



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

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO DE MEDIDORES DE FLUJO
PARA EL CURSO DE MÁQUINAS HIDRÁULICAS**

Carlos Rodrigo Hernández Pérez

Asesorado por el Ing. José Ismael Véliz Padilla

Guatemala, mayo de 2020

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO DE MEDIDORES DE FLUJO
PARA EL CURSO DE MÁQUINAS HIDRÁULICAS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

CARLOS RODRIGO HERNÁNDEZ PÉREZ

ASESORADO POR EL ING. JOSÉ ISMAEL VÉLIZ PADILLA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO

GUATEMALA, MAYO DE 2020

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

| | |
|------------|---------------------------------------|
| DECANA | Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada |
| VOCAL I | Ing. José Francisco Gómez Rivera |
| VOCAL II | Ing. Mario Renato Escobedo Martínez |
| VOCAL III | Ing. José Milton de León Bran |
| VOCAL IV | Br. Christian Moisés de la Cruz Leal |
| VOCAL V | Br. Kevin Armando Cruz Lorente |
| SECRETARIO | Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez |

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

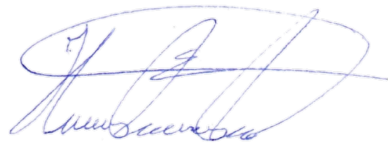
| | |
|------------|--|
| DECANO | Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco |
| EXAMINADOR | Ing. Byron Giovanni Palacios Colindres |
| EXAMINADOR | Ing. Víctor Manuel Ruiz Hernández |
| EXAMINADOR | Ing. Esdras Feliciano Miranda Orozco |
| SECRETARIA | Inga. Lesbia Magalí Herrera López |

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO DE MEDIDORES DE FLUJO PARA EL CURSO DE MÁQUINAS HIDRÁULICAS

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



Carlos Rodrigo Hernández Pérez

Guatemala, 12 de noviembre de 2019

Ingeniero
Roberto Guzman Ortiz
Director de Escuela de Ingeniería Mecánica
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Señor director:

Por este medio me dirijo a usted, para informar que he llevado a cabo la revisión final del trabajo de graduación titulado, "DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO DE MEDIDORES DE FLUJO PARA EL CURSO DE MÁQUINAS HIDRÁULICAS", desarrollado por el estudiante Carlos Rodrigo Hernández Pérez, quien se identifica con número de DPI: 2740627980501 y registro académico 201314169.

El trabajo se ha desarrollado de acuerdo con el programa y los objetivos iniciales planteados y considero que llena los requisitos para ser aprobado como trabajo de graduación.

Finalmente, considero importante resaltar la utilidad que el trabajo tendrá como apoyo a los estudiantes de la carrera de Ingeniería Mecánica en el curso de Máquinas Hidráulicas.

Agradeciendo la atención a la presente aprovecho la oportunidad de suscribirme de usted.

Atentamente.



Ing. José Ismael Veliz Padilla

Ingeniero Mecánico

Colegiado: 3646

JOSÉ ISMAEL VÉLIZ PADILLA

INGENIERO MECÁNICO

COLEGIADO 3646



USAC

TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Mecánica

Ref.E.I.M.277.2019

El Coordinador del Área Complementaria de la Escuela de Ingeniería Mecánica, luego de conocer el dictamen del Asesor y habiendo revisado en su totalidad el trabajo de graduación titulado: **DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO DE MEDIDORES DE FLUJO PARA EL CURSO DE MÁQUINAS HIDRÁULICAS** presentado por el estudiante **Carlos Rodrigo Hernández Pérez**, CUI **2740627980501** y Reg. Académico No. **201314169** recomienda su aprobación.

"Id y Enseñad a Todos"

Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez
Coordinador Área Complementaria
Escuela de Ingeniería Mecánica



Guatemala, noviembre 2019



USAC

TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

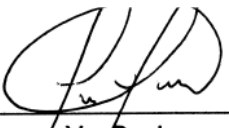
Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Mecánica

Ref.EIM.137.2020

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y con la aprobación del Coordinador del Área Complementaria, al trabajo de graduación titulado: **DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO DE MEDIDORES DE FLUJO PARA EL CURSO DE MÁQUINAS HIDRÁULICAS** del estudiante **Carlos Rodrigo Hernández Pérez**, DPI **2740627980501**, Reg. Académico **201314169** y luego de haberlo revisado en su totalidad, procede a la autorización del mismo.

"Id y Enseñad a Todos"


Vo.Bo. Ing.



Ing. Gilberto Enrique Morales Baiza
Director
Escuela de Ingeniería Mecánica

Guatemala, octubre de 2020

/aej



DTG. 288.2020.

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO DE MEDIDORES DE FLUJO PARA EL CURSO DE MÁQUINAS HIDRÁULICAS**, presentado por el estudiante universitario: **Carlos Rodrigo Hernández Pérez**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

inga. Anabela Cordova Estrada
Decana



Guatemala, octubre de 2020

AACE/asga

ACTO QUE DEDICO A:

Dios

Quien me inspiró para la realización de este estudio, por darme sabiduría y bendición para alcanzar mis metas como persona y como profesional.

Mis padres

Carlos Hernández y Luz Aida Pérez. Su amor será siempre mi inspiración.

Mi familia

Por brindarme su apoyo a lo largo de mi trayectoria.

AGRADECIMIENTOS A:

| | |
|---|---|
| Dios | Por haberme dado la oportunidad de realizar el presente estudio. |
| Universidad de San Carlos de Guatemala | Por ayudarme en mi formación profesional. |
| Facultad de Ingeniería | Por haber colaborado en mi formación académica. |
| Escuela de Ingeniería Mecánica | Por darme las herramientas técnicas y científicas para la realización del presente estudio. |
| Ing. José Véliz | Por el asesoramiento y conocimientos. |
| Ing. Carlos Pérez | Por su asesoramiento en la estructuración del trabajo de graduación. |

ÍNDICE GENERAL

| | |
|--|--------|
| ÍNDICE DE ILUSTRACIONES | XIII |
| LISTA DE SÍMBOLOS | XXI |
| GLOSARIO..... | XXV |
| RESUMEN..... | XXIX |
| OBJETIVOS | XXXI |
| INTRODUCCIÓN..... | XXXIII |
| | |
| 1. ANTECEDENTES | 1 |
| 1.1. Flujo de fluidos | 1 |
| 1.2. Clasificación de los fluidos..... | 3 |
| 1.2.1. Estado de materia..... | 4 |
| 1.2.2. Viscosidad y su esfuerzo cortante..... | 4 |
| 1.2.3. Densidad..... | 5 |
| 1.3. Aplicaciones de medición de fluidos | 6 |
| 1.4. Mercado de equipos de medición de flujo..... | 7 |
| 1.5. Historia de la evolución de la mecánica de fluidos y de los medidores de flujo | 10 |
| 1.5.1. Antigüedad y principios | 10 |
| 1.5.2. Estudios iniciales sobre hidráulica e hidrodinámica..... | 11 |
| 1.5.3. Teoría contemporánea: nacimiento de la Mecánica de Fluidos | 17 |
| 1.5.4. Avances recientes..... | 18 |
| 1.6. Antecedentes de estudios de medidores de flujos | 21 |

| | | |
|------------|--|----|
| 2. | MARCO TEÓRICO | 29 |
| 2.1. | Conceptos fundamentales de fluidos..... | 29 |
| 2.1.1. | Fluido | 29 |
| 2.1.2. | Caudal o Flujo | 30 |
| 2.1.3. | Velocidad | 31 |
| 2.1.4. | Viscosidad | 32 |
| 2.1.4.1. | Fluido newtonianos y no newtonianos . | 34 |
| 2.1.4.2. | Viscosidad cinemática | 35 |
| 2.1.5. | Compresibilidad..... | 36 |
| 2.1.6. | Densidad | 37 |
| 2.1.7. | Volumen específico | 37 |
| 2.1.8. | Peso específico | 38 |
| 2.1.9. | Presión | 38 |
| 2.1.9.1. | Presión manométrica y absoluta | 39 |
| 2.1.9.2. | Manómetros..... | 41 |
| 2.1.9.2.1. | Manómetro de dos ramas abiertas | 41 |
| 2.1.9.2.2. | Tubo de Bourdon | 42 |
| 2.1.10. | Presión de vapor y cavitación | 42 |
| 2.1.11. | Tensión superficial..... | 43 |
| 2.2. | Ecuaciones básicas y conceptos de flujo de fluidos | 44 |
| 2.2.1. | Introducción al movimiento de los fluidos | 44 |
| 2.2.1.1. | Descripción del movimiento | 44 |
| 2.2.1.1.1. | Descripción euleriana del movimiento..... | 45 |
| 2.2.1.1.2. | Descripción lagrangiana del movimiento | 45 |
| 2.2.1.2. | Campo de velocidades | 46 |

| | | | |
|--------|----------|--|----|
| | 2.2.1.3. | Campo de aceleraciones..... | 48 |
| | 2.2.1.4. | Campo rotacional | 49 |
| | 2.2.1.5. | Campo de flujo | 50 |
| 2.2.2. | | Fenómenos y tipos de flujos..... | 52 |
| | 2.2.2.1. | Flujo potencial | 52 |
| | 2.2.2.2. | Flujo estacionario y no estacionario | 53 |
| | 2.2.2.3. | Flujo uniforme y no uniforme | 55 |
| | 2.2.2.4. | Flujos unidimensionales, bidimensionales y tridimensionales..... | 56 |
| | 2.2.2.5. | Flujo laminar, de transición y turbulento | 57 |
| | 2.2.2.6. | Flujo incompresible y compresible..... | 58 |
| | 2.2.2.7. | Flujo rotacional e irrotacional..... | 59 |
| | 2.2.2.8. | Concepto general de flujo volumétrico | 60 |
| 2.2.3. | | Análisis del volumen de control finito | 62 |
| | 2.2.3.1. | Ecuación de continuidad | 64 |
| | | 2.2.3.1.1. Ley de conservación de la materia | 64 |
| | | 2.2.3.1.2. Dedución de la ecuación de continuidad..... | 64 |
| | 2.2.3.2. | Ecuaciones de la cantidad de movimiento lineal y de momento de la cantidad de movimiento | 68 |
| | | 2.2.3.2.1. Segunda ley de Newton..... | 68 |
| | | 2.2.3.2.2. Dedución de la ecuación de cantidad de movimiento lineal..... | 69 |

| | | | |
|--------|------------|--|-----|
| | 2.2.3.2.3. | Deducción de la ecuación de momento de la cantidad de movimiento | 71 |
| | 2.2.3.3. | Ecuación de la energía | 74 |
| | 2.2.3.3.1. | Primera ley de la termodinámica | 75 |
| | 2.2.3.3.2. | Ecuación de la energía . | 75 |
| | 2.2.3.3.3. | Segunda ley de la termodinámica | 77 |
| 2.2.4. | | Ecuación de Bernoulli | 78 |
| | 2.2.4.1. | Línea de energía..... | 82 |
| | 2.2.4.2. | Línea piezométrica | 83 |
| 2.2.5. | | Ecuación general de la energía | 84 |
| | 2.2.5.1. | Pérdidas de energía | 86 |
| | 2.2.5.2. | Ecuación de energía en flujo uniforme continuo | 87 |
| 2.3. | | Regímenes de flujo | 89 |
| | 2.3.1. | Capa límite y rugosidad superficial | 89 |
| | 2.3.2. | Número de Reynolds..... | 94 |
| | 2.3.2.1. | Diámetro equivalente..... | 96 |
| | 2.3.2.2. | Radio hidráulico | 96 |
| | 2.3.3. | Flujo laminar y turbulento | 97 |
| | 2.3.4. | Flujo de transición | 98 |
| 2.4. | | Tuberías y formas de transporte de fluidos | 98 |
| | 2.4.1. | Tamaños | 99 |
| | 2.4.2. | Valores recomendados de diseño | 100 |
| | 2.4.3. | Tuberías de termoplásticos | 101 |
| | 2.4.4. | Tuberías de metal..... | 102 |

| | | | |
|------|---------------------------|---|-----|
| | 2.4.4.1. | Tuberías de cobre y aleaciones | 103 |
| | 2.4.4.2. | Tuberías de acero negro y galvanizado..... | 105 |
| | 2.4.4.3. | Tuberías de acero inoxidable | 107 |
| | 2.4.5. | Canales..... | 108 |
| | 2.4.6. | Mangueras..... | 108 |
| 2.5. | Bombas | | 109 |
| | 2.5.1. | Tipos de bombas | 109 |
| | 2.5.2. | Bombas centrífugas | 111 |
| | 2.5.2.1. | Partes de una bomba centrífuga | 112 |
| | 2.5.2.2. | Tamaño..... | 114 |
| | 2.5.2.3. | Sentido de rotación | 114 |
| | 2.5.3. | Bombas periféricas | 115 |
| | 2.5.4. | Características de rendimiento de una bomba | 117 |
| | 2.5.5. | Cabeza neta de succión positiva y cavitación | 119 |
| | 2.5.5.1. | Cavitación | 119 |
| | 2.5.5.2. | Cabeza neta de succión positiva..... | 120 |
| | 2.5.6. | Leyes de afinidad de bombas centrífugas | 121 |
| | 2.5.7. | Parámetros implicados en la selección de una bomba..... | 125 |
| | 2.5.8. | Punto de operación de una bomba | 130 |
| 2.6. | Pérdidas de energía | | 131 |
| | 2.6.1. | Pérdidas por fricción | 131 |
| | 2.6.1.1. | Ecuación de Darcy | 132 |
| | 2.6.1.2. | Factor de fricción..... | 133 |
| | 2.6.1.2.1. | Pérdidas en flujo turbulento | 133 |
| | 2.6.1.3. | Pérdidas en tuberías de secciones no circulares..... | 136 |

| | | | | |
|--------|----------|--|---|-----|
| | 2.6.1.4. | Ecuación de Hazen-Williams | 137 | |
| 2.6.2. | | Pérdidas por forma | 138 | |
| | 2.6.2.1. | Codos de tuberías | 140 | |
| | | 2.6.2.1.1. | Flujo secundario | 140 |
| | | 2.6.2.1.2. | Resistencia de las curvas..... | 141 |
| | | 2.6.2.1.3. | Codos estándar | 143 |
| | 2.6.2.2. | Contracción y expansión súbita | 143 | |
| | 2.6.2.3. | Contracción y expansión gradual..... | 145 | |
| | 2.6.2.4. | Válvulas | 146 | |
| | | 2.6.2.4.1. | Válvulas de compuerta | 146 |
| | | 2.6.2.4.2. | Válvulas de globo | 148 |
| | | 2.6.2.4.3. | Válvulas de cheque o retención de disco oscilante | 149 |
| | | 2.6.2.4.4. | Válvulas de pie con filtro o pichancha..... | 151 |
| | | 2.6.2.4.5. | Válvulas de bola o esfera | 153 |
| | 2.6.2.5. | Pérdida en diversos accesorios | 154 | |
| | | 2.6.2.5.1. | Conexiones estándar en T | 154 |
| | | 2.6.2.5.2. | Salidas de tubería a tanques..... | 155 |
| | | 2.6.2.5.3. | Entradas de flujo de tanque a tubería..... | 156 |
| 2.7. | | Flujo de fluidos en canales | 158 | |
| | 2.7.1. | Características generales del flujo en un canal..... | 158 | |
| | 2.7.2. | Ondas superficiales | 160 | |

| | | |
|----------|---|-----|
| 2.7.3. | Consideraciones de energía | 161 |
| 2.7.3.1. | Energía hidráulica total en canales..... | 161 |
| 2.7.3.2. | Energía específica | 163 |
| 2.7.4. | Tipos de flujos..... | 164 |
| 2.7.5. | Flujo en un canal de profundidad uniforme | 168 |
| 2.7.5.1. | Flujo estable uniforme | 169 |
| 2.7.5.2. | Geometría de los canales más comunes | 171 |
| 2.7.5.3. | Las ecuaciones de Chezy y Manning . | 174 |
| 2.7.6. | Flujo de variación rápida | 179 |
| 2.7.6.1. | Salto hidráulico..... | 180 |
| 2.7.6.2. | Vertederos de pared delgada | 182 |
| 2.8. | Tipos de medidores de flujo | 183 |
| 2.8.1. | Factores para la selección de medidores de flujo.. | 183 |
| 2.8.2. | Medidores de carga variable | 187 |
| 2.8.2.1. | Medidor de Venturi..... | 187 |
| 2.8.2.2. | Medidor de orificio | 191 |
| 2.8.3. | Medidores de área variable | 192 |
| 2.8.4. | Fluxómetro de turbina | 197 |
| 2.8.5. | Fluxómetro de remolino y vórtice | 199 |
| 2.8.6. | Fluxómetro magnético..... | 202 |
| 2.8.7. | Medidores de ranura | 205 |
| 2.8.8. | Medidores de flujo de masa térmicos | 206 |
| 2.8.9. | Medidores de flujo en canales abiertos | 207 |
| 2.8.9.1. | Vertedero rectangular con contracciones laterales..... | 209 |
| 2.8.9.2. | Vertedero triangular..... | 212 |
| 2.8.9.3. | Vertedero trapezoidal | 215 |
| 2.8.9.4. | Vertedero circular | 217 |

| | | |
|-------------|--|-----|
| 2.9. | Marco legal y normativo de equipo de medición de flujo de fluidos..... | 219 |
| 3. | METODOLOGÍA..... | 223 |
| 3.1. | Fase de diseño..... | 223 |
| 3.1.1. | Determinación de variables de operación..... | 223 |
| 3.1.1.1. | Delimitación de campo de estudio | 226 |
| 3.1.1.2. | Recursos humanos disponibles | 226 |
| 3.1.1.3. | Recursos materiales disponibles | 226 |
| 3.1.1.4. | Materiales e insumos..... | 227 |
| 3.1.1.5. | Máquinas y herramientas..... | 233 |
| 3.1.1.6. | Recursos generales..... | 234 |
| 3.1.1.7. | Caudal estimado de operación | 236 |
| 3.1.1.8. | Temperatura | 236 |
| 3.1.1.9. | Régimen de flujo de operación | 236 |
| 3.1.1.10. | Propiedades de tuberías y accesorios | 237 |
| 3.1.1.10.1. | Rugosidad | 237 |
| 3.1.1.10.2. | Resistencia a la corrosión..... | 237 |
| 3.1.1.11. | Diseño preliminar para determinar longitudes de tubería | 238 |
| 3.1.1.12. | Tamaño de tubería y velocidad de flujo..... | 240 |
| 3.1.2. | Selección de bomba hidráulica | 243 |
| 3.1.2.1. | Determinación de Carga Dinámica Total (CDT)..... | 244 |
| 3.1.2.1.1. | Cálculo de pérdidas por fricción | 247 |

| | | | |
|--------|------------|--|-----|
| | 3.1.2.1.2. | Cálculo de pérdidas por forma..... | 250 |
| | 3.1.2.2. | Determinación de la potencia necesaria para la bomba | 256 |
| 3.1.3. | | Selección de materiales | 256 |
| | 3.1.3.1. | Tipo de tubería | 257 |
| | 3.1.3.2. | Accesorios utilizados | 258 |
| | 3.1.3.3. | Manómetros y vacuómetros | 265 |
| | 3.1.3.4. | Suministros eléctricos | 267 |
| | 3.1.3.5. | Acero, perfiles y tubos para soporte ... | 271 |
| | 3.1.3.6. | Pinturas, adhesivos y recubrimientos . | 272 |
| | 3.1.3.7. | Empaques | 274 |
| 3.1.4. | | Planos mecánicos y modelo en 3D | 274 |
| 3.1.5. | | Planos eléctricos | 304 |
| 3.1.6. | | Planos de soldadura | 306 |
| 3.1.7. | | Selección de medidores de flujo | 321 |
| | 3.1.7.1. | Rotámetro | 323 |
| | 3.1.7.2. | Medidor de turbina digital | 325 |
| 3.1.8. | | Diseño de medidores de flujo..... | 328 |
| | 3.1.8.1. | Medidor de placa de orificio..... | 328 |
| | 3.1.8.2. | Medidor de Venturi..... | 330 |
| | 3.1.8.3. | Vertederos | 331 |
| 3.1.9. | | Resumen de parámetros de diseño | 335 |
| 3.2. | | Fase de construcción..... | 336 |
| | 3.2.1. | Metalmecánica..... | 336 |
| | 3.2.2. | Soldadura MMA con arco eléctrico..... | 338 |
| | 3.2.3. | Aplicación de pintura, revestimientos y resinas epóxicas..... | 339 |
| | 3.2.4. | Corte y ensamblaje de tubería de PVC | 341 |

| | | |
|----------|--|-----|
| 3.2.5. | Armado de circuito eléctrico | 341 |
| 3.2.6. | Montaje de tubería, accesorios y medidores de flujo..... | 342 |
| 4. | RESULTADOS | 345 |
| 4.1. | Fase de validación | 345 |
| 4.1.1. | Prueba de fugas | 345 |
| 4.1.2. | Pruebas eléctricas | 346 |
| 4.1.3. | Calibración de medidor de turbina | 349 |
| 4.1.4. | Calibración de medidor de Venturi..... | 352 |
| 4.1.5. | Calibración del medidor de orificio | 356 |
| 4.1.6. | Calibración de medidor de ranura..... | 360 |
| 4.1.7. | Calibración de medidores de vertedero | 364 |
| 4.1.7.1. | Calibración de vertedero con compuerta triangular | 364 |
| 4.1.7.2. | Calibración de vertedero con compuerta trapezoidal | 368 |
| 4.1.7.3. | Calibración de vertedero con compuerta rectangular | 372 |
| 4.1.8. | Formulario para toma de datos..... | 376 |
| 4.2. | Manual de operación..... | 378 |
| 4.2.1. | Procedimiento de encendido | 378 |
| 4.2.2. | Procedimiento de apagado..... | 379 |
| 4.2.3. | Mantenimiento de tubería | 379 |
| | CONCLUSIONES | 383 |
| | RECOMENDACIONES | 387 |
| | BIBLIOGRAFÍA..... | 389 |
| | APÉNDICES | 399 |

ANEXO.....445

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

| | | |
|-----|---|----|
| 1. | Medidores de flujo industrial y su uso..... | 10 |
| 2. | Tubo de Pitot..... | 15 |
| 3. | Permeámetro | 16 |
| 4. | Visualización para el flujo de una válvula de mariposa..... | 21 |
| 5. | Diagrama reológico | 35 |
| 6. | Manómetro de dos ramas abiertas | 41 |
| 7. | Vector posición r como una función vectorial del tiempo | 47 |
| 8. | Líneas de trayectoria bajo una ola en un tanque de agua | 50 |
| 9. | Líneas fugaces en el flujo discontinuo alrededor de un cilindro | 51 |
| 10. | Línea de corriente en un campo de flujo | 51 |
| 11. | Flujo estacionario | 53 |
| 12. | Flujo no estacionario | 54 |
| 13. | Flujo uniforme | 55 |
| 14. | Flujo no uniforme | 56 |
| 15. | Flujo unidimensional en un tubo | 57 |
| 16. | Flujo rotación e irrotacional | 59 |
| 17. | Descripción de flujo volumétrico | 60 |
| 18. | Coincidencia de un sistema y un volumen de control | 65 |
| 19. | Flujo en un tubo | 67 |
| 20. | Partícula desplazándose a lo largo de una línea de corriente | 79 |
| 21. | Balance de energía para dos puntos de un flujo | 83 |
| 22. | Concepto de capa límite..... | 90 |

| | | |
|-----|---|-----|
| 23. | Región de entrada, flujo en desarrollo y flujo totalmente desarrollado en un sistema de tubería | 91 |
| 24. | Zonas de la capa límite..... | 93 |
| 25. | Velocidad de fluidos en tuberías | 100 |
| 26. | Límites de temperatura para tubería termoplástica | 102 |
| 27. | Tubo de cobre para agua. Tipos K, L, M (ASTM B88) | 104 |
| 28. | Clasificación de las bombas según Hydraulic Institute | 110 |
| 29. | Partes de una bomba centrífuga..... | 113 |
| 30. | Designación de una bomba centrífuga..... | 114 |
| 31. | Bomba periférica de una etapa | 116 |
| 32. | Esquema para determinar el aumento de carga ganado por un fluido que circula a través de una bomba | 118 |
| 33. | Curvas de características de una bomba | 131 |
| 34. | Diagrama de Moody | 134 |
| 35. | Flujo secundario | 140 |
| 36. | Valores del factor de fricción para tuberías comerciales, nuevas, de acero, con flujo en la zona de total turbulencia | 142 |
| 37. | Contracción y expansión súbita en una tubería | 144 |
| 38. | Contracción gradual..... | 145 |
| 39. | Válvulas de compuerta de cuña, de doble obturados o tipo macho (cónico)..... | 147 |
| 40. | Válvula de globo | 149 |
| 41. | Válvula de disco oscilante recta..... | 150 |
| 42. | Válvula de disco oscilante curva | 151 |
| 43. | Válvulas de pie | 152 |
| 44. | Válvula de bola | 153 |
| 45. | T estándar | 155 |
| 46. | Salidas de tuberías | 156 |
| 47. | Coeficientes de resistencia de para entradas | 157 |

| | | |
|-----|--|-----|
| 48. | Geometría de un canal..... | 161 |
| 49. | Flujo uniforme en un canal..... | 170 |
| 50. | Elementos geométricos de un canal..... | 172 |
| 51. | Elementos geométricos de las secciones más comunes..... | 173 |
| 52. | Coeficientes de rugosidad..... | 175 |
| 53. | Ecuaciones para el cálculo del factor de fricción C de Chezy..... | 176 |
| 54. | Salto hidráulico..... | 180 |
| 55. | Tubo de Venturi contemporáneo..... | 188 |
| 56. | Coeficiente de flujo K contra el número de Reynolds de orificios, toberas y medidores de Venturi..... | 190 |
| 57. | Medidor de orificio de placa delgada..... | 191 |
| 58. | Rotámetro..... | 195 |
| 59. | Medidor de turbina..... | 198 |
| 60. | Medidor de flujo por remolino..... | 201 |
| 61. | Medidor de flujo vórtex..... | 202 |
| 62. | Medidor magnético..... | 204 |
| 63. | Vertedero de pared delgada de forma general..... | 208 |
| 64. | Vertedero rectangular con contracciones laterales..... | 210 |
| 65. | Vertedero triangular..... | 213 |
| 66. | Vertedero trapezoidal..... | 216 |
| 67. | Esquema 3D preliminar del equipo de medidores de flujo..... | 238 |
| 68. | Esquema para análisis de energía hidráulica entre lo puntos 1 y 2.... | 245 |
| 69. | Determinación de los coeficientes de descarga del medidor de orificio y de Venturi..... | 255 |
| 70. | Matriz de evaluación de tuberías..... | 257 |
| 71. | Codo estándar acero galvanizado 90 grado rosca NPT..... | 258 |
| 72. | Unión universal acero galvanizado rosca hembra 1 pulgada NPT..... | 259 |
| 73. | Copla acero galvanizado 1 pulgada rosca hembra NPT..... | 259 |

| | | |
|-----|--|-----|
| 74. | Reductor concéntrico tipo campana de acero galvanizado de $\frac{3}{4}$ a $\frac{1}{4}$ pulgada rosca hembra NPT | 260 |
| 75. | Válvula de globo de 1 pulgada rosca hembra NPT de bronce | 261 |
| 76. | Válvula PVC de bola 1 pulgada con rosca hembra NPT | 261 |
| 77. | Copla de $\frac{1}{4}$ pulgada de diámetro acero inoxidable AISI 304 rosca hembra NPT | 262 |
| 78. | Codo PVC 90 ° de 1 pulgada sin rosca..... | 263 |
| 79. | Adaptador macho PVC de 1 pulgada rosca NPT | 263 |
| 80. | Adaptador hembra PVC de 1 pulgada rosca NPT | 264 |
| 81. | Tapón hembra PVC de 1 pulgada sin rosca | 264 |
| 82. | Manómetro Bourdon | 265 |
| 83. | Vacuómetro | 266 |
| 84. | Luces led piloto color rojo y verde de 110 V | 267 |
| 85. | Medidor de voltaje análogo..... | 267 |
| 86. | Medidor de corriente alterna análogo | 268 |
| 87. | Botón de paro de emergencia para panel..... | 268 |
| 88. | Interruptor metálico de palanca 10 amperios para panel | 269 |
| 89. | Bomba centrífuga Truper $\frac{3}{4}$ HP | 269 |
| 90. | Curva de rendimiento de bomba centrífuga Truper de $\frac{3}{4}$ HP | 270 |
| 91. | Gabinete metálico con placa Argos 300 x 300 x 150 mm Protección IP66..... | 271 |
| 92. | Tubo cuadrado chapa 18 de 2 pulgadas..... | 272 |
| 93. | Lamina lisa acero negro 1/8 pulgadas | 272 |
| 94. | Cinta de teflón $\frac{3}{4}$ pulgada | 274 |
| 95. | Vista 3D perspectiva frontal 1 | 278 |
| 96. | Vista 3D perspectiva frontal 2 | 279 |
| 97. | Vista 3D perspectiva frontal 3 | 280 |
| 98. | Vista 3D perspectiva lateral 1 | 281 |
| 99. | Vista 3D perspectiva lateral 2 | 282 |

| | | |
|------|--|-----|
| 100. | Vista 3D perspectiva trasera | 283 |
| 101. | Vista 3D perspectiva planta..... | 284 |
| 102. | Vista 2D frontal (elevación 1) | 285 |
| 103. | Vista 2D trasera (elevación 2) | 286 |
| 104. | Vista 2D lateral (elevación 3)..... | 287 |
| 105. | Vista 2D lateral (elevación 4)..... | 288 |
| 106. | Vista 2D planta..... | 289 |
| 107. | Plano frontal (elevación 1) acotado | 290 |
| 108. | Plano trasero (elevación 2) acotado | 291 |
| 109. | Plano lateral (elevación 3) acotado | 292 |
| 110. | Plano lateral (elevación 4) acotado | 293 |
| 111. | Plano de planta acotado..... | 294 |
| 112. | Plano estructural de soporte tubería..... | 295 |
| 113. | Plano estructural de soporte de canal | 296 |
| 114. | Plano estructural de canal..... | 297 |
| 115. | Plano estructural soporte de vertedero..... | 298 |
| 116. | Plano de vertedero triangular | 299 |
| 117. | Plano de vertedero de Cipolletti | 300 |
| 118. | Plano de vertedero rectangular | 301 |
| 119. | Plano estructural de depósito | 302 |
| 120. | Plano estructural de tubería | 303 |
| 121. | Plano eléctrico del equipo | 305 |
| 122. | Simbología de soldadura para un plano | 306 |
| 123. | Simbología de diferentes tipos de soldeo | 307 |
| 124. | Dimensiones por indicar en un plano de soldadura | 308 |
| 125. | Ejemplo de simbología de soldeo..... | 309 |
| 126. | Plano de soldadura del soporte de tubería vista frontal | 310 |
| 127. | Plano de soldadura del soporte de tubería vista planta | 311 |
| 128. | Plano de soldadura del soporte de tubería vista elevación..... | 312 |

| | | |
|------|---|-----|
| 129. | Plano de soldadura de soporte del canal vista frontal | 313 |
| 130. | Plano de soldadura de soporte del canal vista planta | 314 |
| 131. | Plano de soldadura de soporte del canal vista elevación | 315 |
| 132. | Plano de soldadura del canal vista planta | 316 |
| 133. | Plano de soldadura del canal vista elevación 1 | 317 |
| 134. | Plano de soldadura del canal vista elevación 2 | 318 |
| 135. | Plano de soldadura del depósito vista planta | 319 |
| 136. | Plano de soldadura del depósito vista frontal | 320 |
| 137. | Rotámetro seleccionado | 324 |
| 138. | Especificación técnica de las dimensiones del rotámetro | 325 |
| 139. | Medidor de turbina K24 | 326 |
| 140. | Especificación de las dimensiones del medidor K24 | 327 |
| 141. | Plano de medidor de placa de orificio | 329 |
| 142. | Elemento primario de Venturi | 330 |
| 143. | Coeficiente de descarga según Kindsvater y Carter | 333 |
| 144. | Plano de cortes y dobleces de canal | 336 |
| 145. | Plano de cortes y dobleces del tanque de almacenamiento de agua | 338 |
| 146. | Errores absolutos del medidor de turbina | 350 |
| 147. | Regresión lineal del error absoluto de flujo volumétrico de medidor de turbina | 351 |
| 148. | Logaritmo natural del flujo volumétrico versus el logaritmo natural del diferencial de presión para medidor de Venturi | 353 |
| 149. | Flujo volumétrico versus diferencial de presión para medidor de Venturi utilizando el modelo matemático determinado | 356 |
| 150. | Logaritmo natural del flujo volumétrico versus el logaritmo natural del diferencial de presión para medidor de placa de orificio | 359 |
| 151. | Flujo volumétrico versus diferencial de presión para medidor de orificio utilizando el modelo matemático determinado | 360 |

| | | |
|------|--|-----|
| 152. | Valores promedio de flujo volumétrico versus la carga para el medidor de flujo de ranura | 362 |
| 153. | Flujo volumétrico versus carga para medidor de ranura utilizando el modelo matemático determinado | 363 |
| 154. | Logaritmo natural del flujo volumétrico versus el logaritmo natural de la carga para medidor de vertedero triangular en canal abierto..... | 366 |
| 155. | Flujo volumétrico versus carga para vertedero triangular utilizando el modelo matemático determinado | 368 |
| 156. | Logaritmo natural del flujo volumétrico versus el logaritmo natural de la carga para medidor de vertedero trapezoidal en canal abierto | 370 |
| 157. | Flujo volumétrico versus carga para vertedero trapezoidal utilizando el modelo matemático determinado..... | 372 |
| 158. | Logaritmo natural del flujo volumétrico versus el logaritmo natural de la carga para medidor de vertedero rectangular en canal abierto | 374 |
| 159. | Flujo volumétrico versus carga para vertedero rectangular utilizando el modelo matemático determinado..... | 376 |

TABLAS

| | | |
|-------|--|-----|
| I. | Partes de una bomba centrífuga | 112 |
| II. | Valores de n para ecuación de Manning | 177 |
| III. | Clasificación de los saltos hidráulicos | 181 |
| IV. | Fórmulas para calcular el coeficiente μ | 211 |
| V. | Fórmulas experimentales para determinar coeficientes de flujo volumétrico a vertederos triangulares..... | 214 |
| VI. | Coeficiente ϕ | 218 |
| VII. | Valores fijos en el proceso de diseño | 224 |
| VIII. | Variables independientes de la investigación | 225 |
| IX. | Variables dependientes de la investigación..... | 225 |

| | | |
|---------|--|-----|
| X. | Fluidos de operación | 226 |
| XI. | Materiales | 227 |
| XII. | Herramientas y máquinas | 233 |
| XIII. | Recursos generales | 235 |
| XIV. | Recursos tecnológicos..... | 236 |
| XV. | Velocidades recomendadas para flujos en tuberías..... | 241 |
| XVI. | Características de diseño del equipo | 243 |
| XVII. | Valores de longitud equivalente de distintos accesorios de tubería ... | 251 |
| XVIII. | Codificación de componentes | 275 |
| XIX. | Codificación de componentes eléctricos | 304 |
| XX. | Valores de K_b recomendados por el Institute of Technology by Kindsvater and Carter 1957 | 332 |
| XXI. | Parámetros de diseño..... | 335 |
| XXII. | Valores promedio de flujo volumétrico y diferencial de presión para medidor de Venturi | 352 |
| XXIII. | Valores promedio de flujo volumétrico y diferencial de presión para medidor de placa de orificio | 357 |
| XXIV. | Valores promedio de flujo volumétrico y diferencial de presión para medidor de flujo de ranura | 361 |
| XXV. | Valores promedio de flujo volumétrico y carga para el medidor de vertedero triangular para canal abierto | 365 |
| XXVI. | Valores promedio de flujo volumétrico y carga para el medidor de vertedero trapezoidal para canal abierto..... | 369 |
| XXVII. | Valores promedio de flujo volumétrico y carga para el medidor de vertedero rectangular para canal abierto | 373 |
| XXVIII. | Formato de toma de datos originales..... | 377 |
| XXIX. | Solución de problemas comunes en tuberías | 381 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| Símbolo | Significado |
|----------------|---|
| y | Altura del fluido en un punto específico de un canal |
| h | Altura o carga de un sistema hidráulico |
| Z | Altura o carga potencial desde un punto de referencia |
| A | Amperios, indica cantidad de corriente eléctrica |
| θ | Ángulo |
| A | Área |
| A_m | Área mojada |
| A_t | Área transversal |
| b | Base de vertedero |
| B | Base del canal |
| H_p | Carga de la bomba |
| H_T | Carga de la turbina |
| C_d | Coefficiente de descarga |
| C_H | Coefficiente de rugosidad de Hazen y Williams |
| g | Constante de la aceleración de la gravedad |
| π | Constante de la circunferencia |
| K | Constante de pérdida de energía para un accesorio |
| ρ | Densidad |
| ∂ | Derivada parcial |
| D_e | Diámetro equivalente |
| D | Diámetro mayor |
| d | Diámetro menor |
| $d\mu$ | Diferencial de viscosidad |

| | |
|-----------|--|
| η | Eficiencia |
| E | Energía específica |
| u | Energía interna |
| σ | Esfuerzo |
| τ | Esfuerzo cortante |
| s | Espesor |
| f | Factor de fricción de Darcy |
| \dot{Q} | Flujo de calor |
| \dot{m} | Flujo másico |
| \dot{V} | Flujo volumétrico |
| F | Fuerza |
| F_n | Fuerza normal |
| F_t | Fuerza tangencial |
| Hz | Hercios, indica la frecuencia de corriente eléctrica |
| Δ | Indica incerteza |
| kg | Kilogramo, indica cantidad de materia |
| l | Litro, indica cantidad de volumen |
| L | Longitud |
| L_e | Longitud equivalente |
| m | Masa |
| m | Metro |
| e | Número de Euler |
| Fr | Número de Froude |
| Re | Número de Reynolds |
| Pa | Pascal, indica presión |
| S_o | Pendiente de fondo |
| S_f | Pendiente de fricción |
| S | Pendiente de un canal |

| | |
|---------------|----------------------------------|
| H_L | Pérdidas de energía |
| H_{FF} | Pérdidas de energía por forma |
| H_{LF} | Pérdidas de energía por fricción |
| P_m | Perímetro mojado |
| γ | Peso específico |
| P_F | Potencia al freno |
| P | Presión |
| P_{abs} | Presión absoluta |
| P_{atm} | Presión atmosférica |
| P_{man} | Presión manométrica |
| r | Radio |
| Rh | Radio hidráulico |
| β | Relación de diámetros |
| ε | Rugosidad absoluta |
| ϵ | Rugosidad relativa |
| T | Temperatura |
| t | Tiempo |
| Tr | Torque |
| W | Trabajo |
| \dot{W} | Trabajo de flecha |
| W_{eje} | Trabajo en el eje |
| v | Velocidad |
| c | Velocidad de una onda |
| ν | Viscosidad cinemática |
| μ | Viscosidad dinámica |
| V | Volumen |
| W | Watt, indica cantidad de energía |

GLOSARIO

| | |
|---------------|--|
| AC | Alternating current (corriente alterna) |
| AISI | American Iron and Steel Institute (Instituto Americano del Hierro y el Acero). |
| ASME | American Society of Mechanical Engineers (Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos). |
| ASTM | American Society for Testing and Materials (Sociedad Americana para Pruebas y Materiales). |
| AWS | American Welding Society (Sociedad de Soldadura Americana). |
| Caudal | Cantidad de volumen que circula por unidad de tiempo a través de una sección dada. |
| CPVC | Es un homopolímero de PVC que ha sido sometido a una reacción de cloración. Típicamente, el cloro y el PVC reaccionan de acuerdo con un mecanismo básico de radicales libres, que puede lograrse mediante diversos enfoques que utilizan energía térmica y/o UV. |
| DC | Direct current (corriente directa) |

| | |
|---------------------------|---|
| Espejo de agua | Superficie encerrada por las fronteras de un cuerpo de agua. |
| Fluido | Medio continuo formado por una sustancia entre cuyas moléculas sólo hay una fuerza de atracción débil. La propiedad definitoria es que los fluidos pueden cambiar de forma sin que aparezcan fuerzas restitutivas tendentes a recuperar la forma original. Un fluido es un conjunto de partículas que se mantienen unidas entre sí por fuerzas cohesivas débiles. |
| Flujo de fluidos | Rama de la mecánica que estudia los fluidos de manera estática y dinámica. |
| <i>MMA</i> | Manual Metal Arc (Soldadura Manual de Arco de Metal). Es el tipo de soldadura más común, la característica más importante es que el arco eléctrico se produce entre la pieza y un electrodo metálico recubierto. El recubrimiento protege el interior del electrodo hasta el momento de la fusión. |
| Montaje | Colocación de piezas de un aparato, máquina, o instalación de algún equipo en el sitio adecuado. |
| Número de Froude | Grupo adimensional que muestra la relación de las fuerzas inerciales entre las fuerzas gravitacionales. |
| Número de Reynolds | Grupo adimensional que relaciona las fuerzas de inercia respecto a las fuerzas viscosas de un fluido. |

| | |
|--------------------------|---|
| Placa de orificio | Elemento primario para la medición de flujo, es una lámina plana circular con un orificio concéntrico, excéntrico o segmentado. |
| Presión | Aplicación de una fuerza por unidad de área en sentido perpendicular a la misma. |
| PVC | Policloruro de vinilo es el producto de la polimerización del monómero de cloruro de vinilo. En la industria existen dos tipos de PVC: flexible y rígido. Este último es el utilizado en tuberías para transporte de fluidos. |
| Tubo de Venturi | Pieza de tubería con una disminución gradual de su diámetro hasta una sección estrecha, llamada garganta, ésta produce una disminución de la presión hidrostática, la cual es utilizada para calcular el flujo volumétrico a través de una tubería. |
| Vertedero | Consta de una compuerta por la cual circula un fluido dado con el objeto de medir el flujo volumétrico del mismo. |
| Tabulador | Tecla que se presiona para separar concepto de significado. |

RESUMEN

Este trabajo de graduación se realizó con el objetivo de brindar a los estudiantes del curso de Máquinas Hidráulicas de la carrera de Ingeniería Mecánica, un equipo para el estudio de los distintos tipos de medidores de flujo.

Se diseñó y construyó un equipo de medidores de flujo, con tubería de acero galvanizado de uniones roscadas. El equipo cuenta con un sistema de almacenamiento de agua, un medidor de flujo tipo turbina, un rotámetro, un medidor de Venturi, un medidor de placa de orificio, un medidor de ranura y un canal al que se le puede instalar tres tipos de vertederos.

Se validó el funcionamiento del equipo por medio de la calibración de los medidores de flujo tomando el rotámetro como instrumento patrón. La calibración de los instrumentos es válida para el rango de 10 a 45 litros por minutos, con agua a una temperatura de 25 °C.

Para el transporte de agua, el equipo cuenta con una bomba centrífuga de 0,75 hp de potencia nominal, el control del flujo volumétrico se realizó por medio de una válvula de globo.

Se determinó que el equipo es apto para la medición de fluidos newtonianos de viscosidad similar al agua para una temperatura de 25 °C.

OBJETIVOS

General

Diseñar y construir un equipo de medidores de flujo a escala laboratorio para el curso de Máquinas Hidráulicas, de la carrera de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Específicos

1. Efectuar una revisión bibliográfica de investigaciones realizadas en la temática de medición de flujos.
2. Caracterizar el espacio físico donde se instalar el equipo a diseñar.
3. Realizar una recabar información de los tipos de medidores de flujo, definir cuáles son y los principios de operación de los mismos.
4. Diseñar un equipo de medidores de flujo a escala laboratorio para uso docente.
5. Construir un equipo de medidores de flujo a escala laboratorio para uso docente.
6. Validar la operación del equipo de medidores de flujo.
7. Redactar un manual de operación del equipo de medidores de flujo.

INTRODUCCIÓN

El laboratorio de Máquinas Hidráulicas de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de San Carlos de Guatemala no cuenta con un equipo para el estudio de medidores de flujo. Aunque en la facultad de ingeniería se han realizado diversos estudios para la investigación y calibración de medidores de flujo, actualmente no se tiene un equipo para realización de pruebas de laboratorio.

De acuerdo a esta problemática se plantea diseñar y construir un equipo de medidores de flujo. Por tal motivo se realizó una recopilación de investigaciones realizadas anteriormente bajo la misma temática. Se revisó literatura de medidores de flujo, mecánica de fluidos, instrumentación e hidráulica.

Se diseñó un equipo a escala laboratorio para utilizarlo en el estudio de calibración de medidores y determinación de jerarquía metrológica. Se calcularon las pérdidas por fricción y tipo de tubería, la potencia del equipo de bombeo. Se realizó un análisis de selección de materiales de construcción. El diseño del equipo tiene bases teóricas de flujo de fluidos, balances energéticos y matemática diferencial. También se recurre a modelos empíricos para el cálculo del coeficiente de fricción de Darcy. La técnica de calibración de los medidores de flujo que se utilizó consiste en aplicar regresiones lineales a datos de presión diferencial y carga respectivamente; en función de los valores flujo volumétrico del instrumento patrón.

Se validan los parámetros, procedimientos y rangos de operación de equipo.

1. ANTECEDENTES

En este capítulo se describe la situación actual de los medidores de flujo en la temática de investigación, aplicación industrial, historia y comercialización en el mercado guatemalteco.

1.1. Flujo de fluidos

Desde la antigüedad el ser humano ha tenido la necesidad de transportar fluidos. La materia se encuentra en cualquiera de los tres estados físicos: sólido, líquido o gaseoso; la materia que se encuentra en los estados líquido y gaseoso, la conocemos comúnmente como fluido¹.

De todos los fluidos conocidos el más importante para el ser humano siempre ha sido el agua. Este elemento vital ha servido, sirve y servirá para el desarrollo de la humanidad, por lo que el hombre desde la antigüedad ha tratado de explotar, captar, conducir, distribuir y comercializar este fluido, por tanto, el estudio de los principios que rigen el movimiento de los fluidos ha sido de interés para el ser humano.

Se denomina fluido a un tipo de medio continuo formado por alguna sustancia en cuyas moléculas hay una fuerza de atracción débil. Los fluidos se caracterizan por cambiar de forma sin que existan fuerzas para recuperar la forma original lo cual constituye la principal diferencia con un sólido deformable.

¹ ESCALANTE TRIAY, Eduardo José, GARCÍA SOSA, Jorge y MORALES BURGOS, Armando. *Mecánica de Fluidos antecedentes y actualidad*. p. 1.

Un fluido es un conjunto de partículas que se mantienen unidas entre sí por fuerzas cohesivas débiles y las paredes de un recipiente; el término engloba a los líquidos y gases. Existen características propias de los fluidos por lo cual pueden distinguirse, entre ellas pueden mencionarse:

- **Movimiento no acotado de las moléculas:** son infinitamente deformables, los desplazamientos que un punto material o molécula puede alcanzar en el seno del fluido no están acotados. Esto se debe a que sus moléculas no tienen una posición de equilibrio, como sucede en los sólidos donde la mayoría de las moléculas ejecutan pequeños movimientos alrededor de sus posiciones de equilibrio.
- **Compresibilidad:** todos los fluidos son compresibles en cierto grado. No obstante, los líquidos son altamente incompresibles a diferencia de los gases que son altamente compresibles.
- **Viscosidad:** aunque la viscosidad en los gases es mucho menor que en los líquidos. La viscosidad hace que la velocidad de deformación puede aumentar las tensiones en el seno del medio continuo, es decir, nos permite predecir la velocidad de un fluido y como este afecta al transporte de masa de un lugar a otro, sabiendo que intervienen variables como la densidad, la temperatura y la presión.
- **Distancia molecular grande:** esta es una característica de los fluidos la cual sus moléculas se encuentra separadas a una gran distancia en comparación con los sólidos y esto le permite cambiar muy fácilmente su velocidad debido a fuerzas externas y facilita su compresión.

- Fuerzas de Van der Waals: esta fuerza fue descubierta por el físico holandés Johannes Van der Waals, el físico encontró la importancia de considerar el volumen de las moléculas y las fuerzas intermoleculares y en la distribución de cargas positivas y negativas en las moléculas estableciendo la relación entre presión, volumen y temperatura de los fluidos.
- Ausencia de memoria de forma, es decir, toman del recipiente que lo contengan, sin que existan fuerzas de recuperación elástica como en los sólidas. Debido a su separación molecular los fluidos no poseen una forma definida por tanto no se puede calcular su volumen o densidad a simple vista, para esto se introduce el fluido en un recipiente en el cual toma su forma y así podemos calcular su volumen y densidad, esto facilita su estudio.

Flujo de fluidos o mecánica de fluidos, es la rama de la mecánica que estudia el movimiento de los fluidos: gases y líquidos; así como las fuerzas que lo provocan y su interacción con sustancias sólidas.

1.2. Clasificación de los fluidos

La clasificación de un fluido depende de sus características físicas, es decir, se encuentra que los fluidos se pueden clasificar de acuerdo con el estado de la materia, por el perfil de velocidad que puedan presentar, si es régimen estático o dinámico, de acuerdo con el régimen de flujo, entre otros.

1.2.1. Estado de materia

De acuerdo con el estado de la materia los fluidos se clasifican en:

- Gases: se denomina gas al estado de agregación de la materia en el cual, bajo ciertas condiciones de temperatura y presión, sus moléculas interaccionan solo débilmente entre sí, sin formar enlaces moleculares, adoptando la forma y el volumen del recipiente que las contiene y tendiendo a separarse, esto es, expandirse, todo lo posible por su alta energía cinética. Los gases son fluidos altamente compresibles, que experimentan grandes cambios de densidad con la presión y la temperatura.
- Líquidos: líquido es un estado de agregación de la materia en forma altamente incompresible lo que significa que su volumen es, muy apropiadamente, constante en un rango de presión. Las moléculas de los líquidos no están tan próximas como las de los sólidos, pero están menos separadas que las de los gases. Los líquidos presentan tensión superficial y capilaridad, generalmente se dilatan cuando se enfrían, aunque sometidos a compresión su volumen es muy poco variable a diferencia de lo que sucede con otros fluidos como los gases.

1.2.2. Viscosidad y su esfuerzo cortante

De acuerdo con su viscosidad y a su esfuerzo cortante los fluidos se clasifican en:

- Newtonianos: un fluido newtoniano es un fluido cuya viscosidad puede considerar constante en el tiempo. Los fluidos newtonianos son uno de los

fluidos más sencillos de describir. La curva que muestra la relación entre el esfuerzo o cizalla contra su velocidad de deformación es lineal. El mejor ejemplo de este tipo de fluidos es el agua.

- No newtonianos: un fluido no newtoniano es aquel fluido cuya viscosidad varía con la temperatura y la tensión cortante que se le aplica. Como resultado, un fluido no newtoniano no tiene un valor de viscosidad definido y constante. Como la viscosidad no es suficiente para definir a estos tipos de fluidos es necesario clasificarlos de acuerdo con sus propiedades reológicas, en esta investigación no se considera el estudio de los fluidos no newtonianos por tal motivo no se ahondará más a detalle en el tema.

1.2.3. Densidad

De acuerdo con los cambios de densidad con respecto al tiempo los fluidos pueden clasificarse en:

- Compresibles: son fluidos en los cuales los cambios de densidad de un punto a otro no son despreciables macroscópicamente. Por fuerzas externas o variables termodinámicas, la densidad varía de acuerdo con las condiciones del sistema.
- Incompresibles: un fluido incompresible es aquel en el cual los cambios de densidad de un punto a otro son despreciables, mientras se examinan puntos dentro del campo de flujo.

1.3. Aplicaciones de medición de fluidos

Existen diferentes tipos de aplicación para la medición de un flujo, pero en general diremos que en cualquier lugar donde se utilice un fluido es necesario medir la cantidad que consumimos. Por tal motivo en la operación de plantas productivas, negocios, residenciales, entre otros; debemos medir la cantidad de fluido que entra, sale y que procesamos. En el caso de residencias para cancelar el consumo volumétrico de agua, en empresas o fábricas para controlar procesos, o bien para optimizar los costos de producción.

Las aplicaciones de la medición de flujos se pueden resumir en:

- Control de procesos
- Verificación de consumo
- Optimización de costos

La medición de flujos está presente en muchos campos de trabajo entre ellos los más importantes son:

- Industria de alimentos
- Industria petrolera
- Industria agrícola
- Industria textil
- Industria química
- Industria farmacéutica
- Redes de agua municipal
- Hidroeléctricas
- Mantenimiento e irrigación de jardines
- Medicina

Vemos que la medición de flujos es indispensable para el desarrollo de muchas actividades industriales, sin embargo, no siempre se mide el mismo tipo de fluido, en ciertas ocasiones es necesario medir gases, en otras aplicaciones se miden líquidos. También debe considerarse si los fluidos son viscosos, ácidos, calientes, fríos, inflamables, si son termolábiles, entre otros. Es por ello que existen diferentes tipos de medidores de flujo, sin embargo, este tema será tratado en apartados posteriores, puesto que es necesario comprender su principio de medición para clasificarlos.

1.4. Mercado de equipos de medición de flujo

La industria manufacturera es el sector económico que más emplea medidores de flujo, sin embargo, también está el sector de servicios como las redes de distribución de agua potable y gas donde es necesario medir el gasto volumétrico de fluidos que se realiza.

En Guatemala y Centroamérica, el sector industrial comenzó a desarrollarse a partir de la década de los años cincuenta. Pero fue, sobre todo, en el periodo comprendido entre los años sesenta y ochenta que se logró instalar una determinada capacidad industrial y se logró una importante acumulación de conocimiento tecnológico. Por tanto, el tardío desarrollo de la industria en Guatemala provocó que las únicas empresas formales fueran las manufactureras de productos finales, como lo son alimentos, bebidas, aceites, grasa, jabones, medicamentos, entre otros; muchas de ellas eran fábricas pequeñas con procesos artesanales. Por ello, en el mercado guatemalteco no existen empresas que se dediquen al desarrollo y fabricación de equipos de medición de flujos.

Debido a lo anterior la instrumentación y equipos usados hoy en día en Guatemala son importados al país, los mayores proveedores son empresas de

origen americano y europeo. A continuación, se mencionarán los sectores donde se emplean medidores de flujo y las características de los procesos en los que son empleados.

En las industrias de producción de bebidas y alimentos los medidores de flujo que más se usan son: rotámetros, tipo turbina y ultrasónicos, la principal característica es que los instrumentos utilizados en esta industria deben de ser inoxidable con características sanitarias para permanecer inocuos en los procesos donde serán utilizados.

En la industria farmacéutica deben cumplir con características más exigentes, debido a las normas internacionales de producción de fármacos la mayoría de los equipos e instrumento utilizados en esta industria deben de ser diseñados para esterilizarse, ser inoxidable, o de un material altamente inocuo y fácil de limpiar. Por esta razón los medidores de flujo utilizados en esta industria generalmente son mucho más caros, además que en los departamentos de ingeniería o mantenimiento de las empresas se debe contar con un *stock* de repuestos debido a que en su mayoría son instrumentos de medición que deben de ser importados al país.

En industrias menos exigentes respecto a la inocuidad, como lo son fábricas de fertilizantes, jabones, detergentes, los flujómetros son mucho más baratos y existen distribuidores que cada vez han ido creciendo. En estas industrias los medidores tienen características de ser fabricados en su mayoría de aceros.

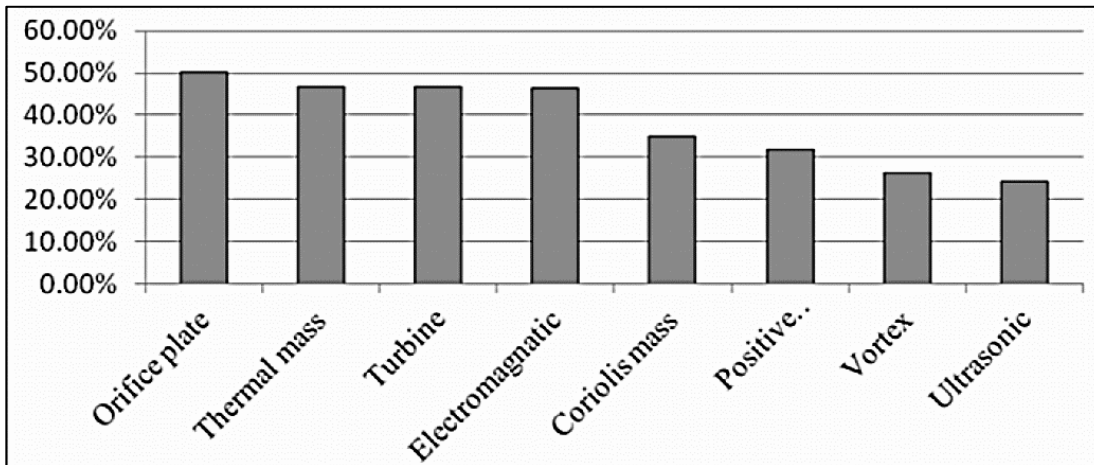
Distinto es el caso de la industria agrícola, donde el mayor uso, es para la medición del riego a los cultivos, en esta industria se hace notable el uso de medidores de menor precisión y mayor incerteza, también de materiales de menor costo como plástico, acero negro y galvanizado. Los medidores de flujo

han demostrado ser excelentes dispositivos para medir el flujo en los campos de riego, ya que se requieren para medir el agua necesaria para evitar daños en los cultivos con exceso de agua e incluso para ahorrar el agua, ya que es un recurso valioso. También tienen el propósito de juzgar las tuberías de irrigación, ya que, los caudales más bajos de lo normal pueden indicar la necesidad de reparación de la bomba o fugas en las tuberías. El flujo se puede medir con el tipo de contacto o el tipo de sensor sin contacto.

En la figura 1 se observa los distintos tipos de medidores de flujo y su porcentaje de uso en la industria. Por la economía, los medidores de placa de orificio actualmente son los más usados, esto también se debe a la exactitud de las mediciones que se pueden realizar. Otro medidor bastante utilizado es el tipo turbina, éste es bastante confiable.

Otro medidor utilizado es el termo-másico, generalmente son más caros y requieren mayor mantenimiento. Este tipo de medidor de flujo se utilizan en procesos industriales y químicos, que van desde la polimerización hasta la elaboración de cerveza, estas industrias dependen del suministro de cantidades precisas de líquidos o gases. Debido a que la medición de flujo másico indica directamente la cantidad de moléculas presentes, tiene la ventaja de ser inmune a la variación de densidad.

Figura 1. **Medidores de flujo industrial y su uso**



Fuente: KAUR, Manjit, LENKA, Hemant, SOOD, Ria. *Diseño y desarrollo de un medidor de flujo automático de agua*. <http://www.academia.edu/download/45446558/33131jcsea06.pdf>. Consulta: 09/01/2019.

1.5. **Historia de la evolución de la mecánica de fluidos y de los medidores de flujo**

El estudio de los fluidos comienza con los griegos y los romanos. La civilización griega tuvo grandes avances en el planteamiento de la estática de los líquidos y la romana en la construcción de sistemas de captación, conducción y distribución de agua en sus ciudades.

1.5.1. **Antigüedad y principios**

El estudio de los fluidos inicia con los planteamientos de Arquímedes (287-212 A.C) para la estática de los líquidos, su gran aporte fue la primera bomba de agua, la que se utiliza hoy en día para diversos procesos industriales, la bomba de tornillo sin fin.

La civilización romana, según consta en los tratados del Sextus Julius Frontinus (40 - 103 D.C.), autor de *aquis urbis Romae*, en relación con las aguas de la Ciudad de Roma, describe el abastecimiento de Roma, así como las leyes relacionadas con su uso; los romanos desarrollaron ampliamente los sistemas de captación, conducción y transporte.

En la edad media los científicos como da Vinci, Mariotte, Pascal, Newton, Euler, Bernoulli, Navier, Darcy, Manning, realizaron grandes aportaciones teóricas y experimentales para el desarrollo de la hidráulica y la hidrodinámica. Ambas disciplinas con aportes teóricos, y la hidráulica con una orientación práctica y aplicada, son los antecedentes de la mecánica de fluidos.

Durante el Renacimiento Leonardo da Vinci (1452 – 1519), formula el principio de continuidad, describió que la velocidad de un flujo varía inversamente proporcional al área de la sección transversal del mismo.

1.5.2. Estudios iniciales sobre hidráulica e hidrodinámica

Evangelista Torricelli (1608 – 1647), fue el primero en demostrar el efecto de la presión en los fluidos, también desarrollo el barómetro.

Edme Mariotte (1620 – 1684), implementó la experimentación con túnel de viento, sus mediciones hidrológicas sobre el río Sena en Francia y sus estudios sobre la elasticidad del aire. En la misma época Blaise Pascal (1623-1662) se interesa en los trabajos de Torricelli sobre la presión atmosférica, clarificando los principios del barómetro y de la distribución de presiones. A partir de este punto el desarrollo de la teoría de los fluidos comenzó a requerir mayor descripción matemática. Un científico de la época, Isaac Newton (1642 – 1727) quien estableció la ley de gravitación universal, realizó diversos experimentos sobre la

resistencia que se presenta en los cuerpos en movimiento, debido a la viscosidad, la inercia y la elasticidad de los fluidos, también descubrió la contracción de los chorros en descarga libre.

Una célebre familia de científicos suizos realizó grandes aportaciones al conocimiento de los fluidos, de los que destacan Johan Bernoulli y su hijo Daniel. Johan, fue un científico que impartió clases en universidades alemanas, donde inspiró a sus estudiantes, el interés hacia el estudio de las matemáticas. Los trabajos más destacados de los Bernoulli fueron realizados en el cálculo exponencial, la trigonometría, la determinación de trayectorias ortogonales, el planteamiento de trabajo virtual. Se cree que Daniel fue el primero en asignar la letra “g” a la aceleración de la gravedad; en 1743, publicó su libro *Hidráulica*.

Daniel Bernoulli fue el segundo hijo de Johan y contemporáneo e íntimo amigo de Leonhard Euler, con quien trabajó en colaboración; aun cuando sus primeros estudios los realizó en medicina, posteriormente se dedicó a las matemáticas y a la física, especialmente a la hidrodinámica, acuñó el término de hidrodinámica por primera vez. Los trabajos más importantes de Daniel Bernoulli fueron presentados en su libro *Hidrodinámica*, publicado en 1738, en él planteaba las bases para un gran número de desarrollos posteriores como la teoría cinética-molecular de los gases y la ley de la conservación de la energía. También trataba a las propiedades básicas de los fluidos, así como la presión, la densidad y la velocidad en diversos conductos y establecía las relaciones fundamentales para enunciar la ecuación, conocida como de Bernoulli, aunque no la declara en forma explícita.

Juntamente con Euler, fueron los primeros científicos en interesarse por el flujo sanguíneo. Para investigarlo realizaron experimentos en los que perforaban pequeños orificios en las paredes de tuberías con extremos abiertos y observaron

que la altura que alcanza el fluido de la tubería estaba relacionada con la presión. Johan desarrolló diversos estudios sobre el movimiento de los músculos, en los que debe destacar la aplicación del cálculo diferencial a problemas biológicos; por lo anterior, tanto Johan como Daniel Bernoulli son considerados como pioneros en los campos de la hemodinámica y la mecánica muscular.

Leonhard Euler (1707 – 1783), suizo de nacimiento, fue uno de los escritores más prolíficos en el campo de las matemáticas de esa época; fue alumno de Johan Bernoulli y amigo de Daniel Bernoulli. Aunque sus aportaciones principales fueron en las matemáticas puras, también realizó aportaciones a la hidrodinámica, tales como la descripción de la presión en el flujo de los fluidos, la formulación de las ecuaciones básicas del movimiento de fluidos que posteriormente serían conocidas como teorema de Bernoulli, también introdujo el concepto de cavitación y algunos principios asociados a la turbo maquinaria. Se considera que utilizó por primera ocasión diversos términos, tales como la letra e , para designar a los logaritmos de base natural, la letra i para la raíz cuadrada de (-1) , la letra griega π para pi, la letra griega Σ para designar sumatorias, entre otros.

El ingeniero francés Antoine *Chezy* (1718-1789) construyó un modelo del río Yvette para determinar el gasto volumétrico que se podía derivar hacia la ciudad de París, el modelo estaba hecho de madera, de aproximadamente 200 m de longitud, 1,30 m de ancho y 0,52 m de profundidad, en el cual realizó diversas pruebas para determinar los factores que influyen en el gasto de un canal. De sus pruebas derivó la primera fórmula para flujo uniforme en canales, considerando que la fuerza de resistencia del flujo por unidad de área es proporcional al cuadrado de la velocidad, multiplicada por una constante de proporcionalidad.

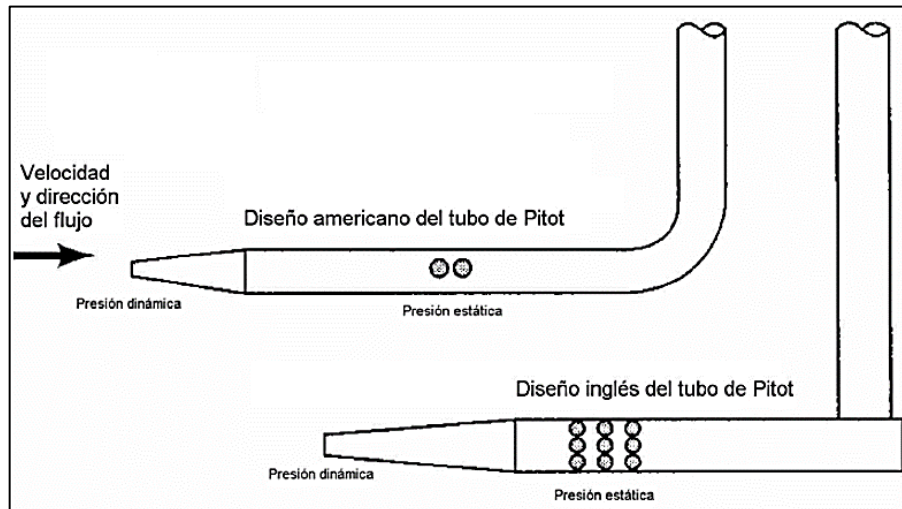
Posteriormente Robert Manning (1816-1897), un ingeniero irlandés, combinó los resultados de gran número de experimentos realizados por Weisbach, Saint Venant, Darcy, Bazin, Ganguillet, Kutter, entre otros; en una fórmula sencilla que se ajustaba a las velocidades de flujo observadas en los canales. Esta fórmula denominada de Manning sigue utilizándose actualmente y muestra lo empírico de la hidráulica, que es una de las áreas que se desarrolló ampliamente debido a la necesidad de resolver diversos problemas con el transporte del agua².

Henry de Pitot (1675 – 1771), ingeniero francés creó un dispositivo para medir la velocidad del flujo en conductos que es conocido como el Tubo de Pitot (ver figura 2). Este dispositivo consta de dos aberturas una cara abierta en la dirección del flujo; ambos tubos están conectados en sus extremos opuestos a un manómetro, de tal manera que la diferencia entre la presión dinámica del primer tubo y la presión estática del segundo puede ser medida. Con la diferencia de presión obtenida y aplicando el teorema de Bernoulli, se obtiene la velocidad.

Aunque fue considerado una innovación en su tiempo, presentaba diversas deficiencias que dificultaban su uso, entre otras, la falta de un análisis teórico del instrumento, ya que Pitot realizaba diversas lecturas de un cuerpo que transitaba en el flujo y preparaba unas tablas de calibración cuya presión era cuestionable; las lecturas del instrumento debían realizarse en el flujo, por lo que su uso era lento e incómodo; no se tenía un claro entendimiento de la influencia de la forma del tubo en el desempeño del mismo; entre otros.

² ESCALANTE TRIAY, Eduardo José, GARCÍA SOSA, Jorge y MORALES BURGOS, Armando. *Mecánica de Fluidos antecedentes y actualidad*. p. 13.

Figura 2. **Tubo de Pitot**



Fuente: ESCALANTE TRIAY, Eduardo José, GARCÍA SOSA, Jorge y MORALES BURGOS, Armando. *Mecánica de Fluidos antecedentes y actualidad*. p. 14.

El francés Claude Louis Marie Henri Navier (1785 – 1836) conocido por desarrollar las ecuaciones Navier-Stokes de la dinámica de fluidos; aunque no comprendía con precisión los esfuerzos cortantes que se generaban en un fluido, a partir de los trabajos de Euler, obtuvo en 1821 dichas ecuaciones para fluidos incompresibles, y para fluidos viscosos en 1822.

Otro francés destacado en la hidráulica fue Henry P. Darcy (1803 – 1858), modificó el tubo inicialmente concebido por Pitot, eliminando un gran número de sus inconvenientes, con lo que impulsó el trabajo de otros investigadores de la hidráulica, especialmente de canales. Su contribución principal fue establecer la ecuación que rige el movimiento del agua en medios porosos; la ecuación que hoy en día se conoce como ley de Darcy, para pérdida de energía en tubos a presión.

La ley de Darcy es válida cuando el medio poroso es homogéneo e isótropo y está totalmente saturado. Para la realización de sus experimentos y obtener

dicha ley Darcy utilizó el dispositivo que se presenta a continuación; hoy en día el dispositivo se conoce como permeámetro (ver figura 3).

Figura 3. **Permeámetro**



Fuente: ESCALANTE TRIAY, Eduardo José, GARCÍA SOSA, Jorge y MORALES BURGOS, Armando. *Mecánica de Fluidos antecedentes y actualidad*. p. 16.

Las ecuaciones obtenidas por Navier fueron nuevamente desarrolladas, con un mejor entendimiento de los esfuerzos que se generaban, por el Barón Augustin Louis de Cauchy (1789 – 1857) y por George Gabriel Stokes (1819 – 1903). Cauchy fue más matemático que hidráulico, sin embargo, una gran cantidad de sus trabajos son aplicados en la hidrodinámica, como lo son las ecuaciones de Cauchy que consideran los esfuerzos cortantes que se generan en un fluido, las ecuaciones de Cauchy-Riemann que se utilizan en los análisis de flujos ideales, entre otros.

El irlandés Stokes investigó sobre el movimiento de fluidos incompresibles y los esfuerzos cortantes generales en fluidos en movimientos, desarrollando el concepto de fricción interna, con lo que obtuvo las ecuaciones básicas de la dinámica de fluidos: las ecuaciones de Navier-Stokes; estas ecuaciones son tan complejas que sólo se pueden aplicar a flujos sencillos y no existe solución general de la misma.

El desarrollo de la industria a finales del siglo XIX dirigió la atención de los científicos hacia los gases y otros líquidos distintos del agua. Así, los estudios se orientaron hacia la dinámica de fluidos y a la resistencia al flujo que ofrecen los fluidos.

Julius Weisbach (1806-1871), desarrolló una de las ecuaciones más utilizadas actualmente para determinar las pérdidas de energía por esfuerzos cortantes, comúnmente conocidas como pérdidas por fricción, juntamente con Darcy lleva su nombre, la ecuación de Darcy-Weisbach.

1.5.3. Teoría contemporánea: nacimiento de la Mecánica de Fluidos

Osborne Reynolds (1842 – 1916), realizó estudios de hidráulica, entre los más importantes destacan los temas de cavitación, modelos de similitud en ríos, resistencia en tuberías, entre otros; asimismo, diseñó un equipo que permite distinguir cuando un flujo es de régimen laminar o de régimen turbulento; el número adimensional utilizado para distinguir los diversos tipos de regímenes mencionados, se conoce como el número de Reynolds.

Lewis Ferry Moody (1880 – 1953) integró las pérdidas de fricción en tuberías en los diversos regímenes de flujo, en un diagrama que se conoce como el diagrama de Moody.

Edgar Buckingham (1867 – 1940) desarrolló el teorema Pi de Buckingham para análisis dimensional, con el fin de reducir los costos de la experimentación y la interpretación y extrapolación de los resultados.

Ludwig Prandtl (1875 – 1953) desarrolló la teoría de la capa límite, por lo que a Ludwig Prandtl se le ha dado el nombre de Padre de la Mecánica de Fluidos. La teoría de capa límite permite analizar los flujos dividiéndolos en dos regiones: una primera región, que es la mayor parte de este se considerada esencialmente como un flujo con potencial; otra región, es una pequeña parte del flujo que está cerca de la superficie del cuerpo y es donde dominan los efectos viscosos. Esta última región, que es una delgada capa, es conocida como la capa límite. Conceptualmente la teoría de la capa límite de Prandtl permite conciliar la hidrodinámica y la hidráulica.

Theodore Von Kàrmàn (1881 – 1963), fue pionero en el estudio de la aeronáutica. En 1911, realizó un análisis de los vórtices alternados que se originan en la parte posterior de un cuerpo para un fluido en movimiento, los cuales son conocidos como la calle de vórtices de Von Kàrmàn o vórtices de Von Kàrmàn. Sus principales contribuciones a la mecánica de fluidos fueron sus estudios sobre los fenómenos de resistencia en superficies, turbulencia y ondas.

1.5.4. Avances recientes

Con el desarrollo de las computadoras en las últimas tres décadas (1980 – 2010), se ha iniciado el desarrollo de soluciones de las ecuaciones de Navier-Stokes mediante diversos métodos numéricos, esta área se ha nombrado Dinámica de Fluidos Computacional. Esta rama de la ciencia tuvo su origen en la industria aeroespacial.

La segunda ley de Newton permite la determinación de la aceleración del flujo, conservando su masa y energía. Cuando la segunda ley de Newton es expresada en forma vectorial, el número de ecuaciones diferenciales que rigen el movimiento de los flujos se incrementa a cinco. Estas ecuaciones son

conocidas como las de Navier-Stokes, de continuidad y de cantidad de movimiento; las primeras se obtuvieron al principio del siglo XIX.

Debido a la complejidad de las ecuaciones antes mencionadas, éstas fueron resueltas para casos específicos como serían el flujo laminar entre placas paralelas fijas, el flujo de Couette, el flujo de Hagen-Poiseuille, entre otros.

Los métodos numéricos aplicados en la actualidad iniciaron su desarrollo en la década de 1970 y aún continúa. De las diversas técnicas disponibles para encontrar la solución numérica de las ecuaciones diferenciales rectoras del flujo de fluidos, los tipos siguientes son los más comunes:

- Método de las diferencias finitas
- Método del elemento o volumen finito
- Método del elemento límite

En cada uno de estos métodos el campo de flujo continuo es descrito en términos de valores discretos para puntos específicos del mismo. Con esta técnica, las ecuaciones diferenciales se sustituyen por un conjunto de ecuaciones algebraicas que se puede resolver con una computadora.

En todos los métodos anteriores, el campo de flujo se descompone en un conjunto de pequeños elementos de fluidos. Las ecuaciones de conservación de masa, de energía y de cantidad de movimiento son escritas de forma apropiada para cada elemento, y el conjunto de ecuaciones algebraicas resultantes se resuelve numéricamente para el campo de flujo.

El número, tamaño y forma de los elementos están dictados parcialmente por la geometría particular del flujo y por las condiciones de flujo para el problema en

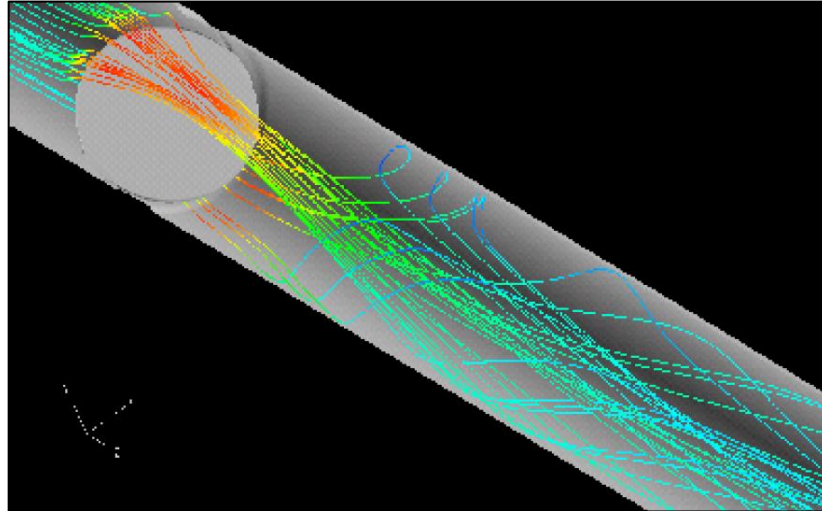
cuestión. A medida que aumenta el número de elementos, el número de ecuaciones simultáneas a resolver crece rápidamente. No es raro encontrar problemas que implican 10 000 elementos y hasta 50 000 ecuaciones, esto es, puesto que para cada elemento se plantean cinco ecuaciones, el número de éstas, será cinco veces el número de elementos de la malla. Estos sistemas de ecuaciones sólo se han podido resolver mediante el empleo de computadoras de alta velocidad de procesamiento. El gran número de soluciones obtenidas resulta difícil de interpretar en su forma numérica, por lo que se han desarrollado técnicas de procesamiento de dichos resultados con el objeto de poderlos visualizar utilizando códigos de colores o de líneas.

Así se puede decir, que la definición del número de elementos de la malla, el planteamiento de las ecuaciones y su solución forma parte de una primera etapa que se conoce como preprocesamiento, la visualización de los resultados en imágenes constituye la segunda parte que se designa como postprocesamiento.

La graficación de imágenes permite una mejor comprensión del comportamiento de los flujos que se dan en la realidad, la figura 4 ilustra lo descrito anteriormente y muestra el flujo de un líquido a través de una válvula de mariposa.

Puesto que las ecuaciones de Navier-Stokes rigen el movimiento de todo tipo de flujo, desde los flujos sanguíneos hasta los grandes flujos oceánicos, la dinámica de fluidos computacional es una herramienta esencial en casi todos los campos de las ciencias de la ingeniería, especialmente en la predicción del clima tratándose de flujos ambientales.

Figura 4. **Visualización para el flujo de una válvula de mariposa**



Fuente: ESCALANTE TRIAY, Eduardo José, GARCÍA SOSA, Jorge y MORALES BURGOS, Armando. *Mecánica de Fluidos antecedentes y actualidad*. p. 26.

1.6. Antecedentes de estudios de medidores de flujos

La investigación siempre ha sido el pilar para el desarrollo de la civilización humana, en las últimas décadas se han realizado estudios en el campo de mecánica de fluidos, como ya se mencionó, en el apartado anterior la dinámica fluidos computacional es el campo más estudiado. Sin embargo, existen otros estudios en el campo de la hidráulica que también han sido relevancia. A continuación, se presenta una serie de investigaciones realizadas por estudiantes de pregrado universitarios, profesionales, científicos e investigadores; realizados en las últimas dos décadas, donde podrán observarse los últimos avances en la mecánica de fluidos; enfocados al tema de medidores de flujo en canales abiertos y tuberías a presión.

En 2008, el estudiante de ingeniería en control y automatización, Omar Aarón Campos López, Instituto Politécnico Nacional, México, realizó un estudio titulado: *“Programa de cómputo para dimensionar medidores de flujo por*

presión diferencial en líquidos". En este trabajo se desarrolla un programa para calcular los medidores de flujo por presión diferencial como son: placa de orificio con tomas de presión en la brida, placa de orificio con tomas de presión esquinadas, placa de orificio con tomas de presión en la vena contracta, tobera ISA 1932, tobera ASME y tubos Venturi en base a la norma ISO 5167-1. El programa desarrollado tiene el nombre: Liq Flow DP 2007; se elaboró en Visual Basic 6.0. El programa tiene una variación de 3 % con respecto a otras metodologías. Además, el programa indica al usuario cuando alguno de los parámetros calculados está fuera de norma, si existe cavitación y realiza recomendaciones al usuario cuando se presentan casos específicos³.

En 2008, los estudiantes Marco Rolando Córdova Lascano y Diego Javier Velásquez Pérez, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador, realizaron un estudio titulado: *"Instalación y montaje de un banco de pruebas de caudal, para el Laboratorio de Instrumentación de la Facultad de Mecánica"*. En este trabajo de enfoque técnico se diseñó, construyó e instaló un banco de medidores de flujo para uso docente, el equipo consta de una red de tuberías interconectadas donde están instalados medidores de flujo de ultrasonido, turbina, por presión diferencial y de masa térmico⁴.

Se describe detalladamente el proceso de diseño; costos, tiempo, fallas de construcción, planos, esquemas, entre otros. Lo más destacado del trabajo es el proceso de selección para los instrumentos de medición establece claramente un esquema de decisiones y criterios técnicos.

³ CAMPOS LÓPEZ, Omar Aarón. *Programa de cómputo para dimensionar medidores de flujo por presión diferencial en líquidos*. p. IX.

⁴ CÓRDOVA LASCANO, Marco Rolando y VELÁSQUEZ PÉREZ, Diego Javier. *Instalación y montaje de un banco de pruebas de caudal, para el Laboratorio de Instrumentación de la Facultad de Mecánica*. p. 6.

En 2010, el estudiante Iván Durán Atilano, Universidad Nacional Autónoma de México, realizó un estudio titulado: *“Medición de Fluidos por Efecto de Coriolis”*. Este estudio es una recopilación de los distintos tipos de instrumentos de medición utilizados en la industria petrolera, así como la importancia de estos.

Se toma en cuenta operaciones, procedimientos herramientas y principios para obtener mediciones precisas; explica la diferencia una medición de referencia y una medición para transferencia de custodia; se presenta un método de medición reciente basado en el principio de resonancia natural de materiales y el principio de la fuerza de Coriolis, permitiendo exactitudes de exactitud [sic] $\pm 0,5\%$. Siendo en la actualidad la mejor herramienta para la medición de hidrocarburos en los procesos de transferencia de custodia y en las refinerías⁵.

En 2010, se publicó una investigación titulada: *“Banco de calibración de medidores de flujos líquidos en conductos cerrados por el método gravimétrico”*. En esta investigación se rediseña y automatiza un banco de calibración para medidores de agua cambiando el principio de funcionamiento volumétrico a uno gravimétrico, con la automatización el banco fue capaz de reducir tiempos de calibración mediante la utilización del sistema de adquisición de datos en forma automática, la cual sigue una secuencia lógica y sincronizada de eventos para cada uno de los ensayos⁶. La forma en que se aborda el contenido de esta investigación está orientada a servir de herramienta didáctica en el área de metrología.

En 2010, el estudiante de ingeniería civil, Manuel Agustín Lux Monroy, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala, realizó una investigación titulada: *“Medidores de flujo en canales abiertos”*. En este trabajo se realiza una recopilación bibliográfica del funcionamiento de los vertederos de pared delgada de distintas secciones geométricas, así como del canal tipo Parshall. Se construyen cuatro vertederos de pared delgada: rectangular, trapezoidal,

⁵ DURÁN ATILANO, Iván. *Medición de fluidos por efecto de coriolis*. p. I.

⁶ ALFONSI, Alfonso, PÉREZ, Jesús y RIVERA, Laur. *Banco de calibración de medidores de flujo líquidos en conductos cerrados por el método gravimétrico*. p. 183-192.

triangular y circular; y un canal Parshall, se determina la relación entre flujo volumétrico y el tirante de agua en los vertederos, al comparar los resultados de experimentos con ecuaciones que propone la literatura⁷.

En 2010, el estudiante de ingeniería química Faneli Mireli Huey Gil, Universidad Nacional Autónoma de México, realizó un estudio titulado: *“Aplicación de medidores de flujo en hidrocarburos para transferencia de custodia”*. En este trabajo se aborda el tema de la transferencia de custodia de fluidos como el petróleo y sus derivados, se describen los componentes de un sistema de transferencia de custodia. También se describen algunos procedimientos de calibración de medidores de flujo, así como los dispositivos utilizados en estos procedimientos como lo son; medidores maestros, patrones volumétricos y probadores de desplazamiento positivo⁸.

En 2011, el estudiante de ingeniería civil, Carlos Enrique Castillo de Paz, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala, realizó un estudio titulado: *“Medidores de flujo en tuberías a presión”*. En este trabajo se describen los conceptos fundamentales de los diferentes tipos de flujo, en este trabajo se hace énfasis en la estimación de la desviación estándar de los datos de laboratorio, la calibración de la placa de orificio, tubo de Venturi y rotámetro, así como las pérdidas de carga, número de Reynolds y el error que cada medidor genera, todo esto en el marco de laboratorio de investigación⁹.

En 2012, un grupo de investigadores de la Universidad Nacional Autónoma de México, publican un estudio titulado: *“Medición de caudales mediante la implementación de un vehículo acuático teleoperado”*. En este trabajo se diseña

⁷ LUX MONROY, Manuel Agustín. *Medidores de flujo en canales abiertos*. p. 106.

⁸ HUEY GIL, Faneli Mireli. *Aplicación de medidores de flujo en hidrocarburos para transferencia de custodia*. p. VI-VIII.

⁹ CASTILLO DE PAZ, Carlos Enrique. *Medidores de flujo en tuberías a presión*. p. 23-80.

y construye un sistema de aforo denominado S A-1, el cual es un vehículo acuático teleoperado y cuya finalidad es evitar que el personal se introduzca en el cuerpo de agua para realizar aforos en ríos y lagos. La medición del flujo de agua se realiza por medio de un sensor de molinete que desciende a una profundidad específica y realiza varias medidas, la importancia de esta investigación es la automatización de un trabajo que por décadas se ha realizado de forma manual en México¹⁰.

En 2013, Luis García Gutiérrez, jefe del Laboratorio de Agua del Centro Español de Metrología, realizó un estudio titulado: *“Teoría de la medición de caudales y volúmenes de agua e instrumental necesario disponible en el mercado”*. En este trabajo se hace una recopilación bibliográfica de los conceptos básicos de la medida de caudal y las características de los instrumentos de medida.

Entre los principales medidores que se estudian se citan, en primer lugar, los medidores de presión diferencial. Después se estudian los medidores de accionamiento mecánico, es decir, los medidores de caudal de tipo electromagnético y los medidores de tipo ultrasónico. Se indican también las ventajas e inconvenientes de emplear uno y otro tipo de medidor de caudal, tanto técnica como económicamente¹¹.

En 2013, los investigadores e ingenieros en electrónica y comunicación, Ria Sood, Manjit Kaun y Hemant Kumar Lenka, publicaron un estudio titulado: *“Diseño y desarrollo de un medidor de flujo automático de agua”*. En este trabajo se desarrolla el proceso de diseño de un medidor de flujo basado en el efecto de

¹⁰ DÍAZ GUTIÉRREZ, Carlos Eduardo, et al. *Medición de caudales mediante la implementación de un vehículo acuático teleoperado*. p. 73-91.

¹¹ GARCÍA GUTIÉRREZ, Luis. *Teoría de la medición de caudales y volúmenes de agua e instrumental necesario disponible en el mercado*. p. 21-23.

Hall, se muestra el diseño del sistema electrónico. Esta investigación introduce una técnica novedosa para medir el caudal de agua en tuberías de riego, que puede detectar fugas.

EL funcionamiento del medidor de flujo es el siguiente; cuando el agua pasa a través del rotor hace que este gire a una velocidad equivalente a la del flujo de agua, la velocidad del rotor cambia con diferentes tasas de flujo de agua, a medida que cada cuchilla del rotor pasa a través del imán ubicado en el estator, se crea un campo magnético en la base del sensor Hall y por lo *tanto* se generan pulsos. Estos pulsos producen una frecuencia de salida. La cual es proporcional al flujo volumétrico total a través del sensor, esta frecuencia se convierte a la tasa de flujo mediante el uso de un programa de software para el microcontrolador AT89S52¹².

En 2016, el estudiante de ingeniería química, Juan Diego Velásquez López, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala, realizó una investigación titulada: “*Diseño e implementación de un medidor tipo vertedero para el estudio de flujo de fluidos en canales abiertos*”. En este trabajo se muestra el proceso de diseño de un medidor de flujo tipo vertedero para canales, se utilizan tres tipos de compuertas: rectangular, triangular y trapezoidal; con las que se puede estudiar las diferencias entre las medidas de caudal para determinados flujos al compararlos con la teoría expuesta en la literatura. El equipo diseñado se utiliza en un laboratorio y por ende tiene características científicas para la investigación de mecánica de fluidos¹³.

¹² KAUR, Manjit, LENKA, Hemant, SOOD, Ria. *Diseño y desarrollo de un medidor de flujo automático de agua*. p. 49-59.

¹³ VELÁSQUEZ LÓPEZ, Juan Diego. *Diseño e implementación de un medidor tipo vertedero para el estudio de flujo de fluidos en canales abiertos*. p. 69-71.

Otra investigación en la temática de hidráulica computacional se realizó en 2016. Un grupo de investigadores del Departamento de Eléctrica y Electrónica, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Ecuador, publico el estudio titulado: *“Medidor digital de agua potable con comunicación inalámbrica”*. En este trabajo se plantea el desarrollo de un medidor de flujo volumétrico agua residencial, el cual tiene como fin automatizar el proceso de lectura de contadores de agua. Para ello se propone incluir un sistema de comunicación inalámbrica el cual sería el encargado de enviar la información del consumo de agua al ente encargado de los cobros, esto mismo ayudaría para crear historiales de consumo por vivienda, de este modo se simplificaría el trabajo de las municipalidades¹⁴.

En 2016, un grupo de investigadores de la Universidad Pedagógica y Tecnológica, Facultad de Ingeniería, Colombia, realizaron un estudio titulado: *“Estudio comparativo de flujo de fluido a través de una placa de orificio usando las ecuaciones de Stokes y de Navier Stokes”*. Este trabajo se realiza en la temática de dinámica de fluidos computacional y presenta los resultados de la comparación entre las ecuaciones de Stokes y de Navier-Stokes para la simulación del flujo de agua líquida, a condiciones atmosféricas a través de una placa de orificio concéntrica.

A partir de los datos experimentales que fueron tomados en un banco de fluidos, se evaluaron las simulaciones de ambas ecuaciones usando el software libre Freefem++cs, que se base en el método de elementos finitos, las variables evaluadas son velocidad y presión en un intervalo de tiempo. Al analizar los resultados obtenidos con las simulaciones y comparar con los datos

¹⁴ ANDALUZ, Victor, et al. *Medidor digital de agua potable con comunicación inalámbrica*. p. 85-96.

experimentales se encontró que las ecuaciones de Navier-Stokes representan mejor el sistema que la ecuación de Stokes¹⁵.

En 2017, el estudiante de ingeniería civil, Estuardo René Marín Enamorado, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala, realizó un estudio titulado: “*Construcción de un modelo hidráulico para la simulación de tipos de flujo en canales abiertos para el Laboratorio de Mecánica de Fluidos e Hidráulica de la Facultad de Ingeniería, USAC*”. En este trabajo se describe el proceso de construcción de un modelo hidráulico a escala para simular diferentes tipos de flujos en canales abiertos, de acuerdo con el tiempo, el espacio y la gravedad.

Se evalúan en forma cualitativa y cuantitativa las características de los tipos de flujo en un canal rectangular, se comprueba la efectividad del modelo hidráulico para la simulación de tipos de flujo. Las características de los tipos de flujo en el canal rectangular que se evaluaron fueron el tirante, el área hidráulica y la velocidad media de flujo para clasificar los tipos de flujo de acuerdo con el tiempo, espacio, y la inercia del flujo para clasificarlos según la gravedad¹⁶.

¹⁵ GARCÍA BULTRAGO, María Vilma, GUERRA MAZO, Miryam Lucía y RODRÍGUEZ ACEVEDO, Elizabeth. *Estudio comparativo de flujo de fluido a través de una placa de orificio usando las ecuaciones de Stokes y Navier-Stokes*. p. 99-110.

¹⁶ MARÍN ENAMORADO, Estuardo René. *Construcción de un modelo hidráulico para la simulación de tipos de flujo en canales abiertos para el laboratorio de Mecánica de Fluidos e Hidráulica de la Facultad de Ingeniería, USAC*. p. 83-84.

2. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se abordarán los conceptos teóricos necesarios para el diseño del equipo de medidores de flujo.

2.1. Conceptos fundamentales de fluidos

Los conceptos fundamentales son definiciones básicas para comprender las características de un fluido.

2.1.1. Fluido

Comúnmente a los líquidos y gases se les denomina fluidos, sin embargo, qué diferencia a los fluidos de un sólido. Para explicar esta diferencia es necesario definir a los esfuerzos cortantes (ver ecuación No. 1). Una fuerza (F) que actúa en un área (A) puede ser descompuesta en una componente normal (F_n) y una componente tangencial (F_t). La fuerza dividida entre el área sobre la cual actúa se llama esfuerzo. El vector de fuerza dividido entre el área es un vector de esfuerzo, la componente normal de fuerza dividida entre el área es un esfuerzo normal, y la fuerza tangencial dividida entre el área es un esfuerzo cortante (τ)¹⁷:

$$\tau = \frac{F_t}{A} \quad Ec. 1$$

¹⁷ POTTER, Merle C. y WIGGERT, David C. *Mecánica de Fluidos*. p. 8.

Un fluido es una sustancia que se deforma continuamente cuando se somete a un esfuerzo cortante, sin importar cuán pequeño sea ese esfuerzo¹⁸. Vemos que la principal diferencia entre un sólido y un fluido consiste en que los fluidos no pueden soportar esfuerzos cortantes. Al aplicar un determinado sistema de fuerzas sobre un sólido, éste experimenta deformaciones que se mantienen constantes mientras no se modifique el estado tensional, cualquiera que sea éste.

Cuando un fluido es sometido a fuerzas que originan esfuerzos cortantes en su seno, éste experimenta una deformación continua que persiste mientras sigan actuando las causas que originan dichos esfuerzos cortantes por muy pequeños que sean.

Existen sustancias que pueden llegar a presentar un comportamiento que no corresponde con el de los sólidos y fluidos genuinos que se acaba de describir, o en las que no se da una relación de proporcionalidad entre esfuerzos cortantes y velocidad de deformación, este tipo de fluidos se conocen como fluidos no newtonianos, aunque en este trabajo no se investigó acerca de este tipo de fluidos, si se da una breve descripción de estos en apartados posteriores.

2.1.2. Caudal o Flujo

El caudal o flujo, es la medida o velocidad con que cierto volumen de un fluido se desplaza a un tiempo conocido, matemáticamente se expresa como: el flujo volumétrico es proporcional al volumen e indirectamente proporcional a tiempo. La ecuación 2 ejemplifica lo anterior:

¹⁸ STREETER, Victor L. y WYIIE, E. Benjamin. *Mecánica de los Fluidos*. p. 3.

$$\dot{V} = \frac{V}{t} \quad Ec. 2$$

Donde:

\dot{V} : flujo volumétrico (m^3/s).

V : volumen (m^3).

t : tiempo (s)

Cuando se trata de una tubería de sección circular se puede expresar en términos de velocidad de desplazamiento y área de la sección transversal de la tubería, ver la ecuación 3:

$$\dot{V} = A_t * v \quad Ec. 3$$

Donde:

\dot{V} : flujo volumétrico (m^3/s).

A_t : área de la sección transversal de tubería (m^2).

v : velocidad promedio de desplazamiento del fluido (m/s).

2.1.3. Velocidad

Para abordar el tema de velocidad es necesario explicar más a detalle temas como viscosidad, capa limite, turbulencia, entre otros. Cabe destacar que el término de velocidad que se definirá en esta sección es la “velocidad media de flujo”, en la literatura cuando se refieren a velocidad de un fluido, tratan casi siempre, a menos que se diga lo contrario, acerca de la velocidad media de flujo. Se habla de velocidad media dado que en la realidad existen fluctuaciones de velocidad en una sección de tubería cuando se analiza el flujo de un fluido, esto se explicará más a detalle en apartados posteriores.

Entonces: La velocidad media de flujo, se refiere al promedio de velocidades de cierta sección transversal dada por la ecuación de continuidad para un flujo estacionario¹⁹. La ecuación 4 define la velocidad media en función del flujo y el área transversal:

$$v = \frac{\dot{V}}{A} \quad Ec. 4$$

Donde:

v : velocidad promedio de un fluido (m/s).

\dot{V} : flujo volumétrico (m^3/s).

A : área transversal de la sección de tubería (m^2).

2.1.4. Viscosidad

La viscosidad de un fluido es la propiedad a la que debe prestársele mayor consideración en el estudio de flujo de fluidos. Las características y naturaleza de la viscosidad son de suma importancia para comprender el comportamiento de los fluidos y comprender fenómenos que más adelante se trataran. La viscosidad es la propiedad de un fluido mediante la cual, este ofrece resistencia a los esfuerzos cortantes. La ley de viscosidad de Newton, ver ecuación 5:

$$\tau = \mu \frac{d\mu}{dy} \quad Ec. 5$$

Afirma que, dada una rapidez de deformación angular en el fluido, el esfuerzo cortante es directamente proporcional a la viscosidad.

¹⁹ CRANE. *Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías*. p. 5.

La viscosidad de un gas aumenta con la temperatura, pero la viscosidad de un líquido disminuye con la temperatura. Las variaciones en las tendencias de la temperatura se pueden explicar por el examen de las causas de la viscosidad. La resistencia de un fluido al corte depende de su cohesión y de su rapidez de transferencia de cantidad de movimiento molecular. Un líquido, cuyas moléculas dejan espacios entre ellas mucho más cerrados que las de un gas, tiene fuerzas cohesivas mucho mayores que un gas. La cohesión parece ser la causa predominante de la viscosidad en un líquido; y ya que la cohesión decrece con la temperatura, la viscosidad decrece también. Por otro lado, un gas tiene fuerzas cohesivas muy pequeñas. Mucha de su resistencia al esfuerzo cortante es el resultado de la transferencia de la cantidad de movimiento molecular.

Si se imagina un fluido conformado por una cantidad infinita de capas unas sobre otras, se podría observar que cuando una capa se mueve con relación a una capa adyacente, la transferencia molecular de la cantidad de movimiento lleva a ésta de un lado a otro, de manera que se establece un esfuerzo cortante aparente, el cual resiste el movimiento relativo y tiende a igualar las velocidades de las capas adyacentes. La medida del movimiento de una capa relativa a una capa adyacente es la rapidez de deformación angular $d\mu/dy$.

Para presiones ordinarias, la viscosidad es independiente de la presión y depende sólo de la temperatura. Para presiones muy grandes, los gases y la mayor parte de los líquidos han mostrado variaciones erráticas con la presión.

Las dimensiones de la viscosidad se determinan a partir de la ley de viscosidad de Newton. La unidad del SI para la viscosidad, newton-segundo por metro cuadrado ($N * s/m^2$), no tiene nombre²⁰.

²⁰ STREETER, Victor L. y WYIIE, E. Benjamin. *Mecánica de los Fluidos*. p. 10.

2.1.4.1. Fluido newtonianos y no newtonianos

Como se mencionó anteriormente existen materiales diferentes de los fluidos, los cuales no satisfacen la definición de un fluido. Una sustancia plástica se deformará cierta cantidad proporcional a la fuerza, pero no continuamente cuando el esfuerzo aplicado es menor que el esfuerzo cortante cedente. Un vacío completo entre las placas causaría deformación con una rapidez siempre en aumento. Si se colocara arena entre las dos placas, la fricción de Coulomb requeriría una fuerza finita para causar un movimiento continuo. Por tanto, plásticos y sólidos se excluyen de la clasificación de fluidos.

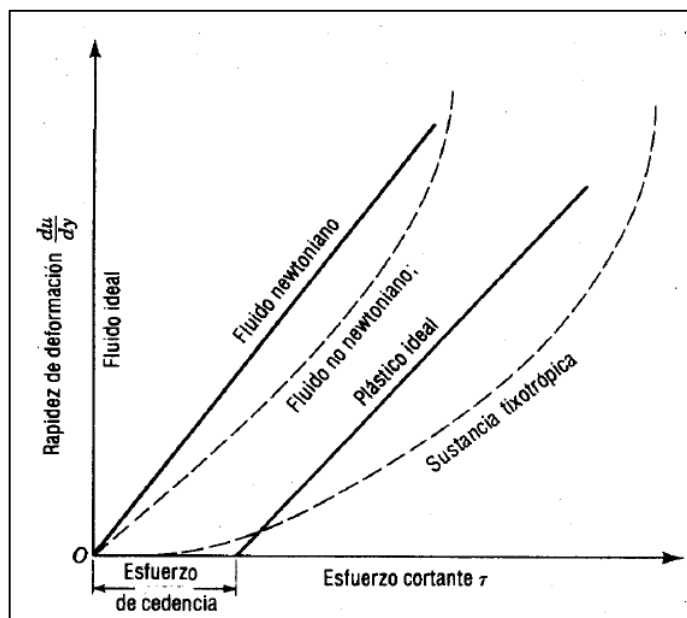
Los fluidos se clasifican en newtonianos o no newtonianos. En el flujo newtoniano hay una relación lineal entre la magnitud del esfuerzo cortante aplicado y la rapidez de deformación resultante. Muchos fluidos comunes, tales como aire, agua y aceite, son Newtonianos. Los fluidos no Newtonianos, con esfuerzo cortante contra relaciones de velocidad de deformación como se muestran en la figura 5, con frecuencia tienen una composición molecular compleja.

Los dilatantes son fluidos no newtonianos que se vuelven más resistentes al movimiento conforme se incrementa la velocidad de deformación, y los pseudoplásticos se vuelven menos resistentes al movimiento con la velocidad de deformación incrementada. Los plásticos ideales o fluidos de Bingham requieren un esfuerzo cortante mínimo para empezar a moverse. Las suspensiones arcillosas y la pasta de dientes son ejemplos que también requieren un cortante mínimo para empezar a moverse, más no tienen una relación lineal esfuerzo-velocidad de deformación²¹. Una sustancia tixotrópica, como la tinta de impresión, tiene una viscosidad que depende de la deformación angular

²¹ POTTER, Merle C. y WIGGERT, David C. *Mecánica de Fluidos*. p. 16.

inmediatamente anterior de la sustancia y tiende a asentarse cuando está en reposo. Los gases y líquidos poco densos tienden a ser fluidos newtonianos, mientras que los hidrocarburos espesos de cadena larga pueden ser no newtonianos. En la figura 5 se observa la relación entre la rapidez de deformación y el esfuerzo cortante.

Figura 5. **Diagrama reológico**



Fuente: STREETER, Victor L. y WYIIE, E. Benjamin. *Mecánica de los Fluidos*. p. 5.

Para fines de análisis, frecuentemente se supone que un fluido no es viscoso. Con viscosidad nula, el esfuerzo cortante es siempre cero, sin importar el movimiento del fluido. Si el fluido se considera incompresible se denomina entonces fluido ideal.

2.1.4.2. **Viscosidad cinemática**

A la viscosidad que utiliza la letra griega (μ) comúnmente se denomina viscosidad absoluta o viscosidad dinámica para evitar confundirla con la

viscosidad cinemática (ν), que es la razón de viscosidad absoluta a densidad de masa (ρ). La ecuación 6 representa la relación anterior:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad \text{Ec. 6}$$

La viscosidad cinemática ocurre en muchas aplicaciones.

2.1.5. Compresibilidad

La compresibilidad se refiere al cambio de volumen (V) que sufre una sustancia cuando se le sujeta a un cambio de presión. La cantidad usual que se emplea para medir este fenómeno es el módulo volumétrico de elasticidad, o sencillamente módulo volumétrico (E)²². En la ecuación 7 se define la compresibilidad como la razón entre el diferencial de presión y el diferencial de volumen:

$$E = \frac{-\Delta p}{(\Delta V)/V} \quad \text{Ec. 7}$$

Debido a que las cantidades de ΔV y V tienen las mismas unidades, el denominador de la ecuación es adimensional. Por tanto, las unidades de E son las mismas que las de la presión.

En la práctica se determina con mayor frecuencia que el cambio de volumen generado por la presión, puede observarse fácilmente con el cambio de la densidad. Al reducir el volumen de una sustancia, está aumenta su densidad, sucede lo contrario si el volumen aumenta.

²² MOTT, Robert L. *Mecánica de Fluidos*. p. 13.

Por la razón anterior, se dice que un fluido es compresible si presenta un cambio significativo en su densidad al variar la presión del ambiente donde esté contenido.

Por lo contrario, un fluido es incompresible, si no presenta un cambio significativo en su densidad al variar la presión del ambiente donde esté contenido.

Los líquidos son muy poco compresibles por esta razón a menos que se indique lo contrario, universalmente se conoce a los líquidos como fluidos incompresibles.

2.1.6. Densidad

La densidad de una sustancia es su masa (m) por unidad de volumen (V). La unidad de densidad en el SI es el kilogramo por metro cúbico y se denota por la letra griega (ρ). En la ecuación 8 se define la densidad:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad Ec.8$$

2.1.7. Volumen específico

El volumen específico (\bar{V}) es el inverso de la densidad, esto se puede observar en la ecuación 9. Su unidad en el SI es el metro cúbico por kilogramo.

$$\bar{V} = \frac{V}{m} = \frac{1}{\rho} \quad Ec.9$$

2.1.8. Peso específico

El peso específico o densidad relativa (S) es una medida relativa de la densidad. Como la presión tiene un efecto insignificante sobre la densidad de los líquidos, la temperatura es la única variable que debe ser tomada en cuenta al sentar las bases para el peso específico. La densidad relativa de un líquido es la relación de su densidad a cierta temperatura, con respecto al agua u otra sustancia a una temperatura normalizada (T). A medida estas temperaturas son las mismas y se suele utilizar (15,6 °C) o (4 °C)²³. En la ecuación 10 se puede observar la definición de la densidad relativa:

$$S = \frac{\rho \text{ cualquier líquido a cierta temperatura}}{\rho \text{ agua u otra sustancia a } T \text{ conocida}} \quad \text{Ec. 10}$$

2.1.9. Presión

La propiedad fundamental de un fluido estático es la presión. Como es sabido, la presión es la fuerza superficial que ejerce un fluido sobre las paredes del recipiente que lo contiene. En cualquier punto del interior de un fluido existe también una determinada presión.

La presión es la magnitud escalar que relaciona la fuerza con la superficie. Cuando sobre una superficie plana de área (A) se aplica una fuerza normal (F_n) de manera uniforme, la presión (P) viene dada por la ecuación 11:

$$P = \frac{F_n}{A} \quad \text{Ec. 11}$$

²³ CRANE. *Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías*. p. 3.

En un caso general donde la fuerza puede tener cualquier dirección y está distribuida uniformemente en cada punto la presión se define como se establecen en la ecuación 12:

$$P = \frac{dF_A}{dA} * n \quad Ec. 12$$

Donde:

n : Vector unitario y normal a la superficie en el punto donde se pretende medir la presión. Si se separa la fuerza del diferencial la ecuación 12 se convierte en la ecuación 13:

$$P = \frac{d}{dA} \int_s f * n dS \quad Ec. 13$$

Donde:

f : fuerza por unidad de superficie.

n : vector normal a la superficie.

A : área total de la superficie.

2.1.9.1. Presión manométrica y absoluta

Cuando se hacen cálculos que involucran la presión de un fluido, las presiones normalmente están referenciadas a la presión atmosférica. De esta forma se denomina presión manométrica a la que arroja la medición del fluido. La presión que se mide en relación con un vacío perfecto se denomina presión absoluta²⁴.

²⁴ MOTT, Robert. *Mecánica de fluidos*. p. 53.

La ecuación 14 define la presión absoluta, esta relaciona los dos sistemas de medición de presión es:

$$P_{abs} = P_{man} + P_{atm} \quad Ec. 14$$

Donde:

P_{abs} : presión absoluta (Pa)

P_{man} : presión manométrica (Pa)

P_{atm} : presión atmosférica (Pa)

Para comprender a la perfección los conceptos de los distintos tipos de presiones es necesario realizar algunas aclaraciones:

- Un vacío perfecto es la presión más baja posible. Por tanto, una presión absoluta siempre será positiva.
- Una presión manométrica superior a la presión atmosférica siempre es positiva.
- Una presión manométrica inferior a la presión atmosférica es negativa y comúnmente se le llama presión de vacío.
- Una presión manométrica se expresará en las unidades del sistema internacional Pascal (Pa).
- La magnitud de la presión atmosférica varía con la ubicación y condiciones climáticas.

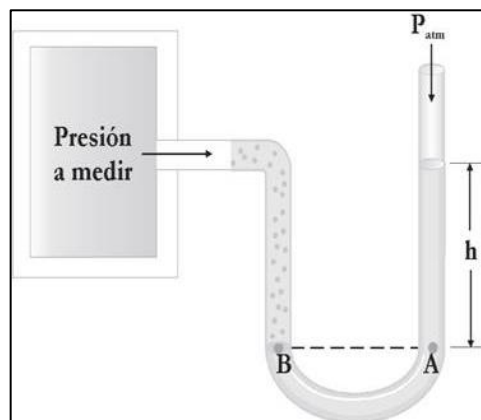
2.1.9.2. Manómetros

Los manómetros son instrumentos que utilizan para medir presiones en fluidos, utilizan la presión atmosférica como nivel de referencia y miden la diferencia entre la presión real o absoluta y la atmosférica. Existen varios tipos de manómetros y se detallan a continuación.

2.1.9.2.1. Manómetro de dos ramas abiertas

Son los elementos con los que se mide la presión positiva, pueden adoptar distintas escalas. El manómetro más sencillo consiste en un tubo de vidrio doblado en U que contiene un líquido apropiado: mercurio, agua, entre otros; una de las ramas del tubo está abierta a la atmósfera, la otra está conectada con el depósito que contiene el fluido cuya presión se desea medir, ver figura 6. El fluido del recipiente penetra en parte del tubo en U, haciendo contacto con la columna líquida. Los fluidos alcanzan una configuración de equilibrio de la que resulta fácil deducir la presión absoluta en el depósito.

Figura 6. Manómetro de dos ramas abiertas



Fuente: R., JoséLuis. *Comofunciona*. como-funciona.co/un-manometro. Consulta: 5 de octubre de 2019

2.1.9.2.2. Tubo de Bourdon

Es el manómetro más común, consiste en un tubo metálico aplanado, hermético, cerrado por un extremo y enrollado en espiral.

El funcionamiento de este manómetro es el siguiente; cuando la presión a medir aumenta, el tubo tiende a desenrollarse, y cuando disminuye, el tubo tiende a curvarse más. Este movimiento se transmite mediante una conexión mecánica a un sistema de engranajes conectado a una aguja. La aguja se coloca delante de una plantilla que lleva las indicaciones del valor de la presión relativa a la posición de la aguja.

2.1.10. Presión de vapor y cavitación

La presión de vapor es la presión de la fase gaseosa de un sólido o líquido sobre la fase líquida, para una temperatura determinada, en la que la fase líquida y el vapor se encuentran en equilibrio termodinámico. En este equilibrio, las fases reciben la denominación de líquido saturado y vapor saturado.

Esta propiedad posee una relación inversamente proporcional con las fuerzas moleculares, debido a que cuanto mayor sea el módulo de estas, mayor deberá ser la cantidad de energía entregada, ya sea en forma de calor u otra manifestación para vencerlas y producir el cambio de estado.

En los flujos de líquido en tuberías, se pueden crear condiciones que conduzcan a una presión por debajo de la presión de vapor del líquido. Cuando esto ocurre, se forman burbujas localmente. Este fenómeno, llamado cavitación, puede ser muy dañino cuando estas burbujas son transportadas por el flujo a regiones de presión más alta. Lo que sucede es que las burbujas implosionan al

entrar a la región de mayor presión, y esta implosión produce picos de presión local que tienen el poder de dañar la pared de un tubo o impulsor de una bomba²⁵.

2.1.11. Tensión superficial

La interfase es un término utilizado en física y química para denominar una zona de separación de dos fases donde las propiedades no son las de ninguna de las fases. Aunque esta zona puede ser muy delgada, puede tener efectos significativos y fácilmente observables.

Un fenómeno que se puede explicar debido a la interfase es la transformación de las gotas de mercurio al ser colocadas sobre una superficie lisa, debido a que las fuerzas de cohesión en la superficie tienden a mantener juntas a todas las moléculas en una configuración compacta. Este tipo de fenómeno superficial se debe a las fuerzas de cohesión no equilibradas que actúan sobre las moléculas del líquido en la superficie del fluido.

Las moléculas en el interior de la masa del fluido están rodeadas por moléculas que son atraídas entre sí de la misma forma. Sin embargo, las moléculas a lo largo de la superficie están sometidas a una fuerza neta hacia el interior. La consecuencia física aparente de esta fuerza no equilibrada a lo largo de la superficie es la creación de la piel o membrana hipotética. Se puede considerar que una fuerza de tensión actúa en el plano de la superficie a lo largo de cualquier línea de ésta. La intensidad de la atracción molecular por unidad de longitud a lo largo de cualquier línea de la superficie se denomina tensión superficial y se designa por la letra griega sigma (σ)²⁶.

²⁵ POTTER, Merle C. y WIGGERT, David C. *Mecánica de Fluidos*. p. 21.

²⁶ MUNSON, Bruce R., OKIISHI, Theodore H. y YOUNG, Donald F. *Fundamentos de Mecánica de Fluidos*. p. 43-44.

La tensión superficial es una propiedad del líquido y depende de la temperatura, así como del otro fluido con que esté en contacto. Las unidades de la tensión superficial son la fuerza por unida de longitud, para el caso del SI son newton por metro (N/m).

2.2. Ecuaciones básicas y conceptos de flujo de fluidos

En esta sección se presentan los conceptos básicos de flujo de fluidos a partir de estos se desarrollan las ecuaciones fundamentales para el estudio de la mecánica de fluidos.

2.2.1. Introducción al movimiento de los fluidos

Los movimientos de los fluidos se manifiestan de diferentes maneras. Algunos pueden ser descritos con facilidad, en tanto que otros requieren de un conocimiento completo de las leyes de la física. Esta sección sirve para introducir los conceptos necesarios para analizar el movimiento de los fluidos.

2.2.1.1. Descripción del movimiento

Para describir el movimiento de un fluido es necesario conocer las siguientes condiciones:

- El cambio de posición de una partícula
- La variación de la velocidad en un punto

Hay dos formas clásicas de describir el movimiento de un fluido.

2.2.1.1.1. Descripción euleriana del movimiento

El primero es el método de Euler, éste consiste en elegir un punto y determinar las variables cinemáticas en ese punto, esto es, la derivada parcial de la velocidad respecto a la coordenada x : $\partial v/\partial x$; la derivada parcial respecto a la coordenada y : $\partial v/\partial y$; la derivada parcial respecto a la coordenada z : $\partial v/\partial z$; en cada instante, es decir, la derivada parcial de la velocidad respecto al tiempo t : $\partial v/\partial t$; sin considerar el camino que después siga cada partícula individual²⁷. En coordenadas cartesianas la velocidad se expresa se indica en la ecuación 15:

$$v = v(x, y, z, t) \quad Ec. 15$$

La región de flujo considerada se llama campo de flujo.

2.2.1.1.2. Descripción lagrangiana del movimiento

En la descripción lagrangiana muchas partículas pueden ser seguidas y su influencia en otras observada. La posición, velocidad y aceleración de cada partícula se expresan como $r(x_0, y_0, z_0, t)$, $v(x_0, y_0, z_0, t)$, y $a(x_0, y_0, z_0, t)$. El punto (x_0, y_0, z_0) localiza el punto de inicio de cada partícula. Las coordenadas x_0 , y_0 y z_0 indican la posición en los ejes xyz de un de un espacio tridimensional.

²⁷ CHEREQUE MORAN, Wendor. *Mecánica de Fluidos I*. p. 54.

2.2.1.2. Campo de velocidades

Una partícula del líquido recorre una línea usualmente curva que se llama trayectoria. El estudio del movimiento de la partícula puede hacerse:

- Utilizando el vector posición \bar{r} , como una función vectorial del tiempo (t), ver ecuación 16:

$$\bar{r} = \bar{r}(t) \quad \text{Ec. 16}$$

El vector posición se describe por las coordenadas x , y y z y los componentes \bar{i} , \bar{j} , \bar{k} , ver ecuación 17:

$$\bar{r} = x\bar{i} + y\bar{j} + z\bar{k} \quad \text{Ec. 17}$$

Donde las coordenadas x , y , z dependen del tiempo (t), ver ecuaciones 18, 19 y 20:

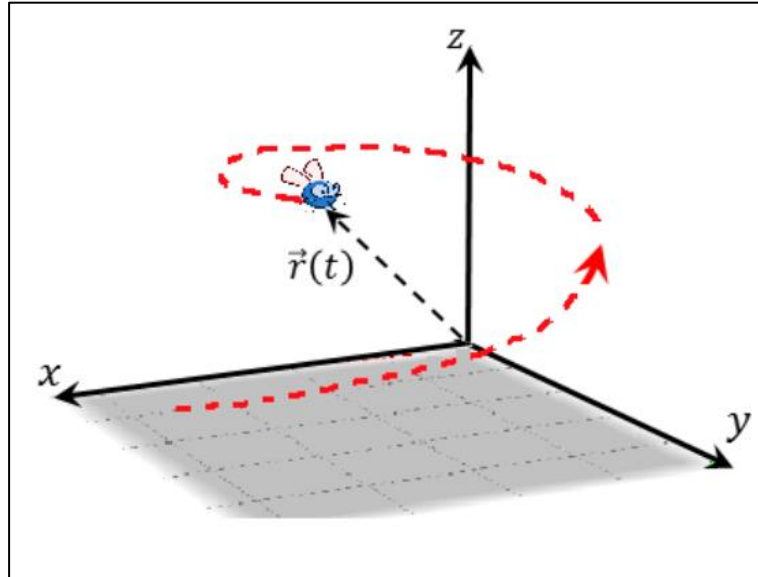
$$x = x(t) \quad \text{Ec. 18}$$

$$y = y(t) \quad \text{Ec. 19}$$

$$z = z(t) \quad \text{Ec. 20}$$

En la figura 7 se observan las coordenadas x , y , z y el vector posición, para ejemplificar se muestra la trayectoria del vuelo de una mosca.

Figura 7. **Vector posición \vec{r} como una función vectorial del tiempo**



Fuente: BARAGATTI, Esteban Eduardo, PORTESI, Mariela Adelina y SCHUVERD, María Laura. *Funciones vectoriales de un parámetro*.

www.mate.unlp.edu.ar/practicas/114_4_19032019171958.pdf.

Consulta: 5 de octubre de 2019.

- Utilizando la trayectoria y el camino recorrido, como una función escalar del tiempo.

El vector velocidad de la partícula (\vec{v}), ver ecuación 21, se define como la rapidez de cambio de su posición:

$$\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt} \quad \text{Ec. 21}$$

Donde \vec{v} resulta ser un vector tangente a la trayectoria en cada punto, que depende de la posición de la partícula y del tiempo. Y si el vector posición \vec{r} es un vector unitario tangente en cada punto a la trayectoria se cumple, que la

primera derivada del vector posición es igual a la derivada de la posición por el vector, ver ecuación 22:

$$d\vec{r} = dr * \vec{r} \quad Ec. 22$$

Y como el vector posición depende del tiempo se puede obtener la ecuación 23, donde se observa que el vector de velocidad (\vec{v}) es igual a la derivada parcial del vector posición (\vec{r}) respecto al tiempo (t):

$$\vec{v} = v * \vec{r} = \frac{dr}{dt} \vec{r} = \frac{d\vec{r}}{dt} \quad Ec. 23$$

2.2.1.3. Campo de aceleraciones

Es un campo que se deriva del campo de velocidades. El vector de aceleración de la partícula en un punto (\vec{a}) se define como la rapidez de cambio de su velocidad en ese punto, ver ecuación 24:

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d^2\vec{r}}{dt^2} \quad Ec. 24$$

Sus componentes espaciales se describen a continuación.

- La ecuación 25 describe la aceleración en la coordenada x :

$$a_x = \frac{dv_x}{dt} \quad Ec. 25$$

- La ecuación 26 describe la aceleración en la coordenada y :

$$a_y = \frac{dv_y}{dt} \quad Ec. 26$$

- La ecuación 27 describe la aceleración en la coordenada z :

$$a_z = \frac{dv_z}{dt} \quad Ec. 27$$

Desarrollando las derivadas de las ecuaciones 25, 26 y 27, se aprecia que las componentes de la aceleración son funciones de punto y de tiempo. Debido a que este tema está enfocado en el campo de la hidrodinámica, no se demostrará, debido a que el presente trabajo aborda el estudio de los medidores de flujo desde el punto de vista de la hidráulica.

2.2.1.4. Campo rotacional

Además de los campos de velocidad y aceleraciones, existe en el seno líquido otro campo llamado campo rotacional que se deriva de las velocidades. Se llama rotor de \bar{v} al vector descrito en la ecuación 28:

$$rot \bar{v} = \begin{vmatrix} \bar{i} & \bar{j} & \bar{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ v_x & v_y & v_z \end{vmatrix} \quad Ec. 28$$

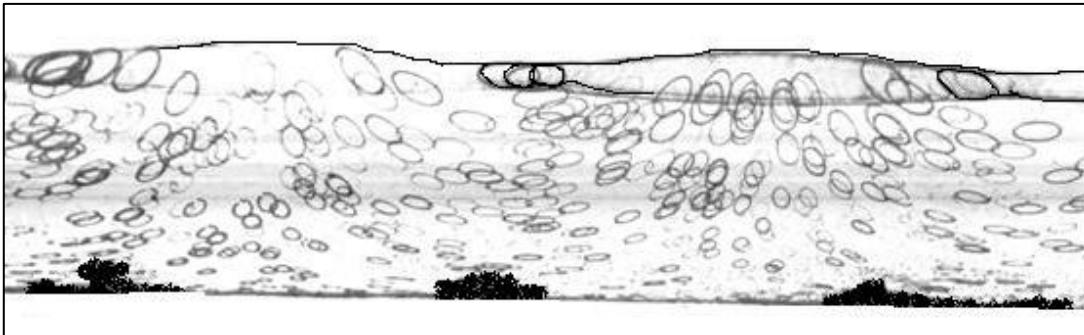
Que también es función de punto y de tiempo.

2.2.1.5. Campo de flujo

Para describir un campo de flujo se utilizan tres líneas diferentes.

- Una línea de trayectoria es el lugar geométrico de los puntos recorridos por una partícula a medida que se desplaza en un campo de flujo; la línea de trayectoria proporciona el registro de las ubicaciones de la partícula. Una fotografía de una línea de trayectoria requeriría una exposición de tiempo de una partícula iluminada. En la figura 8 se muestran las líneas de trayectoria de partículas bajo una superficie de agua con oleaje.

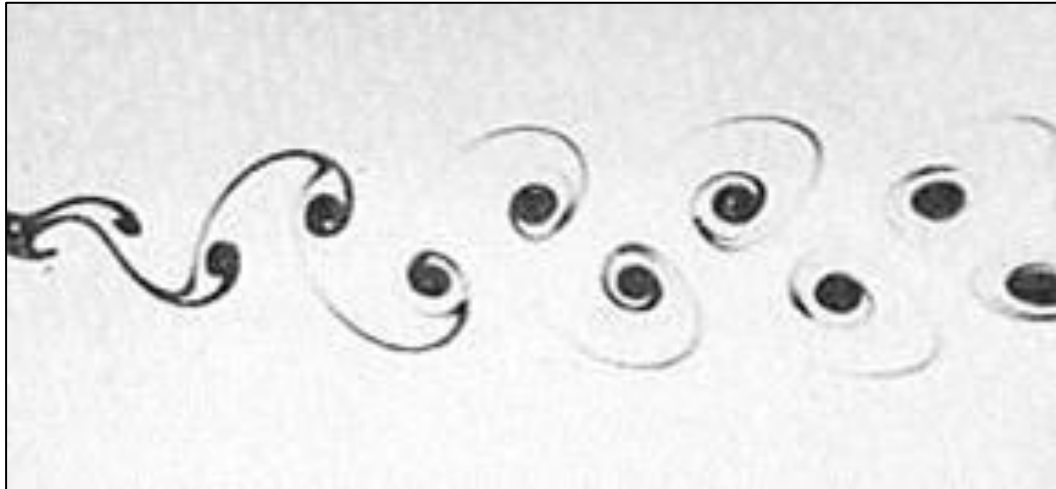
Figura 8. **Líneas de trayectoria bajo una ola en un tanque de agua**



Fuente: POTTER, Merle C. y WIGGERT, David C. *Mecánica de Fluidos*. p. 80.

- Una línea fugaz; se define como una línea instantánea cuyos puntos son ocupados por todas las partículas que se originan en algún campo específico en el campo de flujo. Las líneas fugaces indican dónde están las partículas en el mismo instante. Una fotografía de una línea fugaz sería una foto instantánea del conjunto de partículas iluminadas que pasan por un cierto punto. La figura 9 muestra líneas fugaces producidas por la emisión continua de una corriente de humo de diámetro pequeño a medida que se mueve alrededor de un cilindro.

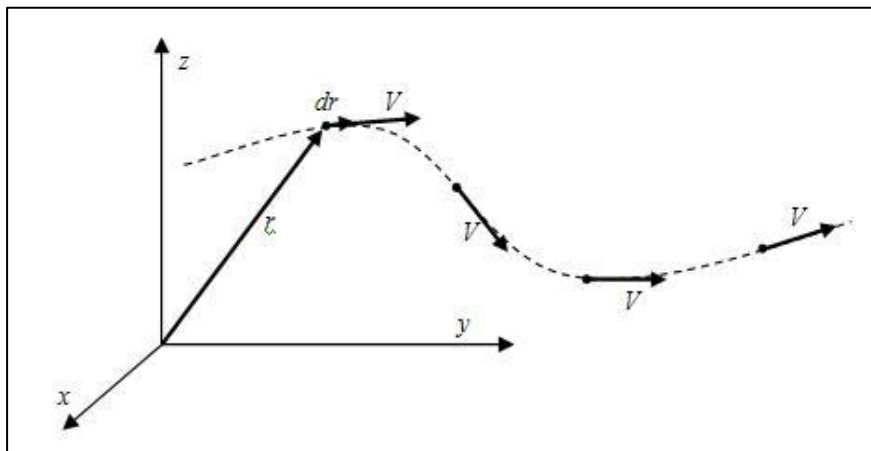
Figura 9. **Líneas fugaces en el flujo discontinuo alrededor de un cilindro**



Fuente: POTTER, Merle C. y WIGGERT, David C. *Mecánica de Fluidos*. p. 80.

- Una línea de corriente es una línea en el flujo que posee la siguiente propiedad: el vector de velocidad de cada partícula que ocupa un punto en la línea de corriente es tangente a ésta. Se muestra gráficamente en la figura 10.

Figura 10. **Línea de corriente en un campo de flujo**



Fuente: POTTER, Merle C. y WIGGERT, David C. *Mecánica de Fluidos*. p. 81.

La ecuación 29 expresa que el vector de velocidad es tangente a una línea de corriente:

$$v \times dr = 0 \quad \text{Ec. 29}$$

Un tubo de corriente es un tubo cuyas paredes son líneas de corriente. Como la velocidad es tangente a una línea de corriente, nada de fluido atraviesa las paredes del canal. Con frecuencia se dibuja un tubo de corriente con una pequeña sección transversal en el interior de un flujo con el propósito de demostración²⁸.

2.2.2. Fenómenos y tipos de flujos

En este apartado se definen algunos aspectos de la mecánica de fluidos. Aunque algunos de los conceptos se definen de nuevo y analizan más a detalle en secciones posteriores, es conveniente presentar la clasificación general de los tipos de flujo que existen.

2.2.2.1. Flujo potencial

El comportamiento de un fluido depende mucho de que el fluido esté o no bajo la influencia de superficies sólidas. En una tubería de diámetro muy grande, el centro del tubo es la región donde la influencia de la pared es pequeña el esfuerzo cortante puede despreciarse, y el comportamiento del fluido puede acercarse al de un fluido ideal, es decir, no compresible y con viscosidad cero. El flujo de un fluido que cumple con las características anteriores se denomina flujo potencial.

²⁸ POTTER, Merle C. y WIGGERT, David C. *Mecánica de Fluidos*. p. 81.

El flujo potencial tiene dos características importantes:

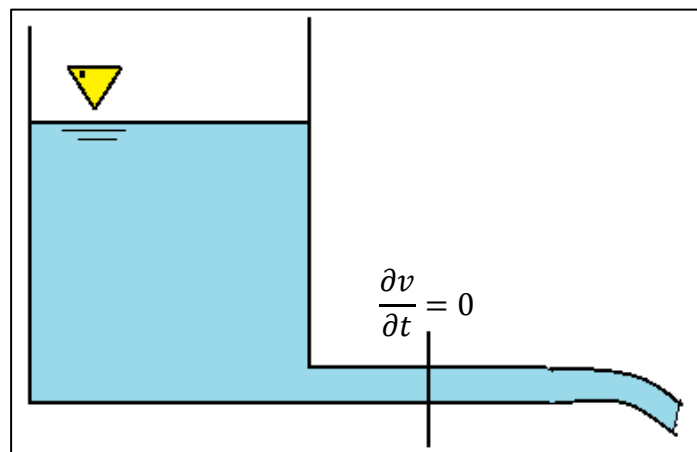
- No existen circulaciones ni remolinos dentro de la corriente, forma que el flujo potencial se denomina también flujo irrotacional.
- No existe fricción, por tanto, no hay disipación de energía mecánica en calor.

2.2.2.2. Flujo estacionario y no estacionario

El flujo estacionario o permanente ocurre cuando las condiciones en cualquier punto del fluido no cambian con el tiempo²⁹. La ecuación 30 muestra que la derivada parcial de la velocidad respecto al tiempo es igual a cero:

$$\frac{\partial v}{\partial t} = 0 \quad \text{Ec. 30}$$

Figura 11. Flujo estacionario



Fuente: CHOREQUE MORAN, Wendor. *Mecánica de Fluidos I*. p. 52.

²⁹ STREETER, Victor L. y WYIIE, E. Benjamin. *Mecánica de los Fluidos*. p. 86.

En la figura 11 se observa el caso de un tanque con nivel constante de agua, por lo tanto, el flujo en la tubería no varía respecto al tiempo.

Asimismo, en flujo estacionario la densidad, presión y temperatura no varía en función del tiempo, ver ecuaciones 31, 32 y 33 respectivamente:

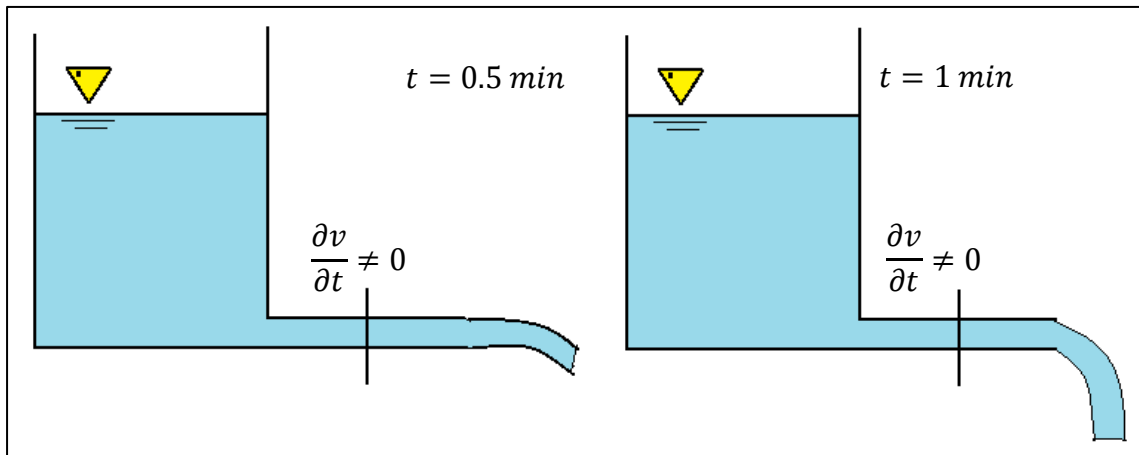
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad \text{Ec. 31}$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = 0 \quad \text{Ec. 32}$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad \text{Ec. 33}$$

En un flujo no estacionario las propiedades del flujo son función del tiempo.

Figura 12. **Flujo no estacionario**



Fuente: CHOREQUE MORAN, Wendor. *Mecánica de Fluidos I*. p. 52.

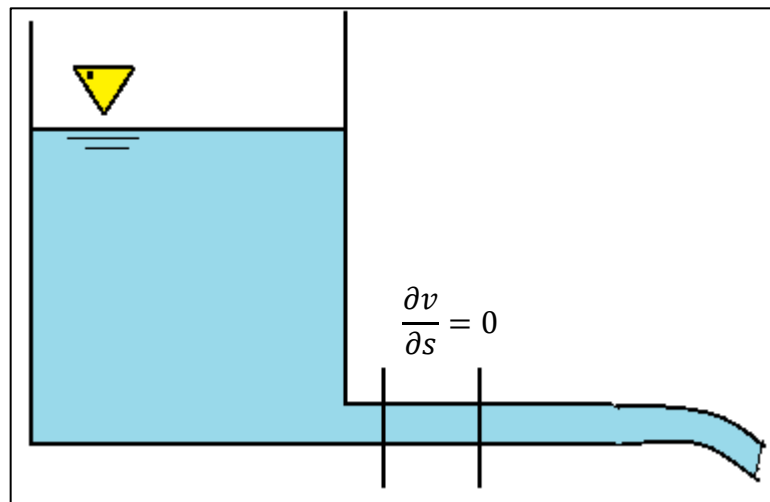
2.2.2.3. Flujo uniforme y no uniforme

Un flujo uniforme se da cuando, en todo el recorrido de un flujo, el vector de velocidad es idénticamente el mismo en magnitud y dirección, para cualquier instante dado³⁰.

En un flujo uniforme las variables hidráulicas del flujo; velocidad, presión, densidad; permanecen constantes a lo largo de la conducción. En el flujo no uniforme los valores de estas variables cambian de un punto a otro.

Un líquido que se bombea a través de un tubo recto tiene flujo uniforme, tal como se muestra en la figura 13. Un líquido que fluye a través de una sección curva o de un tubo en reducción tiene un flujo no uniforme, ver figura 14.

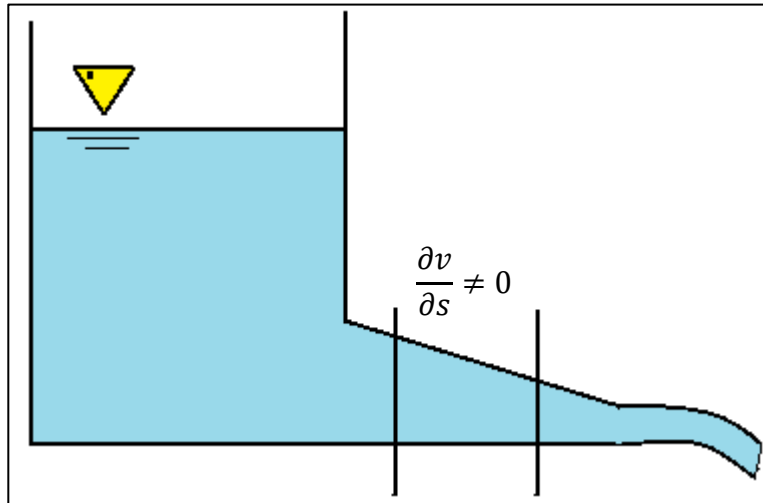
Figura 13. Flujo Uniforme



Fuente: CHOREQUE MORAN, Wendor. *Mecánica de Fluidos I*. p. 52.

³⁰ STREETER, Victor L. y WYIIE, E. Benjamin. *Mecánica de los Fluidos*. p. 86.

Figura 14. **Flujo no uniforme**



Fuente: CHOREQUE MORAN, Wendor. *Mecánica de Fluidos I*. p. 52.

2.2.2.4. **Flujos unidimensionales, bidimensionales y tridimensionales**

Como se describió en secciones anteriores: en la descripción Euleriana del movimiento; el vector de velocidad, en general, depende de tres variables espaciales y del tiempo, como se observa en la ecuación 34:

$$v = v(x, y, z, t) \quad \text{Ec. 34}$$

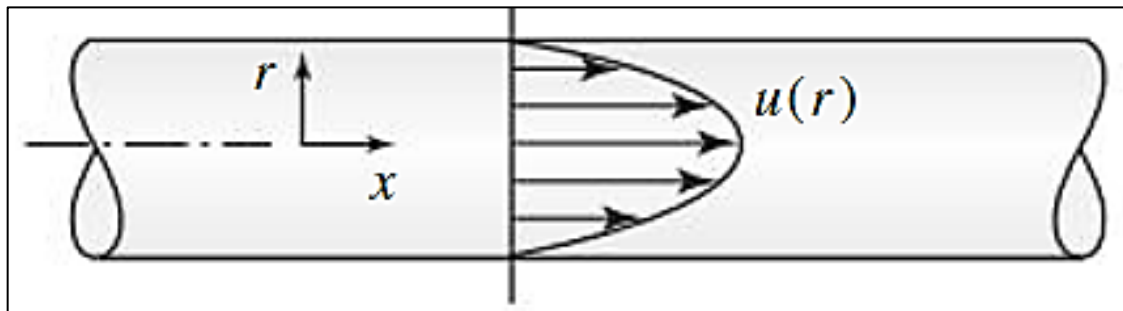
Un flujo como ese es un flujo tridimensional, porque el vector de velocidad depende de tres coordenadas espaciales. Las soluciones de problemas de flujo tridimensional son muy difíciles.

Un flujo bidimensional es un flujo en el que el vector velocidad depende sólo de dos variables espaciales, ver ecuación 35:

$$v = v(x, y) \quad \text{Ec. 35}$$

Un flujo unidimensional es un flujo en el que el vector de velocidad depende de sólo una variable espacial. Flujos como ese ocurren en tubos largos rectos o entre placas paralelas, como se muestra en la figura 15.

Figura 15. **Flujo unidimensional en un tubo**



Fuente: POTTER, Merle C. y WIGGERT, David C. *Mecánica de Fluidos*. p. 89.

La velocidad en el tubo varía sólo con r , es decir, $u = u(r)$. Un flujo de este tipo también puede ser llamado flujo desarrollado; es decir, los perfiles de velocidad no varían con respecto a la coordenada espacial en la dirección del flujo.

2.2.2.5. **Flujo laminar, de transición y turbulento**

En un flujo laminar el fluido fluye sin turbulencia. Si se inyectara un colorante, el flujo no se mezclaría con el colorante, excepto por actividad molecular, lo que se observaría entonces, sería un flujo conformado por capas de fluido que no se mezclan entre sí.

En un flujo turbulento, los movimientos del fluido varían constantemente y de forma errática. Por ello la velocidad y la presión muestran una variación aleatoria manteniendo picos máximos y mínimos; con frecuencia para describir

las características hidráulicas de este tipo de flujo se utilizan promedios estadísticos³¹.

Existe un tercer tipo de flujo de acuerdo con la turbulencia; el flujo de transición se caracteriza por ser una condición hidráulica donde un flujo varía aleatoriamente entre un flujo laminar y un flujo turbulento. Debido a esto es muy difícil describir el comportamiento del flujo de fluidos en esta región y por esto suele ser una condición en que no se recomienda operar líneas de transporte de fluidos.

Existe un parámetro adimensional llamado número de Reynolds; el cual utilizado para describir más técnicamente los flujos anteriores. La descripción detallada de los flujos de acuerdo con la turbulencia se aborda en la sección 2.3. Regímenes de flujo.

2.2.2.6. Flujo incompresible y compresible

Un flujo incompresible se da cuando la densidad de cada partícula de un fluido permanece relativamente constante conforme se desplaza a través de un campo de flujo.

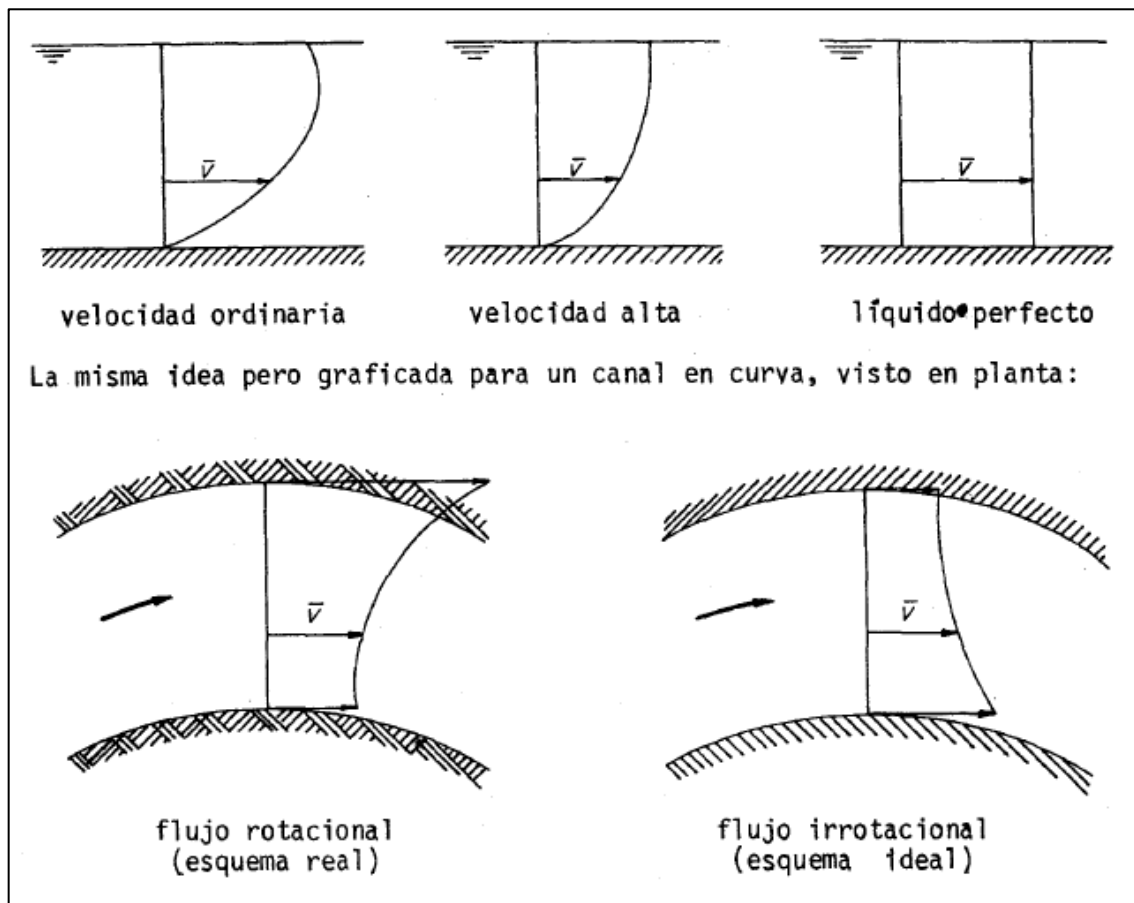
Un flujo compresible se da cuando hay una variación significativa de la densidad del fluido que es transportado a lo largo del campo de flujo, un ejemplo de esto puede ser el transporte de vapor sobrecalentado hacia un intercambiador de calor donde hay una transferencia de calor y el vapor se convierte en líquido saturado, ocurriendo un cambio de densidad brusco.

³¹ POTTER, Merle C. y WIGGERT, David C. *Mecánica de Fluidos*. p. 91.

2.2.2.7. Flujo rotacional e irrotacional

Un flujo es rotacional si en su seno el campo de vectores $rot \bar{v}$ adquiere valores distintos de cero, y es irrotacional si en todo punto y en todo instante $rot \bar{v} = 0$. Para velocidades ordinarias el movimiento del agua es rotacional; para velocidades altas puede ser considerado irrotacional. La figura 16 muestra el diagrama de velocidades en un canal, para cada situación.

Figura 16. Flujo rotación e irrotacional



Fuente: CHOREQUE MORAN, Wendor. *Mecánica de Fluidos I*. p. 54.

2.2.2.8. Concepto general de flujo volumétrico

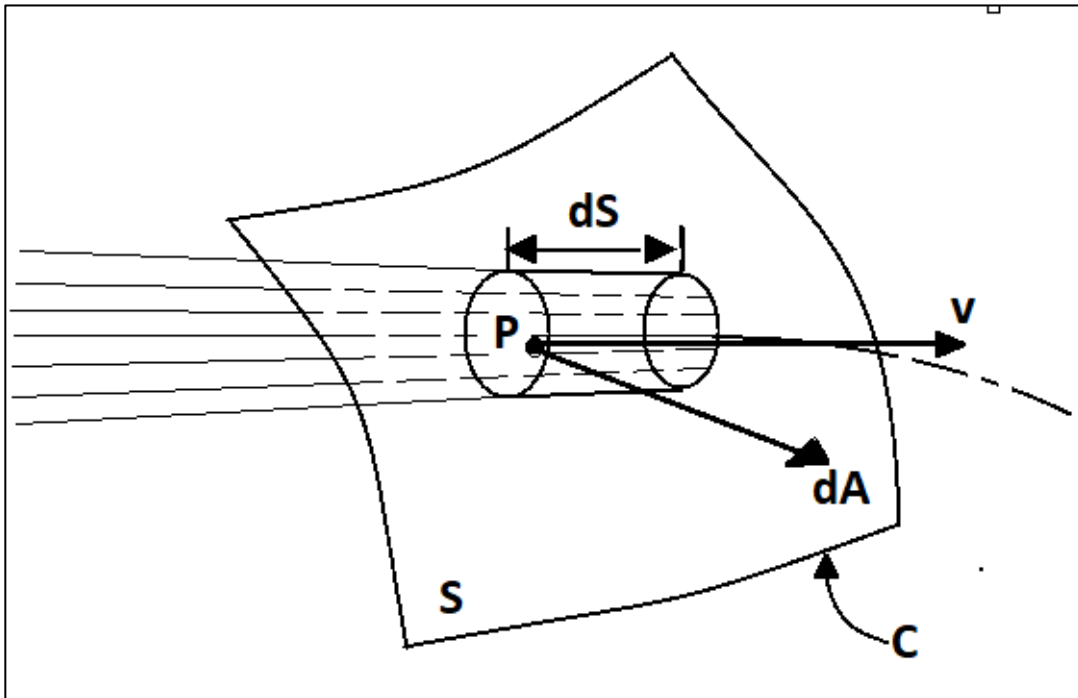
En la figura 17, un elemento infinitesimal de área (dA), de la superficie (S), la cual es limitada por la curva (C) y contiene al punto cualquiera (P). Se puede representar por el vector diferencial de superficie de acuerdo a la ecuación 36:

$$dA = dAn \quad \text{Ec. 36}$$

Donde:

n : vector unitario normal a la superficie en el punto (P).

Figura 17. Descripción de flujo volumétrico



Fuente: SOTELO ÁVILA, Gilberto. *Hidráulica general*. p. 103.

El sentido de n se considera positivo por convención. La velocidad (v) que corresponde al punto P tiene en general una dirección distinta a la de dA .

En un intervalo dt , el volumen del fluido que atraviesa el elemento de superficie dA , queda determinado por el producto escalar de los vectores: el diferencial de arco ds sobre la línea de corriente que pasa por P y el vector diferencial de superficie dA .

Entonces considerando que $ds = v dt$, el volumen del fluido que pasa a través del elemento dA se expresa por la ecuación 37:

$$dv = ds \cdot dA = v \cdot dA dt \quad Ec. 37$$

El flujo de volumétrico (\dot{V}) a través de toda la superficie (S) queda definido por la ecuación 38:

$$\dot{V} = \frac{dv}{dt} = \int_A v \cdot dA \quad Ec. 38$$

En la práctica, se realizan una suposición para simplificar la ecuación del flujo volumétrico; si en un flujo de la superficie (S) se asumen que las líneas de corriente son normales a ella en cada punto, entonces la ecuación 38 se reduce a la ecuación 39:

$$\dot{V} = \int \int_A v dA \quad Ec. 39$$

Introduciendo el concepto de velocidad media (v), se supone que la velocidad se distribuye uniformemente sobre toda la superficie, con un valor constante y en dirección perpendicular a la misma, ver ecuación 40.

$$v = \frac{\int \int_A v \, dA}{A} \quad Ec. 40$$

Sustituyendo la ecuación 39 en la 40 y despejando se obtiene la definición común del flujo volumétrico, ver ecuación 41:

$$\dot{V} = v \cdot A \quad Ec. 41$$

2.2.3. Análisis del volumen de control finito

Existen cuatro leyes físicas que son fundamentales para describir la mecánica de fluidos.

- Ley de la conservación de la materia
- Segunda ley de Newton
- Primera ley de la termodinámica
- Segunda ley de la termodinámica

El análisis teórico de estas leyes, aplicado al flujo de fluidos utilizando métodos matemáticos permite la obtención de ecuaciones que son de suma importancia para el estudio del flujo de fluidos. Estas son:

- Ecuación de continuidad
- Ecuación de cantidad de movimiento
- Ecuación de cantidad de movimiento

- Ecuación del momento de la cantidad de movimiento

Existen dos métodos para el análisis del movimiento de los flujos: Lagrangiano y Euleriano.

En el presente trabajo se utiliza el método euleriano, para deducir estas ecuaciones. Este método estudia el flujo con base en el análisis de un volumen adecuado de fluido llamado volumen de control fijo respecto a un sistema coordinado y de forma y magnitud constantes. El contorno de dicho volumen se llama superficie de control.

En el análisis se considera el intercambio de masa, energía y cantidad de movimiento, a través de las fronteras de volumen de control que puede ser de tamaño diferencial o de magnitud finita³².

El método de Euler consiste en lo siguiente:

Adoptar una porción fija del espacio dentro del seno del fluido de forma y tamaño constantes. Esta porción del espacio se llama volumen de control y su delimitación superficie de control; escoger una porción de masa fluida de modo que en un instante dado coincida con el volumen de control. Esta porción de masa se llama "sistema" y su delimitación contorno; considerar la coincidencia en un instante t , el sistema desplazado un dt después y aplicarle los principios de la mecánica³³.

En esta sección se analiza y estudia, el uso del concepto volumen de control y su aplicación en la deducción de las ecuaciones fundamentales de la mecánica de fluidos.

³² SOTELO ÁVILA, Gilberto. *Hidráulica general*. p. 112-114.

³³ CHOREQUE MORAN, Wendor. *Mecánica de Fluidos I*. p. 61.

2.2.3.1. Ecuación de continuidad

En esta sección se deduce la ecuación de la continuidad.

2.2.3.1.1. Ley de conservación de la materia

La ley que establece que la masa debe conservarse es:

En un sistema aislado, durante toda reacción química ordinaria la masa total en el sistema permanece constante, es decir, la masa consumida de los reactivos es igual a la masa de los productos.

Este postulado indica que la materia no puede crearse o destruirse, sí que solamente puede transformarse. Lo que significa que en un sistema o volumen de control la materia que entra es igual a la materia que sale, por lo tanto, permanece constante en el tiempo³⁴, de tal forma que la derivada parcial de la materia respecto al tiempo es igual a cero, como lo indica la ecuación 42:

$$\frac{\partial m}{\partial t} = 0 \quad \text{Ec. 42}$$

2.2.3.1.2. Deducción de la ecuación de continuidad

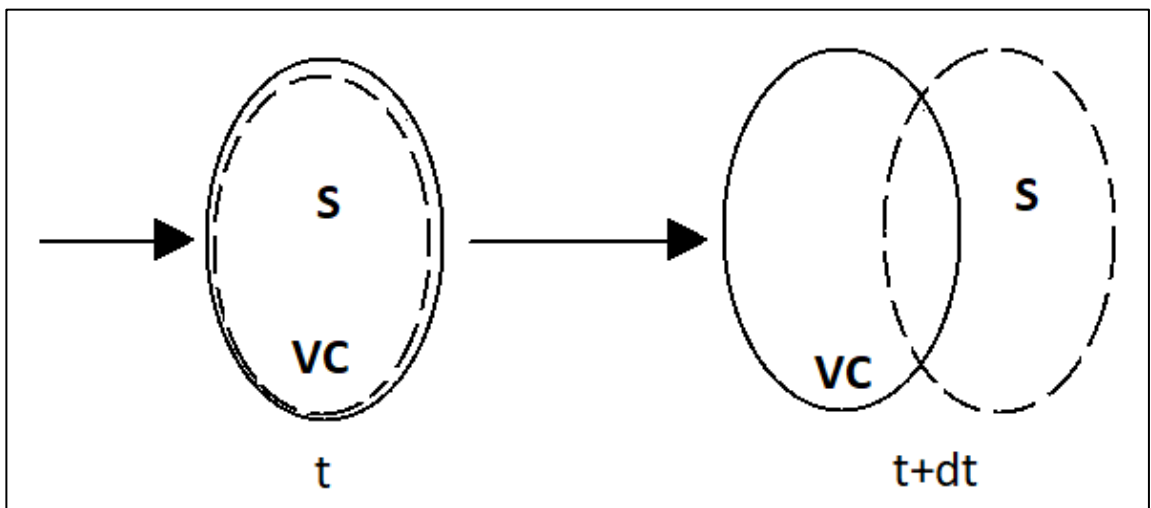
La masa de un volumen de control se puede expresar en una forma general como se indica en la ecuación 43.

³⁴ STREETER, Victor L. y WYIIE, E. Benjamin. *Mecánica de los Fluidos*. p. 94.

$$m = \int \rho dV \quad \text{Ec. 43}$$

Para un sistema y un volumen de control fijo indeformable que coinciden en un instante dado, como se ilustra en la figura 18:

Figura 18. **Coincidencia de un sistema y un volumen de control**



Fuente: CHOREQUE MORAN, Wendor. *Mecánica de Fluidos I*. p. 61.

La masa en el volumen de control en el momento t es $m_{VC t}$; la masa en el volumen de control en el momento $t + dt$ es $m_{VC (t+dt)}$; la masa que ha salido del VC en el intervalo dt es dm_s ; la masa que ha entrado en el VC en el intervalo dt es dm_e .

Debido a la conservación de la materia, la masa en el sistema S permanece invariable, ver ecuación 44:

$$m_{VC t} = m_{VC (t+dt)} + dm_s - dm_e \quad \text{Ec. 44}$$

Dividiendo entre dt y ordenando se obtiene la ecuación 45:

$$\frac{m_{VC(t+dt)} - m_{VCt}}{dt} = \frac{dm_e - dm_s}{dt} \quad Ec. 45$$

Es decir, que la rapidez variación de la masa en el volumen de control es igual al flujo neto de masa entrante.

El primer miembro de la ecuación 45 es igual a la ecuación 46:

$$\frac{dm}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} \rho dV_0 = \int_{VC} \frac{\partial \rho}{\partial t} dV_0 \quad Ec. 46$$

El segundo miembro de la ecuación 45, es el flujo neto de masa entrante es, ver ecuación 47:

$$\frac{dm_e - dm_s}{dt} = - \int_{SC} \rho \dot{V} dA \quad Ec. 47$$

Reemplazado las ecuaciones 46 y 47 en la ecuación 45, se obtiene la ecuación 48, la cual es la expresión más amplia de la ecuación de continuidad para un volumen de control.

$$\int_{VC} \frac{\partial \rho}{\partial t} dV_0 = - \int_{SC} \rho \dot{V} dA \quad Ec. 48$$

Para un flujo estacionario se anula el primer miembro de la ecuación 48 y se obtiene la ecuación 49 para flujos estacionarios.

$$\int_{SC} \rho \dot{V} dA = 0 \quad \text{Ec. 49}$$

Para un flujo en una tubería, ver figura 19, como el fluido no atraviesa las paredes sólo quedan las áreas externas, reduciéndose la expresión a la ecuación 50:

$$\rho_2 v_2 dA_2 - \rho_1 v_1 dA_1 = 0 \quad \text{Ec. 50}$$

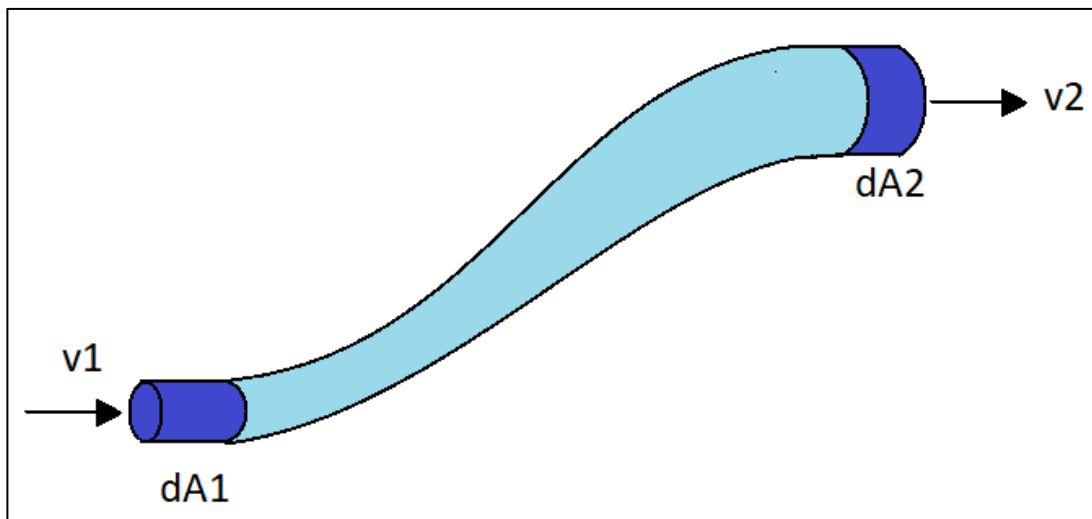
Despejando se obtiene la ecuación 51:

$$\rho_1 v_1 dA_1 = \rho_2 v_2 dA_2 \quad \text{Ec. 51}$$

Asumiendo que se analiza un tubo de sección constante y el flujo tiene una velocidad media constante la expresión se simplifica a la ecuación 52:

$$\rho_1 v_1 A_1 = \rho_2 v_2 A_2 \quad \text{Ec. 52}$$

Figura 19. **Flujo en un tubo**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Paint.

Además, si el fluido es incompresible se puede afirmar que la densidad en los puntos 1 y 2 es la misma, ver ecuación 53:

$$\rho_1 = \rho_2 \quad Ec.53$$

Por lo tanto, la ecuación de continuidad más simple se muestra en la ecuación 54:

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 = \dot{V}_1 = \dot{V}_2 = cte. \quad Ec.54$$

2.2.3.2. Ecuaciones de la cantidad de movimiento lineal y de momento de la cantidad de movimiento

A continuación, se presentarán las deducciones de las ecuaciones de cantidad de movimiento y momento de la cantidad de movimiento.

2.2.3.2.1. Segunda ley de Newton

La segunda ley de Newton, también llamada ecuación de cantidad de movimiento establece que:

La fuerza resultante que actúa en un sistema es igual a la velocidad con la que cambia la cantidad de movimiento del sistema³⁵.

La cantidad de movimiento de una partícula de masa de un fluido es una cantidad vectorial dada por $\rho v dA$; por consiguiente, la segunda ley de Newton

³⁵ POTTER, Merle C. y WIGGERT, David C. *Mecánica de Fluidos*. p. 116.

puede ser expresada en un marco de referencial inercial como puede verse en la ecuación 55:

$$\sum F = \frac{\partial}{\partial t} \int_{sist} v \rho v dA \quad Ec.55$$

Donde:

F : Fuerza (cualquier fuerza del sistema) (N).

t : tiempo (s).

v : velocidad (m/s).

ρ : densidad (kg/m^3).

2.2.3.2.2. Deducción de la ecuación de cantidad de movimiento lineal

Un sistema de referencia como el visto en el punto anterior se denomina Inercial. Un sistema de coordenadas fijo es inercial. Es un sistema de coordenadas que se mueve en línea recta con velocidad constante, por lo que carece de aceleración, es inercial.

Antes de deducir la ecuación de la cantidad de movimiento, el teorema del transporte de Reynolds es una expresión matemática que relaciona la derivada lagrangiana de una integral de volumen de un sistema, con una integral en derivadas eulerianas. En otras palabras, este teorema relaciona la tasa de cambio en el tiempo de una propiedad extensiva H con la generación y el flujo de la propiedad intensiva correspondiente η , ver ecuación 56.

$$\frac{DH}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{sc} \rho \eta v dA + \int_{sc} \rho \eta v \hat{n} dA \quad Ec.56$$

Cuando un volumen de control coincide con un sistema durante algún instante, las fuerzas que actúan sobre el sistema y las fuerzas que actúan sobre el contenido del volumen de control coincidente son idénticas instantáneamente, ver ecuación 57:

$$\sum F_{sistema} = \sum F_{\text{contenido del volumen de control coincidente}} \quad Ec. 57$$

Además, para un sistema y el contenido de un volumen de control coincidente fijo y que no se deforma, el teorema de transporte de Reynolds (con H igual a la cantidad de movimiento y n igual a la velocidad) permite obtener la ecuación 58:

$$\frac{D}{Dt} \int_{sistema} v \rho v dA = \frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} v \rho v dA + \int_{SC} v \rho v \hat{n} dA \quad Ec. 58$$

La ecuación 58 establece que la razón de cambio con respecto al tiempo de la cantidad de movimiento lineal del sistema se expresa como la suma de dos cantidades de volumen de control; la razón de cambio con respecto al tiempo de la cantidad de movimiento lineal del contenido del volumen de control (VC), y la razón de flujo neto de la cantidad de movimiento lineal a través de la superficie de control (SC). A medida que las partículas de masa se mueven hacia fuera del volumen de control a través de la superficie de control, transportan cantidad de movimiento hacia dentro o hacia a fuera. Así, el flujo de la cantidad de movimiento no debe parecer más extraño que el flujo de masa³⁶.

³⁶ MUNSON, Bruce R., OKIISHI, Theodore H., YOUNG, Donald f. *Fundamentos de Mecánica de Fluidos*. p. 234-235.

Para un volumen de control fijo inercial y que no se deforma, la cantidad de movimiento con un planteamiento matemático basado en la segunda ley de movimiento de Newton, se describe de acuerdo a la ecuación 59:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} v \rho v dA + \int_{SC} v \rho v \hat{n} dA = \sum F_{\text{contenido del volumen de control}} \quad \text{Ec. 59}$$

La ecuación 59 se denomina ecuación de cantidad de movimiento lineal.

2.2.3.2.3. Deducción de la ecuación de momento de la cantidad de movimiento

El torque o par es necesario para describir el momento de una fuerza con respecto a un eje. La ecuación de cantidad de movimiento lineal también se puede usar para resolver problemas en los que se tienen torques. Sin embargo, al formar el momento de la cantidad de movimiento lineal y la fuerza resultante asociada a cada partícula de fluido con respecto a un punto en un sistema inercial de coordenadas, se obtendrá una ecuación de momento de la cantidad de movimiento que relaciona torque y flujo de cantidad de movimiento angular para el contenido de un volumen de control.

Aplicar la segunda ley de movimiento de Newton a una partícula de fluido se obtiene la ecuación 60:

$$\frac{D}{Dt} (v \rho v dA) = dF_{\text{partícula}} \quad \text{Ec. 60}$$

Donde:

v : velocidad de la partícula medida en un sistema de referencial inercial.

ρ : densidad de la partícula.

vdA : volumen infinitesimal de la partícula

$dF_{partícula}$: fuerza resultante externa que actúa sobre la partícula.

Si se forma el momento de cada miembro de la ecuación 60 con respecto al origen de un sistema inercial de coordenadas, se obtiene la ecuación 61:

$$r \times \frac{D}{Dt}(v\rho vdA) = r \times dF_{partícula} \quad Ec. 61$$

Donde:

r : es el vector de posición que va del origen del sistema inercial de coordenadas a la partícula de fluido, ver ecuación 62.

$$\frac{D}{Dt}[(r \times v)\rho vdA] = \frac{Dr}{Dt} \times v\rho vdA + r \times \frac{D(v\rho vdA)}{Dt} \quad Ec. 62$$

Y si la velocidad se describe de acuerdo a la ecuación 63:

$$\frac{Dr}{Dt} = v \quad Ec. 63$$

Así como, la ecuación 64:

$$v \times v = 0 \quad 64$$

Al combinar las ecuaciones 61, 62, 63 y 64 se obtiene la ecuación 65:

$$\frac{D}{Dt}[(r \times v)\rho vdA] = r \times dF_{partícula} \quad Ec. 65$$

La ecuación 65 es válida para toda partícula del sistema. Para un sistema, entendiéndose una colección de partículas de fluido, es necesario usar la sumatoria de ambos miembros de la ecuación 65 para obtener, la ecuación 66:

$$\int_{sistema} \frac{D}{Dt} [(r \times v)\rho v dA] = \sum (r \times F)_{sistema} \quad Ec. 66$$

Donde el segundo miembro de la ecuación 66, se puede igualar como se ve en la ecuación 67:

$$\sum r \times dF_{partícula} = \sum (r \times F)_{sistema} \quad Ec. 67$$

Se observa que sacando la derivada de la ecuación 66 se obtiene la ecuación 68:

$$\frac{D}{Dt} \int_{sistema} (r \times v)\rho v dA = \int_{sistema} \frac{D}{Dt} [(r \times v)\rho v dA] \quad Ec. 68$$

Ya que el orden secuencial de la diferenciación e integración se puede invertir sin consecuencias. Así, a partir de las ecuaciones 66 y 68 se obtiene la ecuación 69:

$$\frac{D}{Dt} \int_{sistema} (r \times v)\rho v dA = \sum (r \times F)_{sistema} \quad Ec. 69$$

O bien, describiendo la ecuación anterior en palabras: primer miembro, razón de cambio con respecto al tiempo del momento de la cantidad de movimiento del sistema; segundo miembro, suma de las torques externas que actúan sobre el sistema.

Para un volumen de control que coincide durante un instante con el sistema, los torques que actúan sobre el sistema y sobre el contenido del volumen de control son idénticas, ver ecuación 70:

$$\sum (r \times F)_{sistema} = \sum (r \times F)_{VC} \quad Ec.70$$

Además, para el sistema y el contenido del volumen de control coincidente fijo y que no se deforma, el teorema de transporte de Reynolds conduce a la ecuación 71:

$$\frac{D}{Dt} \int_{sistema} (r \times v) \rho v dA = \frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} (r \times v) \rho v dA + \int_{SC} (r \times v) \rho v \hat{n} dA \quad Ec.71$$

Para un volumen de control fijo que no se deforma, se combinan las dos ecuaciones anteriores para obtener la ecuación 72, que corresponde a la ecuación de momento de la cantidad de movimiento lineal ³⁷:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} (r \times v) \rho v dA + \int_{SC} (r \times v) \rho v \hat{n} dA = \sum (r \times F)_{\substack{\text{contenido del volumen} \\ \text{de control}}} \quad Ec.72$$

La ecuación 72 se denomina ecuación del momento de la cantidad de movimiento.

2.2.3.3. Ecuación de la energía

La ecuación de la energía, es la base de la ecuación general de la energía tratada en apartados posteriores, por ello es importante saber su deducción.

³⁷ MUNSON, Bruce R., OKIISHI, Theodore H., YOUNG, Donald f. *Fundamentos de Mecánica de Fluidos*. p. 251-253.

2.2.3.3.1. Primera ley de la termodinámica

La ley que relaciona la transferencia de calor, el trabajo y el cambio de energía es la primera ley de la termodinámica; la cual establece que:

La velocidad de transferencia de calor a un sistema menos la velocidad con la que el sistema realiza trabajo es igual a la velocidad con la que cambia la energía del sistema.

De acuerdo con esta aseveración tanto la densidad como la energía específica pueden cambiar de un punto a otro en el sistema, y puede expresarse como la ecuación 73;

$$\dot{Q} - \dot{W} = \frac{D}{Dt} \int_{\text{sistema}} e\rho d\dot{V} \quad \text{Ec. 73}$$

Donde:

\dot{Q} : flujo de calor.

\dot{W} : flujo de trabajo.

t : tiempo.

e : energía específica.

ρ : densidad.

\dot{V} : Flujo volumétrico

2.2.3.3.2. Ecuación de la energía

Generalizando la ecuación 73 se dice que: la razón de aumento con respecto al tiempo de la energía total almacenada del sistema es igual a la razón

neta de cambio con respecto al tiempo de la adición de energía por transferencia de calor hacia el sistema.

En forma matemática esto se describe, como se ve en la ecuación 74:

$$\begin{aligned} \frac{D}{Dt} \int_{sistema} ep d\dot{V} &= \left(\sum \dot{Q}_{entrada} - \sum \dot{Q}_{salida} \right)_{sistema} \\ &+ \left(\sum \dot{W}_{entrada} - \sum \dot{W}_{salida} \right)_{sistema} \quad Ec. 74 \end{aligned}$$

La ecuación 74 es válida para sistemas de referencias inerciales y no inerciales. En un volumen de control coincidente con un sistema durante un instante se puede afirmar que la energía del sistema es igual a la energía del volumen de control, ver ecuación 75:

$$\left(\dot{Q}_{neta\ entrada} + \dot{W}_{neta\ entrada} \right)_{sistema} = \left(\dot{Q}_{neta\ entrada} + \dot{W}_{neta\ entrada} \right)_{volumen\ de\ control\ coincidente} \quad Ec. 75$$

Para el sistema y el contenido del volumen de control coincidente fijo y que no se deforma, el teorema de transporte de Reynolds permite obtener la ecuación 76:

$$\frac{D}{Dt} \int_{sistema} ep d\dot{V} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} ep d\dot{V} + \int_{SC} epv \cdot \hat{n} dA \quad Ec. 76$$

Al combinar las ecuaciones 75 y 76 se obtiene la fórmula del volumen de control para la primera ley de la termodinámica, ver ecuación 77:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} e \rho d\dot{V} + \int_{SC} e \rho v \cdot \hat{n} dA = \left(\dot{Q}_{entrada\ neta} + \dot{W}_{entrada\ neta} \right)_{VC} \quad Ec. 77$$

En general se realizan diversas suposiciones: se eligen volúmenes de control con en un tubo; se considera que la transferencia de potencia de esfuerzo tangencial del fluido es pequeña y se puede ignorar; entre otros. Con estas suposiciones se obtiene la ecuación de la energía, ver ecuación 78:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} e \rho d\dot{V} + \int_{SC} \left(u + \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} + gz \right) \rho v \cdot \hat{n} dA = \dot{Q}_{entrada\ neta} + \dot{W}_{entrada\ neta\ en\ el\ eje} \quad Ec. 78$$

2.2.3.3.3. Segunda ley de la termodinámica

La segunda ley de la termodinámica establece que:

En un estado de equilibrio, los valores que toman los parámetros característicos de un sistema termodinámico aislado son tales que maximizan el valor de una cierta magnitud que está en función de dichos parámetros, llamada entropía.

La entropía de un sistema es una magnitud física abstracta que la mecánica estadística identifica con la aleatoriedad de un sistema. Debido a la entropía entonces surge el concepto de irreversibilidad de un proceso; si un flujo unidimensional estable incompresible con fricción se lleva de un punto a otro a través de una tubería, entonces el fluido transportado llegara obtener un estado de equilibrio, del cual no es posible revertirlo. Más concretamente lo que ocurre que es en el proceso la energía es disipada en otras formas de energía.

La ecuación 79 es un enunciado general de la segunda ley de la termodinámica para un flujo:

$$\frac{D}{Dt} \int_{sistema} s \rho d\dot{V} \geq \sum \left(\frac{\dot{Q}_{entrada\ neta}}{T} \right)_{sistema} \quad Ec. 79$$

El miembro derecho de la ecuación 79 es idéntico para el sistema y el volumen de control en el instante en que éstos coinciden, se observa en la ecuación 80:

$$\sum \left(\frac{\dot{Q}_{entrada\ neta}}{T} \right)_{sistema} = \sum \left(\frac{\dot{Q}_{entrada\ neta}}{T} \right)_{VC} \quad Ec. 80$$

A partir del principio de irreversibilidad, que es descrito por la ecuación 80, se obtiene la ecuación general de la energía que se tratará en las secciones posteriores.

2.2.4. Ecuación de Bernoulli

La ecuación de Bernoulli es una interpretación de la conservación de energía y la aplicación de la segunda ley de Newton aplicado a un flujo estacionario. No se realizará la deducción ya que es un proceso tedioso, pero si es importante hacer notorio que las secciones anteriores son las bases teóricas para la deducción de la ecuación de Bernoulli.

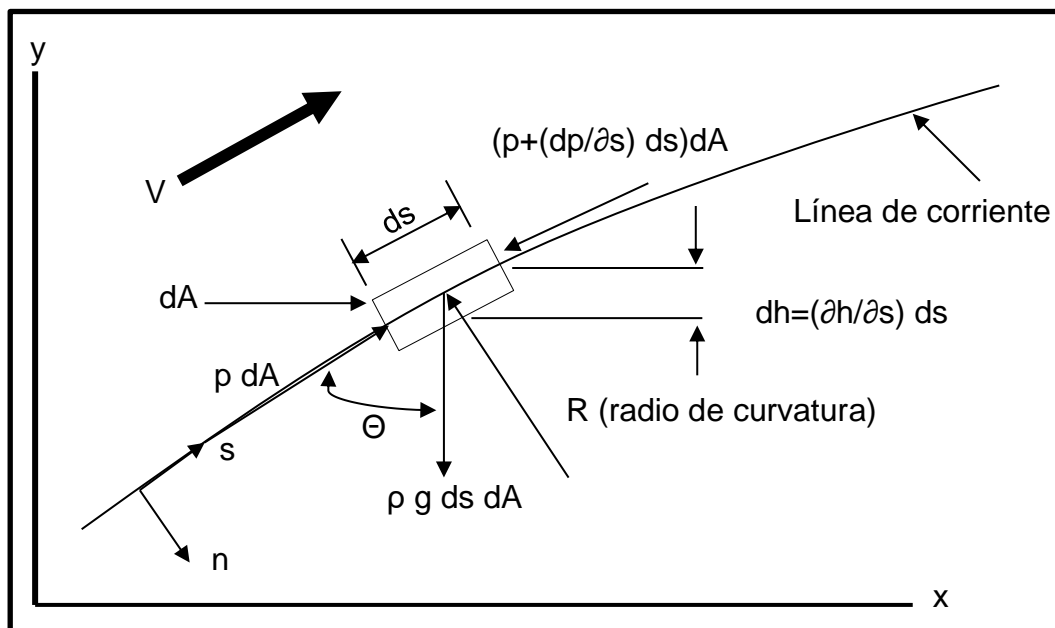
La ecuación de Bernoulli, a diferencia la mayoría de las ecuaciones que se han tratado, probablemente se utiliza con más frecuencia en aplicaciones de flujo de fluidos. Con frecuencia es mal utilizada y es necesario entender sus

limitaciones. Las limitaciones de la ecuación de Bernoulli se originan debido a las suposiciones hechas en su derivación.

La deducción de la ecuación de Bernoulli se inicia con la aplicación de la segunda ley de Newton a una partícula de fluido. Se utiliza una partícula cilíndrica infinitesimal colocada como se muestra en la figura 20, con longitud (ds) y área de sección transversal (dA). Las fuerzas que actúan en la partícula son las fuerzas de presión y el peso. Si se suman las fuerzas en la dirección del movimiento, la dirección (s), se obtiene la ecuación 81:

$$P dA - \left(P + \frac{\partial P}{\partial s} ds \right) dA - P g ds dA \cos \theta = \rho ds dA a_s \quad \text{Ec. 81}$$

Figura 20. **Partícula desplazándose a lo largo de una línea de corriente**



Fuente: POTTER, Merle C. y WIGGERT, David C. *Mecánica de Fluidos*. p. 95.

Donde:

a_s : es la aceleración de la partícula en la dirección s . Está dado por la ecuación 82:

$$a_s = v \frac{\partial v}{\partial s} + \frac{\partial v}{\partial t} \quad Ec. 82$$

Debido a que se supone un flujo continuo, la razón de cambio de la velocidad respecto al tiempo es igual a cero, ver ecuación 83.

$$\frac{\partial v}{\partial t} = 0 \quad Ec. 83$$

La ecuación 84 describe la relación entre la altura (dh) y la dirección (ds):

$$dh = ds \cos \theta = \frac{\partial h}{\partial s} ds \quad Ec. 84$$

Despejando se obtiene la ecuación 85:

$$\cos \theta = \frac{\partial h}{\partial s} \quad Ec. 85$$

Luego, después de dividir entre ds da , y utilizando las ecuaciones 82, 84 y 85 para a_s y $\cos \theta$ se deduce la ecuación 86:

$$-\frac{\partial p}{\partial s} - pg \frac{\partial h}{\partial s} = \rho v \frac{\partial v}{\partial s} \quad Ec. 86$$

Ahora, se supone una densidad constante, reduciendo la ecuación 86 a la ecuación 87:

$$v \frac{\partial v}{\partial s} = \frac{\partial \left(\frac{v^2}{2} \right)}{\partial s} \quad \text{Ec. 87}$$

Entonces la ecuación 86 se reescribe como se indica en la ecuación 88:

$$\frac{\partial}{\partial s} \left(\frac{v^2}{2} + \frac{p}{\rho} + gh \right) = 0 \quad \text{Ec. 88}$$

Esta ecuación se satisface si, a lo largo de la línea de corriente, se cumple la ecuación 89:

$$\frac{v^2}{2} + \frac{P}{\rho} + gh = \text{constante} \quad \text{Ec. 89}$$

Donde la constante puede tener un valor diferente en una línea de corriente diferente. Entre dos puntos en la misma línea de corriente, se puede escribir la siguiente igualdad, de tal forma que se obtiene la ecuación 90:

$$\frac{v_1^2}{2} + \frac{P_1}{\rho} + gh_1 = \frac{v_2^2}{2} + \frac{P_2}{\rho} + gh_2 \quad \text{Ec. 90}$$

Dividiendo la ecuación 90 entre g, se obtiene la ecuación 91:

$$\frac{v_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\rho g} + h_1 = \frac{v_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\rho g} + h_2 \quad \text{Ec. 91}$$

Cualquier ecuación ya sea la 90 o 91, es la conocida ecuación de Bernoulli, nombrada así en honor de Daniel Bernoulli³⁸.

La cual está basada en las siguientes suposiciones:

- Flujo no viscoso (no hay esfuerzos cortantes)
- Flujo continuo (no hay aceleración)
- A lo largo de la línea de corriente $(a_s = v \frac{\partial v}{\partial s})$
- Densidad constante $(\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0)$
- Marco de referencial inercial

2.2.4.1. Línea de energía

El teorema de Bernoulli es una forma de expresión de aplicación de la ley de conservación de la energía al flujo de fluidos en una tubería. La energía total en un punto cualquiera por encima de un plano horizontal arbitrario fijado como referencia, es igual a la suma de la cabeza de altura, cabeza de presión y a la cabeza debida a la velocidad, como se ve en la ecuación 92:

$$\frac{v^2}{2g} + \frac{P}{\rho g} + h = H \quad \text{Ec. 92}$$

Si las pérdidas por rozamiento se desprecian y no se aporta o se toma ninguna energía del sistema de tuberías (bombas o turbinas), la cabeza total o energía total en la ecuación anterior permanecerá constante para cualquier punto del fluido. Sin embargo, en la realidad existen pérdidas o incrementos de energía que deben incluirse en la ecuación de Bernoulli.

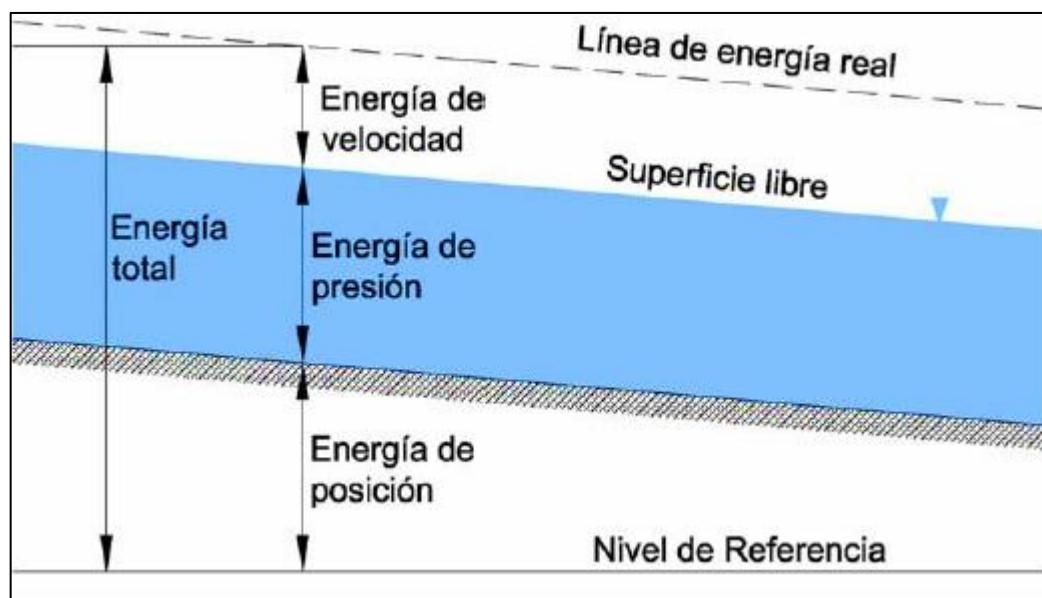
³⁸ POTTER, Merle C. y WIGGERT, David C. *Mecánica de Fluidos*. p. 95-99.

Entonces se puede decir que la “línea de energía”, es la suma de energía cinética, potencial y de presión para un flujo a lo largo de un tubo, y que desprecia la energía disipada por la fricción, calor o cualquier otro tipo de transferencia de energía.

2.2.4.2. Línea piezométrica

La figura 21 describe que la línea piezométrica es el resultado de la suma de las cargas de energía potencial y de presión, por lo tanto, la línea piezométrica se define como la energía hidráulica disponible en el flujo.

Figura 21. **Balance de energía para dos puntos de un flujo**



Fuente: *Energía del flujo en canales abiertos*. www.cuevadelcivil.com/2011/02/energia-del-flujo-en-canales-abiertos.html. Consulta: 6 de octubre de 2019.

Como ya se ha notado la ecuación de Bernoulli no es capaz de describir lo anterior por completo. Al mismo tiempo se pueden hacer las siguientes generalizaciones:

- La línea de energía no puede ser horizontal o con inclinación ascendente en la dirección del flujo, si el líquido es real u no adquiere energía adicional desde el exterior. La diferencia de nivel de la línea de energía en dos puntos distintos representa la pérdida de carga o disipación de energía por unidad de peso del líquido.
- La línea de energía y la de cargas piezométricas coinciden y quedan al nivel de la superficie libre para un volumen de líquido en reposo.
- En el caso de que la línea de cargas piezométricas quede en algún tramo por debajo del eje de la vena líquida, las presiones locales en ese tramo son menores que la presión cero de referencia que se utilice.

2.2.5. Ecuación general de la energía

La ecuación general de la energía es una la solución de la ecuación de la energía para un flujo incompresible uniforme continuo, sin embargo, en cursos elementales de mecánica de fluidos se suele enseñar como una ampliación del teorema de Bernoulli, lo cual es incorrecto, puesto que para su deducción se requiere analizar la ecuación de la energía para un volumen de control, como se muestra en la ecuación 93:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} e \rho dV + \int_{SC} e \rho v \cdot \hat{n} dA = \left(\dot{Q}_{neta\ entrada} + \dot{W}_{neta\ entrada} \right)_{VC} \quad Ec. 93$$

A esta ecuación se le agrega la definición formal de la razón de trabajo en un flujo, la cual no será deducida debido a que no es el objetivo de este trabajo. El término de razón de trabajo se describe por la ecuación 94:

$$\dot{W} = \int_{SC} P \hat{n} v dA + \dot{W}_s + \dot{W}_{cortante} + \dot{W}_I \quad Ec. 94$$

Donde:

$\int_{SC} p \hat{n} v dA$: razón del trabajo que resulta de la fuerza generada por una presión que se desplaza de la superficie de control. A menudo conocida como trabajo de flujo.

\dot{W}_s : razón de trabajo que resulta de flechas rotatorias como las de una bomba o turbina, o la energía eléctrica equivalente.

$\dot{W}_{cortante}$: razón de trabajo producida por el esfuerzo cortante que actúa en un límite móvil tal como una banda móvil.

\dot{W}_I : razón de trabajo que ocurre cuando el volumen de control se desplaza con respecto a un marco de referencial fijo (inercial).

Cuando el término de razón de trabajo de la ecuación 94 se sustituye en la ecuación 93, se obtiene la ecuación 95 o ecuación de energía:

$$\dot{Q} - \dot{W}_s - \dot{W}_{cortante} - \dot{W}_I = \frac{d}{dt} \int_{VC} e P d\dot{V} + \int_{SC} \left(e + \frac{P}{\rho} \right) \rho \hat{n} \cdot v dA \quad Ec. 95$$

La energía específica (e) se define como se indica en la ecuación 96:

$$e = \frac{v^2}{2} + gz + \bar{u} \quad Ec. 96$$

Si se sustituyen los términos de energía cinética, potencial y la energía interna específica (\bar{u}) en la ecuación (95) se obtiene la ecuación 97:

$$\begin{aligned} \dot{Q} - \dot{W}_s - \dot{W}_{cortante} - \dot{W}_I \\ = \frac{d}{dt} \int_{VC} \left(\frac{v^2}{2} + gz + \bar{u} \right) \rho d\dot{V} \\ + \int_{SC} \left(\left(\frac{v^2}{2} + gz + \bar{u} \right) + \frac{P}{\rho} \right) \rho \hat{n} \cdot v dA \quad Ec. 97 \end{aligned}$$

Esta forma general de la ecuación de energía es útil al analizar problemas de flujo que pudieran incluir efectos que dependen del tiempo y perfiles no uniformes³⁹.

2.2.5.1. Pérdidas de energía

Antes de simplificar la ecuación para flujo continuo y perfiles uniformes, se introduce la noción de pérdidas. Este tema será tratado con mayor detalle en la sección 2.7.

En un flujo, las formas útiles de energía: energía cinética y energía potencial; y el trabajo de flujo se convierten en formas de energía inútiles: energía interna o transferencia de calor. Si se supone que la temperatura del volumen de control permanece constante, la energía no cambia y las pérdidas son equilibradas por la transferencia de calor a través de la superficie de control. Esta transferencia de calor puede ser el resultado de convección, radiación o conducción en las superficies de control. En la descripción detallada de estos efectos se apunta hacia la teoría de la transferencia de calor. Sin embargo, esto

³⁹ POTTER, Merle C. y WIGGERT, David C. *Mecánica de Fluidos*. p. 131.

se simplifica en este trabajo como \dot{Q} . De este modo pérdidas, ver ecuación 98, se definen como la suma de todos los términos que representan formas de energía inútiles:

$$p\acute{e}rdidas = -\dot{Q} + \frac{d}{dt} \int_{VC} \bar{u} \rho dV + \int_{SC} \bar{u} \rho v \cdot \hat{n} dA \quad Ec. 98$$

Ahora la ecuación 97 se escribe como se observa en la ecuación 99:

$$\begin{aligned} & -\dot{W}_s - \dot{W}_{cortante} - \dot{W}_I \\ & = \frac{d}{dt} \int_{VC} \left(\frac{v^2}{2} + gz \right) p d\dot{V} + \int_{SC} \left(\frac{v^2}{2} + gz + \frac{P}{\rho} \right) \rho \hat{n} \cdot v dA + p\acute{e}rdidas \quad Ec. 99 \end{aligned}$$

Las pérdidas se deben a dos efectos principales:

- La viscosidad provoca fricción que incrementa la energía interna, incremento de temperatura o transferencia de calor.
- Los cambios de geometría provocan flujos separados que requieren energía útil para mantener los movimientos secundarios resultantes en los que ocurre la disipación.

2.2.5.2. Ecuación de energía en flujo uniforme continuo

En un flujo incompresible continuo en el que existe una entrada y una salida a través de las cuales se pueden suponer perfiles uniformes. Además, se supone que la razón de trabajo cortante y trabajo inercial son cero. Entonces con

velocidad constante y con líneas de corriente paralelas, la ecuación de energía se reduce a la ecuación 100.

$$-\frac{\dot{W}_s}{\dot{m}g} = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} + \frac{p_2}{\gamma_2} - \frac{p_1}{\gamma_1} + h_2 - h_1 + H_L \quad Ec. 100$$

Como se puede observar, se incluye el término de pérdida de energía, el cual se define en la ecuación 101:

$$H_L = \frac{\bar{u}_2 - \bar{u}_1}{g} - \frac{\dot{Q}}{\dot{m}g} \quad Ec. 101$$

En la práctica esto se calcula en función de un coeficiente de pérdida K , como se puede ver en la ecuación 102:

$$H_L = K \frac{v^2}{2g} \quad Ec. 102$$

A menudo es común llamar al término $(\dot{W}_s/\dot{m}g)$ asociado con una bomba altura de bomba H_P , y al término $(\dot{W}_s/\dot{m}g)$ asociado con una turbina altura de turbina H_T . Luego la ecuación de energía, para un flujo incompresible, toma la forma:

$$H_P + \frac{v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\gamma} + z_1 = H_T + \frac{v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + H_L \quad Ec. 103 \quad ^{40}$$

⁴⁰ POTTER, Merle C. y WIGGERT, David C. *Mecánica de Fluidos*. p. 135.

La ecuación 103 es la ecuación general de la energía para un flujo incompresible uniforme continuo y es probablemente la ecuación con mayor uso en el estudio de la mecánica de fluidos.

2.3. Regímenes de flujo

En este apartado se tratará únicamente de regímenes de flujo en tuberías o flujos internos. El tema de regímenes de flujo en canales se abordará en la sección 2.8.

Un régimen de flujo es un conjunto de condiciones regulares y constante en el tiempo que provocan una sucesión de fenómenos naturales en el perfil hidráulico en un flujo de un fluido.

Para entender como los flujos se pueden clasificar en los distintos tipos de regímenes de flujo es necesario comprender la teoría de la capa límite de Prandtl.

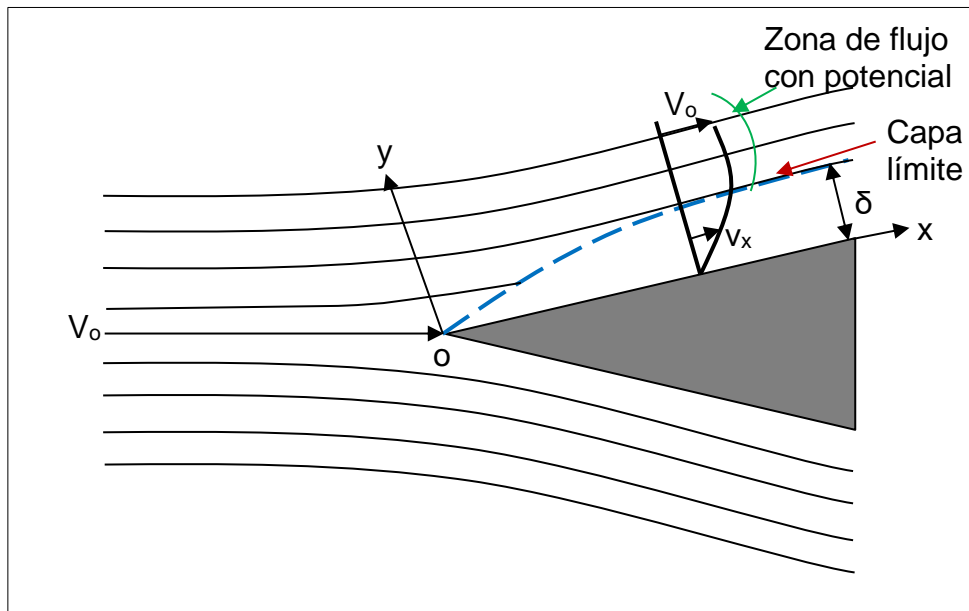
2.3.1. Capa límite y rugosidad superficial

Existe una región dentro del flujo de un fluido donde los efectos de viscosidad se confinan a una capa muy delgada, que está ubicada entre el flujo completamente desarrollado y la pared sólida de la tubería, dicha región se conoce como capa límite⁴¹.

Una mejor forma de explicar el concepto de capa límite es suponer que existe un flujo uniforme horizontal, de velocidad constante (v_o), al que se interpone un cuerpo agudo, como se muestra en la figura 22.

⁴¹ SOTELO ÁVILA, Gilberto. *Hidráulica general*. p. 527.

Figura 22. Concepto de capa límite



Fuente: SOTELO ÁVILA, Gilberto. *Hidráulica general*. p. 527.

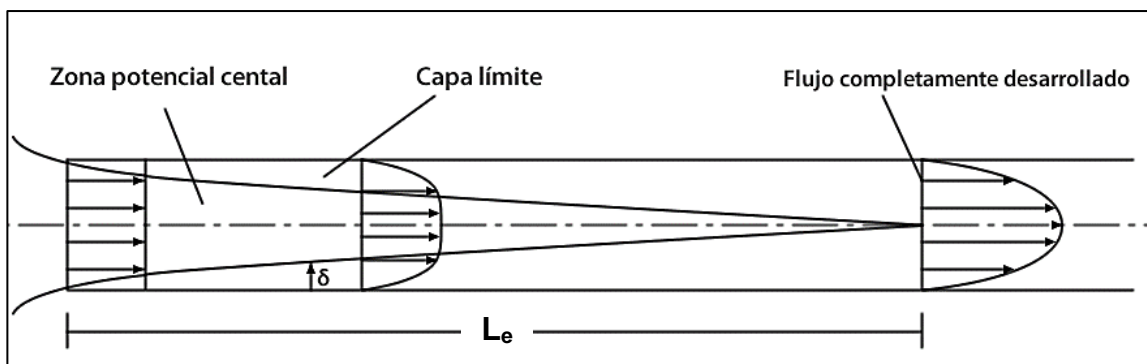
El campo de velocidades de flujo se adapta a la forma del cuerpo y modifica su carácter de uniformidad. Además, las fuerzas viscosas que retardan el movimiento del fluido en una capa muy delgada; de espesor cero, en el punto en el que la corriente toca al cuerpo, se manifiestan sobre una capa de espesor creciente al transmitir progresivamente el efecto de filete en filete. La región interior de la capa límite presenta las siguientes características:

- La velocidad del fluido, en el punto de contacto con la frontera, vale cero.
- El gradiente transversal de velocidades y , por lo mismo, el esfuerzo cortante, tienen valores máximos en la frontera; disminuye a medida que el punto se aleja de ésta.

- Fuera de la capa límite, el gradiente de velocidad es prácticamente cero, porque también lo es el esfuerzo cortante y los efectos viscosos.
- Fuera de la capa límite las líneas de corriente se conforman, según un flujo con potencial, sufriendo un ligero desplazamiento hacia el exterior de la pared.

La descripción anterior es la de una capa límite bidimensional. En el caso tridimensional los vectores velocidad, dentro de la capa límite y a diferentes distancias de la frontera, tienen componentes en las tres direcciones coordenadas que dificultan su estudio; éste es el caso de la figura 23 que muestra la entrada a un tubo donde se desarrolla la capa límite alrededor de toda la frontera.

Figura 23. **Región de entrada, flujo en desarrollo y flujo totalmente desarrollado en un sistema de tubería**



Fuente: *Textos científicos*. www.textoscientificos.com/fisica/fluidos/flujo-interno. Consulta: 8 de octubre de 2019.

Después de cierta distancia, desde la entrada, la capa límite converge para establecerse inmediatamente en una manera uniforme. Boussinesq determinó

por vía experimental que en un ducto cilíndrico en régimen laminar esto ocurre a la distancia (L_e) como se muestra en la ecuación 104:

$$L_e = 0,0065 D Re \quad Ec. 104$$

Donde:

L_e : distancia de flujo en la región de entrada.

D : diámetro de la tubería.

Re : número de Reynolds.

Para régimen turbulento la ecuación 105 es válida:

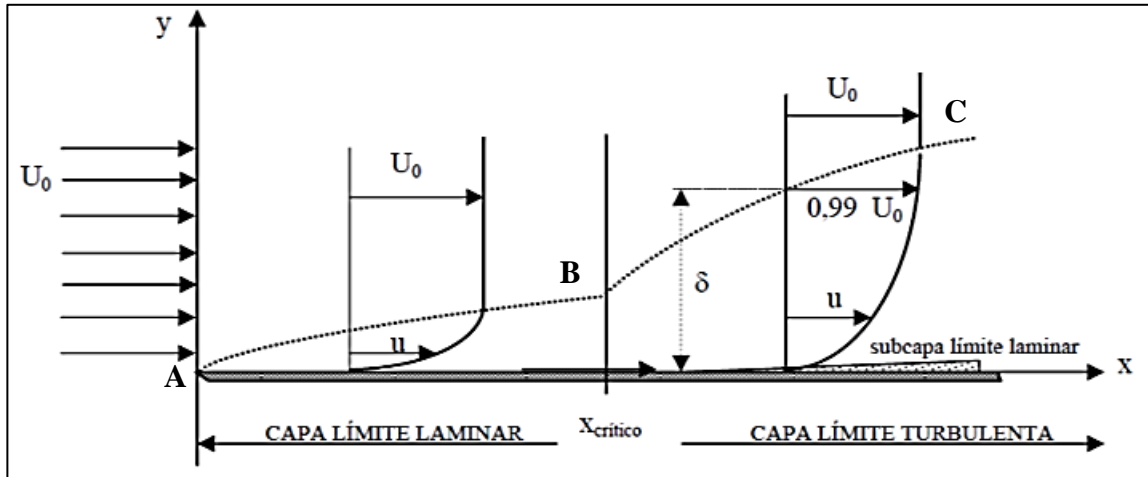
$$L_e = 4,4 (Re)^{\frac{1}{6}} D \quad Ec. 105$$

Cuando la capa límite laminar se adelgaza hasta alcanzar un espesor muy pequeño, adquiere el nombre de subcapa laminar. La turbulencia originada en la capa límite es posible debido al efecto de alguna irregularidad sobre la superficie de la pared, produciendo el disturbio que se transmite hacia a fuera.

A partir de (x_o) el espesor de la capa límite turbulenta crece más rápidamente que en el caso laminar (ver figura 24).

En lo que respecta a la velocidad, se observa que el efecto de fricción se presenta en la capa límite por la modificación de su distribución, según la línea ABC , variando su velocidad de cero “en la pared” al valor medio v_o . Las fuerzas de viscosidad son importantes dentro de la capa límite; fuera de ésta, la distribución de velocidades es prácticamente uniforme y las fuerzas de viscosidad son despreciables.

Figura 24. Zonas de la capa límite



Fuente: RAMOS, Jordy. *Diseño de una bahía de carga para un UAV de aplicación civil*.
www.researchgate.net/publication/292987027_Payload_bay_design_for_a_civil_application_UVA. Consulta: 8 de octubre de 2019.

El espesor (δ), de la capa límite turbulenta, no es posible definirlo con exactitud debido a que su curva de distribución de velocidades se aproxima asintóticamente al valor (U_0); sin embargo, es común aceptar como espesor la magnitud de la distancia normal a la pared de un nivel en el que la velocidad difiere en 1 % de la velocidad que existiría sin pared (U_0).

En el punto A donde se inicia la perturbación el flujo próximo a la placa es enteramente laminar y se desarrolla una capa límite laminar a lo largo de la superficie de la pared, siguiendo la línea AB , la distribución transversal de velocidades es aproximadamente parabólica y, a partir de B , el flujo se torna turbulento, desarrollándose una capa turbulenta limitada por la pared y la línea BC .

Si la superficie de la pared es relativamente lisa, en la proximidad de ella se forma una película delgada, dentro de la cual el flujo se conserva más o menos laminar, la que se conoce como subcapa laminar.

Si la pared es rugosa la capa límite turbulenta se puede establecer muy cerca del punto en el que el flujo hace su primer contacto con la placa, sin existir el tramo inicial del flujo laminar.

Si la rugosidad absoluta es menor que una cierta fracción del espesor de la subcapa laminar, adherida a la pared del conducto, las irregularidades de la superficie son tan pequeñas que quedan cubiertas por la subcapa laminar. En estas condiciones la rugosidad no tiene efecto sobre la zona exterior y se dice que la superficie de la pared se comporta como hidráulicamente lisa o simplemente lisa; sin embargo, puede ser ondulada si el perfil medio de la superficie sigue una curva regular.

Si las rugosidades son muy grandes, extienden su efecto más allá de la subcapa laminar y producen disturbios en el flujo; entonces se dice que la superficie es hidráulicamente rugosa o simplemente rugosa.

2.3.2. Número de Reynolds

El número de Reynolds es un parámetro adimensional que sirve para predecir el régimen de un flujo⁴². Teóricamente éste es un parámetro que mide la relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas, y la ecuación 106 describe matemáticamente dicho parámetro.

⁴² POTTER, Merle C. y WIGGERT, David C. *Mecánica de Fluidos*. p. 92

$$Re = \frac{vD}{\nu} \quad Ec. 106$$

Donde:

Re : numero de Reynolds.

v : velocidad promedio de flujo (m/s).

ν : viscosidad cinemática del fluido (m^2s^{-1}).

D : diámetro del tubo o diámetro equivalente (m).

El régimen de flujo se puede predecir por medio de rangos de valores del número de Reynolds los cuales fueron estudiados por Osborne Reynolds, de esta forma se puede decir que existen tres regímenes de flujo para flujos internos, como se muestra a continuación:

- Régimen laminar ($Re \leq 2\,100$)
- Régimen de transición ($2\,100 \leq Re \leq 4\,000$)
- Régimen turbulento ($Re > 4\,000$)

A los números de Reynolds que delimitan los regímenes de flujo, con frecuencia se les suele llamarse números de Reynolds críticos.

Como se observó la ecuación 106 del número de Reynolds indica que para definir el régimen de flujo es necesario determinar tres parámetros físicos:

- Escala de longitud del campo de flujo: corresponde al espesor de una capa límite o al diámetro de un tubo. "Si la escala de longitud es suficientemente

grande, una perturbación de flujo puede incrementarse y el flujo puede llegar a ser turbulento”⁴³.

- Escala de velocidad de tiempo: es un promedio espacial de la velocidad o velocidad promedio del flujo.
- Viscosidad cinemática o dinámica. Esto debido a que a menor viscosidad un fluido sufre mayor deformación debido a los esfuerzos cortantes del campo de flujo.

2.3.2.1. Diámetro equivalente

El diámetro equivalente es un término utilizado cuando se transportan fluidos en canales y tubos no circulares. Se asemeja el comportamiento del flujo como si fuera flujo en una tubería de sección transversal circular. La ecuación 107 define al radio hidráulico como cuatro veces el radio hidráulico:

$$De = 4 Rh \quad Ec. 107$$

Donde:

De: diámetro equivalente.

Rh: radio hidráulico.

2.3.2.2. Radio hidráulico

El radio hidráulico, es un parámetro utilizado en canales, tubos y otros componentes de obras hidráulicas de sección transversal no circular, la ecuación 108 define matemáticamente el radio hidráulico:

⁴³ POTTER, Merle C. y WIGGERT, David C. *Mecánica de Fluidos*. p. 92.

$$Rh = \frac{A_T}{P_m} \quad E.108$$

Donde:

A_T : Área de la sección transversal por donde circula el fluido.

P_m : Perímetro mojado (Contorno de la sección transversal que está en contacto con el fluido).

2.3.3. Flujo laminar y turbulento

En las secciones anteriores se mencionó los límites de los regímenes de flujo (laminar, de transición y turbulento). Sin embargo, no se abordó su definición teórica.

- El régimen de flujo laminar se define como un flujo donde el fluido se mueve en capas o láminas, deslizándose suavemente una capa sobre otra capa adyacente con sólo un intercambio molecular de cantidad de movimiento⁴⁴. En este régimen las perturbaciones que originan la turbulencia son amortiguadas por las fuerzas viscosas, por lo que no hay movimiento relativo entre las capas adyacentes.
- En el caso del régimen de flujo turbulento, las partículas del fluido se mueven de forma errática, con un intercambio de cantidad de movimiento cruzado muy violento. Por lo tanto, en el flujo turbulento, las capas adyacentes son rotas y existe un mezclado total de las partículas del fluido.

⁴⁴ STREETER, Victor L. y WYIIE, E. Benjamin. *Mecánica de los Fluidos*. p. 189.

2.3.4. Flujo de transición

Existe un régimen de flujo donde ocurre un fenómeno físico particular. Este régimen se denomina de transición, es caracterizado por cambiar de forma totalmente aleatoria entre el régimen laminar y turbulento, por lo que hay una formación y rotura constante de las capas de fluido. Por lo tanto, el flujo de transición no puede ser estudiado debido a la forma errática que presenta el perfil de velocidad de flujo.

Como se pudo notar no se ha abordado las implicaciones matemáticas de los regímenes de flujo, debido a que este tema se sale del objetivo del presente trabajo, no obstante, en las secciones posteriores se verá su implicación en la deducción de las ecuaciones del factor de fricción.

2.4. Tuberías y formas de transporte de fluidos

Los fluidos se transportan generalmente por tubos o tuberías de sección circular, que existen en una amplia variedad de tamaño, espesor de pared y materiales de construcción. No existe una clara distinción entre los términos tubería y tubo.

En general una tubería tiene pared gruesa, diámetro relativamente grande y se construyen en longitudes moderadas, comprendidas entre 6 y 12 metros. Los tubos son de pared delgada y generalmente se venden en forma de rollos de muchos metros de longitud. Los tubos metálicos se pueden roscar mientras que las tuberías no. Las paredes de las tuberías son generalmente rugosas, y en cambio, los tubos tienen paredes muy lisas. Los tramos de tuberías se pueden unir por bridas o mediante accesorios soldados, las piezas de tubos se unen a menudo mediante accesorios. Por último, los tubos se fabrican por extrusión o laminación en frío, mientras que las tuberías metálicas se fabrican por soldadura o moldeo⁴⁵.

⁴⁵ HARRIOTT, Peter, MCCABE, Warren L. y SMITH, Julian C. *Operaciones básicas de Ingeniería Química*. p. 188.

Los tubos y tuberías se fabrican de muy diferentes materiales, incluyendo metales y aleaciones, madera, cerámica, vidrio y diferentes plásticos. El cloruro de polivinilo, o PVC, es ampliamente utilizado para conducciones de agua. En las plantas de proceso, el material más frecuente es acero de bajo contenido de carbono, con el que se fabrica la llamada tubería de acero negro. Con frecuencia se utilizan también tuberías de hierro forjado y de fundición.

2.4.1. Tamaños

Los tubos y tuberías se clasifican en función de su diámetro y del espesor de pared. En tuberías de acero, los diámetros nominales normalizados están comprendidos en el intervalo de 1/8 a 30 pulgadas. En tuberías grandes de más de 12 pulg de diámetro, el diámetro nominal es igual al diámetro externo real; en tuberías pequeñas el diámetro nominal no corresponde a ninguna dimensión real.

Para tuberías de 3 a 12 pulg el valor nominal es próximo al diámetro interno real, pero para tuberías muy pequeñas esto no es cierto. Sin tener en cuenta el espesor de pared, el diámetro externo de todas las tuberías, correspondientes a un determinado tamaño nominal, es el mismo, con el fin de poder intercambiar los accesorios. Las tuberías de otros materiales se fabrican también con el mismo diámetro externo que las tuberías de acero, con el objeto de poder intercambiar las diversas partes de un sistema de conducción. Estas dimensiones normalizadas de tubería se las conoce como IPS iron pipe size o NPS normal pipe size.

El espesor de una tubería viene dado por el número de catálogo o número de cédula, que aumenta con el espesor. Se utilizan los diez números de catálogo, 10, 20, 30, 40, 60, 80, 100, 120, 140, y 160; sin embargo, para tuberías de

diámetro inferior a 8 pulg solamente son habituales los números 40, 80, 120 y 160⁴⁶.

Para el acero a temperatura ordinaria, la presión admisible es la cuarta parte de la máxima que soporta el material.

2.4.2. Valores recomendados de diseño

El tamaño óptimo de tubería para un caso determinado depende de los costos relativos de instalación, de la potencia, mantenimiento y de las tuberías. Además de la velocidad de operación, en la figura 25 se indican intervalos representativos de velocidad en tuberías, estas son velocidades recomendadas para diseñar una red de transporte de fluidos.

Figura 25. Velocidad de fluidos en tuberías

| Fluido | Tipo de flujo | Velocidad | |
|------------------------|---------------------|-----------|-----------|
| | | pies/s | m/s |
| Líquidos poco viscosos | Flujo por gravedad | 0,5-1 | 0,15-0,30 |
| | Entrada de bomba | 1-3 | 0,3-0,9 |
| | Salida de bomba | 4-10 | 1,2-3 |
| | Línea de conducción | 4-8 | 1,2-2,4 |
| Líquidos viscosos | Entrada de bomba | 0,2-0,5 | 0,06-0,15 |
| | Salida de bomba | 0,5-2 | 0,15-0,6 |
| Vapor de agua | | 30-50 | 9-15 |
| Aire o gas | | 30-100 | 9-30 |

Fuente: HARRIOTT, Peter, MCCABE, Warren L. y SMITH, Julian C. *Operaciones básicas de Ingeniería Química*. p. 190.

⁴⁶ HARRIOTT, Peter, MCCABE, Warren L. y SMITH, Julian C. *Operaciones básicas de Ingeniería Química*. p. 189.

Las velocidades pequeñas han de ser las más utilizadas, especialmente cuando el flujo es por gravedad desde tanques elevados.

2.4.3. Tuberías de termoplásticos

Este tipo de tuberías son hechas a partir de polímeros que se vuelen líquidos homogéneos cuando se calientan a temperaturas relativamente altas y cuándo se enfría se obtiene un material duro en estado de transición vítrea.

De todos los tipos de tuberías termoplásticas, las importante es la tubería de PVC. Tiene aplicación en la industria de la construcción de viviendas, edificios, siendo éste el material más común para las redes de distribución de agua en Guatemala.

El PVC no soporta temperaturas muy altas como las tuberías metálicas por lo tanto tienen un límite de operación de temperatura relativamente bajo, esto puede observarse en la figura 26.

Existen tubos y tuberías de cloruro de polivinilo (PVC) y cloruro de polivinilo clorado (CPVC) en tamaños de 12 pulg y menores para el PVC y de 4 pulg y menores para el CPVC. Tienen una excelente resistencia a la temperatura ambiente, a las sales, al hidróxido de amonio y al ácido sulfúrico, al nítrico, al acético y al clorhídrico, pero pueden sufrir daños mediante las cetonas, los aromáticos y algunos hidrocarburos clorados.

En el grupo de especificaciones ASTM para tubería de PVC se incluye cinco tipos de tuberías cuyos materiales tiene resistencia química, resistencia al impacto y al esfuerzo de diseño hidrostático.

Figura 26. Límites de temperatura para tubería termoplástica

| Material (tipo genérico) | Límites recomendados | | | |
|--|----------------------|-----|--------|-----|
| | Mínimo | | Máximo | |
| | °F | °C | °F | °C |
| Acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS) | -30 | -34 | 180 | 82 |
| Celulosa butirato acetato de (CAB) | 0 | -18 | 140 | 60 |
| Poliéter clorado | 0 | -18 | 210 | 99 |
| Poliacetal | 0 | -18 | 170 | 77 |
| Polietileno | | | | |
| PE 1404 | -30 | -34 | 100 | 38 |
| PE 2305 | -30 | -34 | 120 | 49 |
| PE 2306 | -30 | -34 | 140 | 60 |
| PE 3306 | -30 | -34 | 160 | 71 |
| PE 3406 | -30 | -34 | 180 | 82 |
| Polipropileno | 30 | -01 | 210 | 99 |
| Cloruro de polivinilo | | | | |
| PVC 1120 | 0 | -18 | 150 | 66 |
| PVC 1220 | 0 | -18 | 150 | 66 |
| PVC 2110 | 0 | -18 | 130 | 54 |
| PVC 2112 | 0 | -18 | 130 | 54 |
| PVC 2116 | 0 | -18 | 150 | 66 |
| PVC 2120 | 0 | -18 | 150 | 66 |
| Cloruro de polivinilo clorado (CPVC, 4120) | 0 | -18 | 210 | 99 |
| Cloruro de polivinilideno | 40 | 4 | 160 | 71 |
| Fluoruro de polivinilideno | 0 | -18 | 275 | 135 |
| Nylon | -30 | -34 | 180 | 82 |
| Polibutileno | 0 | -18 | 210 | 99 |
| Óxido de polifenileno (POP2125) | 30 | -01 | 210 | 99 |

Fuente: GREEN, D., MALONEY, O. y PERRY, R. *Manual del Ingeniero Químico*. p. 6-42.

2.4.4. Tuberías de metal

Los sistemas de tuberías de metales pueden ser ferrosos, cobre, aluminio, son los que más se utilizan y tiene mayor cobertura de partes de normas internacionales.

2.4.4.1. Tuberías de cobre y aleaciones

Se producen por extrusión tubos y tuberías de aleaciones de cobre y silicio, cobre, bronce y latón y aleaciones de cobre níquel sin costuras. El tubo existe en diámetros exteriores de tamaños que van de 1/16 a 16 pulg y en una gama de espesores de paredes que varían de 0,005 pulg para el tubo más pequeño a 0,75 pulg para el tamaño de 16 pulg. Los tubos se especifican por lo común mediante el diámetro exterior y el espesor de la pared.

El tubo de cobre sin costura se vende en tamaños de tubo para agua (ASTM B88 y B306). Estos tamaños se identifican mediante una designación de tamaño estándar de 1/8 pulg menor que el diámetro exterior nominal. El tubo se vende también como tubo de cobre de diámetro externo (ASTM B280)⁴⁷.

El tubo de cobre se usa mucho en oficinas y laboratorios para servicios de agua, vapor, sistemas de control neumático, aire comprimido, refrigeración y conducción de gas inerte. Las conexiones se hacen conjuntas para accesorios de ajuste ensanchado, ajuste de compresión, ajuste de mordiente y soldadas. Las juntas son más económicas para tamaños de 3/4 pulg y mayores. La facilidad en el manejo y doblamiento favorece el empleo del cobre.

La tubería de cobre para agua ASTM B88 con dimensiones y tolerancias como las mostradas en la figura 28, se encuentra disponible templada o recocida en longitudes rectas de 6,1 m en los tipos K, L, M hasta un tamaño estándar de 8 pulg. El tipo K se vende en longitudes de 5,5 m para el tamaño de 10 pulg y de 3,6 m para el de 12 pulg. El tipo L se ofrece en longitudes de 6,1 m para el tamaño de 10 pulg y de 5,5 in para 12 pulg. El tipo M está disponible en longitudes de

⁴⁷ GREEN, D., MALONEY, O. y PERRY, R. *Manual del Ingeniero Químico*. p. 6-67.

6,1 m hasta para 12 pulg. Los tres tipos se pueden obtener en rollos de 18,3 m para tamaño de 1 1/4 y 1 1/2 pulg y rollos de 12,2 o 13,7 m en tamaño de 2 pulg.

Figura 27. **Tubo de cobre para agua. Tipos K, L, M (ASTM B88)**

| Tamaño estándar, in | Diámetro nominal en in | Tolerancia promedio del diámetro exterior, in | | | Espesor y tolerancias nominales de la pared, in | | | | | | Peso teórica, en lb/ft | | |
|---------------------|------------------------|---|------------------|---------------------|---|-------------|------------|-------------|------------|-------------|------------------------|--------|--------|
| | | De temple bl. | Estirado en frío | Espesor de la pared | Tipo K | | Tipo L | | Tipo M | | Tipo K | Tipo L | Tipo M |
| | | | | | Tolerancia | de la pared | Tolerancia | de la pared | Tolerancia | de la pared | | | |
| 1/8 | 0.375 | 0.002 | 0.001 | 0.035 | 0.004 | 0.030 | 0.0035 | \$ | \$ | 0.145 | 0.126 | \$ | |
| 1/4 | 0.500 | 0.0025 | 0.001 | 0.049 | 0.004 | 0.035 | 0.0035 | 0.025 | 0.0025 | 0.269 | 0.198 | 0.145 | |
| 3/8 | 0.625 | 0.0025 | 0.001 | 0.049 | 0.004 | 0.040 | 0.0035 | 0.028 | 0.0025 | 0.314 | 0.285 | 0.204 | |
| 1/2 | 0.750 | 0.0025 | 0.001 | 0.049 | 0.004 | 0.042 | 0.0035 | \$ | \$ | 0.418 | 0.382 | \$ | |
| 5/8 | 0.875 | 0.003 | 0.001 | 0.065 | 0.0045 | 0.045 | 0.004 | 0.032 | 0.003 | 0.641 | 0.455 | 0.328 | |
| 1 | 1.125 | 0.0035 | 0.0015 | 0.065 | 0.0045 | 0.050 | 0.004 | 0.035 | 0.0035 | 0.839 | 0.655 | 0.465 | |
| 1 1/4 | 1.375 | 0.004 | 0.0015 | 0.065 | 0.0045 | 0.055 | 0.0045 | 0.042 | 0.0035 | 1.04 | 0.894 | 0.682 | |
| 1 1/2 | 1.625 | 0.0045 | 0.002 | 0.072 | 0.005 | 0.060 | 0.0045 | 0.049 | 0.004 | 1.36 | 1.14 | 0.940 | |
| 2 | 2.125 | 0.005 | 0.002 | 0.083 | 0.007 | 0.070 | 0.006 | 0.058 | 0.006 | 2.06 | 1.75 | 1.46 | |
| 2 1/2 | 2.625 | 0.005 | 0.002 | 0.085 | 0.007 | 0.080 | 0.006 | 0.065 | 0.006 | 2.93 | 2.48 | 2.03 | |
| 3 | 3.125 | 0.005 | 0.002 | 0.109 | 0.007 | 0.090 | 0.007 | 0.072 | 0.006 | 4.00 | 3.33 | 2.68 | |
| 3 1/2 | 3.625 | 0.005 | 0.002 | 0.120 | 0.008 | 0.100 | 0.007 | 0.083 | 0.007 | 5.12 | 4.29 | 3.58 | |
| 4 | 4.125 | 0.005 | 0.002 | 0.134 | 0.010 | 0.110 | 0.009 | 0.095 | 0.009 | 6.51 | 5.38 | 4.66 | |
| 5 | 5.125 | 0.005 | 0.002 | 0.160 | 0.010 | 0.125 | 0.010 | 0.109 | 0.009 | 9.67 | 7.61 | 6.66 | |
| 6 | 6.125 | 0.005 | 0.002 | 0.192 | 0.012 | 0.140 | 0.011 | 0.122 | 0.010 | 13.9 | 10.2 | 8.92 | |
| 8 | 8.125 | 0.006 | +0.002 | 0.271 | 0.016 | 0.200 | 0.014 | 0.170 | 0.014 | 25.9 | 19.3 | 16.5 | |

Fuente: GREEN, D., MALONEY, O. y PERRY, R. *Manual del Ingeniero Químico*. p. 6-67.

2.4.4.2. Tuberías de acero negro y galvanizado

El acero negro o acero colado es el metal más barato en sistemas de tuberías y se emplea mucho en servicios de baja presión en los que la corrosión interna y externa puede causar una pérdida considerable de metal. Se utiliza mucho para tuberías subterráneas de distribución de agua.

Existe un conjunto de normas internacionales que definen las características de los tubos, entre ellas se pueden mencionar:

- ASTM A153
- ASTM A53
- ASTM A120 78

La fabricación de acero negro tiene normas similares a las del acero galvanizado, en algunos casos es prácticamente la misma norma la que define la fabricación de dos tubos con la única diferencia que uno de ellos es galvanizado.

Los tubos de acero galvanizado son tubos que han sido sometidos a procesos de galvanización añadiendo una capa protectora de zinc en la superficie de los tubos, con el fin de proteger la superficie del metal sobre el cual se realiza el proceso.

El galvanizado más común consiste en depositar una capa de zinc sobre acero negro; ya que, al ser el zinc más oxidable, menos noble que el acero, genera un óxido estable, protege de esta forma al acero de la oxidación al exponerse al oxígeno del aire.

Tanto los tubos de acero negro como los galvanizados son adecuados para usarse en la conducción de vapor, agua, gas, aire y otros fluidos no corrosivos, pero no deben someterse a operaciones de doblado, formar con ellos serpentinas cerradas, ni son adecuados para servicios a altas temperaturas.

Los tubos de acero negro y galvanizado más comunes son los tubos para conducción, estos son destinados a la conducción de fluidos a temperatura ambiente o ligeramente superior pero no son apropiados para usos que impliquen calentamiento.

La clasificación de los tubos se realiza de acuerdo con su proceso de fabricación:

- Con costura o soldadura a topes
- Con costura y con soldadura eléctrica
- Sin costura

Las uniones de estos tubos pueden ser por:

- Soldadura
- Roscados
- Por medio de flanges o bridas

Para el caso de las tuberías con rosca, la norma más común utilizada para la fabricación tuberías roscadas es la NPT (National Pipe Thread), esta es una norma técnica estadounidense que se aplica para la estandarización del roscado de los elementos de conexión empleados en los sistemas e instalaciones hidráulicas.

2.4.4.3. Tuberías de acero inoxidable

Los aceros inoxidables son aleaciones de hierro, carbono y cromo; con un mínimo de 10 % m/m de cromo.

Este tipo de tuberías se utilizan cuando es necesario transportar fluidos en la industria de alimentos e industria farmacéutica. También se utiliza en maquinaria y en algunas ocasiones en la industria automotriz.

Existen varios tipos de tuberías de acero inoxidable para la conducción de fluidos:

- Tubería sanitaria que es fabricada bajo la norma ASTM A270 es pulida por dentro y por fuera 180 GRITT 32-20 RA, con tratamientos térmicos especiales y se utiliza para la conducción de líquidos o alimentos en la industria de alimentos, bebidas y se le denomina tubería de grado alimenticio.
- Tubería farmacéutica que es fabricada por medio de la norma ASME BPE SF1, esta tubería es pulida por fuera con GRITT 180 y por dentro el pulido es mayor a 320 GRITT. Este pulido es tan fino que se asegura la total limpieza de las mismas, haciéndola idónea para la conducción de productos muy finos como los utilizados en los laboratorios, o industria cosmética. Además, la aleación de ASME BPE es superior a la ASTM A270 316 L.
- Tubería de cédula 10, cédula 40 y cédula 80 de acero inoxidable con o sin costura que es una tubería fabricada bajo la norma ASTM A312. Esta

tubería no se pule ni por dentro ni por fuera, pero soporta presiones altas de trabajo.

- Tubing de acero inoxidable, conocido como tubería delgada y es ampliamente utilizada en la industria de instrumentación en medidas muy pequeñas como 1/8".

2.4.5. Canales

Por norma general cuando se transporta un fluido por un canal, implícitamente se dice que el fluido no se transporta a presión, por tanto, la conducción de fluidos por canales se realiza únicamente en casos donde el movimiento se genera por la fuerza de gravedad. Siendo posible entonces utilizar los canales en situaciones donde hay una pendiente prolongada a lo largo del trayecto.

Los canales se utilizan casi exclusivamente para el transporte de agua en sistemas de riego de la industria agrícola y pecuaria. También son utilizados en la distribución y transporte de agua potable.

2.4.6. Mangueras

Las mangueras por lo general no son utilizadas para el transporte de un fluido a largas distancias. Comúnmente se utilizan en aplicaciones donde es necesario tener versatilidad para maniobrar al punto exacto donde será dispensado el fluido. Por ello su aplicación se limita a:

- Sistemas de riego de agua.
- Sistemas de enfriamiento automotriz.

- Como accesorio final de tubería en la industria de jabones y detergentes.
- Sistemas oleo hidráulicos para transmisión de potencia, rara vez se utilizan para transporte.

2.5. Bombas

Una bomba es una máquina que transforma energía. Recibe energía mecánica que puede proceder de un motor eléctrico, térmico, entre otros; y la convierte en energía que un fluido adquiere en forma de presión, de posición o de velocidad⁴⁸.

¿Para qué se usa una bomba?, la necesidad de utilizar una bomba tiene cuatro objetivos:

- Aumentar la presión del fluido
- Elevar la altura del fluido
- Aumentar la velocidad del fluido
- Vencer la resistencia de fricción de la tubería

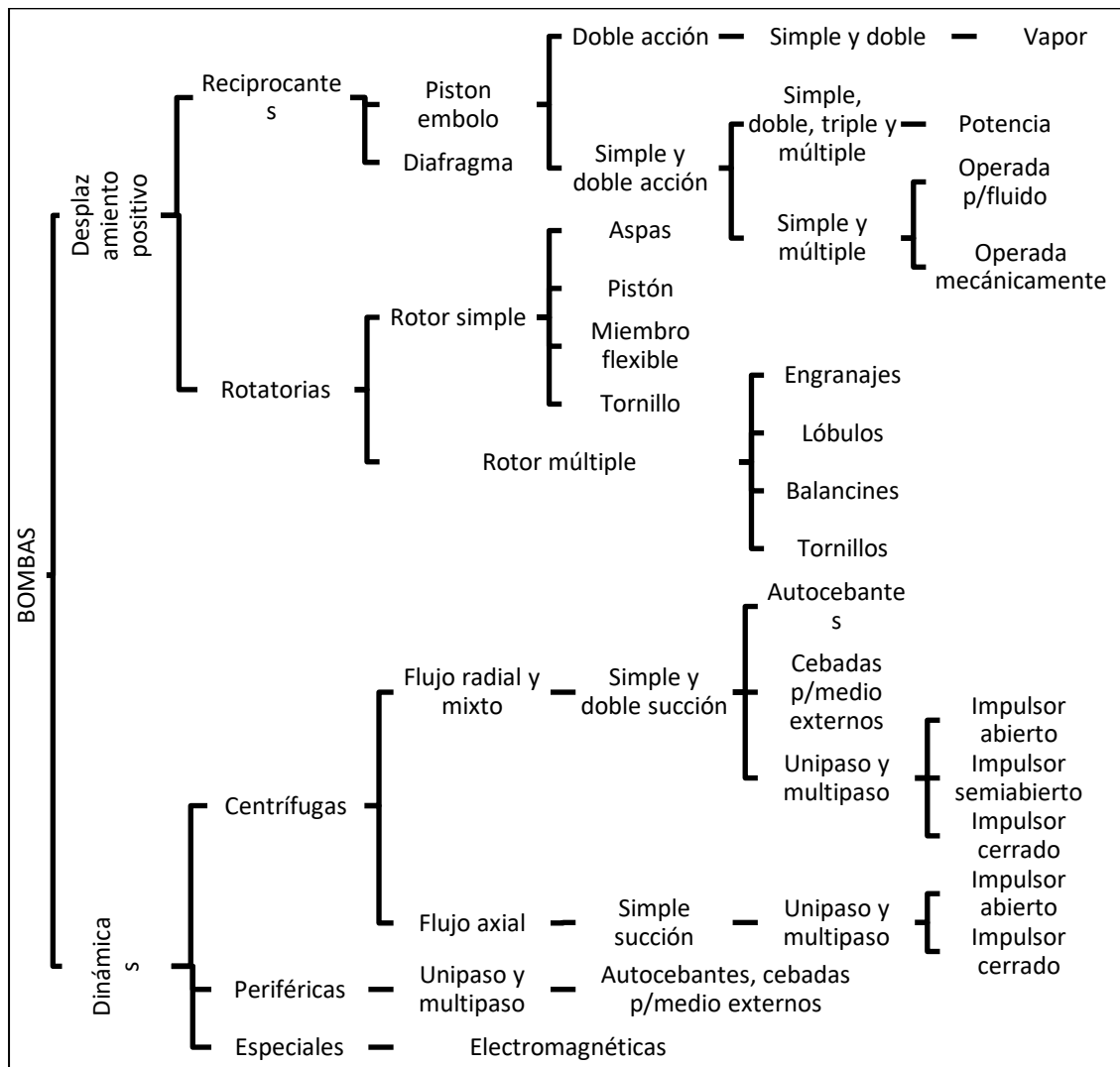
2.5.1. Tipos de bombas

Existe variedad de bombas en el mercado. La clasificación más completa de los tipos de bombas es la del Hydraulic Institute (HI), que se puede observar en la figura 28. El Instituto de Hidráulica tiene como miembros a más de cincuenta compañías fabricantes de equipos de bombeo en el mundo entero, publica y actualiza con regularidad los estándares de fabricación de bombas. El instituto ofrece una amplia variedad de programas y servicios, cada uno adaptado a las

⁴⁸ VIEJO ZUBICARAY, Manuel. *Bombas teoría, diseño y aplicaciones*. p. 13.

necesidades de los miembros: desarrollo de estándares, oportunidades de creación de redes, acceso a datos estadísticos e informes económicos específicos, oportunidades promocionales, materiales educativos, entre otros⁴⁹.

Figura 28. **Clasificación de las bombas según Hydraulic Institute**



Fuente: VIEJO ZUBICARAY, Manuel. *Bombas teoría, diseño y aplicaciones*. p. 14.

⁴⁹ HYDRAULIC INSTITUTE. *Descripción del Hydraulic Institute*. http://www.pumps.org/Membership/About_Us.aspx. Consulta: 20 de febrero de 2019.

2.5.2. Bombas centrífugas

Como se puede observar en la figura 28 existe una gran variedad de bombas, por este motivo en el presente trabajo únicamente se describirán las bombas centrífugas y periféricas puesto que son las de mayor interés para la investigación realizada.

La bomba centrífuga es una de las turbomáquinas radiales más comunes. Este tipo de bomba cuenta con dos componentes principales: un impulsor conectado a un eje giratorio, y una caja, carcasa o voluta que contiene al impulsor. El impulsor consta de varias aspas, también denominadas algunas veces álabes directores dispuestas en un patrón rectangular alrededor del eje⁵⁰.

En una bomba centrífuga a medida que el impulsor gira, a través del ojo de la voluta se aspira aire que fluye radialmente hacia fuera. Las aspas giratorias agregan energía al fluido, y por tanto la presión como la velocidad absoluta aumentan a medida que el fluido circula del centro hasta la periferia de las aspas.

En la bomba centrífuga más sencilla, el fluido se descarga directamente a un difusor en espiral. La forma de la carcasa está diseñada para reducir la velocidad a medida que el fluido sale del impulsor, y esta disminución de energía cinética se convierte en un aumento de presión. La carcasa en forma de espiral, con su área creciente en la dirección del flujo, se usa para producir una distribución de velocidad esencialmente uniforme a medida que el fluido se mueve alrededor de la carcasa hacia la apertura de descarga. Para bombas centrífugas grandes, a menudo se usa un diseño diferente, en el que álabes directores del difusor rodean al impulsor. Estos desaceleran el flujo a medida que

⁵⁰ MUNSON, Bruce R., OKIISHI, Theodore H. y YOUNG, Donald F. *Fundamentos de Mecánica de Fluidos*. p. 768.

el fluido es dirigido hacia la voluta de la bomba. Este tipo de bomba centrífuga se denomina bomba difusora.

2.5.2.1. Partes de una bomba centrífuga

Las partes constitutivas de una bomba centrífuga depende de su construcción y tipo. Por esta razón existe una innumerable cantidad de piezas, las cuales se han numerado de 1 a 170 por el Instituto de Hidráulica (HI) de los Estados Unidos de América. En la tabla I, se presenta una lista de las partes más usadas cuyos nombres se enumera de acuerdo con el libro del Instituto de Hidráulica y se ilustran en la figura 29.

Tabla I. Partes de una bomba centrífuga

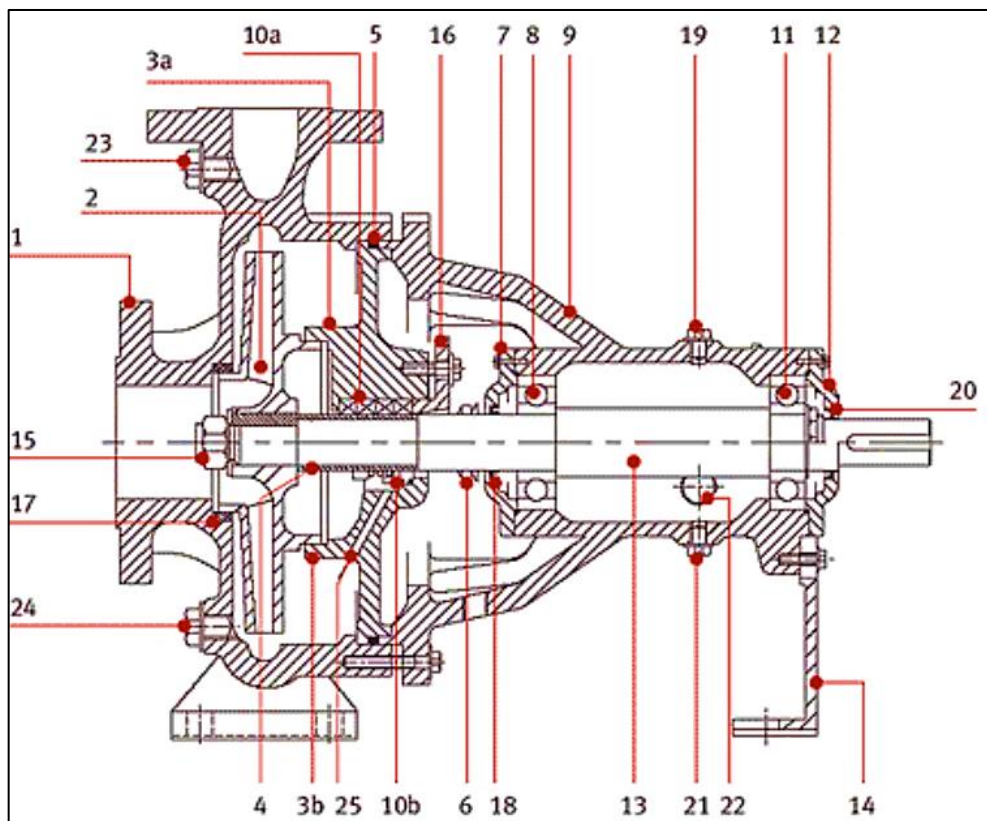
| No. | Descripción | No. | Descripción |
|-----|-----------------------------|-----|---------------------------|
| 1 | Cuerpo | 11 | Rodamiento posterior |
| 2 | Impulsor | 12 | Tapa rodamiento posterior |
| 3a | Tapa prensa | 13 | Eje |
| 3b | Tapa sello | 14 | Pie de soporte |
| 4 | Camisa de eje | 15 | Tuerca impulsora |
| 5 | O-Ring / Junta | 16 | Prensa estopa |
| 6 | V-Ring | 17 | Conjunto de aro de roce |
| 7 | Tapa de rodamiento anterior | 18 | Reten anterior |
| 8 | Rodamiento anterior | 19 | Tapón aceite |
| 9 | Soporte | 20 | Reten posterior |
| 10a | Empaquetadura | 21 | Drenaje Carter |
| 10b | Sello mecánico | 22 | Visor nivel de aceite |
| 23 | Venteo de la bomba | 24 | Drenaje de la bomba |
| | | 25 | Lubricación |

Fuente: VIEJO ZUBICARAY, Manuel. *Bombas teoría, diseño y aplicaciones*. p. 35.

Las partes que está en contacto con el fluido se denominan extremo líquido y son:

- Carcaza
- Cabeza de succión
- Impulsor
- Anillos

Figura 29. Partes de una bomba centrífuga



Fuente: DROTEC. *Curso de máquinas hidráulicas.*

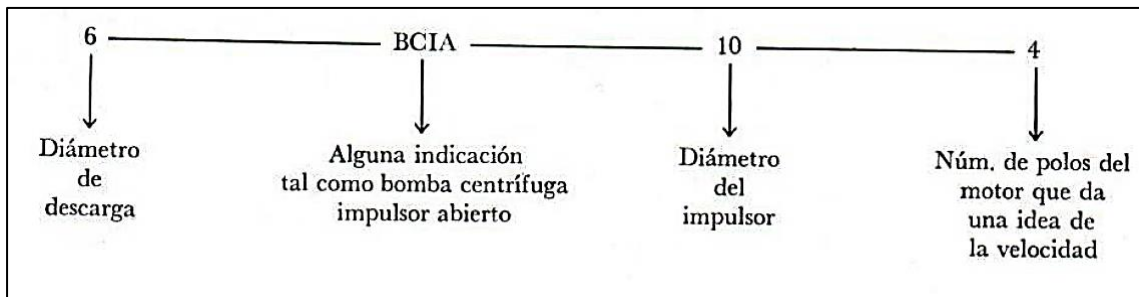
www.drotec.com.ar/folleto_html/images/corte-bomba-centrifuga-NDQ.gif. Consulta: 9 de octubre de 2019.

2.5.2.2. Tamaño

El tamaño nominal de una bomba centrífuga se determina generalmente por el diámetro interior de la brida de descarga. Sin embargo, esta designación muchas veces no es suficiente puesto que no determina el gasto que puede proporcionar una bomba, ya que éste dependerá de la velocidad de rotación, así como del diámetro del impulsor.

Conforme a ello suelen usarse designaciones tales como la que se muestran en la figura 31.

Figura 30. **Designación de una bomba centrífuga**



Fuente: VIEJO ZUBICARAY, Manuel. *Bombas teoría, diseño y aplicaciones*. p. 36.

2.5.2.3. Sentido de rotación

El sentido de rotación de una bomba centrífuga puede ser:

- En el sentido horario
- Anti-horario

El punto de observación debe ser en una bomba horizontal cuando el observador está colocado en el lado del cople de la bomba.

Lo mismo sucede en las bombas verticales en las cuales el observador debe colocarse mirando hacia abajo en la flecha superior de la bomba.

2.5.3. Bombas periféricas

Una bomba periférica es un producto del cruce entre una bomba de desplazamiento y una bomba centrífuga, en la cual el medio se bombeo hacia un canal periférico⁵¹.

Cuando se arranca una bomba periférica, el fluido es aspirado a través de la brida de succión directamente a un canal anular en el que gira el impulsor periférico. El impulsor consiste en paletas rectas que colocan el fluido en un movimiento circular. Después de pasar por el canal anular, el fluido sale de la bomba a través de la salida. En el canal anular, las paletas imparten energía cinética al fluido, lo que aumenta la presión del fluido. Este principio de funcionamiento es muy similar a cómo funcionan una bomba de canal lateral.

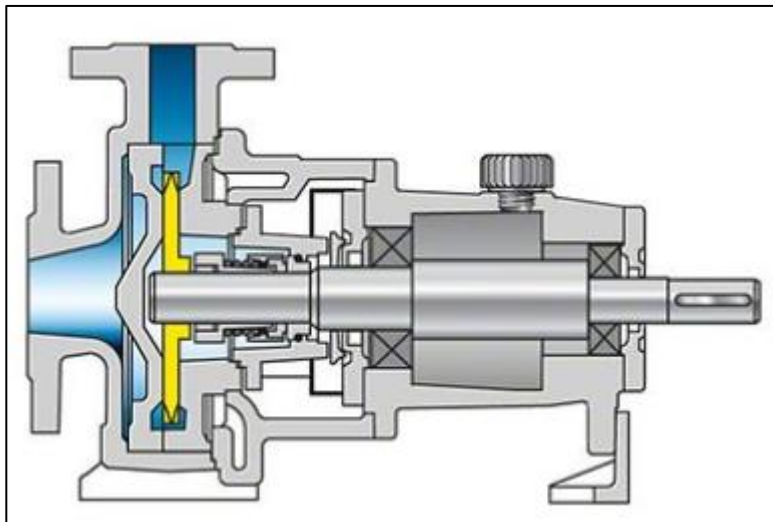
A diferencia de las bombas centrífugas ordinarias, las curvas características no se aplanan a medida que disminuye el flujo de fluido. Las curvas de la bomba son líneas rectas con cabezas máximas en caudales bajos y cabezas bajas en caudales máximos porque una bomba periférica es una bomba de desplazamiento.

⁵¹ CP pump systems. *Bombas periféricas*. <https://www.cp-pumps.com/en/products/technical-features/working-principles/peripheral-pumps.html>.

A las bombas periféricas, también se les conoce como bombas regenerativas. En total, el fluido se mueve a lo largo de la circunferencia desde la entrada hasta la salida de la carcasa a medida que aumenta la presión. Un separador dispuesto entre la salida y la entrada evita un cortocircuito hidráulico entre el lado de alta presión y el lado de baja presión del canal de la carcasa.

Debido al gran aumento de energía, las bombas periféricas pueden ser de tamaño relativamente pequeño. A menudo se diseñan como bombas de acoplamiento cerrado. En la figura 31 se muestra el esquema común de una bomba periférica.

Figura 31. **Bomba periférica de una etapa**



Fuente: KSB SE & Co. KGaA. *Peripheral pump*. <https://www.ksb.com/centrifugal-pump-lexicon/peripheral-pump/192176/>. Consulta: 20 de febrero de 2019.

Los coeficientes de carga, o coeficientes de presión, de las bombas periféricas superan los de las bombas de canal lateral, y sus curvas

características son más pronunciadas. La potencia de entrada de estas disminuye al aumentar el caudal.

Las eficiencias de las bombas periféricas son más bajas que las de las bombas radiales. Son adecuadas para bombear líquidos no contaminados, como agua de alimentación de caldera, como bombas de aumento de presión, hidro-lavadoras automotrices, para industria química y aplicaciones de caudales bajos a alta presión.

2.5.4. Características de rendimiento de una bomba

El aumento de carga real (H_p) ganado por el fluido a través de una bomba se puede determinar con un arreglo experimental del tipo que se muestra en la figura 32, usando la ecuación de energía se dice entonces que la carga real de la bomba es:

$$H_p = \frac{p_2 - p_1}{\gamma} \quad Ec. 109$$

Donde:

p_2 : presión a la salida de la bomba.

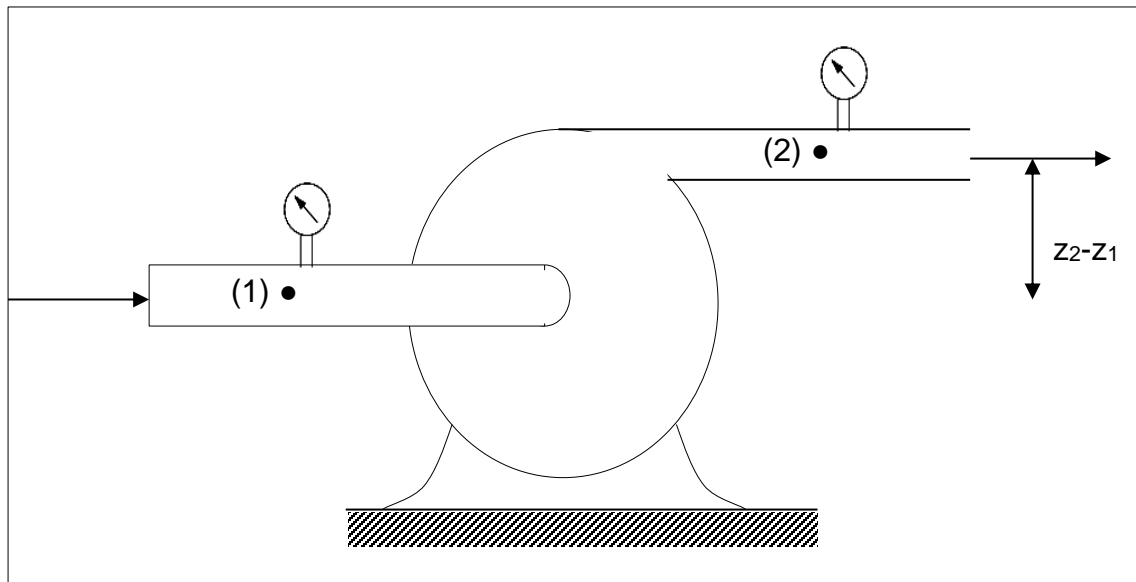
p_1 : presión en la entrada de la bomba.

γ : peso específico del fluido.

La potencia ganada por el fluido está dada por la ecuación 110:

$$P = \gamma \dot{V} H_p \quad Ec. 110$$

Figura 32. **Esquema para determinar el aumento de carga ganado por un fluido que circula a través de una bomba**



Fuente: MUNSON, Bruce R., OKIISHI, Theodore H., YOUNG, Donald f. *Fundamentos de Mecánica de Fluidos*. p. 774.

Además de la potencia es de interés la eficiencia total, ver ecuación 111:

$$\eta = \frac{P}{P_F} = \frac{P}{W_{eje}} \quad Ec. 111$$

El denominador de esta relación representa la potencia total aplicada al eje de la bomba, y a menudo se denomina potencia al freno.

Para determinar la potencia al freno es necesario utilizar un dinamómetro en el eje de la bomba, o instalar un medidor de potencia a la bomba.

2.5.5. Cabeza neta de succión positiva y cavitación

Cuando se está seleccionando una bomba es importante garantizar que la condición del fluido que entra a la bomba sea la apropiada para mantener un flujo completo de líquido. El factor principal es la presión del fluido en la entrada de la bomba.

El diseño de la tubería debe proporcionar una presión suficientemente alta para evitar que se desarrollen burbujas de vapor dentro del fluido en movimiento, condición que recibe el nombre de cavitación⁵².

La formación de burbujas de vapor depende de la naturaleza del fluido, la presión y temperatura en la línea de succión.

2.5.5.1. Cavitación

La cavitación se refiere a condiciones en ciertos lugares dentro de la bomba, la presión local se reduce a la presión de vapor del líquido, y, por lo tanto, ocurre un cambio de estado en la materia convirtiendo parte del líquido en vapor⁵³. A los espacios que ocupan las burbujas de vapor se les suelen llamar cavidades. Conforme las cavidades son transportadas a través de la bomba a una región de mayor presión, éstas implosionan con rapidez, y generan presiones localizadas extremadamente altas. Las burbujas implosionan próximas a los límites sólidos debilitando a su vez la superficie sólida, y después de repetidas implosiones, la superficie puede presentar picaduras, erosión y fatiga.

⁵² MOTT, Robert L. *Mecánica de Fluidos*. p. 411.

⁵³ POTTER, Merle C. y WIGGERT, David C. *Mecánica de Fluidos*. p. 542.

Cuando hay cavitación, el rendimiento de la bomba se degrada con severidad conforme el flujo volumétrico desciende. La bomba se hace ruidosa y genera un sonido fuerte e intermitente, como si hubiera grava en el fluido. Si se permitiera que esto continuara, la bomba se destruiría en poco tiempo. Debe apagarse e identificar la causa de la cavitación para corregirla⁵⁴.

2.5.5.2. Cabeza neta de succión positiva

Existen dos tipos de carga neta de succión positiva NSPH, por sus siglas en ingles. El primer tipo se denomina NSPH_R, carga neta de succión positiva requerida, este valor es un indicador de la medida de energía mínima necesaria para evitar que exista cavitación. Los fabricantes de bombas prueban cada diseño para determinar el nivel de la presión de succión que se requiere y reportan los resultados como NSPH_R.

El segundo tipo de NSPH es el NSPH_A, cabeza neta de succión positiva disponible, este valor depende de la presión del vapor del fluido que se bombea, las pérdidas de energía en el tubo de succión, la ubicación del almacenamiento del fluido y la presión que se aplica a éste⁵⁵.

De acuerdo con la definición anterior la ecuación 112 define la NSPH_A.

$$NSPH_A = \frac{P_{atm} - P_V}{\gamma} - \Delta Z - H_L \quad Ec. 112 \quad ^{56}$$

Donde:

⁵⁴ MOTT, Robert L. *Mecánica de Fluidos*. p. 412.

⁵⁵ *Ibíd.* p. 414.

⁵⁶ POTTER, Merle C. y WIGGERT, David C. *Mecánica de Fluidos*. p. 543.

P_{atm} : presión atmosférica de acuerdo con el nivel del mar del lugar donde este instalado el equipo de bombeo.

P_v : presión de vapor de fluido que se bombea.

γ : peso específico del fluido.

ΔZ : diferencia de alturas entre la entrada de fluido en la bomba y el espejo (nivel) del fluido en el tanque o depósito del mismo.

El American National Standards Institute (ANSI) y el Hydraulic Institute (HI) publican en conjunto estándares que especifican un margen mínimo de 10 % para $NPSH_A$ sobre la $NPSH_R$, como se indica en la ecuación 113.

$$NPSH_A > 1,10 NPSH_R \quad Ec. 113$$

El criterio anterior es el que se aplicará posteriormente en el capítulo 3 para el diseño del equipo de medidores de flujo.

En ciertas aplicaciones críticas como el control de inundaciones, ductos y servicio de generación de energía, se espera márgenes más elevados, de hasta 100 % de sobredimensionamiento.

2.5.6. Leyes de afinidad de bombas centrifugas

La similitud o afinidad en las máquinas hidrodinámicas tiene por objeto describir el funcionamiento de cierta máquina a la cual se le han cambiado algunas características, tal como la velocidad⁵⁷.

Es importante entender la manera en que varían la capacidad, carga, potencia y momento, cuando se modifica la velocidad o diámetro del impulsor de

⁵⁷ VIEJO ZUBICARAY, Manuel. *Bombas teoría, diseño y aplicaciones*. p. 63.

una bomba. Para comparar una bomba con el funcionamiento experimental, de otra máquina o modelo con geometría similar, o para la misma bomba se han desarrollado las relaciones de similitud o leyes de afinidad de las bombas.

- Las leyes de afinidad de bombas cuando se varía la velocidad angular de operación del impulsor de n_1 a n_2 son:
 - Los gastos \dot{V} son proporcionales a la velocidad angular, ver ecuación 114.

$$\frac{\dot{V}_1}{\dot{V}_2} = \frac{n_1}{n_2} \quad Ec. 114$$

Donde:

\dot{V}_1, \dot{V}_2 : gasto o flujo volumétrico de la bomba con impulsor 1 y 2.

n_1, n_2 : velocidad angular de los impulsores 1 y 2.

- Las cargas Hm son proporcionales al cuadrado de la velocidad angular, ver ecuación 115.

$$\frac{Hm_1}{Hm_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \quad Ec. 115$$

Donde:

Hm_1, Hm_2 : cargas de la bomba 1 y 2.

n_1, n_2 : velocidad angular de los impulsores 1 y 2.

- Los momentos requeridos en la flecha de la bomba M son proporcionales al cuadrado de la velocidad angular, ver ecuación 116.

$$\frac{M_1}{M_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \quad \text{Ec. 116}$$

Donde:

M_1, M_2 : momentos de las bombas 1 y 2.

n_1, n_2 : velocidad angular de los impulsores 1 y 2.

- Las potencias absorbidas P son proporcionales al cubo de la velocidad angular⁵⁸, ver ecuación 117.

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3 \quad \text{Ec. 117}$$

Donde:

P_1, P_2 : potencia de la bomba 1 y 2.

n_1, n_2 : velocidad angular de los impulsores 1 y 2.

- Las leyes de afinidad cuando el diámetro del impulsor varía de D_1 a D_2 son:
 - Los gastos \dot{V} son proporcionales al cubo del diámetro, ver ecuación 118.

$$\frac{\dot{V}_1}{\dot{V}_2} = \frac{D_1}{D_2} \quad \text{Ec. 118}$$

⁵⁸ VIEJO ZUBICARAY, Manuel. *Bombas teoría, diseño y aplicaciones*. p. 64.

Donde:

\dot{V}_1, \dot{V}_2 : gasto o flujo volumétrico de la bomba con impulsor 1 y 2.

D_1, D_2 : Diámetro del impulsor 1 y 2.

- Las cargas Hm son proporcionales al cuadrado del diámetro, ver ecuación 119.

$$\frac{Hm_1}{Hm_2} = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2 \quad Ec. 119$$

Donde:

Hm_1, Hm_2 : cargas de la bomba 1 y 2.

D_1, D_2 : Diámetro del impulsor 1 y 2.

- Si la velocidad angular es constante. Las potencias absorbidas P son proporcionales a la tercera potencia del diámetro⁵⁹. Ver ecuación 120.

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^3 \quad Ec. 120$$

Donde:

P_1, P_2 : potencia de la bomba 1 y 2.

D_1, D_2 : Diámetro del impulsor 1 y 2.

⁵⁹ MOTT, Robert L. *Mecánica de Fluidos*. p. 400.

2.5.7. Parámetros implicados en la selección de una bomba

Los parámetros de selección de una bomba son bastante amplios, la empresa Bornemann Pumps por medio del documento Seminario sobre selección de equipos y mantenimiento preventivo explica detalladamente los factores implicados en la selección de una bomba hidráulica⁶⁰:

- Naturaleza del fluido
 - Características reológicas
 - Fluido newtoniano (agua, aceite, alcohol, nafta, entre otros).
 - Fluido no newtoniano (pasta de dientes, melazas, mayonesa, chocolate, entre otros).
 - Viscosidad
 - Presión de vapor ¡qué tan volátil es!
 - Densidad
 - Temperatura
 - Agresividad química: ácido, alcalino, corrosivo, entre otros
 - Es abrasivo, ¿puede provocar erosión del impulsor?
 - Contenido de sólidos
 - Gases disueltos
- Condiciones de proceso
 - Flujo volumétrico requerido.

⁶⁰ Bornemann Pumps. *Seminario sobre selección de equipos y mantenimiento preventivo*. <https://bornemann.files.wordpress.com/2009/09/seleccion-y-mantenimiento-preventivo-bombas-de-tornillo-excentrico.pdf>.

- Cabeza o carga de la bomba a partir de ecuación general de la energía.
 - Presión atmosférica.
 - Condiciones de succión.
 - Presión en la línea de succión, positiva o vacío.
 - Cabeza neta de succión positiva disponible $NSPH_A$
 - Temperatura
 - Configuración de la línea de succión
 - Condiciones de descarga.
 - Presión de descarga de la bomba
 - Configuración de la línea de descarga
- Sistema donde la bomba impulsa fluido
 - Tipo de flujo requerido
 - Continuo, bomba rotodinámica
 - Intermitente o pulsante, bomba reciprocante o alternativa
 - Curvas características de la bomba
 - Uso sanitario y limpieza
 - Evitar o favorecer formación de espuma
 - Evitar o favorecer agitación mezcla y desglose
- Fuente de potencia
 - Motor eléctrico
 - Tensión de red eléctrica
 - ✓ 110 V
 - ✓ 220 V
 - ✓ 380 V

- ✓ 460 V
 - Frecuencia de red eléctrica
 - ✓ 60 Hz
 - Grado IP y aptitud para área peligrosas
 - Norma de construcción
 - ✓ NEMA (Asociación Norteamericana de Manufacturas eléctricas)
 - ✓ IEC (Comisión Electrotécnica Internacional)
 - ✓ ANCE (Asociación de Normalización y Certificación de México)
 - Motor de combustión interna
 - Diésel
 - Gasolina
 - Bunker
 - Otros combustibles
 - Motor hidráulico
 - Accionamiento neumático
 - Mecanismo de transmisión de potencia
 - Caja reductora
 - Caja multiplicadora
 - Correas y poleas
 - Acoplamientos
 - Engranajes
- Aspectos dimensionales
 - Tipo de conexión
 - Brida
 - ✓ ANSI B16.5/B16.1

- ✓ DIN EN 1092-1
 - Rosca
 - ✓ NPT (National Pipe Thread)
 - ✓ BSP/BPST (British Standard Pipe Parallel/British Standard Pipe Thread)
 - Sanitario
 - ✓ Clamp ISO 2852
 - ✓ DANESA DS 722.0
 - ✓ SUECA SMS 1145
 - ✓ DIN 11851/11864-1/2
 - Posición de montaje
 - Vertical
 - Horizontal
 - Pozo
 - Fundación o base necesaria
 - Limitación de espacio
- Condiciones ambientales
 - Intemperie o lugar cerrado y presencia de gases o vapores corrosivos.
 - Pinturas anticorrosivas
 - Pinturas epoxicas
 - Protección eléctrica
 - Áreas clasificadas
 - Motor
 - Instrumentación
 - Permisividad o pérdidas de sellado

- Costos
 - Adquisición de la bomba
 - Instalación
 - Base o soportes
 - Accesorios
 - Protecciones
 - Operación
 - Consumo de energía (eléctrica, térmica, entre otros)
 - Eficiencia
 - Consumibles
 - Confiabilidad
 - Mantenimiento y servicio
 - Facilidad de reparación
 - Frecuencia de servicio
 - Disponibilidad de repuestos
 - Servicio técnico cercano

- Códigos y estándares
 - Normas ANSI/HI
 - Normas API
 - API 610 Bombas centrífugas (ISO 13709)
 - API 676 Bombas rotativas DP
 - API 674 Bombas alternativas (ISO 13710)
 - API 682 Sellos mecánicos (ISO 21049)
 - Normas DIN-EN-ISO
 - DIN EN 733 / 734 /735 Bombas centrífugas
 - ISO 5099 / 9905 / 9908 Bombas centrífugas

- ISO 14847 Bombas rotativas DP
- ISO 16330 Bombas alternativas DP
- EN ISO 3069 / 12756 Sellos mecánicos
- Normas sanitarias
- Especificaciones y típicos de cliente
- Normas y legislación ambiental

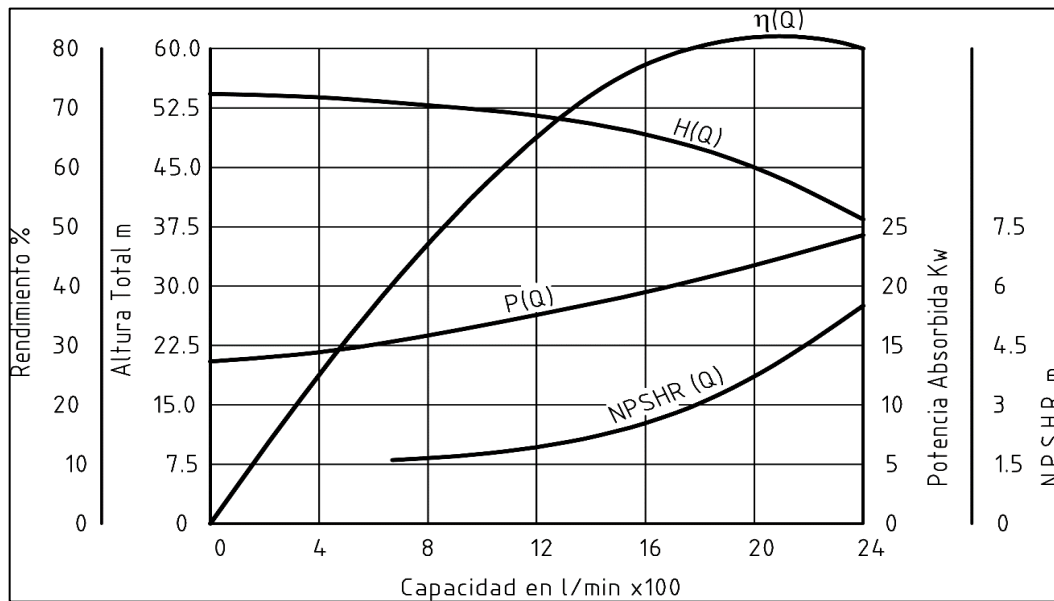
2.5.8. Punto de operación de una bomba

Las características de rendimiento para un geometría y velocidad de operación de una bomba dadas se proporcionan en forma de gráficas de carga H_p , velocidad angular del impulsor η y la potencia al freno P_F contra el flujo volumétrico \dot{V} ⁶¹.

En la figura 33 se muestra una curva característica típica de una bomba centrífuga radial. Estas bombas poseen una curva de carga descendente. La carga desarrollada por la bomba a descargar cero se denomina carga de cierre, y representa el aumento en la carga de presión a través de la bomba cuando la válvula de descarga está cerrada. Debido a que no hay flujo cuando la válvula está cerrada, la eficiencia relacionada es cero, y la potencia suministrada por la bomba simplemente es disipada como calor. Aunque las bombas centrífugas pueden operar durante cortos períodos con la válvula de descarga cerrada, puede haber daño debido al sobrecalentamiento y gran esfuerzo mecánico con cualquier operación prolongada con la válvula cerrada.

⁶¹ MUNSON, Bruce R., OKIISHI, Theodore H. y YOUNG, Donald f. *Fundamentos de Mecánica de Fluidos*. p. 774.

Figura 33. **Curvas de características de una bomba**



Fuente: Curvas características de una bomba. <https://areamecanica.files.wordpress.com/2011/06/grafico-curvas-bomba.png>. Consulta: 10 de octubre de 2019.

2.6. Pérdidas de energía

En cualquier transporte de un fluido a través de una tubería siempre existe resistencia al flujo, existe dos tipos de resistencia al flujo de un fluido: resistencia por fricción y resistencia por forma. Las resistencias al flujo son formas de disipación de energía debido a la irreversibilidad de un proceso, tal como lo explica la entropía.

2.6.1. Pérdidas por fricción

Las pérdidas por fricción son un medio de disipación de energía de un flujo debido a la fricción que se genera entre el fluido que se transporta y la pared o superficie de rozamiento del medio de transporte. También existe una pérdida de

fricción debido a las fuerzas viscosas del fluido y la interacción del flujo con la capa límite.

La experimentación ha demostrado que las pérdidas de energía por fricción dependen de factores con régimen de flujo, viscosidad, velocidad de flujo, entre otros.

2.6.1.1. Ecuación de Darcy

La forma más común de cuantificar las pérdidas de fricción en tuberías de sección con diámetro constante y un flujo estacionario; donde la línea de cargas piezométricas es paralela a la línea de energía e inclinada en la dirección del movimiento, es la ecuación de Darcy Weisbach, ver ecuación 121⁶².

$$H_{LF} = f \frac{L v^2}{D 2g} \quad Ec. 121$$

Donde:

f : factor de fricción

g : aceleración de la gravedad

H_{LF} : pérdida por fricción

D : diámetro de la tubería

L : longitud de la tubería

v : velocidad media del flujo

La ecuación de Darcy se utiliza tanto para flujo laminar como para flujo turbulento. La diferencia entre los dos flujos está en la evaluación del factor de fricción adimensional f .

⁶² SOTELO ÁVILA, Gilberto. *Hidráulica general*. p. 278.

2.6.1.2. Factor de fricción

El factor de fricción es un parámetro adimensional utilizado para dimensionar el efecto de la fricción en el flujo de un fluido. Este es función de la rugosidad de la tubería, diámetro, velocidad y viscosidad del fluido. Existe una ecuación para calcular el factor de fricción en flujo laminar y varias correlaciones matemáticas para flujo turbulento, estas ecuaciones serán descritas en los apartados 2.6.1.2.1. y 2.6.1.2.2. respectivamente.

Un método gráfico para determinar el factor de fricción es utilizar el diagrama de Moody (ver figura 35), también denominado diagrama universal del factor de fricción, este diagrama utiliza la correlación de Colebrook y White para flujo turbulento y la ecuación de Poiseuille de flujo laminar.

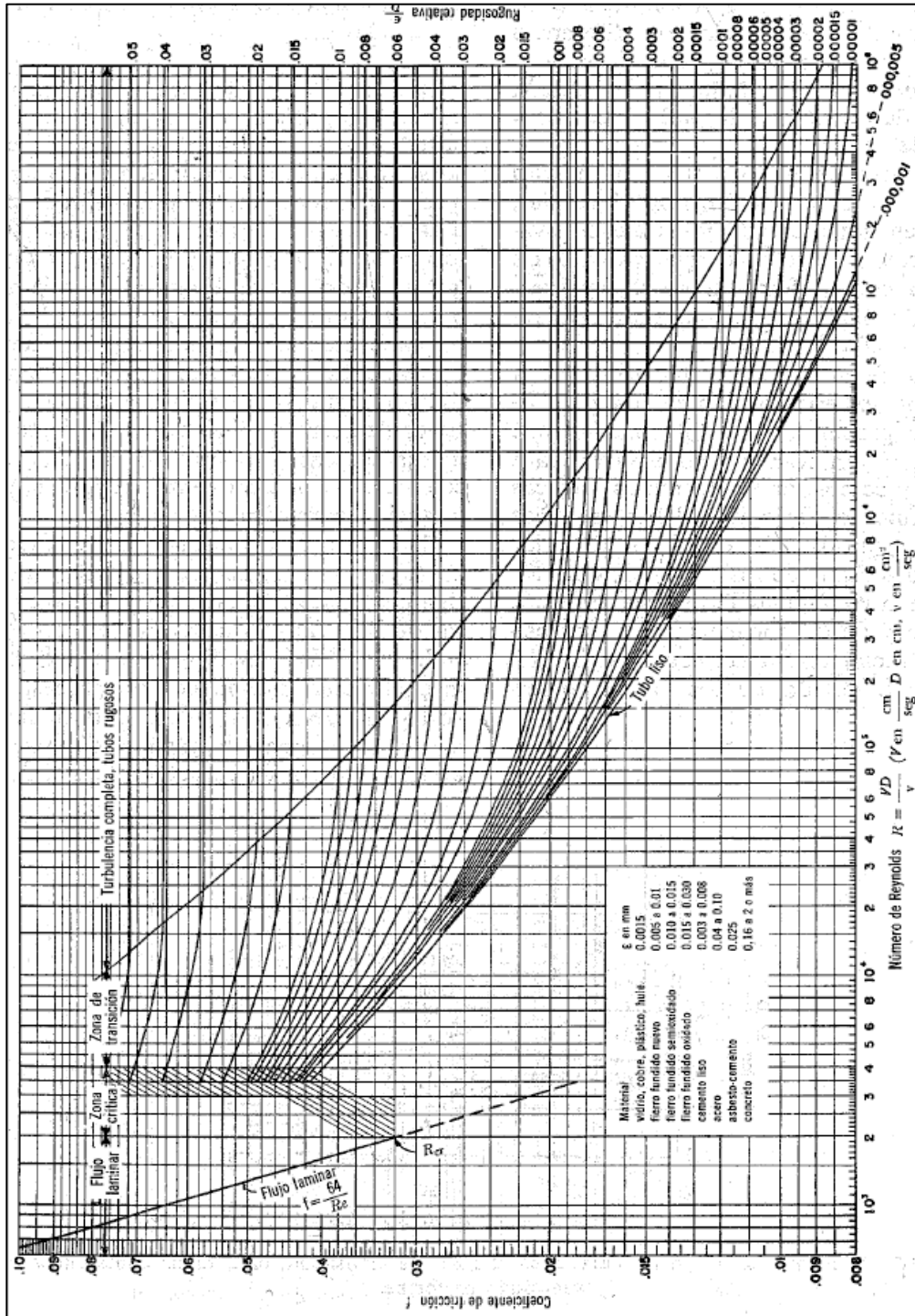
2.6.1.2.1. Pérdidas en flujo turbulento

A partir de los resultados experimentales acumulados hasta el año 1913, Blasius llegó a la importante conclusión de que existen dos tipos de fricción para el flujo turbulento en tubos. El primero está asociado con tubos lisos donde los efectos de viscosidad predominan y el factor de fricción depende del número de Reynolds y de la rugosidad relativa.

Blasius formuló la ecuación 123 para tubos lisos:

$$f = \frac{0,3164}{Re^{\frac{1}{4}}} \quad Ec. 123$$

Figura 34. Diagrama de Moody



Fuente: SOTELO ÁVILA, Gilberto. *Hidráulica general*. p. 282.

Las contribuciones más importantes para el cálculo del factor de fricción las realizó Nikuradse, alrededor de 1920. Este investigador obtuvo resultados de f contra R , en tubos lisos, que comprendían valores de hasta $Re = 3 \times 10^6$, obteniendo la ecuación 124.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log_{10}(Re\sqrt{f}) - 0,8 \quad Ec. 124$$

Además de la ecuación para tubos lisos, Nikuradse obtuvo la ecuación 125 válida para tubos rugosos en la zona turbulenta y que es:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log_{10}\left(\frac{D}{2\varepsilon}\right) + 1,74 \quad Ec. 125$$

Colebrook y White presentaron la ecuación 126, que es una fórmula empírica para la zona de transición entre flujo turbulento liso y flujo turbulento rugoso:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10}\left(\frac{\varepsilon/D}{3,71} + \frac{2,51}{Re\sqrt{f}}\right) \quad Ec. 126$$

En 1976 Swamee y Jain presentaron la fórmula para el factor de fricción, más utilizada actualmente para el cálculo de este factor (ver ecuación 127). La ecuación que desarrollaron es válida en los intervalos de rugosidad relativa y número de Reynolds $0,01 > \varepsilon/D > 10^{-6}$, y $10^8 > Re > 5\,000$ respectivamente⁶³.

⁶³ POTTER, Merle C. y WIGGERT, David C. *Mecánica de Fluidos*. p. 482.

$$f = \frac{0,25}{\left[\log_{10} \left(\frac{\varepsilon/D}{3,71} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^2} \quad Ec.127$$

2.6.1.3. Pérdidas en tuberías de secciones no circulares

En tuberías que no son de sección circular, se pueden hacer una buena aproximación de la pérdida de energía utilizando el concepto de radio hidráulico el cual fue definido en la sección 2.3.2.2.

Para un tubo circular que fluye completo el radio hidráulico R se determina por la ecuación 128:

$$R = \frac{r}{2} \quad Ec.128$$

Despejando el radio, se obtiene la ecuación 129:

$$r = 2Rh \quad Ec.129$$

La ecuación 130 define el diámetro equivalente:

$$D_e = 4Rh \quad Ec.130$$

Entonces para calcular la pérdida de fricción en secciones no circulares se puede emplear la ecuación 131 en conjunto con el diagrama de Moody:

$$Re = \frac{D_e v \rho}{\mu} \quad Ec.131$$

La rugosidad relativa ϵ , se puede determinar usando la ecuación 132:

$$\epsilon = \frac{\epsilon}{D_e} = \frac{\epsilon}{4 Rh} \quad Ec. 132$$

La pérdida de energía con la ecuación de Darcy se calcula, como se indica en la ecuación 133:

$$H_{LF} = f \frac{L}{4R} \frac{v^2}{2g} \quad Ec. 133$$

2.6.1.4. Ecuación de Hazen-Williams

Antes de que se conocieran las fórmulas de tipo logarítmico descritas en los apartados anteriores, las únicas disponibles para el diseño eran las de tipo exponencial, como se observa en la ecuación 134:

$$v = a D^X S^Y \quad Ec. 134$$

Una de ellas, de uso cotidiano hoy en día, es la fórmula de Hazen-Williams (ver ecuación 135):

$$v = 0,8494 C_H Rh^{0,63} S^{0,54} \quad Ec. 135$$

Donde:

v : velocidad medio de flujo (m/s).

Rh : radio hidráulico del flujo (m).

S : pendiente de la línea de energía ($\frac{H_{LF}}{L}$) o pérdida unitaria de carga, adimensional.

C_H : coeficiente de rugosidad de Hazen-Williams, que sólo depende del material del tubo.

La fórmula es válida dentro de las siguientes limitaciones⁶⁴:

- Solo sirve para tuberías rugosas.
- Solo sirve para conducción de agua.
- Es válida en el régimen turbulento.
- Es válida únicamente para valores de diámetro equivalente de tuberías mayor de 2 pulgadas.
- Es válido para flujos que no excedan los 3 m/s.

2.6.2. Pérdidas por forma

Las pérdidas por forma o menores, también llamadas pérdidas locales en algunos libros. Estas son un conjunto perdidas de energías en las que la dispersión de energía es provocada por la redistribución de las líneas de velocidad, aceleración y campo del flujo por obstrucciones o configuraciones geométricas en la tubería, generando a su vez lo que se conoce como turbulencia. Como las pérdidas son originadas por alteraciones geométricas en el flujo, a este tipo de disipación de energía hidráulica se le conoce como pérdidas por forma.

Las tuberías de conducción que se utilizan en las industrias están compuestas, generalmente por tramos rectos y curvos para ajustarse a los

⁶⁴ CHOREQUE MORAN, Wendor. *Mecánica de Fluidos I*. p. 172

accidentes topográficos del terreno, así como los cambios que se presentan en la geometría de la sección y los distintos dispositivos para control del flujo. Las perturbaciones entonces son generadas por accesorios, válvulas y elementos que se colocan en un sistema de tuberías. Estos cambios en el flujo originan pérdidas de energía, distintas a las de fricción, localizadas en el mismo sitio del cambio de geometría o de la alteración del flujo.

De igual forma que las pérdidas por fricción, las pérdidas por forma se expresan como una fracción de la carga de velocidad, inmediatamente aguas abajo del sitio donde se produjo la pérdida⁶⁵. La ecuación 136, es la fórmula general de pérdida por forma.

$$H_{FF} = K \frac{v^2}{2g} \quad \text{Ec. 136}$$

Donde:

H_{FF} : pérdida de energía por forma.

K : coeficiente de pérdida por forma, depende del tipo de pérdida, del número de Reynolds y de la rugosidad del tubo.

v : velocidad promedio del flujo.

g : aceleración de la gravedad.

Cabe resaltar que el cálculo del coeficiente de pérdida por forma es distinto para cada tipo de accesorio; aunque existen tablas con valores tabulados de K determinados por medio de experimentación, es preferible realizar el cálculo de este debido a que se incurre en un menor error.

⁶⁵ SOTELO ÁVILA, Gilberto. *Hidráulica general*. p. 296-297.

En los siguientes apartados se presentarán las ecuaciones empíricas más comunes para el cálculo del coeficiente de fricción.

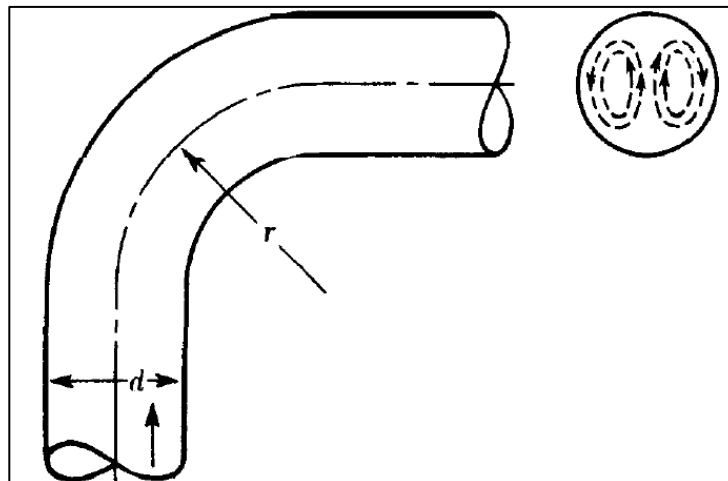
2.6.2.1. Codos de tuberías

La pérdida de energía se genera por la colisión del flujo con el codo al sufrir un cambio de dirección abrupto.

2.6.2.1.1. Flujo secundario

La naturaleza del flujo de líquidos en las curvas ha sido investigada completamente, y se han descubierto muchos aspectos interesantes. Por ejemplo, cuando un fluido pasa por una curva, ya sea en régimen laminar o turbulento, se establece en la curva una condición conocida como flujo secundario. En la figura 35 se puede observar el efecto del flujo secundario en una tubería

Figura 35. Flujo secundario



Fuente: CRANE. *Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías*. p. 2-15.

El flujo secundario es un movimiento de rotación perpendicular al eje de la tubería, que se superpone al movimiento principal en la dirección del eje. La resistencia debida a la fricción de las paredes de la tubería y la acción con la fuerza centrífuga combinadas producen esta rotación⁶⁶.

2.6.2.1.2. Resistencia de las curvas

Para calcular el coeficiente de pérdida K se hace una semejanza comparando a la curva como una tubería de longitud desarrollada, en diámetros de tubería, multiplicada por el factor de fricción f_T descrito y tabulado en la figura 36.

En la ecuación 137, se puede observar que existe una relación directa entre el radio de la curva de un codo y el coeficiente de pérdida de energía.

$$K = 0,5 f_T \pi \frac{r}{d} \quad Ec. 137$$

Donde:

K : coeficiente de pérdida.

f_T : factor de fricción de Darcy.

r : radio de la curva del codo.

d : diámetro del codo.

⁶⁶ CRANE. *Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías*. p. 2-15.

Figura 36. Valores del factor de fricción para tuberías comerciales, nuevas, de acero, con flujo en la zona de total turbulencia

| Diámetro nominal | mm | 15 | 20 | 25 | 32 | 40 | 50 | 65, 80 |
|-------------------------|------|-------|-------|-------|----------|---------|---------|----------|
| | pulg | 1/2 | 3/4 | 1 | 1 1/4 | 1 1/2 | 2 | 2 1/2, 3 |
| Factor de fricción (fT) | | 0,027 | 0,025 | 0,023 | 0,022 | 0,021 | 0,019 | 0,018 |
| Diámetro nominal | mm | 100 | 125 | 150 | 200, 250 | 300-400 | 450-600 | |
| | pulg | 4 | 5 | 6 | 8, 10 | 12-16 | 18-24 | |
| Factor de fricción (fT) | | 0,017 | 0,016 | 0,015 | 0,014 | 0,013 | 0,012 | |

Fuente: CRANE. *Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías*. p. A-46.

Este tipo de tablas permite determinar con mayor precisión el coeficiente de pérdida, también se usa para calcular la pérdida en otros accesorios, por lo que esta figura será mencionada con regularidad en las siguientes secciones.

2.6.2.1.3. Codos estándar

Para un codo estándar de 90 °, el factor K de fricción se puede calcular de acuerdo a la ecuación 138:

$$K = 30 f_T \quad \text{Ec. 138}$$

En el caso de un codo estándar de 45 ° se puede utilizar la ecuación 139:

$$K = 16 f_T \quad \text{Ec. 139}$$

2.6.2.2. Contracción y expansión súbita

Antes de presentar las ecuaciones para el cálculo del coeficiente de pérdida en contracciones y expansiones súbitas, se definirá la relación de diámetros internos (β) de tuberías pequeña (d_1) y tubería grande (d_2), ver ecuación 140.

$$\beta = \frac{d_1}{d_2} \quad \text{Ec. 140}$$

La resistencia al flujo debida a expansiones bruscas puede expresarse por la ecuación 141:

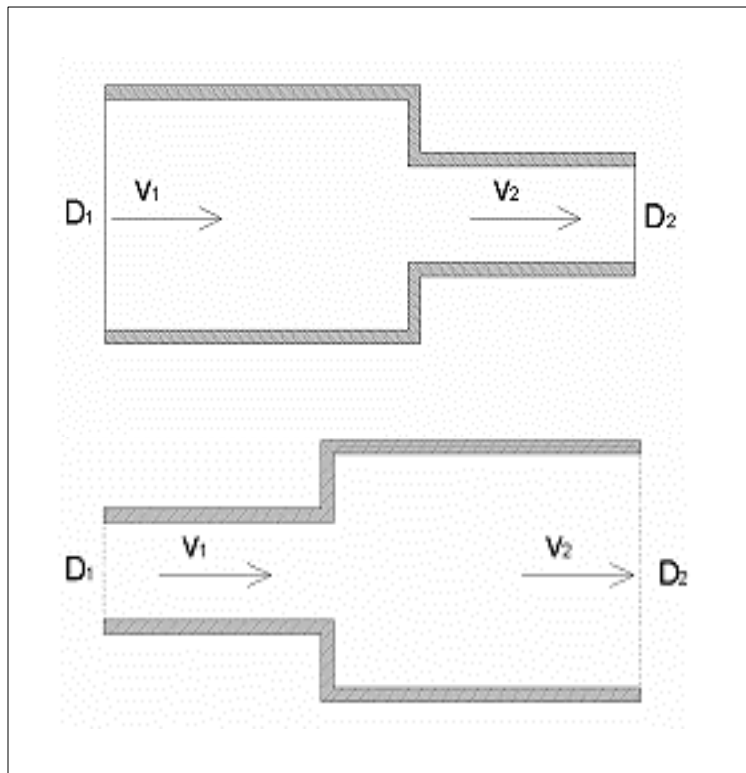
$$K_1 = (1 - \beta^2)^2 \quad \text{Ec. 141}$$

Y la resistencia debida a contracciones bruscas por la ecuación 142:

$$K_t = 0,5 (1 - \beta^2) \quad \text{Ec. 142}$$

Una ejemplificación de una contracción y expansión súbita se muestra en la figura 37.

Figura 37. **Contracción y expansión súbita en una tubería**



Fuente: SALAS, A. ocwus.us.es/ingenieria-agroforestal/hidraulica-y-riegos/temario/Tema%202.Conducciones%20forzadas/tutorial_22.htm. Consulta: 11 de octubre de 2019.

2.6.2.3. Contracción y expansión gradual

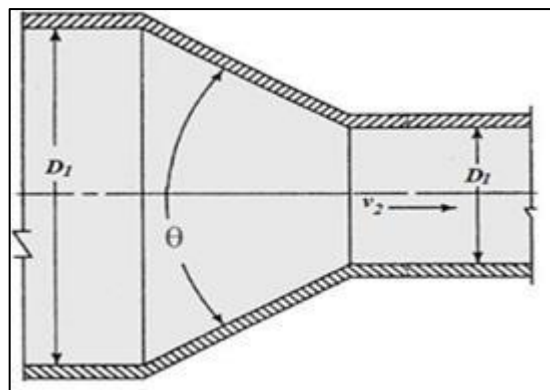
El coeficiente para una contracción gradual (ver figura 38) depende del ángulo de contracción (θ). Si el ángulo θ es menor a 45 grados, se utiliza la ecuación 143:

$$\theta < 45^\circ, \quad K = \frac{0,8 \operatorname{Sen} \left(\frac{\theta}{2} \right) (1 - \beta^2)}{\beta^4} \quad \text{Ec. 143}$$

Si el ángulo θ se encuentra dentro del rango de 45 a 180 grados, se utiliza la ecuación 144:

$$45^\circ < \theta < 180^\circ, \quad K = \frac{0,5 (1 - \beta^2) \sqrt{\operatorname{sen} \left(\frac{\theta}{2} \right)}}{\beta^4} \quad \text{Ec. 144}$$

Figura 38. Contracción gradual



Fuente: BOHÓRQUEZ PEÑAFIEL, Gabriel A., CAIZA VIVAZ, Luis E. y QUITIAQUEZ SARZOSA, William. *Análisis numérico de los perfiles de velocidad de un flujo de agua a través de una tubería con reducción gradual*. scielo.senescyt.gob.ec/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1390-65422018000300080#B16. Consulta: 11 de octubre de 2019.

De igual forma para una expansión gradual el coeficiente de resistencia depende del ángulo. Si el ángulo θ es menor a 45 grado se utiliza la ecuación 145:

$$\theta < 45^\circ, \quad K = \frac{2,6 \operatorname{Sen} \left(\frac{\theta}{2} \right) (1 - \beta^2)^2}{\beta^4} \quad \text{Ec. 145}$$

Si el ángulo se encuentra en el rango de 45 a 180 grados se utiliza la ecuación 146:

$$45^\circ < \theta < 180^\circ, \quad K = \frac{(1 - \beta^2)^2}{\beta^4} \quad \text{Ec. 146}$$

2.6.2.4. Válvulas

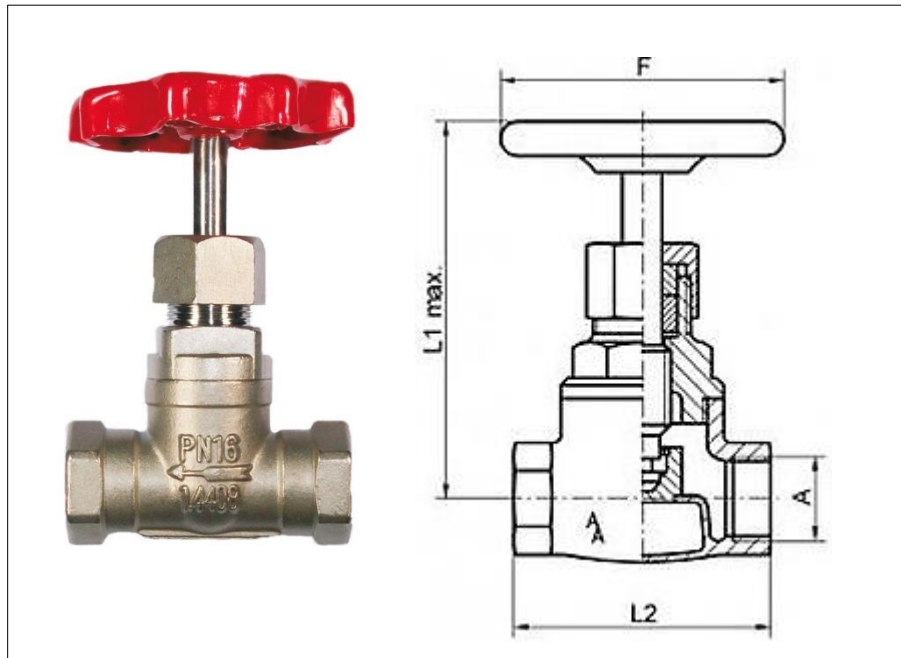
A continuación, se muestran las fórmulas para calcular K en válvulas.

2.6.2.4.1. Válvulas de compuerta

Una válvula de compuerta es una válvula que se abre mediante el levantamiento de una compuerta permitiendo el paso del fluido, la característica que permite distinguir este tipo de válvula es el asiento del disco en dos áreas distribuidas en los contornos de ambas caras del disco.

En la figura 39 hay una válvula de compuerta y un corte en sección.

Figura 39. **Válvulas de compuerta de cuña, de doble obturados o tipo macho (cónico)**



Fuente: Manual válvula de compuerta. www.directindustry.es/prod/armaturen-arndt/product-27019-934655.html. Consulta: 11 de octubre de 2019.

Existen tres ecuaciones para determinar el coeficiente de pérdida de energía.

Si el factor β es igual a 1 y no existe contracción gradual en la rosca o junta de conexión de la válvula se utiliza la ecuación 147:

$$K = 8f_T \quad \text{Ec. 147}$$

En el caso donde la tubería el factor β es menor a 1 y el ángulo de contracción gradual sea menor a 45 grados se emplea la ecuación 148.

$$K = \frac{(1 - \beta^2)^2 + \operatorname{sen}\left(\frac{\theta}{2}\right) [0,8 (1 - \beta^2) + 2,6(1 - \beta^2)^2]}{\beta^4} \quad \text{Ec. 148}$$

Cuando el ángulo θ se encuentra en el rango de 45 a 180 grados se utiliza la ecuación 149.

$$K = \frac{0,5 (1 - \beta^2)}{\beta^4} + \frac{0,5 (1 - \beta^2) \sqrt{\operatorname{sen}\left(\frac{\theta}{2}\right)}}{\beta^4} + \frac{(1 - \beta^2)^2}{\beta^4} \quad \text{Ec. 149}$$

2.6.2.4.2. Válvulas de globo

Una válvula de globo es un tipo de válvula que posee un tapón obturador en forma de cono sujeto y accionado por un vástago para abrir, cerrar o regular el flujo de un líquido que pasa por el orificio de paso, este orificio se encuentra en el cuerpo de la válvula.

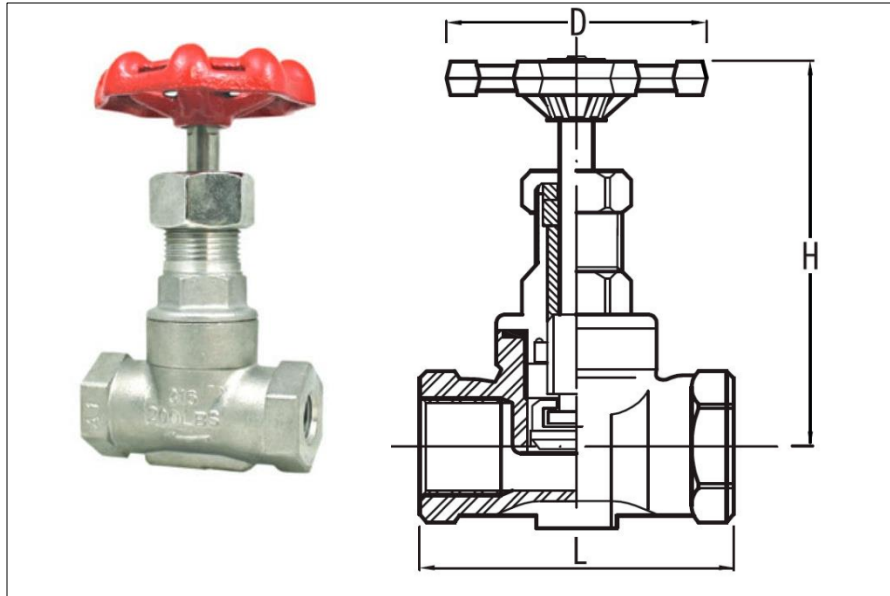
En la figura 40 se puede observar una fotografía de una válvula de globo de accionamiento manual y un esquema con las dimensiones características: diámetro, alto y largo.

En general existen dos formas de calcular el coeficiente K dependiendo de los siguientes criterios.

Si el diámetro aguas arriba y aguas abajo es el mismo, entonces β es igual a 1 y se puede emplear la ecuación 150.

$$K = 340 f_T \quad \text{Ec. 150}$$

Figura 40. **Válvula de globo**



Fuente: CRANE. *Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías*. p. A-47

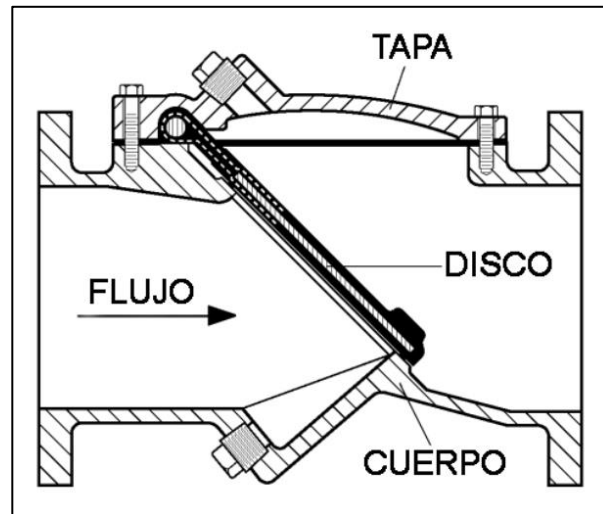
En el caso donde los diámetros varían y β es menor a 1, se utiliza la ecuación 151.

$$K = \frac{\frac{0,5(1 - \beta^2)}{\beta^4} + \beta [0,5(1 - \beta^2) + (1 - \beta^2)^2]}{\beta^4} \quad \text{Ec. 151}$$

2.6.2.4.3. **Válvulas de cheque o retención de disco oscilante**

La válvula antirretorno tiene por objetivo cerrar por completo el paso de un fluido en circulación en un sentido y dejar paso libre en el contrario. Este tipo de válvulas son muy utilizado en tuberías conectadas a sistema de bombeo para evitar golpes de ariete.

Figura 41. Válvula de disco oscilante recta



Fuente: LARA FIGUEROA, Sergio. *Válvula de retención Swing Flex*.
slidex.tips/download/valvula-de-retencion-swing-flex#. Consulta: 12 de octubre de 2019.

Para este tipo de válvula, si el disco se gira 90 grado levantándose por completo se dice que es una válvula de disco oscilante recta y el coeficiente K se cómo se indica en la ecuación 152.

$$K = 100 f_T \quad \text{Ec. 152}$$

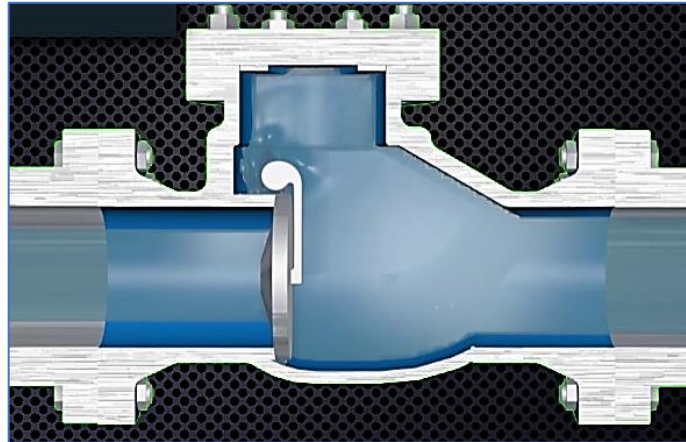
Donde:

K : coeficiente de pérdida de energía.

f_T : factor de fricción de Darcy.

En un tipo de válvula similar a la de disco oscilante recta es la curva que se puede observar en la figura 42. Esta válvula genera una pérdida de energía menor debido a que por su configuración espacial genera menos turbulencia, por tanto, su coeficiente K es menor como se ve en la ecuación 153.

Figura 42. **Válvula de disco oscilante curva**



Fuente: DFT INC. *Válvula antirretorno*. i.ytimg.com/vi/_jv0rx6QGO8/maxresdefault.jpg.

Consulta: 12 de octubre de 2019.

$$K = 50 f_T \quad \text{Ec. 153}$$

Donde:

K : coeficiente de pérdida de energía.

f_T : factor de fricción de Darcy.

2.6.2.4.4. Válvulas de pie con filtro o pichancha

Una válvula de pie es un tipo de válvula antirretorno que generalmente se utiliza en el inicio de una tubería de succión en bombas hidráulicas, su función es mantener fluido en la tubería cuando la bomba no está operando de manera que al volver a accionarla la presión de vacío habrá la válvula. En la figura 43 se muestra una válvula de pie con filtro.

Figura 43. **Válvulas de pie**



Fuente: EDHARD. *Válvula de pie*. www.directindustry.es/prod/erhard/product-119545-1283397.html. Consulta: 12 de octubre de 2019.

Para determinar el coeficiente K , cuando es una la válvula tiene un obturado ascendente, se emplea la ecuación 154:

$$K = 420 f_T \quad Ec. 154$$

Donde:

K : coeficiente de pérdida de energía.

f_T : factor de fricción de Darcy.

Si la válvula tiene un obturador oscilante, entonces se emplea la ecuación 155.

$$K = 75 f_T \quad Ec. 155$$

Donde:

K : coeficiente de pérdida de energía.

f_T : factor de fricción de Darcy.

2.6.2.4.5. Válvulas de bola o esfera

Una válvula de bola permite el paso de un fluido y se caracteriza por el que mecanismo para abrir y cerrar tiene forma de esfera perforada. Cuando se abre la perforación queda alineada con la tubería permitiendo el paso del fluido. En la figura 44 se puede observar una válvula con un corte de sección.

Figura 44. **Válvula de bola**



Fuente: IEDA. *Válvula de bola*. agrega.juntadeandalucia.es/repositorio/02042014/39/es-an_2014040213_9105644/ODE-9f67a703-4a82-3e0f-b915-a7c7cf62147a/index.html. Consulta: 12 de octubre de 2019.

Existen tres ecuaciones para determinar el coeficiente de pérdida K , su uso depende de la relación de diámetros β de las tuberías antes y después de la válvula y el ángulo θ de estrechamiento de la rosca o conexión. Si β es igual a 1 y θ es cero se utiliza ecuación 156:

$$K = 3 f_T \quad \text{Ec. 156}$$

Si β es menor a 1 y θ es menor a 45 grados, se emplea la ecuación 157.

$$K = \frac{(1 - \beta^2)^2 + \text{sen}\left(\frac{\theta}{2}\right) [0,8 (1 - \beta^2) + 2,6(1 - \beta^2)^2]}{\beta^4} \quad \text{Ec. 157}$$

En el caso donde θ está en el rango de 45 a 180 grados se usa la ecuación 158.

$$K = \frac{0,5 (1 - \beta^2)}{\beta^4} + \frac{0,5 (1 - \beta^2) \sqrt{\text{sen}\left(\frac{\theta}{2}\right)}}{\beta^4} + \frac{(1 - \beta^2)^2}{\beta^4} \quad \text{Ec. 158}$$

2.6.2.5. Pérdida en diversos accesorios

En el caso de accesorios de forma muy particular también existen fórmulas para calcular K , las cuales se muestran en los siguientes apartados.

2.6.2.5.1. Conexiones estándar en T

Una conexión en tee es un accesorio que sirve para derivar dos flujos a partir de uno, en la figura 45 se puede observar una tee estándar para tuberías.

Figura 45. **T estándar**



Fuente: Tee inoxidable roscar tipo 304. www.ferreteriaipilesya.com/wp-content/uploads/2017/09/tee-inox.jpg. Consulta: 12 de octubre de 2019.

Para el cálculo del coeficiente K existen dos casos. Cuando el flujo es directo usa la ecuación 159:

$$K = 20 f_T \quad \text{Ec. 159}$$

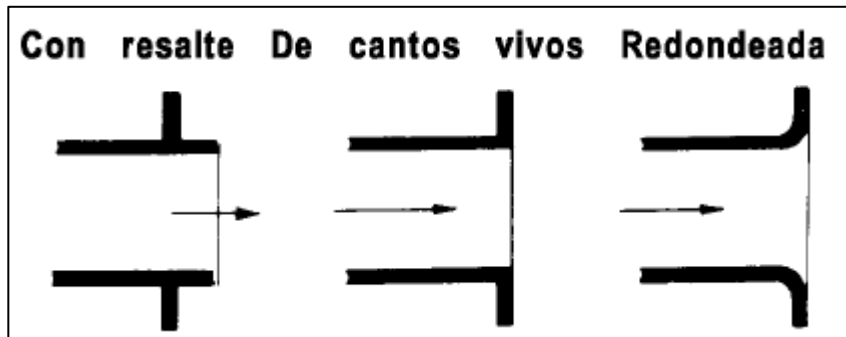
Si el flujo es desviado a 90° , se emplea la ecuación 160:

$$K = 60 f_T \quad \text{Ec. 160}$$

2.6.2.5.2. Salidas de tubería a tanques

Existe una pérdida de energía relacionada con la redistribución del flujo cuando hay una explosión súbita, como en el caso de la descarga de una tubería en un tanque, esto se ilustra en la figura 46.

Figura 46. Salidas de tuberías



Fuente: CRANE. *Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías*. p. A-49.

Para cualquier tipo de salida se utiliza la ecuación 161:

$$K = 1 \quad \text{Ec. 161}$$

2.6.2.5.3. Entradas de flujo de tanque a tubería

Para calcular los coeficientes de resistencia en las entradas existen cuatro casos, y cada uno se calcula de forma distinta:

- Tubería que se proyecta hacia adentro, ver ecuación 162.

$$K = 1 \quad \text{Ec. 162}$$

- Tubería soldada o colocada a tope con bordes afilados, ver ecuación 163.

$$K = 0,5 \quad \text{Ec. 163}$$

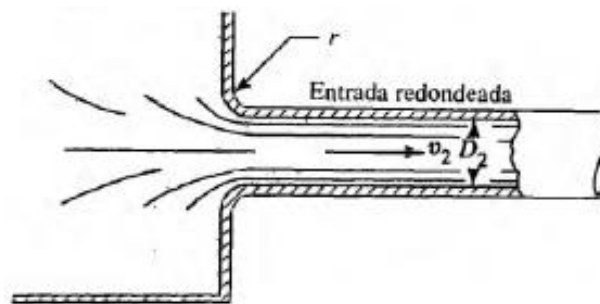
- Tubería con borde achaflanado se usa la ecuación 164.

$$K = 0,25 \quad \text{Ec. 164}$$

- Tubería con entrada redondeada.

Para este caso existen diversos valores tabulados dependiendo de la relación entre el radio del borde redondeado y el diámetro de la tubería, ver figura 47.

Figura 47. **Coefficientes de resistencia de para entradas**



| r/D_2 | K |
|---------|------------------------|
| 0 | 0.50 |
| 0.02 | 0.28 |
| 0.04 | 0.24 |
| 0.06 | 0.15 |
| 0.10 | 0.09 |
| >0.15 | 0.04 (Bien redondeada) |

Fuente: MOTT, Robert L. *Mecánica de Fluidos*. p. 293.

2.7. Flujo de fluidos en canales

En esta sección se describirá de manera breve el flujo de fluidos en canales abiertos.

2.7.1. Características generales del flujo en un canal

El flujo de un fluido en un canal tiene la particularidad que existe una superficie libre entre el fluido que circula y un fluido por encima de este (aire atmosférico)⁶⁷. Por este motivo se dice que el flujo en un canal circula a presión atmosférica, es decir, carece de presión positiva o manométrica. La fuerza motriz del flujo es generada entonces por la aceleración de la gravedad atmosférica.

Otra característica muy importante es que los canales no pueden transportar gases debido a que no pueden retenerlos y un gas se mezcla con el aire cuando entran en contacto. Por lo tanto, los canales solo se utilizan en con líquidos.

El movimiento de un líquido a superficie libre se ve afectado por las mismas fuerzas que intervienen en un flujo a presión dentro de un tubo⁶⁸. estas fuerzas son:

- La fuerza de gravedad, como la más importante en el movimiento
- La fuerza de resistencia ocasionada en las fronteras rígidas por la fricción y la naturaleza casi siempre turbulenta del flujo.

⁶⁷ MUNSON, Bruce R., OKIISHI, Theodore H., YOUNG, Donald f. *Fundamentos de Mecánica de Fluidos*. p. 623.

⁶⁸ SOTELO ÁVILA, Gilberto. *Hidráulica de canales*. p. 1.

- La fuerza producida por la presión que se ejerce sobre las fronteras del canal.
- La fuerza debida a la viscosidad del líquido, de poca importancia si el flujo es turbulento.

A las fuerzas anteriores, excepcionalmente se le puede agregar las siguientes:

- La fuerza de tensión superficial, consecuencia directa de la superficie libre
- Las fuerzas ocasionales debidas al movimiento del sedimento arrastrado

Como se mencionó anteriormente la superficie libre se considera como la intercara o interfase entre dos fluidos: el superior, que es aire estacionario o en movimiento, y el inferior, que usualmente es agua en movimiento. La gravedad y la tensión superficial amortiguan las perturbaciones en la superficie. Aunque se trate a la superficie libre con simplicidad, en la práctica su análisis es muy complejo, y únicamente a bases de suposiciones y generalizaciones es posible entender su mecánica.

De acuerdo con su origen, los canales pueden ser naturales o artificiales. Los naturales son las conducciones hidráulicas que existen para el drenaje natural sobre la tierra, como arroyos, ríos, estuarios, entre otros.

Los canales artificiales son construidos por el hombre para fines de riego, drenaje, generación de energía, navegación, entre otros. Este tipo de canal es interés para el presente trabajo, debido a que el equipo construido será fabricado.

Los canales artificiales tienen, por lo general, secciones geométricas de forma y dimensiones constantes en tramos más o menos largos. Cuando un canal tiene sección transversal e inclinación de plantilla constantes, se denomina prismático⁶⁹.

2.7.2. Ondas superficiales

La superficie libre del flujo en un canal, comúnmente se distorsiona debido a diversas fuerzas que actúan sobre la misma. La forma de la distorsión suele presentarse como ondas superficiales.

- Velocidad de onda: caracteriza el movimiento de una onda, se realiza la hipótesis de un flujo unidimensional uniforme para el cual se cumple la ecuación de continuidad más simple. La deducción no es de interés en este trabajo por lo que se omite, luego de una serie de sustituciones matemáticas, se llega a la ecuación 165 para la velocidad de una onda⁷⁰.

$$c = \sqrt{gy} \quad \text{Ec. 165}$$

Donde:

c : velocidad de una onda (m/s).

g : aceleración de la gravedad (m/s^2)

y : profundidad o altura del fluido en la sección del canal (m).

⁶⁹ SOTELO ÁVILA, Gilberto. *Hidráulica de canales*. p. 2.

⁷⁰ MUNSON, Bruce R., OKIISHI, Theodore H. y YOUNG, Donald f. *Fundamentos de Mecánica de Fluidos*. p. 627.

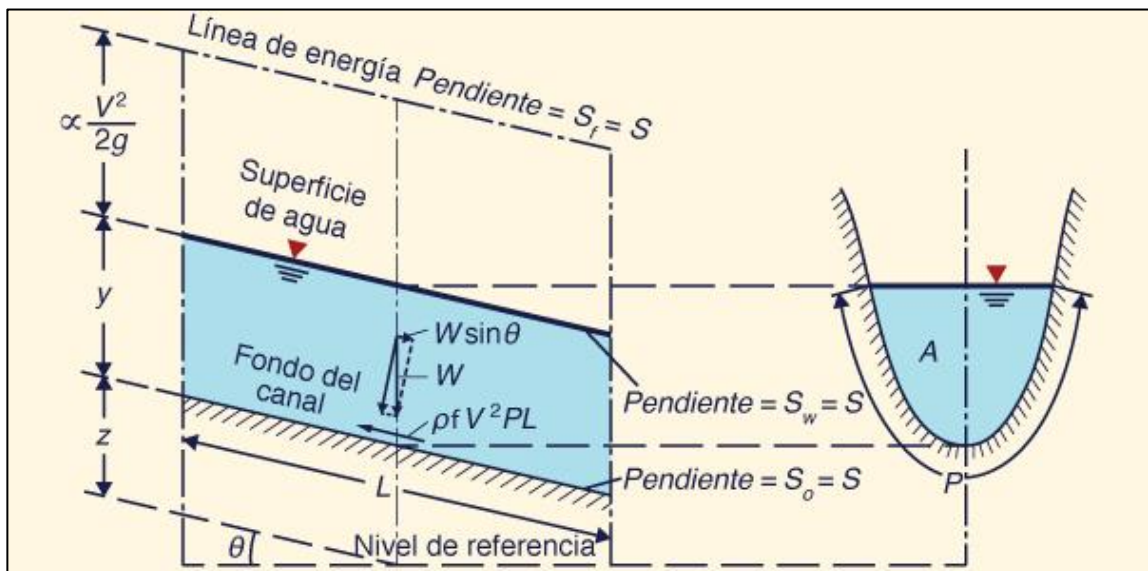
2.7.3. Consideraciones de energía

Tal como se explicó en el apartado anterior, la mayoría de los conceptos explicados en la sección 2.7. son para flujo uniforme estable puesto que es el más fácil de explicar y de interés para el presente trabajo. Aunque se abordara brevemente los temas de flujo gradualmente variado y de variación rápida, estos no son interés para el trabajo.

2.7.3.1. Energía hidráulica total en canales

En esta sección se deducen las ecuaciones de energía para un canal en flujo uniforme. En la figura 48 se puede observar las características geométricas y de energía de un canal.

Figura 48. Geometría de un canal



Fuente: PONCE, Víctor Miguel. *Drenaje de carreteras*.

ponce.sdsu.edu/drenaje_de_carreteras_a.html. Consulta: 12 de octubre de 2019.

Con la hipótesis de perfil de velocidad uniforme a través de cualquier sección de un canal, la ecuación 166 para flujo unidimensional es:

$$y_1 + \frac{v_1^2}{2g} + S_o L = y_2 + \frac{v_2^2}{2g} + S_f L \quad \text{Ec. 166}$$

Donde:

y_1 : profundidad del fluido en el canal en el punto 1.

v_1 : velocidad media del flujo en el punto 1.

S_o : pendiente de fondo del canal, definida por la ecuación 167:

$$S_o = \frac{Z_1 - Z_2}{L} \quad \text{Ec. 167}$$

L : longitud de la sección del canal a analizar.

y_2 : profundidad del fluido en el punto 2.

v_2 : velocidad media del flujo en el punto 2.

$Z_1 - Z_2$: diferencia de altura entre el punto 1 y 2.

S_f : pendiente fricción cuya definición se puede ver en la ecuación 168:

$$S_f = \frac{H_L}{L} \quad \text{Ec. 168}$$

H_L : pérdidas de energía por fricción.

- Pérdida de energía

La pérdida de energía en un canal comúnmente se calcula con la ecuación 169 de Darcy-Weisbach.

$$H_L = f \frac{L}{4 Rh} \frac{v^2}{2g} \quad Ec.169$$

La diferencia entre el cálculo de la pérdida de energía en un flujo a presión y un flujo en un canal es la forma en que se determina el factor de fricción.

2.7.3.2. Energía específica

El concepto de energía específica E , definido como se muestra en la ecuación 170:

$$E = y + \frac{v^2}{2g} \quad Ec.170$$

A menudo es de utilidad en consideraciones de flujo en un canal abierto. La ecuación 166 de energía descrita en la sección anterior se puede escribir en términos de E como se observa en la ecuación 171:

$$E_1 = E_2 + (S_f - S_0)l \quad Ec.171$$

Si las pérdidas de carga son insignificantes, entonces la pendiente de fricción S_f vale cero. De modo que la ecuación 172 es válida con la suposición anterior.

$$(S_f - S_0)l = -S_0l = z_2 - z_1 \quad Ec.172$$

Si la suma de la energía específica y la elevación del fondo del canal permanecen constantes, como se indica en la ecuación 173.

$$E_1 + z_1 = E_2 + z_2 \quad \text{Ec. 173}$$

Enunciado la ecuación de Bernoulli donde hay conservación de energía.

Si se considera un canal simple cuya forma de sección transversal es un rectángulo de ancho b , la energía específica se puede escribir en términos del caudal por unidad de ancho q .

La unidad de ancho se define como el flujo volumétrico por ancho de canal, ver la ecuación 174.

$$q = \frac{\dot{V}}{b} = vy \quad \text{Ec. 174}$$

Por tanto, la velocidad se puede definir como se indica en la ecuación 175.

$$v = \frac{q}{y} \quad \text{Ec. 175}$$

Reescribiendo la ecuación de energía específica se obtiene la ecuación 176:

$$E = y + \frac{q^2}{2gy^2} \quad \text{Ec. 176}$$

2.7.4. Tipos de flujos

La dimensión característica de los canales es el radio hidráulico Rh , definido como la relación del área transversal A_T neta de una corriente al perímetro

mojado P_m de la sección⁷¹. La ecuación 177 muestra la expresión matemática del radio hidráulico Rh .

$$Rh = \frac{A_T}{P_m} \quad Ec. 177$$

Para más detalles de la forma consultar la sección 2.3.2.2.

Para clasificar los tipos de flujos en canales abiertos se utiliza el número de Reynolds, basándose en la ecuación 178:

$$Re = \frac{vD\rho}{\mu} \quad Ec. 178$$

Como ya se mencionó, la dimensión característica de un canal abierto es el radio hidráulico Rh . En apartados anteriores se dijo que para una sección transversal circular llena, $D = 4 Rh$. Para secciones transversales no circulares, cerradas, era conveniente sustituir $4 Rh$ por D , de modo que el número de Reynolds tendría el mismo orden de magnitud que la de ductos y tuberías. Sin embargo, en el análisis de flujo en canales abiertos por lo general esto no se hace.

El número de Reynolds y los términos laminar y turbulento no bastan para caracteriza todas las clases de flujo en los canales abiertos. Es conveniente analizar la relación entre fuerzas inerciales y gravitacionales, para ello se calcula el número de Froude Fr ⁷². La ecuación 179 se utiliza para determinar el número de Froude en canales.

⁷¹ MOTT, Robert. *Mecánica de fluidos*. p. 446.

⁷² *Ibíd.* p. 447.

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g y_h}} \quad Ec. 179$$

Donde:

F_r : número de Froude.

y_h : profundidad hidráulica.

v : velocidad media del flujo del canal.

g : aceleración de la gravedad.

La profundidad hidráulica o tirante hidráulico se define por la ecuación 180:

$$y_h = \frac{A_T}{T} \quad Ec. 180$$

Donde:

A_T : área de la sección transversal del canal.

T : ancho del canal en la superficie libre del fluido (tirante hidráulico).

Dependiendo del valor del número de Froude el flujo en un canal se puede clasificar en:

- Flujo crítico: $F_r = 1$
- Flujo subcrítico: $F_r < 1$
- Flujo supercrítico: $F_r > 1$

Entonces dependiendo de las diferentes configuraciones es posibles clasificar los tipos de flujo en:

- Flujo subcrítico laminar: $Re < 500$ y $Fr < 1$

- Flujo subcrítico turbulento: $Re > 2\,000$ y $Fr < 1$
- Flujo supercrítico turbulento: $Re > 2\,000$ y $Fr > 1$
- Flujo supercrítico laminar: $Re < 500$ y $Fr > 1$

Además, es posible clasificar los flujos en la región de transición. Sin embargo, tales flujos son inestables y muy difíciles de caracterizar:

- Flujo subcrítico de transición: $500 < Re < 2\,000$ y $Fr < 1$
- Flujo supercrítico de transición: $500 < Re < 2\,000$ y $Fr > 1$
- Flujo crítico de transición: $500 < Re < 2\,000$ y $Fr = 1$
- Flujo crítico laminar: $Re < 500$ y $Fr = 1$
- Flujo crítico turbulento: $Re > 2\,000$ y $Fr = 1$

Existe una clasificación de los flujos de acuerdo con la variación de sus características respecto al tiempo y espacio.

- Flujo permanente y no permanente. Esta clasificación obedece a la utilización del tiempo como criterio. Es permanente cuando la velocidad media en una sección dada se mantiene constante en el tiempo o en un lapso especificado. Lo contrario sucede cuando no es permanente.
- Flujo uniforme y variado. Esta clasificación obedece a la utilización del espacio como criterio. El flujo uniforme se presenta cuando la velocidad media permanece constante en cualquier sección del canal. Esto significa que su área hidráulica y tirante también son constantes.

Un flujo permanente puede ser variado o uniforme. El flujo variado se puede, a su vez, clasificar en gradual, rápido y espacialmente variado. En el gradualmente variado el tirante cambia de forma gradual a lo largo del canal. En

el rápidamente variado acontece lo contrario, como en un salto hidráulico. En el espacialmente variado el gasto cambio a lo largo del canal o en un tramo de este. La clasificación se muestra a continuación:

- Flujo permanente
 - Uniforme
 - Variado
 - Gradualmente
 - Rápidamente
 - Espacialmente

- Flujo no permanente variado
 - Gradualmente
 - Rápidamente
 - Espacialmente

2.7.5. Flujo en un canal de profundidad uniforme

El flujo a profundidad uniforme se puede lograr ajustando la pendiente de fondo S_0 , de modo que sea precisamente igual a la pendiente de la línea de energía, S_f . Es decir, $S_0 = S_f$. Desde el punto de vista de energía, el flujo a profundidad uniforme se logra por medio de un equilibrio entre la energía potencial ganada y la energía disipada por efectos viscosos⁷³.

⁷³ MUNSON, Bruce R., OKIISHI, Theodore H. y YOUNG, Donald f. *Fundamentos de Mecánica de Fluidos*. p. 635.

2.7.5.1. Flujo estable uniforme

Se denomina flujo estacionario y uniforme aquel cuyas características hidráulicas no varían con respecto al tiempo y el espacio⁷⁴. Por tanto, se puede afirmar que la velocidad de cambio del tirante respecto al tiempo es cero, ver ecuación 181, y que la velocidad de cambio del tirante respecto a longitud no varía, ver ecuación 182.

$$\frac{\partial y}{\partial t} = 0 \quad \text{Ec. 181}$$

$$\frac{\partial y}{\partial L} = 0 \quad \text{Ec. 182}$$

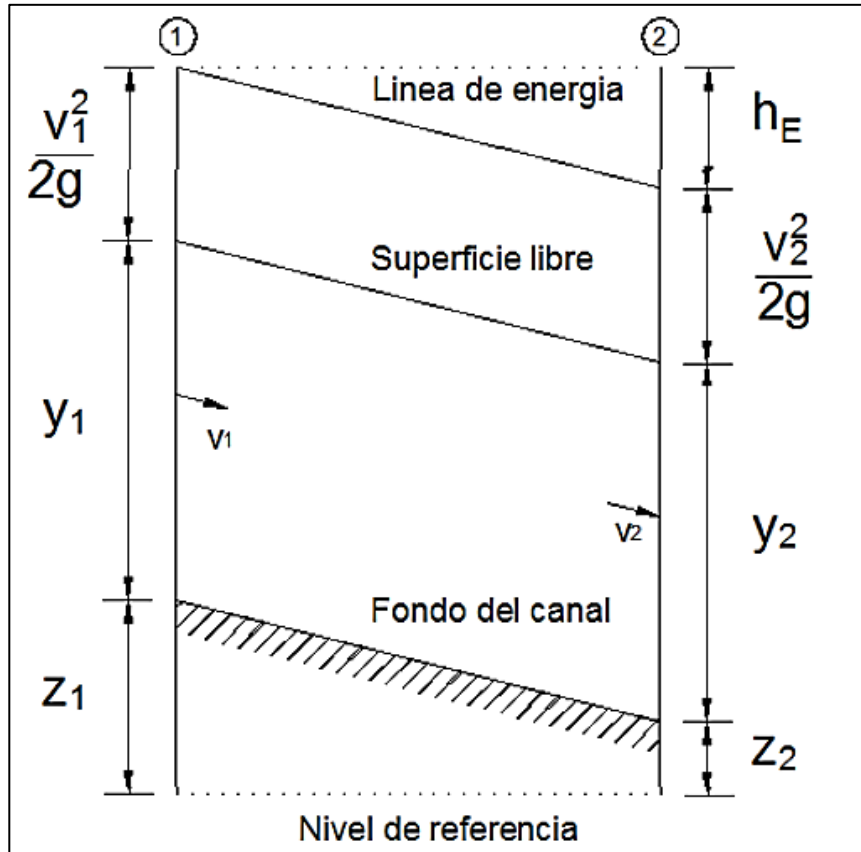
Para ejemplificar esto se muestra la figura 49. Lo que observamos es que tanto las condiciones del punto 1 y el punto 2 son las mismas, manteniendo paralelas las líneas de energía.

El flujo uniforme es paralelo y toma lugar en un canal de pequeña pendiente de fondo ($\theta < 6^\circ$).

El flujo uniforme rara vez ocurre en los canales naturales debido a que no son prismáticos. Aun en los prismáticos es poco frecuente por la existencia de controles, como vertederos, compuertas, entre otros, que dictan una relación entre el gasto y el tirante diferente de la apropiada al flujo, dificultando su establecimiento.

⁷⁴ URRUTIA, Norberto. *Hidráulica de canales*. p. 3-1.

Figura 49. Flujo uniforme en un canal



Fuente: EB, Joel. www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/5277/TESIS.pdf?sequence=1. Consulta: 12 de octubre de 2019.

En un canal de cierta pendiente y rugosidad, que debe conducir un caudal conocido, el estado de flujo uniforme es el criterio que rige al área de la sección transversal mínima requerida. Aun cuando exista otra situación que determine sus dimensiones, estas difícilmente serán menores que las de la sección mencionada, ya que la tendencia natural del flujo será tratar de alcanzar dicho estado.

Teniendo en cuenta la definición del flujo estacionario y uniforme, el flujo uniforme se presenta cuando:

- La velocidad, y con ella el tirante y el área hidráulica, permanecen constantes en cada sección.
- La línea de energía, la superficie libre del agua y la plantilla del canal son paralelas.

Para alcanzar o alejarse del flujo uniforme es forzosa la presencia de un flujo variado antes o después del uniforme, que sirva de transición entre un estado a otro flujo uniforme, o entre dos uniformes distintos. Cuando la longitud del canal no es suficiente para alojar a uno u otro tramo de transición, el flujo uniforme no alcanza a establecerse⁷⁵.

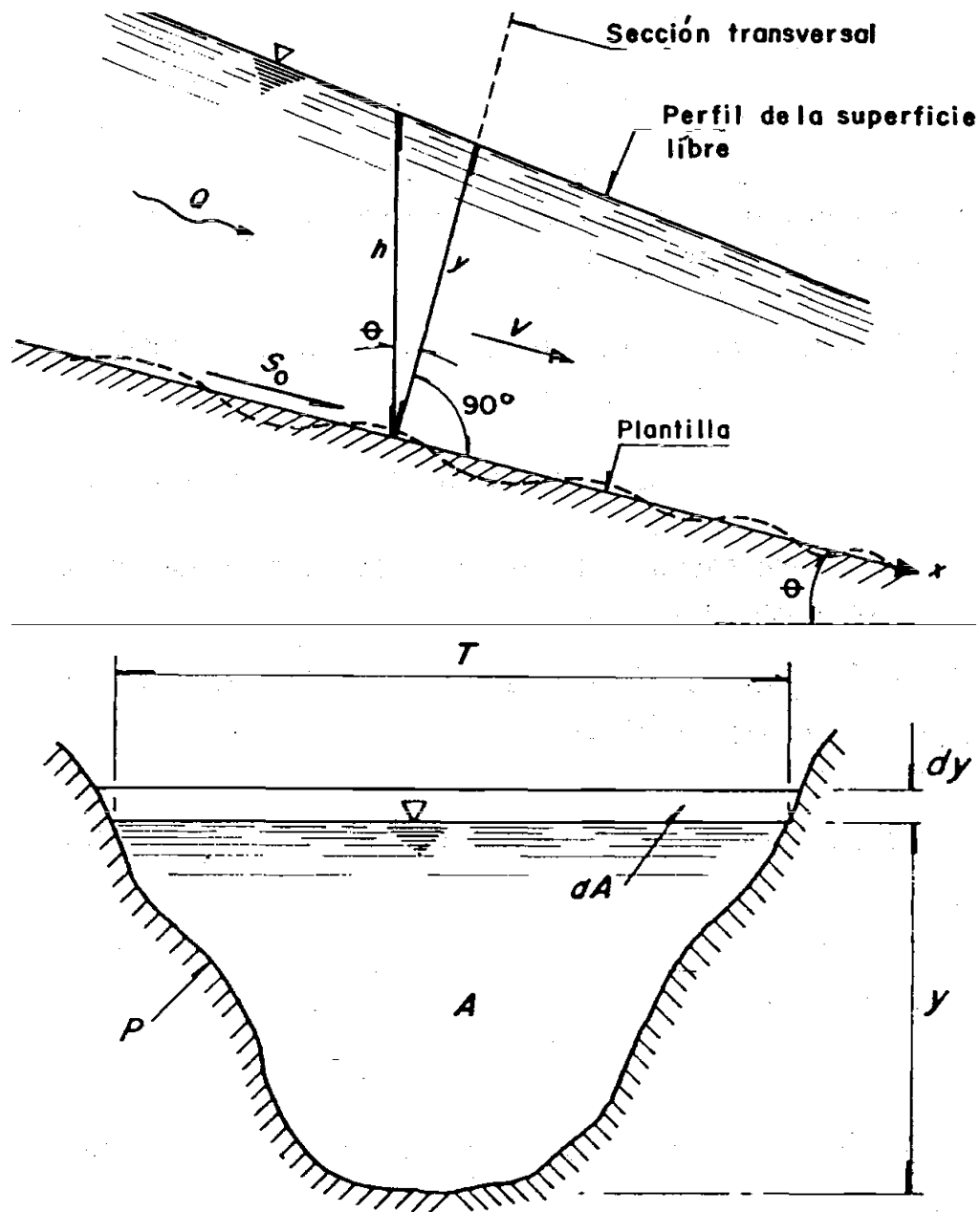
2.7.5.2. Geometría de los canales más comunes

La sección transversal de un canal se localiza mediante la coordenada x sobre la plantilla según su eje, ver figura 50. Los elementos geométricos más importantes de la sección se describen a continuación.

Se denomina tirante a la distancia y perpendicular a la plantilla, medida desde el punto más bajo de la sección hasta la superficie libre del agua. Es decir, es normal a la coordenada x . Otros elementos como: área transversal o hidráulica, perímetro mojado, radio hidráulico y tirante hidráulico ya fueron definidos en la sección 2.7.4.

⁷⁵ SOTELO ÁVILA, Gilberto. *Hidráulica de canales*. p. 66.

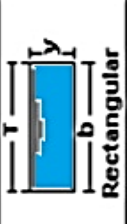
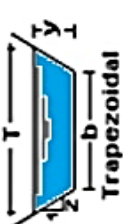

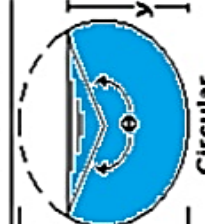
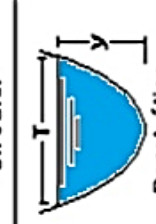
Figura 50. Elementos geométricos de un canal



Fuente: SOTELO ÁVILA, Gilberto. *Hidráulica de canales*. p. 3.

En la figura 51, se muestran las secciones transversales de los canales más comunes.

Figura 51. Elementos geométricos de las secciones más comunes

| Sección | Area hidráulica A | Perímetro mojado P | Radio hidráulico R | Espejo de agua T |
|---|--|-----------------------|---|---|
|  <p>Rectangular</p> | by | $b+2y$ | $\frac{by}{b+2y}$ | b |
|  <p>Trapezoidal</p> | $(b+zy)y$ | $b+2y\sqrt{1+z^2}$ | $\frac{(b+zy)y}{b+2y\sqrt{1+z^2}}$ | $b + 2zy$ |
|  <p>Triangular</p> | zy^2 | $2y\sqrt{1+z^2}$ | $\frac{zy}{2\sqrt{1+z^2}}$ | $2zy$ |
|  <p>Circular</p> | $\frac{(\theta - \text{sen}\theta)D^2}{8}$ | $\frac{\theta D}{2}$ | $(1 - \frac{\text{sen}\theta}{\theta}) \frac{D}{4}$ | $(\text{sen}\frac{\theta}{2}) D$ ó $2\sqrt{y(D-y)}$ |
|  <p>Parabólica</p> | $2/3 Ty$ | $T + \frac{8y^2}{3T}$ | $\frac{2T^2y}{3T^2+8y^2}$ | $\frac{3A}{2Y}$ |

Fuente: MARTINEZ, James. www.slideshare.net/JamesMartinez16/clase-8-diseo-hidraulico-de-canales-2017293-74009783. Consulta: 12 de octubre de 2019.

2.7.5.3. Las ecuaciones de Chezy y Manning

Con la hipótesis de flujo estacionario uniforme se obtiene la ecuación 183, que es la forma más antigua para el estudio del flujo de fluidos en canales abiertos.

$$v = C\sqrt{RhS} \quad Ec. 183$$

Esta ecuación se denomina ecuación de “Chezy” y sus términos son:

v : velocidad media del flujo.

C : factor de resistencia a la fricción

Rh : radio hidráulico

S : seno del ángulo theta θ , $S = \text{sen } \theta$.

θ : ángulo de inclinación del fondo del canal con respecto a la línea horizontal.

Para determinar C existen dos tipos de métodos:

- Por medio de coeficientes de fricción realizando una analogía con la ecuación de Darcy Weisbach para conductos a presión
- Por medio de ecuaciones empíricas de fricción

En este trabajo se tratará únicamente la segunda opción. La mayor parte de los problemas de canales que se presentan en la práctica están dentro de la región hidráulicamente rugosa del flujo turbulento. Para esta condición se han obtenido de manera experimental una buena cantidad de ecuaciones que valúan el factor C (ver figura 53) y los coeficientes de rugosidad (ver figura 52).

Figura 52. Coeficientes de rugosidad

| 1. Conductos cerrados parcialmente llenos | Ganguillet y Kutter n | Kutter m | Bazin N_B | Kozeny N_K |
|---|--|---------------|----------------|-----------------|
| Fierro fundido nuevo. | 0.012 | 0.20 | 0.06 | |
| Fierro fundido usado. | | 0.25 | 0.12 | |
| Fierro colado. | 0.012 | 0.20 | | |
| Barro vitrificado nuevo. | | 0.25 | | |
| Barro vitrificado usado. | 0.017 | 0.30 a 0.35 | | |
| Tubos de alcantarillado. | 0.017 a 0.020 | 0.30 a 0.35 | | |
| Túneles de concreto pulido. | 0.011 a 0.013 | 0.20 a 0.25 | 0.22 | |
| 2. Canales abiertos | Ganguillet y Kutter n | Kutter m | Bazin N_B | Kozeny N_K |
| Madera cepillada. | 0.010 | 0.15 a 0.20 | 0.06 | |
| Madera de acabado rugoso. | | 0.30 a 0.35 | | |
| Mampostería de ladrillo bien acabada. | 0.013 | 0.25 | 0.16 | 70 a 76 |
| Cemento pulido. | | 0.20 a 0.25 | 0.10 a 0.16 | 84 a 90 |
| Concreto pulido. | 0.012 | 0.20 | 0.11 a 0.22 | |
| Concreto rugoso. | 0.017 | 0.65 | 0.45 | 58 a 62 |
| Piedra brasa bien acabada. | 0.017 | 0.65 | 0.46 | 60 a 70 |
| En tierra, arroyos y ríos. | 0.025 | 1.75 | 1.4 a 1.6 | |
| En tierra con material grueso y plantas. | 0.035 | 2.0 a 2.5 | 1.75 | |
| Con cantos rodados. | 0.04 a 0.5 | 3.5 a 5.0 | hasta 3.5 | |
| Con gran rugosidad de fondo y maleza tupida. | hasta 0.9 | | | |
| Roca acomodada. | | | | 36 a 50 |
| Roca a volteo. | | | | 28 a 36 |
| Grava | $\left\{ \begin{array}{l} \text{gruesa (10 a 15 cm).} \\ \text{media (5 a 10 cm).} \\ \text{fina (2 a 3 cm).} \end{array} \right.$ | | | 32 a 38 |
| | | | | 38 a 42 |
| | | | | 42 a 46 |
| Cantos rodados (15 a 20 cm). | | | | 28 a 32 |

Fuente: SOTELO ÁVILA, Gilberto. *Hidráulica de canales*. p. 84.

Figura 53. Ecuaciones para el cálculo del factor de fricción C de Chezy

| Autor | Ecuación | Observaciones |
|---------------------|---|---|
| Ganguillet y Kutter | $C = \frac{23 + \frac{1}{n} + \frac{0.00155}{S}}{1 + \left[23 + \frac{0.00155}{S} \right] \frac{n}{\sqrt{R_h}}}$ | <p>Aconsejable en canales naturales, para los que usualmente conduce a resultados satisfactorios. Es compleja y tiene la desventaja de que ocurren cambios grandes en C para cambios pequeños en n. Este coeficiente depende de la rugosidad del canal, según la tabla 2.5.</p> |
| Kutter | $C = \frac{100 \sqrt{R_h}}{m + \sqrt{R_h}}$ | <p>Es una simplificación de la de Ganguillet y Kutter, m es un coeficiente de rugosidad según la tabla 2.5.</p> |
| Bazin | $C = \frac{87}{1 + \frac{N_b}{\sqrt{R_h}}}$ | <p>Está basada en una buena cantidad de experimentos y es relativamente sencilla, N_b es un coeficiente de rugosidad según la tabla 2.5.</p> |
| Kozeny | $C = 20 \log \frac{A}{T} + N_K$ | <p>Es análoga a la de los conductos a presión y fue obtenida con base en los resultados experimentales de von Mises y Bazin. N_K es un coeficiente de rugosidad según la tabla 2.5.</p> |
| Martínez | $C = 17.7 \log \left[\frac{R_h}{d_m} \right] + 13.6$ | <p>Se obtuvo de muchas mediciones en ríos de la exUnión Soviética. d_m es el diámetro medio del grano de material en el fondo del río en m. Es válida cuando $0.15 \leq R_h \leq 2.25$ m, $0.00004 \leq S \leq 0.0039$ y $0.004 \leq d_m \leq 0.25$ m (referencia 9).</p> |
| Manning | $C = \frac{R_h^{1/6}}{n}$ | <p>Originalmente fue obtenida a partir de siete ecuaciones diferentes basadas en ensayos de Bazin, y posteriormente verificada por observaciones. Es una de las más utilizadas por su sencillez. n es el mismo coeficiente que utilizó Ganguillet y Kutter, según la tabla 2.5.</p> |
| Pavlovski | $C = \frac{R_h^z}{n}$ | <p>Considera que el exponente en la ecuación de Manning no es constante sino que varía con la forma del canal y la rugosidad, como sigue: $z = 1.5\sqrt{n}$, para $R_h < 1$ m, y $z = 1.3\sqrt{n}$, para $R_h > 1$ m. El valor de n es el mismo que el de Manning.</p> |

Fuente: SOTELO ÁVILA, Gilberto. *Hidráulica de canales*. p. 83.

Si la ecuación empírica de Manning de la figura 53 se sustituye en la ecuación de Chezy se la ecuación 184:

$$v = \frac{1}{n} Rh^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} \quad Ec. 184$$

Ésta es propiamente la ecuación de fricción llamada de Manning, la más conocida y utilizada en la mayoría de los países occidentales y será la que se empleará en este trabajo. En la tabla II se presenta una ampliación de los términos n de la figura 53.

Tabla II. **Valores de n para ecuación de Manning**

| Descripción del canal | n |
|--|-------|
| Vidrio, cobre, plástico y otras superficies lisas. | 0,010 |
| Acero liso sin pintar, madera plana. | 0,012 |
| Acero pintado o hierro fundido revestido. | 0,013 |
| Asfalto liso, arcilla común de revestimiento de drenajes, concreto con acabado, ladrillo vitrificado. | 0,013 |
| Hierro fundido sin recubrimiento, tubería de hierro negro forjado, arcilla vitrificada para revestir drenajes. | 0,014 |
| Ladrillo en concentro cementado, concentro flotado con acabado, tubo de concreto. | 0,015 |
| Concreto colado, sin acabado, tubo de acero en espiral. | 0,017 |
| Suelo suave. | 0,018 |
| Suelo limpio excavado. | 0,022 |

Fuente: MOTT, Robert. *Mecánica de fluidos*. p. 449.

El término S es conocido comúnmente como pendiente y se muestra en la ecuación 185:

$$S = \frac{\Delta h_f}{L} = \text{sen } \theta \quad \text{Ec. 185}$$

Donde:

Δh_f : pérdida por fricción en el tramo de longitud L .

L : longitud del tramo del canal a analizar.

θ : ángulo inclinado del canal respecto a la línea horizontal.

Debido a que normalmente el valor de θ es muy pequeño no suele utilizarse. Para pendientes pequeñas es más práctico utilizar valores expresados en porcentaje o decimales. Por ejemplo:

- El canal desciende 1 m por cada 1 000 m que avanza
- La pendiente es de 0,1 %
- La pendiente es 0,001 m/m

Es más práctico calcular el flujo volumétrico que la velocidad media para ello la ecuación de Manning se multiplica por el área de la sección transversal del canal, obteniendo la ecuación 186:

$$\dot{V} = \left(\frac{1}{n}\right) A R h^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} \quad \text{Ec. 186}$$

Cabe destacar que para poder utilizar las ecuaciones de Manning descritas anteriormente se deben utilizar dimensionales del sistema internacional de unidades (SI).

2.7.6. Flujo de variación rápida

Se denomina flujo rápidamente variado a aquel flujo en el cual las características hidráulicas no varían con respecto al tiempo en una sección transversal dada, pero varían con respecto al espacio L , en donde L es una longitud relativamente corta⁷⁶.

A continuación, se presentan las características más importantes del flujo de variación rápida:

- La curvatura de las líneas de corriente es bastante pronunciada teniendo como resultado un flujo no paralelo; y, por lo tanto, la distribución de presiones no es del tipo hidrostático, tal como sucede en el caso del flujo uniforme.
- Las pérdidas de energía por efecto del rozamiento de la masa de fluido con el contorno de la estructura llegan a ser muy pequeñas hasta el punto de que pueden ser despreciadas.
- Existen cambios bruscos en el área mojada dando lugar a una distribución no uniforme de velocidades.
- La presencia de vórtices y remolinos tiende a complicar y hacer compleja la descripción del comportamiento del flujo.

Las características de flujo antes mencionadas hacen difícil generalizar acerca del comportamiento del flujo; por lo que se hace necesario estudiar

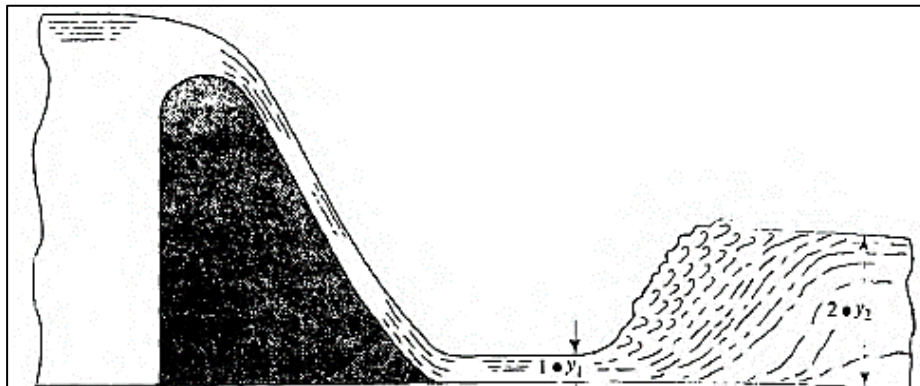
⁷⁶ URRUTIA, Norberto. *Hidráulica de canales*. p. 6-1.

específicamente los diferentes casos de flujo rápidamente variado, en este trabajo solo se tratarán; el salto hidráulico y vertederos de pared delgada.

2.7.6.1. Salto hidráulico

El salto hidráulico es un caso específico del flujo de variación rápida por medio del cual un flujo supercrítico pasa a un estado subcrítico. El fenómeno se caracteriza por un incremento brusco en la profundidad del flujo acompañado de una gran turbulencia la cual da lugar a un cambio de energía siendo mayor la energía antes del salto⁷⁷. En la figura 54 se ejemplifica un salto hidráulico.

Figura 54. Salto hidráulico




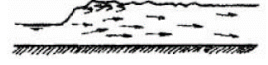



Fuente: MOTT, Robert. *Mecánica de fluidos*. p. 460.

La U.S. Bureau Reclamation da una clasificación del salto hidráulico según el número de Froude del flujo supercrítico que origina el salto.

En la tabla III se puede observar la clasificación de los diferentes tipos de saltos hidráulicos.

⁷⁷ URRUTIA, Norberto. *Hidráulica de canales*. p. 6-5.

Tabla III. **Clasificación de los saltos hidráulicos**

| Fr_1 | y_2/y_1 | Clasificación | Bosquejo |
|-----------|-----------|--|---|
| < 1 | 1 | Salto imposible | |
| 1 a 1,7 | 1 a 2 | Salto ondulatorio: el cambio de estado supercrítico no es tan abrupto y la superficie del agua presenta ligeras ondulaciones. |  |
| 1.7 a 2,5 | 2 a 3,1 | Salto débil: se caracteriza porque en la superficie del agua se desarrollan pequeños vórtices y la superficie libre aguas abajo permanece inalterada; la disipación de energía es pequeña. |  |
| 2.5 a 4,5 | 3,1 a 5,9 | Salto oscilatorio: presencia de una pulsación oscilante y aperiódica desde el fondo del canal hasta la superficie libre. |  |
| 4,5 a 9 | 5,9 a 12 | Salto estable: su posición es casi inalterada por cambios de nivel de aguas abajo. La disipación de energía de 45 a 70 %. |  |
| > 9 | > 12 | Salto fuerte: formación de ondas que hacen que la superficie aguas abajo se altere. La disipación de energía es de 85 % o más. |  |

Fuente: URRUTIA, Norberto. *Hidráulica de canales*. p. 6-6 a 6-7.

Para caracterizar un salto hidráulico existen dos ecuaciones:

- Relación entre profundidades inicial y_1 y seciente y_2 , ver ecuación 187:

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{\sqrt{1 + 8 Fr^2} - 1}{2} \quad Ec. 187$$

- Pérdida de energía, que se muestra en la ecuación 188:

$$\Delta E = E_1 - E_2 = \frac{(y_2 - y_1)^3}{4y_1y_2} \quad Ec. 188$$

2.7.6.2. Vertederos de pared delgada

Un vertedero es una obstrucción en el fondo de un canal sobre la que debe circular el fluido. Constituye un medio conveniente para determinar el caudal en un canal abierto en términos de una sola medición de la profundidad⁷⁸.

La naturaleza compleja del flujo sobre un vertedero hace imposible obtener expresiones analíticas precisas para el flujo en función de otros parámetros, como la altura del vertedero, la carga en el vertedero, la profundidad del fluido corriente arriba y la geometría de la placa del vertedero.

Los principales mecanismos que rigen el flujo sobre un vertedero son la gravitación y la inercia. Desde el punto de vista simple, la gravitación acelera al fluido desde su elevación de superficie libre corriente arriba del vertedero hasta una velocidad más alta a medida que fluye hacia abajo. Aunque los efectos

⁷⁸ MUNSON, Bruce R., OKIISHI, Theodore H. y YOUNG, Donald f. *Fundamentos de Mecánica de Fluidos*. p. 658.

viscosos y de tensión superficial suelen ser de menor importancia, no se pueden ignorar por completo. En general para explicar esos efectos se usan coeficientes adecuados determinados experimentalmente.

El tema de vertederos de pared delgada será tratado de manera más explícita en la sección 2.8.8.

2.8. Tipos de medidores de flujo

Un medidor de flujo es un aparato que determina mediante una medida única, la cantidad de volumen o masa por unidad de tiempo que pasa por una sección transversal.

Existen diferentes tipos de medidores de flujo, y por esto es necesario evaluar un conjunto de factores para seleccionar un medidor de flujo.

2.8.1. Factores para la selección de medidores de flujo

Hay muchos dispositivos para medir el flujo. Algunos miden el flujo volumétrico en forma directa, mientras que otros miden una velocidad promedio del flujo que se convierte a flujo volumétrico. Algunos proporcionan mediciones primarias directas, en tanto otros requieren de calibración o la aplicación de un coeficiente de descarga a la salida observada del instrumento. La forma de la salida del medidor de flujo también varía en forma considerable de un tipo a otro. La lectura puede provenir de la presión, nivel de líquido, contador mecánico, posición de un indicador en la corriente de fluido, señal eléctrica continua o una serie de pulsos eléctricos. La selección del tipo básico de medidor de fluido y su sistema indicador dependen de varios factores, algunos de los cuales estudiaremos a continuación.

- Rango: los medidores que existen comercialmente miden flujos que van desde unos cuantos mililitros por segundo (ml/s), para experimentos precisos de laboratorio, hasta varios miles de metros cúbicos por segundo (m³/s). Entonces se dice que el rango es el conjunto de valores que puede medir el instrumento. Se especifica mediante el límite inferior y el superior.
- Alcance: diferencia entre los valores superior e inferior del rango.
- Error: diferencia algebraica entre el valor leído o transmitido por el instrumento y el valor real de la variable medida. Puede ser error estático y error dinámico.
- Grado de incertidumbre o incerteza: error máximo que se puede cometer al efectuar la medida con el instrumento.
- Exactitud requerida: límite máximo del error de medida en condiciones normales de servicio. Existen varias formas de expresarla:
 - En forma absoluta en términos de unidades de ingeniería de las variables medidas, por ejemplo: ± 1 °C.
 - En forma relativa como porcentaje del alcance, por ejemplo: 1 % del alcance.
 - En forma relativa como porcentaje de límite superior del rango.
 - En forma relativo como porcentaje del valor medido.
- Precisión: capacidad del instrumento de repetir el mismo valor en lecturas.
- Repetitividad: grado de consistencia del instrumento. Es decir, en qué grado el dispositivo proporciona medidas iguales cuando mide el mismo valor en las mismas condiciones. Si no se exige que las condiciones de

las medidas sean idénticas, esta característica se denomina reproducibilidad.

- Zona muerta: rango de variación de la variable medida que no produce un cambio perceptible en la salida del instrumento. La causa más común es la fricción estática. Se suele especificar como porcentaje del alcance.
- Sensibilidad: relación que existe entre el incremento en la señal de salida del instrumento y el incremento correspondiente en la variable medida. Esta característica es un importante cuando se busca medir el flujo operar con rango muy pequeño.
- Resolución: incremento mínimo de la variable de entrada que produce un cambio observable en la salida. Este concepto está ligado al de banda muerta y sensibilidad. Se expresa en términos absolutos o porcentuales sobre el alcance.
- Histéresis: valor máximo de la diferencia entre las medidas de un mismo valor en sentido creciente y decreciente de la variable. Se suele expresar en forma porcentual sobre el alcance del instrumento.
- Linealidad: mide en qué grado la característica entrada salida del instrumento se puede aproximar una línea recta. Se suele expresar como el error máximo que se cometería al aproximar la función por una línea recta. Esta cualidad es muy deseable ya que implica una sensibilidad similar en todo el rango de medida.

- Sesgo (bias): error constante que afecta a la medida en todo su rango. No tiene carácter aleatorio y puede ser corregido mediante la calibración del instrumento.
- Umbral: Valor mínimo que tiene que alcanzar la variable para que el instrumento proporcione una señal de medida.
- Temperatura de servicio: campo de temperaturas en el cual se espera que trabaje el instrumento dentro de los límites de error especificados.
- Vida útil de servicio: tiempo mínimo especificado durante el cual se aplican las características de servicio continuo e intermitente del instrumento, sin que se presenten cambios en su comportamiento más allá de las tolerancias especificadas.
- Presión de servicio: campo de presiones en el cual se espera que trabaje el instrumento dentro de los límites de error especificados.
- Ubicación: existen dos tipos de medidores de flujo de acuerdo con el lugar donde se utilizará:
 - Medidor de panel: cuando la caratula del instrumento se encuentra en un panel de control o una pantalla digital lejos de donde se encuentra el elemento primario.
 - Medidor de flujo de campo: cuando la caratula y el elemento primario se encuentran juntos y por lo tanto para leer el valor es necesarios acercarse al instrumento.
- Tipo de fluido: si el fluido es un líquido, gas, mezcla de líquido y vapor saturado, mezcla de líquido con sólidos.

- Viscosidad del fluido
- Conductividad eléctrica
- Turbulencia
- Condiciones químicas del fluido: corrosiva, acida, alcalina.
- Tipo de transmisor a utilizar.
- Riesgo de incendio, inundación, explosión.
- Condiciones ambientales: ambiente exterior, bajo techo o en la intemperie.
- Función del medidor de flujo:
 - Indicador
 - Registrador
 - Ciego

2.8.2. Medidores de carga variable

El principio fundamental en el que se basan los medidores de carga variable es el siguiente: cuando se restringe una corriente de fluido, su presión disminuye en una cantidad que depende del flujo volumétrico a través de la restricción. Por lo tanto, la diferencia de presión entre puntos antes y después de la restricción se utiliza para indicar el flujo volumétrico. Los tipos más comunes de medidores de carga variable son el tubo de Venturi, la boquilla de flujo y de orificio.

2.8.2.1. Medidor de Venturi

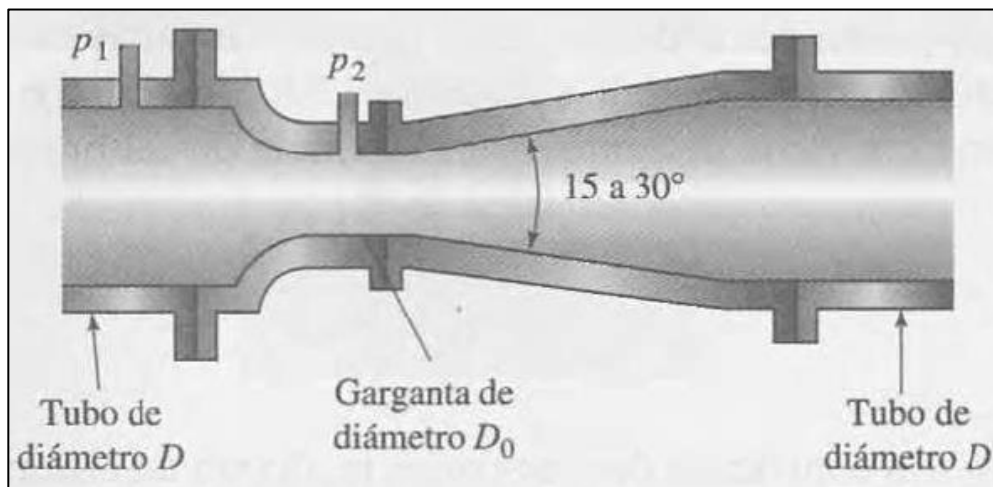
El medidor de Venturi es una pieza fundida que consta de una porción aguas arriba, la cual tienen el mismo tamaño de la tubería, tiene un revestimiento liso y contiene un anillo piezométrico para medir la presión estática; una región cónica convergente; una garganta cilíndrica con un revestimiento liso para medir la presión; y una región cónica gradualmente divergente que desemboca en una sección cilíndrica del tamaño de la tubería. Un manómetro diferencial conecta los

dos anillos piezométricos. El tamaño de un medidor Venturi se especifica mediante el diámetro de la tubería y de la garganta.

El medidor de Venturi tiene una forma que intenta imitar los patrones de flujo a través de una obstrucción aerodinámica en una tubería. El tipo clásico o Herschel de medidor Venturi rara vez se utiliza en la actualidad puesto que sus dimensiones son bastante grandes, lo que lo hace difícil de instalar y caro de fabricar. Consiste en una contracción cónica a 21° , seguida por una garganta cilíndrica corta, que conduce a una expansión de salida cónica a 7° u 8° .

En contraste el tubo Venturi contemporáneo se compone de una sección de entrada de tobera de flujo estándar (ISA 1935) y una expansión de salida cónica no mayor de 30° ⁷⁹.

Figura 55. **Tubo de Venturi contemporáneo**



Fuente: POTTER, Merle C. y WIGGERT, David C. *Mecánica de Fluidos*. p. 594.

⁷⁹ POTTER, Merle C. y WIGGERT, David C. *Mecánica de Fluidos*. p. 594.

El flujo volumétrico se determina empleando las ecuaciones 189 y 190:

$$\dot{V} = KA_0\sqrt{2g(h_1 - h_2)} \quad Ec. 189$$

$$h_1 = \frac{p_1}{\gamma} + Z_1, \quad h_2 = \frac{p_2}{\gamma} + Z_2 \quad Ec. 190$$

Donde:

K : coeficiente de flujo.

A_0 : área de la sección transversal de la tobera en la constricción de la presión 2.

p_1 y p_2 : presión en los puntos 1 y 2.

Z_1 y Z_2 : altura de los puntos 1 y 2 respecto a un nivel de referencia.

g : aceleración de la gravedad.

γ : peso específico del fluido.

h_1 y h_2 : energía específica en los puntos 1 y 2.

El coeficiente de flujo K es un parámetro utilizado para considerar el coeficiente de descarga C_d y coeficiente de contracción C_c , además de la relación entre los diámetros de la tubería y el diámetro de la contracción de la tobera en el punto 2. La ecuación 191 relaciona estos términos:

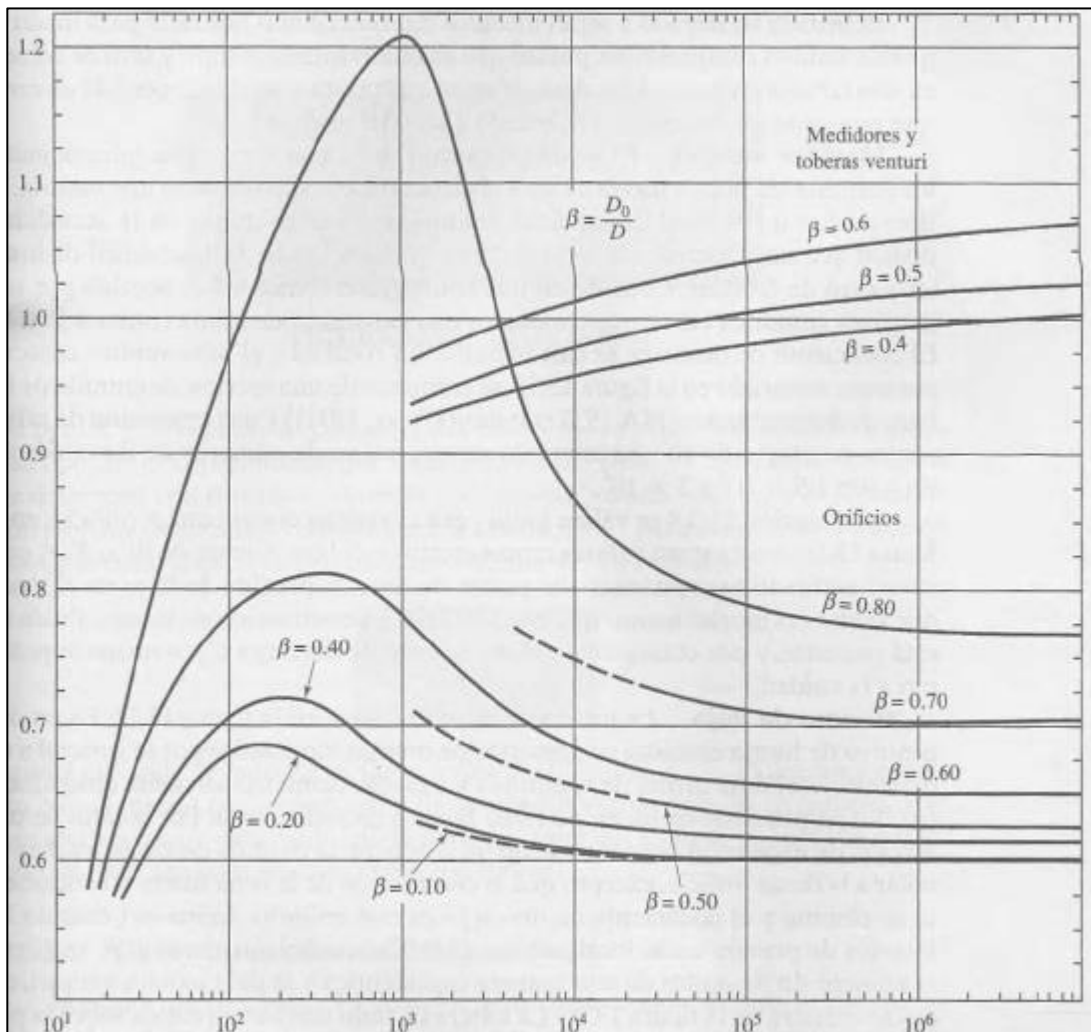
$$K = \frac{C_d}{\sqrt{1 - C_c^2\beta^4}} \quad Ec. 191$$

Un análisis dimensional revela que C_d y K dependen del número de Reynolds. Conviene evaluar el número de Reynolds en la región de aproximación en la obstrucción. Los valores del coeficiente de flujo K se pueden observar en la

figura 56. El término β , que se observa en la ecuación 192, es la relación entre el diámetro de tubería D y el diámetro de la contracción de la tobera d .

$$\beta = \frac{d}{D} \quad \text{Ec. 192}$$

Figura 56. **Coefficiente de flujo K contra el número de Reynolds de orificios, toberas y medidores de Venturi**



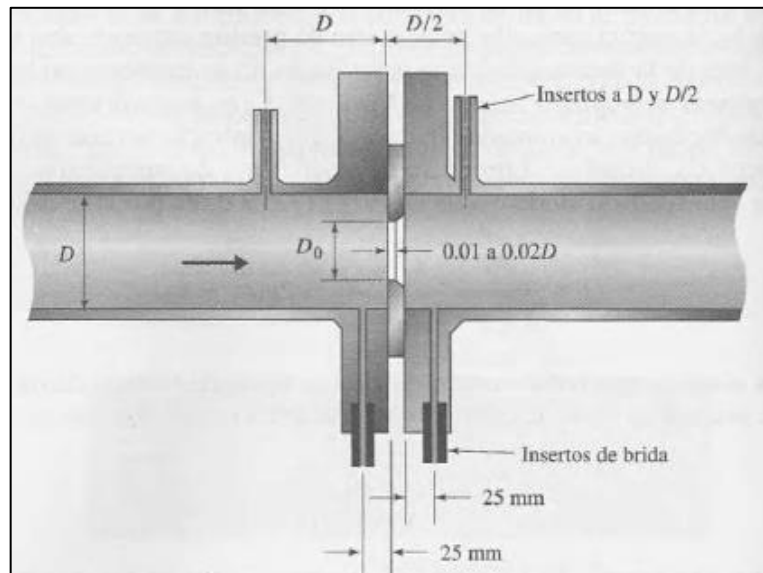
Fuente: POTTER, Merle C. y WIGGERT, David C. *Mecánica de Fluidos*. p. 593.

2.8.2.2. Medidor de orificio

Un medidor de orificio de placa delgada por lo general se fabrica en el intervalo: $0,2 \leq \beta \leq 0,8$.

En la figura 57 se muestran dos formas de localizar los insertos de presión: insertos de brida, colocados a 25 mm corriente arriba y corriente debajo de la placa de orificio, y los insertos colocados a un diámetro corriente arriba y a medio diámetro corriente debajo de la placa. Se prefiere la segunda disposición, puesto que es capaz de detectar una presión diferencial fuerte, y se ajusta a las leyes de similitud geométrica. Una tercera disposición, no mostrada en la figura 58, tiene los insertos de presión localizados en la pared del tubo inmediatamente corriente arriba y corriente abajo del orificio; los insertos colocados en este lugar se denominan insertos esquineros.

Figura 57. Medidor de orificio de placa delgada



Fuente: POTTER, Merle C. y WIGGERT, David C. *Mecánica de Fluidos*. p. 592.

La ecuación 193 describe el flujo en una placa de orificio.

$$\dot{V} = KA_0\sqrt{2g(h_1 - h_2)} \quad Ec.193$$

También se puede emplear la figura 56 para determinar el coeficiente de flujo K .

2.8.3. Medidores de área variable

Los elementos de área variable se caracterizan por el cambio de área que se produce entre el elemento primario en movimiento y el cuerpo del medidor. Pueden asimilarse a una placa de orificio cuyo diámetro interior fuera variable dependiendo del caudal y de la fuerza de arrastre producida por el fluido.

El primer rotámetro fue inventado en 1908 por Kart Kueppers en Aachen (patente alemana 215225).

En el rotámetro, un flotador cambia su posición dentro de un tubo, proporcionalmente al flujo del fluido. El flotador está en equilibrio entre su peso, la fuerza de arrastre del fluido y la fuerza de empuje del fluido sobre el flotador. El caudal depende del peso específico del líquido, de su viscosidad y de los valores de la sección interior del tubo, ya que la misma cambia según sea el punto de equilibrio del flotador⁸⁰.

La condición de equilibrio del flotador, según las fuerzas que actúan sobre el mismo son: peso del flotador G , fuerza de empuje F y fuerza de arrastre E .

La ecuación 194 define el peso del flotador:

$$G = v\rho_f \quad Ec.194$$

La fuerza de empuje se observa en la ecuación 195.

⁸⁰ CREUS, Antonio. *Instrumentación industrial*. p. 144.

$$F = v\rho_l \quad \text{Ec. 195}$$

En la ecuación 196 se define la fuerza de arrastre del flujo.

$$E = C_a\rho_l A_f \frac{v^2}{2g} \quad \text{Ec. 196}$$

La ecuación 197 establece la relación entre las tres fuerzas.

$$F + E = G \quad \text{Ec. 197}$$

Donde:

G : peso del flotador.

V_f : volumen del flotador.

ρ_f : densidad del flotador.

ρ_l : densidad del fluido.

E : fuerza de arrastre del fluido sobre el flotador.

F : fuerza de empuje del fluido sobre el flotador.

C_a : coeficiente de arrastre del fluido sobre el flotador.

v : velocidad del fluido.

A_f : área de la sección del flotador.

A_w : área de la sección interior del tubo.

Resolviendo las ecuaciones 194, 195, 196 y 197; y despejando la velocidad v , se obtiene la ecuación 198:

$$v = \sqrt{\frac{2gV_f(\rho_f - \rho_l)}{C_a\rho_l A_f}} \quad \text{Ec. 198}$$

El valor de C_a depende de la viscosidad del fluido.

El rotámetro, al ser un diafragma de orificio variable, tendrá como esté, un coeficiente de descarga que englobará el reparto desigual de velocidades, la contracción de la vena del fluido, las rugosidades de la tubería, entre otros.

Por conveniencia, se incorpora el término $C = \sqrt{\frac{1}{C_a}}$ a este coeficiente de descarga. Sustituyendo C en la ecuación 198, se obtiene la ecuación 199:

$$v = C \sqrt{\frac{2gV_f(\rho_f - \rho_l)}{\rho_l A_f}} \quad Ec. 199$$

El flujo volumétrico se puede definir como se indica en la ecuación 200:

$$\dot{V} = v \times A_w \quad Ec. 200$$

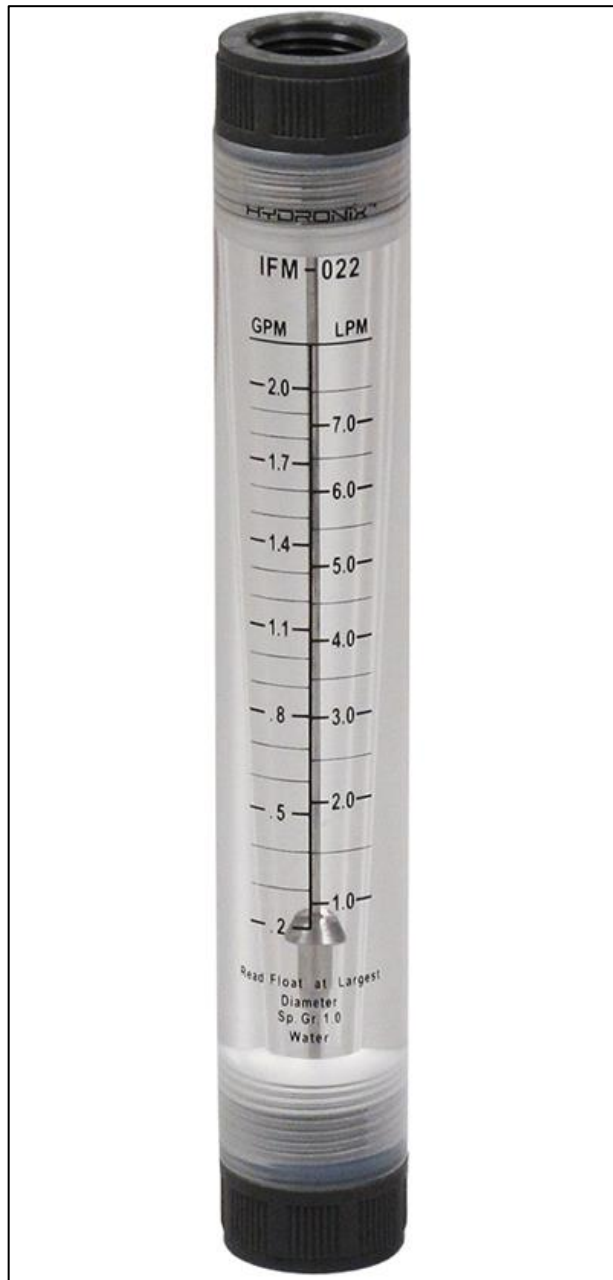
Entonces, sustituyendo la ecuación 199 en la ecuación 200, se obtiene la ecuación 201:

$$\dot{V} = CA_w \sqrt{\frac{2gV_f(\rho_f - \rho_l)}{\rho_l A_f}} \quad Ec. 201$$

La ecuación 201 permite determinar el flujo volumétrico del fluido que pasa a través de un rotámetro conocido. Este caudal depende del peso específico del líquido y de la sección interior de tubo A_w , debido a que la misma cambia según sea el punto de equilibrio del flotador. Por este motivo, la elección del tamaño de los rotámetros es laboriosa y es conveniente emplear algún método que simplifique los cálculos anteriores.

En la figura 58 se observa la imagen de un rotámetro.

Figura 58. **Rotámetro**



Fuente: CREUS, Antonio. *Instrumentación industrial*. p. 144.

Los flotadores pueden tener varios perfiles de construcción, entre ellos se puede mencionar:

- Esféricos para bajos caudales y poca precisión, con una influencia considerable de la viscosidad del fluido.
- Cilíndrico con borde plano para caudales medios y elevados, con una influencia media de la viscosidad del fluido.
- Cilíndrico, con borde saliente contra el flujo y con la mínima influencia de la viscosidad del fluido. Por sus características de caudal pueden compararse a una tobera.
- Cilíndrico, con bordes salientes contra el flujo y con la mínima influencia de la viscosidad. Por su funcionamiento puede compararse a una placa de orificio o tobera.

El material más empleado en los flotadores es el acero inoxidable 316 si bien, para satisfacer la gran variedad de requerimientos de resistencia a la corrosión que se presenta en la industria, también se utilizan otros materiales. También se utilizan flotadores de plástico, si bien se prefieren los metálicos por su mayor facilidad de mecanización del borde superior.

La calibración de los rotámetros se consigue, básicamente, manteniendo constante el paso de un caudal a través del rotámetro y midiendo la cantidad de líquido o de gas recogido en un tiempo dado y medido con precisión.

En lo líquidos, los aparatos de medida del volumen suelen ser buretas graduadas o básculas, mientras que en los gases se suelen utilizar gasómetros

y calibradores, graduados con sello de mercurio. Para medir el tiempo se emplean cronómetros capaces de medir 0,01 segundos como mínimo.

Según la aplicación, los rotámetros pueden dividirse en rotámetros de purga, de indicación directa para usos generales y armados con indicación magnética y transmisión neumática, electrónica y digital.

Los rotámetros de vidrio de indicación directa pueden adoptar varias disposiciones: llevar placas laterales, estar cerrados con cuatro placas con ventana de cristal para ver el tubo; disponer de armadura de seguridad o blindada de cierre estanco para evitar que, en caso de rotura del tubo, el gas o el líquido interiores pueden dañar al operador; disponer de armadura anti hielo con gel de sílice para evitar la presencia de humedad en el espacio entre la armadura y el tubo que podría impedir la visibilidad del flotador.

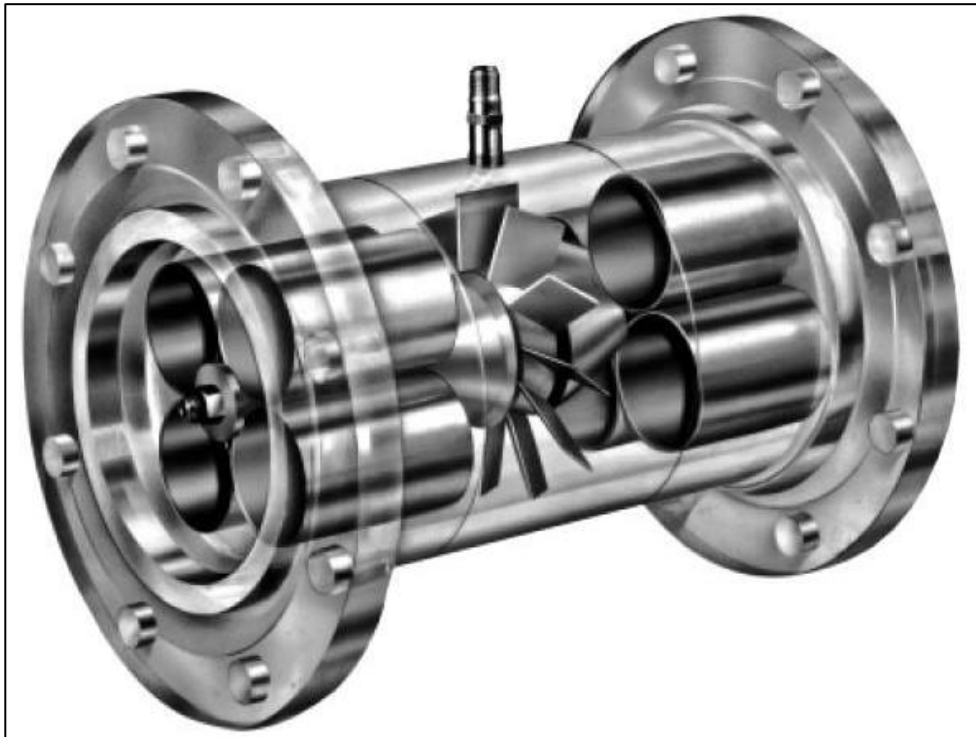
2.8.4. Fluxómetro de turbina

Los medidores de turbina consisten en un rotor que gira al paso del fluido con una velocidad directamente proporcional al caudal. El fluido choca con el borde frontal de las palas del rotor produciendo un área de baja presión y, como resultado de esta presión diferencial, las palas giran.

Como la velocidad del fluido baja inmediatamente después de las palas de la turbina, por el principio de Bernoulli aumenta la presión aguas debajo de la turbina y, como consecuencia, se ejerce una fuerza igual y opuesta a la del fluido aguas arriba y, de este modo, el rotor está equilibrado hidrodinámicamente y gira entre los conos anterior y posterior sin necesidad de utilizar rodamientos axiales, evitando así los efectos indeseables de un rozamiento que necesariamente se produciría.

En la figura 59 se puede observar un medidor de flujo tipo turbina industrial.

Figura 59. **Medidor de turbina**



Fuente: VILLAJULCA, José Carlos. *Instrumentación y control*. instrumentacionycontrol.net/flujo-medidores-de-area-variable-magneticos-turbina-vortice-y-flujo-total/. Consulta: 12 de octubre de 2019.

Existen dos tipos de convertidores para captar la velocidad de la turbina. En el de reluctancia, la velocidad viene determinada por el paso de las palas individuales de la turbina a través del campo magnético creador por un imán permanente montado en una bobina captadora exterior. El paso de cada pala varía la reluctancia del circuito magnético. Esta variación cambia el flujo, induciendo en la bobina captadora una corriente alterna que, por lo tanto, es proporcional al giro de la turbina.

En el tipo inductivo, poco usado actualmente, el rotor lleva incorporadas piezas magnéticas y el campo magnético giratorio que se origina induce una corriente alterna en una bobina captadora exterior.

2.8.5. Fluxómetro de remolino y vórtice

El medidor de flujo volumétrico por remolino se basa en la determinación de la frecuencia del remolino producido por una hélice estática dentro de la tubería a través de la cual pasa el fluido⁸¹. La frecuencia del remolino es proporcional a la velocidad del fluido, de acuerdo con la ecuación 202 conocida como número de Strouhal:

$$St = \frac{f \times d}{v} \quad Ec. 202$$

Donde:

St : número de Strouhal.

f : frecuencia del remolino.

d : anchura del remolino.

v : velocidad promedio del fluido.

El número de Strouhal es constante para números de Reynolds comprendidos entre 20 000 y 70 000 000.

En estas condiciones, la frecuencia del remolino no se ve afectada por la viscosidad, la densidad, la temperatura o la presión del fluido, la anchura del remolino es mantenida por el fabricante del medidor, con lo cual el flujo volumétrico se define como se indica en la ecuación 203.

⁸¹ CREUS, Antonio. *Instrumentación industrial*. p. 180.

$$\dot{V} = \frac{f d A}{St} = fK \quad \text{Ec. 203}$$

Donde:

A : área de la sección de transversal de tubería.

K : impulsos por unidad de volumen.

Por lo tanto, el flujo volumétrico del fluido es proporcional a la frecuencia del remolino, una termistancia de muy baja inercia térmica que sigue los efectos de refrigeración del remolino generado en el gas, o bien mediante un condensador de capacidad variable, función de la deformación de un diafragma, placa o bien mediante la aplicación de un haz de ultrasonidos perpendicular al remolino, midiendo el tiempo de transito del haz desde el transmisor al receptor.

Los transductores de remolino son adecuados en la medida de flujos volumétricos de gases y de líquidos y su intervalo de medida entre el valor máximo y el mínimo es de 50 a 1. Deben instalarse en tubería recta con longitudes mínimas de 10 diámetros aguas arriba y de 5 diámetros aguas abajo.

El medidor debe instalarse perfectamente alineado con la tubería para asegurar la formación correcta de remolinos, ver figura 60.

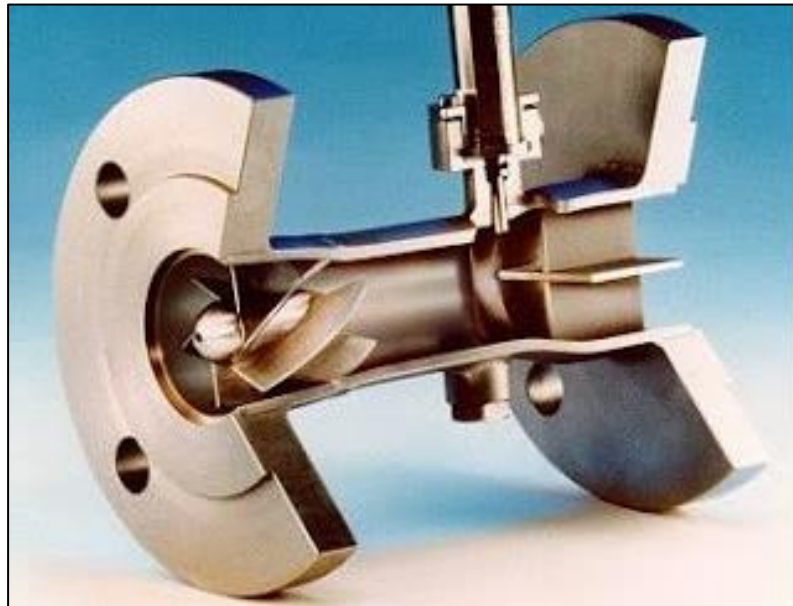
La exactitud del instrumento es del $\pm 1\%$ al $\pm 5\%$.

Los instrumentos de vórtex son parecidos a los de remolino son parecidos a los de remolino, excepto que están basados en el efecto Von Karman, donde un cuerpo en forma de cono genera alternativamente vórtices (áreas de baja

presión e inestabilidad) desfasados en 180 °, cuya frecuencia es directamente proporcional a la velocidad y, por lo tanto, al flujo volumétrico⁸².

Para asegurar una correcta medición, la tubería debe estar libre de obstrucciones cerca de la entrada. Generalmente, deben instalarse en tubería recta con longitudes mínimas de 15 diámetros aguas arriba y de 5 diámetros aguas abajo. El medidor debe instalarse perfectamente alineado con la tubería para asegurar la formación correcta de vórtices.

Figura 60. **Medidor de flujo por remolino**



Fuente: GALVAN, Rigel. *Instrumentación: equipos y principios*. instrumentaciondinamica2013.blogspot.com/2013/12/medidor-de-flujo-tipo-swirl.html. Consulta: 12 de octubre de 2019.

El vórtex debe instalarse de tal manera que el sensor esté siempre lleno de líquido. La exactitud es de $\pm 0,75\%$ para líquidos y del $\pm 1\%$ para gases.

⁸² CREUS, Antonio. *Instrumentación industrial*. p. 181.

En la figura 61 se muestra un medidor vórtex.

Figura 61. **Medidor de flujo vórtex**



Fuente: YOKOGAWA EUROPE. *Medidor tipo vórtex*. www.directindustry.es/prod/yokogawa-europe/product-19033-1159213.html. Consulta: 12 de octubre de 2019.

2.8.6. Fluxómetro magnético

Este medidor de flujo volumétrico funciona bajo el principio de tensión inducida.

La ley de Faraday establece tensión (voltaje) inducida a través de cualquier conductor, al moverse este perpendicularmente a través de un campo magnético es proporcional a la velocidad del conductor. La regla de la mano derecha nos indica que, colocando la mano derecha abierta, con la palma perpendicular a las

líneas de fuerza del campo magnético, y los dedos en el sentido de la corriente del fluido, el pulgar señala el sentido de la corriente inducida.

La fórmula del flujo volumétrico que da la ley de Faraday de inducción electromagnética, se define de acuerdo a la ecuación 204:

$$E = -N \frac{d\phi}{dt} = -N \frac{d(B \times A)}{dt} = -N \times B \frac{dA}{dt} = -N \times B \times D \frac{dl}{dt} = -N \times B \times D \times v \\ = K \times v \quad \text{Ec. 204}$$

Donde:

E : tensión generada en el conductor.

N : número de espiras de la bobina.

ϕ : flujo magnético.

B : densidad del campo magnético.

D : distancia entre los dos electrodos.

v : velocidad del movimiento del flujo de volumétrico.

K : constante.

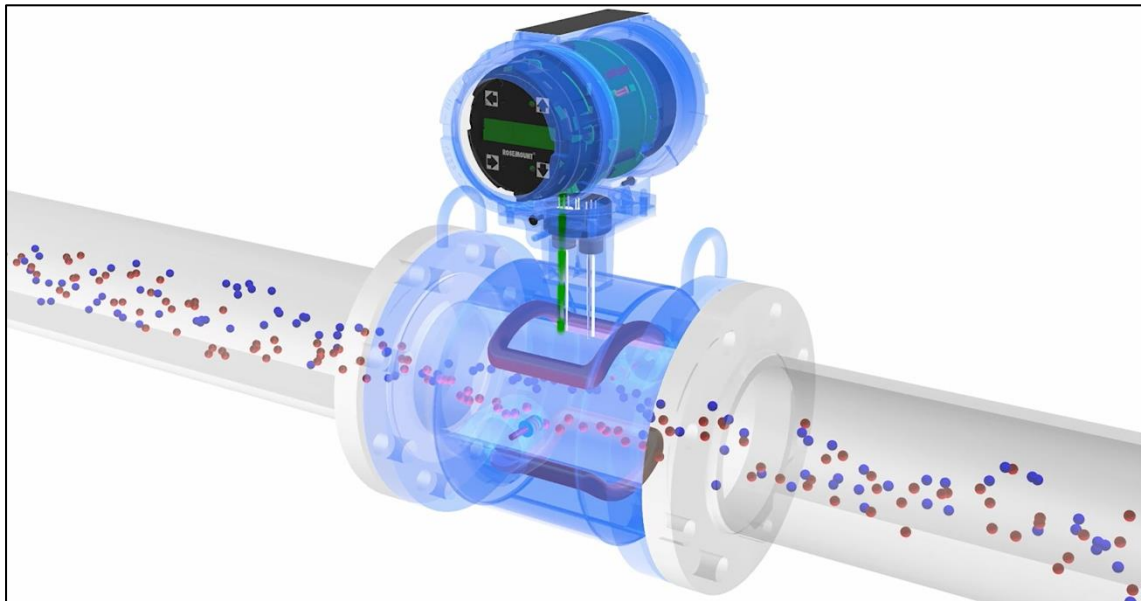
El signo negativo indica que la corriente inducida crea otro campo magnético opuesto al campo magnético creado por la bobina (ley de Lenz).

La señal generada es captada por dos electrodos, rasantes con la superficie interior del tubo y diametralmente opuestos, por lo que el medidor está libre de pérdidas de carga en el fluido. La fórmula indica que la tensión generada es proporcional a la velocidad del flujo de caudal. Sin embargo, para que el instrumento pueda medir se requiere que el fluido tenga una conductividad eléctrica mayor de 3 $\mu\text{S/cm}$.

Asimismo, la constante K y la señal generada depende, no sólo de la velocidad del fluido sino también de la densidad del campo magnético B , la cual a su vez está influida por la tensión de la línea y por la temperatura del fluido.

La figura 62 muestra un esquema de un medidor magnético detectando partículas, el imán rojo que se observa en el elemento primario.

Figura 62. **Medidor magnético**



Fuente: EMERSON. *Medición magnética de caudal*. www.emerson.com/es-es/automation/measurement-instrumentation/flow-measurement/about-magnetic. Consulta: 12 de octubre de 2019.

La ecuación 205 define el flujo volumétrico en una tubería de sección circular:

$$\dot{V} = v \frac{\pi D^2}{4} \quad Ec. 205$$

Por analogía un medidor de flujo mide el flujo volumétrico de acuerdo a la ecuación 206.

$$\dot{V} = K \frac{E_s}{B} \times D \quad Ec. 206$$

Las ecuaciones 205 y 206 indican que la señal E_s depende, no sólo de la velocidad del fluido sino también de la densidad del campo magnético B , la cual a su vez está influida por la tensión de la línea y por la temperatura del fluido. Es obvio, que para obtener una señal que depende únicamente de la velocidad, debe eliminarse la influencia de estos tres factores y, por otro lado, es muy difícil mantenerlos en valores constantes, la temperatura y la conductividad del fluido vienen dadas por las condiciones particulares de servicio.

No se tratará más a fondo este tipo de medidores puesto que no se utilizará en este trabajo, cabe destacar que para detectar la señal magnética se utilizan sensores.

2.8.7. Medidores de ranura

Este tipo medidor de flujo volumétrico consiste en un tubo colocado en posición vertical con una ranura que puede oscilar entre 0,05 mm a 0,5 m por la cual sale el fluido. Por medio de calibración con un medidor de flujo de mayor jerarquía metrológica puede validarse, aunque para aplicaciones comunes se suele aplicar el método volumétrico para realizar la calibración.

La calibración consiste en indicar por medio de una altura el nivel del fluido y relacionarlo proporcionalmente al flujo volumétrico.

Los medidores de flujo de ranura son utilizados en aplicaciones donde no es tan crítica la exactitud de la medida, por lo general se utiliza en la industria agrícola, distribución de agua por canales y redes de tubería para transportar agua en instalaciones industriales.

2.8.8. Medidores de flujo de masa térmicos

Aunque en la industria se utilizan normalmente medidores volumétricos de caudal, con el flujo volumétrico determinado en las condiciones de servicio, en ocasiones interesa medir el flujo másico, sea inferencialmente por compensación de la presión, la temperatura o la densidad, o bien aprovechando características medibles de la masa con sistemas básicos de medida directa, los instrumentos térmicos, los de momentos angular y los de Coriolis.

Miden el flujo volumétrico indirectamente y se basan en la elevación de temperatura del fluido en su paso por un cuerpo caliente. El primer instrumento de esta clase fue proyectado por Thomas en 1911 para medir el caudal másico de gas en una tobera. Por este motivo, estos aparatos reciben también el nombre de medidores de caudal Thomas.

Este tipo de medidor consiste en una fuente eléctrica de alimentación de precisión que proporciona un flujo de calor constante al punto medio del tubo por el que circula el fluido. En puntos equidistantes de la fuente de calor se encuentran sondas de resistencia para medir la temperatura.

Cuando el fluido está en reposo, la temperatura es idéntica en las dos sondas. Cuando el fluido circula, transporta una cantidad de calor hacia la segunda sonda y se presenta una diferencia de temperaturas que va aumentando progresivamente entre las dos sondas a medida que aumenta el caudal. Esta

diferencia es proporcional a la masa que circula a través del tubo, de acuerdo con la ecuación 207:

$$\dot{Q} = \dot{m}C_e(T_2 - T_1) \quad Ec. 207$$

Donde:

\dot{Q} : flujo de calor transferido.

\dot{m} : flujo másico.

C_e : calor específico del fluido.

T_1 : temperatura anterior

T_2 : temperatura posterior.

El sistema está conectado a un puente de Wheatstone que determina la diferencia de temperaturas y la amplifica con una señal de salida de 0,5 V DC en 1000 ohmios de impedancia. Esta señal puede ser utilizada en registradores, indicadores digitales y controladores y admite comunicaciones digitales con la planta y con el panel de control.

2.8.9. Medidores de flujo en canales abiertos

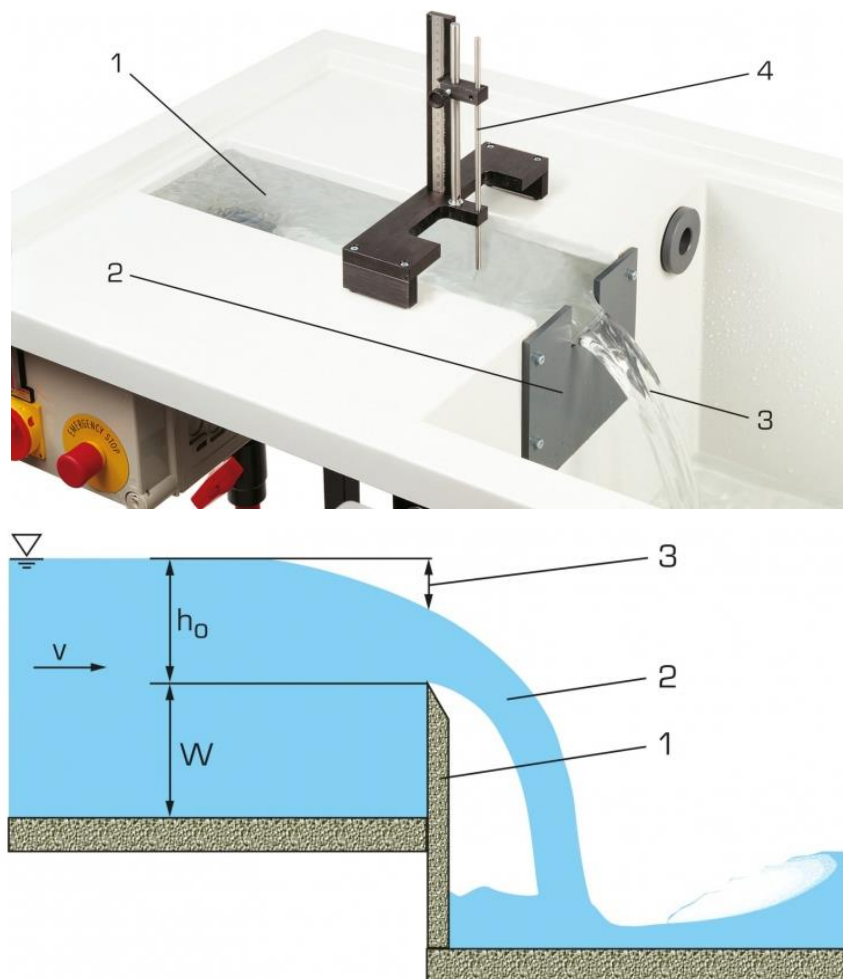
En la medición del flujo volumétrico en canales abiertos se utilizan vertederos de formas variadas que provocan una diferencia de nivel en el canal, entre la zona anterior del vertedero y su punto más bajo. El vertedero debe formar un ángulo recto con la dirección del caudal y el canal aguas arriba debe ser recto como mínimo en una distancia de 10 veces la anchura.

La diferencia de alturas debe medirse en un punto aguas arriba lo suficientemente alejado, como para no ser influido por la curva de bajada de la

superficie del agua y es conveniente, incluso utilizar un pozo de protección para el flotador del instrumento de medida, en caso de utilizar este sistema.

A partir de la ecuación de la energía se deduce la ecuación general del flujo volumétrico para un vertedero.

Figura 63. **Vertedero de pared delgada de forma general**



Fuente: GUNT. *Vertedero de cresta delgada*. www.gunt.de/es/productos/vertederos-de-cresta-delgada-para-el-hm-150/070.15003/hm150-03/glct-1:pa-150:pr-550. Consulta: 12 de octubre de 2019.

La ecuación 208 es la ecuación general de flujo volumétrico para un vertedero de pared delgada.

$$\dot{V} = 2\sqrt{2g} \mu \int_0^h x(h-y)^{\frac{1}{2}} dy \quad Ec. 208$$

Donde:

g : aceleración de la gravedad.

μ : coeficiente de gasto.

x : mitad de la longitud del ancho de la sección del vertedero.

h : diferencia de altura entre nivel de vertedero y nivel del horizonte.

y : altura a la que se encuentra la velocidad media del flujo.

2.8.9.1. Vertedero rectangular con contracciones laterales

Para el caso de un vertedero rectangular, la ecuación general de flujo volumétrico en un vertedero se reduce a la ecuación 209:

$$\dot{V} = \frac{2}{3} \sqrt{2g} \mu b h^{\frac{3}{2}} \quad Ec. 209$$

Donde:

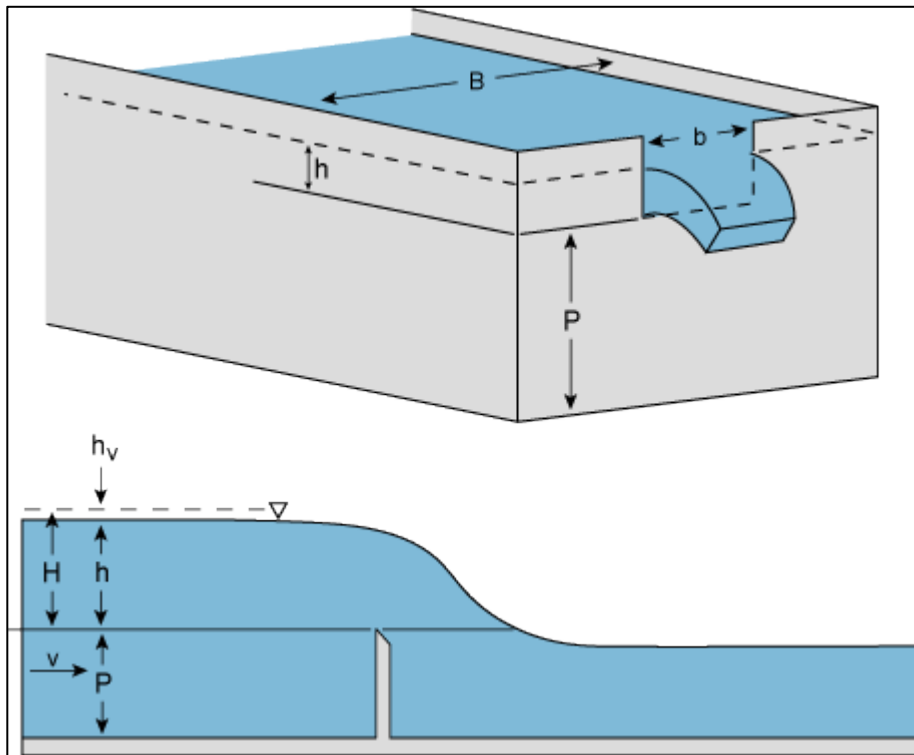
g : aceleración de la gravedad.

μ : coeficiente de gasto.

b : ancho de vertedero.

h : altura del agua sobre el horizonte.

Figura 64. **Vertedero rectangular con contracciones laterales**



Fuente: FINNEY, Brad. *Vertedero rectangular*. kacv.net/brad/nws/assets/thin-plate-weir-rect.gif.

Consulta: 12 de octubre de 2019.

En la tabla IV se observan fórmulas experimentales para determinar el coeficiente de gasto μ aplicable a la ecuación de flujo volumétrico de un vertedero con contracciones o sin ellas. En el caso de vertedero sin contracciones laterales se puede asumir que $b=B$, en las fórmulas.

Tabla IV. **Fórmulas para calcular el coeficiente μ**

| Autor | Fórmula | Límites de aplicación |
|--|--|--|
| Hegly (1921) | $\mu = \left[0,6075 - 0,045 \left(\frac{B-b}{B} \right) + \frac{0,0041}{h} \right]$ $\left[1 + 0,55 \left(\frac{b}{B} \right)^2 \left(\frac{h}{h+w} \right)^3 \right]$ | <p>0,10 m \leq h \leq 0,60 m 0,50 m \leq b \leq 2,00 m 0,20 m \leq w \leq 1,13 m h/b > 0,13 usar SIAS</p> |
| Sociedad de Ingenieros y Arquitectos Suizos (1924) (Fórmula SIAS) | $\mu = \left[0,578 + 0,037 \left(\frac{b}{B} \right)^2 \right]$ $+ \frac{3,615 - 3 \left(\frac{b}{B} \right)^2}{1000 h + 1,6}$ $\left[1 + 0,5 \left(\frac{b}{B} \right)^4 \left(\frac{h}{h+w} \right)^2 \right]$ | <p>0,025 m \leq h \leq 0,80 m b \leq 0,38 m w \geq 0,30 m h/w \leq 1 contracciones laterales Sin contracciones: 0,025 m \leq h \leq 0,80 m h/w \leq 1 h/b \leq 0,13 usar Hegly</p> |
| Hamilton- Smith | $\mu = 0,616 \left(1 - \frac{b}{10B} \right)$ | <p>0,075 m \leq h \leq 0,60 m 0,30 m \leq b 0,30 m \leq w h \leq w/2 b \leq (B-2h), h/b \leq 0.5 Si B(h+w) < 10bh, reemplazar el valor de h por h', donde: h'=h + 1.4 (v²/2g). Siendo v = [V̇ / B(h+w)] es la velocidad de llegada.</p> |

Continuación de tabla IV.

| Autor | Fórmula | Límites de aplicación |
|-------------------|---|--|
| Francis | $\mu = 0,623 \left[1 - 0,1 n \frac{h}{b} \right] \left[\left(1 + \frac{v_0^2}{2gh} \right)^{\frac{3}{2}} - \left(\frac{v_0^2}{2gh} \right)^{\frac{3}{2}} \right]$ | <p>0,18 m ≤ h ≤ 0,50 m 2,40 m ≤ b ≤ 3,00 m 0,60 m ≤ w ≤ 1,50 m b ≥ 3 h $v = [\dot{V} / B(h+w)]$ Siendo v la velocidad de llegada. n = 2 contracción lateral n = 0 sin contracción</p> |
| Rehbock (1929) | $\mu = \left[0,6035 + 0,0813 \left(\frac{h + 0,0011}{w} \right) \right] \left[1 + \frac{0,0011}{h} \right]^{\frac{3}{2}}$ | <p>0,18 m ≤ h ≤ 0,50 m b ≥ 0,3 m w ≥ 0,06 m h/w ≤ 1 Vale sólo sin contracciones laterales. Es muy precisa y muy usada por su sencillez.</p> |

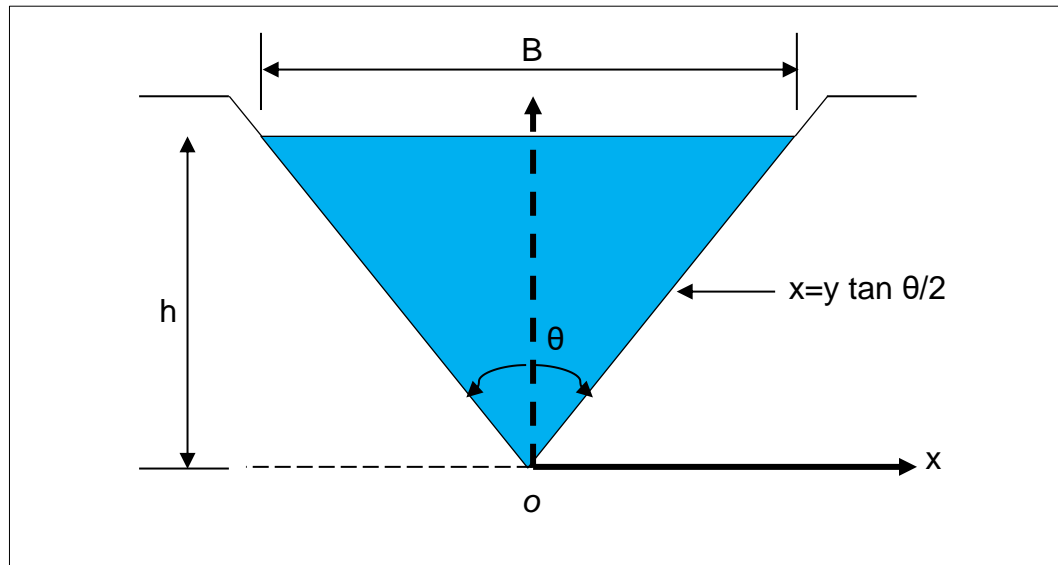
Fuente: SOTELO ÁVILA, Gilberto. *Hidráulica general*. p. 246.

2.8.9.2. Vertedero triangular

Cuando el vertedero es de sección triangular simétrico respecto del eje vertical y con ángulo en el vértice θ , el valor x , se define como se indica en la ecuación 210:

$$x = y \tan \frac{\theta}{2} \quad \text{Ec. 210}$$

Figura 65. **Vertedero triangular**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

La ecuación 211, es la ecuación del flujo volumétrico para un vertedero triangular.

$$\dot{V} = \frac{8}{15} \sqrt{2g} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \mu h^{\frac{5}{2}} \quad \text{Ec. 211}$$

En algunas aplicaciones se suele utilizar una formula como la ecuación 212.

$$\dot{V} = C h^{\frac{5}{2}} \quad \text{Ec. 212}$$

Los vertederos triangulares se recomiendan para el aforo de gastos inferiores a 30 l/s y cargas superiores a 6 cm y hasta de 60 cm. Su precisión es mejor que la del rectangular, para gastos pequeños, e incluso para gastos comprendidos entre 40 y 300 l/s. Para gastos mayores es recomendable el

rectangular debido a que el triangular es más sensible a cualquier cambio en la rugosidad de la placa y, también, porque requiere mayor exactitud en la medición de las cargas, pues el flujo volumétrico varía con la potencia 5/2 de la misma.

Los valores de C y μ se suelen calcular por medio de fórmulas empíricas las cuales se pueden observar en la tabla V:

Tabla V. **Fórmulas experimentales para determinar coeficientes de flujo volumétrico a vertederos triangulares**

| Autor | Fórmula | Límites |
|-------------------------------|--|---|
| Universidad Católica de Chile | $C = \frac{8}{15} \sqrt{2g} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \mu K$ | $15^\circ \leq \theta \leq 120^\circ$. Si $B/h \geq 5$ con $\theta = 90^\circ$ Si $B/h \geq 2,75$ para $\theta = 45^\circ$. $K=1$ |
| Gourley y Crimp | $C = \frac{1,32 \tan\left(\frac{\theta}{2}\right)}{h^{0,03}}$ | Valido solo para 45° , 60° y 90° |
| Hegly (1921) | $\mu = \left[0,5812 + \frac{0,00375}{h} \right] \left\{ 1 + \left[\frac{h^2}{B(h+w)} \right]^2 \right\}$ | $\theta = 90^\circ$ $0,10 \text{ m} \leq h \leq 0,50 \text{ m}$ Y profundidades w pequeñas. |
| Barr (1909) | $\mu = 0,565 + \frac{0,0087}{h^{0,5}}$ | $\theta = 90^\circ$ con cargas $0,05 \text{ m} \leq h \leq 0,25 \text{ m}$ $w = 3 h$ $B = 8 h$ |
| Koch (1923) Yarnall (1926) | $\mu = 0,58$ | $\theta = 90^\circ$ con cargas muy grandes. $w = 3 h$ $B = 8 h$ No se limita con precisión el rango de validez |

Continuación de tabla V.

| Autor | Fórmula | Límites |
|------------|--|---|
| Heyndrickx | $\mu = [0,5775 + 0,214 h^{1,85}] \left\{ 1 + \left[\frac{h^2}{B(h+w)} \right]^2 \right\}$ | $\theta = 60^\circ$ con cargas normales. Es bastante precisa. |

Fuente: SOTELO ÁVILA, Gilberto. *Hidráulica general*. p. 252.

2.8.9.3. Vertedero trapezoidal

El flujo volumétrico de un vertedero trapezoidal, como el mostrado en la figura 66, se puede calcular suponiendo la suma del flujo volumétrico correspondiente a uno rectangular con longitud de cresta b y el triangular formado con las dos orillas. De una combinación de las ecuaciones 209 y 211, se obtiene la ecuación 213 de flujo volumétrico en vertederos trapezoidales.

$$\dot{V} = \frac{2}{3} \sqrt{2g} \mu_r b h^{\frac{3}{2}} + \frac{8}{15} \sqrt{2g} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \mu_t h^{\frac{5}{2}} \quad Ec. 213$$

Utilizando la ecuación 214 para definir el termino μ .

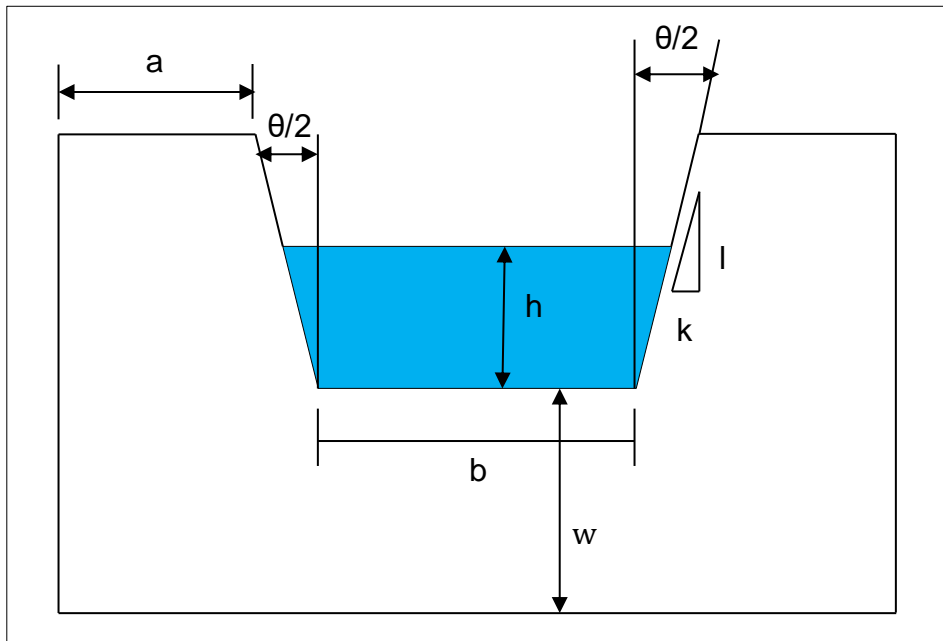
$$\mu = \mu_r + \frac{4h}{5b} \mu_t \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad Ec. 214$$

Sustituyendo el segundo miembro de la ecuación 214 en la ecuación 213, se obtiene la ecuación 215.

$$\dot{V} = \frac{2}{3} \sqrt{2g\mu} b h^{\frac{3}{2}} \quad \text{Ec. 215}$$

Debido a que el vertedero trapezoidal tiene escaso interés, ha sido poco estudiado. Únicamente se ha dado importancia al llamado de Cipolletti que tiene el trazo de un trapecio regular con taludes en los lados $k = 0,25$ (0,25 horizontal y uno vertical) y que encuentra aplicación como aforador en canales, ver figura 66.

Figura 66. **Vertedero trapezoidal**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

La geometría de este medidor de flujo ha sido obtenida de manera que las ampliaciones laterales compensen el flujo volumétrico disminuido por las contracciones laterales de un vertedero rectangular, de longitud de cresta b en igualdad de condiciones de carga.

Experimentalmente se sabe que el coeficiente μ de un vertedero de Cipolletti vale 0,63⁸³.

2.8.9.4. Vertedero circular

Strauss derivó una ecuación teórica para determinar el gasto en vertederos de forma circular en 1931⁸⁴. La deducción de esta ecuación parte de la ecuación de la circunferencia, ver ecuación 216:

$$x = \sqrt{y(D - y)} \quad \text{Ec. 216}$$

Sustituyendo x en la ecuación general de flujo volumétrico para un vertedero se obtiene la ecuación 217:

$$\dot{V} = 2\sqrt{2g\mu} \int_0^h [y(D - y)(h - y)]^{\frac{1}{2}} dy \quad \text{Ec. 217}$$

Con $t = \frac{h}{D}$ y cambiando la variable de integración $z = \frac{y}{D}$, se deduce la ecuación 218:

$$\dot{V} = 2\sqrt{2g\mu} D^{\frac{5}{2}} \int_0^t \sqrt{z(1 - z)(t - z)} dz \quad \text{Ec. 218}$$

La integración de la ecuación 218 anterior conduce a la ecuación 219:

$$\dot{V} = \frac{4}{15} \sqrt{2g} [2(1 - t + t^2)E - (2 - 3t + t^2)K] \mu D^{\frac{5}{2}} \quad \text{Ec. 219}$$

⁸³ SOTELO, ÁVILA, Gilberto. *Hidráulica general*. p. 254.

⁸⁴ *Ibíd.*

Donde E y K son dos integrales elípticas. La ecuación 219 resulta, finalmente en la ecuación 220:

$$\dot{V} = \phi \mu D^{\frac{5}{2}} \quad \text{Ec. 220}$$

Donde D se expresa en decímetros y \dot{V} se obtiene en l/s . En la ecuación 220 ϕ es la función de $\frac{h}{D}$ dada por la tabla VI y μ el coeficiente de flujo volumétrico determinado por la ecuación 221 de Stauss y Jorissen:

$$\mu = 0,555 + \frac{D}{110 h} + 0,041 \frac{h}{D} \quad \text{Ec. 221}$$

La cual es válida para los intervalos establecidos por las ecuaciones 222 y 223:

$$0,20 \text{ m} \leq D \leq 0,30 \text{ m} \quad \text{Ec. 222}$$

$$0,075 < \frac{h}{D} < 1 \quad \text{Ec. 223}$$

Tabla VI. **Coeficiente ϕ**

| h/D | ϕ | h/D | ϕ | h/D | ϕ | h/D | ϕ | h/D | ϕ |
|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|
| 0,05 | 0,0272 | 0,25 | 0,6428 | 0,45 | 1,9559 | 0,65 | 3,7900 | 0,85 | 5,9133 |
| 0,10 | 0,1072 | 0,30 | 0,9119 | 0,50 | 2,3734 | 0,70 | 4,3047 | 0,90 | 6,4511 |
| 0,15 | 0,2380 | 0,35 | 1,2223 | 0,55 | 2,8205 | 0,75 | 4,8336 | 0,95 | 6,9756 |
| 0,20 | 0,4173 | 0,40 | 1,5713 | 0,60 | 3,2939 | 0,80 | 5,3718 | 1,00 | 7,4705 |

Fuente: SOTELO ÁVILA, Gilberto. *Hidráulica general*. p. 255.

Y para distancias mínimas a la frontera del canal de llegada de $3D$ desde los cantos del vertedor.

2.9. Marco legal y normativo de equipo de medición de flujo de fluidos

La Comisión Guatemalteca de Normas (COGUANOR) es el organismo nacional de normalización, adscrito al Ministerio de Economía, según la Ley del Sistema Nacional de la Calidad decreto 78-2005 del Congreso de la República de Guatemala. La principal función de COGUANOR es desarrollar actividades de Normalización que contribuyan a mejorar la competitividad de las empresas nacionales y elevar la calidad de los productos y servicios que dichas empresas ofertan en el mercado nacional e internacional. Su ámbito de actuación abarca todos los sectores económicos. Las normas técnicas que COGUANOR elabora, publica y difunde, son de observancia, uso y aplicación voluntarios.

En lo que respecta a normas para medidores de flujo COGUANOR ha publicado dos normas:

- NTG OIML R 49-1: Medidores y contadores para agua potable fría y caliente Parte 1: Requisitos metrológicos y técnicos.
- NTG ILAC – G24/OIML D10:2007: Lineamientos para la determinación de los intervalos de calibración de los instrumentos de medición.

Debido al vacío normativo es común que para aplicaciones más específicas de medidores de flujo se adopte normas internacionales, como ISO, ATSM, entre otros. A continuación, se muestra una serie de normas para medidores de flujo las cuales tienen validez internacional:

- ISO 11631:1998. Medición de flujo de fluidos. Métodos para especificar el rendimiento del medidor de flujo.
- ISO 11605:1995. Papel y cartón. Calibración de caudalímetros de área variable, rotámetros.
- ISO 2715:2017. Hidrocarburos líquidos. Medición volumétrica mediante caudalímetro de turbina.
- ISO 14551:2019. Medición del flujo de fluido en conductos cerrados. Caudalímetros de masa térmica.
- ISO 10790:1994. Medición del flujo de fluidos en conductos cerrados: caudalímetros de masa de Coriolis.
- ISO 13359:1998. Medición del flujo de líquido conductor en conductos cerrados. Caudalímetros electromagnéticos con bridas. Longitud total.
- ISO 6817:1992. Medición del flujo del líquido conductor en conductos cerrados. Método con medidores de flujo electromagnéticos.
- ISO 20456:2017. Medición del flujo de fluidos en conductos cerrados. Guía para el uso de medidores de flujo electromagnéticos para líquidos conductores.
- ISO 12764:2017. Medición del flujo de fluidos en conductos cerrados: medición del caudal por medio de medidores de flujo de vertido de vórtices insertados en conductos de sección transversal circular completos.

- ISO 10790:2015. Medición del flujo de fluidos en conductos cerrados: guía para la selección, instalación y uso de medidores de caudal de Coriolis, mediciones de flujo de masa, densidad y flujo de volumen.
- ISO 12242:2012. Medición del flujo de fluido en conductos cerrados. Medidores de tiempo de tránsito ultrasónicos para líquidos.
- ISO 5167-1 a la norma ISO 5167-5. Medición del flujo de fluidos por medio de dispositivos de presión diferencial insertados en conductos de sección transversal circular que funcionan a pleno.
- ASME MFC-22-2007. Medición de líquido por medidores de flujo de turbina.

3. METODOLOGÍA

A continuación, se presentan los procedimientos y criterios necesarios para el diseño del equipo de medidores de flujo.

3.1. Fase de diseño

La fase de diseño contempla la determinación de variables de operación basándose en condiciones arbitrarias, selección del equipo de bombeo, selección de materiales, elaboración de planos que servirán de guía en la fase de construcción.

3.1.1. Determinación de variables de operación

Para una correcta operación del equipo es necesario realizar la selección y definición de las variables implicadas en el diseño del equipo de medidores de flujo. Se trabajará a un escalamiento de planta piloto.

El escalamiento es una herramienta indispensable para la ingeniería mecánica, con ello se pueden reducir errores en diseños directos, debido a correlaciones inexactas o a la falta de información.

El concepto de escalamiento parte de la propia definición de medición, medir es asignar números a las propiedades de los objetos u operaciones, de acuerdo con ciertos criterios y reglas. El escalamiento es el proceso mediante el que se desarrollan los criterios y reglas de asignación numérica que determinan

las unidades de medida significativas para llevar de un tamaño dado a otro tamaño mayor o menor a una operación u objeto.

Escalar un proceso o equipo es convertirlo desde su escala de industrial a escala laboratorio o piloto, o viceversa. En el caso de esta investigación se requiere la primera opción, debido que para realizar investigaciones se requiere explicar el principio del funcionamiento de los equipos. Es necesario observarlo en un ambiente controlado con un alto nivel de idealidad o afinidad con los conceptos teóricos. Por lo que para esta investigación se seleccionó trabajar a un nivel de planta piloto.

- Variables: la tabla VII se describen las variables utilizadas en la fase de diseño del equipo de medidores de flujo.

Tabla VII. **Valores fijos en el proceso de diseño**

| No. | Valor | Unidad | Descripción |
|-----|--------------------|-------------------|---|
| 1 | Temperatura | °C | Se refiere a la temperatura del flujo de agua. |
| 3 | Rugosidad absoluta | ε | Se refiere a la aspereza de la superficie interna de la tubería. |
| 4 | Voltaje | V | Se refiere a la tensión eléctrica de alimentación de diseño del equipo. |
| 5 | Densidad | kg/m ³ | Se refiere a la cantidad de materia contenida en un volumen conocido. |

Fuente: elaboración propia.

- Variables independientes

En la tabla VIII se muestran las variables independientes de diseño.

Tabla VIII. **Variables independientes de la investigación**

| No. | Variable | Unidad | Descripción |
|-----|---------------------|-------------------|---|
| 1 | Flujo volumétrico | m ³ /s | Se refiere al caudal de agua que circula por el equipo. |
| 2 | Diámetro de tubería | M | Se refiere al diámetro interno de la tubería. |

Fuente: elaboración propia.

- Variables dependientes

En la tabla IX se presentan las variables dependientes del diseño.

Tabla IX. **Variables dependientes de la investigación**

| No. | Variable | Unidad | Descripción |
|-----|--------------------------------|--------|--|
| 1 | Presión | Pa | Depende del flujo volumétrico. |
| 2 | Velocidad | m/s | Depende del flujo volumétrico y el diámetro de la tubería. |
| 3 | Potencia requerida de la bomba | Watt | Depende del flujo volumétrico, aceleración de la gravedad y densidad del fluido. |

Fuente: elaboración propia.

3.1.1.1. Delimitación de campo de estudio

La presente investigación se limita al diseño de equipo de medidores de flujo a escala planta piloto tomando como base la mecánica de fluidos, hidráulica y principios de funcionamiento de máquinas hidráulicas. Se trabajó con una temperatura de 25 °C utilizando agua como fluido de estudio. El flujo volumétrico de diseño es de 40 l/min. El sistema eléctrico es de 120 V.

3.1.1.2. Recursos humanos disponibles

- Investigador: Ing. Carlos Rodrigo Hernández Pérez
- Investigador asesor: Ing. José Ismael Véliz Padilla

3.1.1.3. Recursos materiales disponibles

Son bienes tangibles disponibles y empleados por los investigadores para el presente estudio. En la tabla X se presentan los insumos utilizados para la investigación.

Tabla X. Fluidos de operación

| | |
|---------------|-----------------|
| Insumo | Agua |
| | Flujo eléctrico |

Fuente: elaboración propia.

3.1.1.4. Materiales e insumos

En la tabla XI, se detallan todos los materiales y equipos auxiliares que se utilizaron en el proceso de diseño, construcción y validación del reactor, cabe destacar que algunos son consumibles.

Tabla XI. **Materiales**

| Descripción | Dimensiones | Cantidad |
|---|--|----------|
| Bomba de agua marca Truper tipo centrífuga rosca NPT. | D= 1 pulg. | 1 u |
| Codo de acero galvanizado rosca NPT. | D= 1 pulg. | 9 u |
| Unión universal acero galvanizado rosca NPT. | D= 1 pulg. | 7 u |
| Reducidor concéntrico tipo campada galvanizado NPT. | D1= 3/4 pulg. D2= ¼ pulg. | 1 u |
| Copla acero galvanizado rosca NPT. | D= 1 pulg. | 2 u |
| Tubo estructural cuadrado acero negro chapa 20. | A=2 pulg. L=6 m | 7 u |
| Lamina lisa acero negro chapa 18. | A=3 pie L=8 pie | 2 u |
| Gabinete metálico IP66 cob placa Argos, acabado de pintura de resina Epoxi Poliéster Gris RAL 7032. | A= 300 mm H=300 mm P=150 mm, Espesor de lámina= 1,2 mm. Espesor de placa de montaje= 1,5 mm | 1 u |
| Tacos de hule para tubo cuadrado. | D=2 pulg. | 12 u |

Continuación de tabla XI.

| Descripción | Dimensiones | Cantidad |
|---|-------------------------|-----------------|
| Válvula de globo de bronce con unión roscada NPT hembra. | D= 1 pulg | 1 u |
| Válvula de bola PVC unión roscada hembra. | D= 1 pulg. | 1 u |
| Válvula antirretorno de pichancha o de pie de bronce con malla filtrante de acero inoxidable 304 y unión roscada NPT. | D= 1 pulg. | 1 u |
| Hierro plano tipo acero negro. | A= 1 pulg. S= 1/8 pulg. | 2 u |
| Niple de acero inoxidable 304 tipo industrial rosca NPT. | D=1/4 pulg. L= 3 pulg. | 2 u |
| Reductor tipo campana de acero inoxidable 304 tipo industrial rosca hembra NPT. | D1= ¾ pulg. D2= ¼ pulg. | 1 u |
| Copla de acero galvanizado rosca NPT. | D=1/4 pulg. | 2 u |
| Copla de acero inoxidable 304 tipo industrial rosca NPT. | D=1/4 pulg. | 4 u |
| Niple acero galvanizado tipo ligero rosca NPT. | D=1 pulg. L=10 pulg. | 1 u |
| Niple acero galvanizado tipo ligero rosca NPT. | D=1 pulg. L=11 pulg. | 1 u |
| Niple acero galvanizado tipo ligero rosca NPT. | D=1 pulg. L=1 pulg. | 1 u |

Continuación de tabla XI.

| Descripción | Dimensiones | Cantidad |
|---|------------------------|-----------------|
| Niple acero galvanizado tipo ligero rosca NPT. | D=1 pulg. L=9 pulg. | 1 u |
| Niple acero galvanizado tipo ligero rosca NPT. | D=1 pulg. L=12 pulg. | 2 u |
| Niple acero galvanizado tipo ligero rosca NPT. | D=1 pulg. L=3 pulg. | 1 u |
| Niple acero galvanizado tipo ligero rosca NPT. | D=1 pulg. L=3 ½ pulg. | 1 u |
| Niple acero galvanizado tipo ligero rosca NPT. | D=1 pulg. L=86 cm. | 2 u |
| Niple acero galvanizado tipo ligero rosca NPT. | D=1 pulg. L=75,5 cm. | 4 u |
| Niple acero galvanizado tipo ligero rosca NPT. | D=1 pulg. L=16,5 cm. | 1 u |
| Niple acero galvanizado tipo ligero rosca NPT. | D=1 pulg. L=37,5 cm. | 1 u |
| Niple acero galvanizado tipo ligero rosca NPT. | D=1 pulg. L=45,72 cm. | 1 u |
| Abrazadera Conduit acero galvanizado. | D=1 ¼ pulg. | 7 u |
| Tornillos galvanizados para chapa. | D=1/8 pulg. L=1 pulg. | 7 u |
| Tornillo galvanizado rosca ordinaria acero negro. | D=3/8 pulg. L= 3 pulg. | 6 u |
| Electrodo 6013 punto verde. | D=1/8 pulg. | 4 lb |

Continuación de tabla XI.

| Descripción | Dimensiones | Cantidad |
|---|--|-----------------|
| Vacuómetro de tubo Bourdon rosca NPT. | Caratula: D=2 pulg. Conexión: D= ¼ pulg. Rango de medición de vacío= 0 a -1 bar. | 1 u |
| Manómetro tipo Bourdon rosca NPT. | Caratula: D=2 pulg. Conexión: D= ¼ pulg. Rango de medición = 0 a 60 psi. | 5 u |
| Interruptor de palanca metálico tipo industrial. | | 1 u |
| Luz piloto color rojo. | D=3/4 pulg. Tensión=120 V Tipo de corriente: AC | 1 u |
| Luz piloto color verde. | D=3/4 pulg. Tensión=120 V Tipo de corriente: AC | 1 u |
| Botón de paro de emergencia tipo hongo color rojo. | Tensión=120 V Tipo de corriente: AC | 1 u |
| Amperímetro análogo UXCELL rectangular para montaje en tablero eléctrico. | A=6,3 cm H= 5,5 cm P= 1 cm Peso= 96 g. Rango de medición: 0 a 20 A Tipo de corriente: AC Precisión= Clase 2,5 | 1 u |
| Medidor de voltaje análogo para montaje en tablero eléctrico. | Rango de medición: 0 a 300 V Tipo de corriente: AC | 1 u |
| Tornillo de acero negro rosca ordinaria. | D=3/8 pulg. L=1 pulg. | 6 u |

Continuación de tabla XI.

| Descripción | Dimensiones | Cantidad |
|---|---|----------|
| Rotámetro (medidor de flujo volumétrico) conexión hembra NPT Marca PRM. Importado de Ciudad Industrial de Los Ángeles USA. Modelo: Z4004. | Rango de medición de flujo volumétrico= 2 a 20 gpm. D= 1 pulg. Cuerpo acrílico resistente a los rayos UV | 1 u |
| Medidor de turbina digital K24 Azul conexión NPT. | D= 1 pulg. Error: $\pm 1\%$ Precisión: $\pm 0,5\%$ Presión máxima= 20 bar Voltaje de operación: 2,3 a 3,3 V Rango de medición de flujo volumétrico: 10 a 120 l/min. Acumulado simple: 0 a 9999,9 Total, acumulado: 0 a 999999,9 | 1 u |
| Medidor de flujo volumétrico tipo Venturi PVC negro Dealglad conexión NPT. | D= 1 pulg. | 1 u |
| Lámina acrílica transparente para uso industrial. | A= 3 pie. L= 7 pie. E= 5 mm | 1 u |
| Pintura Industrial especial alquímica tipo mate para metal color gris SURCOLOR. | 1 galón | 1 u |
| Pintura base aceite tipo brillante color rojo óxido. | ¼ galón | 2 u |

Continuación de tabla XI.

| Descripción | Dimensiones | Cantidad |
|---|----------------------------------|-----------------|
| Pintura base aceite tipo brillante color amarillo Caterpillar. | ¼ galón | 1 u |
| Adaptador macho PVC. | D= 1 pulg. | 3 u |
| Adaptador hembra PVC. | D= 1 pulg. | 2 u |
| Tapón hembra PVC. | D= 1 pulg. | 1 u |
| Codo 90 ° PVC. | D= 1 pulg. | 1 u |
| Silicon blanco para montajes pintable ALEX 25 años. | | 3 u |
| Poliuretano color gris para montaje de estructuras metálicas tipo industrial. | | 1 u |
| Caja cuadrada JSL para exteriores. | A= 80 mm L= 80 mm P= 50 mm | 1 u |
| Teflón para conexiones roscadas. | Presentación de rollo A= ½ pulg. | 12 u |
| Pegamento PVC. | V= 100 g | 2 u |
| Pegamento industrial Super Bonder (Cianocrilato). | P= 26 g | 1 u |
| Cable TSJ calibre No 12 trifilar. | | 5 m |
| Extensión eléctrica color amarillo calibre No. 12 polarizada. | L= 6 m | 1 u |
| Cinta de aislar eléctrica. | A=3/4 pulg. | 2 u |

Fuente: elaboración propia.

3.1.1.5. Máquinas y herramientas

Las herramientas son accesorios utilizados para manufacturar el equipo, en la tabla XII se muestra las herramientas utilizadas en la investigación.

Tabla XII. Herramientas y máquinas

| Descripción | Cantidad |
|---|----------|
| Careta para soldar con levante lente | 1 u |
| Careta para soldar electrónica con sensor de arco eléctrico | 1 u |
| Vidrio claro para careta 51 x 108 mm | 2 u |
| Vidrio rectangular para soldar 51 x 108 mm No. 10 | 1 u |
| Prensa para taladro 4 pulgadas | 1 u |
| Manguera para aire comprimido D= ¼ rosca NPT L= 10 pie | 1 u |
| Pistola para pintura, aplicación con aire comprimido | 1 u |
| Destornilladores de cruz | 3 u |
| Destornilladores planos | 2 u |
| Pinza de eléctrico | 1 u |
| Prisionero Allen métrico 4 x 20 m | 1 u |
| Broca para metal HSS con espiga D= ½ pulg | 1 u |
| Broca para metal HSS D= 3/8 pulg | 1 u |
| Broca para metal HSS D= ¼ pulg | 1 u |
| Broca para metal HSS D= 1/8 pulg | 1 u |
| Broca para metal HSS D= 5/16 pulg | 1 u |
| Brocha para pintar PLUS 3 pulg | 1 u |
| Cepillo de alambre | 1 u |
| Llave ajustable de 6" Cangrejo | 1 u |
| Soldadora convencional DC MMA | 1 u |

Continuación de tabla XII.

| Descripción | Cantidad |
|--|-----------------|
| Soldadora TIG Marca Stayer, Modelo: Plus 120BGE | 1 u |
| Esmeriladora angular (Pulidora) D= 4 ½ pulg. | 1 u |
| Barreno con mandril para broca de espiga de D= ½ pulg. | 1 u |
| Cautín 40 W | 1 u |
| Juego de prensar para soldar | 1 u |
| Multímetro Digital | 1 u |
| Martillo de acero | 1 u |
| Disco de corte de metal 4 ½ pulg. | 12 u |
| Extensión eléctrica | 1 u |
| Barreno con mandril de raíz de ½ pulg. | 1 u |
| Banco metálico de trabajo | 1 u |

Fuente: elaboración propia.

3.1.1.6. Recursos generales

Se entiende por recurso general a todos aquellos usados con el fin de documentar, limpiar, organizar y demás actividades que no son de carácter técnico científico. Entre ello se puede mencionar aparatos electrónicos utilizados para documentar información como lo es una computadora o una cámara fotográfica.

También puede mencionarse equipo de protección personal, para actividades de metalmecánica. En la tabla XIII se puede observar los recursos generales utilizados en el presente trabajo.

Tabla XIII. **Recursos generales**

| | |
|--------------------------------------|---|
| Útiles de oficina | Papel bond |
| | Lapiceros |
| | Cuaderno de bitácora |
| | Tinta |
| | Grapas |
| Artículos de limpieza | Jabón para manos |
| | Jabón en gel para limpieza de cristalería |
| | Papel mayordomo |
| | Lavapachas |
| | Alcohol |
| Aparatos electrónicos | Impresora |
| | Cámara fotográfica |
| | Cámara de video |
| | Computadora |
| Equipo de protección Personal | Bata |
| | Mascarilla |
| | Overol para laboratorio |
| | Casco |
| | Lentes de protección |
| | Zapatos industriales punta de acero |
| | Guantes antiestáticos |
| | Guantes de soldadura |

Fuente: elaboración propia.

En la tabla XIV se muestran los softwares utilizados para el desarrollo de la investigación.

Tabla XIV. **Recursos tecnológicos**

| | |
|-----------------|-----------------------|
| Software | Microsoft Word 2013 |
| | Microsoft Excel 2013 |
| | Wólfram Matemática 10 |
| | Polymath 5.1 |
| | QtiPlot |
| | AutoCad 2017 |
| | SketchUp 2016 |

Fuente: elaboración propia.

3.1.1.7. Caudal estimado de operación

Para este diseño por medio arbitrario se ha decidió utilizar un caudal de 50 l/min.

3.1.1.8. Temperatura

La temperatura no es un parámetro que afecte significativamente la operación del equipo que se diseñó, esto debido a que el agua es un fluido incompresible.

3.1.1.9. Régimen de flujo de operación

Por la naturaleza de los sistemas de flujo se espera trabajar en condiciones de régimen turbulento completamente desarrollado. Por tanto, el número de Reynolds oscilara en un valor superior a 20 000.

3.1.1.10. Propiedades de tuberías y accesorios

Se ha decidido utilizar tubería de acero galvanizado para el presente diseño, a continuación, se detallan las propiedades de este tipo de tubería.

3.1.1.10.1. Rugosidad

La rugosidad absoluta ϵ de una tubería tipo ligera con acabado industrial de acero galvanizado tiene un valor que oscila en el siguiente intervalo: $1,5 \times 10^{-4} m < \epsilon < 2,4 \times 10^{-4} m$.

3.1.1.10.2. Resistencia a la corrosión

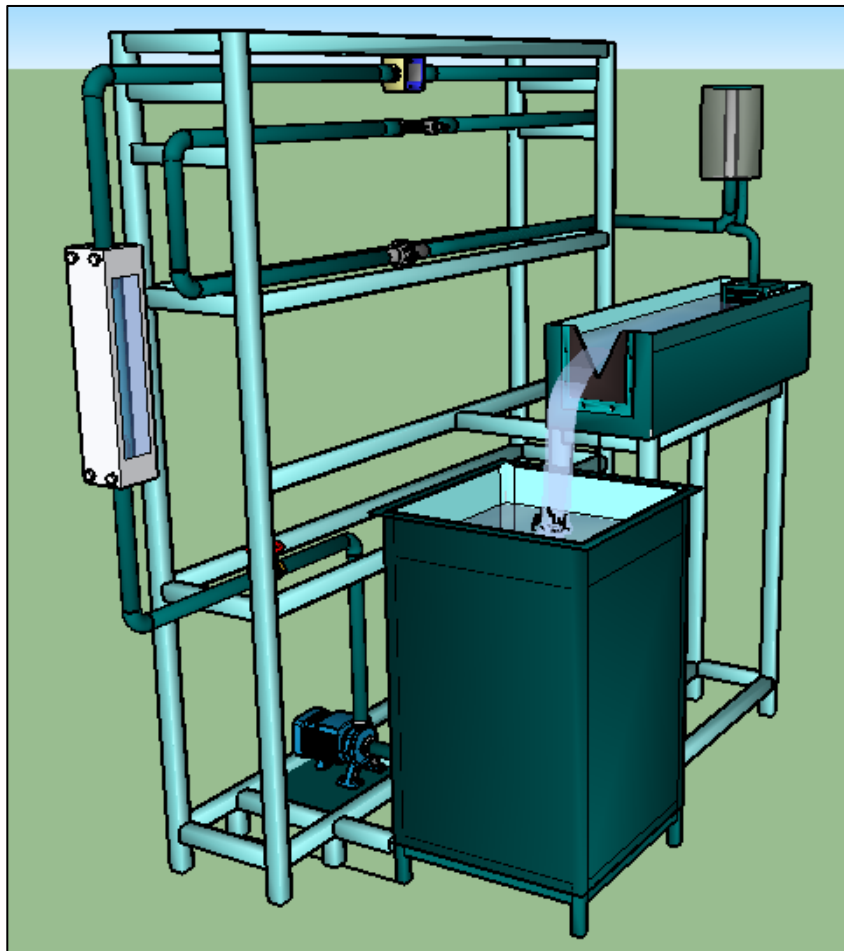
El galvanizado es un recubrimiento ampliamente usado en la industria; el zinc que es un metal con un comportamiento más activo que el hierro, sin embargo, la vida media del recubrimiento es mayor comparada con la del acero normal, debido a la formación de una película protectora de óxido sobre su superficie. El acero galvanizado técnicamente es un acero galvanizado, pero por costumbre se emplea el nombre de acero galvanizado.

El acero galvanizado expuesto a ambientes atmosféricos tropicales es afectado por la acción de agentes presentes en la atmosfera marina, por la humedad relativa, temperatura y tiempo de exposición al ambiente, lo que causa un cambio en la composición de la capa protectora, y por lo tanto una disminución en su resistencia a la corrosión.

3.1.1.11. Diseño preliminar para determinar longitudes de tubería

En la figura 67 se muestra un diseño preliminar utilizado para realizar cálculos matemáticos en la fase de diseño.

Figura 67. Esquema 3D preliminar del equipo de medidores de flujo



Fuente: elaboración propia, empleando SketchUp Pro 2016.

Los detalles de los niples o conjunto de tubos utilizados para el transporte de agua en el equipo de medidores de flujo pueden observarse en la tabla XI, a continuación, se muestra la suma del conjunto de niples y tubos para obtener la longitud total L de toda la tubería. Para simplificar el cálculo se definió la ecuación 224. Donde: L_1 está definido por la ecuación 225 y es la sumatoria de la longitud de los niples estándares, el termino L_2 se observa en la ecuación 227 y es la sumatoria de niples fabricados a longitudes exactas.

$$L = L_1 + L_2 \quad \text{Ec. 224}$$

$$L_1 = 2 * 3 \text{ pulg} + 10 \text{ pulg} + 11 \text{ pulg} + 1 \text{ pulg} + 9 \text{ pulg} + 2 * 12 \text{ pulg} + 3 \text{ pulg} + 3,5 \text{ pulg} \quad \text{Ec. 225}$$

La ecuación 226 muestra el resultado en diferentes unidades de la sumatoria de la ecuación 225.

$$L_1 = 67,5 \text{ pulg} = 171,45 \text{ cm} = 1,7145 \text{ m} \quad \text{Ec. 226}$$

La ecuación 227 mencionada anteriormente se presenta a continuación:

$$L_2 = 2 * 86 \text{ cm} + 75,5 \text{ cm} * 4 + 16,5 \text{ cm} + 37,5 \text{ cm} + 45,72 \text{ cm} + 25 \text{ cm} \quad \text{Ec. 227}$$

El resultado de la sumatoria de los términos del segundo miembro de la ecuación 227 se muestra en la ecuación 228 en centímetros y metros.

$$L_2 = 598,72 \text{ cm} = 5,9872 \text{ m} \quad \text{Ec. 228}$$

Sustituyendo los resultados de las ecuaciones 226 y 228, como se observa en la ecuación 229, se obtiene la longitud total L de la tubería, ver ecuación 230.

$$L = 1,7145 \text{ m} + 5,9872 \text{ m} \quad \text{Ec. 229}$$

$$L = 7,7017 \text{ m} \quad \text{Ec. 230}$$

3.1.1.12. Tamaño de tubería y velocidad de flujo

Para la determinación del tamaño de la tubería se recurrió al criterio de los valores recomendados de diseño en líneas de flujo de fluidos.

Un aspecto muy importante a tener en cuenta para el diseño del sistema de tuberías sistema es el de la velocidad que alcanza el fluido por el interior de las conducciones. Dicha velocidad, en el caso de la circulación isoterma de fluidos incompresibles, viene determinada por el caudal y el diámetro de la sección interna de la conducción, y para cada fluido tiene un valor máximo que no debe ser sobrepasado, ya que de lo contrario puede producirse un deterioro del producto por tratamiento mecánico inadecuado.

Para esto se consultó la literatura de la cual se obtuvo los valores mostrados en la tabla XV.

De la tabla XV se observa que el valor recomendado de diseño oscila entre 1,2 a 2,4 m/s.

Se escogió trabajar a una velocidad de 1,3 m/s, luego se calculó el diámetro de la tubería. Para ello se empleó la ecuación 231 para flujos estables, incompresibles y unidimensionales.

$$\dot{V} = A * v \quad \text{Ec. 231}$$

Tabla XV. **Velocidades recomendadas para flujos en tuberías**

| Fluido | Tipo de flujo | Velocidad | |
|------------------------|---------------------|-----------|-------------|
| | | pie/s | m/s |
| Líquidos poco viscosos | Flujo por gravedad | 0,5 – 1 | 0,15 – 0,30 |
| | Entrada de bomba | 1 – 3 | 0,3 – 0,9 |
| | Salida de bomba | 4 – 10 | 1,2 – 3 |
| Líquidos viscosos | Línea de conducción | 4 – 8 | 1,2 – 2,4 |
| | Entrada de bomba | 0,2 – 0,5 | 0,06 – 0,15 |
| | Salida de bomba | 0,5 – 2 | 0,15 – 0,6 |
| Vapor de agua | | 30 – 50 | 9 – 15 |
| Aire o gas | | 30 – 100 | 9 – 30 |

Fuente: HARRIOTT, Peter, MCCABE, Warren L. y SMITH, Julian C. *Operaciones básicas de Ingeniería Química*. p. 190.

El área A características de una tubería de sección circular de diámetro D , se representa mediante la ecuación 232.

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \quad \text{Ec. 232}$$

Sustituyendo el segundo miembro de la ecuación 232 en la ecuación 231 se obtiene la definición del flujo volumétrico para una sección circular en términos del diámetro D y la velocidad media de flujo v , como se ve en la ecuación 233.

$$\dot{V} = \frac{\pi D^2}{4} * v \quad \text{Ec. 233}$$

Despejando el diámetro en la ecuación 233, se obtiene la ecuación 234:

$$D = \left(\frac{4 * \dot{V}}{\pi * v} \right)^{0,5} \quad Ec. 234$$

Sustituyendo el valor del flujo volumétrico de diseño 15 l/min y la velocidad recomendada de diseño 1,3 m/s se obtiene la ecuación 235.

$$D = \left(\frac{4 * 0,0008333 \frac{m^3}{s}}{\pi * 1,3 \frac{m}{s}} \right)^{0,5} \quad Ec. 235$$

Simplificando la ecuación 235 se determina el valor del diámetro teórico de la tubería a utilizar, ver ecuación 236.

$$D = 0,028556 \text{ m} \quad Ec. 236$$

Este diámetro es similar al diámetro interior de una tubería galvanizada de 1 pulgada nominal tipo ligera, cuyo valor se puede observar en la ecuación 237.

$$D = 0,028626 \text{ m} \quad Ec. 237$$

Calculando la velocidad real del flujo con el diámetro de la ecuación 237, como se observa en la ecuación 238.

$$v = \frac{0,0008333 \frac{m^3}{s}}{\pi * \frac{(0,028626 \text{ m})^2}{4}} \quad Ec. 238$$

Se obtiene el valor de la velocidad media real a utilizar, ver ecuación 239.

$$v = 1,294816 \frac{m}{s} \quad Ec. 239$$

En la tabla XVI se muestra el resumen de las características de diseño del equipo obtenidas en los cálculos anteriores.

Tabla XVI. **Características de diseño del equipo**

| v (m/s) | \dot{V} (m ³ /s) | D (m) real | D (pulg) nominal | L (m) |
|-----------|-------------------------------|------------|------------------|-------|
| 1,294815 | 0,0008333 | 0,028626 | 1 | 7,017 |

Fuente: elaboración propia.

3.1.2. Selección de bomba hidráulica

La selección de un equipo de bombeo depende de varios factores entre ellos se puede mencionar:

- Potencia
- Caudal
- Tipo de líquido a transportar
- Temperatura del fluido
- Ambiente donde será instalada la bomba
- Tipo de flujo continuo o intermitente

3.1.2.1. Determinación de carga dinámica total (CDT)

La carga dinámica total (CDT) es un parámetro que debe de calcularse siempre que se necesita dimensionar la potencia al freno requerida de una bomba. Para su cálculo se debe realizar un balance de energía entre los dos puntos desde donde se succionará el fluido hasta donde será descargado.

El balance de energía en un sistema de bombeo se puede representar mediante la ecuación 240 deducida en apartados anteriores:

$$H_p + \frac{v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\gamma} + z_1 = H_T + \frac{v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + H_L \quad \text{Ec. 240}$$

Donde:

H_p : carga de la bomba y equivale a la CDT

v_1, v_2 : velocidad del flujo en los puntos 1 (inicial) y 2 (final)

g : aceleración de la fuerza de gravedad

γ : peso específico del fluido

z_1, z_2 : altura del punto 1 y 2 desde un punto de referencia respectivamente

H_T : trabajo de flecha realizado por el fluido para generar algún trabajo

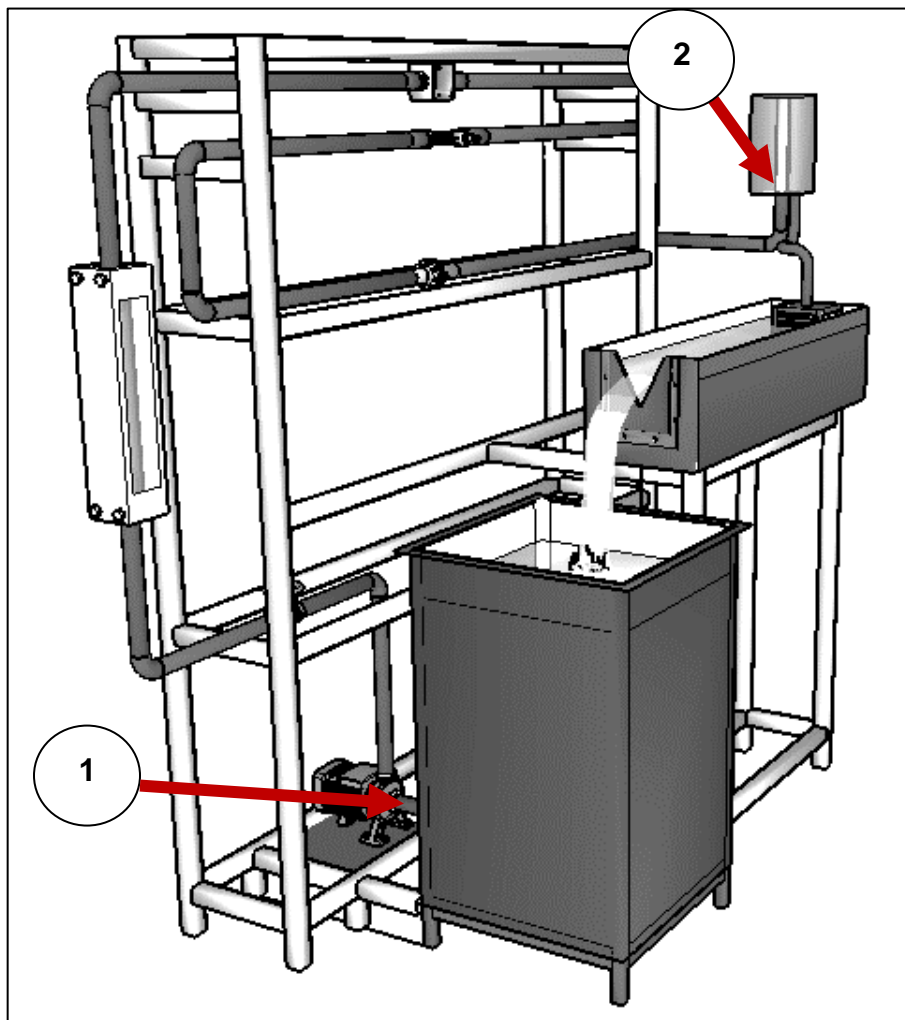
H_L : sumatoria de pérdidas de energía

En este caso como no se utilizará el flujo para generar trabajo el término H_p se puede eliminar de la ecuación 240, obteniendo la ecuación 241.

$$H_p + \frac{v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\gamma} + z_1 = \frac{v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + H_L \quad \text{Ec. 241}$$

Los puntos analizar son la tubería de succión de la bomba (1) y la salida del agua en el medidor de ranura (2), ver figura 68.

Figura 68. **Esquema para análisis de energía hidráulica entre los puntos 1 y 2**



Fuente: elaboración propia, empleando SketchUp 2016.

Dado que la velocidad es la misma en ambos puntos, la ecuación 241 se puede reducir a la ecuación 242:

$$H_p + \frac{p_1}{\gamma} + z_1 = \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + H_L \quad \text{Ec. 242}$$

Despejando la carga de la bomba se obtiene la ecuación 243:

$$H_p = z_2 - z_1 + H_L + \frac{p_2 - p_1}{\gamma} \quad \text{Ec. 243}$$

Por criterio de diseño se sabe que la diferencia de altura entre los puntos 2 y 1 es 1,375 m, ver ecuación 244.

$$z_2 - z_1 = 1,375 \text{ m} \quad \text{Ec. 244}$$

La diferencia de presión se calcula en la ecuación 245 y los datos son arbitrarios:

$$\frac{p_2 - p_1}{\gamma} = \frac{34\,473 \text{ Pa} - (-13\,789,5 \text{ Pa})}{9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times 997,13 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} \quad \text{Ec. 245}$$

Operando el segundo miembro de la ecuación 245, se obtiene el valor de la carga de presión el cual se puede ver en la ecuación 246.

$$\frac{p_2 - p_1}{\gamma} = 4,93 \text{ m} \quad \text{Ec. 246}$$

Por lo que el únicamente se necesita calcular las pérdidas de energía por fricción y forma, como se muestra en la ecuación 247.

$$H_L = H_{LF} + H_{FF} \quad \text{Ec. 247}$$

Donde:

H_{LF} : Sumatoria de pérdidas de energía por fricción dinámica.

H_{FF} : Sumatoria de pérdidas de energía por forma.

3.1.2.1.1. Cálculo de pérdidas por fricción

La sumatoria de las pérdidas de energía por fricción se pueden expresar mediante la ecuación 248:

$$H_{LF} = \sum f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} \quad Ec. 248$$

Donde:

f : factor de fricción de Darcy.

v : velocidad media del fluido.

D : diámetro de la tubería.

g : aceleración de la fuerza de gravedad.

L : longitud del tramo de tubería a analizar.

La ecuación 248 también se utiliza cuando la pérdida de energía por forma de un accesorio es dada en términos de longitud equivalente, ver ecuación 249.

$$\frac{L}{D} = \text{longitud equivalente} \quad Ec. 249$$

La correlación más utilizada para calcular el factor de fricción de Darcy es la de Swamee Jain, como la mostrada en la ecuación 250:

$$f = \frac{0,25}{\left[\log_{10} \left(\frac{\varepsilon/D}{3,71} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^2} \quad Ec. 250$$

Donde:

ε : rugosidad absoluta de la tubería o del material del cual está fabricado el accesorio.

D : diámetro o diámetro equivalente.

Re : número de Reynolds.

f : factor de fricción de Darcy.

Para el cálculo de la pérdida de energía por fricción, se utilizan los datos de las longitudes de las secciones de tuberías que se enumeran en la tabla XVI.

$$L = 7,7017 \text{ m}$$

$$D = 0,028626 \text{ m}$$

$$v = 1,294815 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$g = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$H_{LF} = f * \frac{L}{D} * \frac{v^2}{2g}$$

$$H_{LF} = f * \frac{7,7017 \text{ m}}{0,028626 \text{ m}} * \frac{(1,294815 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2}{2 * 9,81 \text{ m/s}^2}$$

Calculando el número de Reynolds, ver ecuación 251:

$$Re = \frac{\rho * D * v}{\mu} \quad Ec. 251$$

Las propiedades del agua a 25 °C son:

$$\rho = 997,13 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu = 0,001 \text{ Pa} * \text{s}$$

$$Re = \frac{997,13 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 0,028626 \text{ m} * 1,294815 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{0,001 \text{ Pa} * \text{s}}$$

$$Re = 36\ 959$$

Calculando el factor de fricción:

La rugosidad absoluta de un tubo galvanizado con acabado industrial tipo ligero es:

$$\varepsilon = 0,00024 \text{ m}$$

Sustituye el valor de la rugosidad absoluta en la ecuación de Swamee Jain:

$$f = \frac{0,25}{\left[\log_{10} \left(\frac{0,00024 \text{ m}/0,028626 \text{ m}}{3,71} + \frac{5,74}{(36\ 959)^{0,9}} \right) \right]^2}$$

$$f = 0,0379$$

Sustituyendo en la ecuación de pérdida de energía por fricción:

$$H_{LF} = 0,0379 * \frac{7,7017 \text{ m}}{0,028626 \text{ m}} * \frac{\left(1,294815 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2 * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 0,8713 \text{ m}$$

3.1.2.1.2. Cálculo de pérdidas por forma

Para el cálculo de pérdidas de energía por forma en accesorios por lo general la pérdida de energía se presenta en términos de coeficiente de pérdida por forma (K).

La ecuación 252 representa la pérdida de energía por forma.

$$H_{FF} = \sum K \frac{v^2}{2g} \quad \text{Ec. 252}$$

Donde:

H_{FF} : pérdida de energía por forma.

K : coeficiente de pérdida de energía.

v : velocidad media del flujo.

g : aceleración de la fuerza de gravedad.

El coeficiente de pérdida de energía por forma se puede obtener de tablas donde se describe el valor de K en función del factor de fricción y la longitud equivalente de Darcy, o puede calcularse mediante la ecuación 253:

$$K = \left(\frac{Le}{D}\right) f_D \quad \text{Ec. 253}$$

Calculado las pérdidas de energía por forma:

$$\begin{aligned}
 H_{FF} = & \left(\frac{Le}{D} \text{ codos} + \frac{Le}{D} \text{ coplas y uniones} + \frac{Le}{D} \text{ Valvula de pie} \right. \\
 & + \frac{Le}{D} \text{ Valvula de globo} + \frac{Le}{D} \text{ Válvula de bola} + \frac{Le}{D} \text{ Rotámetro} \\
 & \left. + \frac{Le}{D} \text{ Turbina} \right) f_D \frac{v^2}{2g} \\
 & + (K \text{ orificio estrechamiento} + K \text{ orificio ensanchamiento} \\
 & + K \text{ Venturi estrechamiento} + K \text{ Venturi ensanchamiento} \\
 & + K \text{ entrada tubería} + K \text{ salida tubería}) \frac{v^2}{2g}
 \end{aligned}$$

En la tabla XVII se muestran los valores de K para distintos accesorios.

Tabla XVII. **Valores de longitud equivalente de distintos accesorios de tubería**

| Accesorio | Valor de Le/D |
|--|-----------------|
| Codo a 90 ° | 30 |
| Coplas y uniones | 10 |
| Válvula de pie con filtro | 420 |
| Válvula de globo | 340 |
| Válvula de bola | 5 |
| Rotámetro | 26 |
| Medidor de Turbina | 30 |
| Entrada de tanque a tubería con resalte hacia dentro | $1/f_D$ |
| Salida de tubería | $1/f_D$ |

Fuente: CRANE. *Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías*. p. A-46 – A-49.

Sustituyendo los valores correspondientes:

$$H_{FF} = \left[(9 \times 30 + 9 \times 10 + 420 + 340 + 5 + 15 + 30) \times 0,0379 \times \frac{\left(1,294815 \frac{m}{s}\right)^2}{2 * 9,81 \frac{m}{s^2}} \right] + \left(\frac{1 + 1}{f_D} \times f_D \times \frac{\left(1,294815 \frac{m}{s}\right)^2}{2 * 9,81 \frac{m}{s^2}} \right)$$

$$H_{FF} = \left(1170 \times 0,0379 \times \frac{\left(1,294815 \frac{m}{s}\right)^2}{2 * 9,81 \frac{m}{s^2}} \right) + \left(\frac{2}{f_D} \times f_D \times \frac{\left(1,294815 \frac{m}{s}\right)^2}{2 * 9,81 \frac{m}{s^2}} \right)$$

$$H_{FF} = 3,7915 \text{ m} + 0,17 \text{ m}$$

$$H_{FF} = 3,95 \text{ m}$$

Calculando las pérdidas de energía por el medidor de orificio y medidor de Venturi:

Para este cálculo se utiliza la ecuación 254 del flujo volumétrico de placas de orificio y Venturi:

$$\dot{V} = KA_0 \sqrt{2g(h_1 - h_2)} \quad \text{Ec. 254}$$

Despejando la expresión $h_1 - h_2$, la cual corresponde la diferencia de energía entre los dos puntos a analizar en un medidor de orificio, ver ecuación 255.

$$h_1 - h_2 = \frac{\left(\frac{\dot{V}}{KA_0}\right)^2}{2g} \quad Ec. 255$$

El valor de K se puede consultar en la figura 69, sin embargo, es necesario conocer el valor de β .

$$\beta = \frac{d}{D}$$

Donde:

d : diámetro del orificio o contracción del Venturi.

D : diámetro de la tubería.

$$\beta = \frac{0,0115 \text{ m}}{0,028626 \text{ m}}$$

$$\beta = 0,40$$

En la figura 69 se observan los valores de los coeficientes descarga del medidor de orificio y de Venturi, los cuales son:

$$K = 0,97 \text{ Venturi}$$

$$K = 0,62 \text{ Placa de orificio}$$

Calculando las pérdidas de energía en los medidores de orificio y Venturi:

$$h_1 - h_2 = \frac{(0,0008333 / (0,97 \times \pi \times (0,0127 \text{ m})^2 / 4))^2}{2 \times 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 2,34 \text{ m Venturi}$$

$$h_1 - h_2 = \frac{(0,0008333 / (0,62 \times \pi \times (0,0127 \text{ m})^2 / 4))^2}{2 \times 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 5,74 \text{ m Orificio}$$

Calculando el total de las pérdidas de energía:

$$H_L = H_{LF} + H_{FF}$$

$$H_L = 0,87 \text{ m} + 3,95 \text{ m} + 2,34 \text{ m} + 5,74 \text{ m}$$

$$H_L = 12,9 \text{ m}$$

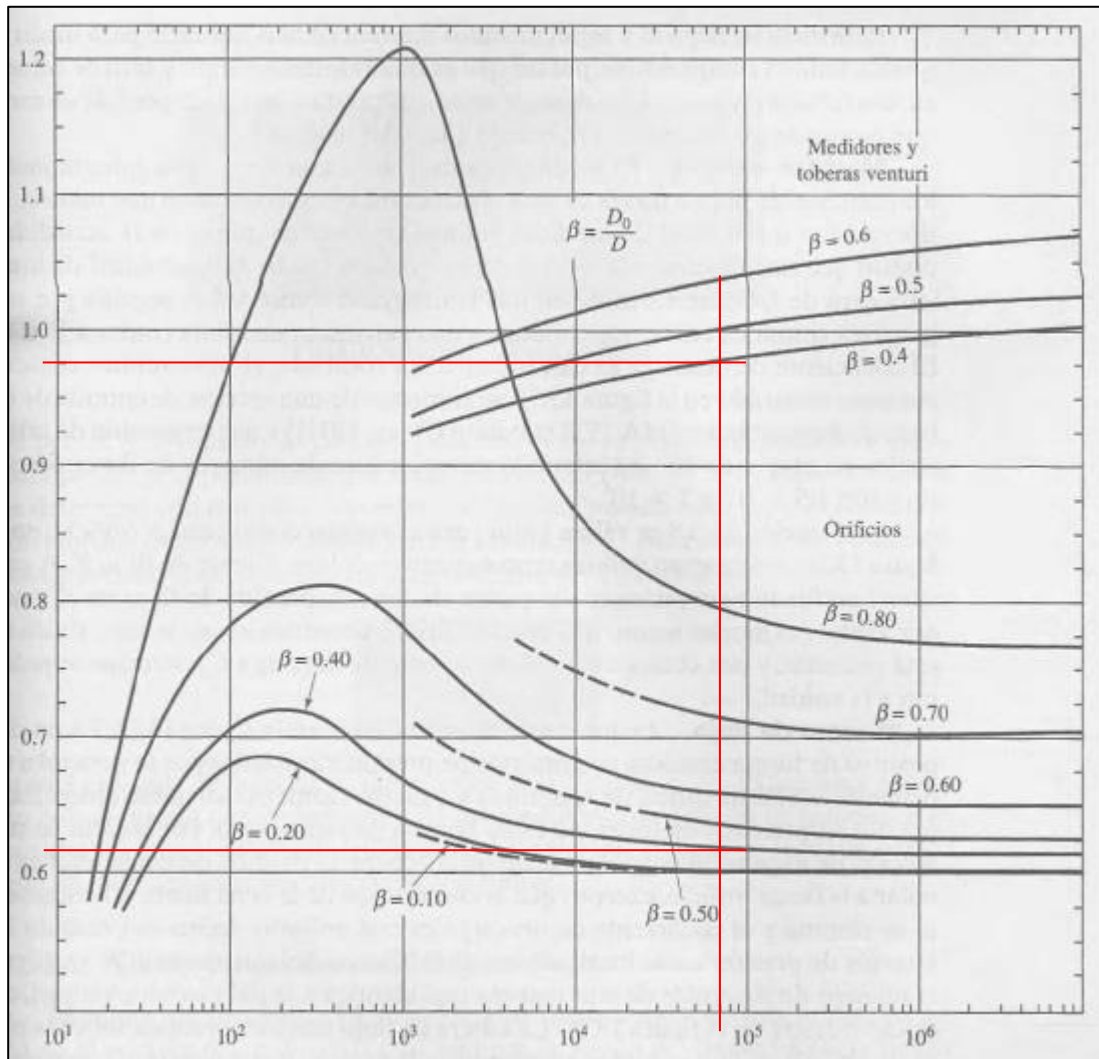
Calculando la carga dinámica total:

$$H_p = z_2 - z_1 + H_L + \frac{p_2 - p_1}{\gamma}$$

$$H_p = 1,38 \text{ m} + 12,9 + 4,93 \text{ m}$$

$$H_p = 19,21 \text{ m}$$

Figura 69. **Determinación de los coeficientes de descarga del medidor de orificio y de Venturi**



Fuente: POTTER, Merle C. y WIGGERT, David C. *Mecánica de Fluidos*. p. 593.

3.1.2.2. Determinación de la potencia necesaria para la bomba

Para determinar la potencia requerida de una bomba se utiliza el concepto de potencia al freno de una bomba la cual se puede calcular con la ecuación 256:

$$P_F = H_P \times \dot{V} \times \gamma \quad \text{Ec. 256}$$

Donde:

H_P : potencia al freno de la bomba.

\dot{V} : Flujo volumétrico.

γ : peso específico del fluido.

Calculando la potencia al freno de la bomba:

$$P_F = (19,21 \text{ m}) \left(0,0008333 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right) \left(9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times 997,13 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)$$

$$P_F = 156,58 \text{ Watt}$$

Se consultó con varios proveedores y la bomba que más se adecuaba al trabajo es una bomba de $\frac{3}{4}$ Hp centrífuga marca Trupper. Para seleccionar la bomba se utilizó la figura 90 que corresponde a la curva característica.

3.1.3. Selección de materiales

En esta sección se explicarán a detalle los criterios técnicos para la selección de los materiales de construcción del equipo de medidores de flujos.

3.1.3.1. Tipo de tubería

Se evaluaron distintos tipos de materiales para la tubería del equipo para ello se utilizó una matriz donde se ponderan diversas propiedades de los materiales; resistencia a la temperatura, presión de trabajo, maleabilidad, entre otros; en una escala del 1 muy baja a 5 para muy alta. A continuación, se muestra la matriz de ponderación utilizada.

Cabe destacar que las propiedades mencionadas son las de mayor interés para el presente estudio.

En la figura 70 se muestra la matriz utilizada evaluación de tuberías, se determinó que el mejor material es el acero galvanizado.

Figura 70. **Matriz de evaluación de tuberías**

| Propiedades | Físicas | | | Químicas | | | Mecánicas | | | | | Tecnológicas | | | | Precio económico | Total |
|-------------------|---------------|-----------------------|-----------------|----------------------------|------------------|-------------|-----------|------------|------------|--------------------------|-------------------------|--------------|-------------|-------------|-------------------------|------------------|-------|
| Materiales | Transparencia | Conductividad térmica | Punto de fusión | Resistencia a la corrosión | No es inflamable | Reactividad | Dureza | Ductilidad | Fragilidad | Resistencia a la tensión | Resistencia a la fatiga | Soldabilidad | Fusibilidad | Colabilidad | Facilidad de mecanizado | | |
| 1. Tubería común | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Cobre | 1 | 4 | 3 | 1 | 5 | 1 | 2 | 3 | 3 | 3 | 4 | 3 | 3 | 4 | 4 | 3,9 | 47,9 |
| PVC | 1 | 2 | 2 | 4 | 2 | 4 | 1 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 | 3 | 2 | 1 | 5 | 35,0 |
| Vinilo | 5 | 2 | 1 | 3 | 1 | 3 | 1 | 5 | 5 | 4 | 5 | 1 | 2 | 2 | 1 | 5 | 46,0 |
| Acero negro | 1 | 3 | 5 | 1 | 5 | 1 | 5 | 1 | 3 | 3 | 3 | 5 | 5 | 4 | 5 | 4 | 54,0 |
| Acero galvanizado | 1 | 3 | 5 | 3 | 5 | 2 | 5 | 1 | 3 | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 | 5 | 3,9 | 55,9 |

Fuente: elaboración propia.

3.1.3.2. Accesorios utilizados

En esta sección se describirán los accesorios a utilizar para el ensamblaje de la tubería.

En la figura 71 se observa un codo a 90 grados, este accesorio sirve para cambiar la dirección de un flujo.

Figura 71. **Codo estándar acero galvanizado 90 grado rosca NPT**



Fuente: PROMART. *Catalogo*. www.promart.pe/codo-90%C2%B0-1--galvanizado/p.

Consulta: 17 de octubre de 2019.

La unión universal, es un accesorio designado para instalación de sistemas de tuberías. Por su singular forma y movimiento permite unir tramos en los que se hayan realizado cortes de segmento de tubería. Ya que, por el uso de coplas, enroscar una tubería de ambos lados es imposible. La unión universal a parte de dar giro contrario a los 2 segmentos de tubería situados a sus extremos, tendrá la posibilidad de una pequeña extensión para permitir el alcance de los puntos de unión lateral, sin embargo, con mano de obra especializada. En la figura 72 se muestra una unión universal de acero galvanizado.

Figura 72. **Unión universal acero galvanizado rosca hembra 1 pulgada NPT**



Fuente: NOVEX. *Catálogo*. <https://www.novex.com.gt/producto/12077/UNI%C3%93N-UNIVERSAL-GALVANIZADA-DE-1-PULGADA.html>. 21 de marzo de 2019.

Para realizar conexiones de dos tuberías se puede utilizar una copla, este es un accesorio que cuenta con dos roscas hembra en sus extremos, como se puede observar en la figura 73.

Figura 73. **Copla acero galvanizado 1 pulgada rosca hembra NPT**



Fuente: MEGACENTER. *Catálogo*. www.megacenter.cl/COPLA-Galvanizada-A-197-Clase-150-NPT. Consulta: 17 de octubre de 2019.

Un reductor concéntrico se utiliza cuando es necesario disminuir el flujo volumétrico para derivaciones, o en ocasiones especiales donde se requiere cambiar el diámetro de la tubería. Este accesorio cuenta con dos roscas hembras en sus extremos como se aprecia en la figura 74.

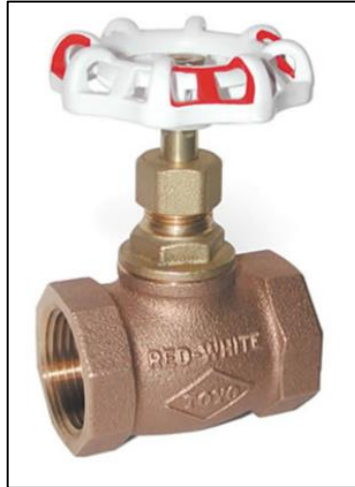
Figura 74. **Reductor concéntrico tipo campana de acero galvanizado de $\frac{3}{4}$ a $\frac{1}{4}$ pulgada rosca hembra NPT**



Fuente: AMAZON. www.amazon.com/Jones-Stephens-Corp-reductor-acoplamiento/dp/B00I3PCDMW/ref=sr_1_18?__mk_es_US=%C3%85M%C3%85%C5%BD%C3%95%C3%91&crd=1TNVHSXQDL2LO&keywords=3%2F4+x+1%2F4+reducer&qid=1571369362&srefix=3%2F4+x+1%2F4%2Caps%2C388&sr=8-18. Consulta: 21 de marzo de 2019.

Una válvula de globo es un accesorio utilizado para regular caudal debido a la pérdida de presión que genera. Por su robustez y precisión su valor suele ser elevado en comparación con las válvulas de paso y compuerta. En la figura 75 se muestra una válvula de globo tipo bronce.

Figura 75. **Válvula de globo de 1 pulgada rosca hembra NPT de bronce**



Fuente: M. SIERRA FERRETEROS. *Catalogo*. msierraferreteros.com/producto/valvula-de-globo-bronce-2/. Consulta: 15 de febrero de 2019.

Una válvula de bola como la mostrada en la figura 76 tiene una cavidad interna esférica que alberga un obturador en forma de bola o esfera.

Figura 76. **Válvula PVC de bola 1 pulgada con rosca hembra NPT**



Fuente: MYERS. *Catalogo*. www.casamyers.com.mx/item/10200240 Consulta: 17 de octubre de 2019.

La bola tiene un corte adecuado que fija la curva característica de la válvula, y gira transversalmente. El cierre estanco se logra con un aro de teflón incorporado al cuerpo contra el cual asienta la bola cuando la válvula está cerrada. En posición de apertura total, la válvula equivale aproximadamente en tamaño a 75 % del tamaño de la tubería. La válvula de bola se emplea principalmente en control de caudal de fluidos negros, o bien en fluidos con gran porcentaje de sólidos en suspensión.

En la figura 77 se observa una copla de ¼ pulgada que se utilizó para colocar manómetros en diferentes puntos del equipo.

Figura 77. **Copla de ¼ pulgada de diámetro acero inoxidable AISI 304 rosca hembra NPT**



Fuente: SG INDUSTRIAS ELECTRIC. *Catalogo*. sgindustriaselectric.pe/product/imc-copla-con-rosca-union-con-rosca-npt/#&gid=1&pid=1. Consulta: 17 de octubre de 2019.

Cierta sección de equipo diseñado tiene un tramo de tubería de PVC, para realizar las conexiones adecuados se utilizaron codos como el mostrado en la figura 78.

Figura 78. **Codo PVC 90 ° de 1 pulgada sin rosca**



Fuente: HOMECENTER. www.homecenter.com.co/homecenter-co/product/04755/codo-90-x-1-presion. *Catalogo*. Consulta: 8 de octubre de 2018.

Para realizar uniones roscadas en tuberías de PVC se utilizan adaptadores machos los cuales se instalan por medio de pegamento a los extremos de la tubería, existen dos tipos de adaptadores; el macho como el mostrado en la figura 59 y el hembra que se puede ver en la figura 80.

Figura 79. **Adaptador macho PVC de 1 pulgada rosca NPT**



Fuente: EPA. *Catalogo*. cr.epaenlinea.com/adaptador-macho-pvc-sch40-1.html. Consulta 17 de octubre de 2019.

Figura 80. **Adaptador hembra PVC de 1 pulgada rosca NPT**



Fuente: MATERIALES DE OCCIDENTE S.A.S. *Catálogo*. www.materialesdeoccidente.com/tienda/tuberia-accesorios-pvc-tubo/. Consulta: 17 de octubre de 2019.

Existen puntos muertos donde es necesario colocar un accesorio para cortar el paso del flujo. En la figura 81 se muestra un tapón hembra, este accesorio se utiliza en casos donde se desea interrumpir el flujo de manera permanente.

Figura 81. **Tapón hembra PVC de 1 pulgada sin rosca**



Fuente: FERRETERIA TOKIO. *Catálogo*. ferretokio.com/producto/tapon-hembra-pvc/. Consulta: 17 de octubre de 2019.

3.1.3.3. Manómetros y vacuómetros

En la medición de la presión en diversos sistemas se utilizaron manómetros como el de la figura 82, con las siguientes características:

- Rango: 0 a 60 psi
- Conexión: ¼ rosca NPT
- Diámetro de carátula: 2 pulgadas

Figura 82. Manómetro Bourdon



Fuente: GUATEMALA DIGITAL. *Catalogo.*

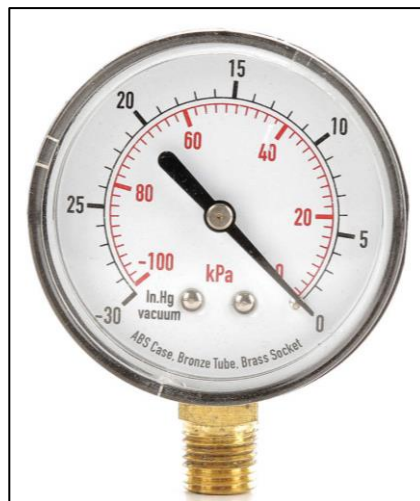
<https://guatemaladigital.com/Pressure+Gauge%2c+KKmoon+50mm+0~15psi+0~1bar+Pool+Filter+Water+Pressure+Dial+Hydraulic+Pressure+Gauge+Meter+Manometer+1%2f4%22+NPT+Thread/Product.aspx?CodigoP=B07QZDNBJ9>. Consulta: 20 de noviembre de 2018.

Para la sección de este instrumento se priorizo la sensibilidad del manómetro, como puede observarse en la figura anterior la sensibilidad es de 2 psi.

En el caso de la medición de presión de vacío en la línea de succión de la bomba centrífuga se seleccionó un vacuómetro que cumpliera con las siguientes características:

- Rango: 0 a 1 bar de vacío
- Conexión: ¼ NPT
- Tamaño de la caratula: 2 pulgadas
- Unidades de medida: psi, bar, pascales
- Posición de la carátula: Vertical

Figura 83. **Vacuómetro**



Fuente: GRAINGER MÉXICO. *Catalogo*. www.grainger.com.mx/producto/GRAINGER-APPROVED-Vacu%C3%B3metro%2C-1-4%22-MNPT%2C-Rango-Primario--30-a-0-pulg-Hg%2C-Relleno-de-L%C3%ADquido-No%2C-Material-de-la-Caja-PI%C3%A1stico/p/4FLV4.

Consulta: 17 de octubre de 2019.

3.1.3.4. Suministros eléctricos

A continuación, se detallan los suministros eléctricos que se utilizaron para la construcción del equipo de medidores de flujo. Para indicación se utilizaron luces piloto de como rojo y verde, ver figura 84.

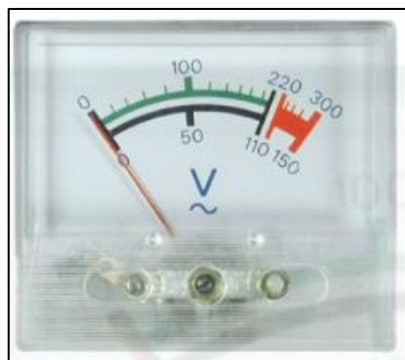
Figura 84. **Luces led piloto color rojo y verde de 110 V**



Fuente: ALIEXPRESS. *Catalogo.* es.aliexpress.com/item/32375227691.html. Consulta: 17 de octubre de 2019.

Para medir el voltaje se instaló un voltímetro como el de la figura 85.

Figura 85. **Medidor de voltaje análogo**



Fuente: KEMIK. *Catalogo.* <https://www.kemik.gt/comprar/medidor-de-voltaje-n-a-analogo/>. Consulta: 3 de agosto de 2018.

Para medir la corriente el equipo cuenta como un medidor de corriente alterna análogo similar al mostrado en la figura 86.

Figura 86. **Medidor de corriente alterna análogo**



Fuente: ELECTRÓNICA EMBAJADORES. *Catálogo*. www.electronicaembajadores.com/es/Productos/Detalle/IPAA775/instrumentos-de-panel/instrumentos-analogicos-amperímetros/instrumento-panel-amperímetro-analógico-70x60mm-5a-ca. Consulta: 17 de octubre de 2019.

Como medida de seguridad se instaló un botón de paro de emergencia, ver figura 87.

Figura 87. **Botón de paro de emergencia para panel**



Fuente: SOLOSTOCKS. *Catálogo*. www.solostocks.com.mx/venta-productos/otros-productos-equipamiento-electrico/boton-hongo-para-de-emergencia-de-medio-giro-3199756. Consulta: 17 de octubre de 2019.

El accionamiento del equipo se realiza con un interruptor de corriente para panel el cual se muestra en la figura 88.

Figura 88. **Interruptor metálico de palanca 10 amperios para panel**



Fuente: ELECTRÓNICA BF. *Catalogo*. www.electronicabf.com/interruptores-palanca/2202-interruptor-palanca-2p-spst-on-off-120v-3a.html. Consulta: 17 de octubre de 2019.

En la figura 89 se muestra la bomba centrífuga instalada en el equipo.

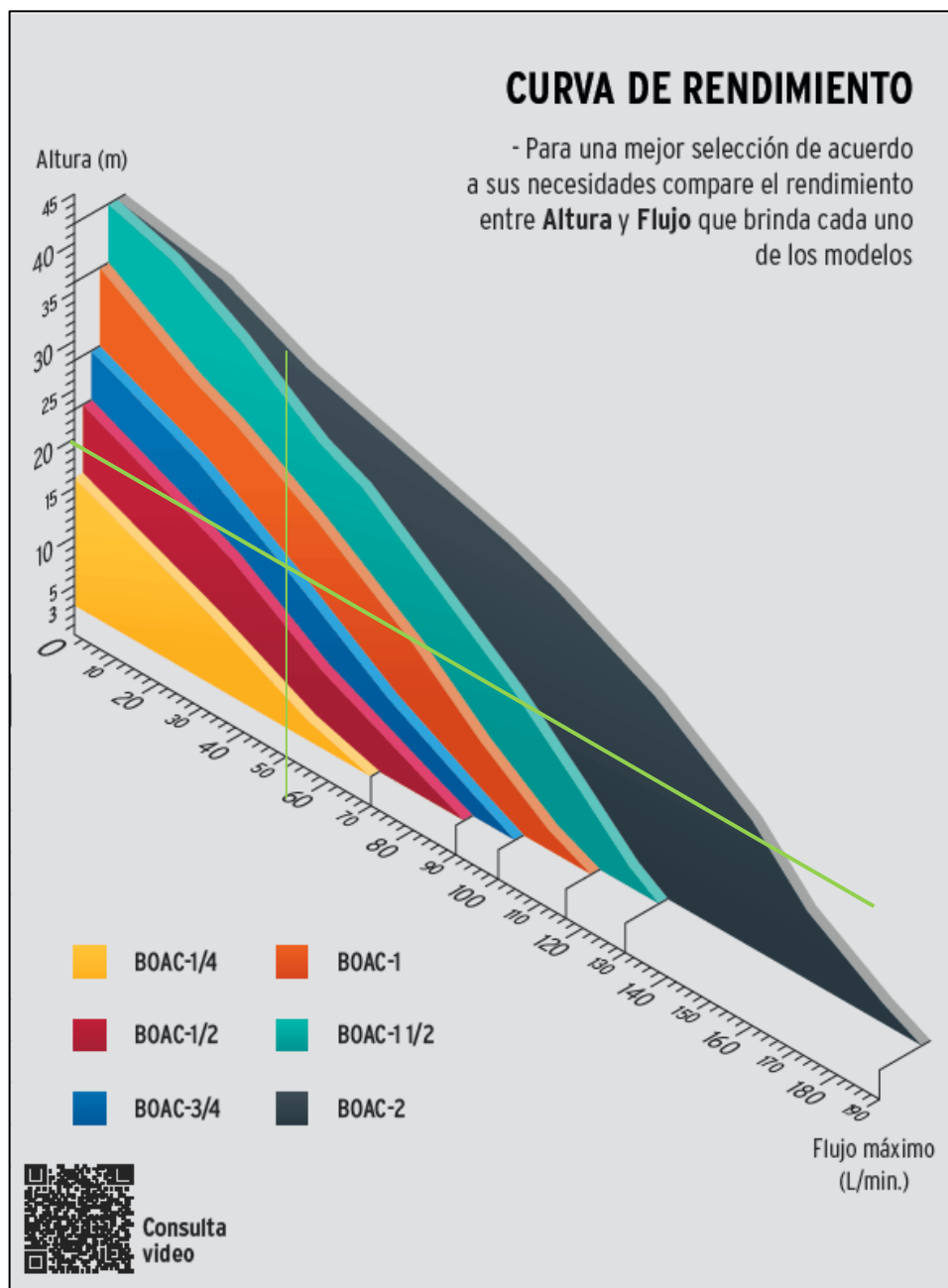
Figura 89. **Bomba centrífuga Truper $\frac{3}{4}$ HP**



Fuente: TRUPER. *Catalogo*. www.truper.com/catvigente/30.php. Consulta: 10 de enero de 2019.

La curva de característica de la bomba se puede observar en la figura 90.

Figura 90. **Curva de rendimiento de bomba centrífuga Truper de $\frac{3}{4}$ HP**



Fuente: TRUPER. *Catalogo*. www.truper.com/catvigente/30.php. Consulta: 1 de enero de 2019.

El panel de control del equipo se armó con un gabinete metálico Argos como el de la figura 91.

Figura 91. **Gabinete metálico con placa Argos 300 x 300 x 150 mm
Protección IP66**



Fuente: ARGOS ELÉCTRICA. *Catálogo*. www.argoselectrica.com/fichastecnicas/2015/ficha-tecnica-armarios-metalicos-argos.pdf. Consulta: 25 de diciembre de 2019.

3.1.3.5. Acero, perfiles y tubos para soporte

En esta sección se describen los materiales de construcción para el soporte del equipo de medidores de flujo.

El soporte principal del equipo de medidores de flujo se realizó con tubo estructural cuadrado de 2 pulgadas con espesor chapa 18. En la figura 92 se observa el detalle de este material.

Figura 92. **Tubo cuadrado chapa 18 de 2 pulgadas**



Fuente: VIDRI S.A. *Catalogo*. www.vidri.com.sv/Mobile/product?sku=42704 Consulta: 17 de octubre de 2019.

Figura 93. **Lámina lisa acero negro 1/8 pulgadas**



Fuente: NOVEX. *Catalogo*. <https://www.novex.com.gt/producto/55076/L%C3%81MINA-NEGRA-EN-FR%C3%8DO-4X8X1%7C32.html>. Consulta: 25 de septiembre de 2018.

3.1.3.6. Pinturas, adhesivos y recubrimientos

Las pinturas y recubrimientos son importantes para prevenir la corrosión en estructuras metálicas, debido a que el presente equipo se diseñó para trabajar a la intemperie, el recubrimiento utilizado es de grado industrial.

Se seleccionó pintura especial anticorrosiva de secado ultra rápido denominado Corrostop fondo anticorrosivo 9030.

CORROSTOP FONDO ANTICORROSIVO 9030 es un primario idóneo para recubrir estructuras o componentes mecánicos que están en armado y necesiten protección contra el óxido mientras permanezcan en proceso de taller.

Para sellar juntas en el tanque de almacenamiento de agua del equipo se utilizó un sellador de Poliuretano denominado Pourthane SL. Este es un sellador de poliuretano de primera calidad, elástico, de un solo componente, auto-nivelador, desarrollado especialmente para utilizarse como sellador multiuso de juntas horizontales en aplicaciones donde se requiere una alta resistencia a agentes químicos, combustibles, aceites e hidrocarburos.

El sellador Pourthane SL es un sellador de curado húmedo con excelentes propiedades adhesivas y resistencia al envejecimiento y el desgaste.

Para cerrar juntas metálicas en la estructura metálica se utilizó el Silicon blanco. Las características de este sellador son:

- Altamente flexible y duradera para un sellado impermeable
- Excelente adherencia
- La masilla curada es resistente al moho y al moho
- Fácil de aplicar y herramienta
- Pintable
- Fácil limpieza del agua
- Uso interior / exterior
- Supera la especificación ASTM C834

3.1.3.7. Empaques

En lo que respecta a materiales utilizados para sellar juntas, únicamente se necesitó de teflón en presentación de rollo, se utilizó en las juntas roscadas de la tubería.

Figura 94. **Cinta de teflón ¾ pulgada**



Fuente: TENAQUIP. *Catalogo*. www.tenaquip.com/product/la-co-industries-inc-teflon-thread-sealant-tape-044075-pa685 Consulta: 17 de octubre de 2019.

3.1.4. Planos mecánicos y modelo en 3D

Los planos mecánicos se elaboraron en el software de diseño SketchUp Pro 2016.

En la tabla XVIII se presentan la nomenclatura de los planos.

Tabla XVIII. **Codificación de componentes**

| Código | Descripción |
|----------|---|
| C1 | Codo 90 ° acero galvanizado tipo ligero rosca interna NPT D: 1 pulg |
| C2 | Codo 90 ° acero galvanizado tipo ligero rosca interna NPT D: 1 pulg |
| C3 | Codo 90 ° acero galvanizado tipo ligero rosca interna NPT D: 1 pulg |
| C4 | Codo 90 ° acero galvanizado tipo ligero rosca interna NPT D: 1 pulg |
| C5 | Codo 90 ° acero galvanizado tipo ligero rosca interna NPT D: 1 pulg |
| C6 | Codo 90 ° acero galvanizado tipo ligero rosca interna NPT D: 1 pulg |
| C7 | Codo 90 ° acero galvanizado tipo ligero rosca interna NPT D: 1 pulg |
| C8 | Codo 90 ° acero galvanizado tipo ligero rosca interna NPT D: 1 pulg |
| C9 | Codo 90 ° acero galvanizado tipo ligero rosca interna NPT D: 1 pulg |
| C10 | Codo 90 ° PVC sin rosca D: 1 pulg |
| C11 | Codo 90 ° PVC sin rosca D: 1 pulg |
| C12 | Codo 90 ° PVC sin rosca D: 1 pulg |
| ROT | Rotámetro |
| TURB | Medidor de turbina K24 |
| TB | Tablero eléctrico |
| RANURA | Medidor de flujo de ranura |
| ORIFICIO | Medidor de flujo de orificio |
| VENTURI | Medidor de flujo de Venturi |
| CANAL | Canal de agua |
| TQ | Depósito de almacenamiento de agua |
| UNION1 | Unión universal acero galvanizado rosca interna NPT D: 1 pulg |
| UNION2 | Unión universal acero galvanizado rosca interna NPT D: 1 pulg |
| UNION3 | Unión universal acero galvanizado rosca interna NPT D: 1 pulg |
| UNION4 | Unión universal acero galvanizado rosca interna NPT D: 1 pulg |
| UNION5 | Unión universal acero galvanizado rosca interna NPT D: 1 pulg |

Continuación de tabla XVIII.

| Código | Descripción |
|---------|---|
| UNION 6 | Unión universal acero galvanizado rosca interna NPT D: 1 pulg |
| BAST1 | Soporte de tubería, conformado por una estructura soldada de tubo cuadrado de 2 pulgadas chapa 20 de acero negro. |
| BAST2 | Soporte del canal, conformado por una estructura soldada de tubo cuadrado de 2 pulgadas chapa 20 de acero negro. |
| BAST3 | Soporte del vertedero, conformado por un conjunto de láminas de acero negro con perforaciones para atornillar los vertederos. |
| MAN1 | Medidor de presión manométrica de vacío o vacuómetro. |
| MAN2 | Manómetro de Bourdon con conexión de ¼ NPT rango de medición 0 a 200 psi. |
| MAN3 | Manómetro de Bourdon con conexión de ¼ NPT, rango de medición 0 a 60 psi. |
| MAN4 | Manómetro de Bourdon con conexión de ¼ NPT, rango de medición 0 a 60 psi. |
| MAN5 | Manómetro de Bourdon con conexión de ¼ NPT, rango de medición 0 a 60 psi. |
| MAN6 | Manómetro de Bourdon con conexión de ¼ NPT, rango de medición 0 a 60 psi. |
| B1 | Bomba centrífuga Truper ¾ HP. |
| EM PQ | Disipador de energía hidráulica (empaquetamiento de canicas) con estructura de acero plano de 1 ½ pulgadas. |
| VALV1 | Válvula de globo de bronce RED WHITE, D= 1 pulgada nominal. |
| VALV2 | Válvula de bola de PVC gris, D= 1 pulgada nominal. |
| UNION7 | Unión universal acero galvanizado rosca interna NPT D= 1 pulg |
| TUB1 | Niple de acero galvanizado, D= 1 pulg, rosca externa NPT. |

Continuación de tabla XVIII.

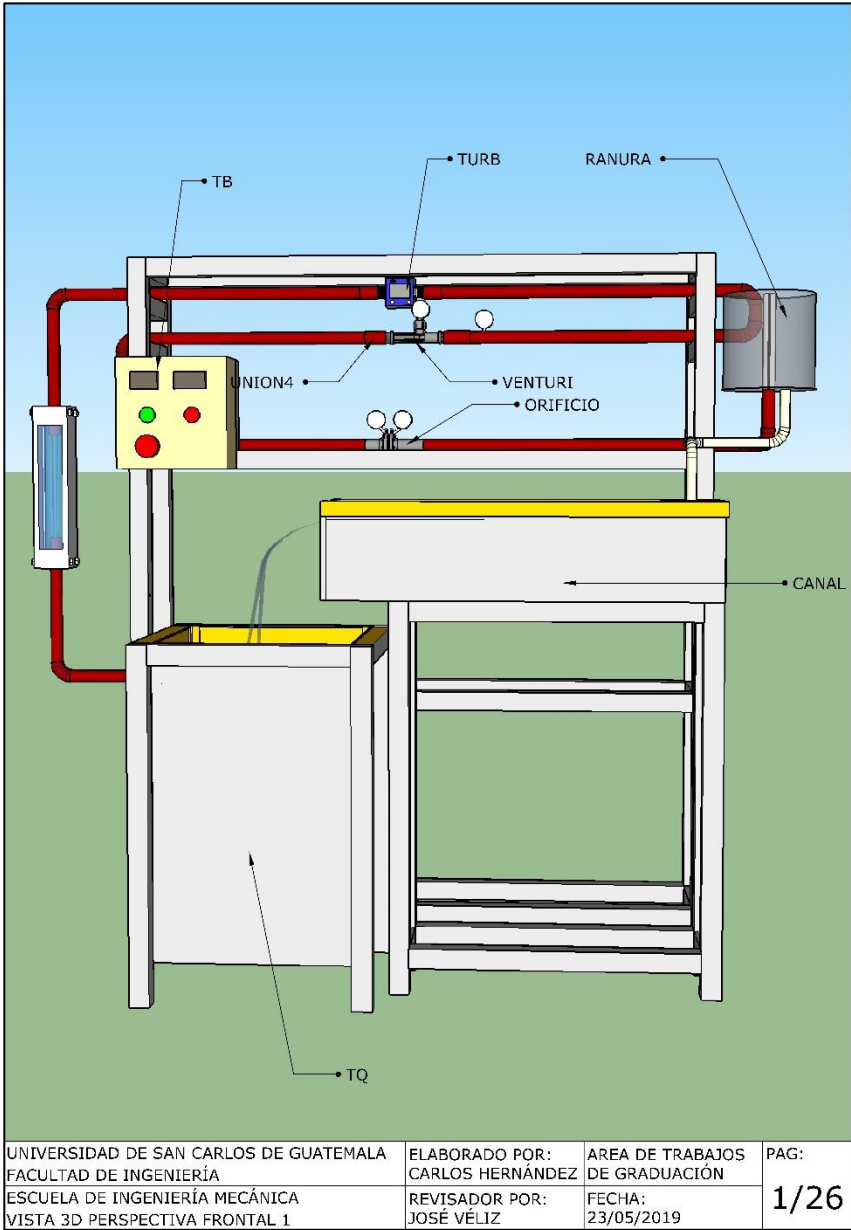
| Código | Descripción |
|--------|---|
| TUB2 | Niple de acero galvanizado, D= 1 pulg, rosca externa NPT. |
| TUB3 | Niple de acero galvanizado, D= 1 pulg, rosca externa NPT. |
| TUB4 | Niple de acero galvanizado, D= 1 pulg, rosca externa NPT. |
| TUB5 | Niple de acero galvanizado, D= 1 pulg, rosca externa NPT. |
| TUB6 | Niple de acero galvanizado, D= 1 pulg, rosca externa NPT. |
| TUB7 | Niple de acero galvanizado, D= 1 pulg, rosca externa NPT. |
| TUB8 | Niple de acero galvanizado, D= 1 pulg, rosca externa NPT. |
| TUB9 | Niple de acero galvanizado, D= 1 pulg, rosca externa NPT. |
| TUB10 | Niple de acero galvanizado, D= 1 pulg, rosca externa NPT. |
| TUB11 | Niple de acero galvanizado, D= 1 pulg, rosca externa NPT. |
| TUB12 | Niple de acero galvanizado, D= 1 pulg, rosca externa NPT. |
| TUB13 | Niple de acero galvanizado, D= 1 pulg, rosca externa NPT. |
| TUB14 | Niple de acero galvanizado, D= 1 pulg, rosca externa NPT. |
| TUB15 | Niple de acero galvanizado, D= 1 pulg, rosca externa NPT. |

Fuente: elaboración propia.

En las siguientes páginas a través de algunas figuras se observan los distintos planos mecánicos del equipo de medidores de flujo.

En la figura 95 se puede apreciar una imagen en 3D perspectiva del lado frontal del equipo de medidores de flujo que fue diseñado.

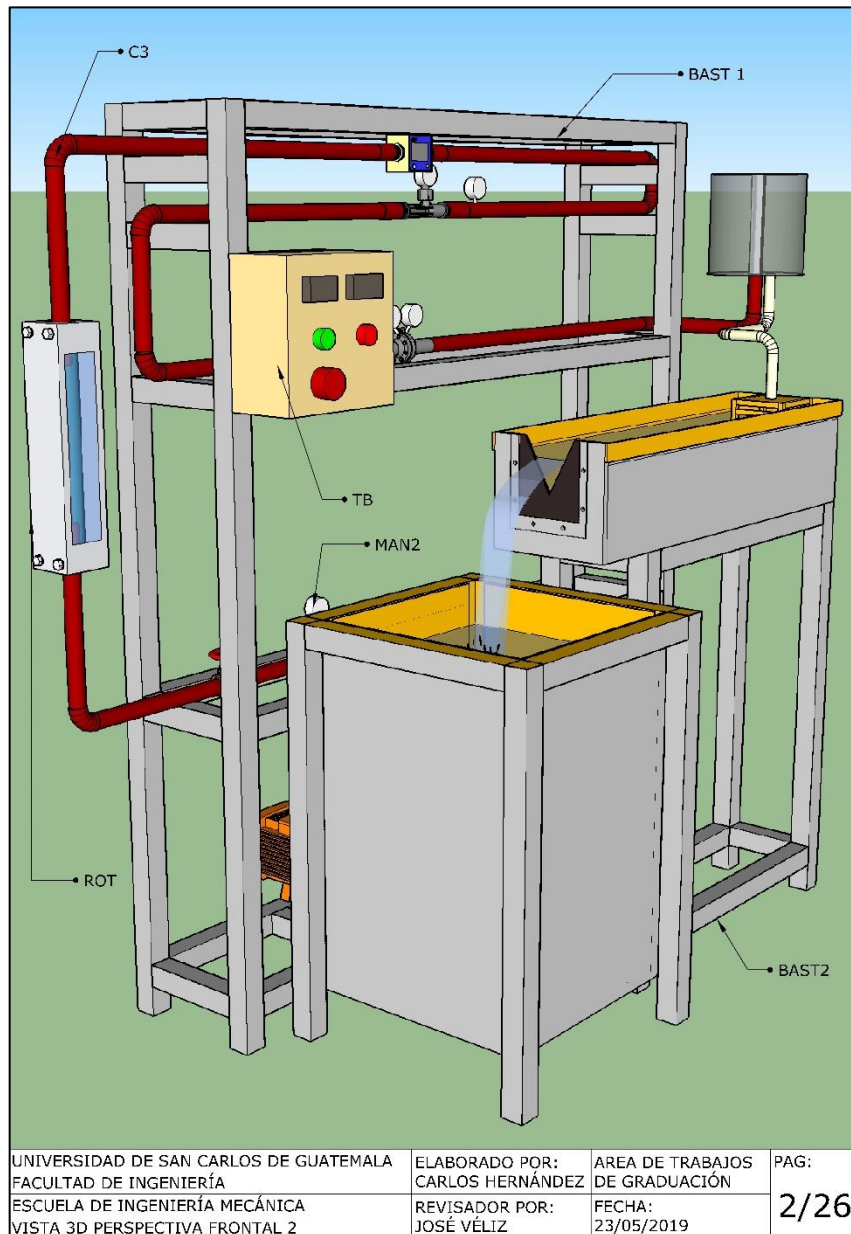
Figura 95. Vista 3D perspectiva frontal 1



Fuente: elaboración propia, empleando SketchUp Pro 2016 y LayOut 2016.

En la figura 96 se puede observar la vista frontal con un ángulo de inclinación más pronunciado, esto para observar detalles laterales.

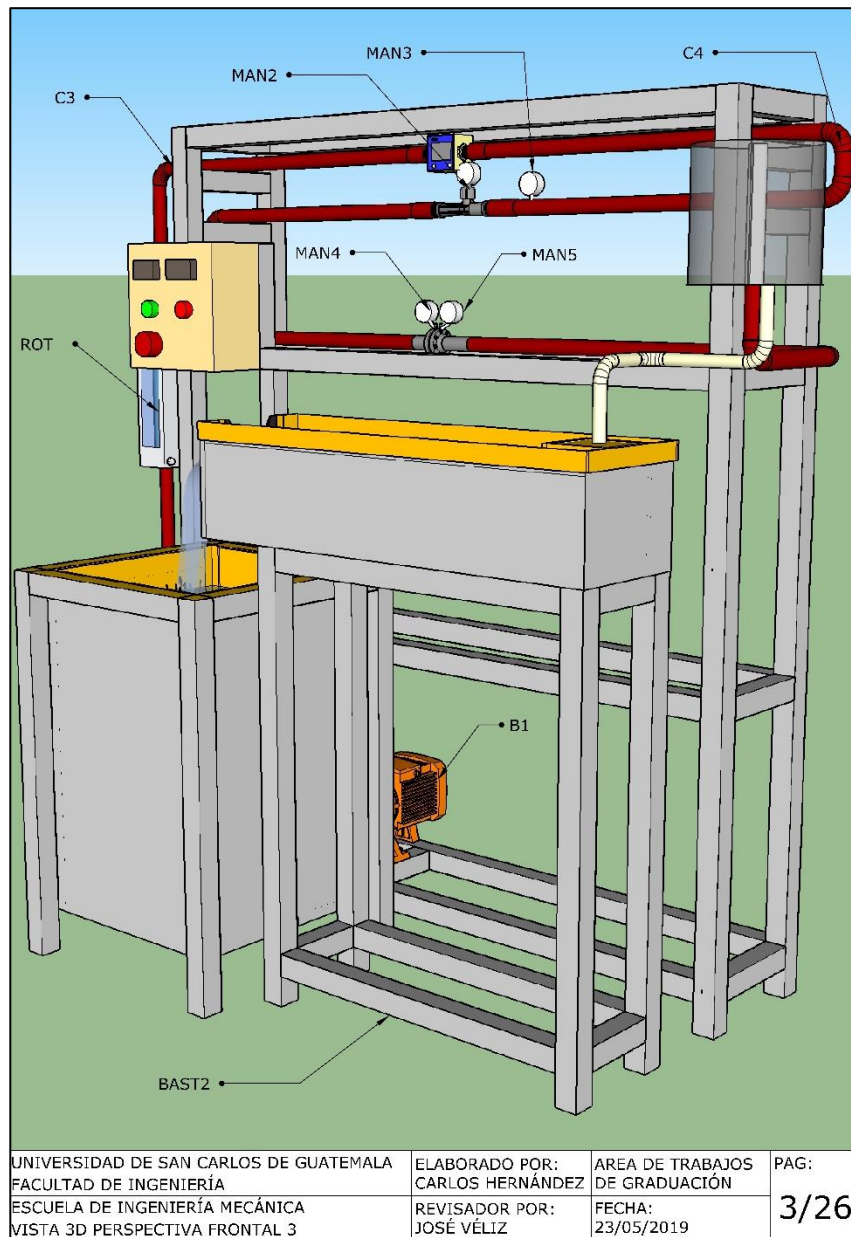
Figura 96. Vista 3D perspectiva frontal 2



Fuente: elaboración propia, empleando SketchUp Pro 2016 y LayOut 2016.

En la figura 97 se observa la vista perspectiva frontal.

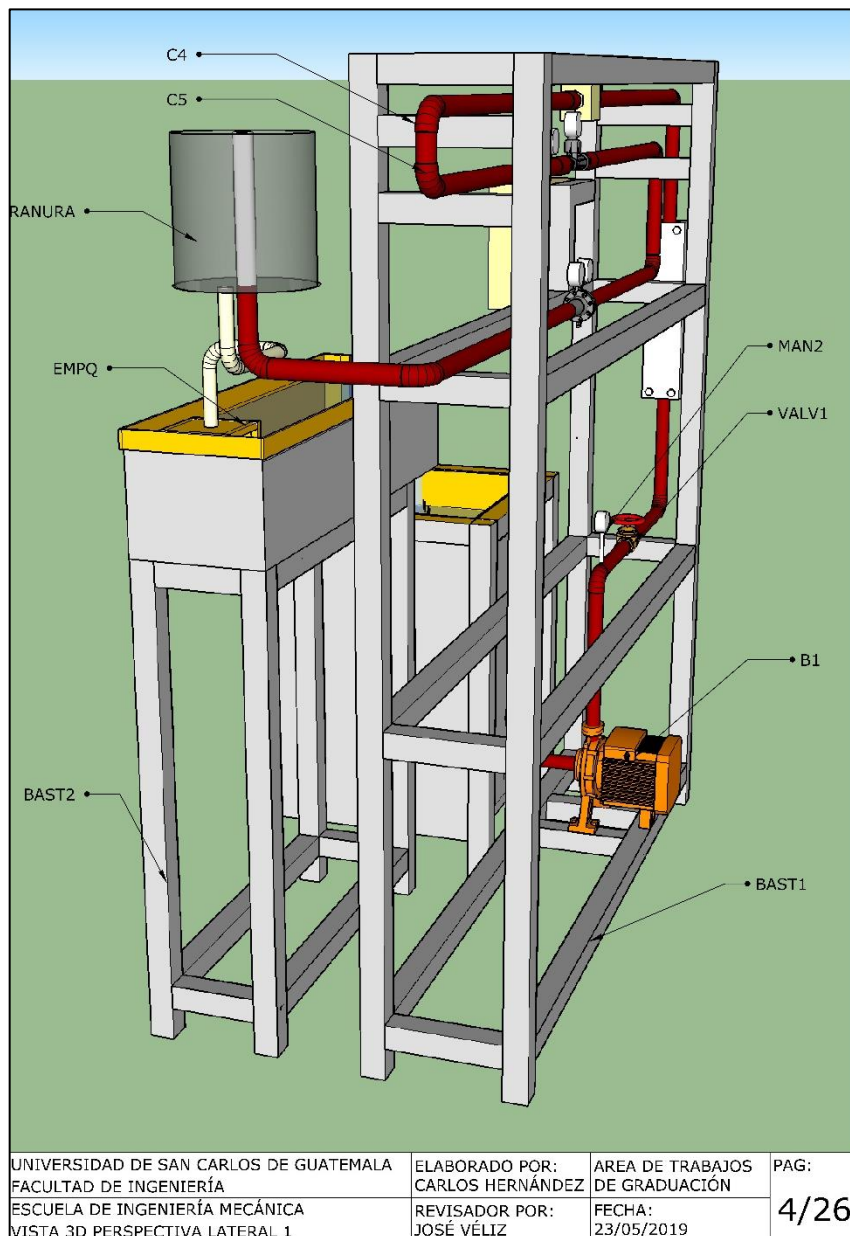
Figura 97. Vista 3D perspectiva frontal 3



Fuente: elaboración propia, empleando SketchUp Pro 2016 y LayOut 2016.

La figura 98 muestra el medidor de flujo de ranura y el lado lateral del equipo de medidores de flujo.

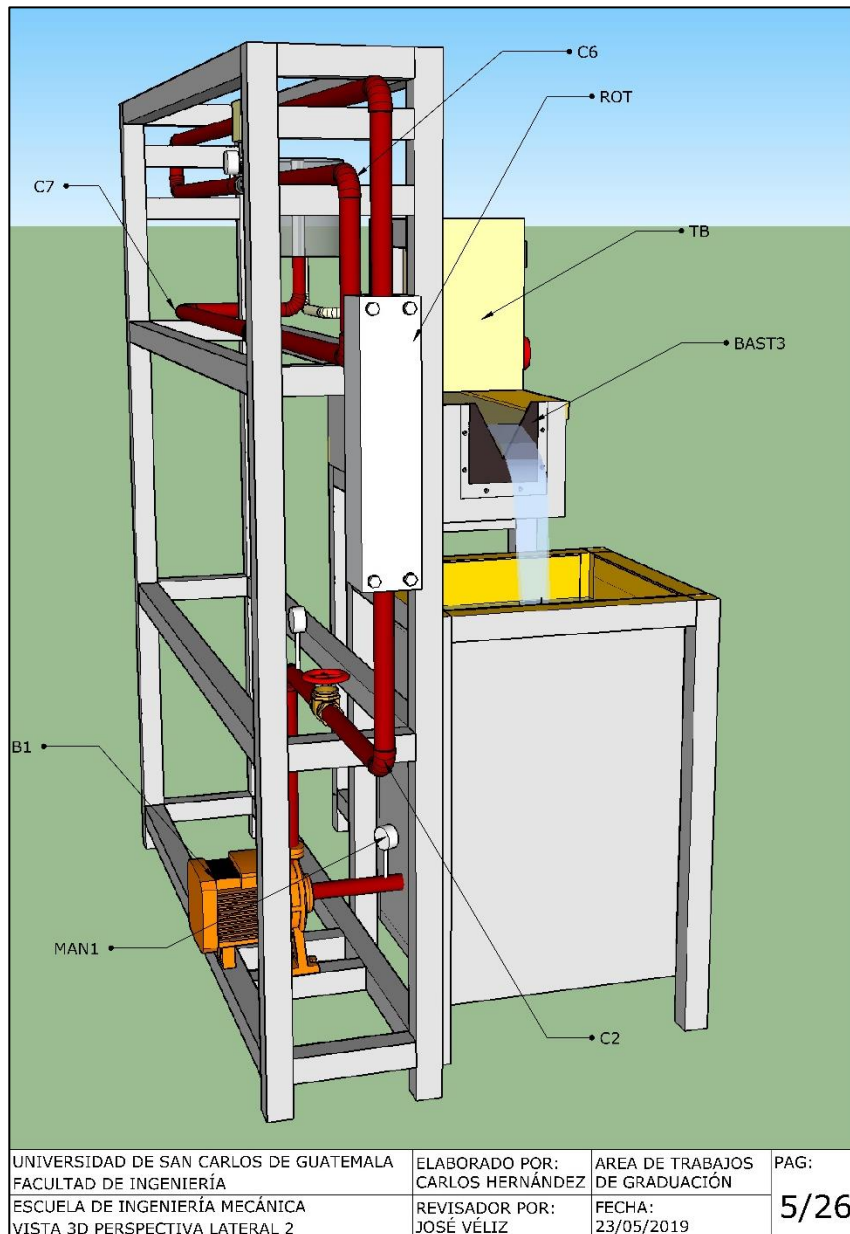
Figura 98. Vista 3D perspectiva lateral 1



Fuente: elaboración propia, empleando SketchUp Pro 2016 y LayOut 2016.

En la vista perspectiva lateral 2, ver figura 99, se observa la bomba B1, el vertedero y la tubería de descarga de la bomba.

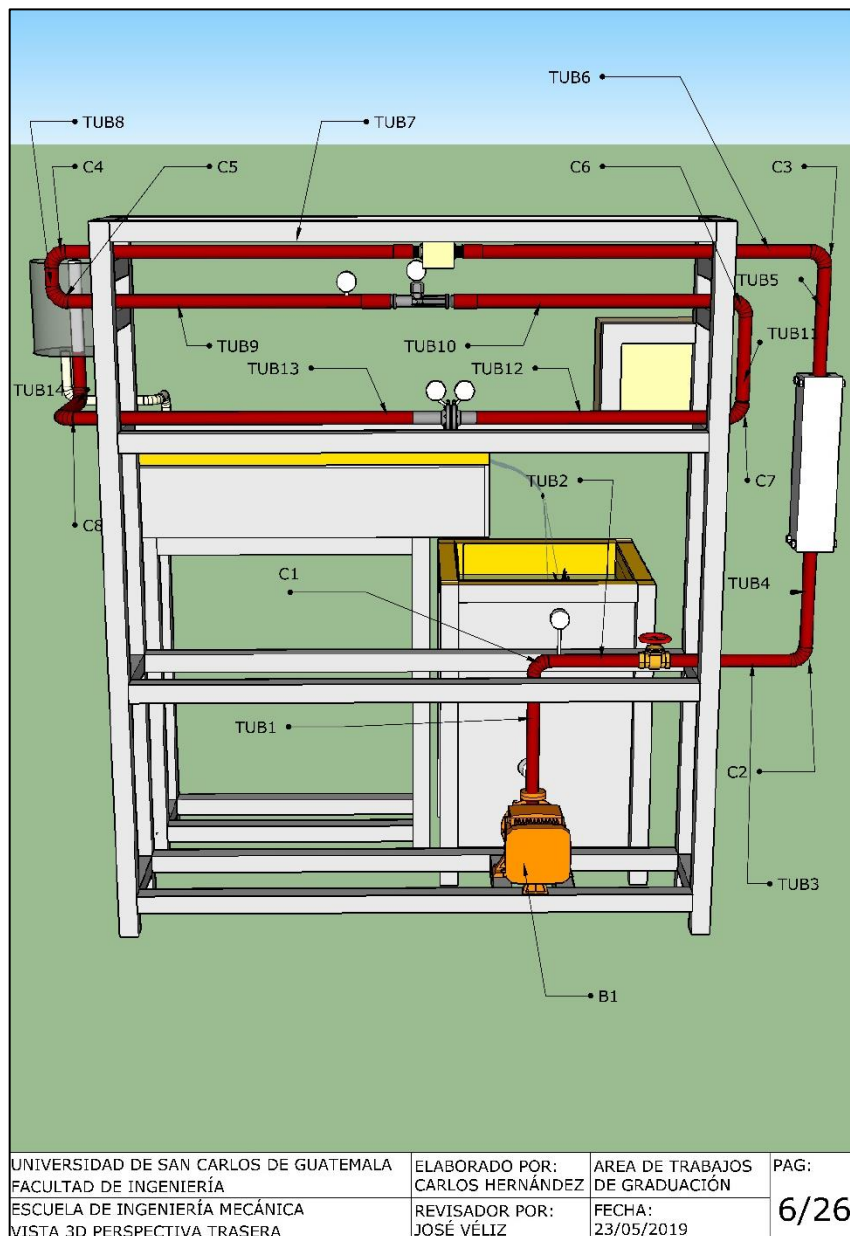
Figura 99. Vista 3D perspectiva lateral 2



Fuente: elaboración propia, empleando SketchUp Pro 2016 y LayOut 2016.

En la figura 100 se observa el equipo desde la parte trasera y el conjunto de medidores de flujo.

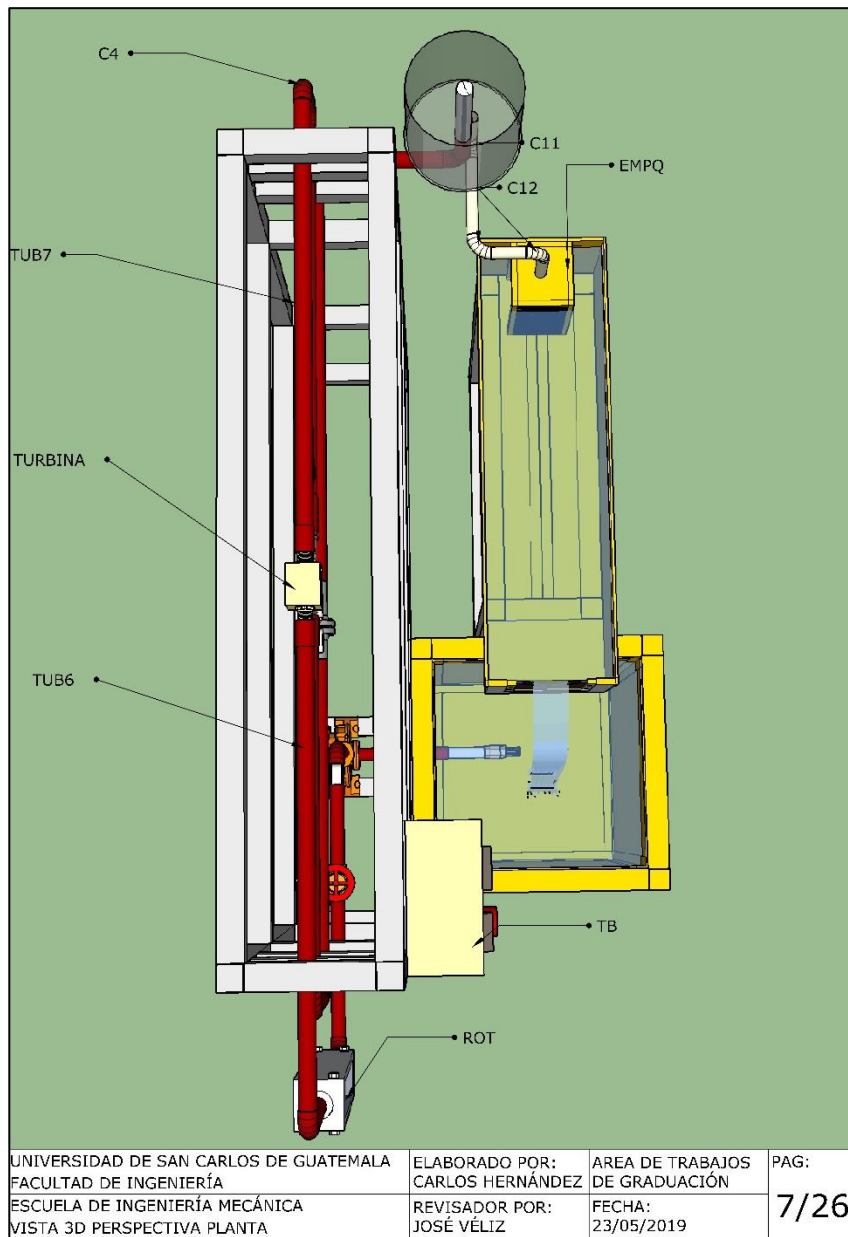
Figura 100. Vista 3D perspectiva trasera



Fuente: elaboración propia, empleando SketchUp Pro 2016 y LayOut 2016.

En la figura 101 se observa la vista 3D perspectiva de planta del equipo.

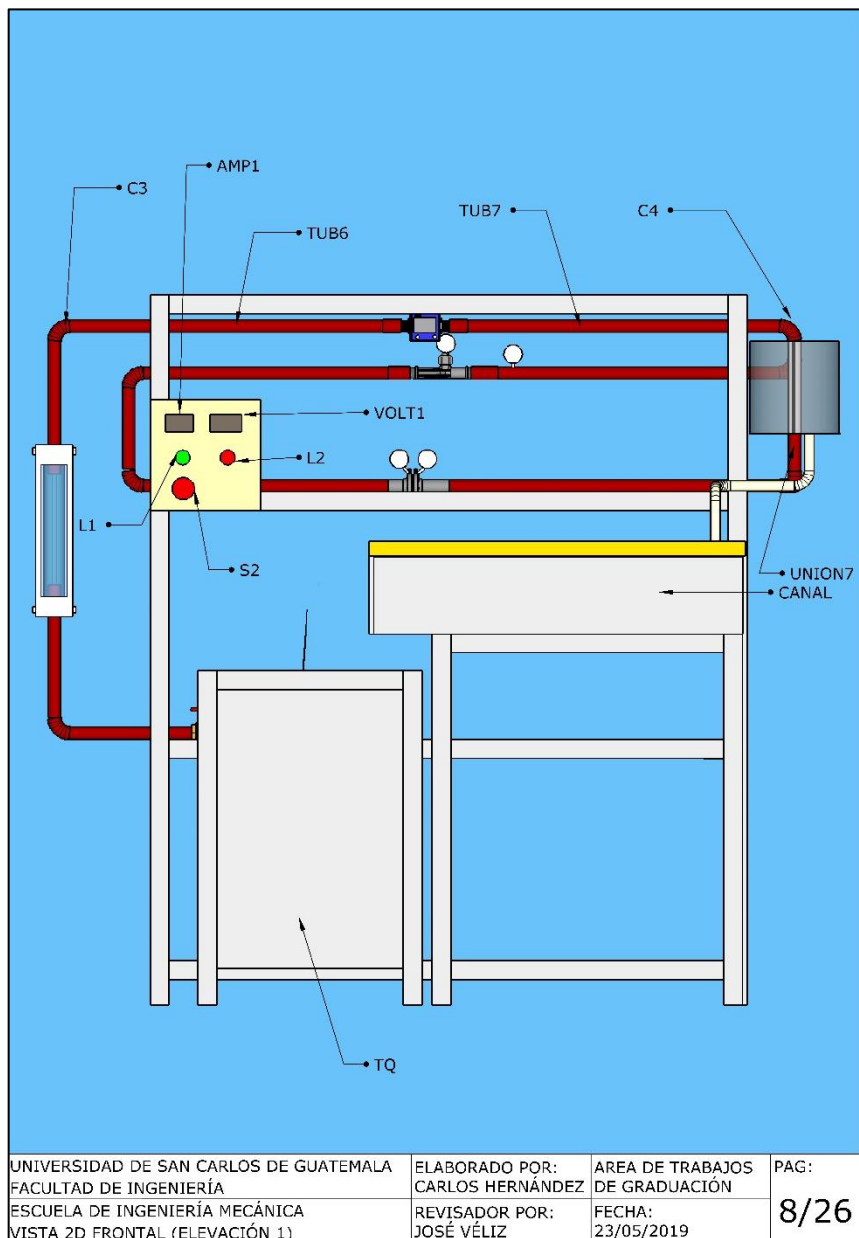
Figura 101. Vista 3D perspectiva planta



Fuente: elaboración propia, empleando SketchUp Pro 2016 y LayOut 2016.

En la figura 102 se aprecia la codificación de los botones y luces piloto del tablero eléctrico, la codificación de codos y tuberías.

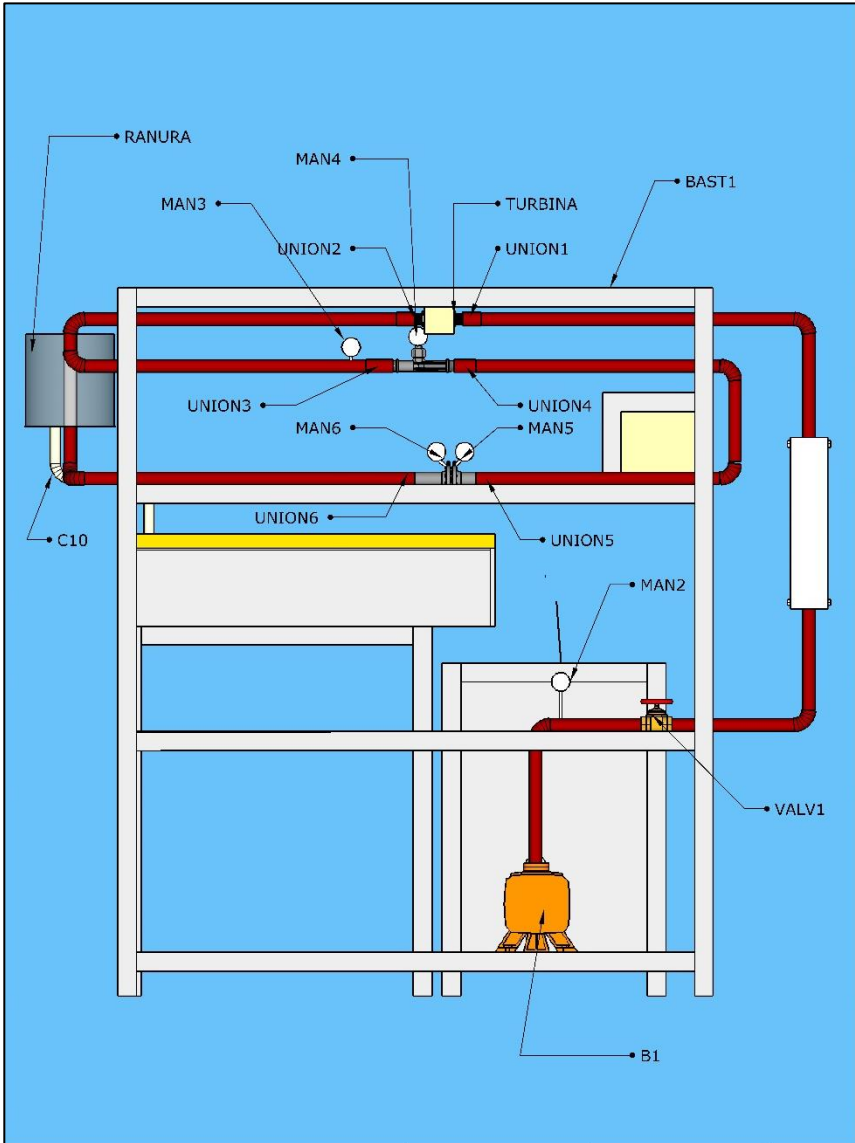
Figura 102. Vista 2D frontal (elevación 1)



Fuente: elaboración propia, empleando SketchUp Pro 2016 y LayOut 2016.

En la figura 103 se observa la parte trasera del equipo de medidores de flujo, se puede ver las uniones universales y manómetros del equipo.

Figura 103. Vista 2D trasera (elevación 2)

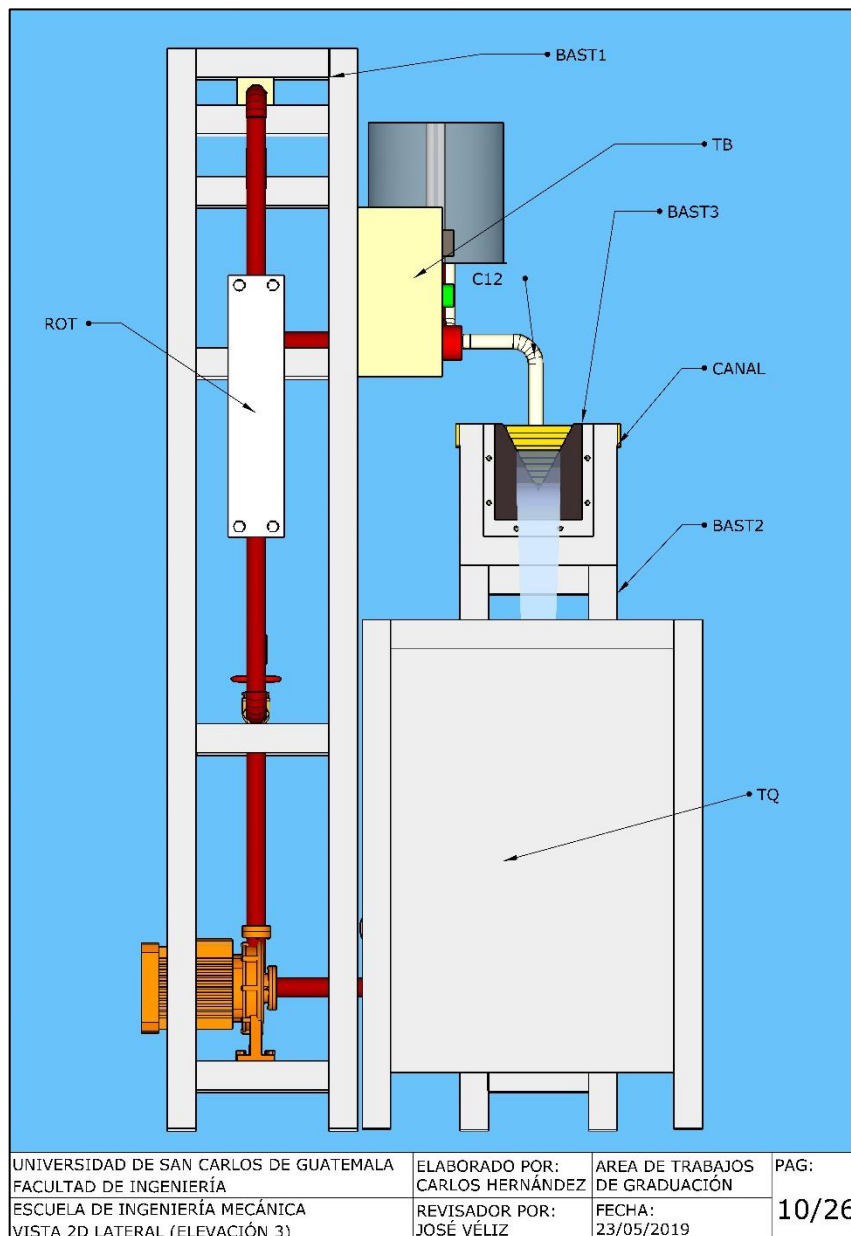


| | | | |
|--|------------------------------------|-----------------------------------|------|
| UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA | ELABORADO POR: CARLOS HERNÁNDEZ | AREA DE TRABAJOS DE GRADUACIÓN | PAG: |
| FACULTAD DE INGENIERÍA | REVISADOR POR: JOSÉ VÉLIZ | FECHA: 23/05/2019 | 9/26 |
| ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA | | | |
| VISTA 2D TRASERA (ELEVACIÓN 2) | | | |

Fuente: elaboración propia, empleando SketchUp Pro 2016 y LayOut 2016.

En la figura 104 se aprecia el tanque de almacenamiento de agua, el canal con el vertedero y los soportes.

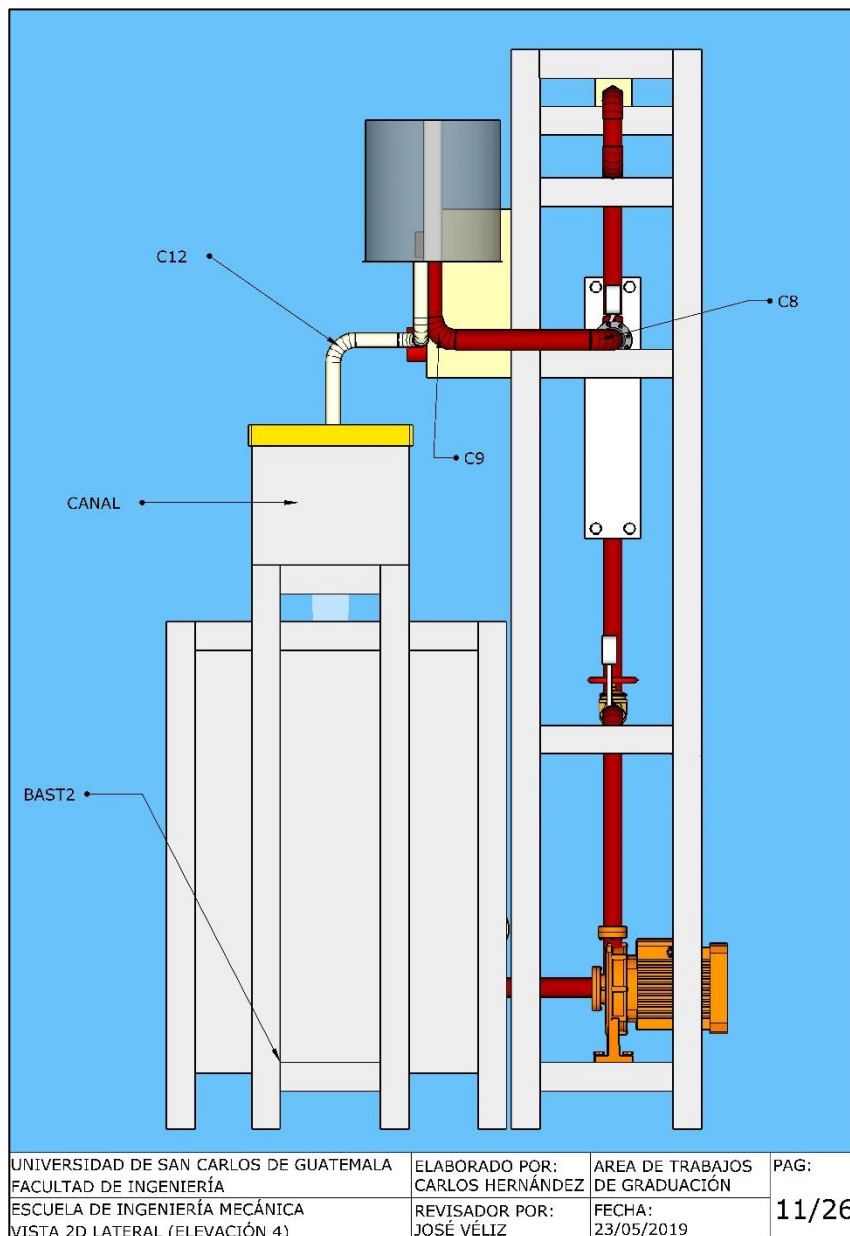
Figura 104. Vista 2D lateral (elevación 3)



Fuente: elaboración propia, empleando SketchUp Pro 2016 y LayOut 2016.

La figura 105 muestra la parte posterior del canal y los codos del medidor de ranura.

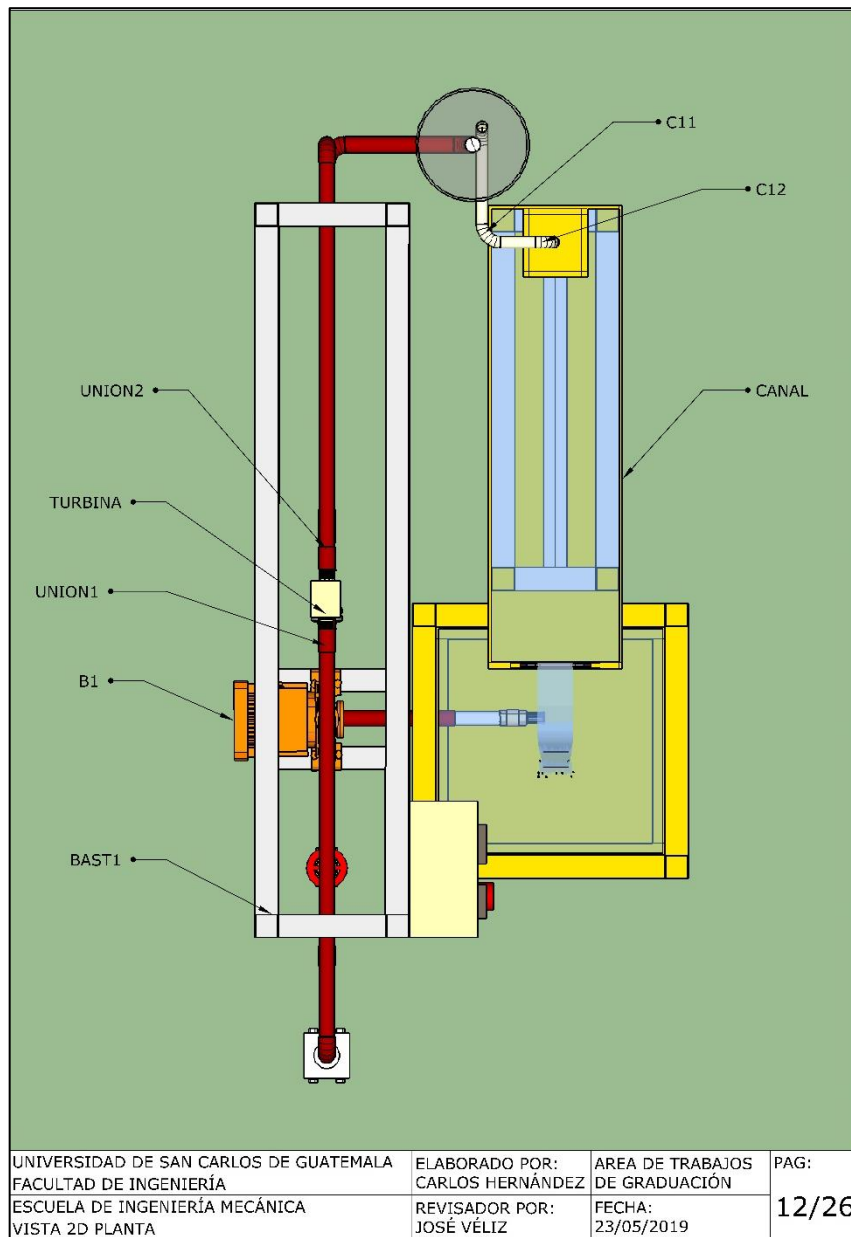
Figura 105. Vista 2D lateral (elevación 4)



Fuente: elaboración propia, empleando SketchUp Pro 2016 y LayOut 2016.

En la figura 106 se observa el plano en vista de planta del equipo.

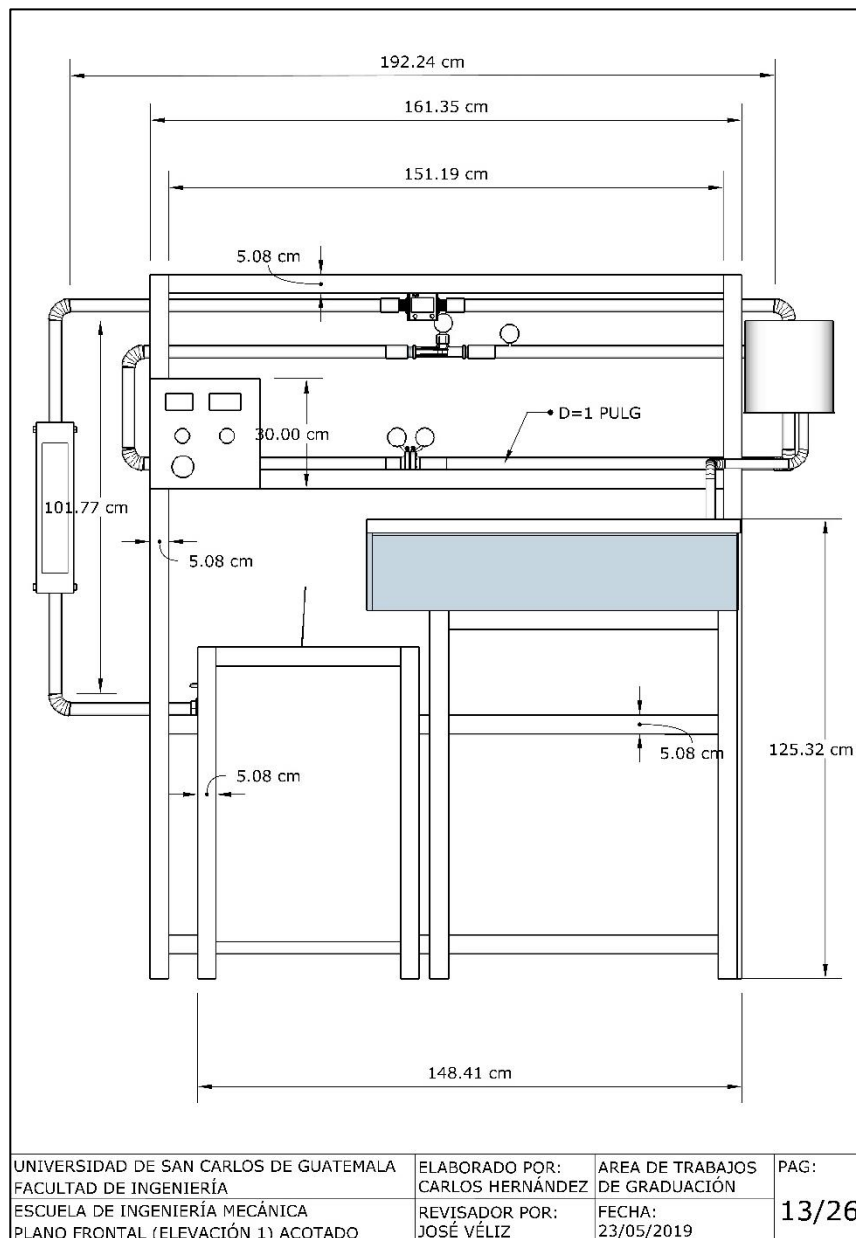
Figura 106. Vista 2D planta



Fuente: elaboración propia, empleando SketchUp Pro 2016 y LayOut 2016.

En la figura 107 se aprecia el plano acotado de elevación frontal, se presenta las dimensiones de la tubería y soportes.

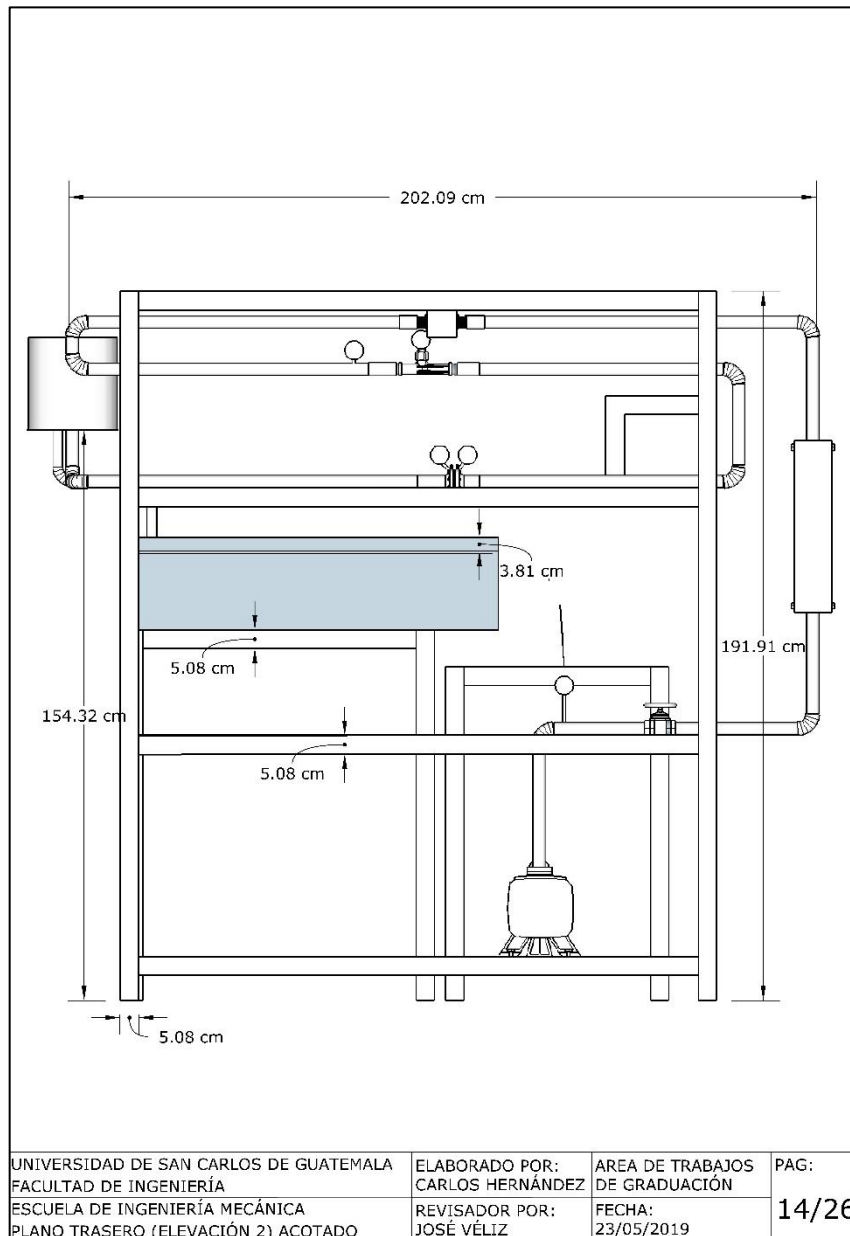
Figura 107. Plano frontal (elevación 1) acotado



Fuente: elaboración propia, empleando SketchUp Pro 2016 y LayOut 2016.

En la figura 108 se muestra el plano de elevación trasera acotado, se observa la altura del soporte principal y dimensiones de canal.

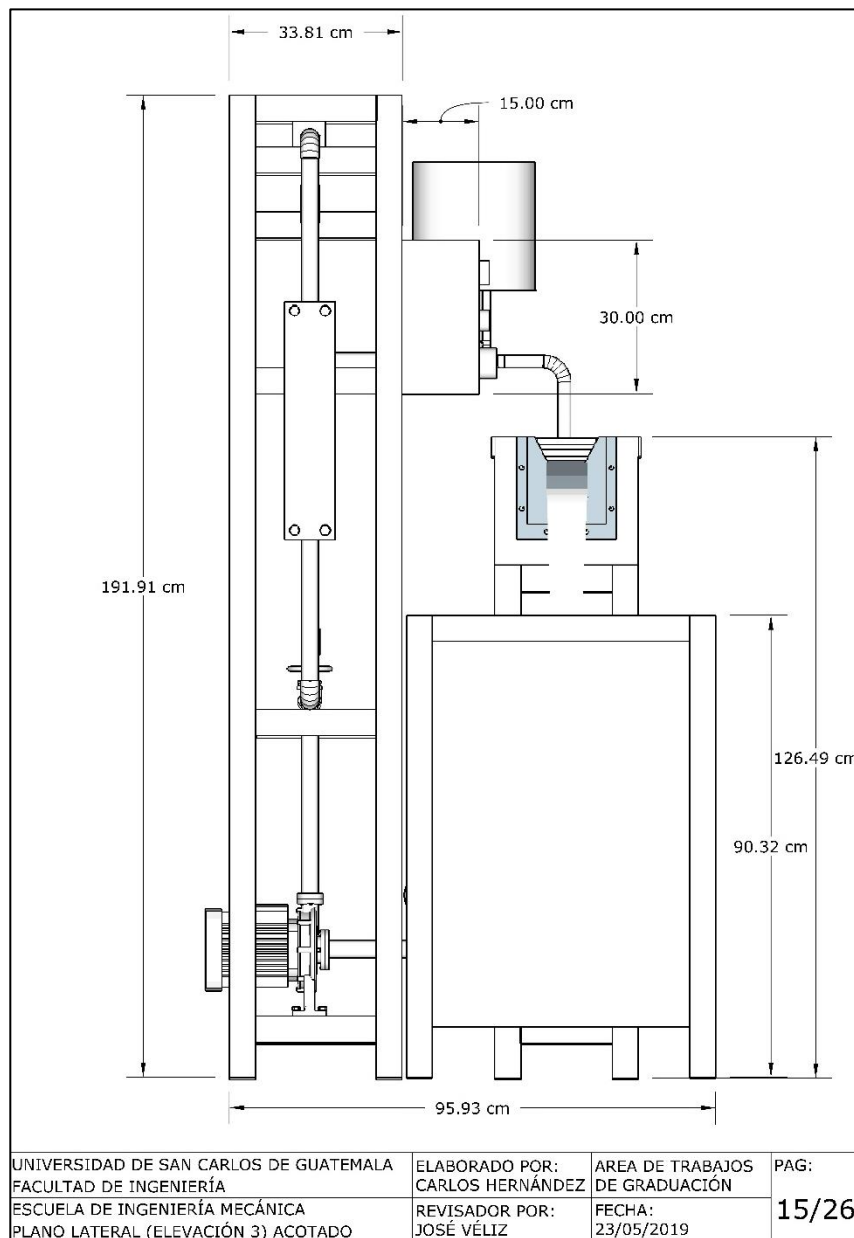
Figura 108. Plano trasero (elevación 2) acotado



Fuente: elaboración propia, empleando SketchUp Pro 2016 y LayOut 2016.

En la figura 109 se observan las dimensiones de tablero eléctrico, el alto, ancho y profundidad de los bastidores 1 y 2.

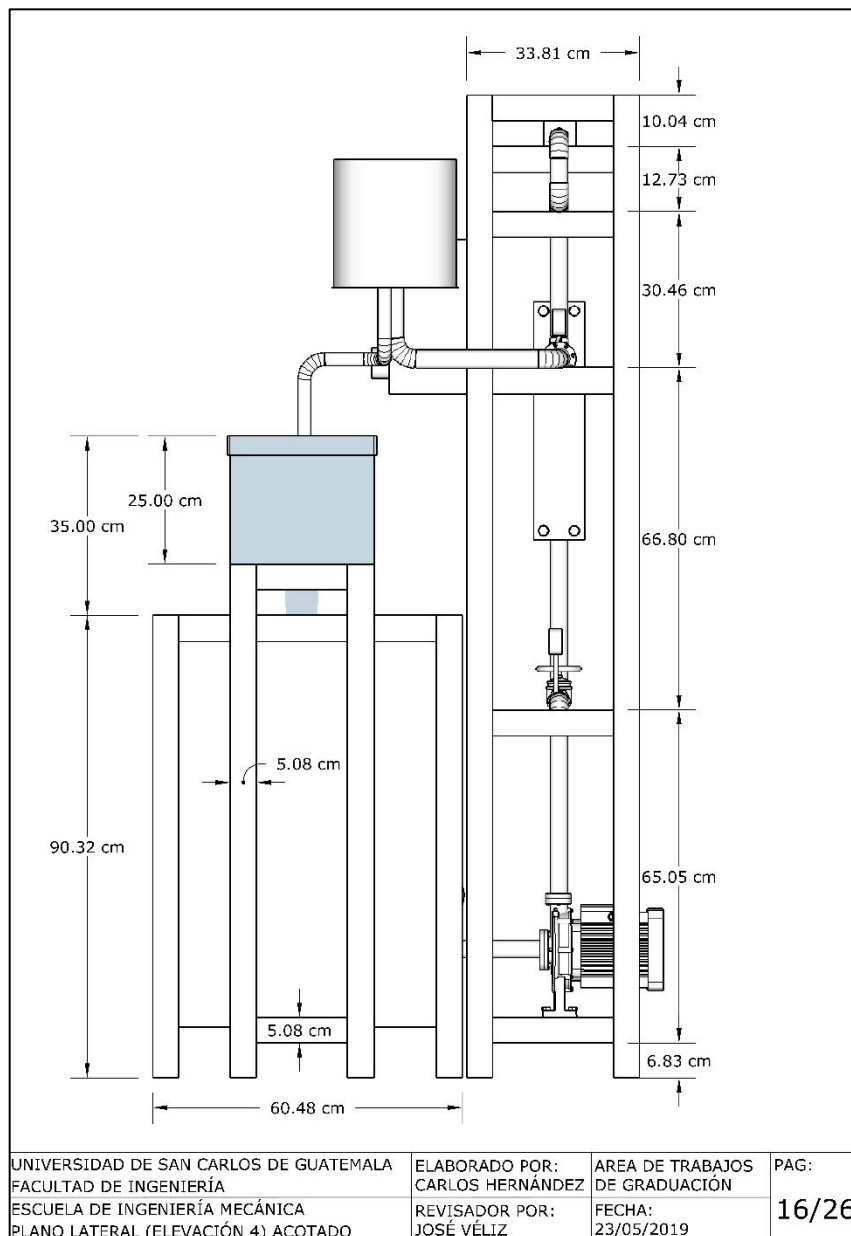
Figura 109. **Plano lateral (elevación 3) acotado**



Fuente: elaboración propia, empleando SketchUp Pro 2016 y LayOut 2016.

En la figura 110 se observan las dimensiones del canal y las distancias entre las vigas del bastidor 1.

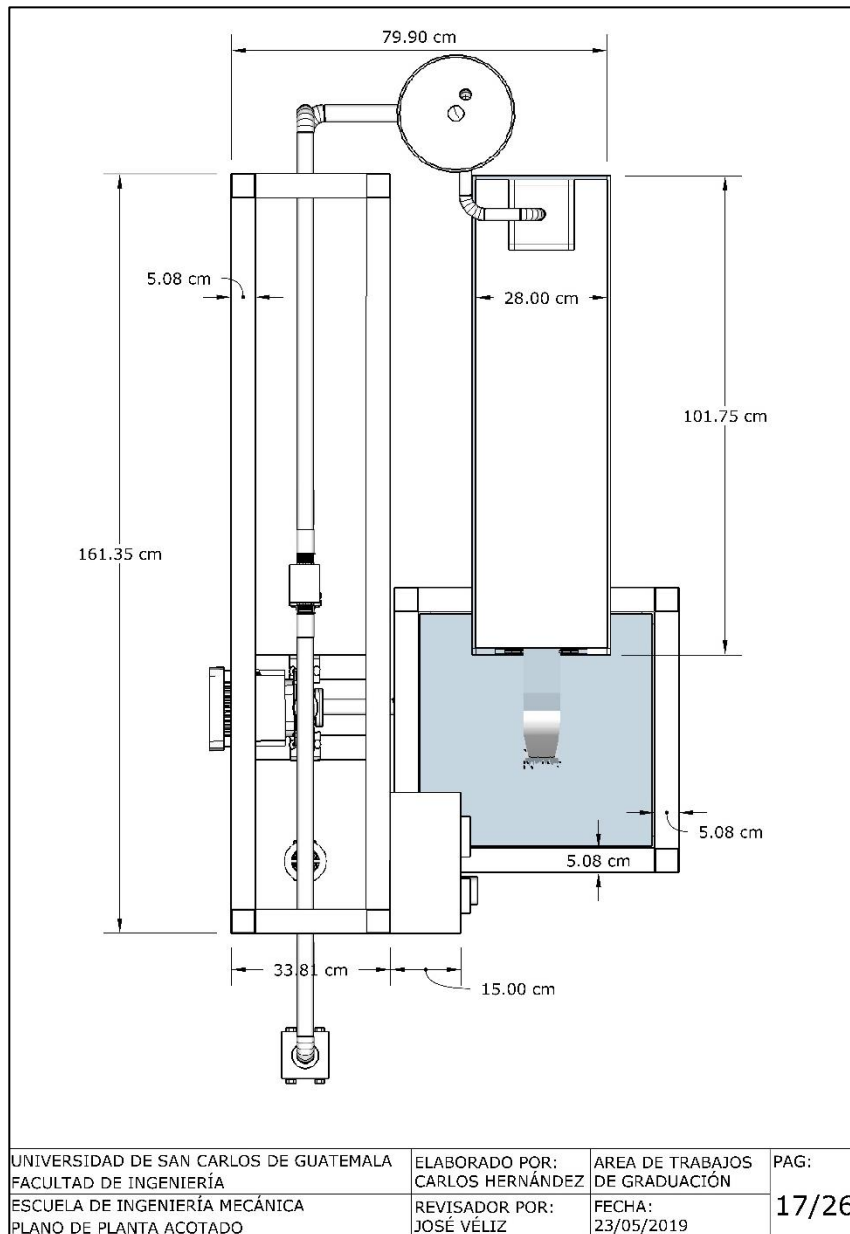
Figura 110. Plano lateral (elevación 4) acotado



Fuente: elaboración propia, empleando SketchUp Pro 2016 y LayOut 2016.

En la figura 111 se describe el largo del bastidor 1, del canal, la dimensión de la tubería del tanque de almacenamiento de agua.

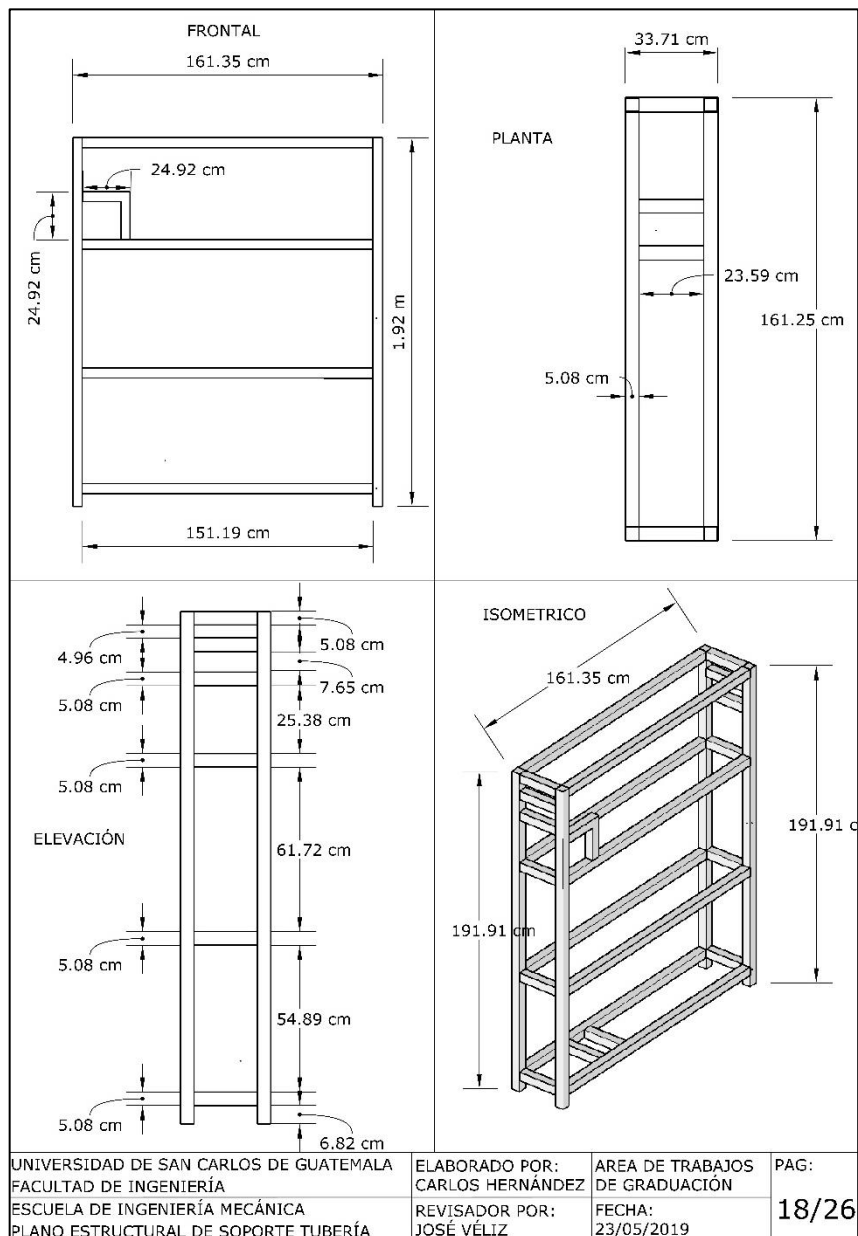
Figura 111. Plano de planta acotado



Fuente: elaboración propia, empleando SketchUp Pro 2016 y LayOut 2016.

En la figura 112 se observan los detalles de las dimensiones del soporte de tubería también llamado bastidor 1.

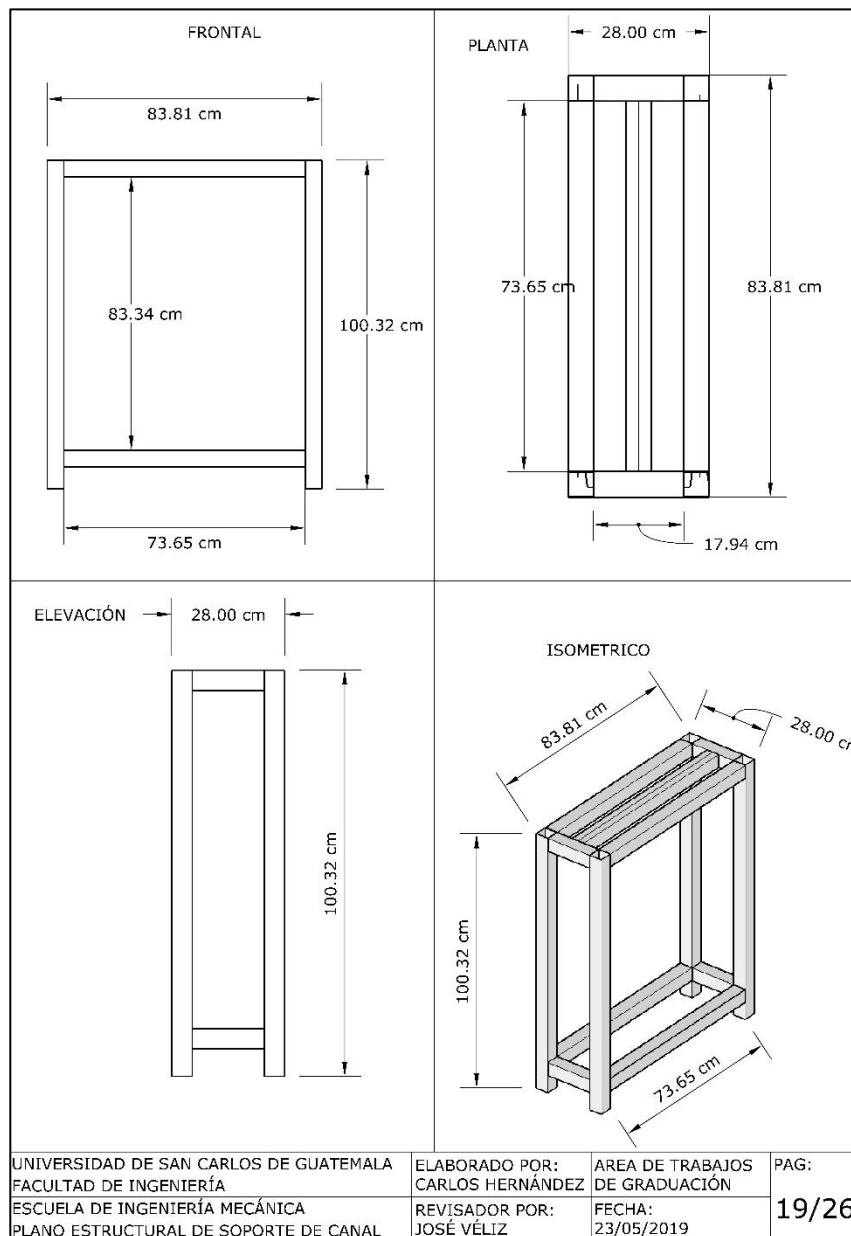
Figura 112. Plano estructural de soporte tubería



Fuente: elaboración propia, empleando SketchUp Pro 2016 y LayOut 2016.

En la figura 113 se especifican las dimensiones de soporte del canal construido con tubo estructural cuadrado de 2 pulgadas.

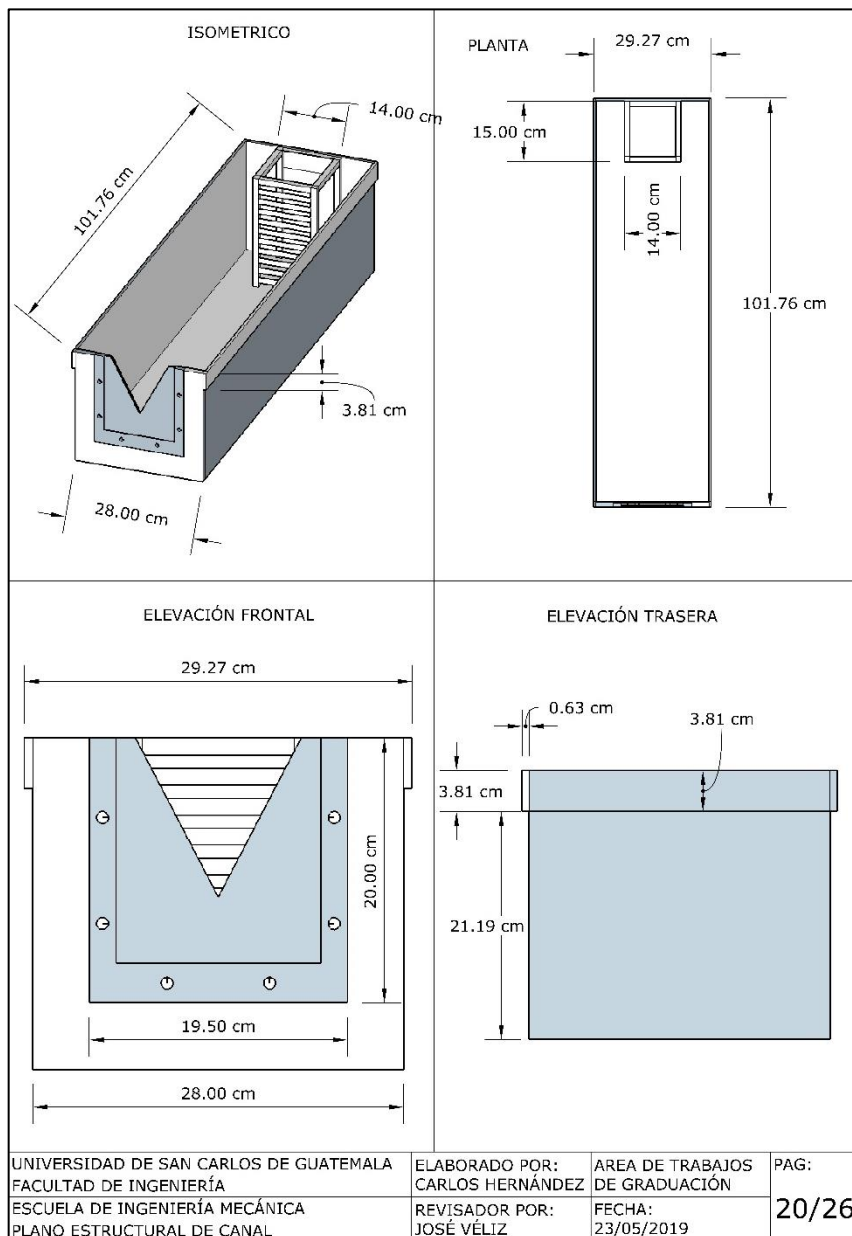
Figura 113. Plano estructural de soporte de canal



Fuente: elaboración propia, empleando SketchUp Pro 2016 y LayOut 2016.

En la figura 114 se observa las dimensiones del canal y el soporte del vertedero.

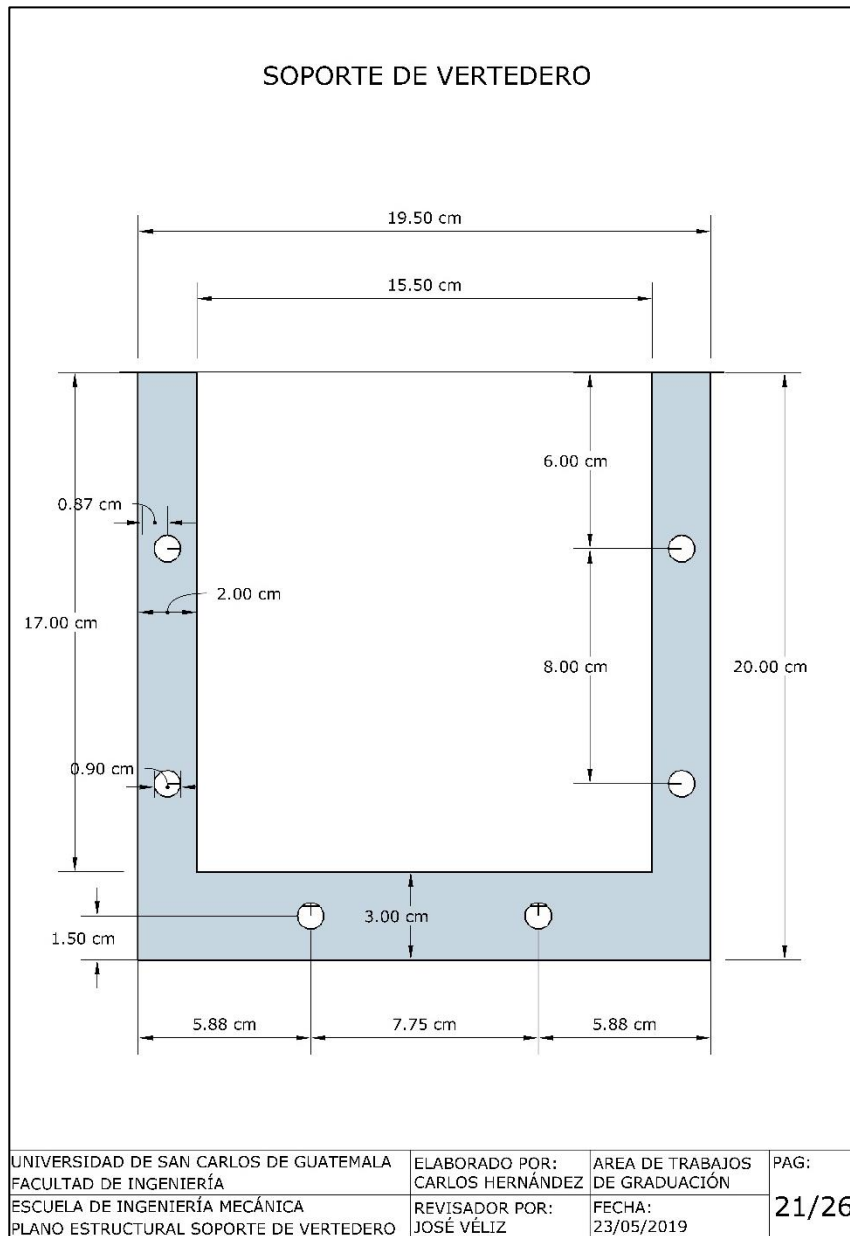
Figura 114. Plano estructural de canal



Fuente: elaboración propia, empleando SketchUp Pro 2016 y LayOut 2016.

La figura 115 describe las dimensiones de construcción del soporte del vertedero.

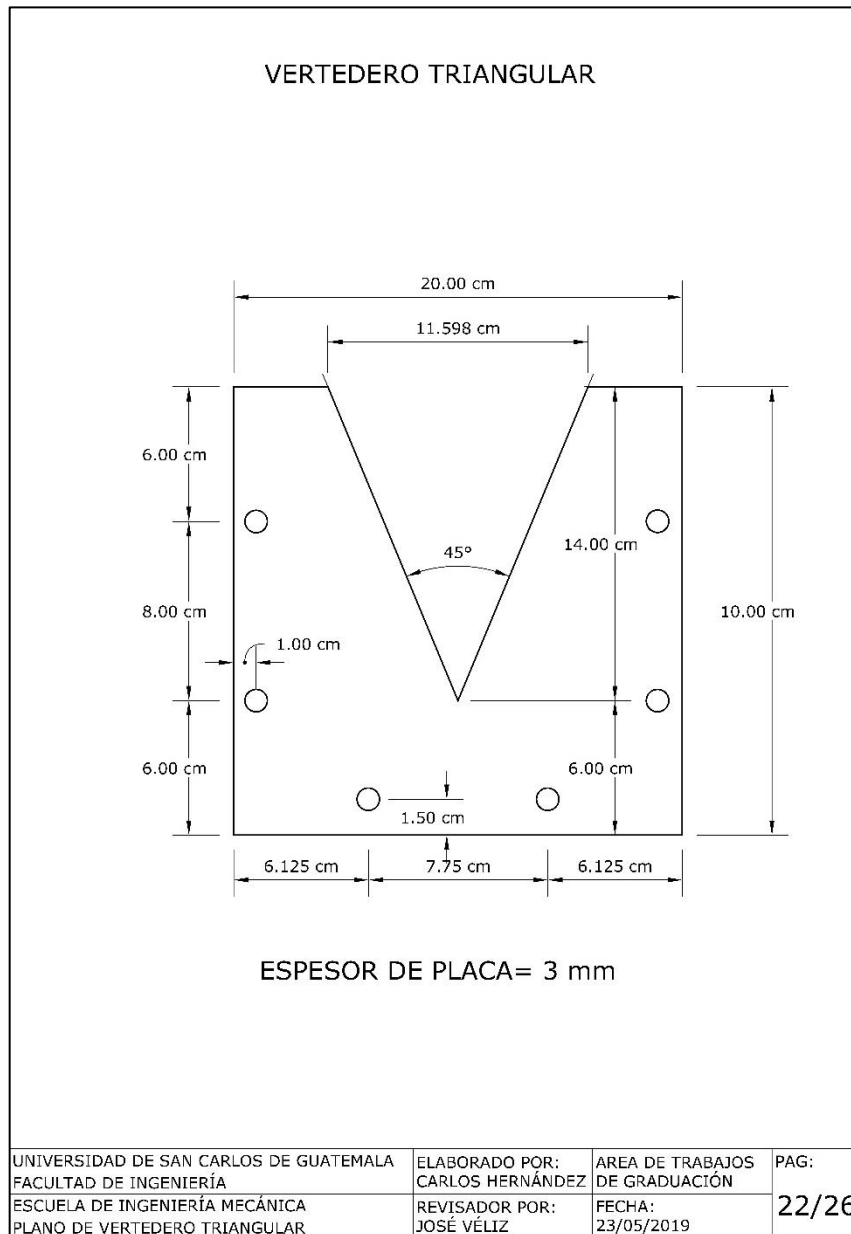
Figura 115. **Plano estructural soporte de vertedero**



Fuente: elaboración propia, empleando SketchUp Pro 2016 y LayOut 2016.

El vertedero triangular se fabricó en acrílico transparente y sus dimensiones se puede observar en la figura 116.

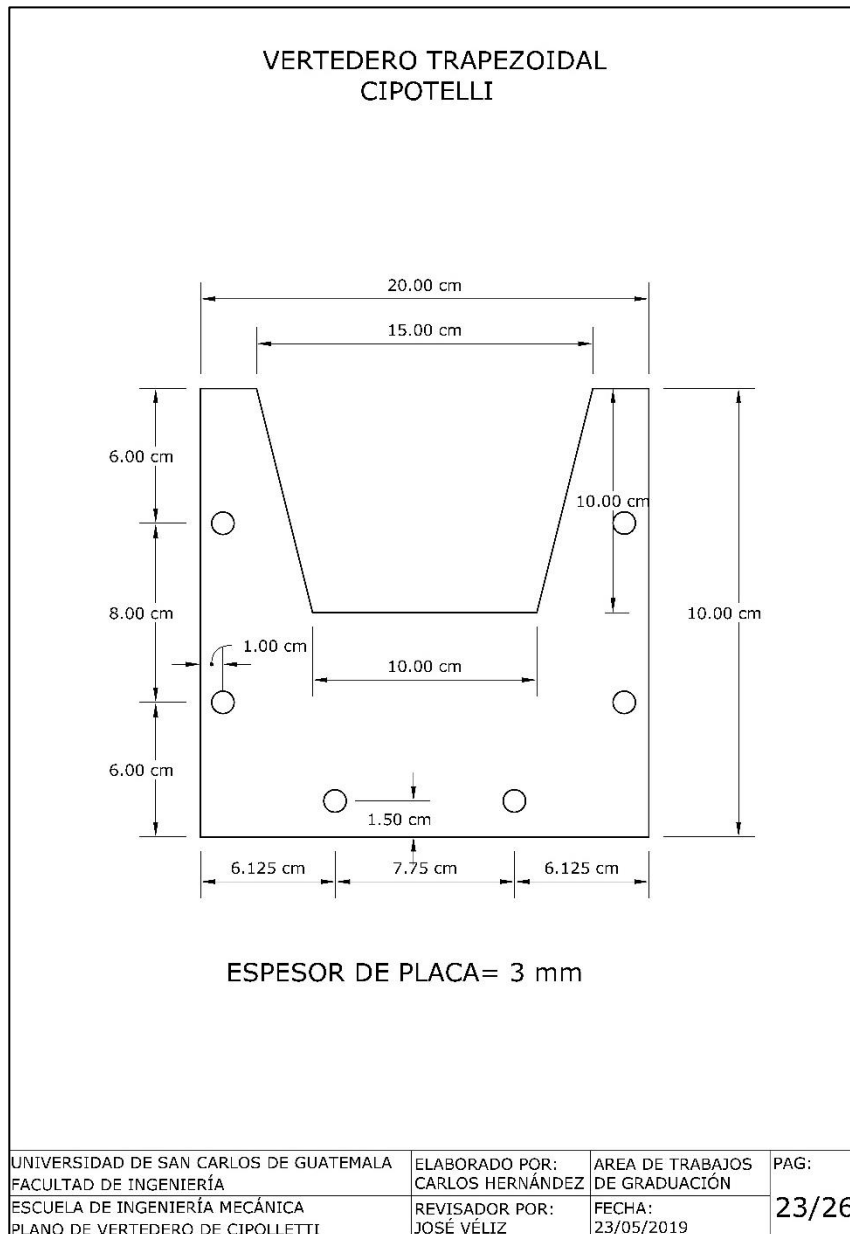
Figura 116. Plano de vertedero triangular



Fuente: elaboración propia, empleando SketchUp Pro 2016 y LayOut 2016.

En la figura 117 se observan las dimensiones del vertedero trapezoidal de Cipolletti.

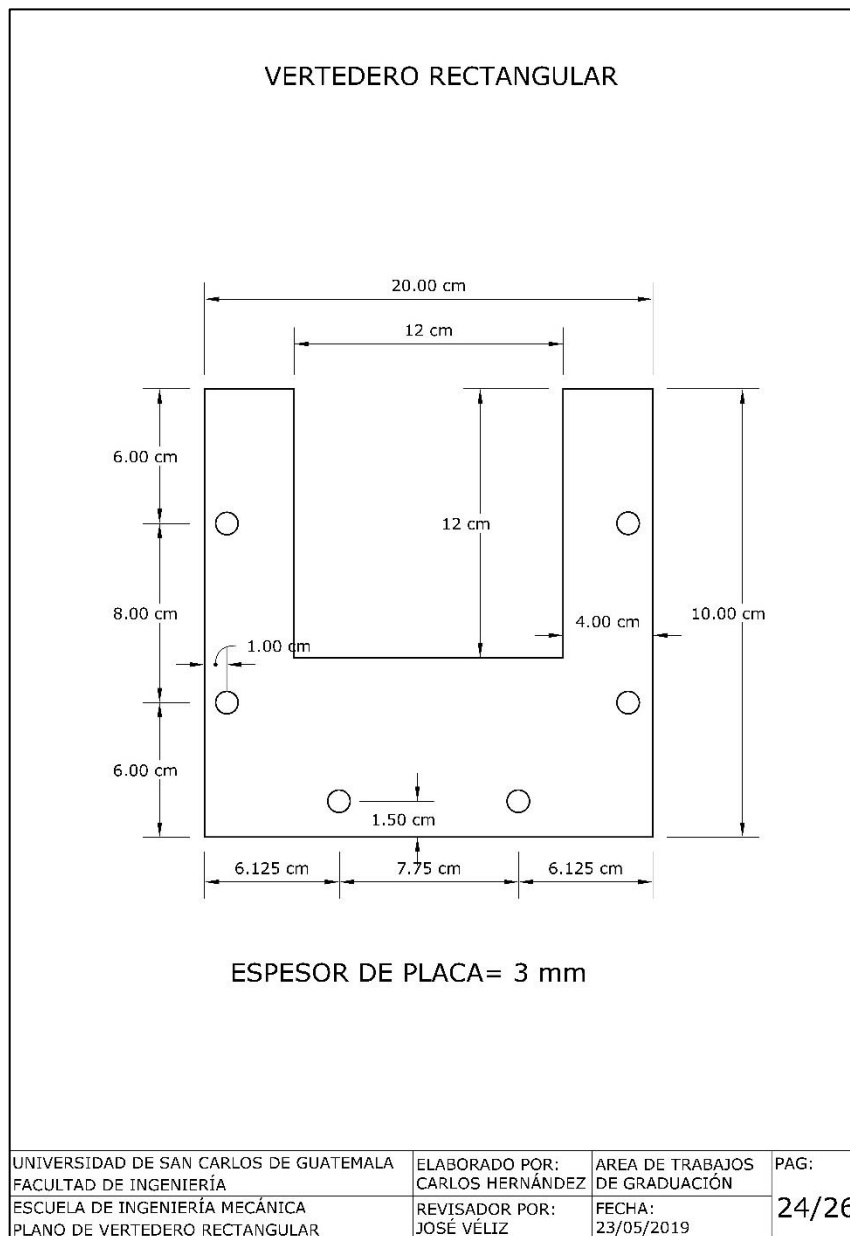
Figura 117. Plano de vertedero de Cipolletti



Fuente: elaboración propia, empleando SketchUp Pro 2016 y LayOut 2016.

En la figura 118 se observa las dimensiones del vertedero rectangular con contracciones laterales.

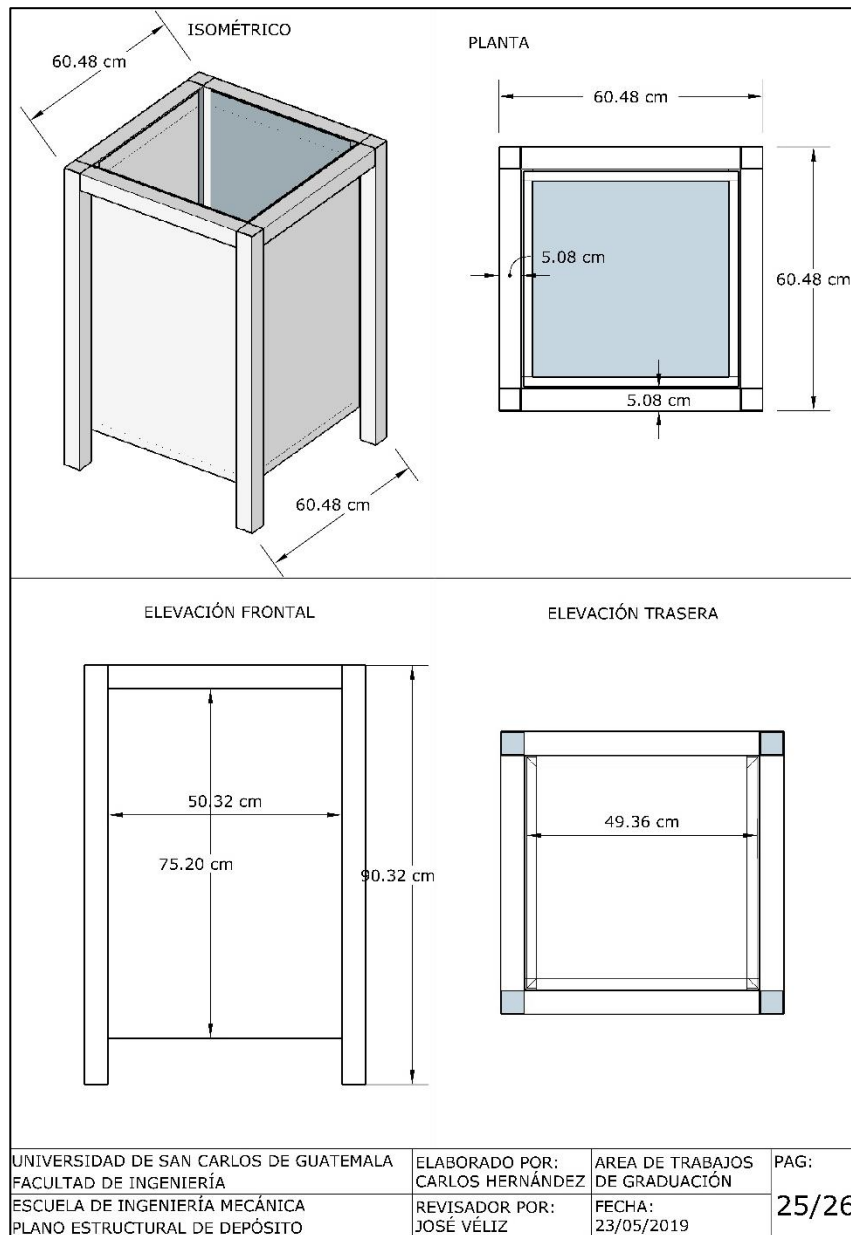
Figura 118. Plano de vertedero rectangular



Fuente: elaboración propia, empleando SketchUp Pro 2016 y LayOut 2016.

En la figura 119 se observa los detalles estructurales del depósito de agua.

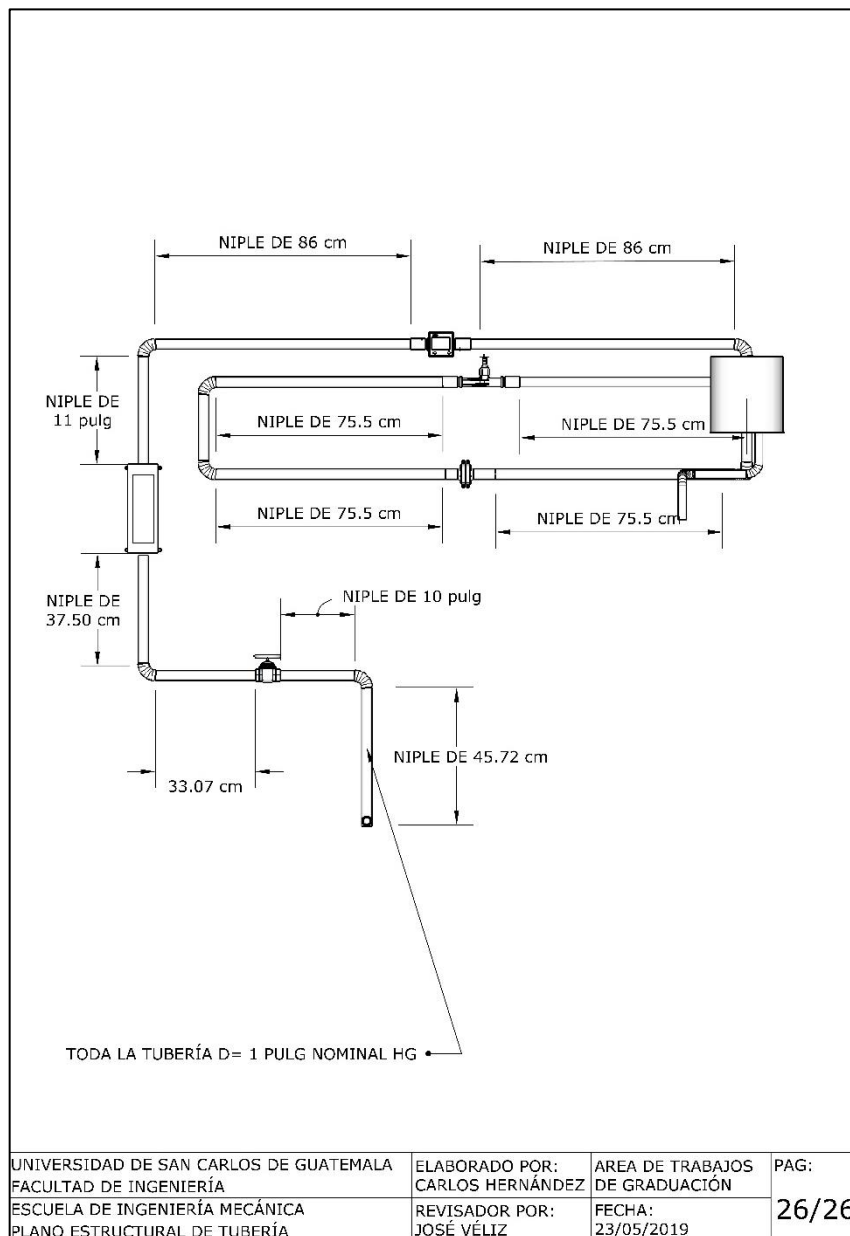
Figura 119. **Plano estructural de depósito**



Fuente: elaboración propia, empleando SketchUp Pro 2016 y LayOut 2016.

En la figura 120 se observan las dimensiones de los tramos de tubería del equipo de medidores de flujo.

Figura 120. Plano estructural de tubería



Fuente: elaboración propia, empleando SketchUp Pro 2016 y LayOut 2016.

3.1.5. Planos eléctricos

El circuito de paro y arranque del equipo se muestra a continuación junto con la codificación respectiva de los planos. En la tabla XIX se muestra la codificación de componentes eléctricos.

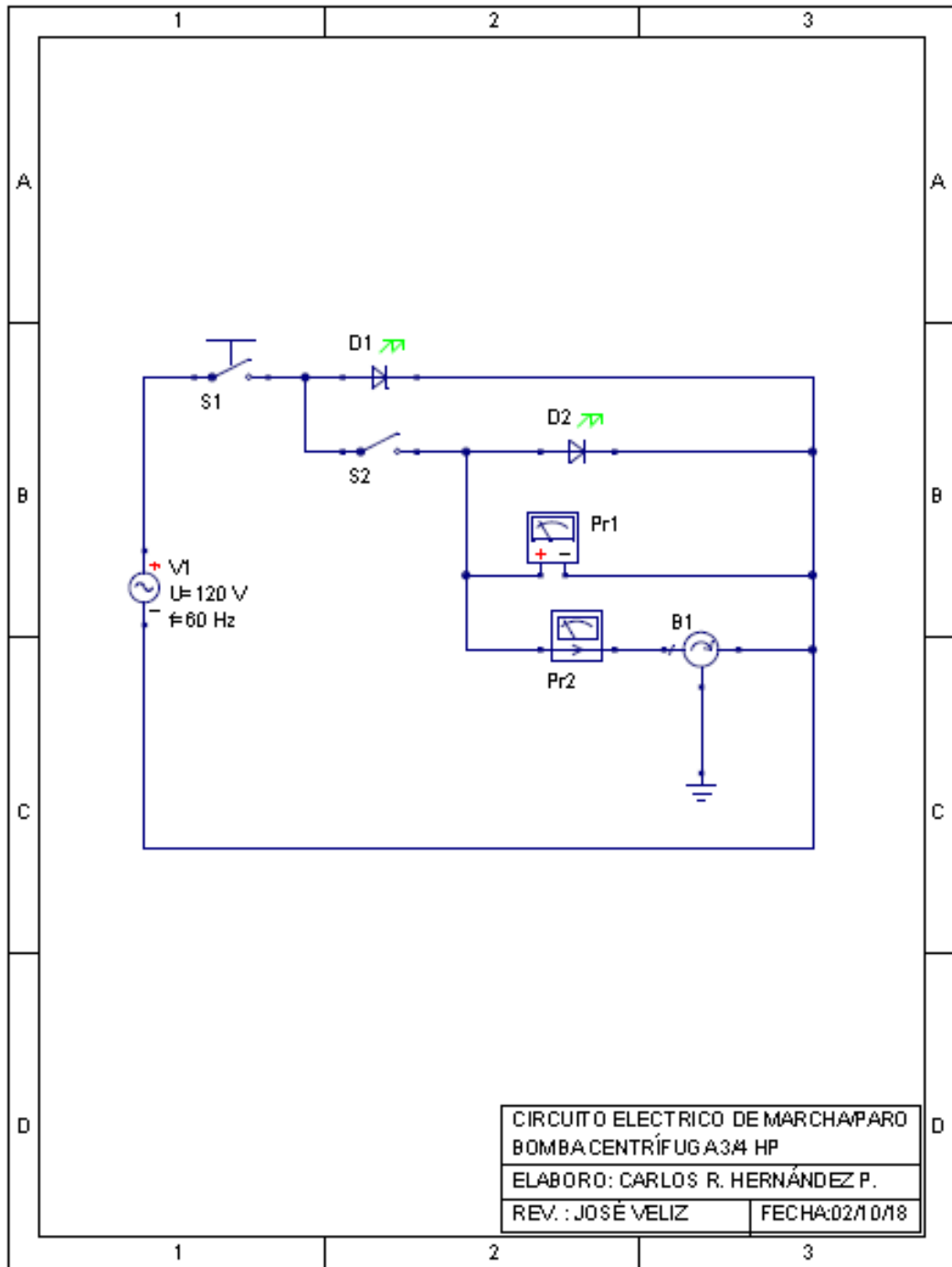
Tabla XIX. **Codificación de componentes eléctricos**

| Código | Descripción |
|--------|--|
| S1 | Botón de paro de emergencia (pulsador con enclavamiento) |
| S2 | Interruptor 15 A, 600 V, simbología ON, OFF |
| D1 | Luz piloto 120 V AC Verde |
| D2 | Luz piloto 120 V AC Roja |
| V1 | Fuente de alimentación 120 V AC, f= 60 Hz |
| Pr1 | Voltímetro análogo 0-400 V AC |
| Pr2 | Amperímetro análogo 0-20 A AC |
| B1 | Bomba centrífuga 120 V, AC, monofásica ¾ HP. |

Fuente: elaboración propia.

En la figura 121 se puede observar el plano eléctrico del equipo de medidores de flujo.

Figura 121. Plano eléctrico del equipo

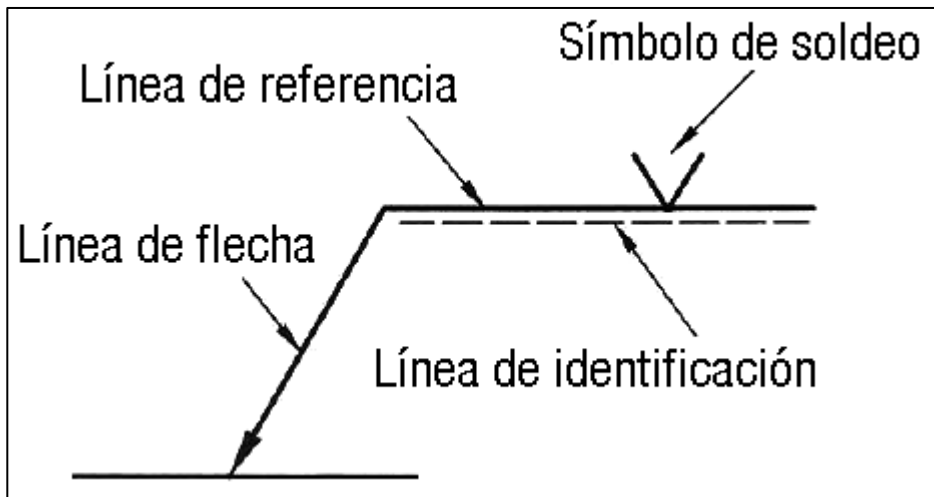


Fuente: elaboración propia, empleando Quite Universal Circuit Simulator Qucs 0.016.

3.1.6. Planos de soldadura

La representación de una soldadura según la norma UNE 22553 especifica toda la información necesaria sobre el tipo de soldadura, posición, longitud, profundidad de penetración, entre otros, como los mostrados en la figura 122.

Figura 122. **Simbología de soldadura para un plano**



Fuente: ULHI. *Manual técnico*. ikastaroak.ulhi.net/edu/es/PPFM/IG/IG03/es_PPFM_IG03_Contenidos/website_241_representacin_de_soldadura_i.html#. Consulta: 5 de septiembre de 2018.

La soldadura es un tipo de unión permanente de varias piezas por la fusión de material de aportación. Dicha unión puede ser a tope para piezas contiguas, es decir, cuando no existe solapamiento, o en ángulo en piezas perpendiculares.

En la figura 123 se pueden observar los diferentes tipos de soldeo con su correspondiente símbolo.

Figura 123. **Simbología de diferentes tipos de soldeo**

| Símbolo | Método de soldeo | Esquema |
|---------|----------------------------------|---------|
| | A tope con bordes levantados | |
| | A tope con bordes planos | |
| | A tope en V | |
| | A tope con bisel simple | |
| | A tope en V con tacón | |
| | A tope en bisel simple con talón | |
| | A tope en U simple | |
| | A tope en J simple | |
| | En ángulo | |
| | A tope en V doble | |
| | A tope en bisel doble | |
| | A tope en V doble con talón | |
| | A tope en bisel doble con talón | |
| | A tope en U doble | |

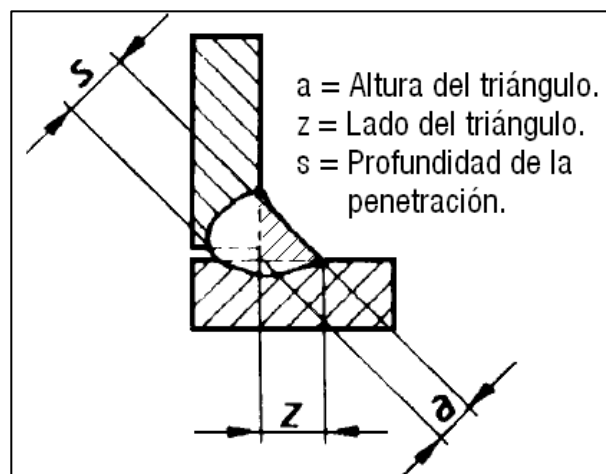
Fuente: ULHI. *Manual técnico*. ikastaroak.ulhi.net/edu/es/PPFM/IG/IG03/es_PPFM_IG03_Contenidos/IG03_CONT_R75_01_tablasimbolossoldadura.gif. Consulta: 5 de septiembre de 2018.

Con base en lo anterior, las dimensiones principales que deben indicarse en una soldadura son las siguientes:

- En primer lugar, indicar la letra correspondiente de la siguiente imagen, seguido de su valor.
- A continuación, se indica el símbolo del método de soldeo utilizado.
- Y, por último, la longitud del cordón que se coloca a la derecha del símbolo.
- Si la soldadura es intermitente, después del símbolo, se indicará el número de tramos seguido de su longitud y entre paréntesis la distancia entre los tramos de soldadura. La ausencia de indicaciones a continuación del símbolo que significa que a soldadura debe ser continua en toda la longitud de la pieza.

En la figura 124 se muestran las dimensiones de un cordón de soldadura.

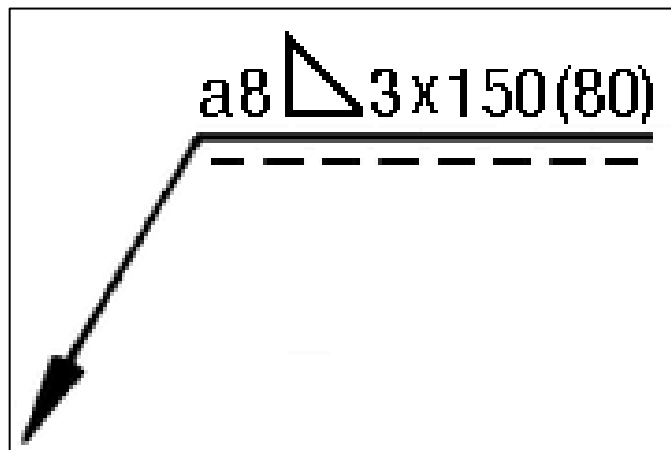
Figura 124. **Dimensiones por indicar en un plano de soldadura**



Fuente: ULHI. *Manual técnico*. ikastaroak.ulhi.net/edu/es/PPFM/IG/IG03/es_PPFM_IG03_Contenidos/IG03_CONT_R75_02_dimensionessoldaduraangulo.gif. Consulta: 5 de septiembre de 2018.

Para ejemplificar esto, en la figura 125 se puede observar la simbología para una soldadura de 8 mm de alto en ángulo con tres secciones de 150 mm con una separación de 80 mm entre cada una.

Figura 125. **Ejemplo de simbología de soldeo**



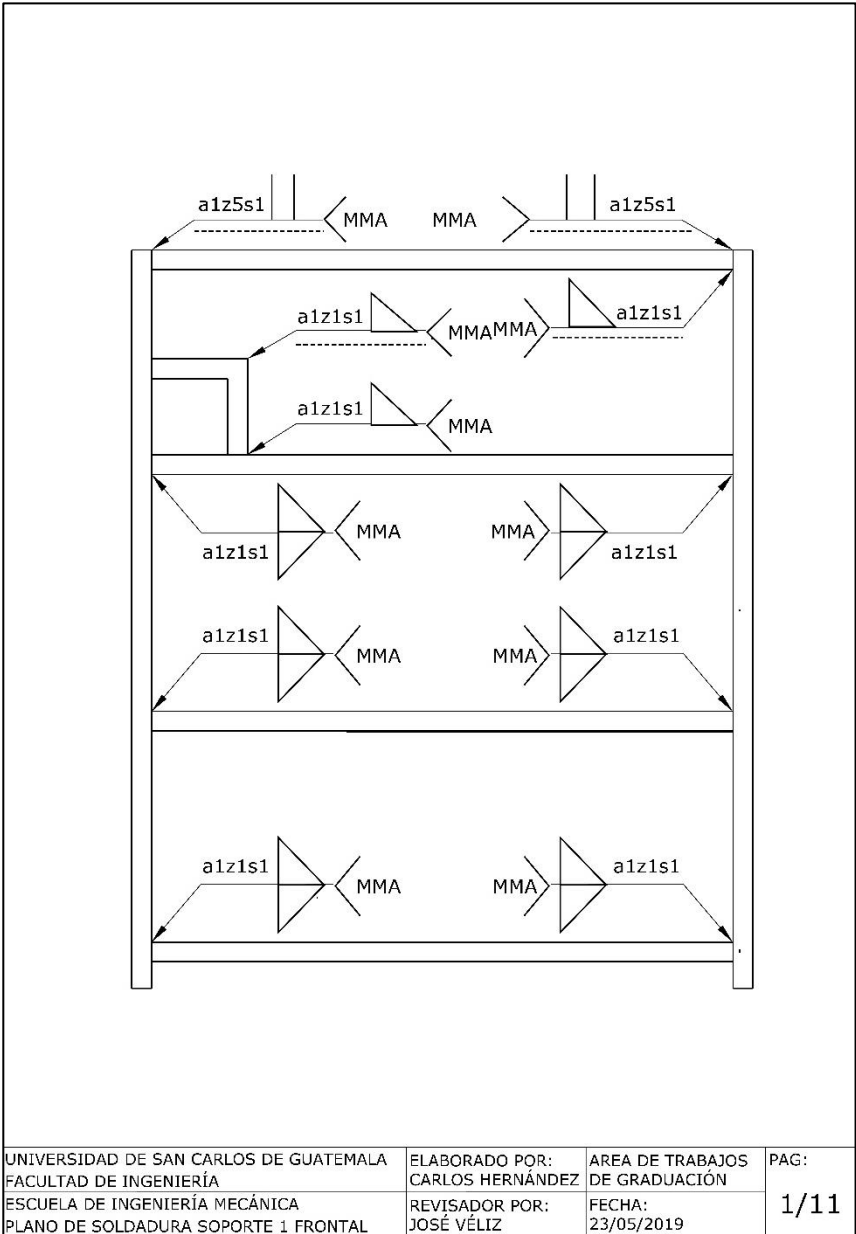
Fuente: ULHI. *Manual técnico*. ikastaroak.ulhi.net/edu/es/PPFM/IG/IG03/es_PPFM_IG03_Contenidos/website_242_representacin_de_soldadura_ii.html. Consulta: 5 de septiembre de 2018.

La línea discontinua significa que la soldadura no es simétrica.

Siguiendo esta misma norma de soldadura se realizaron diversos planos de soldadura para el soporte de la tubería, el soporte del canal, el canal y para el tanque de almacenamiento de agua.

En la figura 126 se observan los detalles de las soldaduras utilizadas para fijar las vigas del soporte principal de la tubería de agua.

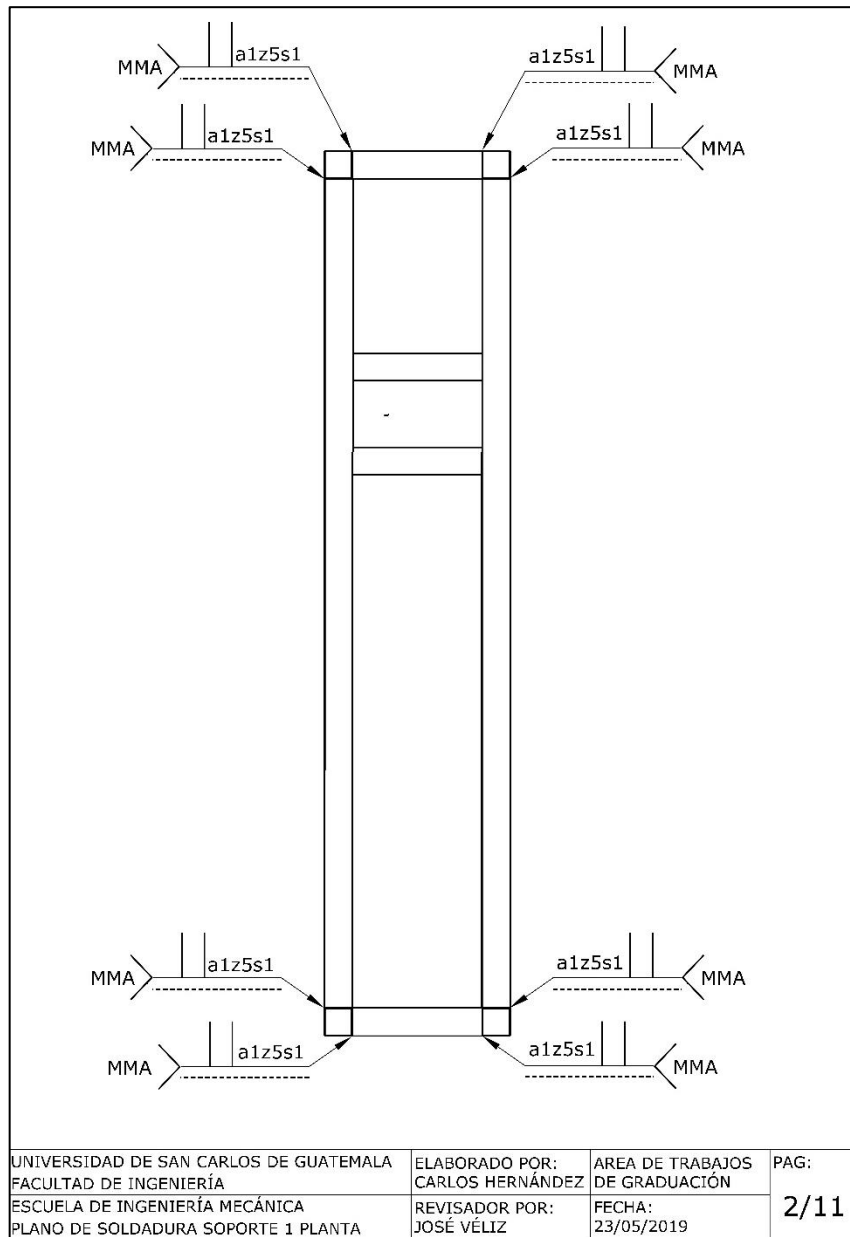
Figura 126. Plano de soldadura del soporte de tubería vista frontal



Fuente: elaboración propia, empleando SketchUp Pro 2016 y LayOut 2016.

En la figura 127 se muestran las soldaduras de la parte superior del soporte principal.

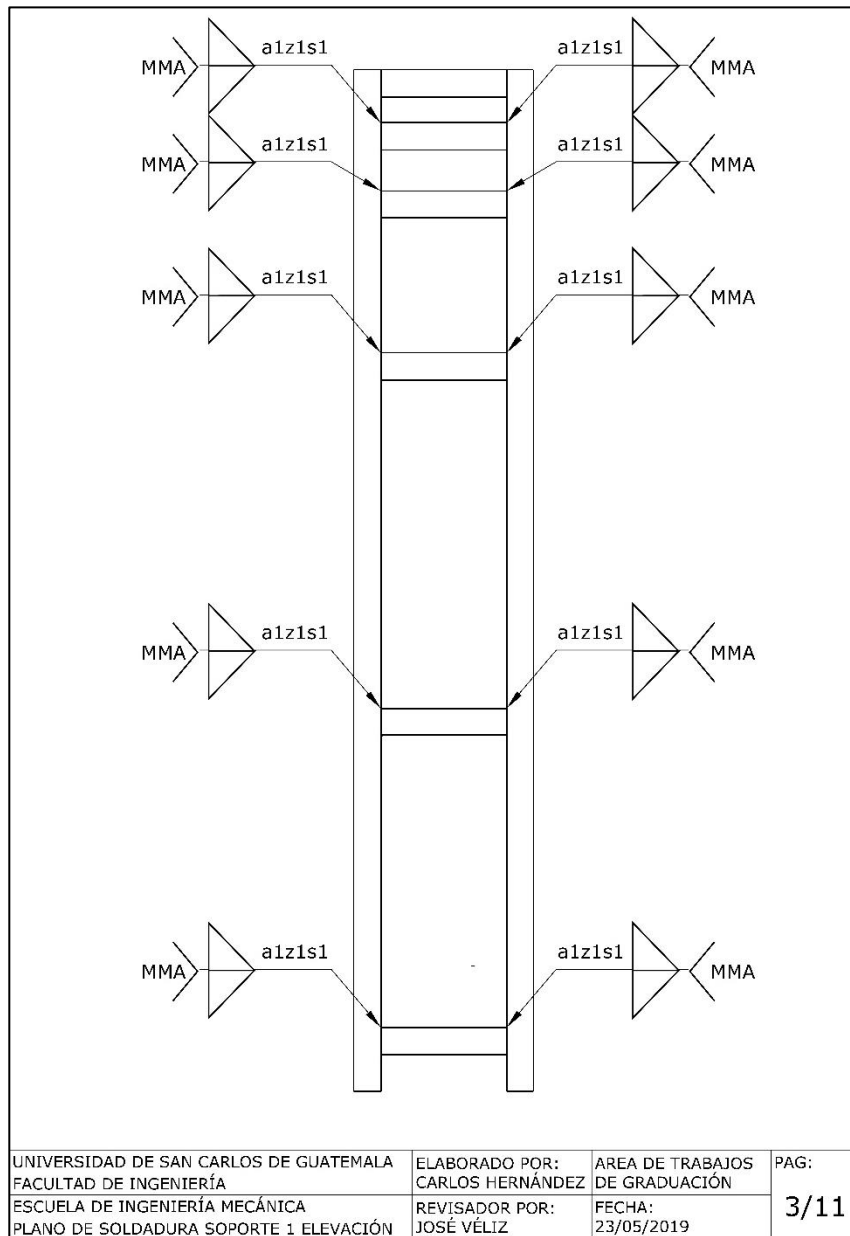
Figura 127. **Plano de soldadura del soporte de tubería vista planta**



Fuente: elaboración propia, empleando SketchUp Pro 2016 y LayOut 2016.

En la figura 128 se observan las dimensiones de las soldaduras en ángulo utilizadas para fijar las vigas de los entre pisos en el soporte de tuberías.

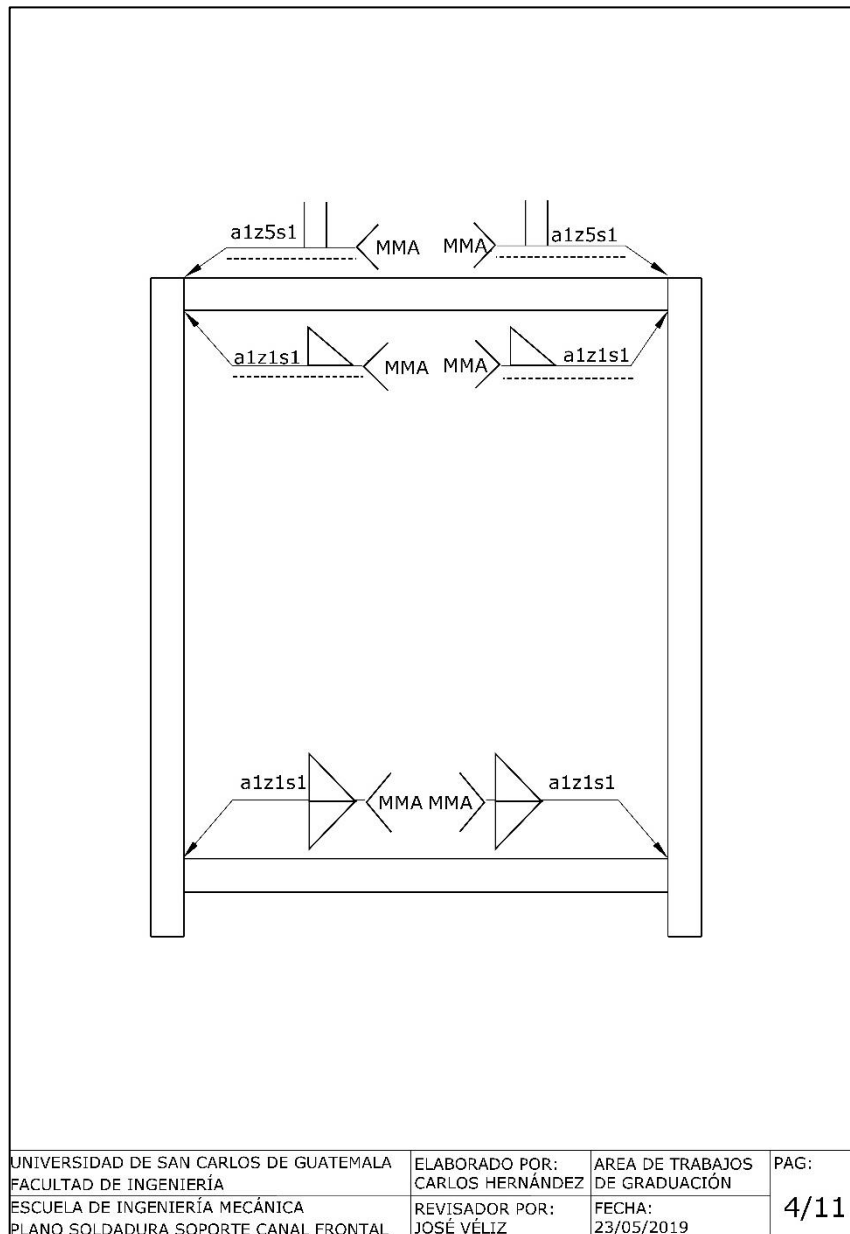
Figura 128. **Plano de soldadura del soporte de tubería vista elevación**



Fuente: elaboración propia, empleando SketchUp Pro 2016 y LayOut 2016.

En la figura 129 se muestran las soldaduras del tanque de almacenamiento de agua.

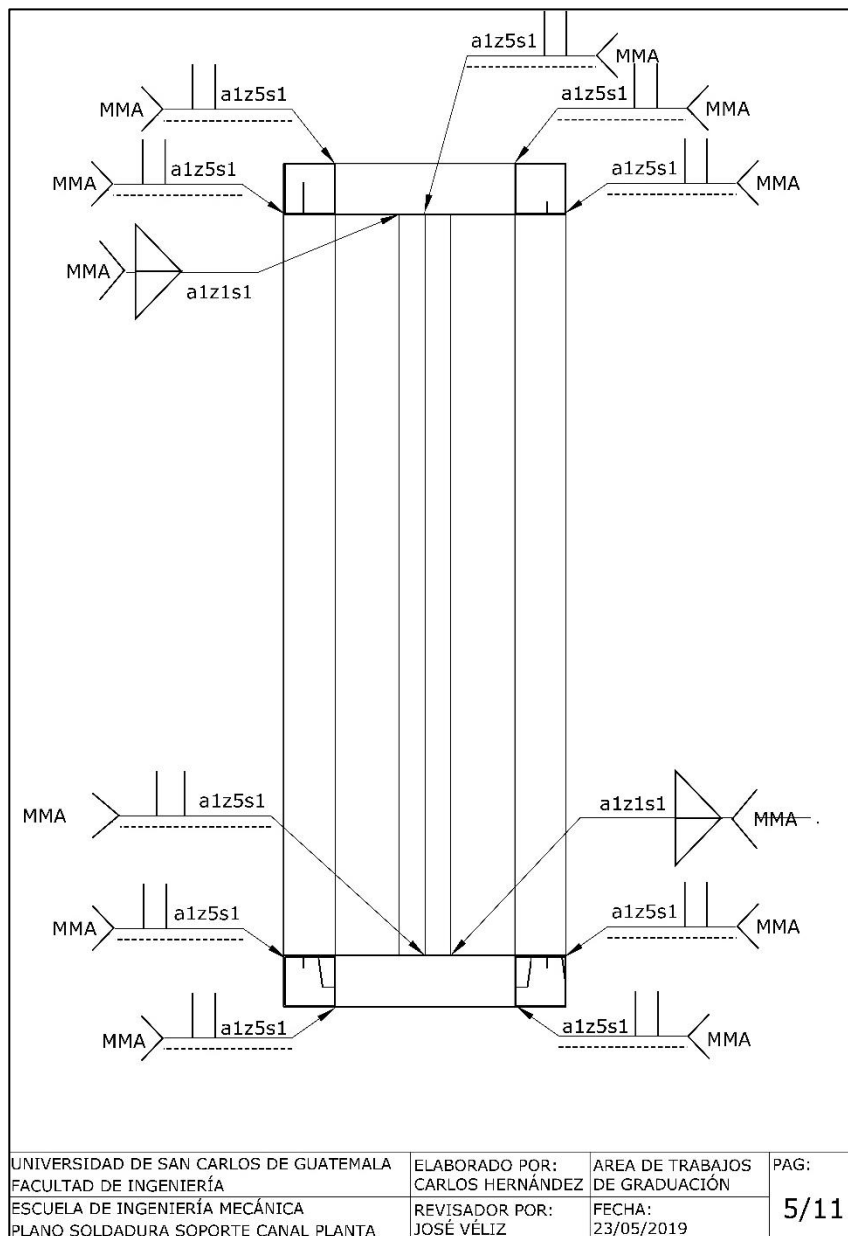
Figura 129. Plano de soldadura de soporte del canal vista frontal



Fuente: elaboración propia, empleando SketchUp Pro 2016 y LayOut 2016.

En la figura 130 se pueden observar las soldaduras utilizadas en la parte superior del soporte del canal para fijar las columnas y las vigas.

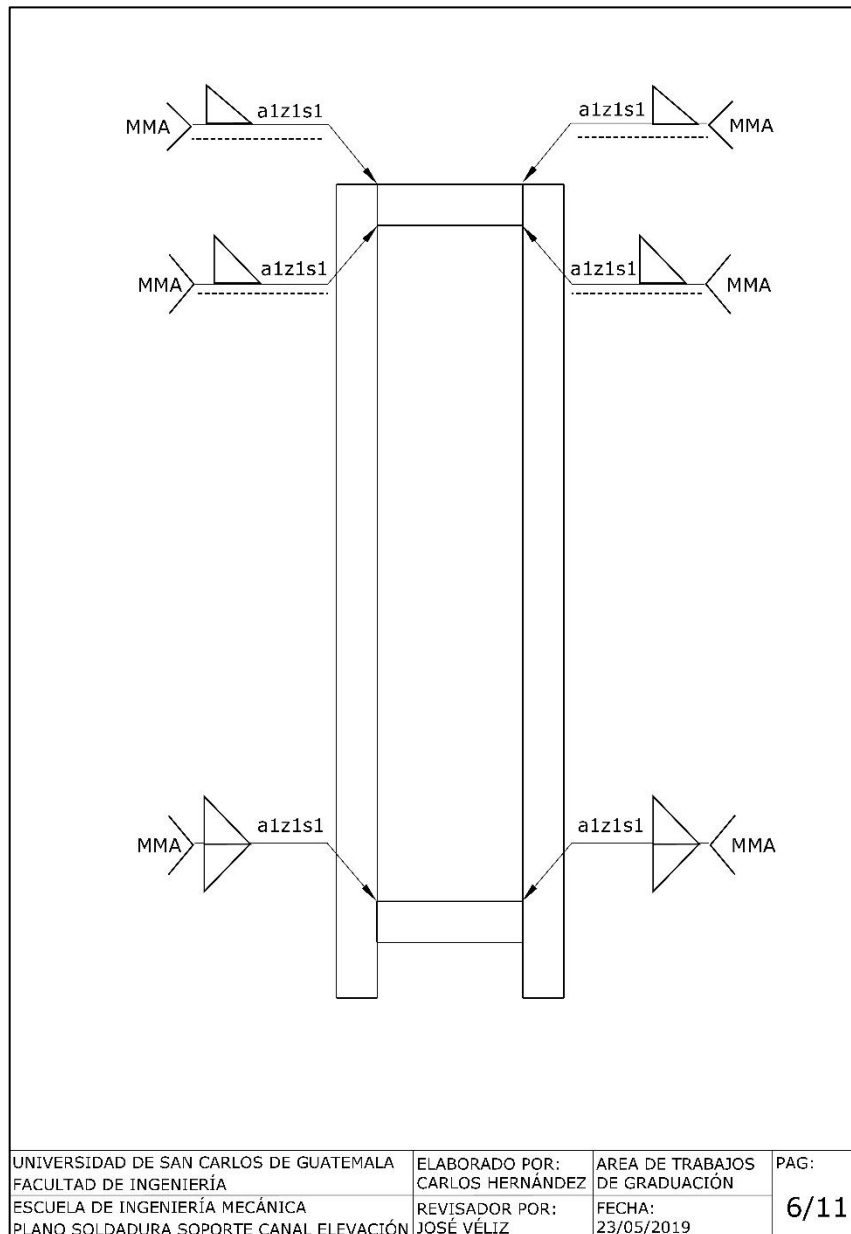
Figura 130. **Plano de soldadura de soporte del canal vista planta**



Fuente: elaboración propia, empleando SketchUp Pro 2016 y LayOut 2016.

En la figura 131 se pueden ver las soldaduras utilizadas para fijar las columnas y vigas en el soporte del canal.

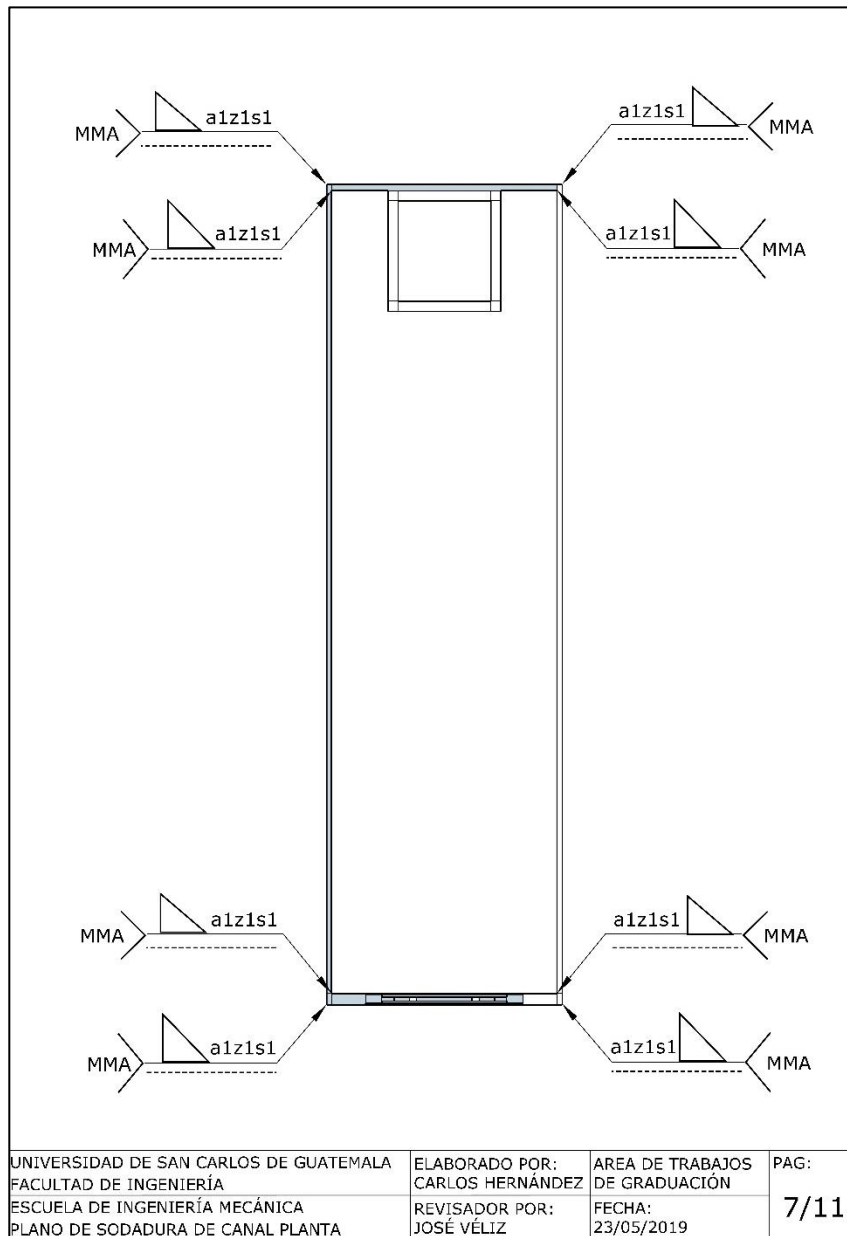
Figura 131. **Plano de soldadura de soporte del canal vista elevación**



Fuente: elaboración propia, empleando SketchUp Pro 2016 y LayOut 2016.

En la figura 132 se muestran las soldaduras utilizadas para construir el canal.

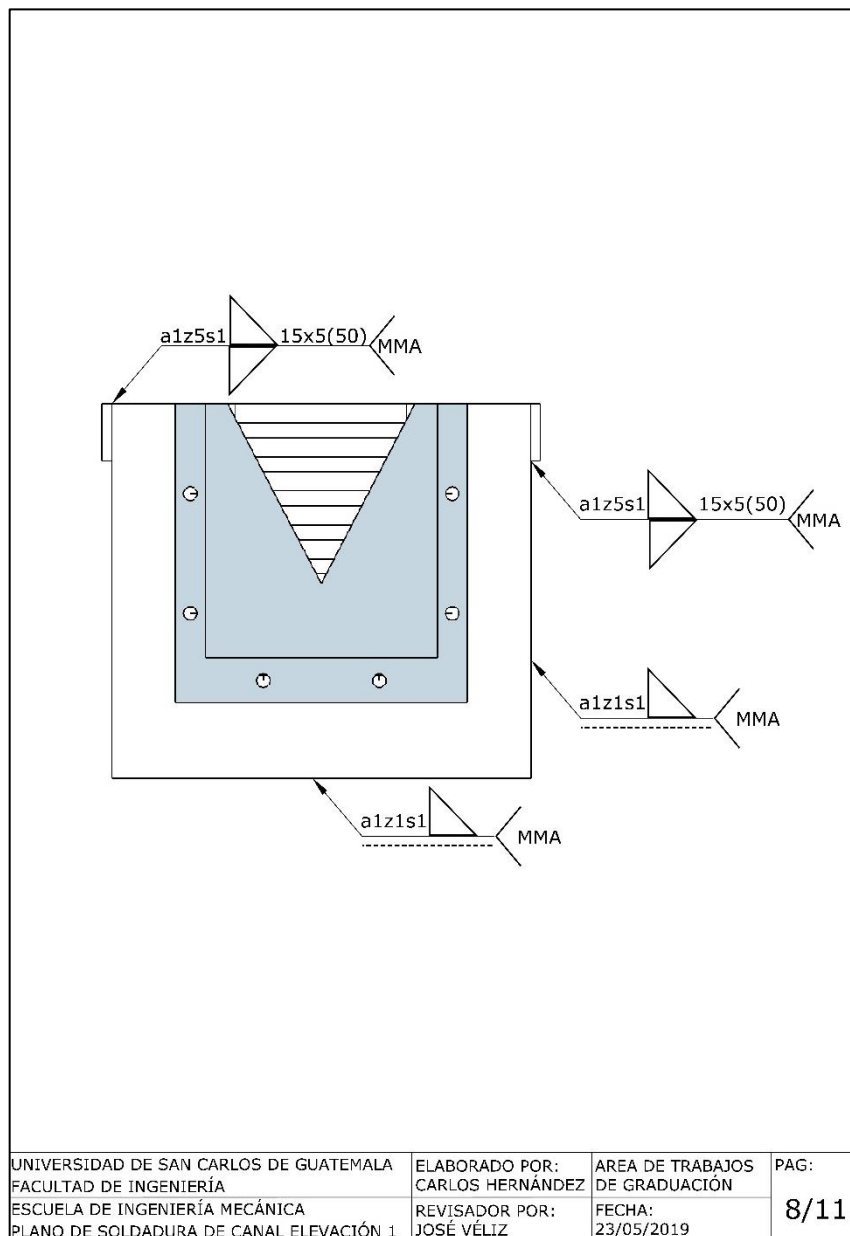
Figura 132. **Plano de soldadura del canal vista planta**



Fuente: elaboración propia, empleando SketchUp Pro 2016 y LayOut 2016.

En la parte frontal del canal se fijó el soporte del vertedero, como se observa en la figura 133.

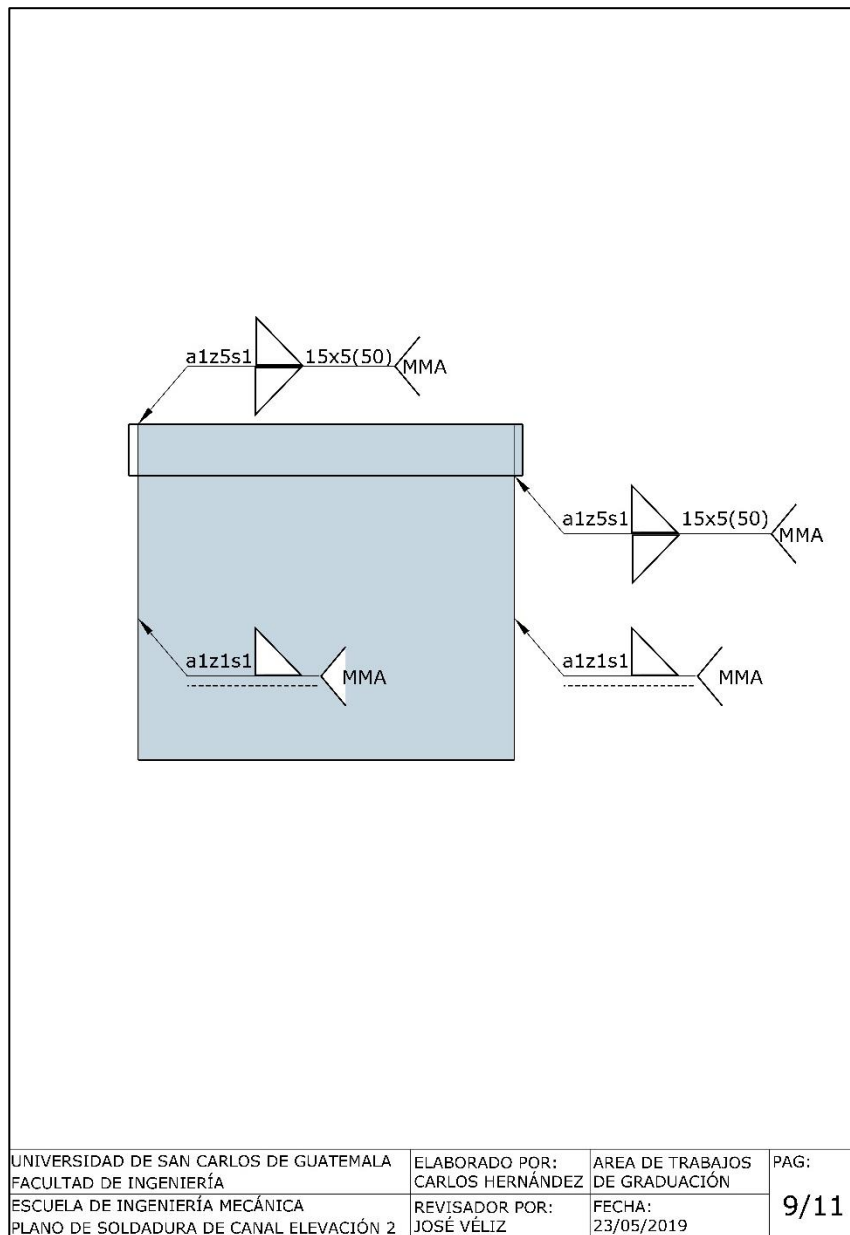
Figura 133. Plano de soldadura del canal vista elevación 1



Fuente: elaboración propia, empleando SketchUp Pro 2016 y LayOut 2016.

En la figura 134 se muestran las soldaduras en la parte trasera del canal.

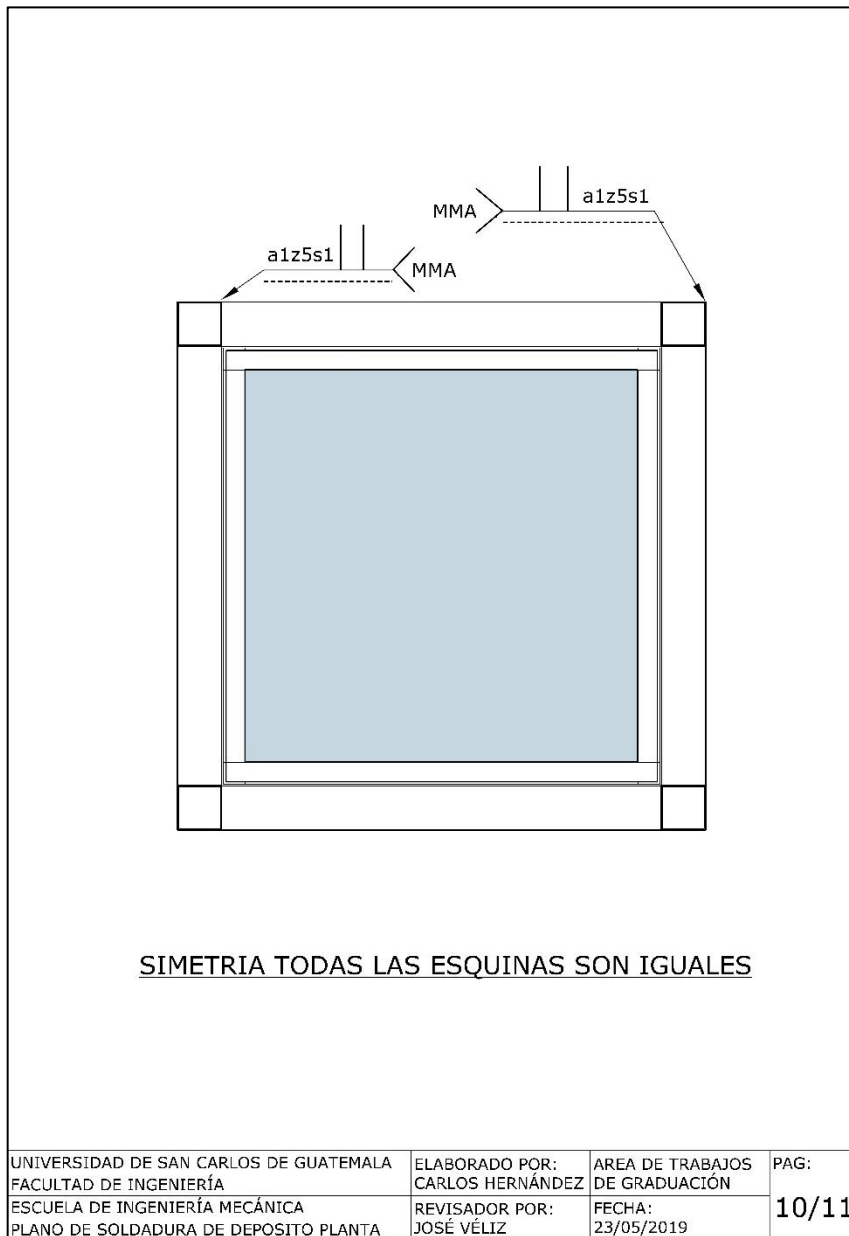
Figura 134. **Plano de soldadura del canal vista elevación 2**



Fuente: elaboración propia, empleando SketchUp Pro 2016 y LayOut 2016.

En la figura 135 se muestran las soldaduras para fijar la columnas y vigas, a la lámina del tanque de almacenamiento de agua.

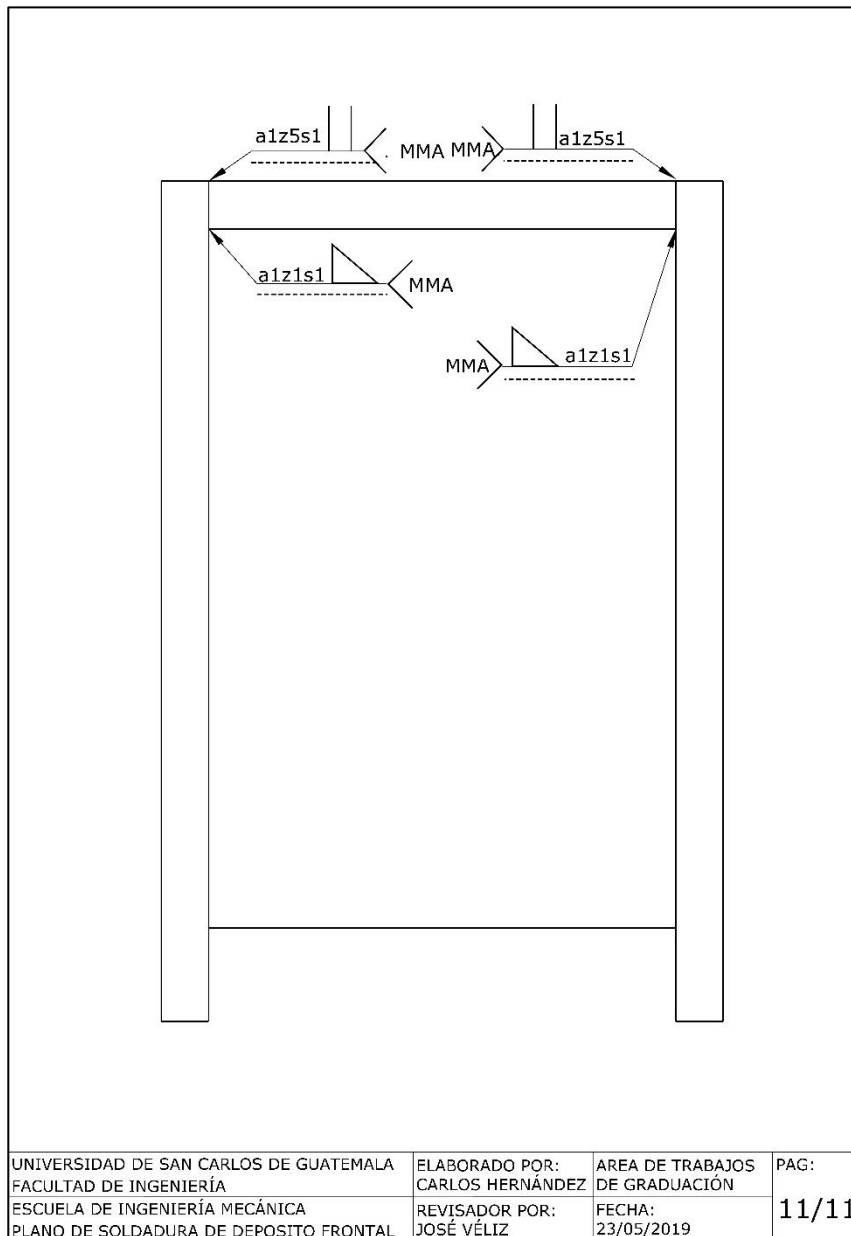
Figura 135. **Plano de soldadura del depósito vista planta**



Fuente: elaboración propia, empleando SketchUp Pro 2016 y LayOut 2016.

En la figura 136 se muestran las soldaduras para fijar las vigas en el tanque de almacenamiento de agua.

Figura 136. **Plano de soldadura del depósito vista frontal**



Fuente: elaboración propia, empleando SketchUp Pro 2016 y LayOut 2016.

3.1.7. Selección de medidores de flujo

Cabe destacar que únicamente se compraron 2 medidores de flujo, el resto de los medidores de flujo fueron construidos y se utilizan parámetros indirectos para medir el caudal. Los medidores que se tratan en esta sección corresponden al medidor de turbina digital y al rotámetro.

En general el proceso de selección de un medidor de flujo se lleva a cabo en cinco pasos:

- Definir claramente la magnitud a medir: la magnitud por medir es el caudal o flujo volumétrico.
- Definir el tipo de instrumentación: equipo no utilizará un panel de control para centralizar los instrumentos de medición, por lo que los medidores de flujo deben de ser de campo.
- Definir las condiciones de operación del elemento primario: refieren directamente a la atmosfera a la cual estará sometido el elemento primario del instrumento de medición entre ellas se puede mencionar:
 - Condiciones físicas
 - Estado de la materia: líquido
 - Temperatura ambiental: 25 °C
 - Temperatura del fluido a transportar: 25 °C
 - Presión interna de la tubería: 25 psi máximo
 - Viscosidad del fluido: 0,0001 Pa*s
 - Densidad del fluido: 997,13 kg/m³
 - Sólidos en suspensión: pocos

- Conductividad eléctrica: débil
- Turbulencia: alta, flujo turbulento totalmente desarrollado
- Condiciones químicas
 - Sustancia corrosiva: no.
 - Acidez o alcalinidad elevada: no, sustancia neutra.
 - Solución químicamente inerte.
- Rango de medición: por selección arbitraria se requiere que el medidor de flujo tenga un rango de medición de 10 a 80 litros por minuto, para que la lectura del flujo volumétrico de diseño, el cual es de 50 l/min quede a la mitad del rango de medición.
- Exactitud requerida: requiere que el instrumento de medición tenga una exactitud de 95 % o más.
- Pérdida de presión: la pérdida de presión debe ser mínima o menor a 1 psi.
- Precisión: la presión del instrumento debe ser ± 1 % de la lectura de medición anterior.
- Tipo de calibración: la calibración debe ser sencilla con un instrumento de igual o mayor jerarquía metrológica.
- Definir las condiciones físicas y químicas que rodearan al elemento secundario.

- Condiciones físicas
 - Posible exposición prolongada a rayos solares
 - Temperaturas elevadas por exposición solar
 - Humedad relativa: 85 %
 - Exposición prolongada a lluvias y a corrosión por lluvia acida
 - Presión atmosférica: 0,84 atm en Ciudad de Guatemala
- Condiciones químicas
 - Acidez moderada por lluvia.
- Definir la función del elemento secundario: debido a que la función del equipo de medidores de flujo será experimental, la instrumentación se sugiere que sea de indicación pues únicamente se registrará información durante la realización de las pruebas.

3.1.7.1. Rotámetro

Tomando en cuenta las condiciones anteriores se procedió a realizar la selección del instrumento de medición de área variable o rotámetro, de lo cual se seleccionó el modelo mostrado en la figura 137.

Las especificaciones técnicas del instrumento son:

- Rango de medición: 1 a 20 galones por minuto, 10 a 80 l/min
- Conexión del instrumento: rosca hembra NPT de 1 pulgada
- Materiales de construcción:
 - Cuerpo: acrílico, plástico ABS
 - Flotador: acero inoxidable 304
 - Válvula: acero inoxidable 304

- O-ring: Viton

- Presión máxima de trabajo: 85 psi
- Temperatura máxima de trabajo: 125 °F o 51,67 °C
- Exactitud: $\pm 4 \%$ de toda la escala de flujo o rango de medición
- Fluido sugerido de uso: agua
- Modelo de producción: FMZ4004
- Marca: PRM

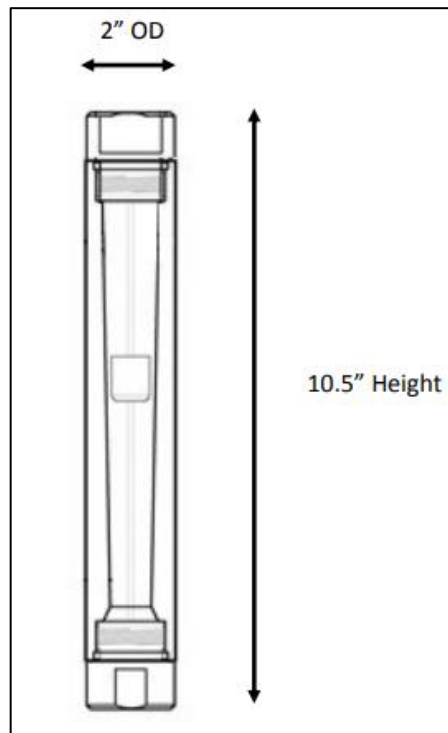
Figura 137. **Rotámetro seleccionado**



Fuente: AMAZON. *Catálogo*. www.amazon.com/WATER-ROTAMETER-METER-FEMALE-CONNECTION/dp/B017O8UXWK#detail-bullets. Consulta: 05 de octubre de 2018.

En la figura 138 se pueden observar las dimensiones del rotámetro.

Figura 138. **Especificación técnica de las dimensiones del rotámetro**



Fuente: PRM FILTRATION. *Catalogo.*

cdn.shopify.com/s/files/1/0822/0771/files/FMZ4004drawing.pdf?1945823781268113397.

Consulta: 03 de octubre de 2018.

3.1.7.2. Medidor de turbina digital

Seleccionando un medidor de flujo tipo turbina digital se determinó que uno de los equipos de menor costo y mayor exactitud era el medidor K24 electrónico, como el que se muestra en la figura 139.

Figura 139. **Medidor de turbina K24**



Fuente: GUATEMALA DIGITAL. *Catalogo*. guatemaladigital.com/Industrial+-caudal%edmetros/CBK+New+Blue+Pro+K24+Turbine+Digital+Diesel+Fuel+Flow+Meter+For+Chemicals+Water/Producto.aspx?CodigoP=B01M3NKSWH. Consulta: 10 de octubre de 2018.

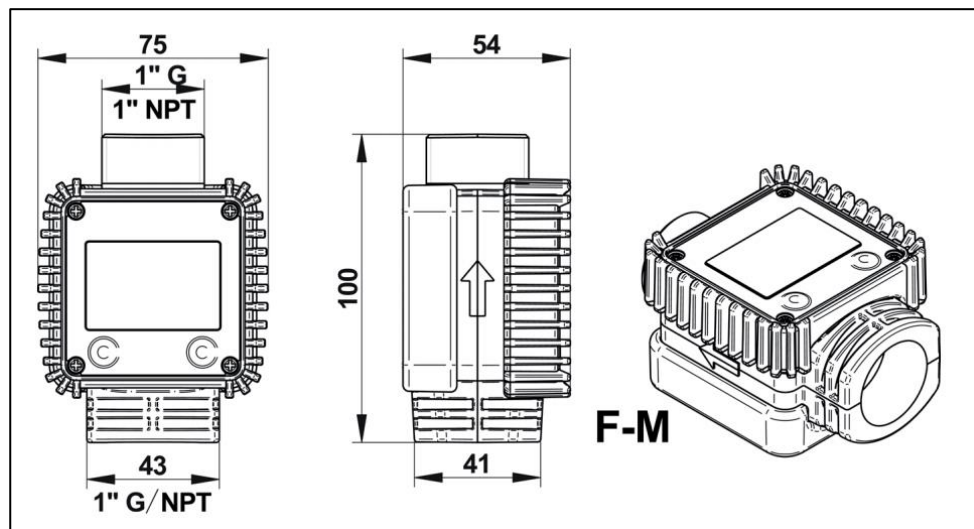
Las especificaciones técnicas del instrumento son:

- Resolución nominal
 - Flujo alto: 0,01 l/pulso
 - Flujo bajo: 0,005 l/pulso
- Rango de medición de flujo: 10 a 120 l/min
- Presión máxima de operación: 10 bar, 145 psi
- Presión de ruptura: 40 bar
- Rango de temperatura de almacenamiento: -20 a 70 °C
- Humedad relativa máxima: 95 %
- Rango de temperatura de operación: -10 a 50 °C
- Resistencia al flujo o caída de presión: 0,3 bar a 100 l/min

- Rango de viscosidad del fluido de operación: 2 a 5,35 cSt
- Exactitud: 1 % luego de la calibración entre 10 a 90 l/min del rango
- Reproducibilidad típica: $\pm 0,3$ %
- Pantalla: Cristal líquido, LCD
- Fuente de alimentación: 2 X 1.5 V baterías alcalinas medida AAA
- Vida de las baterías: 18 a 36 meses
- Peso: 0,25 kg (incluyendo las baterías)
- Protección: IP65

Las dimensiones del medidor K24 se observan en la figura 140.

Figura 140. **Especificación de las dimensiones del medidor K24**



Fuente: COMMERCIAL FUEL SOLUTIONS LIMITED. *Manual técnico.*

<https://www.commercialfuelsolutions.co.uk/downloads/manuals/k24-flowmeter.pdf>. Consulta: 12 de octubre de 2018.

3.1.8. Diseño de medidores de flujo

En esta sección se aborda el diseño de los medidores de flujo volumétricos de placa de orificio y los tres diferentes tipos de vertederos, en el caso del medidor de Venturi se muestra el proceso de selección del elemento primario y la determinación de los lugares de instalación de los manómetros como elementos secundarios.

En el caso del medidor de ranura su funcionamiento es básicamente empírico por lo que únicamente se explica su relación entre el nivel dinámico del agua y el flujo volumétrico.

3.1.8.1. Medidor de placa de orificio

Como ya se describió en apartados anteriores el medidor de orificio utilizado para este instrumento se diseñó con un coeficiente beta de 0,40.

Lo que indica que la relación entre los diámetros de la placa de orificio y el diámetro de la tubería son:

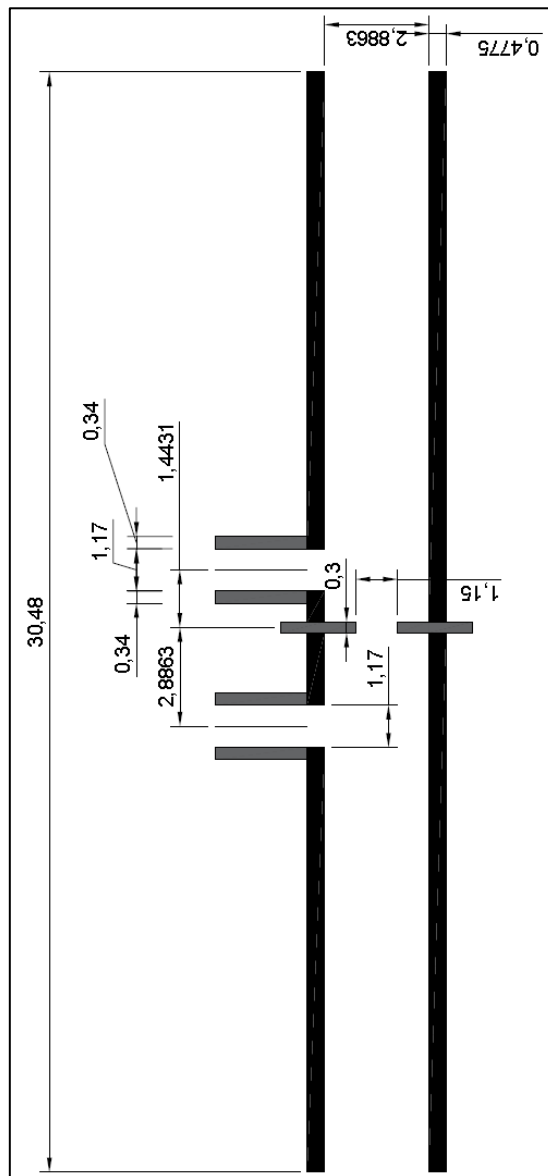
$$\beta = 0,40 = \frac{D_{\text{orificio}}}{D_{\text{tubería}}} = \frac{0,0115 \text{ m}}{0,028626 \text{ m}}$$

La ecuación 257 de flujo volumétrico para un medidor de orificio:

$$\dot{V} = K A_o \sqrt{2g (h_1 - h_2)} \quad \text{Ec. 257}$$

Basado en las medidas recomendadas para el dimensionamiento de un medidor de placa de orificio, las cuales se pueden observar en la figura 58, se elaboró el plano mostrado en la figura 141.

Figura 141. **Plano de medidor de placa de orificio**



Fuente: elaboración propia, empleando Autodesk AutoCAD 2017.

3.1.8.2. Medidor de Venturi

El medidor de Venturi también tiene un coeficiente beta de 0,4, y para el cálculo del flujo volumétrico se utiliza la ecuación 258:

$$\dot{V} = K A_o \sqrt{2g (h_1 - h_2)} \quad \text{Ec. 258}$$

La figura 142 muestra el medidor de Venturi utilizado en el equipo diseñado.

Figura 142. Elemento primario de Venturi



Fuente: GUATEMALADIGITAL. *Catalogo*.

<https://guatemaladigital.com/Dealglad+1+Inch+Irrigation+Venturi+Fertilizer+Injectors+Device+Garden+Water+Tube/Productos.aspx?Codigo=2184208>. Consulta: 8 de octubre de 2018.

El coeficiente beta es de igual forma:

$$\beta = 0,40 = \frac{D_{\text{venturi}}}{D_{\text{tubería}}} = \frac{0,0115 \text{ m}}{0,028626 \text{ m}}$$

3.1.8.3. Vertederos

En el caso de los vertederos se eligieron las dimensiones de acuerdo con las ecuaciones características de los vertederos.

- Vertedero rectangular de pared delgada

La ecuación 259 utilizada para medir el flujo volumétrico es:

$$\dot{V} = \frac{2}{3} \sqrt{2g} C_E b_E h_E^{\frac{3}{2}} \quad \text{Ec. 259}$$

Donde:

g : aceleración de la gravedad.

C_E : coeficiente efectivo de descarga sobre el vertedero.

b_E : ancho de vertedero efectivo, ver ecuación 260.

$$b_E = b + K_b \quad \text{Ec. 260}$$

h_E : carga efectiva sobre el vertedero, ver ecuación 261.

$$h_E = h_1 + K_h \quad \text{Ec. 261}$$

K_h : 0,001 m para todos los valores de b/B .

b : ancho del vertedero.

B : ancho de canal.

K_b : es función de la relación b/B .

La ecuación 259 es la expresión general para canales sobre vertederos rectangulares con contracciones laterales.

En la tabla XX se presentan los valores de K_b recomendados.

Tabla XX. **Valores de K_b recomendados por el Institute of Technology by Kindsvater and Carter 1957**

| Relación $\frac{b}{B}$ | K_B (m) | Relación $\frac{b}{B}$ | K_B (m) |
|------------------------|-----------|------------------------|-----------|
| 0 | 0,0024 | 0,6 | 0,0037 |
| 0,1 | 0,0024 | 0,7 | 0,0041 |
| 0,2 | 0,0024 | 0,8 | 0,0043 |
| 0,3 | 0,0025 | 0,9 | 0,0037 |
| 0,4 | 0,0027 | 1,0 | 0,0009 |
| 0,5 | 0,0030 | | |

Fuente: URRUTIA, Norberto. *Hidráulica de canales*. p. 6-38.

En la figura 143 se observan los coeficientes de descarga C_E para la ecuación 259.

Las dimensiones del vertedero rectangular (ver figura 118) construido son:

$$b = 12 \text{ cm}$$

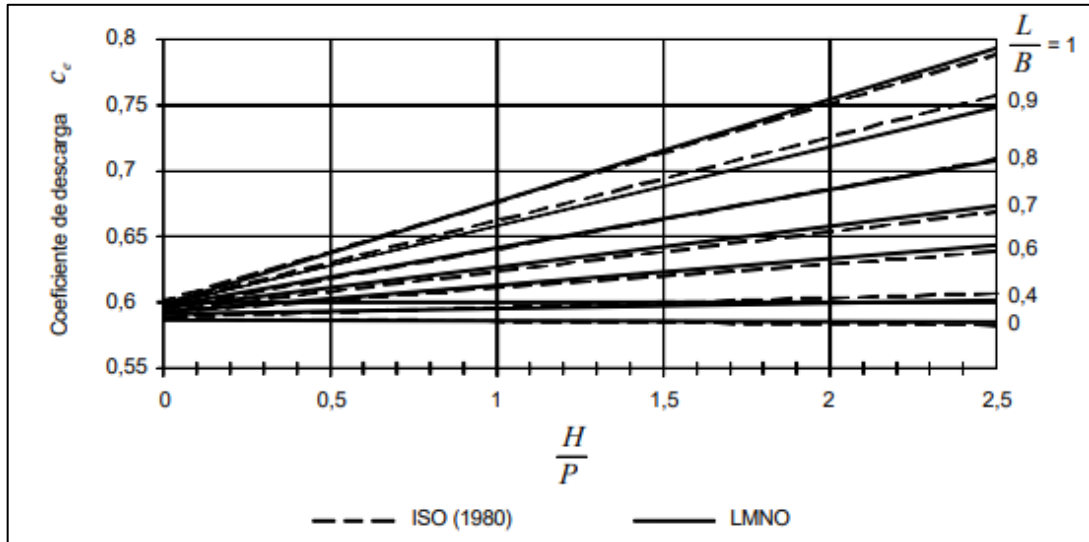
$$B = 28 \text{ cm}$$

$$w = 13 \text{ cm}$$

Calculando b/B:

$$\frac{b}{B} = \frac{12 \text{ cm}}{28 \text{ cm}} = 0,4286$$

Figura 143. Coeficiente de descarga según Kindsvater y Carter



Fuente: ACADEMIA PERUANA DE INGENIERÍA. *Biblioteca*. <http://apiperu.com.pe/wp-content/uploads/presentaciones/hidraulica/8-HIDRAULICA/index.htm>. Consulta: 10 de febrero de 2019.

El valor de h/w no varía significativamente para una relación de b/B de 0,4286, cabe destacar que b/B es equivalente a la relación L/B que se muestra en la figura 143.

Con base en la aclaración anterior, entonces se puede asumir que el valor C_E es casi constante para el vertedero diseñado, observando la figura 143 entonces se dice que el valor de C_E es:

$$C_E = 0,591$$

Calculando el valor de b_E :

$$b_E = 0,12 m + 0,002785 m$$

Sustituyendo los datos en la ecuación de Kindsvater y Carter:

$$\dot{V} = \frac{2}{3} \sqrt{2(9,81)} (0,591) (0,122785 m)(0,001m + h)^{\frac{3}{2}}$$

$$\dot{V} = 0,214285 * (0,001m + h)^{\frac{3}{2}}$$

La ecuación anterior es característica del vertedero rectangular.

- Vertedero triangular y trapezoidal de pared delgada

Para el vertedero triangular se utilizó un ángulo de 45 grados. Para la determinación del caudal se utilizó la ecuación 262:

$$\dot{V} = C h^n \quad Ec. 262$$

Experimentalmente se realizará una calibración y por medio de una regresión logarítmica se calculará el valor de los coeficientes C y n, como se muestra en la ecuación 263.

$$\ln Q = \ln C + n \ln H \quad Ec. 263$$

Cabe destacar que no existen modelos empíricos que cumplan con las condiciones de diseño de los vertederos a construir. De igual forma el vertedero rectangular también se calibrará.

3.1.9. Resumen de parámetros de diseño

A continuación, se muestra tabla XXI que resume los parámetros de diseño del equipo de medidores de flujo.

Tabla XXI. Parámetros de diseño

| Parámetro | Valor |
|--|---|
| Flujo volumétrico nominal de operación | $\dot{V} = 50 \text{ l/min}$ |
| Numero de Reynolds nominal | $Re = 36959$ |
| Velocidad media de operación | $v = 1,294816 \text{ m/s}$ |
| Diámetro real de tubería | $D = 0,028626 \text{ m}$ |
| Diámetro nominal de tubería | $D = 1 \text{ pulg}$ |
| Rugosidad absoluta de tubería | $\varepsilon = 0,00024 \text{ m}$ |
| Factor de fricción nominal | $f_D = 0,0379$ |
| Relación de diámetros | $\beta = 0,4$ |
| Coeficiente de descarga de Venturi | $K = 0,97$ |
| Coeficiente de descarga de placa de orificio | $K = 0,62$ |
| Carga dinámica total | $CDT = H_p = 19,21 \text{ m}$ |
| Potencia al freno | $P_F = 156,58 \text{ Watt}$ |
| Tensión nominal de equipo | $V = 120 \text{ voltios}$ |
| Corriente nominal | $A = 4,7 \text{ amperios}$ |
| Rango de medición del rotámetro | $\dot{V} = 10 - 80 \text{ l/min}$ |
| Exactitud del rotámetro | $\pm 4 \%$ |
| Rango de medición del medidor de turbina | $\dot{V} = 10 \text{ a } 120 \text{ l/min}$ |
| Exactitud del medidor de turbina | $\pm 1 \%$ |
| Reproducibilidad típica del medidor de turbina | $\pm 3 \%$ |

Fuente: elaboración propia.

3.2. Fase de construcción

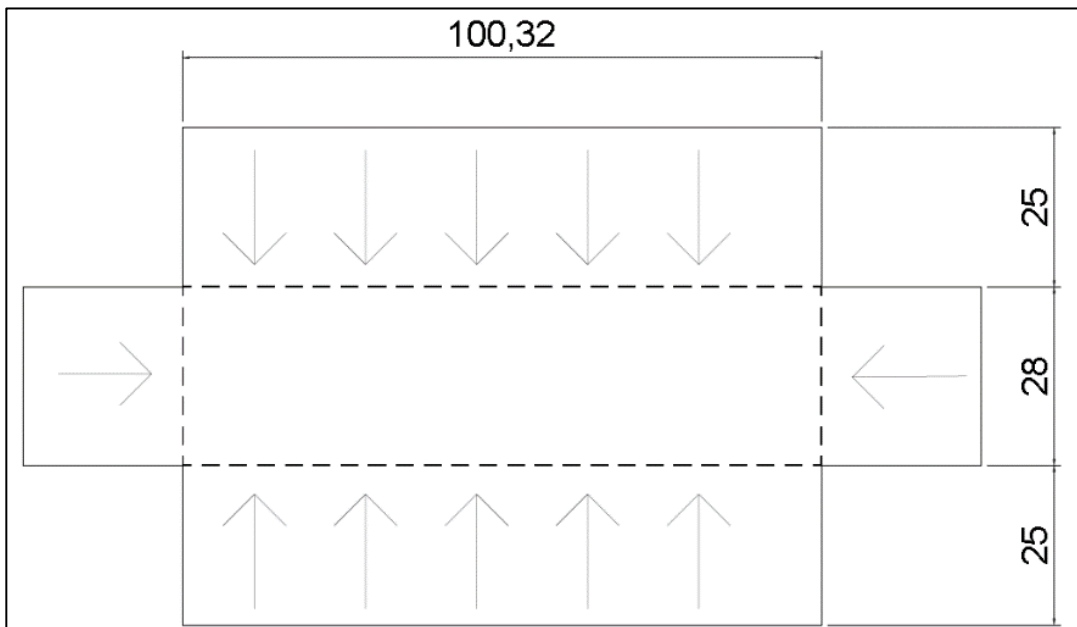
A continuación, se muestra la serie de pasos y procesos realizados en la fase de construcción del equipo. En los apéndices se puede encontrar una galería de imágenes del proceso de construcción.

3.2.1. Metalmecánica

La construcción del soporte metálico de la tubería se realizó con tubo cuadrado estructural de 2 pulgadas en acero negro.

- Se cortó una lámina de acero negro con las dimensiones y dobleces mostrados en la figura 144 para el canal.

Figura 144. Plano de cortes y dobleces de canal

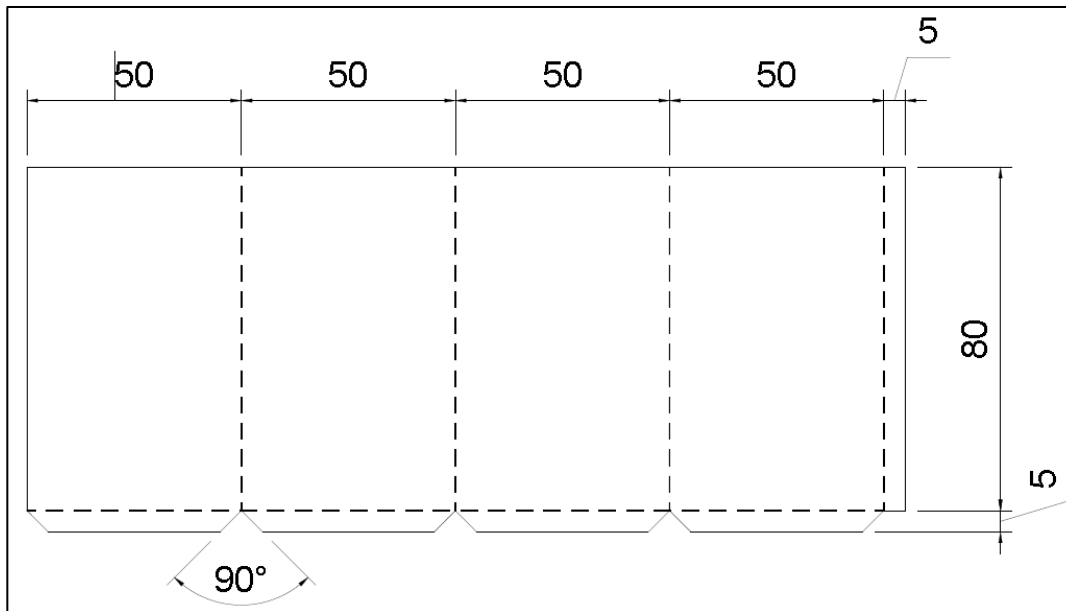


Fuente: elaboración propia, empleando Autodesk AutoCAD 2017.

Las líneas discontinuas indican que hay un doblez y las líneas continuas indican un corte.

- Se cortaron los tubos cuadrados de 2 pulgadas en: 8 secciones de 151,19 cm, 4 secciones de 191,91 cm, 14 secciones de 26,19 cm, 2 secciones de 24,92 cm, 4 secciones de 100,32 cm, 5 secciones de 76,19 cm, 4 secciones de 20,38 cm, 4 secciones de 50,32 cm, 4 de 90,32 cm.
- Se cortaron los tubos circulares galvanizados de 1 pulgada de diámetro nominal en: 2 secciones de 86 cm, 4 secciones de 75,5 cm, 1 sección de 16,5 cm, 1 sección de 37,5 cm, 1 sección de 45, 72 cm y 1 sección de 8,89 cm.
- A las secciones anteriores se les hizo una rosca NPT de 1 pulgada en cada extremo para crear niples galvanizados.
- Se cortó por la mitad un niple de 12 pulgadas
- Se cortó una barra de acero plano de 1 ½ pulgada de ancho por 1/8 de espesor y 6 metros de longitud en: 4 secciones de 101,76 cm y 2 de 28 cm.
- Se realizaron cortes en una placa de vinil de 3 mm de espesor en: 3 cuadrados de 20 cm, y se realizaron diversos cortes como se indican en el plano de vertederos triangular, rectangular y trapezoidal.
- A una lámina de acero negro de 8 pies por 3 pies se realizaron los cortes de la figura 145, para construir el tanque de almacenamiento de agua

Figura 145. **Plano de cortes y dobleces del tanque de almacenamiento de agua**



Fuente: elaboración propia, empleando Autodesk AutoCAD 2017.

3.2.2. Soldadura MMA con arco eléctrico

- Se colocó el equipo de protección personal: guantes, overol, bata de soldadura de cuero, careta con foto sensor para soldar.
- Se armó el equipo se soldadura con electrodo revestido.
- Se conectó el equipo, a la alimentación de energía de 240 V x 60 A.
- Se fijaron con prensas las piezas a soldar.
- Se conectó el cable positivo a la pieza.
- Se colocó un electrodo 6013 punto verde en el porta-electrodo.
- Se encendió el equipo de soldadura.
- Se procedió a crear el arco eléctrico con la técnica de raspado.

- Se soldaron las piezas utilizando la técnica de avance zigzag.
- Se esperó a que la del cordón de soldadura pasara de un color rojizo a color negro.
- Se golpeó ligeramente el cordón de soldadura, para romper la capa de escoria.
- Se limó con un cepillo de alambre el cordón de soldadura, para quitar los restos de escoria.
- Se esperó que la pieza se enfriara.
- Se desbastó el cordón de soldadura con una esmeriladora angular de 4 ¼ pulg.
- Se pulió el cordón de soldadura con un disco de lija de grano 120.
- Se limpió con waípe y thinner la pieza.
- Se repitieron los pasos 4 al 16 de acuerdo con la cantidad de piezas a soldar.

3.2.3. Aplicación de pintura, revestimientos y resinas epóxicas.

- Se limpió con thinner las piezas a pintar

- Se preparó la pintura de aceite color acero, mezclando la pintura con thinner en una proporción de 50 % en volumen.
- Se preparó una mezcla de imprimación de pintura de color acero, mezclando la pintura en una proporción de 70 % de thinner en volumen.
- Se aplicó la mezcla imprimante al tablero eléctrico, utilizando una pistola de aspersión por aire comprimido y un compresor de aire.
- Se esperó 1 hora para que la mezcla imprimante secará
- Se aplicaron 3 capas de pintura al 50 % utilizando la técnica de aspersión con aire comprimido, dejando 3 horas de secado entre cada capa.
- Se dejó secar la pintura por 2 días.
- Se preparó la pintura base anticorrosiva gris con solvente mineral en una proporción de 75 % de pintura en volumen.
- Se preparó la pintura anticorrosiva de secado ultra rápido, en una proporción de 80 % de pintura y 20 % de solvente en volumen.
- Se aplicó la pintura de base anticorrosiva con una pistola y aire comprimido.
- Se aplicó 3 capas de pintura anticorrosiva de secado ultra rápido SURCOLOR especial con pistola y aire comprimido con una brocha, dejando 30 minutos de secado entre cada capa.

- Se dejó secar el soporte del reactor por un día.
- Se aplicó 2 capas de pintura rojo oxido anticorrosiva de acabado brillante a la tubería de acero galvanizado.
- Se dejó secar la tubería por 1 día y se dejó 5 horas entre cada capa.
- Se aplicó 3 capas de pintura amarilla Caterpillar al canal y al tanque de almacenamiento de agua dejando 5 horas entre cada capa.
- Se dejó secar el tanque y el canal por un tiempo de 2 días.

3.2.4. Corte y ensamblaje de tubería de PVC

- Se cortó un tubo de PVC en: 1 sección de 65 cm, 1 sección de 50 cm, 1 sección de 30 cm.
- Se pegaron los codos, bushing reductores, adaptadores machos, entre otros; a las secciones de tubo PVC de 1 pulgada, utilizando pegamento para PVC.

3.2.5. Armado de circuito eléctrico

- Se procedió a realizar las perforaciones necesarias para instalar los botones de encendido, paro de emergencia, luces piloto y medidores de voltaje y amperaje.

- Se procedió a montar en el lugar correspondiente la bomba centrífuga de 3/4 hp y se instaló una caja de registro para exterior JSL cuadrada de 80 x 80 x 50 mm.
- Se instaló la tubería eléctrica de PVC gris para exterior.
- Se realizó la acometida de cables desde la bomba al tablero eléctrico.
- Se procedió a realizar las conexiones eléctricas utilizando un banco de bornes de todos los componentes descritos en el paso 1.

3.2.6. Montaje de tubería, accesorios y medidores de flujo

- Se tomó el soporte del reactor, y se montó el tablero eléctrico, utilizando tornillos de cabeza hexagonal de acero negro de 3/8 pulg. y empaques plásticos verdes de 3/4 pulg.
- Se ensamblaron las secciones de tuberías utilizando diferentes tipos de accesorios roscados de acero galvanizado: codos, uniones universales, coplas.
- Se colocaron los medidores de flujo utilizando teflón como empaque,
- Se realizó el apriete respectivo para cada componente instalado para ello se empleó llaves Stillson de tubería.
- Se procedió a colocar abrazaderas para fijación de la tubería al soporte.

- Se procedió a instalar la tubería de succión de bomba, para ello se acopló la unión universal correspondiente.
- Se procedió a instalar los manómetros y el vacuómetro para medición de presión en el sistema.
- Se colocaron 30 cientos de canicas de $\frac{1}{2}$ pulgada de diámetro en el empaque disipación de energía del canal.
- Se aseguró el soporte del empaque del canal por medio de una barra roscada y tuercas.
- Se procedió a montar el vertedero triangular.
- Se perforó con una broca de $\frac{3}{8}$ pulg el canal para instalar el medidor de nivel de profundidad del agua.
- Se instaló el medidor de ranura.

4. RESULTADOS

En este capítulo se exponen los resultados de la experimentación y calibración de los medidores de flujo.

4.1. Fase de validación

En esta etapa se realizaron distintos procedimientos con el fin de verificar el correcto funcionamiento del equipo construido, en primer lugar, se realizaron pruebas de fugas y eléctricas. Posteriormente se procedió a la calibración de la bomba y luego de los instrumentos de medición.

En los siguientes apartados se describen los procedimientos realizados para la validación del equipo.

4.1.1. Prueba de fugas

- Se llenó el tanque de almacenamiento de agua con 180 litros de agua, equivalentes a una capacidad de 90 % del tanque.
- Se verificó que el interruptor S1 del tablero eléctrico estuviera en posición de apagado.
- Se verificó que el botón de paro de emergencia S2 estuviera desactivado.
- Se conectó el equipo a la fuente de alimentación de energía de 120 V.

- Se abrió la válvula de globo VALV1 un 20 % equivalente a 2/3 de una vuelta.
- Se abrió la válvula de bola VALV2 al 50 %.
- Se accionó el interruptor S1 encendiendo la bomba B1.
- Se dejó estabilizar el sistema por 30 segundos.
- Se abrió completamente la válvula VALV 2.
- Se abrió gradualmente la válvula VALV1 hasta alcanzar el 100 %.
- Se procedió a revisar todas las uniones roscadas de la tubería.
- Se revisó la conexión de los manómetros.
- Se revisaron las uniones soldadas del medidor de placa de orificio.
- Se revisaron las soldaduras del tanque de almacenamiento de agua.
- Se revisaron las uniones del medidor de ranura.
- Se revisaron las uniones de la tubería de PVC.
- Se revisaron las uniones soldadas del canal y el vertedero.
- Se procedió a realizar las anotaciones de la inspección visual y posteriormente se corrigieron las fugas.
- Luego de realizar las correcciones respectivas se repitió el procedimiento descrito en los pasos anteriores para verificar que las correcciones fueron efectivas.

4.1.2. Pruebas eléctricas

Las pruebas eléctricas se realizaron antes de la prueba de fugas con el objetivo reducir la posibilidad de fallas eléctricas durante las pruebas posteriores.

La primera prueba consistió en verificar conexiones eléctricas sin conectar la bomba B1:

- Se abrió el panel eléctrico y caja de registro.

- Se desconectó la bomba B1.
- Se tomó el plano eléctrico y se verificaron que los bornes de las conexiones estuvieran apretados.
- Se verificó cable por cable que la conexión estuviera correctamente sujeta.
- Se verificó que los cables estuvieran correctamente empalmados o sujetos a los siguientes elementos del panel eléctrico: interruptor S1, botón de paro de emergencia S2, luz piloto verde D1, luz piloto roja D2, medidor de voltaje VOLT1 y medidor de corriente eléctrica AMP1.
- Se verificó que los cables cumplieran con el código de colores internacional para conexiones eléctricas residenciales: verde para conexiones a tierra física, negro para línea neutra y blanco para línea viva o de corriente.
- Se verificó que los cables no tuvieran partes peladas o quebradas.
- Con ayuda de un multímetro se comprobó la continuidad de los cables y del circuito eléctrico.
- Se verificó que el interruptor S1 no estuviera accionado.
- Se verificó que el botón de paro de emergencia estuviera desactivado.
- Se conectó el equipo a la fuente de alimentación de energía eléctrica de 120 V.

- Se procedió a verificar el voltaje en las distintas partes del circuito.
- Se verificó que ningún componente presentara sobrecalentamiento.
- Con un multímetro digital se comprobó que el tablero eléctrico no presentara un circuito eléctrico, para ello se aterrizó la línea neutra del voltímetro.
- Se verificó que la lectura del voltaje en el medidor respectivo tuviera una medida correcta.
- Se repitieron los pasos anteriores dos veces más por motivo de seguridad.

Para la segunda prueba se conectó a bomba y se procedió a encender el equipo, con la bomba funcionando, pero con las válvulas VALV1 y VALV2 cerradas:

- Se abrió el panel eléctrico y caja de registro.
- Se desconectó la bomba B1 y se colocó un amperímetro en serie para medir el voltaje del equipo.
- Se verificó que el interruptor S1 no estuviera accionado.
- Se verificó que el botón de paro de emergencia estuviera desactivado.
- Se conectó el equipo a la fuente de alimentación de energía eléctrica de 120 V.

- Se procedió a verificar el voltaje en las distintas partes del circuito.
- Se verificó que ningún componente presentara sobrecalentamiento.
- Con un multímetro digital se comprobó que el tablero eléctrico no presentara un circuito eléctrico, para ello se aterrizó la línea neutra del voltímetro.
- Se verificó que la lectura del voltaje en el medidor respectivo tuviera una medida correcta.
- Se verificó que la lectura de corriente eléctrica en el amperímetro AMP1 fuera la correcta para un consumo equivalente a una potencia de 3/4 hp.
- Se repitieron los pasos anteriores dos veces más por motivo de seguridad.

4.1.3. Calibración de medidor de turbina

La calibración de medidor de Venturi se realizó mediante la corrección del valor del factor de calibración del instrumento ingresando valores a prueba y error.

A continuación, se describe el procedimiento:

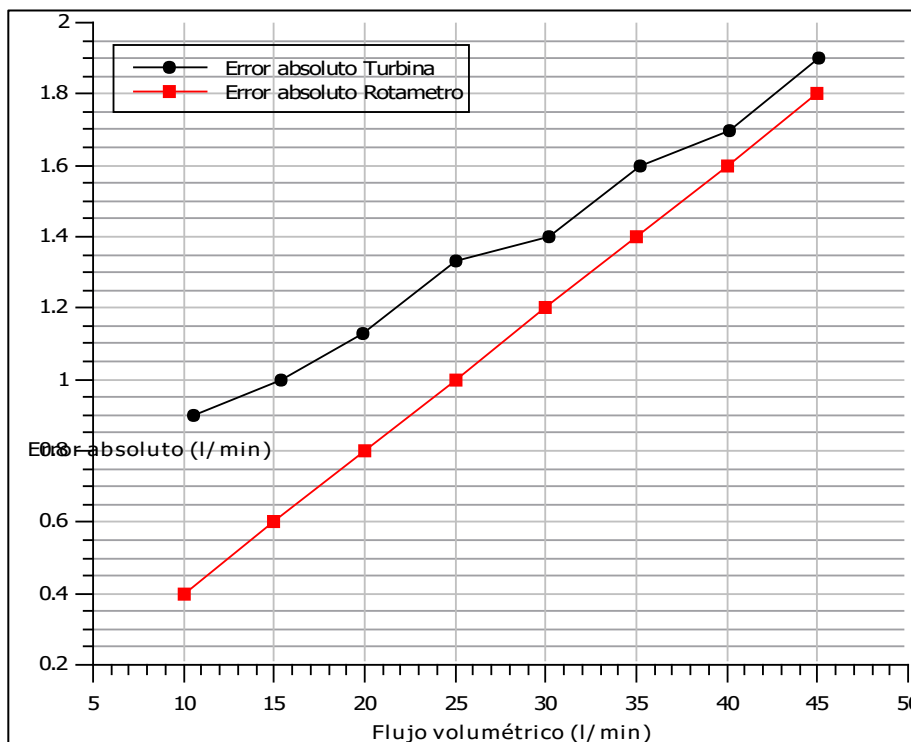
- Se pulsó por 5 segundos el botón CAL.
- Se ingresó un valor aleatorio cercano a 1 000.
- Se pulsó por 5 segundos el botón CAL.
- Se accionó la bomba centrífuga y se verificó el flujo volumétrico del rotámetro respecto al del medidor de turbina.

- Realizando este procedimiento varias veces se determinó que el factor de calibración del medidor para agua a 25 °C es 1099.

Luego de determinar el factor de calibración se procedió a verificar el error de la lectura del medidor de turbina respecto al instrumento patrón (rotámetro).

En la figura 146 se observan los valores del error relativo y el error absoluto en función del flujo volumétrico medido por el instrumento.

Figura 146. **Errores absolutos del medidor de turbina**

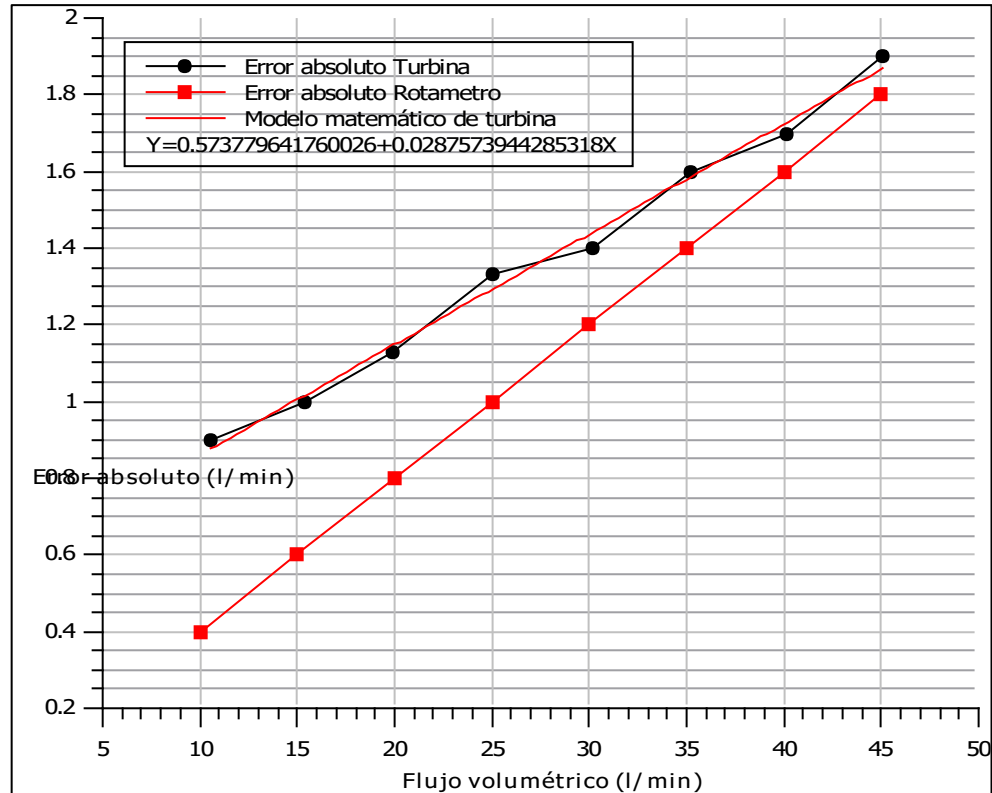


Fuente: elaboración propia, empleando QtiPlot 0.9.8.9 svn 2288.

Realizando una regresión lineal a los datos del medidor de turbina se obtiene la ecuación 264 para el error absoluto de flujo volumétrico del medidor de turbina.

$$\text{Error abs } \dot{V} = 0,573779 + 0,02875 \dot{V} \quad \text{Ec. 264}$$

Figura 147. **Regresión lineal del error absoluto de flujo volumétrico de medidor de turbina**



Fuente: elaboración propia, empleando QtiPlot 0.9.8.9 svn 2288.

Para la obtención de los datos anteriores se realizaron tres pruebas, los datos presentados corresponden a las medias aritméticas.

4.1.4. Calibración de medidor de Venturi

Para la calibración de medidor de Venturi se tomaron las presiones en los manómetros instalados en para calcular los coeficientes c y m de una correlación, como la mostrada en la ecuación 265:

$$\dot{V} = C(\Delta P)^m \quad Ec. 265$$

Donde:

\dot{V} : flujo volumétrico

C : coeficiente de calibración

m : coeficiente de calibración

ΔP : diferencia de presión

Para ello se realizaron tres pruebas y se tomaron los valores experimentales de flujo volumétrico y diferencia de presión, presentados en la tabla XXII.

Tabla XXII. **Valores promedio de flujo volumétrico y diferencial de presión para medidor de Venturi**

| Flujo volumétrico (l/min) | P1-P2 (psi) |
|---------------------------|-------------|
| 45,00 | 20,33 |
| 40,00 | 13,83 |
| 35,00 | 7,17 |
| 30,00 | 4,67 |
| 25,00 | 2,33 |
| 20,00 | 1,50 |
| 15,00 | 1,17 |
| 10,00 | 0,67 |

Fuente: elaboración propia, apéndice 1.

Para determinar el valor de los coeficientes C y m se realizó una linealización de la ecuación 265 del flujo volumétrico como se observa en la ecuación 266:

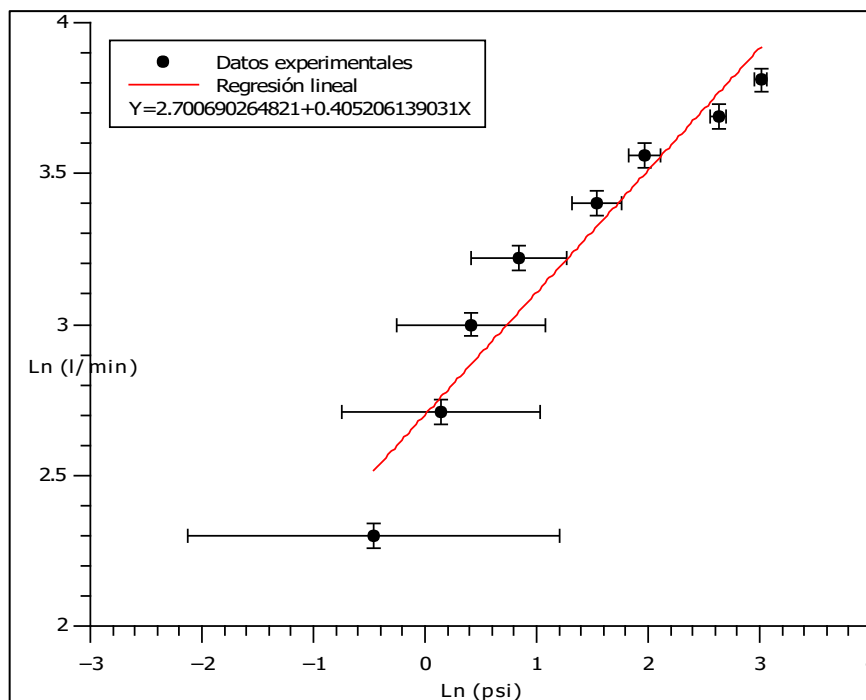
$$\ln(\dot{V}) = \ln(C) + m \ln(\Delta P) \quad \text{Ec. 266}$$

Representado una ecuación de lineal de primer grado, como la ecuación 267.

$$y = b + m x \quad \text{Ec. 267}$$

La regresión lineal se realizó con el software QtiPlot 0.9.8.9 svn 2288.

Figura 148. **Logaritmo natural del flujo volumétrico versus el logaritmo natural del diferencial de presión para medidor de Venturi**



Fuente: elaboración propia, empleando QtiPlot 0.9.8.9 svn 2288.

La ecuación obtenida de acuerdo a la regresión lineal, es:

$$\ln(\dot{V}) = 2,70069 + 0,4052 \ln(\Delta P)$$

El modelo matemático tiene un valor de correlación:

$$r^2 = 0,933$$

De esta ecuación se obtiene el valor del coeficiente m :

$$m = 0,4052 \pm 0,012227$$

El valor de C se obtiene elevando el valor del $\ln(C)$ dentro del número e :

$$C = e^{2,70069}$$

La incerteza de $\ln(C)$ es:

$$\Delta \ln(C) = 0,020949$$

De acuerdo con las reglas de propagación de errores cuando un valor es exponentiado la incerteza se calcula así:

$$\Delta C = e^{\ln(C)} \Delta \ln(C)$$

Calculando el valor la incerteza del coeficiente C :

$$\Delta C = 14,89 (0,020949)$$

$$\Delta C = 0,311938$$

De tal forma que el valor del coeficiente C se expresa:

$$C = 14,89 \pm 0,31193$$

La ecuación de calibración del flujo volumétrico es:

$$\dot{V} = 14,89 \Delta P^{0,4052}$$

Para determinar la incerteza del flujo volumétrico utilizando esta ecuación se realiza una derivación parcial de cada componente de la ecuación:

$$\Delta \dot{V} = \left| \frac{\partial \dot{V}}{\partial C} \right| \Delta C + \left| \frac{\partial \dot{V}}{\partial \Delta P} \right| \Delta \Delta P + \left| \frac{\partial \dot{V}}{\partial m} \right| \Delta m$$

Se realizando las derivaciones parciales se obtiene la siguiente función:

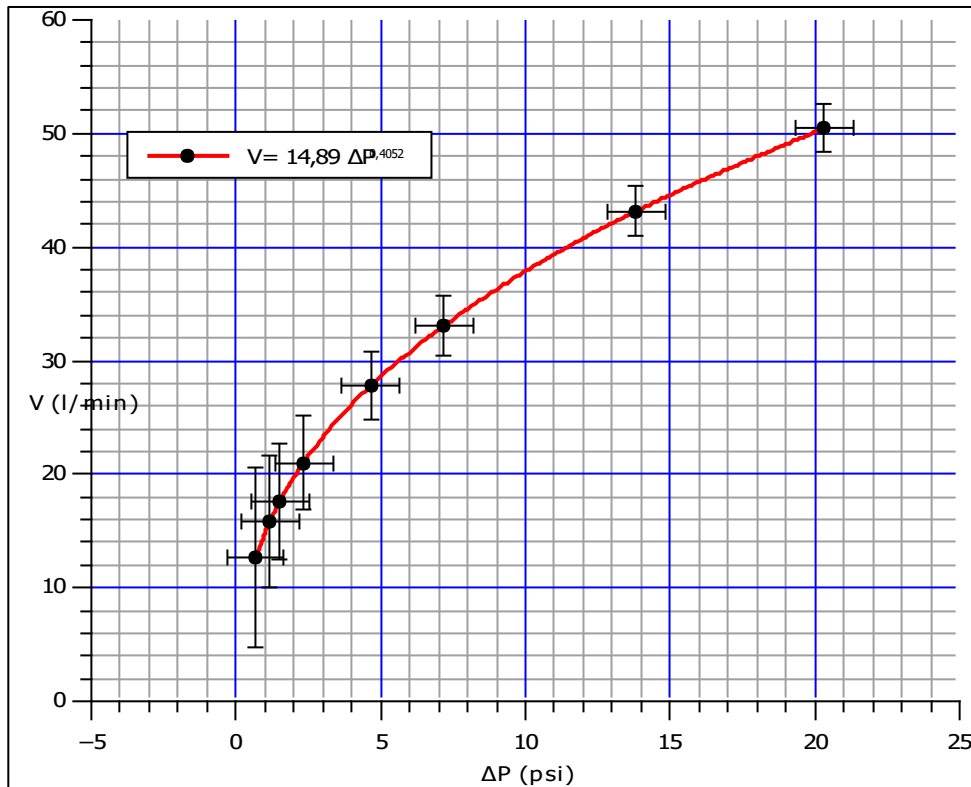
$$\Delta \dot{V} = |\Delta P^m| \Delta C + |C m \Delta P^{m-1}| \Delta \Delta P + |c \Delta P^m \ln(\Delta P)| \Delta m$$

Sustituyendo los valores respectivos se obtiene la función de la incerteza del flujo volumétrico en función del diferencial de presión.

$$\Delta \dot{V} = |\Delta P^{0,4052}| * 0,311938 + |14,89 * 0,4052 * \Delta P^{0,4052-1}| * \Delta \Delta P \\ + |14,89 * \Delta P^{0,4052} * \ln(\Delta P)| * 0,012227$$

Luego de obtener las ecuaciones de flujo volumétrico e incerteza de este, se procedió a calcular el valor del flujo volumétrico para los valores del diferencial de presión. A partir de estos datos se construyó el siguiente gráfico mostrado en la figura 149.

Figura 149. **Flujo volumétrico versus diferencial de presión para medidor de Venturi utilizando el modelo matemático determinado**



Fuente: elaboración propia, empleando QtiPlot 0.9.8.9 svn 2288.

4.1.5. Calibración del medidor de orificio

El procedimiento de calibración del medidor de orificio es exactamente igual que el procedimiento de medidor de Venturi, por lo que se omitirá la explicación de este.

La ecuación que describe el comportamiento del flujo volumétrico en función de la diferencia de presión es:

$$\dot{V} = C \Delta P^m$$

En la tabla XXII se muestran los valores promedio del flujo volumétrico y diferencial de presión para el medidor de placa de orificio.

Tabla XXIII. **Valores promedio de flujo volumétrico y diferencial de presión para medidor de placa de orificio**

| Flujo volumétrico (l/min) | P1-P2 (psi) |
|---------------------------|-------------|
| 45,00 | 10,00 |
| 40,00 | 9,00 |
| 35,00 | 8,00 |
| 30,00 | 7,50 |
| 25,00 | 6,83 |
| 20,00 | 6,17 |
| 15,00 | 5,33 |
| 10,00 | 4,00 |

Fuente: elaboración propia.

De la regresión lineal se obtuvo el siguiente modelo matemático:

$$\ln(\dot{V}) = \ln(C) + m \ln(\Delta P)$$

$$\ln(\dot{V}) = -0,112579 + 1,728909 \ln(\Delta P)$$

Los valores de las incertezas de los coeficientes son:

$$\Delta m = \pm 0,050777$$

$$\Delta \ln(C) = \pm 0,0986389$$

$$\Delta C = e^{\ln(C)} * \Delta \ln(C)$$

$$\Delta C = \pm e^{-0,112579} * 0,0986389$$

$$\Delta C = \pm 0,088136$$

El valor del coeficiente C es:

$$C = 0,893527$$

El valor del coeficiente m es:

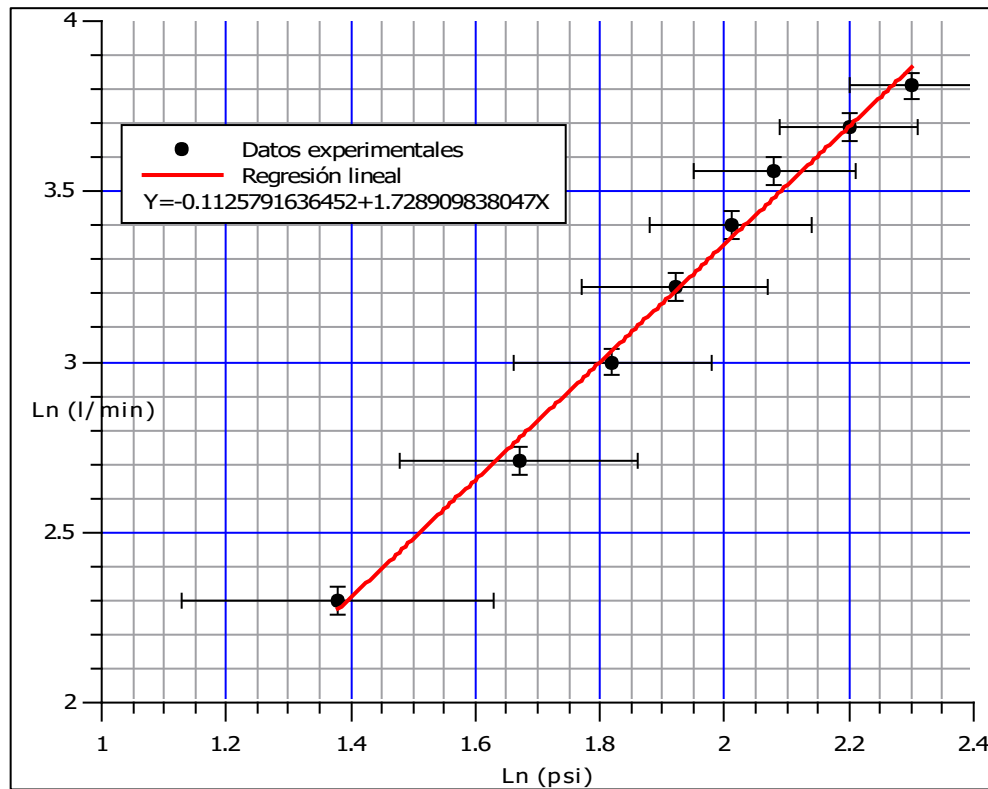
$$m = 1,728909$$

En la figura 150 se muestra el grafico de linealización del flujo volumétrico en función del diferencial de presión.

El modelo matemático que representa el flujo volumétrico en función del diferencial de presión para el medidor de placa de orificio es:

$$\dot{V} = 0,893526 \Delta P^{1,728909}$$

Figura 150. **Logaritmo natural del flujo volumétrico versus el logaritmo natural del diferencial de presión para medidor de placa de orificio**



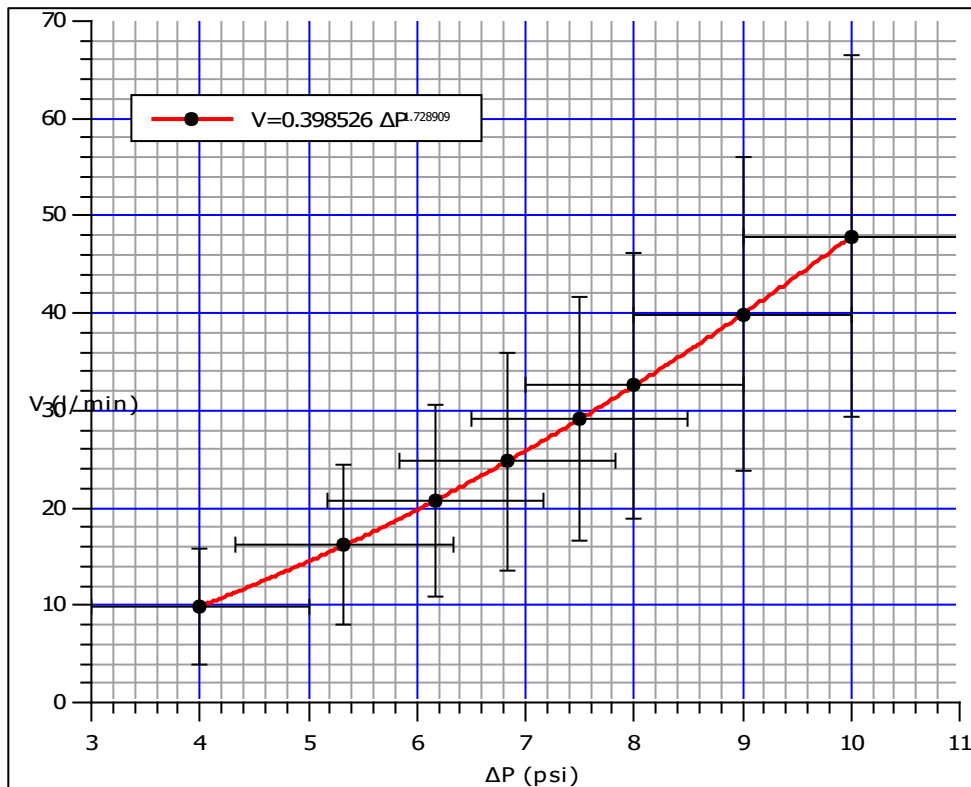
Fuente: elaboración propia, empleando QtiPlot 0.9.8.9 svn 2288.

El valor de la incerteza del modelo matemático se calcula utilizando la siguiente ecuación.

$$\Delta \dot{V} = |\Delta P^{1,728909}| * 0,088136 + |0,893526 * 1,728909 * \Delta P^{1,728909-1}| \Delta \Delta P + |0,893526 \Delta P^{1,728909} Ln(\Delta P)| * 0,050777$$

En la figura 151 se muestra la gráfica del flujo volumétrico corregido en función del diferencial de presión utilizando el modelo matemático determinado.

Figura 151. **Flujo volumétrico versus diferencial de presión para medidor de orificio utilizando el modelo matemático determinado**



Fuente: elaboración propia, empleando QtiPlot 0.9.8.9 svn 2288.

4.1.6. **Calibración de medidor de ranura**

Para la calibración de este medidor de flujo se realizó una regresión polinomial con los datos experimentales mostrados en la tabla XXIV.

Tabla XXIV. **Valores promedio de flujo volumétrico y diferencial de presión para medidor de flujo de ranura**

| Rotámetro | Promedio | L1 | Flujo volumétrico |
|-----------|----------|----------------|-------------------|
| (l/min) | L1 (cm) | Error abs (cm) | Error abs (l/min) |
| 45,00 | 6,77 | 0,05 | 1,80 |
| 40,00 | 6,17 | 0,05 | 1,60 |
| 35,00 | 5,73 | 0,05 | 1,40 |
| 30,00 | 5,47 | 0,05 | 1,20 |
| 25,00 | 5,17 | 0,05 | 1,00 |
| 20,00 | 4,83 | 0,05 | 0,80 |
| 15,00 | 4,50 | 0,05 | 0,60 |
| 10,00 | 4,03 | 0,05 | 0,40 |

Fuente: tabla xxxx datos calculados, apéndice 1.

Luego de obtener la tabla XXIV se procedió a construir las gráficas y determinar una correlación polinomial. De lo cual se determinó un modelo matemático de la forma:

$$\dot{V} = b + m H$$

Los coeficientes a , b , c y d son:

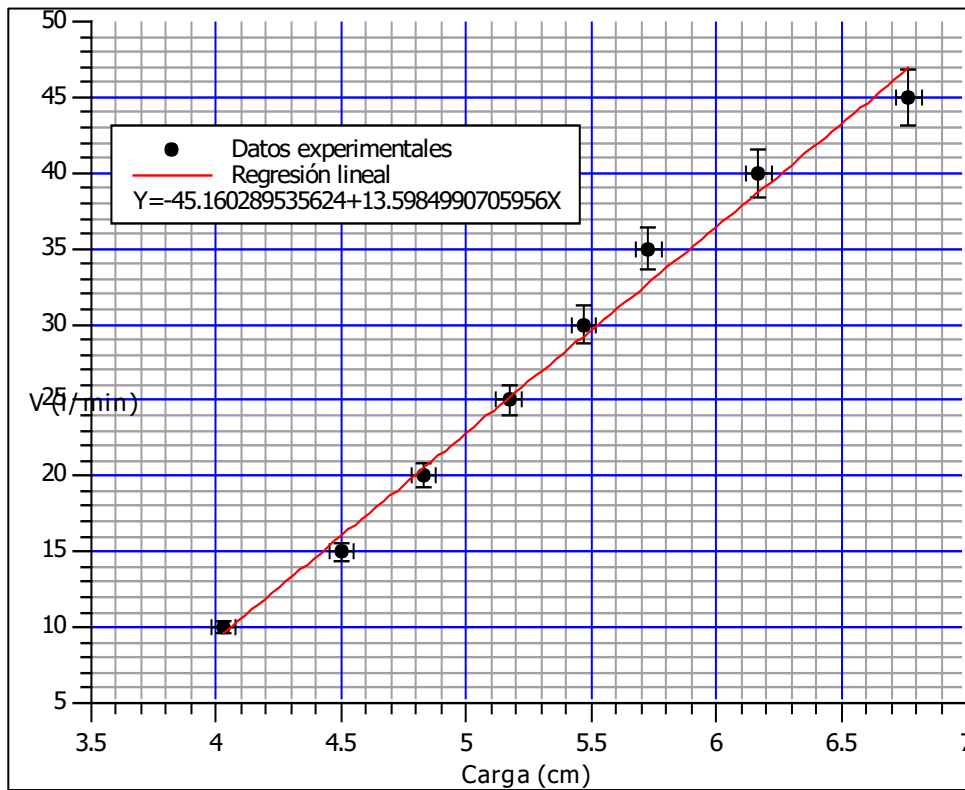
$$b = -45,1602 \pm 1,8773$$

$$m = 13,5984 \pm 0,4067$$

$$\dot{V} = -45,1602 + 13,5984 * H$$

En la figura 152 se muestra la regresión lineal realizada con los datos de la tabla XXIV.

Figura 152. **Valores promedio de flujo volumétrico versus la carga para el medidor de flujo de ranura**



Fuente: Fuente: elaboración propia, empleando QtiPlot 0.9.8.9 svn 2288.

Para la determinación de la incerteza de los valores determinados con el modelo matemático se recurre al método de la derivación parcial:

$$\Delta \dot{V} = \left| \frac{\partial \dot{V}}{\partial b} \right| \Delta b + \left| \frac{\partial \dot{V}}{\partial m} \right| \Delta m + \left| \frac{\partial \dot{V}}{\partial H} \right| \Delta H$$

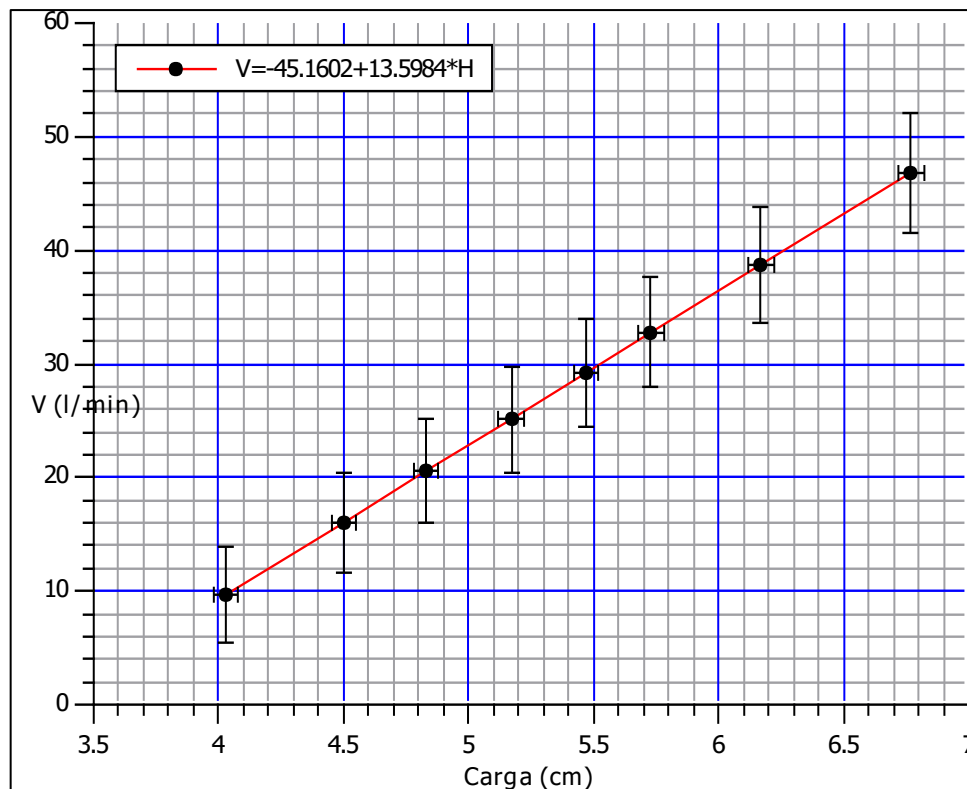
$$\Delta\dot{V} = |1|1,8773 + |H|0,4067 + |13,5984|\Delta H$$

Simplificando:

$$\Delta\dot{V} = 1,8773 + |H|0,4067 + |13,5984|\Delta H$$

Luego de esto se procedió a construir la gráfica de calibración del flujo volumétrico en función de la carga, ver figura 153.

Figura 153. **Flujo volumétrico versus carga para medidor de ranura utilizando el modelo matemático determinado**



Fuente: Fuente: elaboración propia, empleando QtiPlot 0.9.8.9 svn 2288.

4.1.7. Calibración de medidores de vertedero

La fórmula general para la calibración de vertederos se muestra en la ecuación 268:

$$\dot{V} = KH^n \quad \text{Ec. 268}$$

Para calcular los coeficientes K y n se realiza una regresión lineal con los valores de logaritmo natural de flujo (\dot{V}) y la carga (H), ver ecuación 269.

$$\text{Ln}(\dot{V}) = \text{Ln}(K) + n \text{Ln}(H) \quad \text{Ec. 269}$$

De tal forma que la ecuación 269 tiene la forma de una ecuación lineal, ver ecuación 270.

$$y = b + m x \quad \text{Ec. 270}$$

Para la determinación de la propagación de incertezas se utiliza el método de la derivación parcial:

$$\Delta\dot{V} = \left| \frac{\partial\dot{V}}{\partial K} \right| \Delta K + \left| \frac{\partial\dot{V}}{\partial n} \right| \Delta n + \left| \frac{\partial\dot{V}}{\partial H} \right| \Delta H$$

4.1.7.1. Calibración de vertedero con compuerta triangular

Los valores experimentales de las tres pruebas realizadas se resumen en la tabla XXV, estos valores corresponden a la media aritmética de las tres repeticiones.

Tabla XXV. **Valores promedio de flujo volumétrico y carga para el medidor de vertedero triangular para canal abierto**

| Rotámetro (l/min) | Carga (cm) | Error carga (cm) | Error flujo (l/min) |
|-------------------|------------|------------------|---------------------|
| 45,00 | 6,57 | 0,05 | 1,80 |
| 40,00 | 6,27 | 0,05 | 1,60 |
| 35,00 | 5,83 | 0,05 | 1,40 |
| 30,00 | 5,53 | 0,05 | 1,20 |
| 25,00 | 5,13 | 0,05 | 1,00 |
| 20,00 | 4,73 | 0,05 | 0,80 |
| 15,00 | 4,30 | 0,05 | 0,60 |
| 10,00 | 3,67 | 0,05 | 0,40 |

Fuente: elaboración propia, datos calculados, apéndice 1.

En la figura 154 el modelo matemático determinado es:

$$\ln(\dot{V}) = -1,0827 + 2,6143 \ln(H)$$

Entonces:

$$\ln(K) = -1,0827 \pm 0,1265$$

$$K = 0,33868$$

La incerteza de K se determina por la siguiente fórmula:

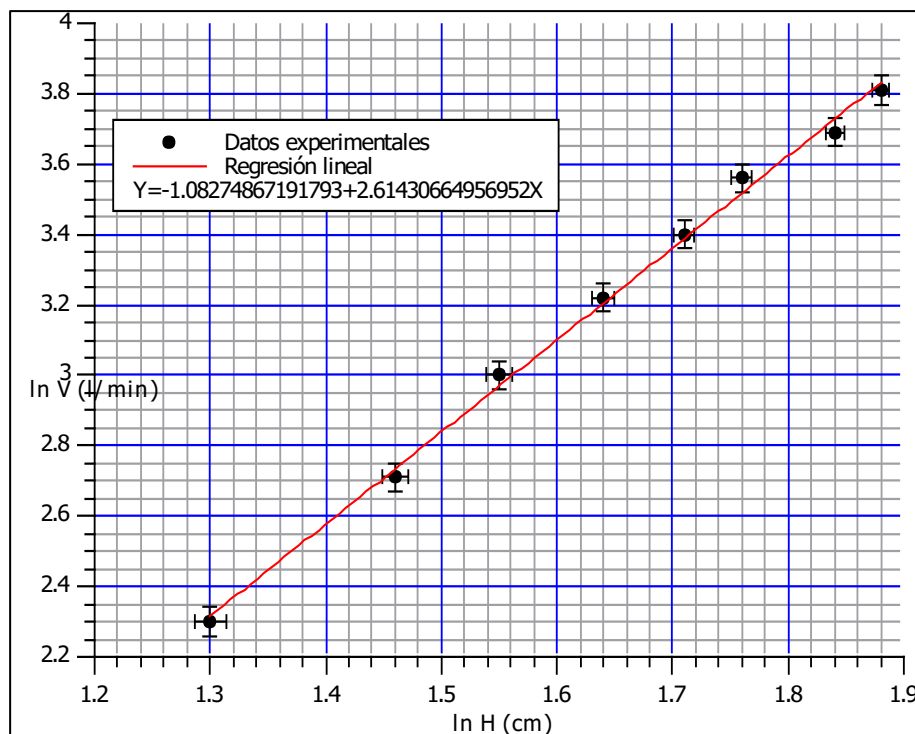
$$\Delta K = \pm e^{\ln(K)} \Delta \ln(K)$$

Sustituyendo valores, se obtiene la incerteza de K , del modelo mostrado en la figura 154:

$$\Delta K = \pm e^{-1,0827}(0,1265)$$

$$\Delta K = 0,042843$$

Figura 154. **Logaritmo natural del flujo volumétrico versus el logaritmo natural de la carga para medidor de vertedero triangular en canal abierto**



Fuente: elaboración propia, empleando QtiPlot 0.9.8.9 svn 2288.

El valor de n corresponde directamente al valor m de la pendiente de la ecuación lineal de primer grado obtenida por la regresión lineal:

$$n = 2,6143 \pm 0,0765$$

Sustituyendo en la ecuación de flujo volumétrico:

$$\dot{V} = 0,33868 H^{2,6143}$$

Determinando la función del error:

$$\Delta\dot{V} = \pm |H^n|\Delta K + |KnH^{n-1}|\Delta H + |H^n \ln(H) K|\Delta n$$

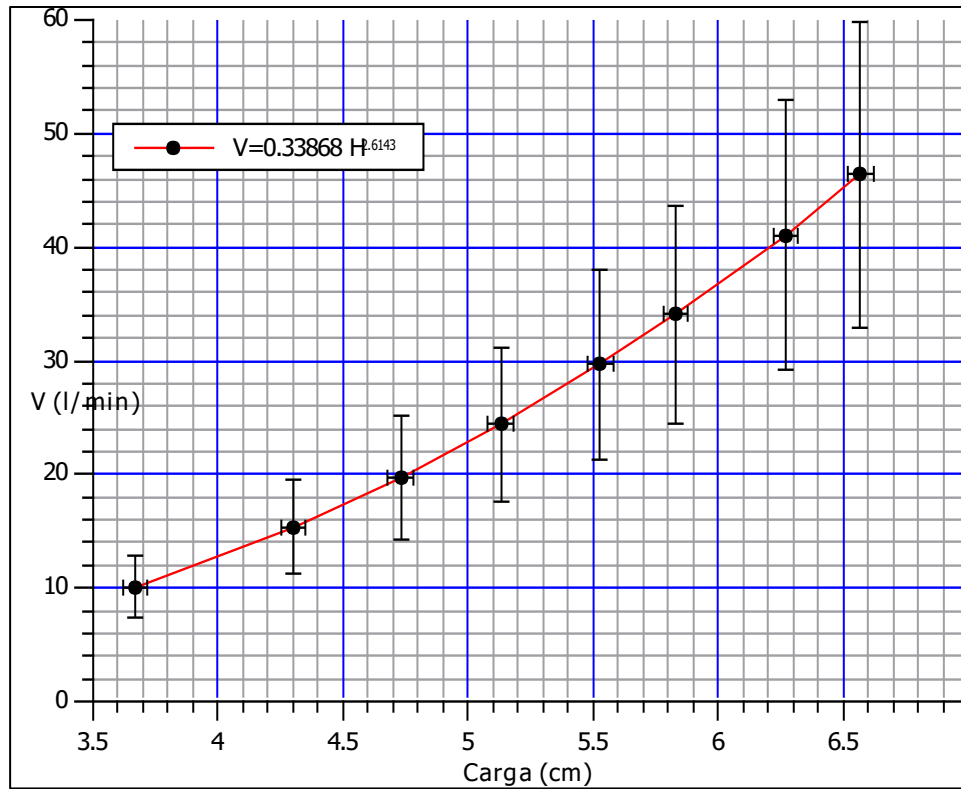
En la figura 155 se muestra el flujo volumétrico en función de la carga para el vertedero triangular, las incertezas del modelo se observan en la siguiente página.

Sustituyendo valores:

$$\Delta\dot{V} = \pm |H^{2,6143}|0,042843 + |0,33868 * 2,6143H^{2,6143-1}|\Delta H \\ + |H^{2,6143} \ln(H) 0,33868|,0765$$

$$\Delta\dot{V} = \pm |H^{2,6143}|0,042843 + |0,8854H^{2,6143-1}|\Delta H + |H^{2,6143} \ln(H) 0,33868|0,0765$$

Figura 155. **Flujo volumétrico versus carga para vertedero triangular utilizando el modelo matemático determinado**



Fuente: elaboración propia, empleando QtiPlot 0.9.8.9 svn 2288.

4.1.7.2. Calibración de vertedero con compuerta trapezoidal

Los valores experimentales de las tres pruebas realizadas se resumen en la tabla XXVI, estos valores corresponden a la media aritmética de las tres repeticiones.

Tabla XXVI. **Valores promedio de flujo volumétrico y carga para el medidor de vertedero trapezoidal para canal abierto**

| Rotámetro (l/min) | Carga (cm) | Error carga (cm) | Error flujo (l/min) |
|-------------------|------------|------------------|---------------------|
| 45,00 | 1,97 | 0,05 | 1,80 |
| 40,00 | 1,80 | 0,05 | 1,60 |
| 35,00 | 1,57 | 0,05 | 1,40 |
| 30,00 | 1,40 | 0,05 | 1,20 |
| 25,00 | 1,17 | 0,05 | 1,00 |
| 20,00 | 0,97 | 0,05 | 0,80 |
| 15,00 | 0,80 | 0,05 | 0,60 |
| 10,00 | 0,70 | 0,05 | 0,40 |

Fuente: elaboración propia, tabla xxx, datos calculados, apéndice 1.

Construyendo una gráfica del logaritmo natural del flujo volumétrico en función de logaritmo natral de la carga, ver figura 156.

El modelo matemático determinado es:

$$\ln(\dot{V}) = 2,9479 + 1,3329 \ln(H)$$

Entonces:

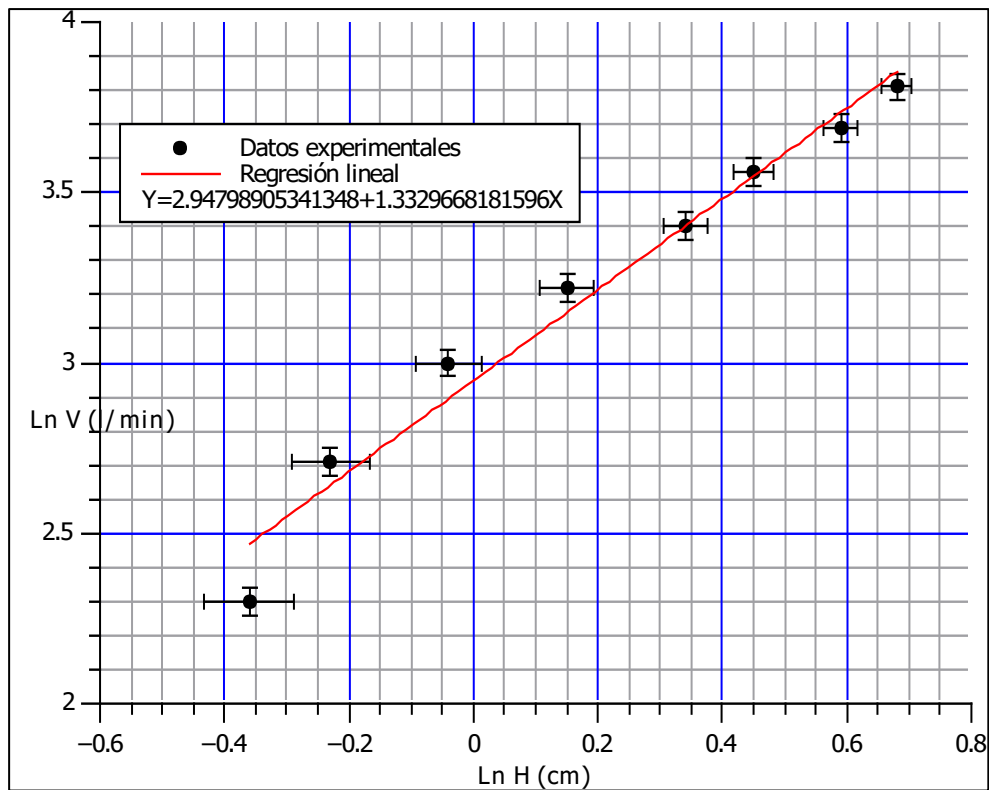
$$\ln(K) = 2,9479 \pm 0,0161$$

$$K = 19,0659$$

La incerteza de K se determina por la siguiente formula:

$$\Delta K = \pm e^{\text{Ln}(K)} \Delta \text{Ln}(K)$$

Figura 156. **Logaritmo natural del flujo volumétrico versus el logaritmo natural de la carga para medidor de vertedero trapezoidal en canal abierto**



Fuente: elaboración propia, empleando QtiPlot 0.9.8.9 svn 2288.

Sustituyendo valores:

$$\Delta K = \pm e^{.9479}(0,0161)$$

$$\Delta K = 0,3069$$

El valor de n corresponde directamente al valor m de la pendiente de la ecuación lineal de primer grado obtenida por la regresión lineal:

$$n = 1,3329 \pm 0,03954$$

Sustituyendo valores:

$$\Delta \dot{V} = \pm |H^{1,3329}|0,3069 + |19,0659 * 1,3329H^{1,3329-1}|\Delta H \\ + |H^{1,3329}Ln(H) 19,0659|0,03954$$

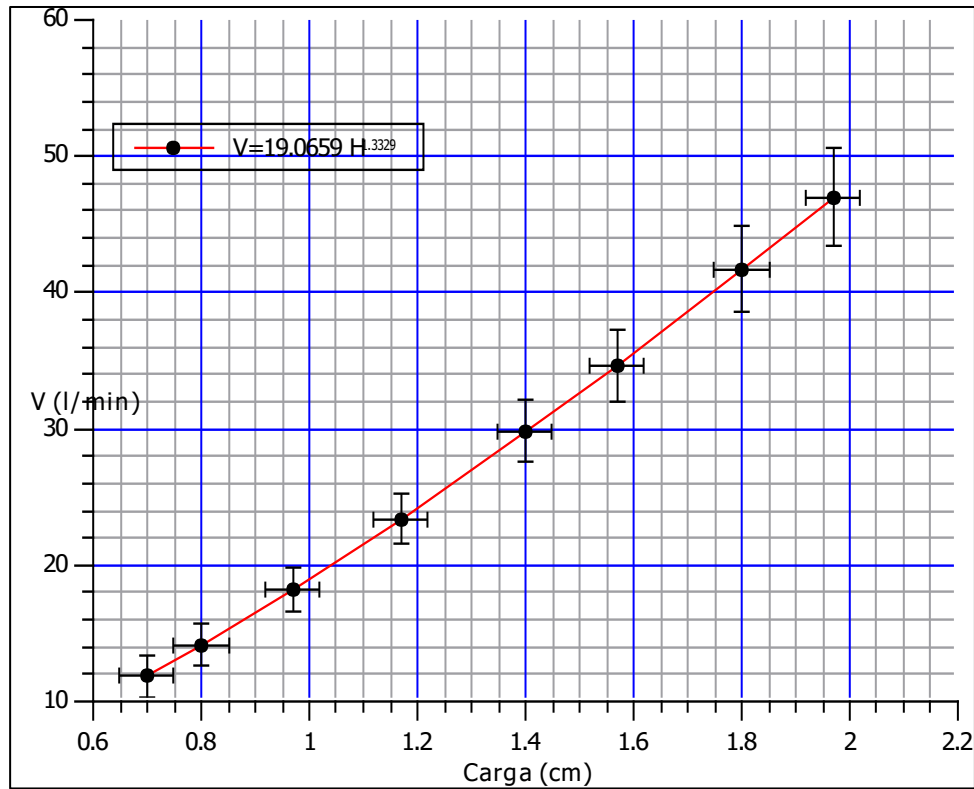
$$\Delta \dot{V} = \pm |H^{1,3329}|0,3069 + |25,4129H^{0,3329}|\Delta H + |H^{1,3329}Ln(H) 19,0659|0,03954$$

Sustituyendo en la ecuación de flujo volumétrico:

$$\dot{V} = 19,0659 H^{1,3329}$$

Utilizando las ecuaciones determinadas se construyó el gráfico de los flujos volumétricos corregidos en función de la carga, ver figura 157.

Figura 157. **Flujo volumétrico versus carga para vertedero trapezoidal utilizando el modelo matemático determinado**



Fuente: elaboración propia, empleando QtiPlot 0.9.8.9 svn 2288.

4.1.7.3. Calibración de vertedero con compuerta rectangular

Los valores experimentales de las tres pruebas realizadas se resumen en la siguiente tabla XXVII, estos valores corresponden a la media aritmética de las tres repeticiones.

Tabla XXVII. Valores promedio de flujo volumétrico y carga para el medidor de vertedero rectangular para canal abierto

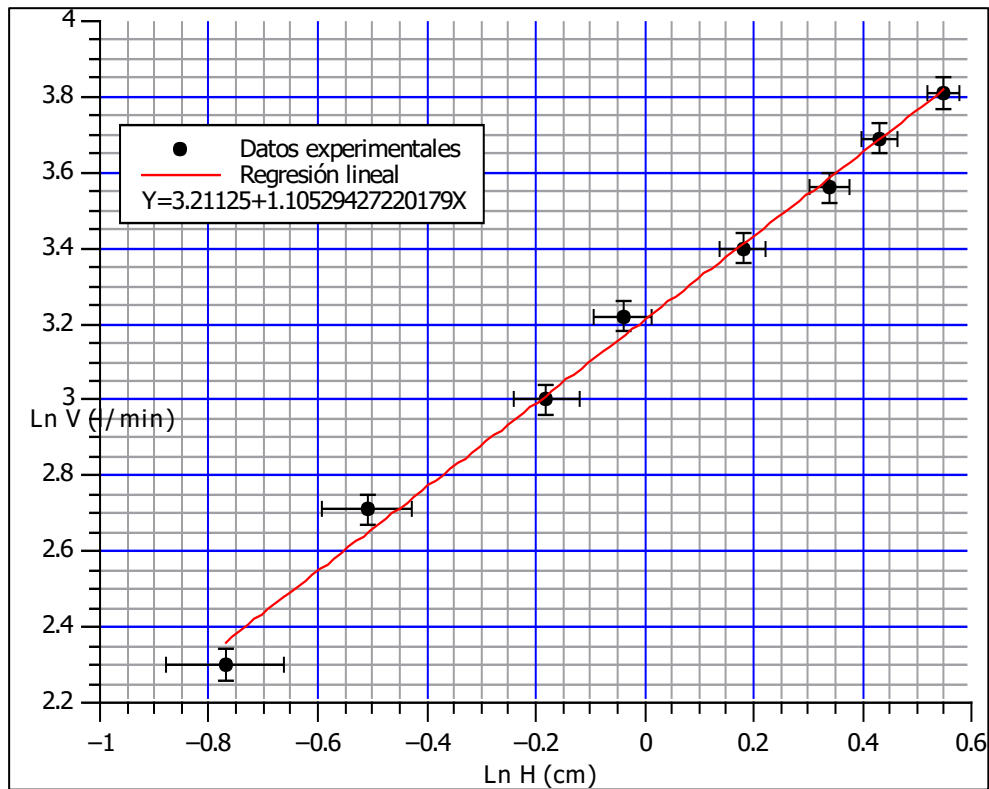
| Rotámetro (l/min) | Carga (cm) | Error carga (cm) | Error flujo (l/min) |
|-------------------|------------|------------------|---------------------|
| 45,00 | 1,73 | 0,05 | 1,80 |
| 40,00 | 1,53 | 0,05 | 1,60 |
| 35,00 | 1,40 | 0,05 | 1,40 |
| 30,00 | 1,20 | 0,05 | 1,20 |
| 25,00 | 0,97 | 0,05 | 1,00 |
| 20,00 | 0,83 | 0,05 | 0,80 |
| 15,00 | 0,60 | 0,05 | 0,60 |
| 10,00 | 0,47 | 0,05 | 0,40 |

Fuente: elaboración propia, apéndice 1.

Un vertedero de compuerta rectangular generalmente tiene cargas más pequeñas debido a que tiene una mayor área transversal por donde circula el fluido.

En la figura 158 se grafica el logaritmo natural del flujo volumétrico en función del logaritmo natural de la carga para el medidor de vertedero rectangular con contracciones laterales.

Figura 158. **Logaritmo natural del flujo volumétrico versus el logaritmo natural de la carga para medidor de vertedero rectangular en canal abierto**



Fuente: elaboración propia, empleando QtiPlot 0.9.8.9 svn 2288.

El modelo matemático determinado es:

$$\ln(\dot{V}) = 3,2112 + 1,1052 \ln(H)$$

Entonces:

$$\ln(K) = 3,2112 \pm 0,01414$$

$$K = 24,8101$$

La incerteza de K se determina por la siguiente formula:

$$\Delta K = \pm e^{Ln(K)} \Delta Ln(K)$$

Sustituyendo valores:

$$\Delta K = \pm e^{3,21125} (0,01414)$$

$$\Delta K = 0,350815$$

El valor de n corresponde directamente al valor m de la pendiente de la ecuación lineal de primer grado obtenida por la regresión lineal:

$$n = 1,1052 \pm 0,03241$$

Sustituyendo en la ecuación de flujo volumétrico:

$$\dot{V} = 24,8101 H^{1,1052}$$

Determinando la función del error:

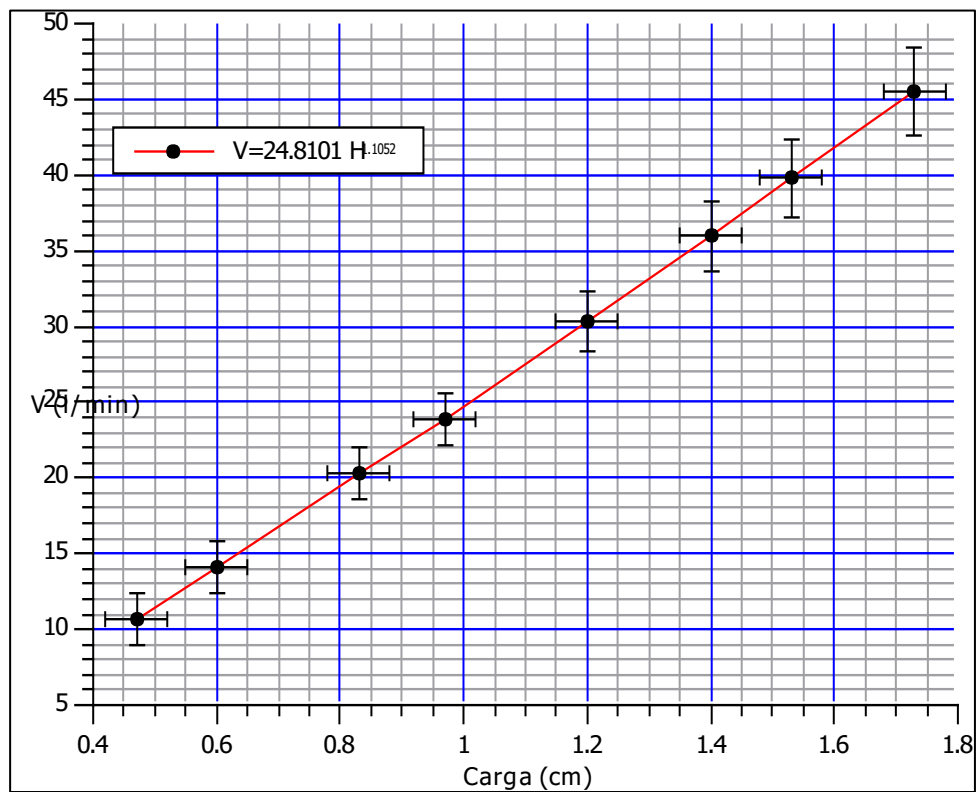
$$\Delta \dot{V} = \pm |H^n| \Delta K + |KnH^{n-1}| \Delta H + |H^n Ln(H) K| \Delta n$$

Sustituyendo valores:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{V} = \pm & |H^{1,1052}| 0,35081 + |24,8101 * 1,1052 H^{1,052-1}| \Delta H \\ & + |H^{1,1052} Ln(H) 24,8101| 0,03241 \end{aligned}$$

En la figura 159 se muestra la gráfica construida con los modelos matemáticos determinados, para obtener valores corregidos del flujo volumétrico.

Figura 159. **Flujo volumétrico versus carga para vertedero rectangular utilizando el modelo matemático determinado**



Fuente: elaboración propia, empleando QtiPlot 0.9.8.9 svn 2288.

4.1.8. Formulario para toma de datos

Para la toma de datos durante la realización de las pruebas se utilizó el siguiente formato mostrado en la figura 160.

Tabla XXVIII. Formato de toma de datos originales

| No. de prueba: | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|-------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|------------------|-------------------|------------------|-----------------------|-----------------|----------------------|-----------------|-----------------------|-----------------|--|
| | | Rotámetro | | Medidor de turbina | | Medidor de Venturi | | Medidor de orificio | | Medidor de ranura | | Vertedero rectangular | | Vertedero triangular | | Vertedero trapezoidal | | |
| Correlativo | V (l/min) | V (l/min) | ΔV (l/min) | P (psi) | P (psi) | ΔP (psi) | P (psi) | P (psi) | ΔP (psi) | H (cm) | H (cm) | ΔH (cm) | H (cm) | H (cm) | ΔH (cm) | H (cm) | H (cm) | |
| 1 | 45 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | 40 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | 35 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | 30 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | 25 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6 | 20 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 7 | 15 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8 | 10 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Incetezas | Rotámetro | Medidor de turbina | Medidor de Venturi | Medidor de orificio | Medidor de ranura | Vertedero rectangular | Vertedero triangular | Vertedero trapezoidal | | | | | | | | | | |
| Correlativo | ΔV (l/min) | ΔV (l/min) | ΔP (psi) | ΔP (psi) | ΔP (psi) | ΔH (cm) | ΔH (cm) | ΔH (cm) | ΔP (psi) | ΔP (psi) | ΔP (psi) | ΔH (cm) | ΔH (cm) | ΔH (cm) | ΔH (cm) | ΔH (cm) | ΔH (cm) | |
| 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 7 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Fuente: elaboración propia.

4.2. Manual de operación

En este apartado se describen procedimientos estándares de operación, cuyo fin es garantizar que el equipo se utilice correctamente.

4.2.1. Procedimiento de encendido

El encendido del equipo está diseñado para operar en un rango de 10 a 50 l/min, a continuación, se muestra el proceso general de verificaciones a realizar previo al encendido.

- Verificar que la válvula VALV1 esté abierta un 20 %.
- Verificar que la válvula VALV2 esté abierta un 50 %.
- Verificar que el botón de paro de emergencia no esté activado.

- Verificar que el tanque de almacenamiento de agua este a un 80 % de su capacidad.

- Verificar que el interruptor de palanca de encendido este en la posición OFF.

- Conectar la espiga al tomacorriente de alimentación de energía eléctrica de 120 V a 60 Hz.

- Accionar el interruptor de palanca a la posición de encendido.

- Verificar el voltaje de operación del equipo, el cual debe estar en el rango de 108 a 120 V.

- Verificar la corriente eléctrica, la cual debe estar en el rango de 4,8 a 5,1 amperios.
- Si las lecturas anteriores son correctas realizar las lecturas necesarias, el equipo puede funcionar un máximo de 40 minutos encendido.

4.2.2. Procedimiento de apagado

El procedimiento que se describe a continuación es esencial para prevenir fallos ocasionados debido al fenómeno de golpe de ariete.

- Para el correcto apagado del equipo en primer lugar se recomienda disminuir el flujo volumétrico a 15 l/min por medio de la válvula VALV1.
- Esperar 10 segundos a que el sistema se estabilice.
- Accionar el interruptor de palanca a la posición OFF.
- Cerrar la válvula VALV2.
- Desenchufar la espiga del tomacorriente de alimentación eléctrica.

4.2.3. Mantenimiento de tubería

El mantenimiento se define como el conjunto de acciones requeridas para llevar a un equipo a condiciones normales de operación, su fin no es la mejora del equipo, sino únicamente asegurar que el equipo o herramienta funcione de manera confiable evitando paros no programados.

La tubería está fabricada por tubería de acero galvanizado de 1 pulgada de diámetro. Cuenta con uniones universales para fácil desmontaje.

La frecuencia de limpieza y mantenimiento de la tubería se recomienda para 1 año. A continuación, se muestra el proceso de limpieza y mantenimiento rutinario del equipo de medidores de flujo.

- Verificar que el equipo esta desconectado de cualquier fuente de energía eléctrica.
- Con dos llaves Stillson proceder a aflojar las uniones universales: UNION1, UNION2, UNION3, UNION4, UNION 5, UNION 6 Y UNION7.
- Con una llave ajustable (cangrejo) desmontar el vacuómetro MAN1 y los manómetros MAN2, MAN 3, MAN4, MAN 5, MAN6.
- Desmontar todos los medidores de flujo.
- Preparar una mezcla de agua con jabón.
- Proceder a limpiar el interior de la tubería con un cepillo lavaprobetas y la mezcla del paso anterior. Se debe limpiar las secciones de tuberías, medidores de flujo, entre otros.
- Con un palo y la misma mezcla limpiar el exterior de las secciones de tubería.
- Utilizando agua a presión enjuagar las secciones de tubería y medidores de flujo para retirar el jabón, aplicar agua a presión en el interior de la tubería.
- Dejar escurrir las secciones de tubería para eliminar el exceso de agua.

- Con un paño seco proceder a secar las secciones de tubería.
- Dejar secar por 1 día el metal.
- Evaluar la pintura, si es necesario aplicar una capa de pintura en el exterior.
- Utilizando las herramientas descritas en pasos anteriores volver a ensamblar las secciones de tuberías.

En la tabla XXVII se muestra una serie de soluciones para diversos problemas que se pueden presentar en la tubería.

Tabla XXIX. **Solución de problemas comunes en tuberías**

| Problema | Herramientas de solución | Descripción |
|--|--|---|
| Suciedad mediana | Jabón o detergente suave, agua caliente | Pasar una esponja, aclarar con agua limpia y pasar un trapo seco. Seguir la dirección del pulimentado para un mejor resultado. Al secar cerciorarse que no se dejan marcas rayadas. |
| Manchas persistentes y decoloración en todos los acabados. | Solución suave de limpieza, limpiadores poco abrasivos y especialmente limpiadores para aceros inoxidable. | Utilizar un trapo, esponja, o cepillo de fibra (nylon suave o cerda natural). Aclarar bien con agua limpia y secar. Seguir las líneas del pulido. |

Continuación de tabla XXVIII.

| Problema | Herramientas de solución | Descripción |
|--|--|---|
| Depósitos de minerales, incrustaciones por dureza de agua. | Solución compuesta ácido acético concentrado al 25 % en volumen. | Remojar las secciones de tubería en la solución, cepillar para aflojar y aclarar bien con agua limpia. |
| Aceite o marcas de grasa en todos los acabados. | Disolventes orgánicos, acetona, limpiadores para acero inoxidable, tricloroetanol. La grasa endurecida puede ser ablandada de antemano con amoníaco. | Limpia con jabón y agua caliente, aclarar con agua limpia y secar. Seguir las líneas del pulido. |
| Oxidación (manchas) y otros resultados de la corrosión. “acero libre” incrustado o adherido. | Las manchas pueden ser quitadas usando limpiadores ácidos. Para esto prepare una solución al 7 % en volumen de ácido clorhídrico. | Aclarar bien con agua limpia, Usar guantes de neopreno, mezclar la solución en un recipiente de vidrio. |
| Perforaciones en la tubería por golpes o daños de impacto. | Comuníquese con un técnico en mantenimiento industrial (soldador, mecánico, entre otros) para que evalúe el daño. | Dependiendo del daño le recomendará reparar la pieza, o fabricar una nueva. |

Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

1. Se realizó una revisión bibliográfica para fundamentar los principios de funcionamiento de los medidores de flujo, para el equipo diseñado.
2. El lugar donde se instalará el equipo es el parque tecnológico de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, cuenta con los servicios y espacio adecuado para realización de pruebas de laboratorio.
3. Existen diferentes tipos de medidores de flujo para medir el flujo, un medidor se vale de fenómenos físicos producidos por el fluido, así como las propiedades del fluido al circular por un conducto abierto o cerrado, fenómenos físicos que se producen al accionar el flujo con los elementos primarios, que generan señales desde los transductores, transmisores, convertidores y por último a los receptores donde se indica el valor de la variable medida. Los medidores de flujo más comunes son: rotámetro, placa de orificio, venturi, magnético, vortex y coriolis.
4. Se ha diseñado un equipo de medidores de flujo volumétrico para el curso de Máquinas Hidráulicas de la carrera de Ingeniería Mecánica, empleando análisis de mecánica de fluidos y modelación matemática. Se elaboraron planos del equipo de medidores de flujo para facilitar la explicación de las partes de éste, y también para detallar el procedimiento estándar de operación.

5. El equipo de medidores de flujo construido tiene un rango de medición de 10 a 50 l/min, el material de la tubería es de acero galvanizado. Los bastidores del equipo son de tubo cuadrado estructural de acero negro de 1 pulgada revestido con pintura anticorrosiva especial. Así mismo la validación del equipo de medidores de flujo se realizó por medio de calibraciones respecto al medidor patrón (rotámetro) cuya incerteza es de 4 % del valor medido, obteniendo ecuaciones de flujo volumétrico en función de diferencial de presión y carga, así mismo se determinaron ecuaciones de error.

6. En el caso del medidor de turbina el factor de calibración es 1099 y la ecuación que describe la propagación del error es: $Error\ abs\ \dot{V} = 0,573779 + 0,02875\ \dot{V}$, se da por validado la operación de este medidor.

7. La ecuación de calibración para el medidor de flujo de Venturi es: $\dot{V} = 14,89\ \Delta P^{0,4052}$ con un coeficiente de correlación de 0,99 y la ecuación que describe la propagación del error es: $\Delta\dot{V} = |\Delta P^{0,4052}| * 0,311938 + |14,89 * 0,4052 * \Delta P^{0,4052-1}| * \Delta\Delta P + |14,89 * \Delta P^{0,4052} * Ln(\Delta P)|0,012227$ de igual manera la ecuación de calibración para el medidor de flujo de placa de orificio es: $\dot{V} = 0,398526\ \Delta P^{1,728909}$ con un coeficiente de correlación de 0,99 y la ecuación que describe la propagación del error es: $\Delta\dot{V} = |\Delta P^{1,728909}| * 0,088136 + |0,893526 * 1,72890 * \Delta P^{1,728909-1}| \Delta\Delta P + |0,893526 * \Delta P^{1,728909} * Ln(\Delta P)| * 0,050777$. La ecuación de calibración para el medidor de flujo de ranura es: $\dot{V} = 45,1602 + 13,5984\ H$ con un coeficiente de correlación de 0,97 y la ecuación que describe la propagación del error es: $\Delta\dot{V} = 1,8773 + |H|0,4067 + |13,5984|\Delta H$ de la misma forma la ecuación de calibración para el medidor de flujo tipo vertedero triangular para el canal abierto es: $\dot{V} = 0,33868\ H^{2,6143}$ con un coeficiente de correlación de 0,99 y la ecuación que describe la

propagación del error es: $\Delta\dot{V} = |H^{2,6143}|0,042843 + |0,8854H^{2,6143-1}|\Delta H + |H^{2,6143}Ln(H) 0,33868| * 0,0765.$

8. La ecuación de calibración para el medidor de flujo tipo vertedero trapezoidal para el canal abierto es: $\dot{V} = 19,0659 H^{1,3329}$ con un coeficiente de correlación de 0,99 y la ecuación que describe la propagación del error es: $\Delta\dot{V} = |H^{2,6143}|0,042843 + |0,8854H^{2,6143-1}|\Delta H + |H^{2,6143}Ln(H) * 0,33868| * 0,0765.$ Así mismo la ecuación de calibración para el medidor de flujo tipo vertedero rectangular para el canal abierto es: $\dot{V} = 24,8101 H^{1,1052}$ con un coeficiente de correlación de 0,99 y la ecuación que describe la propagación del error es: $\Delta\dot{V} = |H^{1,1052}|0,35081 + |24,8101 * 1,1052H^{1,052-1}|\Delta H + |H^{1,1052} * Ln(H) * 24,8101|0,03241.$
9. Se redactó una manual de operación del equipo, este indica procedimientos estándares de operación y mantenimiento.

RECOMENDACIONES

1. Buscar información técnica sobre investigaciones en diseño de bancos de medidores de flujo, así como información de diseño de medidores de flujo en aplicaciones industriales.
2. Debido a la localización de instalación del equipo de medidores de flujo debe tomarse en cuenta un mantenimiento periódico de la pintura y recubrimientos, pues al estar a la intemperie está expuesto a deterioro por corrosión.
3. Investigar acerca de las tecnologías más modernas de medidores de flujo como los medidores de coriolis, vortex y magnéticos, dado que no se abordan a profundidad en el presente estudio y en los últimos años ha aumentado su uso en la industria.
4. En la temática de diseño de equipos de medidores de flujo para educación a nivel pregrado, considerar las nuevas tecnologías que se distribuyan en el mercado esto con el fin de mantener al estudiante actualizado, de igual forma es importante impulsar investigaciones para el desarrollo de medidores de flujo con equipos multidisciplinarios.
5. Instalar medidores de presión de mayor exactitud mejoraría las mediciones para realizar calibraciones de los medidores de flujo, dado que la incerteza actual de los instrumentos es muy grande, así como un medidor de flujo de turbina que se pueda calibrar por varios puntos de referencia mejoraría la exactitud de medición.

6. Para aumentar la exactitud de la ecuación de calibración obtenida para el medidor de Venturi se puede realizar pruebas con más repeticiones.
7. Es posible construir varios medidores de placa de orificio para realizar pruebas con distintos tipos de medidores esto puede servir para estudiar el efecto de variables como la relación entre el diámetro de la contracción y el diámetro de la tubería. También podría probarse placas de diferentes espesores de pared.
8. La sensibilidad de medición del medidor de ranura mejora al reducir el diámetro del medidor, para ello es necesario realizar una nueva calibración del instrumento.
9. Se puede instalar sensores de nivel ultrasónicos para mejorar la medición del nivel en el canal, con esto se puede mejorar la correlación obtenida para el vertedero triangular y disminuir el ancho base del vertedero trapezoidal para mejorar la sensibilidad del instrumento puesto que la medición es muy imprecisa dado el ancho base del vertedero.
10. Aumentar las contracciones laterales puede mejorar la sensibilidad en la medición del nivel del vertedero, con esto se puede realizar una nueva correlación en el vertedero rectangular y seguir el procedimiento estándar de encendido y apagado establecido en el manual de operación previene daños a la bomba e instrumentos de medición debido al golpe de ariete. De esa manera realizar periódicamente el cambio de agua al tanque de alimentación y utilizar sustancias alcalinas para circuitos de limpieza en el equipo previene incrustaciones en la tubería.

BIBLIOGRAFÍA

1. Academia HÜTTE. *Manual del Ingeniero: Enciclopedia del Ingeniero y del Arquitecto*. Segunda edición en español traducida de la Vigésimo Sexta en alemán. Traductor: Rafael Hernández. España: Editorial Gustavo Gili S.A. 1464 p.
2. ALFONSI, Alfonso, PÉREZ, Jesús, RIVERA, Laura, 2010. *Banco de calibración de medidores de flujo líquidos en conductos cerrados por el método gravimétrico*. Venezuela: Universidad de los Andes, Vol. 31, No. 3. Ciencia e Ingeniería. ISSN: 1316-7081. [en línea]. <revencyt.ula.ve/storage/repo/ArchivoDocumento/cing/v31n3/art8.pdf>. [Consulta: enero de 2019]. 285 p.
3. ANDALUZ, Victor, et al., 2016. *Medidor digital de agua potable con comunicación inalámbrica*. Revista científica UTCiencia. Ecuador: Universidad Técnica de Cotopaxi, Vol. 2, No. 3. [en línea]. <investigacion.utc.edu.ec/revistasutc/index.php/utciencia/article/download/45/46>. [Consulta: enero de 2019]. 185 p.
4. ANDERSEN, L. Bryce, et al. *Principios de Operaciones Unitarias*. Segunda edición. México: Compañía Editorial Continental S.A. 756 p. ISBN: 968-26-0776-0.

5. CAMPOS LÓPEZ, Omar Aarón. *"Programa de cómputo para dimensionalizar medidores de flujo por presión diferencial en líquidos"*. Asesores: René Tolentino Eslava y Omar Nava Rodríguez. México: Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Unidad Profesional "Adolfo López Mateos", 2008.
6. CASTELLANOS ROJAS, Walter Guillermo. *"Manual para el desarrollo del laboratorio de Máquinas Hidráulicas de la carrera de ingeniería mecánica"*. Decano: Murphy Olympo Paiz Recinos. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica, 2007.
7. CASTILLO DE PAZ, Carlos Enrique. *"Medidores de flujo en tuberías a presión"*. Decano: Murphy Olympo Paiz Recinos. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Civil, 2011.
8. CHOREQUE MORAN, Wendor, 1987. *Mecánica de Fluidos I*. Perú: Pontificia Universidad Católica del Perú. 220 p.
9. CIFUENTES CASTILLO, Jorge Iván, et al., 2016. *Instrumentación y control de maquinaria agrícola*. Revista de Ingeniería Mecánica. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, No. 1, [en línea]. <www.repositorio.usac.edu.gt/4432/1/REVISTA%20ING.%20MEC.%203.pdf>. [consulta: enero de 2019]. 133 p.

10. CÓRDOVA LASCANO, Marco Rolando y VELÁSQUEZ PÉREZ, Diego Javier. *"Instalación y montaje de un banco de pruebas de caudal, para el Laboratorio de Instrumentación de la Facultad de Mecánica"*. Ecuador: Escuela Superior Politécnica de Chimborazó, Facultad de Mecánica, Escuela de Ingeniería Mecánica, 2008.
11. CRANE, 1987. *Flujo de Fluidos en válvulas, accesorios y tuberías*. México: McGraw-Hill. 215 p.
12. CREUS, Antonio, 2011. *Instrumentación Industrial*. Octava edición. México: Alfaomega Grupo Editor S.A. 792 p. ISBN: 978-607-707-042-9. 7
13. DÍAZ GUTIÉRREZ, Carlos Eduardo, et al., 2012. *Medición de caudales mediante la implementación de un vehículo acuático teleoperado*. Revista Internacional de Contaminación Ambiental. México: Universidad Nacional Autónoma de México, Vol. 28, No. 1. ISSN: 0188-4999. [en línea]. <www.redalyc.org/articulo.oa?id=37023172007>. [Consulta: enero de 2019]. 195 p.
14. DURÁN ATILANO, Iván. *"Medición de fluidos por efecto de coriolis"*. Director: María Isabel Villegas Javier. México: Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, 2010.
15. ESCALANTE TRIAY, Eduardo José, GARCÍA SOSA, Jorge, MORALES BURGOS, Armando, 2002. *Mecánica de Fluidos antecedentes y actualidad*. México: Universidad Autónoma de Yucatán, Facultad de Ingeniería. 34 p.

16. EXSA, OERLIKON. *Manual de Soldadura & Catálogo de Productos* [en línea].[en línea]. <http://www.marioloureiro.net/ensino/manuaisOutros/soldadura/manual_catalogo%20soldadura.pdf>. [Consulta: diciembre de 2018]
17. FERNÁNDEZ FIGUEROA, Francisco Javier. *"Guía general para el cálculo, instalación y mantenimiento de bombas hidroneumáticas"*. Decano: Murphy Olympo Paiz Recinos. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2012.
18. FRANKLAND, Tomas W, 1995. *Manual del montador y soldador de tuberías*. Cuarta reimpresión. México: A.G.T Editor S.A. y URMO S.A. de ediciones. 202 p. ISBN: 968-463-044-1.
19. GARCÍA BULTRAGO, María Vilma, GUERRA MAZO, Miryam Lucía, Rodríguez Acevedo, Elizabeth, 2016. *Estudio comparativo de flujo de fluido a través de una placa de orificio usando las ecuaciones de Stokes y Navier-Stokes*. Revista de la Facultad de Ingeniería. Colombia: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Vol. 25, No. 42. [en línea]. <www.redalyc.org/articulo.oa?id=413945614009>. [Consulta: enero de 2019]. 178 p. ISSN: 0121-1129.
20. GARCÍA GUTIÉRREZ, Luis, 2013. *Teoría de la medición de caudales y volúmenes de agua e instrumental necesario disponible en el mercado. Medida y evaluación de las extracciones de agua subterránea*. España: Centro Español de Metrología. 42 p.

21. GROOVER, Mikell P., 1997. *Fundamentos de Manufactura Moderna; Materiales, Procesos y Sistemas*. México: Pearson Educación. 532 p. ISBN: 0-13-312182-8.
22. HARRIOT, Peter, MC CABE, Warren L., SMITH, Julian C., 1996. *Operaciones básicas de Ingeniería Química*. Cuarta edición. México: Mc Graw Hill. 1112 p. ISBN: 0-07-044828-0.
23. HERNÁNDEZ RIESCO, Germán, 1995. *Manual del Soldador*. Décimo quinta edición. España: Asociación Española de Soldadura y Tecnologías de Unión CESOL. 320 p.
24. HUEY GIL, Faneli Mireli. *"Aplicación de medidores de flujo en hidrocarburos para transferencia de custodia"*. México: Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Zaragoza. [en línea]. <www.zaragoza.unam.mx/portal/wp-content/Portal2015/Licenciaturas/iq/tesis/tesis_huey_gil.pdf>. [Consulta: enero de 2019].
25. JUÁREZ CORONADO, Edgar Ricardo. *"Simbología industrial aplicada al curso de Instrumentación Mecánica"*. Decano: Murphy Olympo Paiz Recinos. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica, 2009.

26. KAUR, Manjit, LENKA, Hemant, SOOD, Ria, 2013. *Diseño y desarrollo de un medidor de flujo automático de agua. Revista Internacional de Ciencia computacional, Ingeniería y Aplicaciones (IJCESA)*. India: Centro para el Desarrollo del Avance Computacional (C-DAC), Vol. 3, No. 3. [en línea]. <www.academia.edu/download/45446558/3313ijcsea06.pdf>. [Consulta: enero de 2019]. 94p.
27. Kucher, A. M. *Tecnología de metales*. Rusia: Editorial Mir Moscú. Págs.: 186. ISBN: 5-03-000083-4.
28. LUX MONROY, Manuel Agustín. *"Medidores de flujo en canales abiertos"*. Decano: Murphy Olympo Paiz Recinos. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Civil, 2010.
29. MARÍN ENAMORADO, Estuardo René. *"Construcción de un modelo hidráulico para la simulación de tipos de flujo en canales abiertos para el laboratorio de Mecánica de Fluidos e Hidráulica de la Facultad de Ingeniería, USAC"*. Decano: Pedro Antonio Aguilar Polanco. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Civil, 2017.
30. MORALES AYAU, Edwin Orlando. *"Mantenimiento del parque tecnológico de fuentes renovables de energía de la Facultad de Ingeniería"*. Decano: Murphy Olympo Paiz Recinos. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica, 2013.

31. MOTT, Robert L., 2006. *Mecánica de Fluidos*. Sexta edición. México: Pearson Educación. 644 p. ISBN: 970-26-0805-8.
32. MUNSON, Bruce R., OKIISHI, Theodore H. y YOUNG, Donald F., 1999. *Fundamentos de Mecánica de Fluidos*. México: Editorial Limusa. 868 p. ISBN: 968-18-5042-4.
33. PINTO LIMA, Raynner Rolando. *"Manual para el desarrollo del laboratorio del curso de Procesos de Manufactura Dos, para estudiantes de ingeniería mecánica"*. Decano: Murphy Olympo Paiz Recinos. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica, 2008.
34. POTTER, Merle C., WIGGERT, David C., 2002. *Mecánica de Fluidos*. Tercera edición. México: International Thomson Editores. 787 p. ISBN: 970-685-205-6.
35. PUSEY ALVARADO, Luis Andree. *"Guía teórica y práctica del curso de Procesos de Manufactura 1"*. Decano: Murphy Olympo Paiz Recinos. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica, 2013.
36. REYES CARRILLO, Walter Edgardo. *"Guía para el curso Máquinas Hidráulicas"*. Decano: Murphy Olympo Paiz Recinos. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica, 2010.

37. ROSADA MÉNDEZ, Ricardo Antonio. *"Manual para los ensayos del laboratorio de Máquinas Hidráulicas"*. Decano: Sydney Alexander Samuels Milson. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica, 2005.
38. SOTELO ÁVILA, Gilberto, 1994. *Hidráulica general*. Decimoquinta reimpresión de la primera edición. México: Editorial Limusa S.A. 522 p. ISBN: 968.18-0503-8.
39. STREETER, Victor L., WYIIE, E. Benjamin, 1990. *Mecánica de los Fluidos*. Octava Edición. México: McGraw-Hill. 343 p. ISBN: 0-07-062242-6.
40. TOC GÓMEZ, Claudia Verónica. *"Manual teórico-práctico de los cursos obligatorios, Procesos de Manufactura I y II, en la Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial, desarrollados en el Instituto Tecnológico Universitario Guatemala Sur"*. Decano: Pedro Antonio Aguilar Polanco. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial, 2017.
41. VELÁSQUEZ GODÍNEZ, Armando Osberto. *"Montaje de equipo de bombeo sumergible y manual para el laboratorio del curso de Máquinas Hidráulicas, de la Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, USAC"*. Decano: Murphy Olympo Paiz Recinos. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica, 2008.

42. VELÁSQUEZ LÓPEZ, Juan Diego. *"Diseño e implementación de un medidor tipo vertedero para el estudio de flujo de fluidos en canales abiertos"*. Decano: Pedro Antonio Aguilar Polanco. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Química, 2016.
43. VENETOOL. *Manual de Soldadura*. Venezuela. [en línea] <http://venetool.com/yahoo_site_admin/assets/docs/MANUAL_PARA_SOLDADOR_ARCO_MANUAL_VENETOOL.145160905.pdf>. [Consulta: diciembre de 2018]
44. VIEJO ZUBICARAY, 2000. *Bombas, Teoría, Diseño y Aplicaciones*. Segunda edición. México: Editorial Limusa. 262 p. ISBN: 968-18-0509-7

APÉNDICES

Apéndice 1. Datos originales

Tabla I. Datos originales de la primer prueba

No. de prueba: _____ 1 _____

| Correlativo | Rotámetro | Medidor de turbina | Medidor de Venturi | | Medidor de orificio | | Medidor de ranura | Vertedero rectangular | Vertedero triangular | Vertedero trapezoidal |
|-------------|--------------------|--------------------|--------------------|------------------|---------------------|------------------|-------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|
| | V (l/min) | V (l/min) | P (psi) | P (psi) | P (psi) | P (psi) | H (cm) | H (cm) | H (cm) | H (cm) |
| 1 | 45 | 45,0 | 22,0 | 1,0 | 11,0 | 1,0 | 6,8 | 14,9 | 17,7 | 17,3 |
| 2 | 40 | 40,1 | 14,5 | 1,0 | 10,0 | 1,0 | 6,1 | 14,7 | 17,4 | 17,1 |
| 3 | 35 | 35,2 | 8,0 | 1,0 | 9,0 | 1,0 | 5,5 | 14,6 | 17,0 | 16,8 |
| 4 | 30 | 30,2 | 5,0 | 1,0 | 8,5 | 1,0 | 5,3 | 14,4 | 16,7 | 16,7 |
| 5 | 25 | 25,3 | 3,0 | 1,0 | 8,0 | 1,0 | 5,1 | 14,2 | 16,3 | 16,5 |
| 6 | 20 | 19,7 | 1,5 | 0,0 | 7,0 | 1,0 | 4,8 | 14,1 | 15,9 | 16,3 |
| 7 | 15 | 15,4 | 1,0 | 0,0 | 6,0 | 1,0 | 4,5 | 13,8 | 15,5 | 16,2 |
| 8 | 10 | 10,5 | 0,5 | 0,0 | 4,5 | 1,0 | 4,0 | 13,7 | 14,8 | 16,1 |
| Incertezas | Rotámetro | Medidor de turbina | Medidor de Venturi | | Medidor de orificio | | Medidor de ranura | Vertedero rectangular | Vertedero triangular | Vertedero trapezoidal |
| Correlativo | ΔV (l/min) | ΔV (l/min) | ΔP (psi) | ΔP (psi) | ΔP (psi) | ΔP (psi) | ΔH (cm) | ΔH (cm) | ΔH (cm) | ΔH (cm) |
| 1 | 1,80 | 1,80 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
| 2 | 1,60 | 1,70 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
| 3 | 1,40 | 1,60 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
| 4 | 1,20 | 1,40 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
| 5 | 1,00 | 1,30 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
| 6 | 0,80 | 1,10 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
| 7 | 0,60 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
| 8 | 0,40 | 0,90 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 |

Fuente: elaboración propia.

Continuación de apéndice 1.

Tabla II. **Datos originales de la segunda prueba**

No. de prueba: 2

| Correlativo | Rotámetro | Medidor de turbina | Medidor de Venturi | | Medidor de orificio | | Medidor de ranura | Vertedero rectangular | Vertedero triangular | Vertedero trapezoidal |
|-------------|--------------------|--------------------|--------------------|------------------|---------------------|------------------|-------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|
| | V (l/min) | V (l/min) | P (psi) | P (psi) | P (psi) | P (psi) | H (cm) | H (cm) | H (cm) | H (cm) |
| 1 | 45 | 45,0 | 21,0 | 1,0 | 11,0 | 1,0 | 6,8 | 15,0 | 17,8 | 17,2 |
| 2 | 40 | 40,1 | 15,0 | 1,0 | 10,0 | 1,0 | 6,2 | 14,7 | 17,5 | 17,1 |
| 3 | 35 | 35,2 | 8,5 | 1,0 | 9,0 | 1,0 | 6,0 | 14,6 | 17,2 | 16,9 |
| 4 | 30 | 30,2 | 6,0 | 1,0 | 8,5 | 1,0 | 5,6 | 14,4 | 16,8 | 16,7 |
| 5 | 25 | 25,3 | 3,5 | 1,0 | 7,5 | 1,0 | 5,2 | 14,1 | 16,4 | 16,4 |
| 6 | 20 | 19,7 | 2,5 | 1,0 | 7,0 | 1,0 | 4,9 | 14,0 | 15,9 | 16,2 |
| 7 | 15 | 15,4 | 1,5 | 0,5 | 6,5 | 1,0 | 4,5 | 13,8 | 15,5 | 16,0 |
| 8 | 10 | 10,5 | 0,5 | 0,0 | 5,5 | 1,0 | 4,1 | 13,6 | 14,8 | 15,9 |
| Incertezas | Rotámetro | Medidor de turbina | Medidor de Venturi | | Medidor de orificio | | Medidor de ranura | Vertedero rectangular | Vertedero triangular | Vertedero trapezoidal |
| Correlativo | ΔV (l/min) | ΔV (l/min) | ΔP (psi) | ΔP (psi) | ΔP (psi) | ΔP (psi) | ΔH (cm) | ΔH (cm) | ΔH (cm) | ΔH (cm) |
| 1 | 1,8 | 1,8 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
| 2 | 1,6 | 1,7 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
| 3 | 1,4 | 1,6 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
| 4 | 1,2 | 1,4 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
| 5 | 1,0 | 1,3 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
| 6 | 0,8 | 1,1 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
| 7 | 0,6 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
| 8 | 0,4 | 0,9 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 |

Fuente: elaboración propia.

Continuación de apéndice 1.

Tabla III. **Datos originales de la tercera prueba**

No. de prueba: 3

| Correlativo | Rotámetro | Medidor de turbina | | Medidor de Venturi | | Medidor de orificio | | Medidor de ranura | Vertedero rectangular | Vertedero triangular | Vertedero traapezoidal |
|-------------|--------------------|--------------------|------------------|--------------------|------------------|---------------------|------------------|-------------------|-----------------------|----------------------|------------------------|
| | V (l/min) | V (l/min) | P (psi) | P (psi) | P (psi) | P (psi) | P (psi) | H (cm) | H (cm) | H (cm) | H (cm) |
| 1 | 45 | 45,3 | 21,0 | 1,0 | 11,0 | 1,0 | 1,0 | 6,7 | 14,9 | 17,8 | 17,3 |
| 2 | 40 | 40,1 | 15,0 | 1,0 | 10,0 | 1,0 | 1,0 | 6,2 | 14,8 | 17,5 | 17,1 |
| 3 | 35 | 35,2 | 8,0 | 1,0 | 9,0 | 1,0 | 1,0 | 5,7 | 14,6 | 16,9 | 16,9 |
| 4 | 30 | 30,2 | 6,0 | 1,0 | 8,5 | 1,0 | 1,0 | 5,5 | 14,4 | 16,7 | 16,7 |
| 5 | 25 | 24,6 | 3,5 | 1,0 | 8,0 | 1,0 | 1,0 | 5,2 | 14,2 | 16,3 | 16,5 |
| 6 | 20 | 20,4 | 2,5 | 1,0 | 7,5 | 1,0 | 1,0 | 4,8 | 14,0 | 16,0 | 16,3 |
| 7 | 15 | 15,4 | 1,5 | 0,0 | 6,5 | 1,0 | 1,0 | 4,5 | 13,8 | 15,5 | 16,1 |
| 8 | 10 | 10,5 | 1,0 | 0,0 | 5,0 | 1,0 | 1,0 | 4,0 | 13,7 | 15,0 | 16,0 |
| Incertezas | Rotámetro | Medidor de turbina | | Medidor de Venturi | | Medidor de orificio | | Medidor de ranura | Vertedero rectangular | Vertedero triangular | Vertedero traapezoidal |
| | ΔV (l/min) | ΔV (l/min) | ΔP (psi) | ΔP (psi) | ΔP (psi) | ΔP (psi) | ΔP (psi) | ΔH (cm) | ΔH (cm) | ΔH (cm) | ΔH (cm) |
| 1 | 1,8 | 2,1 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
| 2 | 1,6 | 1,7 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
| 3 | 1,4 | 1,6 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
| 4 | 1,2 | 1,4 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
| 5 | 1,0 | 1,4 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
| 6 | 0,8 | 1,2 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
| 7 | 0,6 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
| 8 | 0,4 | 0,9 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 |

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. **Datos calculados**

Tabla IV. **Error experimental del medidor de turbina en la prueba 1**

| Rotámetro | | Turbina | |
|-----------|-----------|---------|-----------|
| (l/min) | Error abs | (l/min) | Error abs |
| 45,00 | 1,80 | 45,00 | 1,80 |
| 40,00 | 1,60 | 40,10 | 1,70 |
| 35,00 | 1,40 | 35,20 | 1,60 |
| 30,00 | 1,20 | 30,20 | 1,40 |
| 25,00 | 1,00 | 25,30 | 1,30 |
| 20,00 | 0,80 | 19,70 | 1,10 |
| 15,00 | 0,60 | 15,40 | 1,00 |
| 10,00 | 0,40 | 10,50 | 0,90 |

Fuente: elaboración propia

Tabla V. **Diferencia de presión y carga para el medidor de Venturi de la prueba 1**

| Rotámetro | Venturi | | | | | |
|-----------|----------|----------|-------------|------------|-----------|---------|
| | P1 (psi) | P2 (psi) | P1-P2 (psi) | P1-P2 (Pa) | h1-h2 (m) | D (m) |
| 45,00 | 22,00 | 1,00 | 21,00 | 144788,70 | 14,80 | 0,01150 |
| 40,00 | 14,50 | 1,00 | 13,50 | 93078,45 | 9,52 | 0,01150 |
| 35,00 | 8,00 | 1,00 | 7,00 | 48262,90 | 4,93 | 0,01150 |
| 30,00 | 5,00 | 1,00 | 4,00 | 27578,80 | 2,82 | 0,01150 |
| 25,00 | 3,00 | 1,00 | 2,00 | 13789,40 | 1,41 | 0,01150 |
| 20,00 | 1,50 | 0,00 | 1,50 | 10342,05 | 1,06 | 0,01150 |
| 15,00 | 1,00 | 0,00 | 1,00 | 6894,70 | 0,70 | 0,01150 |
| 10,00 | 0,50 | 0,00 | 0,50 | 3447,35 | 0,35 | 0,01150 |

Fuente: elaboración propia

Continuación de apéndice 2.

Tabla VI. **Velocidad, flujo volumétrico y numero de Reynolds para el medidor de Venturi de la prueba 1**

| | | | | | Flujo volumétrico |
|-----------|----------|------|---------|----------|-------------------|
| Ao (m2) | V (m3/s) | K | V (m/s) | Re | Error abs |
| 0,0001039 | 0,000750 | 0,42 | 7,22 | 82799,04 | 1,80 |
| 0,0001039 | 0,000667 | 0,47 | 6,42 | 73599,15 | 1,60 |
| 0,0001039 | 0,000583 | 0,57 | 5,62 | 64399,26 | 1,40 |
| 0,0001039 | 0,000500 | 0,65 | 4,81 | 55199,36 | 1,20 |
| 0,0001039 | 0,000417 | 0,76 | 4,01 | 45999,47 | 1,00 |
| 0,0001039 | 0,000333 | 0,70 | 3,21 | 36799,58 | 0,80 |
| 0,0001039 | 0,000250 | 0,65 | 2,41 | 27599,68 | 0,60 |
| 0,0001039 | 0,000167 | 0,61 | 1,60 | 18399,79 | 0,40 |

Fuente: elaboración propia

Tabla VII. **Valores de regresión lineal para el medidor de Venturi de la prueba 1**

| P1-P2 (psi) | ln(flujo) | ln(P1-P2) | ln(flujo) | ln(P1-P2) | Error ln(flujo) | Error ln(P1-P2) | Error ln(flujo) | Error ln(P1-P2) |
|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Error abs | (l/min) | (psi) | (m3/s) | (Pa) | (l/min) | (psi) | (m3/s) | (Pa) |
| 1,00 | 3,81 | 3,04 | -7,20 | 11,88 | 0,040 | 0,05 | 0,040 | 0,05 |
| 1,00 | 3,69 | 2,60 | -7,31 | 11,44 | 0,040 | 0,07 | 0,040 | 0,07 |
| 1,00 | 3,56 | 1,95 | -7,45 | 10,78 | 0,040 | 0,14 | 0,040 | 0,14 |
| 1,00 | 3,40 | 1,39 | -7,60 | 10,22 | 0,040 | 0,25 | 0,040 | 0,25 |
| 1,00 | 3,22 | 0,69 | -7,78 | 9,53 | 0,040 | 0,50 | 0,040 | 0,50 |
| 1,00 | 3,00 | 0,41 | -8,01 | 9,24 | 0,040 | 0,67 | 0,040 | 0,67 |
| 1,00 | 2,71 | 0,00 | -8,29 | 8,84 | 0,040 | 1,00 | 0,040 | 1,01 |
| 1,00 | 2,30 | -0,69 | -8,70 | 8,15 | 0,040 | 2,00 | 0,040 | 2,01 |

Fuente: elaboración propia

Continuación de apéndice 2.

Tabla VIII. **Diferencia de presión y carga para la placa de orificio de la prueba 1**

| Rotámetro (l/min) | Placa de orificio | | P3-P4 (psi) | P3-P4 (Pa) | h1-h2 (m) | D (m) |
|----------------------|-------------------|----------|----------------|---------------|-----------|-------|
| | P3 (psi) | P4 (psi) | | | | |
| 45,00 | 11,00 | 1,00 | 10,00 | 68947,00 | 7,05 | 0,01 |
| 40,00 | 10,00 | 1,00 | 9,00 | 62052,30 | 6,34 | 0,01 |
| 35,00 | 9,00 | 1,00 | 8,00 | 55157,60 | 5,64 | 0,01 |
| 30,00 | 8,50 | 1,00 | 7,50 | 51710,25 | 5,29 | 0,01 |
| 25,00 | 8,00 | 1,00 | 7,00 | 48262,90 | 4,93 | 0,01 |
| 20,00 | 7,00 | 1,00 | 6,00 | 41368,20 | 4,23 | 0,01 |
| 15,00 | 6,00 | 1,00 | 5,00 | 34473,50 | 3,52 | 0,01 |
| 10,00 | 4,50 | 1,00 | 3,50 | 24131,45 | 2,47 | 0,01 |

Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. **Velocidad, flujo volumétrico y numero de Reynolds para la placa de orificio de la prueba 1**

| | | | | | Flujo volumétrico |
|----------------------|-----------------------|------|---------|----------|----------------------|
| Ao (m ²) | V (m ³ /s) | K | V (m/s) | Re | Error abs |
| 0,0001039 | 0,00 | 0,61 | 7,22 | 82799,04 | 1,80 |
| 0,0001039 | 0,00 | 0,58 | 6,42 | 73599,15 | 1,60 |
| 0,0001039 | 0,00 | 0,53 | 5,62 | 64399,26 | 1,40 |
| 0,0001039 | 0,00 | 0,47 | 4,81 | 55199,36 | 1,20 |
| 0,0001039 | 0,00 | 0,41 | 4,01 | 45999,47 | 1,00 |
| 0,0001039 | 0,00 | 0,35 | 3,21 | 36799,58 | 0,80 |
| 0,0001039 | 0,00 | 0,29 | 2,41 | 27599,68 | 0,60 |
| 0,0001039 | 0,00 | 0,23 | 1,60 | 18399,79 | 0,40 |

Fuente: elaboración propia.

Continuación de apéndice 2.

Tabla X. **Valores de regresión lineal para la placa de orificio de la prueba 1**

| P3-P4 (psi) | ln(flujos) | ln(P3-P4) | ln(flujos) | ln(P3-P4) | Error ln(flujos) | Error ln(P1-P2) | Error ln(flujos) | Error ln(P1-P2) |
|-------------|------------|-----------|---------------------|-----------|------------------|-----------------|---------------------|-----------------|
| Error abs | (l/min) | (psi) | (m ³ /s) | (Pa) | (l/min) | (psi) | (m ³ /s) | (Pa) |
| 1,00 | 3,81 | 2,30 | -7,20 | 11,14 | 0,040 | 0,10 | 0,040 | 0,10 |
| 1,00 | 3,69 | 2,20 | -7,31 | 11,04 | 0,040 | 0,11 | 0,040 | 0,11 |
| 1,00 | 3,56 | 2,08 | -7,45 | 10,92 | 0,040 | 0,13 | 0,040 | 0,13 |
| 1,00 | 3,40 | 2,01 | -7,60 | 10,85 | 0,040 | 0,13 | 0,040 | 0,13 |
| 1,00 | 3,22 | 1,95 | -7,78 | 10,78 | 0,040 | 0,14 | 0,040 | 0,14 |
| 1,00 | 3,00 | 1,79 | -8,01 | 10,63 | 0,040 | 0,17 | 0,040 | 0,17 |
| 1,00 | 2,71 | 1,61 | -8,29 | 10,45 | 0,040 | 0,20 | 0,040 | 0,20 |
| 1,00 | 2,30 | 1,25 | -8,70 | 10,09 | 0,040 | 0,29 | 0,040 | 0,29 |

Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. **Errores experimentales para el medidor de ranura de la prueba 1**

| Rotámetro | Ranura | L1 | Flujo volumétrico |
|-----------|---------|-----------|-------------------|
| (l/min) | L1 (cm) | Error abs | Error abs |
| 45,00 | 6,80 | 0,05 | 1,80 |
| 40,00 | 6,10 | 0,05 | 1,60 |
| 35,00 | 5,50 | 0,05 | 1,40 |
| 30,00 | 5,30 | 0,05 | 1,20 |
| 25,00 | 5,10 | 0,05 | 1,00 |
| 20,00 | 4,80 | 0,05 | 0,80 |
| 15,00 | 4,50 | 0,05 | 0,60 |
| 10,00 | 4,00 | 0,05 | 0,40 |

Fuente: elaboración propia.

Continuación de apéndice 2.

Tabla XII. **Cargas y errores experimentales para el vertedero triangular de la prueba 1**

| Rotámetro | Triangular | Carga | L2 | Flujo volumétrico |
|-----------|------------|-------|-----------|-------------------|
| (l/min) | L2 (cm) | (cm) | Error abs | Error abs |
| 45,00 | 17,70 | 6,50 | 0,05 | 1,80 |
| 40,00 | 17,40 | 6,20 | 0,05 | 1,60 |
| 35,00 | 17,00 | 5,80 | 0,05 | 1,40 |
| 30,00 | 16,70 | 5,50 | 0,05 | 1,20 |
| 25,00 | 16,30 | 5,10 | 0,05 | 1,00 |
| 20,00 | 15,90 | 4,70 | 0,05 | 0,80 |
| 15,00 | 15,50 | 4,30 | 0,05 | 0,60 |
| 10,00 | 14,80 | 3,60 | 0,05 | 0,40 |

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. **Valores para regresión lineal para el vertedero triangular de la prueba 1**

| ln (FLUJO) | ln (H) | ln (error flujo) | ln (error H) |
|------------|--------|------------------|--------------|
| 3,81 | 1,87 | 0,04 | 0,0077 |
| 3,69 | 1,82 | 0,04 | 0,0081 |
| 3,56 | 1,76 | 0,04 | 0,0086 |
| 3,40 | 1,70 | 0,04 | 0,0091 |
| 3,22 | 1,63 | 0,04 | 0,0098 |
| 3,00 | 1,55 | 0,04 | 0,0106 |
| 2,71 | 1,46 | 0,04 | 0,0116 |
| 2,30 | 1,28 | 0,04 | 0,0139 |

Fuente: elaboración propia.

Continuación de apéndice 2.

Tabla XIV. **Cargas y errores experimentales para el vertedero trapezoidal de la prueba 1**

| Rotámetro | Trapezoidal | Carga | L2 | Flujo volumétrico |
|-----------|-------------|-------|-----------|-------------------|
| (l/min) | L2 (cm) | (cm) | Error abs | Error abs |
| 45,00 | 17,30 | 2,00 | 0,05 | 1,80 |
| 40,00 | 17,10 | 1,80 | 0,05 | 1,60 |
| 35,00 | 16,80 | 1,50 | 0,05 | 1,40 |
| 30,00 | 16,70 | 1,40 | 0,05 | 1,20 |
| 25,00 | 16,50 | 1,20 | 0,05 | 1,00 |
| 20,00 | 16,30 | 1,00 | 0,05 | 0,80 |
| 15,00 | 16,20 | 0,90 | 0,05 | 0,60 |
| 10,00 | 16,10 | 0,80 | 0,05 | 0,40 |

Fuente: elaboración propia.

Tabla XV. **Valores para regresión lineal para el vertedero trapezoidal de la prueba 1**

| ln (FLUJO) | ln (H) | ln (error flujo) | ln (error H) |
|------------|--------|------------------|--------------|
| 3,81 | 0,69 | 0,04 | 0,0250 |
| 3,69 | 0,59 | 0,04 | 0,0278 |
| 3,56 | 0,41 | 0,04 | 0,0333 |
| 3,40 | 0,34 | 0,04 | 0,0357 |
| 3,22 | 0,18 | 0,04 | 0,0417 |
| 3,00 | 0,00 | 0,04 | 0,0500 |
| 2,71 | -0,11 | 0,04 | 0,0556 |
| 2,30 | -0,22 | 0,04 | 0,0625 |

Fuente: elaboración propia.

Continuación de apéndice 2.

Tabla XVI. **Cargas y errores experimentales para el vertedero rectangular de la prueba 1**

| Rotámetro | Vertedero Rectangular | Carga | L2 | Flujo volumétrico |
|-----------|-----------------------|-------|-----------|-------------------|
| (l/min) | L2 (cm) | (cm) | Error abs | Error abs |
| 45,00 | 14,90 | 1,70 | 0,05 | 1,80 |
| 40,00 | 14,70 | 1,50 | 0,05 | 1,60 |
| 35,00 | 14,60 | 1,40 | 0,05 | 1,40 |
| 30,00 | 14,40 | 1,20 | 0,05 | 1,20 |
| 25,00 | 14,20 | 1,00 | 0,05 | 1,00 |
| 20,00 | 14,10 | 0,90 | 0,05 | 0,80 |
| 15,00 | 13,80 | 0,60 | 0,05 | 0,60 |
| 10,00 | 13,70 | 0,50 | 0,05 | 0,40 |

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVII. **Valores de regresión lineal para vertedero rectangular de la prueba 1**

| ln (FLUJO) | ln (H) | ln (error flujo) | ln (error H) |
|------------|--------|------------------|--------------|
| 3,81 | 0,53 | 0,04 | 0,0294 |
| 3,69 | 0,41 | 0,04 | 0,0333 |
| 3,56 | 0,34 | 0,04 | 0,0357 |
| 3,40 | 0,18 | 0,04 | 0,0417 |
| 3,22 | 0,00 | 0,04 | 0,0500 |
| 3,00 | -0,11 | 0,04 | 0,0556 |
| 2,71 | -0,51 | 0,04 | 0,0833 |
| 2,30 | -0,69 | 0,04 | 0,1000 |

Fuente: elaboración propia.

Continuación de apéndice 2.

Tabla XVIII. **Error experimental del medidor de turbina en la prueba 2**

| Rotámetro | | Turbina | |
|-----------|-----------|---------|-----------|
| (l/min) | Error abs | (l/min) | Error abs |
| 45,00 | 1,80 | 45,00 | 1,80 |
| 40,00 | 1,60 | 40,10 | 1,70 |
| 35,00 | 1,40 | 35,20 | 1,60 |
| 30,00 | 1,20 | 30,20 | 1,40 |
| 25,00 | 1,00 | 25,30 | 1,30 |
| 20,00 | 0,80 | 19,70 | 1,10 |
| 15,00 | 0,60 | 15,40 | 1,00 |
| 10,00 | 0,40 | 10,50 | 0,90 |

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIX. **Diferencia de presión y carga para el medidor de Venturi de la prueba 2**

| Rotámetro | Venturi | | | | | |
|-----------|----------|----------|-------------|------------|-----------|--------|
| | P1 (psi) | P2 (psi) | P1-P2 (psi) | P1-P2 (Pa) | h1-h2 (m) | D (m) |
| 45,00 | 21,00 | 1,00 | 20,00 | 137894,00 | 14,10 | 0,0115 |
| 40,00 | 15,00 | 1,00 | 14,00 | 96525,80 | 9,87 | 0,0115 |
| 35,00 | 8,50 | 1,00 | 7,50 | 51710,25 | 5,29 | 0,0115 |
| 30,00 | 6,00 | 1,00 | 5,00 | 34473,50 | 3,52 | 0,0115 |
| 25,00 | 3,50 | 1,00 | 2,50 | 17236,75 | 1,76 | 0,0115 |
| 20,00 | 2,50 | 1,00 | 1,50 | 10342,05 | 1,06 | 0,0115 |
| 15,00 | 1,50 | 0,50 | 1,00 | 6894,70 | 0,70 | 0,0115 |
| 10,00 | 0,50 | 0,00 | 0,50 | 3447,35 | 0,35 | 0,0115 |

Fuente: elaboración propia

Continuación de apéndice 2.

Tabla XX. **Velocidad, flujo volumétrico y numero de Reynolds para el medidor de Venturi de la prueba 2**

| | | | | | Flujo volumétrico |
|-----------|----------|------|---------|----------|-------------------|
| Ao (m2) | V (m3/s) | K | V (m/s) | Re | Error abs |
| 0,0001039 | 0,000750 | 0,43 | 7,22 | 82799,04 | 1,80 |
| 0,0001039 | 0,000667 | 0,46 | 6,42 | 73599,15 | 1,60 |
| 0,0001039 | 0,000583 | 0,55 | 5,62 | 64399,26 | 1,40 |
| 0,0001039 | 0,000500 | 0,58 | 4,81 | 55199,36 | 1,20 |
| 0,0001039 | 0,000417 | 0,68 | 4,01 | 45999,47 | 1,00 |
| 0,0001039 | 0,000333 | 0,70 | 3,21 | 36799,58 | 0,80 |
| 0,0001039 | 0,000250 | 0,65 | 2,41 | 27599,68 | 0,60 |
| 0,0001039 | 0,000167 | 0,61 | 1,60 | 18399,79 | 0,40 |

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXI. **Valores de regresión lineal para el medidor de Venturi de la prueba 2**

| P1-P2 (psi) | ln(flujos) | ln(P1-P2) | ln(flujos) | ln(P1-P2) | Error ln(flujos) | Error ln(P1-P2) | Error ln(flujos) | Error ln(P1-P2) |
|-------------|------------|-----------|------------|-----------|------------------|-----------------|------------------|-----------------|
| Error abs | (l/min) | (psi) | (m3/s) | (Pa) | (l/min) | (psi) | (m3/s) | (Pa) |
| 1,00 | 3,81 | 3,00 | -7,20 | 11,83 | 0,040 | 0,05 | 0,040 | 0,05 |
| 1,00 | 3,69 | 2,64 | -7,31 | 11,48 | 0,040 | 0,07 | 0,040 | 0,07 |
| 1,00 | 3,56 | 2,01 | -7,45 | 10,85 | 0,040 | 0,13 | 0,040 | 0,13 |
| 1,00 | 3,40 | 1,61 | -7,60 | 10,45 | 0,040 | 0,20 | 0,040 | 0,20 |
| 1,00 | 3,22 | 0,92 | -7,78 | 9,75 | 0,040 | 0,40 | 0,040 | 0,40 |
| 1,00 | 3,00 | 0,41 | -8,01 | 9,24 | 0,040 | 0,67 | 0,040 | 0,67 |
| 1,00 | 2,71 | 0,00 | -8,29 | 8,84 | 0,040 | 1,00 | 0,040 | 1,01 |
| 1,00 | 2,30 | -0,69 | -8,70 | 8,15 | 0,040 | 2,00 | 0,040 | 2,01 |

Fuente: elaboración propia.

Continuación de apéndice 2.

Tabla XXII. **Diferencia de presión y carga para la placa de orificio de la prueba 2**

| Rotámetro (l/min) | Placa de orificio | | P3-P4 (psi) | P3-P4 (Pa) | h1-h2 (m) | D (m) |
|----------------------|-------------------|----------|----------------|---------------|--------------|--------|
| | P3 (psi) | P4 (psi) | | | | |
| 45,00 | 11,00 | 1,00 | 10,00 | 68947,00 | 7,05 | 0,0115 |
| 40,00 | 10,00 | 1,00 | 9,00 | 62052,30 | 6,34 | 0,0115 |
| 35,00 | 9,00 | 1,00 | 8,00 | 55157,60 | 5,64 | 0,0115 |
| 30,00 | 8,50 | 1,00 | 7,50 | 51710,25 | 5,29 | 0,0115 |
| 25,00 | 7,50 | 1,00 | 6,50 | 44815,55 | 4,58 | 0,0115 |
| 20,00 | 7,00 | 1,00 | 6,00 | 41368,20 | 4,23 | 0,0115 |
| 15,00 | 6,50 | 1,00 | 5,50 | 37920,85 | 3,88 | 0,0115 |
| 10,00 | 5,50 | 1,00 | 4,50 | 31026,15 | 3,17 | 0,0115 |

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIII. **Velocidad, flujo volumétrico y numero de Reynolds para la placa de orificio de la prueba 2**

| Ao (m ²) | V (m ³ /s) | K | V (m/s) | Re | Flujo volumétrico |
|----------------------|-----------------------|------|---------|----------|----------------------|
| | | | | | Error abs |
| 0,0001039 | 0,000750 | 0,61 | 7,22 | 82799,04 | 1,80 |
| 0,0001039 | 0,000667 | 0,58 | 6,42 | 73599,15 | 1,60 |
| 0,0001039 | 0,000583 | 0,53 | 5,62 | 64399,26 | 1,40 |
| 0,0001039 | 0,000500 | 0,47 | 4,81 | 55199,36 | 1,20 |
| 0,0001039 | 0,000417 | 0,42 | 4,01 | 45999,47 | 1,00 |
| 0,0001039 | 0,000333 | 0,35 | 3,21 | 36799,58 | 0,80 |
| 0,0001039 | 0,000250 | 0,28 | 2,41 | 27599,68 | 0,60 |
| 0,0001039 | 0,000167 | 0,20 | 1,60 | 18399,79 | 0,40 |

Fuente: elaboración propia.

Continuación de apéndice 2.

Tabla XXIV. **Valores de regresión lineal para la placa de orificio de la prueba 2**

| P3-P4 (psi) | ln(flujos) | ln(P3-P4) | ln(flujos) | ln(P3-P4) | Error ln(flujos) | Error ln(P1-P2) | Error ln(flujos) | Error ln(P1-P2) |
|----------------|------------|-----------|---------------------|-----------|---------------------|--------------------|---------------------|--------------------|
| Error abs | (l/min) | (psi) | (m ³ /s) | (Pa) | (l/min) | (psi) | (m ³ /s) | (Pa) |
| 1,00 | 3,81 | 2,30 | -7,20 | 11,14 | 0,040 | 0,10 | 0,040 | 0,10 |
| 1,00 | 3,69 | 2,20 | -7,31 | 11,04 | 0,040 | 0,11 | 0,040 | 0,11 |
| 1,00 | 3,56 | 2,08 | -7,45 | 10,92 | 0,040 | 0,13 | 0,040 | 0,13 |
| 1,00 | 3,40 | 2,01 | -7,60 | 10,85 | 0,040 | 0,13 | 0,040 | 0,13 |
| 1,00 | 3,22 | 1,87 | -7,78 | 10,71 | 0,040 | 0,15 | 0,040 | 0,15 |
| 1,00 | 3,00 | 1,79 | -8,01 | 10,63 | 0,040 | 0,17 | 0,040 | 0,17 |
| 1,00 | 2,71 | 1,70 | -8,29 | 10,54 | 0,040 | 0,18 | 0,040 | 0,18 |
| 1,00 | 2,30 | 1,50 | -8,70 | 10,34 | 0,040 | 0,22 | 0,040 | 0,22 |

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXV. **Errores experimentales para el medidor de ranura de la prueba 2**

| Rotámetro | Ranura | L1 | Flujo volumétrico |
|-----------|---------|-----------|----------------------|
| (l/min) | L1 (cm) | Error abs | Error abs |
| 45,00 | 6,80 | 0,05 | 1,80 |
| 40,00 | 6,20 | 0,05 | 1,60 |
| 35,00 | 6,00 | 0,05 | 1,40 |
| 30,00 | 5,60 | 0,05 | 1,20 |
| 25,00 | 5,20 | 0,05 | 1,00 |
| 20,00 | 4,90 | 0,05 | 0,80 |
| 15,00 | 4,50 | 0,05 | 0,60 |
| 10,00 | 4,10 | 0,05 | 0,40 |

Fuente: elaboración propia.

Continuación de apéndice 2.

Tabla XXVI. **Cargas y errores experimentales para el vertedero triangular de la prueba 2**

| Rotámetro | Triangular | Carga | L2 | Flujo volumétrico |
|-----------|------------|-------|-----------|-------------------|
| (l/min) | L2 (cm) | (cm) | Error abs | Error abs |
| 45,00 | 17,80 | 6,60 | 0,05 | 1,80 |
| 40,00 | 17,50 | 6,30 | 0,05 | 1,60 |
| 35,00 | 17,20 | 6,00 | 0,05 | 1,40 |
| 30,00 | 16,80 | 5,60 | 0,05 | 1,20 |
| 25,00 | 16,40 | 5,20 | 0,05 | 1,00 |
| 20,00 | 15,90 | 4,70 | 0,05 | 0,80 |
| 15,00 | 15,50 | 4,30 | 0,05 | 0,60 |
| 10,00 | 14,80 | 3,60 | 0,05 | 0,40 |

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVII. **Valores para regresión lineal para el vertedero triangular de la prueba 2**

| ln (FLUJO) | ln (H) | ln (error flujo) | ln (error H) |
|------------|--------|------------------|--------------|
| 3,81 | 1,89 | 0,04 | 0,0076 |
| 3,69 | 1,84 | 0,04 | 0,0079 |
| 3,56 | 1,79 | 0,04 | 0,0083 |
| 3,40 | 1,72 | 0,04 | 0,0089 |
| 3,22 | 1,65 | 0,04 | 0,0096 |
| 3,00 | 1,55 | 0,04 | 0,0106 |
| 2,71 | 1,46 | 0,04 | 0,0116 |
| 2,30 | 1,28 | 0,04 | 0,0139 |

Fuente: elaboración propia.

Continuación de apéndice 2.

Tabla XXVIII. **Cargas y errores experimentales para el vertedero trapezoidal de la prueba 2**

| Rotámetro | Trapezoidal | Carga | L2 | Flujo volumétrico |
|-----------|-------------|-------|-----------|-------------------|
| (l/min) | L2 (cm) | (cm) | Error abs | Error abs |
| 45,00 | 17,20 | 1,90 | 0,05 | 1,80 |
| 40,00 | 17,10 | 1,80 | 0,05 | 1,60 |
| 35,00 | 16,90 | 1,60 | 0,05 | 1,40 |
| 30,00 | 16,70 | 1,40 | 0,05 | 1,20 |
| 25,00 | 16,40 | 1,10 | 0,05 | 1,00 |
| 20,00 | 16,20 | 0,90 | 0,05 | 0,80 |
| 15,00 | 16,00 | 0,70 | 0,05 | 0,60 |
| 10,00 | 15,90 | 0,60 | 0,05 | 0,40 |

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIX. **Valores para regresión lineal para el vertedero trapezoidal de la prueba 2**

| ln (FLUJO) | ln (H) | ln (error flujo) | ln (error H) |
|------------|--------|------------------|--------------|
| 3,81 | 0,64 | 0,04 | 0,0263 |
| 3,69 | 0,59 | 0,04 | 0,0278 |
| 3,56 | 0,47 | 0,04 | 0,0313 |
| 3,40 | 0,34 | 0,04 | 0,0357 |
| 3,22 | 0,10 | 0,04 | 0,0455 |
| 3,00 | -0,11 | 0,04 | 0,0556 |
| 2,71 | -0,36 | 0,04 | 0,0714 |
| 2,30 | -0,51 | 0,04 | 0,0833 |

Fuente: elaboración propia.

Continuación de apéndice 2.

Tabla XXX. **Cargas y errores experimentales para el vertedero rectangular de la prueba 2**

| Rotámetro | Vertedero Rectangular | Carga | L2 | Flujo volumétrico |
|-----------|-----------------------|-------|-----------|-------------------|
| (l/min) | L2 (cm) | (cm) | Error abs | Error abs |
| 45,00 | 15,00 | 1,80 | 0,05 | 1,80 |
| 40,00 | 14,70 | 1,50 | 0,05 | 1,60 |
| 35,00 | 14,60 | 1,40 | 0,05 | 1,40 |
| 30,00 | 14,40 | 1,20 | 0,05 | 1,20 |
| 25,00 | 14,10 | 0,90 | 0,05 | 1,00 |
| 20,00 | 14,00 | 0,80 | 0,05 | 0,80 |
| 15,00 | 13,80 | 0,60 | 0,05 | 0,60 |
| 10,00 | 13,60 | 0,40 | 0,05 | 0,40 |

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXI. **Valores de regresión lineal para vertedero rectangular de la prueba 2**

| ln (FLUJO) | ln (H) | ln (error flujo) | ln (error H) |
|------------|--------|------------------|--------------|
| 3,81 | 0,59 | 0,04 | 0,0278 |
| 3,69 | 0,41 | 0,04 | 0,0333 |
| 3,56 | 0,34 | 0,04 | 0,0357 |
| 3,40 | 0,18 | 0,04 | 0,0417 |
| 3,22 | -0,11 | 0,04 | 0,0556 |
| 3,00 | -0,22 | 0,04 | 0,0625 |
| 2,71 | -0,51 | 0,04 | 0,0833 |
| 2,30 | -0,92 | 0,04 | 0,1250 |

Fuente: elaboración propia.

Continuación de apéndice 2.

Tabla XXXII. **Error experimental del medidor de turbina en la prueba 3**

| Rotámetro | | Turbina | |
|-----------|-----------|---------|-----------|
| (l/min) | Error abs | (l/min) | Error abs |
| 45,00 | 1,80 | 45,30 | 2,10 |
| 40,00 | 1,60 | 40,10 | 1,70 |
| 35,00 | 1,40 | 35,20 | 1,60 |
| 30,00 | 1,20 | 30,20 | 1,40 |
| 25,00 | 1,00 | 24,60 | 1,40 |
| 20,00 | 0,80 | 20,40 | 1,20 |
| 15,00 | 0,60 | 15,40 | 1,00 |
| 10,00 | 0,40 | 10,50 | 0,90 |

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIII. **Diferencia de presión y carga para el medidor de Venturi de la prueba 3**

| Rotámetro | Venturi | | | | | |
|-----------|----------|----------|-------------|------------|-----------|--------|
| | P1 (psi) | P2 (psi) | P1-P2 (psi) | P1-P2 (Pa) | h1-h2 (m) | D (m) |
| 45,00 | 21,00 | 1,00 | 20,00 | 137894,00 | 14,10 | 0,0115 |
| 40,00 | 15,00 | 1,00 | 14,00 | 96525,80 | 9,87 | 0,0115 |
| 35,00 | 8,00 | 1,00 | 7,00 | 48262,90 | 4,93 | 0,0115 |
| 30,00 | 6,00 | 1,00 | 5,00 | 34473,50 | 3,52 | 0,0115 |
| 25,00 | 3,50 | 1,00 | 2,50 | 17236,75 | 1,76 | 0,0115 |
| 20,00 | 2,50 | 1,00 | 1,50 | 10342,05 | 1,06 | 0,0115 |
| 15,00 | 1,50 | 0,00 | 1,50 | 10342,05 | 1,06 | 0,0115 |
| 10,00 | 1,00 | 0,00 | 1,00 | 6894,70 | 0,70 | 0,0115 |

Fuente: elaboración propia.

Continuación de apéndice 2.

Tabla XXXIV. **Velocidad, flujo volumétrico y numero de Reynolds para el medidor de Venturi de la prueba 3**

| | | | | | Flujo volumétrico |
|-----------|----------|------|---------|----------|-------------------|
| Ao (m2) | V (m3/s) | K | V (m/s) | Re | Error abs |
| 0,0001039 | 0,000750 | 0,43 | 7,22 | 82799,04 | 1,80 |
| 0,0001039 | 0,000667 | 0,46 | 6,42 | 73599,15 | 1,60 |
| 0,0001039 | 0,000583 | 0,57 | 5,62 | 64399,26 | 1,40 |
| 0,0001039 | 0,000500 | 0,58 | 4,81 | 55199,36 | 1,20 |
| 0,0001039 | 0,000417 | 0,68 | 4,01 | 45999,47 | 1,00 |
| 0,0001039 | 0,000333 | 0,70 | 3,21 | 36799,58 | 0,80 |
| 0,0001039 | 0,000250 | 0,53 | 2,41 | 27599,68 | 0,60 |
| 0,0001039 | 0,000167 | 0,43 | 1,60 | 18399,79 | 0,40 |

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXV. **Valores de regresión lineal para el medidor de Venturi de la prueba 3**

| P1-P2 (psi) | ln(flujos) | ln(P1-P2) | ln(flujos) | ln(P1-P2) | Error ln(flujos) | Error ln(P1-P2) | Error ln(flujos) | Error ln(P1-P2) |
|-------------|------------|-----------|------------|-----------|------------------|-----------------|------------------|-----------------|
| Error abs | (l/min) | (psi) | (m3/s) | (Pa) | (l/min) | (psi) | (m3/s) | (Pa) |
| 1,00 | 3,81 | 3,00 | -7,20 | 11,83 | 0,040 | 0,05 | 0,040 | 0,05 |
| 1,00 | 3,69 | 2,64 | -7,31 | 11,48 | 0,040 | 0,07 | 0,040 | 0,07 |
| 1,00 | 3,56 | 1,95 | -7,45 | 10,78 | 0,040 | 0,14 | 0,040 | 0,14 |
| 1,00 | 3,40 | 1,61 | -7,60 | 10,45 | 0,040 | 0,20 | 0,040 | 0,20 |
| 1,00 | 3,22 | 0,92 | -7,78 | 9,75 | 0,040 | 0,40 | 0,040 | 0,40 |
| 1,00 | 3,00 | 0,41 | -8,01 | 9,24 | 0,040 | 0,67 | 0,040 | 0,67 |
| 1,00 | 2,71 | 0,41 | -8,29 | 9,24 | 0,040 | 0,67 | 0,040 | 0,67 |
| 1,00 | 2,30 | 0,00 | -8,70 | 8,84 | 0,040 | 1,00 | 0,040 | 1,01 |

Fuente: elaboración propia.

Continuación de apéndice 2.

Tabla XXXVI. **Diferencia de presión y carga para la placa de orificio de la prueba 3**

| Rotámetro (l/min) | Placa de orificio | | P3-P4 (psi) | P3-P4 (Pa) | h1-h2 (m) | D (m) |
|----------------------|-------------------|----------|----------------|---------------|--------------|--------|
| | P3 (psi) | P4 (psi) | | | | |
| 45,00 | 11,00 | 1,00 | 10,00 | 68947,00 | 7,05 | 0,0115 |
| 40,00 | 10,00 | 1,00 | 9,00 | 62052,30 | 6,34 | 0,0115 |
| 35,00 | 9,00 | 1,00 | 8,00 | 55157,60 | 5,64 | 0,0115 |
| 30,00 | 8,50 | 1,00 | 7,50 | 51710,25 | 5,29 | 0,0115 |
| 25,00 | 8,00 | 1,00 | 7,00 | 48262,90 | 4,93 | 0,0115 |
| 20,00 | 7,50 | 1,00 | 6,50 | 44815,55 | 4,58 | 0,0115 |
| 15,00 | 6,50 | 1,00 | 5,50 | 37920,85 | 3,88 | 0,0115 |
| 10,00 | 5,00 | 1,00 | 4,00 | 27578,80 | 2,82 | 0,0115 |

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVII. **Velocidad, flujo volumétrico y numero de Reynolds para la placa de orificio de la prueba 3**

| Ao (m ²) | V (m ³ /s) | K | V (m/s) | Re | Flujo volumétrico |
|----------------------|-----------------------|------|---------|----------|----------------------|
| | | | | | Error abs |
| 0,0001039 | 0,000750 | 0,61 | 7,22 | 82799,04 | 1,80 |
| 0,0001039 | 0,000667 | 0,58 | 6,42 | 73599,15 | 1,60 |
| 0,0001039 | 0,000583 | 0,53 | 5,62 | 64399,26 | 1,40 |
| 0,0001039 | 0,000500 | 0,47 | 4,81 | 55199,36 | 1,20 |
| 0,0001039 | 0,000417 | 0,41 | 4,01 | 45999,47 | 1,00 |
| 0,0001039 | 0,000333 | 0,34 | 3,21 | 36799,58 | 0,80 |
| 0,0001039 | 0,000250 | 0,28 | 2,41 | 27599,68 | 0,60 |
| 0,0001039 | 0,000167 | 0,22 | 1,60 | 18399,79 | 0,40 |

Fuente: elaboración propia.

Continuación de apéndice 2.

Tabla XXXVIII. **Valores de regresión lineal para la placa de orificio de la prueba 3**

| P3-P4 (psi) | ln(flujos) | ln(P3-P4) | ln(flujos) | ln(P3-P4) | Error ln(flujos) | Error ln(P1-P2) | Error ln(flujos) | Error ln(P1-P2) |
|----------------|------------|-----------|---------------------|-----------|---------------------|--------------------|---------------------|--------------------|
| Error abs | (l/min) | (psi) | (m ³ /s) | (Pa) | (l/min) | (psi) | (m ³ /s) | (Pa) |
| 1,00 | 3,81 | 2,30 | -7,20 | 11,14 | 0,040 | 0,10 | 0,040 | 0,10 |
| 1,00 | 3,69 | 2,20 | -7,31 | 11,04 | 0,040 | 0,11 | 0,040 | 0,11 |
| 1,00 | 3,56 | 2,08 | -7,45 | 10,92 | 0,040 | 0,13 | 0,040 | 0,13 |
| 1,00 | 3,40 | 2,01 | -7,60 | 10,85 | 0,040 | 0,13 | 0,040 | 0,13 |
| 1,00 | 3,22 | 1,95 | -7,78 | 10,78 | 0,040 | 0,14 | 0,040 | 0,14 |
| 1,00 | 3,00 | 1,87 | -8,01 | 10,71 | 0,040 | 0,15 | 0,040 | 0,15 |
| 1,00 | 2,71 | 1,70 | -8,29 | 10,54 | 0,040 | 0,18 | 0,040 | 0,18 |
| 1,00 | 2,30 | 1,39 | -8,70 | 10,22 | 0,040 | 0,25 | 0,040 | 0,25 |

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIX. **Errores experimentales para el medidor de ranura de la prueba 3**

| Rotámetro | Ranura | L1 | Flujo volumétrico |
|-----------|---------|-----------|----------------------|
| (l/min) | L1 (cm) | Error abs | Error abs |
| 45,00 | 6,70 | 0,05 | 1,80 |
| 40,00 | 6,20 | 0,05 | 1,60 |
| 35,00 | 5,70 | 0,05 | 1,40 |
| 30,00 | 5,50 | 0,05 | 1,20 |
| 25,00 | 5,20 | 0,05 | 1,00 |
| 20,00 | 4,80 | 0,05 | 0,80 |
| 15,00 | 4,50 | 0,05 | 0,60 |
| 10,00 | 4,00 | 0,05 | 0,40 |

Fuente: elaboración propia.

Continuación de apéndice 2.

Tabla XL. **Cargas y errores experimentales para el vertedero triangular de la prueba 3**

| Rotámetro | Triangular | Carga | L2 | Flujo volumétrico |
|-----------|------------|-------|-----------|-------------------|
| (l/min) | L2 (cm) | (cm) | Error abs | Error abs |
| 45,00 | 17,80 | 6,60 | 0,05 | 1,80 |
| 40,00 | 17,50 | 6,30 | 0,05 | 1,60 |
| 35,00 | 16,90 | 5,70 | 0,05 | 1,40 |
| 30,00 | 16,70 | 5,50 | 0,05 | 1,20 |
| 25,00 | 16,30 | 5,10 | 0,05 | 1,00 |
| 20,00 | 16,00 | 4,80 | 0,05 | 0,80 |
| 15,00 | 15,50 | 4,30 | 0,05 | 0,60 |
| 10,00 | 15,00 | 3,80 | 0,05 | 0,40 |

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLI. **Valores para regresión lineal para el vertedero triangular de la prueba 3**

| ln (FLUJO) | ln (H) | ln (error flujo) | ln (error H) |
|------------|--------|------------------|--------------|
| 3,81 | 1,89 | 0,04 | 0,0076 |
| 3,69 | 1,84 | 0,04 | 0,0079 |
| 3,56 | 1,74 | 0,04 | 0,0088 |
| 3,40 | 1,70 | 0,04 | 0,0091 |
| 3,22 | 1,63 | 0,04 | 0,0098 |
| 3,00 | 1,57 | 0,04 | 0,0104 |
| 2,71 | 1,46 | 0,04 | 0,0116 |
| 2,30 | 1,34 | 0,04 | 0,0132 |

Fuente: elaboración propia.

Continuación de apéndice 2.

Tabla XLII. **Cargas y errores experimentales para el vertedero trapezoidal de la prueba 3**

| Rotámetro | Trapezoidal | Carga | L2 | Flujo volumétrico |
|-----------|-------------|-------|-----------|-------------------|
| (l/min) | L2 (cm) | (cm) | Error abs | Error abs |
| 45,00 | 17,30 | 2,00 | 0,05 | 1,80 |
| 40,00 | 17,10 | 1,80 | 0,05 | 1,60 |
| 35,00 | 16,90 | 1,60 | 0,05 | 1,40 |
| 30,00 | 16,70 | 1,40 | 0,05 | 1,20 |
| 25,00 | 16,50 | 1,20 | 0,05 | 1,00 |
| 20,00 | 16,30 | 1,00 | 0,05 | 0,80 |
| 15,00 | 16,10 | 0,80 | 0,05 | 0,60 |
| 10,00 | 16,00 | 0,70 | 0,05 | 0,40 |

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLIII. **Valores para regresión lineal para el vertedero trapezoidal de la prueba 3**

| ln (FLUJO) | ln (H) | ln (error flujo) | ln (error H) |
|------------|--------|------------------|--------------|
| 3,81 | 0,69 | 0,04 | 0,025 |
| 3,69 | 0,59 | 0,04 | 0,028 |
| 3,56 | 0,47 | 0,04 | 0,031 |
| 3,40 | 0,34 | 0,04 | 0,036 |
| 3,22 | 0,18 | 0,04 | 0,042 |
| 3,00 | 0,00 | 0,04 | 0,050 |
| 2,71 | -0,22 | 0,04 | 0,063 |
| 2,30 | -0,36 | 0,04 | 0,071 |

Fuente: elaboración propia.

Continuación de apéndice 2.

Tabla XLIV. **Cargas y errores experimentales para el vertedero rectangular de la prueba 3**

| Rotámetro | Vertedero Rectangular | Carga | L2 | Flujo volumétrico |
|-----------|-----------------------|-------|-----------|-------------------|
| (l/min) | L2 (cm) | (cm) | Error abs | Error abs |
| 45,00 | 14,90 | 1,70 | 0,05 | 1,80 |
| 40,00 | 14,80 | 1,60 | 0,05 | 1,60 |
| 35,00 | 14,60 | 1,40 | 0,05 | 1,40 |
| 30,00 | 14,40 | 1,20 | 0,05 | 1,20 |
| 25,00 | 14,20 | 1,00 | 0,05 | 1,00 |
| 20,00 | 14,00 | 0,80 | 0,05 | 0,80 |
| 15,00 | 13,80 | 0,60 | 0,05 | 0,60 |
| 10,00 | 13,70 | 0,50 | 0,05 | 0,40 |

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLV. **Valores de regresión lineal para vertedero rectangular de la prueba 3**

| ln (FLUJO) | ln (H) | ln (error flujo) | ln (error H) |
|------------|--------|------------------|--------------|
| 3,81 | 0,53 | 0,04 | 0,0294 |
| 3,69 | 0,47 | 0,04 | 0,0313 |
| 3,56 | 0,34 | 0,04 | 0,0357 |
| 3,40 | 0,18 | 0,04 | 0,0417 |
| 3,22 | 0,00 | 0,04 | 0,0500 |
| 3,00 | -0,22 | 0,04 | 0,0625 |
| 2,71 | -0,51 | 0,04 | 0,0833 |
| 2,30 | -0,69 | 0,04 | 0,1000 |

Fuente: elaboración propia.

Continuación de apéndice 2.

Tabla XLVI. **Error experimental promedio del medidor de turbina**

| Rotámetro | | Turbina | |
|-----------|-----------|---------|-----------|
| (l/min) | Error abs | (l/min) | Error abs |
| 45 | 1,80 | 45,10 | 1,90 |
| 40 | 1,60 | 40,10 | 1,70 |
| 35 | 1,40 | 35,20 | 1,60 |
| 30 | 1,20 | 30,20 | 1,40 |
| 25 | 1,00 | 25,07 | 1,33 |
| 20 | 0,80 | 19,93 | 1,13 |
| 15 | 0,60 | 15,40 | 1,00 |
| 10 | 0,40 | 10,50 | 0,90 |

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLVII. **Diferencia de presión y carga promedio para el medidor de Venturi**

| Rotámetro | Venturi | | | | | |
|-----------|----------|----------|-------------|------------|-----------|--------|
| | P1 (psi) | P2 (psi) | P1-P2 (psi) | P1-P2 (Pa) | h1-h2 (m) | D (m) |
| 45,00 | 21,33 | 1,00 | 20,33 | 140192,23 | 14,33 | 0,0115 |
| 40,00 | 14,83 | 1,00 | 13,83 | 95376,68 | 9,75 | 0,0115 |
| 35,00 | 8,17 | 1,00 | 7,17 | 49412,02 | 5,05 | 0,0115 |
| 30,00 | 5,67 | 1,00 | 4,67 | 32175,27 | 3,29 | 0,0115 |
| 25,00 | 3,33 | 1,00 | 2,33 | 16087,63 | 1,64 | 0,0115 |
| 20,00 | 2,17 | 0,67 | 1,50 | 10342,05 | 1,06 | 0,0115 |
| 15,00 | 1,33 | 0,17 | 1,17 | 8043,82 | 0,82 | 0,0115 |
| 10,00 | 0,67 | 0,00 | 0,67 | 4596,47 | 0,47 | 0,0115 |

Fuente: elaboración propia.

Continuación de apéndice 2.

Tabla XLVIII. **Velocidad, flujo volumétrico y numero de Reynolds promedio para el medidor de Venturi**

| | | | | | Flujo volumétrico |
|----------------------|-----------------------|------|---------|----------|-------------------|
| Ao (m ²) | V (m ³ /s) | K | V (m/s) | Re | Error abs |
| 0,0001039 | 0,000750 | 0,43 | 7,22 | 82799,04 | 1,80 |
| 0,0001039 | 0,000667 | 0,46 | 6,42 | 73599,15 | 1,60 |
| 0,0001039 | 0,000583 | 0,56 | 5,62 | 64399,26 | 1,40 |
| 0,0001039 | 0,000500 | 0,60 | 4,81 | 55199,36 | 1,20 |
| 0,0001039 | 0,000417 | 0,71 | 4,01 | 45999,47 | 1,00 |
| 0,0001039 | 0,000333 | 0,70 | 3,21 | 36799,58 | 0,80 |
| 0,0001039 | 0,000250 | 0,61 | 2,41 | 27599,68 | 0,60 |
| 0,0001039 | 0,000167 | 0,55 | 1,60 | 18399,79 | 0,40 |

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLIX. **Valores promedio de regresión lineal para el medidor de Venturi**

| P1-P2 (psi) | ln(flujos) | ln(P1-P2) | ln(flujos) | ln(P1-P2) |
|-------------|------------|-----------|---------------------|-----------|
| Error abs | (l/min) | (psi) | (m ³ /s) | (Pa) |
| 1,00 | 3,81 | 3,01 | -7,20 | 11,85 |
| 1,00 | 3,69 | 2,63 | -7,31 | 11,47 |
| 1,00 | 3,56 | 1,97 | -7,45 | 10,81 |
| 1,00 | 3,40 | 1,54 | -7,60 | 10,37 |
| 1,00 | 3,22 | 0,84 | -7,78 | 9,68 |
| 1,00 | 3,00 | 0,41 | -8,01 | 9,24 |
| 1,00 | 2,71 | 0,14 | -8,29 | 8,97 |
| 1,00 | 2,30 | -0,46 | -8,70 | 8,38 |

Fuente: elaboración propia.

Continuación de apéndice 2.

Tabla L. **Errores promedio de los valores de regresión lineal para el medidor de Venturi**

| Error ln(flujo) | Error ln(P1-P2) | Error ln(flujo) | Error ln(P1-P2) | Flujo volumétrico corregido | Error de correlación |
|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------------------|----------------------|
| (l/min) | (psi) | (m3/s) | (Pa) | (l/min) | (l/min) |
| 0,04 | 0,05 | 0,04 | 0,05 | 50,46 | 2,11 |
| 0,04 | 0,07 | 0,04 | 0,07 | 43,17 | 2,21 |
| 0,04 | 0,14 | 0,04 | 0,14 | 33,07 | 2,58 |
| 0,04 | 0,22 | 0,04 | 0,22 | 27,80 | 3,01 |
| 0,04 | 0,43 | 0,04 | 0,44 | 20,99 | 4,09 |
| 0,04 | 0,67 | 0,04 | 0,67 | 17,55 | 5,11 |
| 0,04 | 0,89 | 0,04 | 0,89 | 15,85 | 5,84 |
| 0,04 | 1,67 | 0,04 | 1,68 | 12,63 | 7,95 |

Fuente: elaboración propia.

Tabla LI. **Diferencia promedio de presión y carga para la placa de orificio**

| Rotámetro | Placa de orificio | | | | | |
|-----------|-------------------|----------|-------------|------------|-----------|--------|
| | P3 (psi) | P4 (psi) | P3-P4 (psi) | P3-P4 (Pa) | h1-h2 (m) | D (m) |
| 45,00 | 11,00 | 1,00 | 10,00 | 68947,00 | 7,05 | 0,0115 |
| 40,00 | 10,00 | 1,00 | 9,00 | 62052,30 | 6,34 | 0,0115 |
| 35,00 | 9,00 | 1,00 | 8,00 | 55157,60 | 5,64 | 0,0115 |
| 30,00 | 8,50 | 1,00 | 7,50 | 51710,25 | 5,29 | 0,0115 |
| 25,00 | 7,83 | 1,00 | 6,83 | 47113,78 | 4,82 | 0,0115 |
| 20,00 | 7,17 | 1,00 | 6,17 | 42517,32 | 4,35 | 0,0115 |
| 15,00 | 6,33 | 1,00 | 5,33 | 36771,73 | 3,76 | 0,0115 |
| 10,00 | 5,00 | 1,00 | 4,00 | 27578,80 | 2,82 | 0,0115 |

Fuente: elaboración propia.

Continuación de apéndice 2.

Tabla LII. **Velocidad, flujo volumétrico y número de Reynolds promedio para la placa de orificio**

| | | | | | Flujo volumétrico |
|----------------------|-----------------------|------|---------|----------|-------------------|
| Ao (m ²) | V (m ³ /s) | K | V (m/s) | Re | Error abs |
| 0,0001039 | 0,000750 | 0,61 | 7,22 | 82799,04 | 1,80 |
| 0,0001039 | 0,000667 | 0,58 | 6,42 | 73599,15 | 1,60 |
| 0,0001039 | 0,000583 | 0,53 | 5,62 | 64399,26 | 1,40 |
| 0,0001039 | 0,000500 | 0,47 | 4,81 | 55199,36 | 1,20 |
| 0,0001039 | 0,000417 | 0,41 | 4,01 | 45999,47 | 1,00 |
| 0,0001039 | 0,000333 | 0,35 | 3,21 | 36799,58 | 0,80 |
| 0,0001039 | 0,000250 | 0,28 | 2,41 | 27599,68 | 0,60 |
| 0,0001039 | 0,000167 | 0,22 | 1,60 | 18399,79 | 0,40 |

Fuente: elaboración propia.

Tabla LIII. **Valores promedio de regresión lineal para la placa de orificio**

| P3-P4 (psi) | ln(flujos) | ln(P3-P4) | ln(flujos) | ln(P3-P4) |
|-------------|------------|-----------|---------------------|-----------|
| Error abs | (l/min) | (psi) | (m ³ /s) | (Pa) |
| 1,00 | 3,81 | 2,30 | -7,20 | 11,14 |
| 1,00 | 3,69 | 2,20 | -7,31 | 11,04 |
| 1,00 | 3,56 | 2,08 | -7,45 | 10,92 |
| 1,00 | 3,40 | 2,01 | -7,60 | 10,85 |
| 1,00 | 3,22 | 1,92 | -7,78 | 10,76 |
| 1,00 | 3,00 | 1,82 | -8,01 | 10,66 |
| 1,00 | 2,71 | 1,67 | -8,29 | 10,51 |
| 1,00 | 2,30 | 1,38 | -8,70 | 10,22 |

Fuente: elaboración propia.

Continuación de apéndice 2.

Tabla LIV. **Errores promedio de valores de regresión lineal para la placa de orificio**

| Error ln(flujos) | Error ln(P1-P2) | Error ln(flujos) | Error ln(P1-P2) | Flujo volumétrico corregido | Error de correlación |
|------------------|-----------------|---------------------|-----------------|-----------------------------|----------------------|
| (l/min) | (psi) | (m ³ /s) | (Pa) | (l/min) | (l/min) |
| 0,04 | 0,10 | 0,04 | 0,10 | 47,86 | 18,59 |
| 0,04 | 0,11 | 0,04 | 0,11 | 39,89 | 16,05 |
| 0,04 | 0,13 | 0,04 | 0,13 | 32,54 | 13,68 |
| 0,04 | 0,13 | 0,04 | 0,13 | 29,11 | 12,56 |
| 0,04 | 0,15 | 0,04 | 0,15 | 24,78 | 11,13 |
| 0,04 | 0,16 | 0,04 | 0,16 | 20,75 | 9,78 |
| 0,04 | 0,19 | 0,04 | 0,19 | 16,14 | 8,20 |
| 0,04 | 0,25 | 0,04 | 0,25 | 9,82 | 5,90 |

Fuente: elaboración propia.

Tabla LV. **Errores experimentales promedio para el medidor de ranura**

| Rotámetro | Ranura | L1 | Flujo volumétrico | Flujo volumétrico o corregido | Error de flujo volumétrico |
|-----------|---------|-----------|-------------------|-------------------------------|----------------------------|
| (l/min) | L1 (cm) | Error abs | Error abs | (l/min) | (l/min) |
| 45,00 | 6,77 | 0,05 | 1,80 | 46,86 | 5,31 |
| 40,00 | 6,17 | 0,05 | 1,60 | 38,70 | 5,07 |
| 35,00 | 5,73 | 0,05 | 1,40 | 32,80 | 4,89 |
| 30,00 | 5,47 | 0,05 | 1,20 | 29,18 | 4,78 |
| 25,00 | 5,17 | 0,05 | 1,00 | 25,10 | 4,66 |
| 20,00 | 4,83 | 0,05 | 0,80 | 20,57 | 4,52 |
| 15,00 | 4,50 | 0,05 | 0,60 | 16,03 | 4,39 |
| 10,00 | 4,03 | 0,05 | 0,40 | 9,69 | 4,20 |

Fuente: elaboración propia.

Continuación de apéndice 2.

Tabla LVI. **Cargas y errores experimentales promedio para el vertedero triangular**

| Rotámetro | Triangular | Carga | L2 | Flujo volumétrico |
|-----------|------------|-------|-----------|-------------------|
| (l/min) | L2 (cm) | (cm) | Error abs | Error abs |
| 45,00 | 17,77 | 6,57 | 0,05 | 1,80 |
| 40,00 | 17,47 | 6,27 | 0,05 | 1,60 |
| 35,00 | 17,03 | 5,83 | 0,05 | 1,40 |
| 30,00 | 16,73 | 5,53 | 0,05 | 1,20 |
| 25,00 | 16,33 | 5,13 | 0,05 | 1,00 |
| 20,00 | 15,93 | 4,73 | 0,05 | 0,80 |
| 15,00 | 15,50 | 4,30 | 0,05 | 0,60 |
| 10,00 | 14,87 | 3,67 | 0,05 | 0,40 |

Fuente: elaboración propia.

Tabla LVII. **Valores promedio para regresión lineal para el vertedero triangular**

| In (FLUJO) | In (H) | In (error flujo) | In (error H) | Flujo volumétrico corregido | Error de flujo volumétrico |
|------------|--------|------------------|--------------|-----------------------------|----------------------------|
| | | | | (l/min) | (l/min) |
| 3,81 | 1,88 | 0,04 | 0,0076 | 46,41 | 13,48 |
| 3,69 | 1,84 | 0,04 | 0,0080 | 41,07 | 11,82 |
| 3,56 | 1,76 | 0,04 | 0,0086 | 34,05 | 9,66 |
| 3,40 | 1,71 | 0,04 | 0,0090 | 29,66 | 8,33 |
| 3,22 | 1,64 | 0,04 | 0,0097 | 24,38 | 6,75 |
| 3,00 | 1,55 | 0,04 | 0,0106 | 19,72 | 5,38 |
| 2,71 | 1,46 | 0,04 | 0,0116 | 15,34 | 4,12 |
| 2,30 | 1,30 | 0,04 | 0,0136 | 10,11 | 2,65 |

Fuente: elaboración propia.

Continuación de apéndice 2.

Tabla LVIII. **Cargas y errores experimentales promedio para el vertedero trapezoidal**

| Rotámetro | Trapezoidal | Carga | L2 | Flujo volumétrico |
|-----------|-------------|-------|-----------|-------------------|
| (l/min) | L2 (cm) | (cm) | Error abs | Error abs |
| 45,00 | 17,27 | 1,97 | 0,05 | 1,80 |
| 40,00 | 17,10 | 1,80 | 0,05 | 1,60 |
| 35,00 | 16,87 | 1,57 | 0,05 | 1,40 |
| 30,00 | 16,70 | 1,40 | 0,05 | 1,20 |
| 25,00 | 16,47 | 1,17 | 0,05 | 1,00 |
| 20,00 | 16,27 | 0,97 | 0,05 | 0,80 |
| 15,00 | 16,10 | 0,80 | 0,05 | 0,60 |
| 10,00 | 16,00 | 0,70 | 0,05 | 0,40 |

Fuente: elaboración propia.

Tabla LIX. **Valores promedio para regresión lineal para el vertedero trapezoidal**

| ln (FLUJO) | ln (H) | ln (error flujo) | ln (error H) | Flujo volumétrico corregido (l/min) | Error de flujo volumétrico (l/min) |
|------------|--------|------------------|--------------|-------------------------------------|------------------------------------|
| 3,81 | 0,68 | 0,040 | 0,025 | 46,96 | 3,60 |
| 3,69 | 0,59 | 0,040 | 0,028 | 41,74 | 3,19 |
| 3,56 | 0,45 | 0,040 | 0,032 | 34,68 | 2,65 |
| 3,40 | 0,34 | 0,040 | 0,036 | 29,86 | 2,30 |
| 3,22 | 0,15 | 0,040 | 0,043 | 23,41 | 1,86 |
| 3,00 | -0,04 | 0,040 | 0,052 | 18,22 | 1,57 |
| 2,71 | -0,23 | 0,040 | 0,063 | 14,16 | 1,53 |
| 2,30 | -0,36 | 0,040 | 0,072 | 11,85 | 1,49 |

Fuente: elaboración propia.

Continuación de apéndice 2.

Tabla LX. **Cargas y errores experimentales promedio para el vertedero rectangular**

| Rotámetro | Vertedero Rectangular | Carga | L2 | Flujo volumétrico |
|-----------|-----------------------|-------|-----------|-------------------|
| (l/min) | L2 (cm) | (cm) | Error abs | Error abs |
| 45,00 | 14,93 | 1,73 | 0,05 | 1,80 |
| 40,00 | 14,73 | 1,53 | 0,05 | 1,60 |
| 35,00 | 14,60 | 1,40 | 0,05 | 1,40 |
| 30,00 | 14,40 | 1,20 | 0,05 | 1,20 |
| 25,00 | 14,17 | 0,97 | 0,05 | 1,00 |
| 20,00 | 14,03 | 0,83 | 0,05 | 0,80 |
| 15,00 | 13,80 | 0,60 | 0,05 | 0,60 |
| 10,00 | 13,67 | 0,47 | 0,05 | 0,40 |

Fuente: elaboración propia.

Tabla LXI. **Valores promedio de regresión lineal para vertedero rectangular**

| In (FLUJO) | In (H) | In (error flujo) | In (error H) | Flujo volumétrico corregido (l/min) | Error de flujo volumétrico (l/min) |
|------------|--------|------------------|--------------|-------------------------------------|------------------------------------|
| 3,81 | 0,55 | 0,040 | 0,029 | 45,57 | 2,91 |
| 3,69 | 0,43 | 0,040 | 0,033 | 39,79 | 2,55 |
| 3,56 | 0,34 | 0,040 | 0,036 | 35,99 | 2,32 |
| 3,40 | 0,18 | 0,040 | 0,042 | 30,35 | 2,01 |
| 3,22 | -0,04 | 0,040 | 0,052 | 23,90 | 1,73 |
| 3,00 | -0,18 | 0,040 | 0,060 | 20,28 | 1,75 |
| 2,71 | -0,51 | 0,040 | 0,083 | 14,11 | 1,73 |
| 2,30 | -0,77 | 0,040 | 0,108 | 10,69 | 1,68 |

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. **Proceso de construcción**

En las figuras 1 y 2 se observa el proceso de unión por soldadura del canal y el soporte de la tubería.

Figura 1. **Soporte de la tubería en proceso de soldadura**



Fuente: taller de soldadura, lote 103 A, Residenciales La Perla, San Felipe, Retalhuleu.

Figura 2. **Soldadura de canal**



Fuente: taller de soldadura, lote 103 A, Residenciales La Perla, San Felipe, Retalhuleu.

Continuación de apéndice 3.

En la figura 3 se observa el soporte del canal y de la tubería.

Figura 3. **Soporte de tubería y canal**



Fuente: taller de soldadura, lote 103 A, Residenciales La Perla, San Felipe, Retalhuleu.

En la figura 4 se observa la construcción del tanque de agua.

Figura 4. **Proceso de construcción de tanque de agua**



Fuente: taller de soldadura, lote 103 A, Residenciales La Perla, San Felipe, Retalhuleu.

Continuación de apéndice 3.

En la figura 5 se observa la parte posterior del canal y el tanque de agua.

Figura 5. Canal y tanque de almacenamiento en construcción



Fuente: taller de soldadura, lote 103 A, Residenciales La Perla, San Felipe Retalhuleu.

En la figura 6 se muestra el montaje de la bomba para determinar distancias.

Figura 6. Montaje temporal de la bomba para determinar distancias de tuberías



Fuente: taller de soldadura, lote 103 A, Residenciales La Perla, San Felipe Retalhuleu.

Continuación de apéndice 3.

En la figura 7 se observa el canal luego de sellar juntas.

Figura 7. Canal luego de aplicación de sellador de juntas



Fuente: taller de soldadura, lote 103 A, Residenciales La Perla, San Felipe Retalhuleu.

En la figura 8 se observa la soldadura de la tubería de succión de la bomba.

Figura 8. Soldadura de tubería de succión en tanque de almacenamiento de agua



Fuente: taller de soldadura, lote 103 A, Residenciales La Perla, San Felipe Retalhuleu.

Continuación de apéndice 3.

En la figura 9 se observa el tanque de agua.

Figura 9. **Tanque luego de soldadura y aplicación de sellador de juntas**



Fuente: taller de soldadura, lote 103 A, Residenciales La Perla, San Felipe Retalhuleu.

En la figura 10 se observa el medidor de placa de orificio.

Figura 10. **Soldadura de placa de orificio**



Fuente: taller de soldadura, lote 103 A, Residenciales La Perla, San Felipe Retalhuleu.

Continuación de apéndice 3.

En la figura 11 se observa la soldadura de las coplas para manómetros.

Figura 11. **Soldadura de coplas para manómetros de medidor de placa de orificio**



Fuente: taller de soldadura, lote 103 A, Residenciales La Perla, San Felipe Retalhuleu.

En la figura 12 se observa las soldaduras de la parte interna del canal.

Figura 12. **Soldadura de paredes internas del canal**



Fuente: taller de soldadura, lote 103 A, Residenciales La Perla, San Felipe Retalhuleu.

Continuación de apéndice 3.

En la figura 13 se observa la soldadura para instalación de copla en tubería de descarga de la bomba.

Figura 13. **Soldadura de niple y copla para manómetro de descarga de la bomba**



Fuente: taller de soldadura, lote 103 A, Residenciales La Perla, San Felipe Retalhuleu.

En la figura 14 se observa el montaje de la tubería previo a pintar.

Figura 14. **Montaje temporal de tubería**



Fuente: taller de soldadura, lote 103 A, Residenciales La Perla, San Felipe Retalhuleu.

Continuación de apéndice 3.

En la figura 15 se observa el armado del panel eléctrico para la bomba.

Figura 15. Armado de panel eléctrico



Fuente: taller de soldadura, lote 103 A, Residenciales La Perla, San Felipe Retalhuleu.

En la figura 16 se observa el ducto eléctrico para cables de alimentación de la bomba.

Figura 16. Colocación de ducto eléctrico



Fuente: taller de soldadura, lote 103 A, Residenciales La Perla, San Felipe Retalhuleu.

Continuación de apéndice 3.

En la figura 17 se observa la caja de registro de la bomba.

Figura 17. **Instalación de cableado para bomba**



Fuente: taller de soldadura, lote 103 A, Residenciales La Perla, San Felipe Retalhuleu.

En la figura 18 se observa la aplicación de pintura al canal.

Figura 18. **Aplicación de pintura a canal y soporte**



Fuente: taller de soldadura, lote 103 A, Residenciales La Perla, San Felipe Retalhuleu.

Continuación de apéndice 3.

En la figura 19 y 20 se observa el soporte de la tubería y el tanque de almacenamiento de agua luego de la aplicación de pintura.

Figura 19. **Aplicación de pintura a soporte de tubería**



Fuente: taller de soldadura, lote 103 A, Residenciales La Perla, San Felipe Retalhuleu.

Figura 20. **Aplicación de pintura a tanque de almacenamiento**



Fuente: taller de soldadura, lote 103 A, Residenciales La Perla, San Felipe Retalhuleu.

Continuación de apéndice 3.

En las figuras 21 y 22 se observa la aplicación de pintura amarilla al empaque de disipación de energía y al interior del tanque de almacenamiento de agua.

Figura 21. **Aplicación de pintura a soporte empaque para disipación de energía**



Fuente: taller de soldadura, lote 103 A, Residenciales La Perla, San Felipe Retalhuleu.

Figura 22. **Aplicación de pintura amarilla Caterpillar a tanque de almacenamiento**



Fuente: taller de soldadura, lote 103 A, Residenciales La Perla, San Felipe Retalhuleu.

Continuación de apéndice 3.

En la figura 23 se muestra la aplicación de pintura amarilla al canal

Figura 23. Aplicación de pintura amarilla Caterpillar al canal



Fuente: taller de soldadura, lote 103 A, Residenciales La Perla, San Felipe Retalhuleu.

En la figura 24 se observa el equipo montado y recién construido.

Figura 24. Equipo montado



Fuente: taller de soldadura, lote 103 A, Residenciales La Perla, San Felipe Retalhuleu.

Continuación de apéndice 3.

En la figura 25 se muestra el tablero eléctrico en la prueba de encendido del equipo.

Figura 25. **Prueba de encendido del equipo**



Fuente: taller de soldadura, lote 103 A, Residenciales La Perla, San Felipe Retalhuleu.

ANEXO

Anexo 1. Tabla de densidades del agua a distintas temperaturas

| Densidad del agua líquida entre 0 °C y 100 °C | | | | | | www.vaxasoftware.com |
|--|---------------------------------|-------------------|---------------------------------|-------------------|---------------------------------|--|
| Presión externa: 1 atm = 101 325 Pa | | | | | | |
| Temperatura °C | Densidad kg / m ³ | Temperatura °C | Densidad kg / m ³ | Temperatura °C | Densidad kg / m ³ | |
| 0 (hielo) | 917,00 | 33 | 994,76 | 67 | 979,34 | |
| 0 | 999,82 | 34 | 994,43 | 68 | 978,78 | |
| 1 | 999,89 | 35 | 994,08 | 69 | 978,21 | |
| 2 | 999,94 | 36 | 993,73 | 70 | 977,63 | |
| 3 | 999,98 | 37 | 993,37 | 71 | 977,05 | |
| 4 | 1000,00 | 38 | 993,00 | 72 | 976,47 | |
| 5 | 1000,00 | 39 | 992,63 | 73 | 975,88 | |
| 6 | 999,99 | 40 | 992,25 | 74 | 975,28 | |
| 7 | 999,96 | 41 | 991,86 | 75 | 974,68 | |
| 8 | 999,91 | 42 | 991,46 | 76 | 974,08 | |
| 9 | 999,85 | 43 | 991,05 | 77 | 973,46 | |
| 10 | 999,77 | 44 | 990,64 | 78 | 972,85 | |
| 11 | 999,68 | 45 | 990,22 | 79 | 972,23 | |
| 12 | 999,58 | 46 | 989,80 | 80 | 971,60 | |
| 13 | 999,46 | 47 | 989,36 | 81 | 970,97 | |
| 14 | 999,33 | 48 | 988,92 | 82 | 970,33 | |
| 15 | 999,19 | 49 | 988,47 | 83 | 969,69 | |
| 16 | 999,03 | 50 | 988,02 | 84 | 969,04 | |
| 17 | 998,86 | 51 | 987,56 | 85 | 968,39 | |
| 18 | 998,68 | 52 | 987,09 | 86 | 967,73 | |
| 19 | 998,49 | 53 | 986,62 | 87 | 967,07 | |
| 20 | 998,29 | 54 | 986,14 | 88 | 966,41 | |
| 21 | 998,08 | 55 | 985,65 | 89 | 965,74 | |
| 22 | 997,86 | 56 | 985,16 | 90 | 965,06 | |
| 23 | 997,62 | 57 | 984,66 | 91 | 964,38 | |
| 24 | 997,38 | 58 | 984,16 | 92 | 963,70 | |
| 25 | 997,13 | 59 | 983,64 | 93 | 963,01 | |
| 26 | 996,86 | 60 | 983,13 | 94 | 962,31 | |
| 27 | 996,59 | 61 | 982,60 | 95 | 961,62 | |
| 28 | 996,31 | 62 | 982,07 | 96 | 960,91 | |
| 29 | 996,02 | 63 | 981,54 | 97 | 960,20 | |
| 30 | 995,71 | 64 | 981,00 | 98 | 959,49 | |
| 31 | 995,41 | 65 | 980,45 | 99 | 958,78 | |
| 32 | 995,09 | 66 | 979,90 | 100 | 958,05 | |

www.vaxasoftware.com

Fuente: VAXA SOFTWARE. *Propiedades del agua a distintas temperaturas.*

http://www.vaxasoftware.com/doc_edu/qui/denh2o.pdf. Consulta: septiembre 2018.

