



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

DETERMINACIÓN DE PÉRDIDAS DE ENERGÍA POR FRICCIÓN EN TUBERÍAS DE PE-AL-PE, HIERRO GALVANIZADO Y COBRE, PRODUCIDAS POR FLUJO DE AIRE COMPRIMIDO

Vivian Nohemí Orozco Orozco

Asesorado por el Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza

Guatemala, febrero de 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DETERMINACIÓN DE PÉRDIDAS DE ENERGÍA POR FRICCIÓN EN TUBERÍAS DE PE-AL-
PE, HIERRO GALVANIZADO Y COBRE, PRODUCIDAS POR FLUJO DE AIRE COMPRIMIDO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

VIVIAN NOHEMÍ OROZCO OROZCO

ASESORADO POR EL ING. LUIS MANUEL SANDOVAL MENDOZA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA CIVIL

GUATEMALA, FEBRERO DE 2022

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. Kevin Vladimir Armando Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Ing. Mario Estuardo Arriola Avila
EXAMINADOR	Ing. Luis Estuardo Saravia Ramírez
EXAMINADOR	Ing. Víctor Manuel López Juárez
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

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:

DETERMINACIÓN DE PÉRDIDAS DE ENERGÍA POR FRICCIÓN EN TUBERÍAS DE PE-AL-PE, HIERRO GALVANIZADO Y COBRE, PRODUCIDAS POR FLUJO DE AIRE COMPRIMIDO

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 29 de octubre del 2018.



Vivian Nohemí Orozco Orozco



Guatemala, 28 enero de 2022

Ingeniero

Pedro Antonio Aguilar Polanco

Jefe del Departamento de Hidráulica

Facultad de Ingeniería

Después de revisar el trabajo de graduación de la estudiante Vivian Nohemí Orozco Orozco, quien se identifica con Registro Académico 201314307 CUI No. 2729 13634 1202, titulado **DETERMINACIÓN DE PÉRDIDAS DE ENERGÍA POR FRICCIÓN EN TUBERÍAS DE PE-AL-PE, HIERRO GALVANIZADO Y COBRE, PRODUCIDAS POR FLUJO DE AIRE COMPRIMIDO**, y haber hecho las correcciones necesarias al mismo, lo doy por aprobado y lo autorizo para continuar con el proceso correspondiente.

Sin otro particular, me despido atentamente.

“ID y Enseñad a Todos”

MSc. Ing. Luis Manuel
Sandoval Mendoza
Ingeniero Civil E Hidrólogo
Colegiado 6496

Dr C Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza
Colegiado No. 6496
Docente Departamento de Hidráulica





Guatemala, 07 de febrero 2022

Ingeniero
Armando Fuentes Roca
Director de la Escuela de Ingeniería Civil
Guatemala

Ingeniero Fuentes.

Por medio de la presente comunico a usted, que a través del Departamento de Hidráulica de la Escuela de Ingeniería Civil se ha revisado el Trabajo Final de Graduación, **DETERMINACIÓN DE PÉRDIDAS DE ENERGÍA POR FRICCIÓN EN TUBERÍAS DE PE-AL-PE, HIERRO GALVANIZADO Y COBRE, PRODUCIDAS POR FLUJO DE AIRE COMPRIMIDO**, de la estudiante de la Carrera de Ingeniería Civil **Vivian Nohemí Orozco Orozco**, Registro Académico: **201314307**, como Asesor al **Dr. LUIS MANUEL SANDOVAL MENDOZA**.

Considero este trabajo bien desarrollado y representa un aporte académico para la comunidad del área y habiendo cumplido con los objetivos del referido trabajo doy mi aprobación al mismo solicitando darle el trámite respectivo.

Sin otro particular, le saludo muy atentamente.

ID Y ENSEÑAD A TODOS


FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO
DE
HIDRAULICA
U S A C
Ing. Civil Pedro Antonio Aguilar Polanco
Jefe Del Departamento de Hidráulica
Cc: Estudiante sucesores
Archiv

Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Coordinador del Departamento de Hidráulica

Asesor
Interesado





LNG.DIRECTOR.048.EIC.2022

El Director de la Escuela de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto bueno del Coordinador de Área y la aprobación del área de lingüística del trabajo de graduación titulado: **DETERMINACIÓN DE PÉRDIDAS DE ENERGÍA POR FRICCIÓN EN TUBERÍAS DE PE-AL-PE, HIERRO GALVANIZADO Y COBRE, PRODUCIDAS POR FLUJO DE AIRE COMPRIMIDO**, presentado por: **Vivian Nohemí Orozco Orozco**, procedo con el Aval del mismo, ya que cumple con los requisitos normados por la Facultad de Ingeniería.

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

Ing. Armando Fuentes Roca
Director
Escuela de Ingeniería Civil



Guatemala, febrero de 2022



LNG.DECANATO.OI.121.2022

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 Civil, al Trabajo de Graduación titulado: **DETERMINACIÓN DE PÉRDIDAS DE ENERGÍA POR FRICCIÓN EN TUBERÍAS DE PE-AL-PE, HIERRO GALVANIZADO Y COBRE, PRODUCIDAS POR FLUJO DE AIRE COMPRIMIDO**, presentado por: **Vivian Nohemí Orozco Orozco**, después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



ingra. Aurelia Anabela Cordova Estrada

Decana

Guatemala, febrero de 2022

AACE/gaoc

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por ser mi fuente de vida y de sabiduría, para concretar esta meta.
- Mis padres** Jaime Orozco y Eugenia de Orozco. Su amor, esfuerzo, sacrificio y ejemplo serán mi inspiración y modelo a seguir
- Mis abuelos** Rodrigo Orozco (q. e. p. d.), Gregoria Velásquez (q. e. p. d.), Marco Orozco (q. e. p. d.) y Amparo Fuentes, por su apoyo, amor y enseñanzas con cariño.
- Mi hermano** Rodrigo Orozco, por ser un apoyo incondicional y alegrar mi vida.
- Mis tíos y primos** Por influir en mi formación profesional, entre otras cosas, con aprecio.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser la casa de estudios superiores que me facilitó ser una profesional al servicio de Guatemala.
Facultad de Ingeniería	Por ser parte de mi formación profesional y facultarme de conocimientos.
Mi asesor	Dr. Luis Manuel Sandoval Mendoza, por brindarme su apoyo, sus conocimientos y su asesoría en la elaboración de esta investigación.
Mis amigos de la Facultad	Williams Sacalxot, Teresita Campos, Astrid Cano, Donoban Ochoa, Alejandro Milian, Jorge Maldonado, Andrés Castro, Edgar Alvarado, Victoria Vasquez, Heike Wellman, Jessica Herrera, Mely Jerez y Hannah Orozco, porque contribuyeron de una manera personal para completar esta meta.
Mis maestras	Por formar parte de mi enseñanza, especialmente a las profesoras Lilian y Mimi.
Ing. Isaac Ramírez V.	Por brindarme sus conocimientos, apoyo, cariño y comprensión en el transcurso de la carrera.

Ester Lucía Barrios R.

Por brindarme su valiosa amistad y formar parte de mi camino profesional.

Ing. Sedwin Ramos

Por brindarme su amistad y compartir sus conocimientos para completar esta meta.

David Monge

Por formar parte fundamental de mi formación en el transcurso de la carrera y su valiosa amistad.

Ing. Yesenia Velásquez

Por inspirarme a cumplir esta meta profesional y su apoyo incondicional.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	XI
LISTA DE SÍMBOLOS	XIX
GLOSARIO	XXI
RESUMEN	XXIII
OBJETIVOS.....	XXV
INTRODUCCIÓN	XXVII
1. AIRE	1
1.1. Aire comprimido.....	1
1.1.1. Ventajas y desventajas	2
1.2. Propiedades del aire comprimido	2
1.2.1. Presión	2
1.2.1.1. Presión absoluta	3
1.2.1.2. Presión atmosférica	4
1.2.1.3. Presión manométrica o relativa	5
1.2.1.4. Presión hidrostática o hidrodinámica	6
1.2.1.5. Presión estática	6
1.2.1.6. Presión dinámica	6
1.2.1.7. Presión total.....	7
1.2.1.8. Presión de un gas.....	8
1.2.2. Humedad del aire	8
1.2.3. Temperatura	9
1.2.4. Compresibilidad	9
1.2.5. Densidad del aire	11
1.2.6. Volumen específico del aire seco	12

1.2.7.	Otros aspectos del aire comprimido	12
1.3.	Compresión de aire	14
1.3.1.	Métodos de compresión	14
1.3.2.	Tipos de compresores	15
1.3.2.1.	Compresores de desplazamiento	16
1.3.2.2.	Compresores dinámicos	17
1.4.	Términos y unidades usadas en la industria de aire comprimido	18
1.4.1.	Términos de uso común en instalaciones de aire comprimido	19
1.4.2.	Unidades de medida	22
2.	COMPONENTES DE UN SISTEMA PARA DISTRIBUCIÓN DE AIRE COMPRIMIDO	25
2.1.	Compresor	25
2.2.	Depósitos de acumulación	27
2.2.1.	Tipos de depósitos de acumulación	27
2.3.	Unidad de mantenimiento	29
2.4.	Manómetros	29
2.5.	Tuberías	30
2.5.1.	Tuberías de cobre	32
2.5.1.1.	Características de la tubería de cobre	33
2.5.2.	Tubería de hierro galvanizado	35
2.5.2.1.	Características de hierro galvanizado ..	35
2.5.3.	Tubería de PE AL PE	37
2.5.3.1.	Características de la tubería de Pe-AL-PE	37
2.6.	Accesorios	39

2.6.1.	Codos	40
2.6.2.	Tees.....	41
2.6.3.	Niples.....	42
2.6.4.	Cruces	43
2.6.5.	Reducciones	43
2.6.6.	Adaptadores	44
2.6.7.	Uniones	45
2.6.8.	Acoples rápidos	45
3.	PÉRDIDAS DE PRESIÓN EN TUBERÍAS CON FLUIDO GASEOSO ...	47
3.1.	Pérdidas continuas o por fricción.....	47
3.1.1.	Factores que influyen en las pérdidas de carga por fricción	48
3.2.	Pérdidas localizadas.....	49
3.3.	Pérdidas por temperatura	50
3.4.	Ecuaciones de pérdidas de presión por fricción	51
3.4.1.	Ecuación de Renouard	52
3.4.2.	Ecuación de Darcy – Weisbasch	53
4.	ENSAYOS.....	59
4.1.	Diseño y fabricación del módulo experimental	59
4.2.	Procedimiento experimental para determinar la pérdida de presión.....	66
4.3.	Ensayos en circuito de tubería de cobre.....	67
4.3.1.	Datos tomados en laboratorio.....	67
4.3.2.	Promedio de resultados experimentales para circuito de tubería de cobre.	72
4.4.	Ensayos en circuito de tubería de hierro galvanizado	74

4.4.1.	Promedio de resultados experimentales para circuito de tubería de hierro galvanizado.....	76
4.5.	Resultados de ensayos para circuito de tubería Pe-Al-Pe	77
4.5.1.	Resultados de ensayos para circuito de tubería de Pe-Al-Pe.....	77
4.5.2.	Promedio de resultados experimentales para circuito de tubería de Pe-Al-Pe.....	79
4.6.	Cálculo teórico de pérdidas de presión con la ecuación de Renouard	80
4.6.1.	Cálculo teórico de pérdidas de presión con la ecuación de Renouard para el circuito de cobre	80
4.6.2.	Cálculo teórico de pérdidas de presión con la ecuación de Renouard para el circuito de hierro galvanizado	82
4.6.3.	Cálculo teórico de pérdidas de presión con la ecuación de Renouard para el circuito de Pe-AL-Pe.....	83
4.7.	Cálculo teórico de pérdida de presión con la ecuación de Darcy-Weisbach.....	84
4.7.1.	Cálculo teórico de pérdida de presión con la ecuación de Darcy-Weisbach en circuito de cobre	86
4.7.2.	Cálculo teórico de pérdida de presión con la ecuación Darcy-Weisbach en circuito de hierro galvanizado	87
4.7.3.	Cálculo teórico de pérdida de presión con la ecuación Darcy-Weisbach en circuito de Pe-Al-Pe.....	88

4.8.	Comparación de resultados teóricos versus experimentales en circuito de tubería de cobre	89
4.8.1.	Comparación de resultados teóricos versus experimentales empleando ecuación de Renouard.....	89
4.8.2.	Comparación de resultados teóricos versus experimentales empleando la ecuación de Darcy-Weisbach.....	90
4.8.3.	Resumen de resultados teóricos versus experimentales en circuito de tubería de cobre	92
4.9.	Comparación de resultados teóricos versus experimentales en circuito de tubería de hierro galvanizado.....	93
4.9.1.	Comparación de resultados teóricos versus experimentales empleando la ecuación Renouard.....	93
4.9.2.	Comparación de resultados teóricos versus experimentales empleando ecuación de Darcy-Weisbach.....	95
4.9.3.	Resumen de resultados teóricos versus experimentales en circuito de tubería de hierro galvanizado.....	96
4.10.	Comparación de resultados teóricos versus experimentales en circuito de tubería de Pe-Al-Pe.....	98
4.10.1.	Comparación de resultados teóricos versus experimentales empleando ecuación de Renouard.....	98
4.10.2.	Comparación de resultados teóricos versus experimentales empleando ecuación de Darcy-Weisbach.....	99

4.10.3.	Resumen de resultados teóricos versus experimentales en circuito de tubería de Pe-Al-Pe.....	101
4.11.	Cálculo del coeficiente para ecuación de Renouard	102
4.11.1.	Cálculo de coeficientes para tubería de cobre	103
4.11.2.	Cálculo de coeficientes para tubería de hierro galvanizado	109
4.11.3.	Cálculo de coeficientes para tubería de Pe-Al-Pe.	110
4.11.4.	Resumen de coeficientes y ecuaciones experimentales, a partir de la ecuación de Renouard.....	110
4.12.	Cálculo del coeficiente para ecuación de Darcy-Weisbach....	112
4.12.1.	Cálculo de coeficientes para tubería de cobre	112
4.12.2.	Cálculo de coeficientes para tubería de hierro galvanizado	113
4.12.3.	Cálculo de coeficientes para tubería de Pe-Al-Pe.	113
4.12.4.	Resumen de coeficientes y ecuaciones experimentales, a partir de la ecuación de Darcy-Weisbach.....	114
4.13.	Cálculo de pérdida de presión utilizando ecuaciones experimentales para tubería de cobre.....	115
4.13.1.	Cálculo de pérdida de presión, empleando la ecuación experimental de Renouard.....	115
4.13.2.	Cálculo de pérdida de presión, empleando la ecuación experimental de Darcy-Weisbach	116
4.14.	Cálculo de pérdida de presión utilizando coeficientes para tubería de hierro galvanizado.....	118
4.14.1.	Cálculo de pérdida de presión, empleando la ecuación experimental de Renouard.....	118

4.14.2.	Cálculo de pérdida de presión, empleando la ecuación experimental de Darcy-Weisbach.....	119
4.15.	Cálculo de pérdida de presión utilizando coeficientes para tubería de Pe-Al-Pe	120
4.15.1.	Cálculo de pérdida de presión, empleando la ecuación experimental de Renouard	121
4.15.2.	Cálculo de pérdida de presión, empleando la ecuación experimental de Darcy-Weisbach.....	122
4.16.	Comparación de resultados utilizando ecuaciones experimentales versus obtenidos en laboratorio, en tubería de cobre.....	123
4.16.1.	Comparación de resultados utilizando ecuación experimental de Renouard versus obtenidos en laboratorio.....	123
4.16.2.	Comparación de resultados utilizando ecuación experimental Darcy-Weisbach versus obtenidos en laboratorio.....	124
4.16.3.	Resumen de resultados experimentales obtenidos a partir de ecuaciones versus experimentales en circuito de tubería de cobre	126
4.17.	Comparación de resultados utilizando ecuaciones experimentales versus obtenidos en laboratorio, en tubería de hierro galvanizado.	127
4.17.1.	Comparación de resultados utilizando ecuación experimental Renouard versus obtenidos en laboratorio.....	128
4.17.2.	Comparación de resultados utilizando ecuación experimental Darcy-Weisbach versus obtenidos en laboratorio.....	129

4.17.3.	Resumen de resultados experimentales obtenidos a partir de ecuaciones versus experimentales en circuito de tubería de hierro galvanizado	131
4.18.	Comparación de resultados utilizando ecuaciones experimentales corregidas versus obtenidos en laboratorio, en tubería de Pe-Al-Pe.....	132
4.18.1.	Comparación de resultados teóricos corregidos versus experimentales empleando ecuación de Renouard.....	133
4.18.2.	Comparación de resultados teóricos corregidos versus experimentales empleando ecuación de Darcy-Weisbach.....	134
4.18.3.	Resumen de resultados experimentales obtenidos a partir de ecuaciones versus experimentales en circuito de tubería de Pe-Al-Pe	136
4.19.	Modelo matemático de Vivian Orozco.....	137
4.19.1.	Tubería de material de cobre	138
4.19.2.	Tubería de material de hierro galvanizado	141
4.19.3.	Tubería de material Pe-Al-Pe	143
4.20.	Comparaciones de ecuaciones corregidas, modelo matemático de Vivian Orozco y experimental.	146
4.20.1.	Comparaciones de ecuaciones corregidas, modelo matemático de Vivian Orozco y experimental para tubería de cobre.....	146
4.20.2.	Comparaciones de ecuaciones corregidas, modelo matemático de Vivian Orozco y experimental para tubería de hierro galvanizado ..	147

4.20.3. Comparaciones de ecuaciones corregidas, modelo matemático de Vivian Orozco y experimental para tubería de Pe-Al-Pe.....	149
CONCLUSIONES	151
RECOMENDACIONES.....	155
BIBLIOGRAFÍA.....	157

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Representación gráfica de medición de presiones.....	7
2.	Compresibilidad de los gases.....	10
3.	Compresor.....	26
4.	Esquema de depósito horizontal	28
5.	Unidad de mantenimiento.....	29
6.	Manómetro	30
7.	Tuberías de cobre en instalaciones hidráulicas.....	34
8.	Tubería de hierro galvanizado roscada y lisa.	36
9.	Tubería de Pe-Al-Pe.....	38
10.	Clasificación de accesorios	40
11.	Tipos de codos	41
12.	Tee	42
13.	Niple	42
14.	Cruz recta.....	43
15.	Reducción.	44
16.	Adaptadores	44
17.	Unión	45
18.	Acoples rápidos.....	46
19.	Factores que influyen en la pérdida de carga por fricción	49
20.	Diagrama de módulo experimental para realizar ensayos	60
21.	Compresor utilizado para realizar ensayos.	61
22.	Llave de paso tipo esférica de compresor	61
23.	Medidor volumétrico de flujo.....	62

24.	Módulo experimental utilizado en el ensayo, cobre, hierro galvanizado y Pe-Al-Pe.....	64
25.	Manómetros utilizados en medición de presión.	65
26.	Detalle de módulo de medición de caudal.	65
27.	Comparación de resultados teóricos versus experimentales empleando ecuación de Renouard	90
28.	Comparación de resultados teóricos versus experimentales empleando la ecuación de Darcy-Weisbach	91
29.	Comparación resultados teóricos versus experimentales en circuito de tubería de cobre	93
30.	Comparación de resultados teóricos versus experimentales empleando la ecuación Renouard.	94
31.	Comparación de resultados teóricos versus experimentales empleando ecuación de Darcy-Weisbach.....	96
32.	Comparación de resultados teóricos versus experimentales en circuito de tubería de hierro galvanizado.....	97
33.	Comparación de resultados teóricos versus experimentales empleando ecuación de Renouard	99
34.	Comparación de resultados teóricos versus experimentales empleando ecuación de Darcy-Weisbach.....	100
35.	Comparación de resultados teóricos versus experimentales en circuito de tubería de Pe-Al-Pe.....	102
36.	SPSS, programa estadístico	103
37.	Vista de variables SPSS, programa estadístico	104
38.	Vista de datos SPSS, programa estadístico	105
39.	Análisis de datos en SPSS, programa estadístico	106
40.	Definición de ecuación en SPSS	107
41.	Parámetros en SPSS.....	108

42.	Comparación de resultados utilizando ecuación experimental de Renouard versus obtenidos en laboratorio.....	124
43.	Comparación de resultados utilizando ecuación experimental Darcy-Weisbach versus obtenidos en laboratorio.....	125
44.	Comparación de resultados experimentales obtenidos a partir de ecuaciones versus experimentales en circuito de tubería de cobre	127
45.	Comparación de resultados utilizando ecuación experimental Renouard versus obtenidos en laboratorio.....	129
46.	Comparación de resultados utilizando ecuación experimental Darcy-Weisbach versus obtenidos en laboratorio.....	130
47.	Comparación de resultados experimentales obtenidos a partir de ecuaciones versus experimentales en circuito de tubería de hierro galvanizado	132
48.	Comparación de resultados teóricos corregidos versus experimentales empleando ecuación de Renouard.	134
49.	Comparación de resultados teóricos corregidos versus experimentales empleando ecuación de Darcy-Weisbach.....	135
50.	Comparación de resultados experimentales obtenidos a partir de ecuaciones versus experimentales en circuito de tubería de Pe-Al-Pe	137
51.	Comparación de resultados de pérdida experimental versus teórica en tubería de cobre	141
52.	Comparación de resultados de pérdida experimental versus teórica en tubería de hierro galvanizado	143
53.	Comparación de resultados de pérdida experimental versus teórica en tubería de Pe-Al-Pe.....	145
54.	Comparación de pérdida de carga en tubería de cobre	147
55.	Comparación de pérdida de carga en tubería de hierro galvanizado ...	148
56.	Comparación de pérdida de carga en tubería de Pe-Al-Pe.....	150

TABLAS

I.	Calidad del aire comprimido según ISO 8573-1.....	13
II.	Equivalencias de 1 atmósfera	22
III.	Unidades de medición en presión	23
IV.	Unidades de medición de longitud	23
V.	Unidades de medición de masa en volumen (densidad).....	23
VI.	Unidades de medición de caudal	23
VII.	Unidades de medición de masa	24
VIII.	Diámetros comerciales de tubería de cobre.....	34
IX.	Diámetros comerciales de hierro galvanizado	36
X.	Diámetros para tuberías comerciales en Pe-Al-Pe	39
XI.	Pérdida por fricción en accesorios.	48
XII.	Rugosidad absoluta de materiales.....	56
XIII.	Resultados experimentales en circuito de tubería de cobre.....	68
XIV.	Datos calculados con datos obtenidos en laboratorio para tubería de cobre	71
XV.	Resultados experimentales en circuito de tubería de cobre.....	73
XVI.	Resultados experimentales en circuito de tubería de hierro galvanizado.....	74
XVII.	Resultados de datos calculados en circuito de tubería de hierro galvanizado.....	75
XVIII.	Resultados promedio experimentales en tubería de hierro galvanizado	77
XIX.	Resultados experimentales en circuito de tubería de Pe-Al-Pe	78
XX.	Resultados calculados en tubería de Pe-Al-Pe.....	79
XXI.	Resultados experimentales promedio en circuito de tubería de Pe-Al- Pe	80

XXII.	Pérdidas de presión con la ecuación de Renouard para el circuito de cobre	82
XXIII.	Pérdidas de presión con la ecuación de Renouard para el circuito de hierro galvanizado	82
XXIV.	Pérdidas de presión con la ecuación de Renouard para el circuito de Pe-AL-Pe.....	83
XXV.	Pérdida de presión con la ecuación de Darcy-Weisbach en circuito de cobre	87
XXVI.	Pérdida de presión con la ecuación Darcy-Weisbach en circuito de hierro galvanizado	87
XXVII.	Pérdida de presión con la ecuación Darcy-Weisbach en circuito de Pe-Al-Pe	88
XXVIII.	Resultados teóricos versus experimentales empleando ecuación de Renouard.....	89
XXIX.	Resultados teóricos versus experimentales empleando la ecuación de Darcy-Weisbach	91
XXX.	Resultados teóricos versus experimentales en circuito de tubería de cobre	92
XXXI.	Resultados teóricos versus experimentales empleando la ecuación Renouard.....	94
XXXII.	Resultados teóricos versus experimentales empleando ecuación de Darcy-Weisbach	95
XXXIII.	Resultados teóricos versus experimentales en circuito de tubería de hierro galvanizado	97
XXXIV.	Resultados teóricos versus experimentales empleando ecuación de Renouard.....	98
XXXV.	Resultados teóricos versus experimentales empleando ecuación de Darcy-Weisbach	100

XXXVI.	Resultados teóricos versus experimentales en circuito de tubería de Pe-Al-Pe	101
XXXVII.	Estimación de parámetros en SPSS	108
XXXVIII.	Estimación de parámetros en SPSS	109
XXXIX.	Estimación de parámetros en SPSS	110
XL.	Coeficientes para ecuaciones experimentales de Renouard	111
XLI.	Estimación de parámetros en SPSS	112
XLII.	Estimación de parámetros en SPSS	113
XLIII.	Estimación de parámetros en SPSS	114
XLIV.	Coeficientes para ecuaciones experimentales de Darcy-Weisbach.....	114
XLV.	Pérdida de presión, empleando la ecuación experimental de Renouard	116
XLVI.	Pérdida de presión, empleando la ecuación experimental de Darcy-Weisbach	117
XLVII.	Pérdida de presión, empleando la ecuación experimental de Renouard	119
XLVIII.	Pérdida de presión, empleando la ecuación experimental de Darcy-Weisbach	120
XLIX.	Pérdida de presión, empleando la ecuación experimental de Renouard	121
L.	Pérdida de presión, empleando la ecuación experimental de Darcy-Weisbach	122
LI.	Resultados utilizando ecuación experimental de Renouard versus obtenidos en laboratorio.....	123
LII.	Resultados utilizando ecuación experimental Darcy-Weisbach versus obtenidos en laboratorio.....	125
LIII.	Resultados experimentales obtenidos a partir de ecuaciones versus experimentales en circuito de tubería de cobre	126

LIV.	Resultados utilizando ecuación experimental Renouard versus obtenidos en laboratorio.....	128
LV.	Resultados utilizando ecuación experimental Darcy-Weisbach versus obtenidos en laboratorio.....	130
LVI.	Resultados experimentales obtenidos a partir de ecuaciones versus experimentales en circuito de tubería de hierro galvanizado.....	131
LVII.	Resultados teóricos corregidos versus experimentales empleando ecuación de Renouard.	133
LVIII.	Resultados teóricos corregidos versus experimentales empleando ecuación de Darcy-Weisbach.....	135
LIX.	Resultados experimentales obtenidos a partir de ecuaciones versus experimentales en circuito de tubería de Pe-Al-Pe	136
LX.	Estimación de parámetros para tubería de cobre.....	138
LXI.	Resultados para ecuación empleando SPSS para tubería de cobre....	140
LXII.	Comparación de pérdida de energía teórica versus pérdida experimental para tubería de cobre.....	140
LXIII.	Estimación de parámetros para tubería de hierro galvanizado	141
LXIV.	Resultados para ecuación empleando SPSS para tubería de hierro galvanizado	142
LXV.	Comparación de pérdida de energía teórica versus pérdida experimental para tubería de hierro galvanizado	142
LXVI.	Estimación de parámetros para tubería de Pe-Al-Pe	143
LXVII.	Resultados para ecuación empleando SPSS para tubería de Pe-Al-Pe	144
LXVIII.	Comparación de pérdida de energía teórica versus pérdida experimental para tubería de Pe-Al-Pe	144
LXIX.	Resultados de comparaciones en ecuaciones corregidas, experimentales y modelo matemático para tubería de cobre	146

LXX.	Resultados de comparaciones en ecuaciones corregidas, experimentales y modelo matemático para tubería de hierro galvanizado.....	148
LXXI.	Resultados de comparaciones en ecuaciones corregidas, experimentales y modelo matemático para tubería de Pe-Al-Pe	149

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
g	Aceleración debida a la gravedad
A	Área de sección transversal
ρ	Densidad
D	Diámetro de tubería
Δp	Diferencia de presión
f_t	Factor de fricción
f	Factor de fricción de Darcy
Q	Flujo volumétrico
F	Fuerza
°K	Grados Kelvin
G_s	Gravedad específica del fluido
Psi	Libras por pulgada cuadrada
l	Longitud
le	Longitud equivalente
m	Metro
mca	Metros columna de agua
mm	Milímetro
mmca	Milímetro columna de agua
nm	Nanómetro
No.	Número
Re	Número de Reynolds
Pa	Pascal
Hf	Pérdida de energía

P	Presión
%	Porcentaje
T	Temperatura
v	Velocidad
V	Volumen

GLOSARIO

Caudal	Volumen que pasa por un área dada en la unidad de tiempo.
Coeficiente	Número o parámetro que se escribe a la izquierda de una variable o incógnita y que indica el número de veces que este debe multiplicarse.
Ensayo	Prueba que se hace para determinar si una cosa funciona o resulta como se desea.
Flujo	Cantidad volumétrica o másica de un fluido que atraviesa una sección por unidad de tiempo.
SPSS	Programa estadístico.
Tubería	Conducto que cumple la función de transportar agua u otros fluidos.
Válvula	Instrumento de regulación y control de fluido.

RESUMEN

El presente trabajo de graduación se enfoca en determinar coeficientes de pérdida de presión, generados a partir de las ecuaciones teóricas de Renouard, Darcy-Weisbach, por lo que se determinó realizar los ensayos en tres diferentes tipos de tuberías: de cobre, hierro galvanizado y Pe-Al-Pe, empleando flujo de aire comprimido.

Se construyó un circuito por cada tipo de tubería ya mencionada, al cual se le hizo circular flujo de aire suministrado por un compresor. Se utilizó un medidor volumétrico, cronómetro y manómetros para poder obtener el caudal y diferencias de presiones en los diferentes circuitos.

En el capítulo uno se describe generalidades acerca del flujo a emplear, términos a utilizar, unidades de medida y mecanismos de funcionamiento del equipo a estudiar.

El capítulo dos se dedica a los componentes de un sistema para distribución de aire comprimido, características de las tuberías y accesorios a emplear para los ensayos.

El capítulo tres se centra en la descripción de las ecuaciones teóricas a emplear, y el desarrollo del funcionamiento de las mismas.

En el capítulo cuatro se presenta la parte del desarrollo de los ensayos realizados, recopilación de datos, tablas de resultados, procedimientos para la elaboración de deducción de coeficientes, gráficas de comparación, evaluación

de ecuaciones teóricas, evaluación de modelos matemáticos experimentales y la determinación de ecuaciones experimentales que generen resultados fiables.

OBJETIVOS

General

Obtener ecuaciones experimentales para la pérdida de presión a partir de las ecuaciones de Renouard y Darcy-Weisbach en tuberías de Pe-Al-Pe, hierro galvanizado y cobre producidas por flujo de aire comprimido.

Específicos

1. Determinar el factor de corrección (k), para las ecuaciones de Renouard y Darcy-Weisbach en tubería de cobre.
2. Determinar el factor de corrección (k), para las ecuaciones de Renouard y Darcy-Weisbach en tubería de hierro galvanizado.
3. Determinar el factor de corrección (k), para las ecuaciones de Renouard y Darcy-Weisbach en tubería de Pe-Al-Pe (polietileno-aluminio-polietileno).
4. Comparar las pérdidas de energía en las tres tuberías, las cuales son de distinto material.
5. Deducir modelos experimentales a partir de los datos obtenidos en los ensayos, utilizando el software SPSS.
6. Comparar los modelos teóricos corregidos, y los generados con el software, con los datos experimentales.

INTRODUCCIÓN

En las instalaciones de redes de distribución de aire comprimido existen diferentes tipos de tuberías, las cuales están formadas por tramos rectos y accesorios que permiten adaptar la instalación a la forma geométrica requerida y especificaciones de diseño. Cuando el flujo de aire comprimido se desplaza por la tubería, la rugosidad de la tubería combinada con la viscosidad del fluido produce una fuerza de fricción que se opone a su desplazamiento, lo cual ocasiona una pérdida de energía, la cual es necesario cuantificar y analizar para garantizar que la energía final entregada sea la adecuada para cumplir los requerimientos de los equipos a los cuales se les suministra el flujo de aire comprimido.

Considerando la importancia de conocer el valor de pérdida de energía en el sistema de aire comprimido para un correcto diseño de un circuito, es necesario conocer la pérdida que se produce en la tubería, por lo cual este trabajo pretende determinar los coeficientes de pérdida de los diferentes materiales utilizados en tres tipos de tuberías para la conducción de aire comprimido: la tubería Pe-Al-Pe (polietileno-aluminio-polietileno), tubería HG (hierro galvanizado) y tubería de cobre.

1. AIRE

El aire es una mezcla homogénea de gases, que se compone fundamentalmente del 78 % de nitrógeno y 21 % de oxígeno, para completar 0,93 % de argón, 0,04 % de dióxido de carbono y unas pequeñas cantidades de otros gases, aunque en algunas ciudades muy contaminadas existe una variación en la concentración de gases. El aire se encuentra constituido en la atmósfera, siendo esta una capa incolora, inodora e insípida que rodea la Tierra, que se mantiene adentro de la atmósfera gracias a la fuerza de la gravedad.

1.1. Aire comprimido

El aire comprimido es una masa de aire que se encuentra sometida a una presión superior a la presión atmosférica, esta se obtiene mediante la aplicación y uso de equipos llamados compresores, estos aspiran el aire atmosférico y lo comprimen hasta llegar a un valor de presión requerido y superior al de la presión atmosférica a la que se encontraba.

El aire comprimido es un medio excelente para almacenar y transmitir energía, este se ha convertido en la segunda fuente de energía utilizada en la industria, después de la energía eléctrica, teniendo como competencia al gas licuado de petróleo. El aire no solo se comprime, sino que también desaparece la humedad y se filtra.

1.1.1. Ventajas y desventajas

Tiene como materia prima el aire atmosférico, del cual se puede tomar la cantidad que se necesite de manera gratuita.

Sobre los sistemas hidráulicos el aire comprimido es más rápido. Tiene velocidad y rapidez de respuesta de trabajo. Este sistema es menos preciso en el posicionamiento de los mecanismos y no permite grandes fuerzas. La reacción de repuesta no es tan rápida como la eléctrica.

1.2. Propiedades del aire comprimido

Las propiedades del aire comprimido nos permitirán conocer la forma en la que se puede producir, qué fenómenos físicos pueden afectar su comportamiento, el funcionamiento y la fiabilidad que puede tener este elemento, así como las aplicaciones que puede tener, ya que se considera la cuarta energía en el mundo industrial.

Si bien es cierto que la aplicación de técnicas que hacen uso del aire que ha sido sometido a presión por medio de un compresor nos da como resultado aire comprimido, el papel de la presión se vuelve una de las propiedades importantes en el aire comprimido, por tal razón será una de las propiedades a estudiar en este capítulo.

1.2.1. Presión

Se define presión como la magnitud de fuerza aplicada en un área determinada, siendo esta una magnitud escalar. Se mide en el Sistema Internacional (SI) en pascales (Pa), que es igual a la fuerza total de un newton

(N), actuando constantemente sobre un en un metro cuadrado (m²). Se representa a través de la siguiente ecuación:

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

Donde:

P = presión en (Pa)

F = fuerza en (N)

A = área en (m²)

La presión se puede clasificar de la siguiente manera:

1.2.1.1. Presión absoluta

Esta presión se define como la cantidad de presión que sufre un cuerpo más la presión atmosférica que sufre este cuerpo, la presión que sufre un cuerpo se mide mediante un manómetro, tomando en cuenta que todos los cuerpos en el planeta Tierra están sometidos a la presión atmosférica.

Matemáticamente se expresa de la siguiente manera:

$$P_{abs} = P_m + P_{Atm}$$

Donde:

P_m = presión manométrica

P_{atm} = presión atmosférica

1.2.1.2. Presión atmosférica

La presión atmosférica o barométrica se define como el peso de la columna de aire que hay sobre cualquier punto o lugar de la superficie terrestre en un punto determinado. De esta manera obtenemos la siguiente relación:

$$P_{atm} = \frac{\text{Peso de columna de aire}}{\text{unidad de superficie}}$$

Donde:

P_{atm} = presión atmosférica

Esta fuerza es inversamente proporcional a la altitud. Para entender mejor el concepto, a mayor altura respecto al nivel del mar, menor es la presión atmosférica, y cuanto menor sea la altura y más se acerque al nivel del mar, será mayor la presión. La mayor presión atmosférica es la que se produce al nivel del mar. Por ende, esta medida se toma como referencia de la presión atmosférica normal.

Existen diversas unidades de medida para representar la presión atmosférica. La utilizada en el SI es la llamada Pascal (Pa) o hectopascal (hPa). Sin embargo, también se usan bares (b), milibares (mb), atmósferas (atm), milímetros de mercurio (mm Hg) y Torricellis (Torr).

Para calcular la presión atmosférica o barométrica se toma como referencia los principios de la ecuación fundamental hidrostática.

$$P_{atm} = \rho * g * h$$

Donde:

P_{atm} = presión atmosférica [Pa]

ρ = densidad del fluido [kg/ m³]

g = aceleración de gravedad [m/s²]

h = profundidad [m]

El valor de la presión atmosférica normal (al nivel del mar) es de 760 mm, lo cual equivale a 760 torr; a 1.013,2 mb (milibares); 101 325 Pa (pascales); a 1013,2 hPa (hectopascales) o también a 1 atm (atmósfera).

1.2.1.3. Presión manométrica o relativa

Esta se define como la diferencia de la presión absoluta o real y la presión atmosférica:

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

Donde:

P_m = presión manométrica o relativa [Pa]

P_{abs} = presión absoluta [Pa]

P_{atm} = presión atmosférica [Pa]

A los aparatos usados para medir la presión manométrica se les denomina manómetros y funcionan con los mismos mecanismos que operan los barómetros de mercurio, siendo esta la presión mayormente utilizada en la vida diaria.

1.2.1.4. Presión hidrostática o hidrodinámica

Es la presión que sufren los fluidos, debido al peso del propio fluido en reposo, como en constante movimiento. Usualmente se calcula una presión media entre las dos.

1.2.1.5. Presión estática

Es la fuerza por unidad de superficie ejercida por el fluido sobre las paredes del conducto, se representa por P y se mide en pascales (Pa) o en mm.c.a. (1 atm= 101325 Pa = 10332 mm.c.a. lo que equivale a que mm.c.a. = 9,8 Pa ≈ 10 Pa).

1.2.1.6. Presión dinámica

La presión dinámica no se manifiesta ejerciendo una fuerza sobre una superficie, como ocurre con la presión estática, sino que es la energía por unidad de volumen que posee el fluido en movimiento. La presión dinámica indica la cantidad de la presión total que guarda relación con la velocidad del fluido en las tuberías. Se puede definir la presión dinámica a partir de la siguiente ecuación:

$$P_d = \frac{\rho_i v_i^2}{2}$$

Donde:

P_d = presión dinámica (Pa)

ρ_i = densidad del fluido (Kg/m³)

V_i = velocidad del fluido (m/s)

1.2.1.7. Presión total

En un sistema se le denomina presión total a la suma de la presión estática y dinámica:

$$P_T = P_e + P_d$$

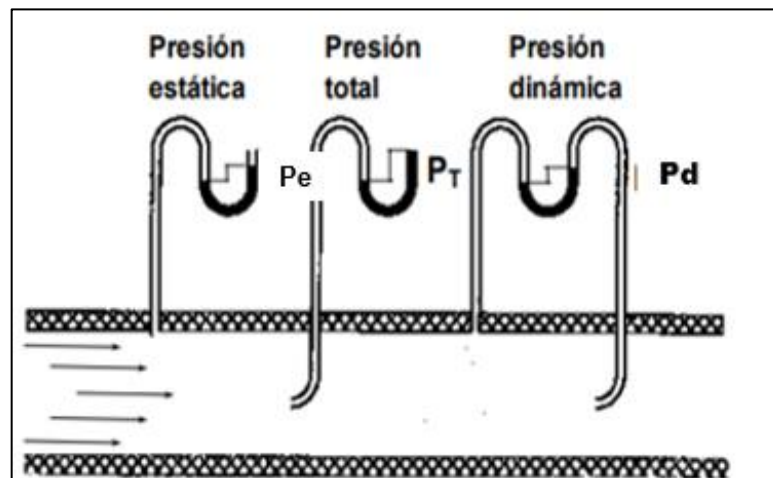
Donde:

P_T = presión total

P_d = presión dinámica

P_e = presión estática

Figura 1. Representación gráfica de medición de presiones



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2018.

1.2.1.8. Presión de un gas

Se origina por el choque de moléculas que contiene el gas, con las paredes del recipiente en el que se encuentra contenido. Cuantas más moléculas choquen mayor será la presión, y cuanto mayor sea la velocidad también aumentará la presión, al igual que al aumentar la temperatura aumentará la presión en el recipiente. Las colisiones que se tienen entre moléculas son tan numerosas que forman una fuerza efectiva dando como resultado una presión constante.

La unidad en el SI de presión es el pascal (Pa), esta se define como un Newton por metro cuadrado:

$$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N m}^{-2}$$

Si dos gases se encuentran en compartimientos separados por una pared móvil, el gas que tiene la mayor presión reducirá el volumen del gas que tiene la menor presión. La mayor presión caerá cuando este se expanda y la del gas con menor presión aumentará cuando este se comprima. En cierto punto las dos presiones se igualan y la pared no tendrá más tendencia a moverse, a eso se le denomina equilibrio mecánico entre dos gases.

1.2.2. Humedad del aire

Esta es provocada por el vapor de agua que se aloja en la tropósfera, esto debido al proceso de evaporación que sucede como parte del ciclo hidrológico, siendo los rayos del sol parte importante de este ciclo. La cantidad de vapor de agua depende de la temperatura ya que, a mayor temperatura, mayor cantidad de vapor de agua contendrá el aire.

Humedad relativa se define como la cantidad de vapor de agua contenida en el aire (humedad absoluta) y la máxima cantidad que el aire sería capaz de contener en esa temperatura (humedad absoluta), esta se expresa como un porcentaje. Un porcentaje alto significa que la mezcla del agua y aire contiene demasiada humedad. La humedad relativa depende de la temperatura y de la presión del sistema de interés, es fuertemente proporcional a la temperatura y altamente sensible a sus cambios.

Para poder comprender la cantidad de vapor de agua que se encuentra en el aire, debemos saber que la humedad experimenta varias fases, y para saber cómo se puede expresar matemáticamente se definen los siguientes términos.

1.2.3. Temperatura

La temperatura del aire es directamente proporcional a la energía cinética media de esas moléculas. Eso significa que la temperatura del aire será alta si la energía cinética media es grande (y las moléculas de aire se mueven más rápido). La temperatura será baja cuando la energía cinética sea pequeña.

El aire comprimido tiene una gran ventaja que es imperceptible a las alteraciones de temperatura, lo que hace posible que se pueda garantizar el trabajo del mismo incluso en temperaturas extremas.

1.2.4. Compresibilidad

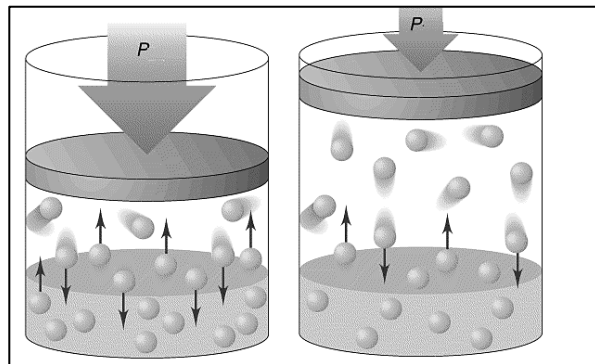
Como todos los gases, el aire no tiene una forma determinada, toma la forma del recipiente que los contiene o la de su ambiente, permite ser comprimido (compresión) y tiene la tendencia a dilatarse (expansión).

Se define compresibilidad como la variación de la presión con respecto a la variación del volumen de una sustancia, si se quiere cuantificar esto se usará el módulo volumétrico de elasticidad.

La capacidad de compresión del aire atmosférico se explica por las leyes de los gases, siendo una de las leyes del aire comprimido la de Boyle-Mariotte, que dice: la presión que se ejerce por una determinada fuerza es inversamente proporcional al volumen de una masa gaseosa, considerando que la temperatura se mantenga constante.

Cuando en el proceso de compresión se reduce el volumen de esa masa de gas, la presión aumenta. Hay que considerar otros factores en el proceso de compresión, como son la temperatura o la humedad. Con aire comprimido no es posible obtener para los émbolos velocidades uniformes y constantes.

Figura 2. **Compresibilidad de los gases**



Fuente: Ciencia Máxima. *Teoría científica de los gases*.

<https://cienciamaxima.wordpress.com/2013/06/03/compresibilidad-y-expansibilidad-de-los-gases-basados-en-la-teoria-cinetica/>. Consulta: 31 de marzo de 2021.

1.2.5. Densidad del aire

Cantidad de masa de aire por unidad de volumen, la densidad del aire, como la presión de aire, disminuye al aumentar la altitud. También cambia con la variación en la presión atmosférica, temperatura y humedad. En 101 325 kPa(abs) y 15 ° C, el aire tiene una densidad de aproximadamente 1,225 kg / m³ (0,001225 g / cm³, 0,0023769 slug / (pies³), 0,0765 lb / (pies³)).

La densidad del aire seco se puede calcular usando la ley del gas ideal, se expresa como una función de la temperatura y la presión.

$$\rho = \frac{p}{R_{esp}T}$$

Donde:

ρ = la densidad del aire (kg/m³)

p = presión absoluta (Pa)

T = temperatura absoluta (°K)

R_{esp} = constante gas específico para el aire seco (J/ (Kg·k))

La constante de gas específica para el aire seco es 287 058 J/ (Kg·k) en el Sistema Internacional de Unidades, y 53,35 (ft· lbf)/ (lb· °R) en unidades imperiales.

Esta cantidad puede variar ligeramente dependiendo de la composición molecular de aire a una ubicación particular.

1.2.6. Volumen específico del aire seco

El volumen específico del aire seco se encuentra en función de la temperatura y presión mediante la siguiente ecuación:

$$V_e = \frac{R_a T_a}{P_a}$$

Donde:

V_e = volumen específico

R_a = constante de los gases ideales [m³Pa/kg.°k]

T_a = temperatura absoluta [K]

P_a = presión parcial del aire seco [kPa]

Para la mayoría de los propósitos prácticos se puede considerar que el aire se comporta como un gas ideal.

1.2.7. Otros aspectos del aire comprimido

El aire comprimido no se considera una sustancia tóxica, ha sido una de las cualidades para su uso en aplicaciones industriales, ya que este puede ser utilizado en ambientes explosivos o inflamables, su resistencia e insensibilidad a las variaciones de la temperatura lo hacen un elemento de calidad y seguro para sus usuarios, como tampoco no existe riesgo de que se presenten accidentes debido a que es una energía antideflagrante (reduce el riesgo de explosiones).

El aire comprimido es económico solo hasta cierto rango de fuerza. Condicionado por la presión de servicio normalmente usual de 700 kPa (7 bar), el límite, también en función de la carrera y la velocidad, es de 20 000 a 30 000 N (2 000 a 3 000 kp). Para la calidad del aire que se requiere según sea

la aplicación se hace necesario someter al flujo de aire a un proceso de tratamiento mediante etapas de filtrado, separación de agua y secado que consiga unos niveles de suciedad, contenido en agua y aceite que queden por debajo de los límites establecidos.

El aire comprimido es denominado una energía limpia, ya que es energía ecológicamente respetuosa con la naturaleza, pues no produce combustión, no contamina la atmósfera y el agua, lo cual lo hace importante para industrias químicas, textiles y alimentarias. Al estar estos gases exentos de azufre, plomo y sus óxidos, no produce olores ni residuos.

A continuación se presenta la tabla que define la calidad del aire clasificándolo en diferentes clases según la normativa:

Tabla I. **Calidad del aire comprimido según ISO 8573-1**

Calidad del aire comprimido, según ISO 8573-1					
CLASE	PARTÍCULAS SÓLIDAS Número máximo de partículas por m ³			HUMEDAD Punto de rocío a presión (°C)	ACEITE Concentración total mg/m ³ (aerosoles, líquidos o vapores)
	0,1-0,5 µm	0,5-1,0 µm	1,0-5,0 µm		
1	100	1	0	-70	0,01
2	10 000	1000	10	-40	0,1
3	-	10 000	500	-20	1
4	-	-	1 000	3	5
5	-	-	20 000	7	-
6	-	-	-	10	-

Fuente: Organización Internacional de Normalización. *Norma ISO 8573-1. Clasificación de la calidad del aire comprimido.* <https://www.serviaire.com/clasificacion-de-la-calidad-del-aire-comprimido-iso-8573-1/>. Consulta: 31 de marzo de 2021.

1.3. Compresión de aire

Se trata de aprovechar la capacidad de compresión que tiene el aire atmosférico, para usarlo como energía con el fin de un uso posterior. Por medio de la compresión del aire se proporciona un gas a una presión más alta de la que originalmente existía. El aumento de la presión puede variar de unas cuantas onzas a miles de PSI y los volúmenes manejados de unos pocos pies cúbicos por minuto (CFM) a cientos de miles.

La compresión puede realizar diversas tareas que facilitan procesos tales como:

- Transmitir potencia para herramientas neumáticas
- Aumentar procesos de combustión
- Transportar y distribuir gas
- Hacer circular un gas en un proceso o sistema
- Acelerar reacciones químicas

1.3.1. Métodos de compresión

Existen cuatro tipos de métodos para comprimir un gas, dos de clase intermitente y los otros dos métodos en la clase de flujo continuo, dichos métodos son:

- Método 1. Atrapar cantidades consecutivas de gas en algún tipo de encerramiento, reducir el volumen incrementando la presión para después desalojar el gas del cerramiento.

- Método 2. Atrapar cantidades consecutivas de gas en algún tipo de encerramiento, trasladarlo sin cambio de volumen a la descarga y comprimirlo por contraflujo.
- Método 3. Comprimir el gas por la acción mecánica de un impulsor o un motor con paletas en rápida rotación, que imparten velocidad y presión al gas que ya está fluyendo.
- Método 4. Alimentar el gas en un chorro de alta velocidad del mismo o diferente gas y convertir la alta velocidad de la mezcla a presión en un difusor.

Los compresores que usan los métodos 1 y 2 se catalogan en la clase intermitente y se conocen como compresores de desplazamiento positivo.

Los compresores que usan el método 3 se conocen como compresores dinámicos. Y los compresores que usan el método 4 se conocen como eyectores.

1.3.2. Tipos de compresores

Se pueden clasificar dos grupos básicos de compresores. En los de desplazamiento positivo (flujo intermitente) el aumento de presión se consigue confinando el gas de un espacio cerrado, donde posteriormente el volumen se reduce por una acción mecánica.

En los compresores de flujo continuo dinámico el aumento de presión se obtiene comunicando energía cinética al flujo constante de gas y convirtiendo esta en energía de presión por medio de un difusor.

1.3.2.1. Compresores de desplazamiento

La compresión se realiza en un recinto cerrado aumentando la presión del gas gracias a la reducción del volumen transmitiéndola al fluido.

A continuación, la clasificación de los compresores de desplazamiento:

- Rectilíneos

Estos son muy utilizados en la industria, por ser económicos en su adquisición y en su uso.

- Características

Estos comprimen aire sin que exista la posibilidad de contaminación con el aceite de lubricación. Sus posibilidades se limitan a bajos caudales y a presiones moderadas.

- Pistón

Consiste en encerrar en el cilindro una determinada cantidad de aire (que ha ingresado por la válvula de admisión), disminuir su volumen por desplazamiento del pistón y entregarlo al consumo (a almacenamiento) a través de la válvula de escape.

Estos compresores son apropiados para presiones moderadas y caudales insignificantes, hasta grandes presiones y caudales (1 000 bar y 25 000 m³/hora).

- Diafragma

Consiste en una membrana (diafragma), que modifica el volumen existente sobre ella por la acción de un pistón unida a la misma desde la parte inferior.

- Rotativos

Producen aire comprimido por un sistema rotatorio y continuo, es decir que empujan el aire desde la aspiración hacia la salida, comprimiéndolo.

- ✓ Un rotor
- ✓ Dos rotores

1.3.2.2. Compresores dinámicos

Se basan en el teorema de la cantidad de movimiento donde gracias a la fuerza recibida del motor de arrastre se aumenta la velocidad del fluido, para posteriormente transformarla en presión.

A continuación se presenta una clasificación de los compresores dinámicos:

- Radial

El recorrido del gas se realiza, entre etapa y etapa, siguiendo un camino radial. El gas entra por el centro de una rueda giratoria, provista de aletas radiales, las cuales lanzan el aire hacia la periferia mediante la acción centrífuga. Antes de ser guiado hasta el centro del siguiente impulsor el aire pasa a través de un difusor que transforma la energía cinética en presión. Se adapta muy bien

a la refrigeración intermedia en cada etapa. Posee altas velocidades comparado con otros compresores.

- Axial

El aire es impulsado por las paletas según el sentido del eje. El gas pasa axialmente por el compresor por hileras alternadas de paletas estacionarias y luego presión al gas. La refrigeración entre etapas es dificultosa, limitando a la relación de presión.

Funcionan a mayores velocidades que los centrífugos y se utilizan en aplicaciones donde es necesario caudal constante y presiones moderadas.

- Compresores reciprocantes

En estas máquinas la compresión y el desplazamiento se efectúan por la acción positiva de un pistón que está reciprocando dentro de un cilindro.

El elemento básico de compresión recíprocante es un simple cilindro comprimiendo un solo lado del pistón, esto es para compresor de simple efecto. Una unidad comprimiendo en los lados del pistón es de doble efecto.

1.4. Términos y unidades usadas en la industria de aire comprimido

Se presenta una lista de términos, unidades y abreviaturas de uso común en el diseño, así como en las unidades de verificación.

1.4.1. Términos de uso común en instalaciones de aire comprimido

Los términos y abreviaturas que se presentan ayudarán a entender las descripciones de los equipos utilizados, medidas y normas utilizadas a lo largo de este tema desarrollado.

- **Actuador:** la parte de una válvula reguladora que convierte el fluido mecánico, la energía térmica o la energía eléctrica, en movimiento mecánico para abrir o cerrar la válvula.
- **Aire normal:** aire que contiene una temperatura de 20 °C (68°F), una humedad relativa de 36 % y una presión de 101,325 kPa (14.7 psi).
- **Aire seco:** aire en el cual no hay vapor de agua (humedad).
- **ASA:** siglas de American Standards Association. Ahora se le conoce como American National Standards Institute (ANSI).
- **Asiento:** parte del mecanismo de una válvula, contra la cual se presiona la válvula para cerrar.
- **Aspiración:** movimiento producido en un fluido por succión.
- **ASME:** siglas de American Society of Mechanical Engineers, que se ha convertido en un conjunto de normas para la construcción de calderas.
- **ASTM:** normas emitidas por la American Society of Testing Materials.

- Bomba: cualquiera de las diferentes máquinas que impulsan un gas o un líquido hacia –o lo atraen de– algo, por succión o por presión.
- *Booster*: término común aplicado a un compresor, cuando se utiliza en un sistema de compresión de doble etapa, para comprimir la etapa baja desde el evaporador hasta la presión intermedia.
- BTU: British Thermal Unit, cantidad de calor que se requiere para elevar un grado Fahrenheit la temperatura de una libra de agua.
- Caída de presión: diferencia de presión en dos extremos de un circuito o parte de un circuito. Cualquier pérdida de presión en la línea debido a la fricción del fluido, o una restricción en la línea.
- Calibrar: posicionar indicadores por comparación, con un estándar o por otros medios, para asegurar mediciones precisas.
- Calor de compresión: efecto de calefacción que se lleva a cabo cuando se comprime un gas. Energía mecánica de la presión, convertida a energía calorífica.
- Carburo: combinación de carbono con un cuerpo simple (carburo de hidrógeno, entre otros).
- Caudal de aire comprimido (Q): el caudal es la cantidad de aire comprimido que atraviesa una sección de conducto en la unidad de tiempo. Se expresa en volumen (m³/h) y, tratándose de aire comprimido, también se puede hablar de caudal másico (kg/h).

- CFM: pies cúbicos por minuto, se refiere al volumen de aire que el compresor puede suministrar, son parámetros clave en la evaluación de un compresor de aire.
- Compresión: término utilizado para denotar el proceso de incrementar la presión, sobre un volumen dado de gas, usando energía mecánica. Al hacer esto, se reduce el volumen y se incrementa la presión del gas.
- Coplas: dispositivos mecánicos para unir líneas de tuberías.
- Ducto: tubo o canal a través del cual el aire es movido o transportado.
- Ebullición: es un proceso físico en el que un líquido pasa a un estado gaseoso a alta temperatura. Efecto de hervir.
- Eficiencia: capacidad de un dispositivo, sistema o actividad, dividida entre la potencia absorbida necesaria para crear esa capacidad. En un compresor, la eficiencia sería la capacidad de trabajo, medida por un cambio de presión, dividida entre la energía eléctrica consumida.
- Eficiencia volumétrica: término utilizado para expresar la relación, entre el funcionamiento real de un compresor o de una bomba de vacío, y el funcionamiento calculado con base en ese desplazamiento.
- Filtro: dispositivo para remover partículas extrañas de un fluido.
- Presión de diseño: la más alta o más severa presión esperada durante la operación. Algunas veces se usa como la presión de operación calculada, más una tolerancia por seguridad.

- Presión de operación: presión real a la cual trabaja el sistema bajo condiciones normales. Puede ser positiva o negativa (vacío).
- SCFM: el término pies cúbicos estándar por minuto incorpora variables como presión atmosférica, la presión del aire ambiente, temperatura y humedad, con el fin de obtener cifras precisas y comparables.
- Vaporización: transformación de un líquido a vapor. Transformación de un líquido a gas.

1.4.2. Unidades de medida

El punto de partida de una instalación de aire comprimido es el aire exterior de la atmósfera, que se encuentra en unas condiciones especiales de presión, temperatura y humedad propia de cada lugar.

Debido a acuerdos internacionales se toma como presión atmosférica normalizada 1 atmósfera, que se define como la presión atmosférica media al nivel del mar, y que toma los siguientes valores según el sistema de unidades:

Tabla II. **Equivalencias de 1 atmósfera**

1 atmósfera	1,01325 bar
1 atmósfera	760 Torr (760 mm Hg)
1 atmósfera	101 325 Pa (N / m ²)
1 atmósfera	1,033227 Kg/ cm ²
1 atmósfera	14, 69595 PSI (pound/ inch ²)
1 atmósfera	10,33 metros de columna de agua m.c.a

Fuente: elaboración propia.

Tabla III. **Unidades de medición en presión**

	Bar	Kg/cm ²	psi	g/cm ³	mm cda	Pa
Bar	1	1,019716	14,5037	1 019,716	10 000	100 000
Kg/ cm ²	0,980665	1	14,2233	1 000	9 806,65	98 065,5
Psi	0,06894	0,07031	1	70,3069	689,4757	6 894,7547
g/cm ²	0,00098	0,001	0,01422	1	9,80665	98,0665
mm cda	9,80665·10 ⁻⁵	0,000109	0,00145	0,10197	1	9,80665
Pa	0,00001	0,0000109	0,000145	0,01019	0,1	1

Fuente: elaboración propia.

Tabla IV. **Unidades de medición de longitud**

	m	Mm	ft	in
M	1	1 000	3,281	39,370
Mm	0,001	1	0,003	0,039
foot (ft) = pie	0,304 8	304,8	1	12
inch (in) = pulgada (1")	0,025 4	25,4	0,083	1

Fuente: elaboración propia.

Tabla V. **Unidades de medición de masa en volumen (densidad)**

	Kg/m ³	lb/ft ³	lb/in ³
Kg/m ³	1	0,062 428	0,000 036
lb/ft ³	16,018 406	1	0,000 578 70
lb/in ³	27 680	1,728	1

Fuente: elaboración propia

Tabla VI. **Unidades de medición de caudal**

	m ³ /h	l/min	ft ³ /min	gal/min
m ³ /h	1	16,667	0,589	4,403
l/min	0,06	1	0,035	0,264
ft ³ /min	1,699	28,317	1	7,481
gal/ min	0,227	3,785	0,134	1

Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. **Unidades de medición de masa**

	Kg	libra (lb)	onza
Kg	1	2,204 622 9	35,273 9
Pound (lb) librra	0,453 592 37	1	16
Onza	0,0283495	0,0625	1

Fuente: elaboración propia.

- Unidades de medición de temperatura

El 0 °C corresponde a -32 F y 100° C a 212 °F. Un grado Fahrenheit equivale a $100/180 = 5/8$ °C.

La temperatura estándar para la medida de volúmenes gaseosos en el sistema anglosajón es de 60 °F.

- Unidades de medición de velocidad

$$1 \text{ ft /s} = 0,3048 \text{ m/s}$$

2. COMPONENTES DE UN SISTEMA PARA DISTRIBUCIÓN DE AIRE COMPRIMIDO

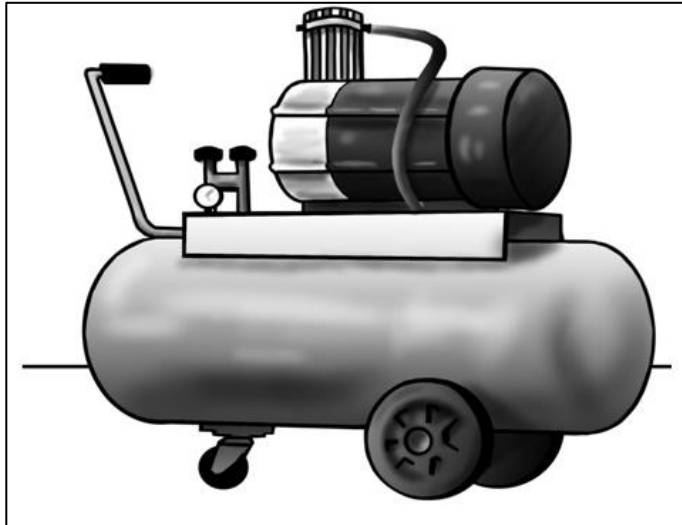
Un sistema para distribución de aire comprimido se conforma de diferentes componentes, los cuales varían en formas, marcas y tamaños, de acuerdo a las necesidades que se deseen cubrir.

El diseño y mantenimiento adecuado de redes de aire comprimido y sus respectivos accesorios juega un papel decisivo en los procesos productivos involucrados cuya energía utilizada es el aire. A continuación se describen los principales componentes de un sistema para distribución de aire comprimido.

2.1. Compresor

Es una máquina que tiene la función de incrementar la presión de un fluido. El compresor eleva la presión de fluidos compresibles como el aire y todo tipo de gases, pero no todos los compresores lo hacen de la misma manera. Los tipos de compresores se han descrito en el capítulo anterior, así como el funcionamiento de cada uno de los diferentes tipos de compresores.

Figura 3. **Compresor**



Fuente: Línea de Prevención. *Productos*. <https://www.lineaprevencion.com/ProjectMiniSites/IS41/html/cap-1/cap32.htm>. Consulta: 9 de febrero de 2021.

- Criterios de selección de un compresor:

Las pautas que llevan a la selección de un tipo de compresor van de la mano de las necesidades que desean cubrir, debido a eso se presentan los siguientes puntos de vista a considerar para la selección de un compresor:

Tipo de compresor, por lo que se recomienda para 0 a 80 psig (5,5 Bar): compresor de una etapa. 80 a 250 psig (17,2 Bar) / uso continuo de herramientas: compresor de aire de dos etapas.

- Consumo total de aire, por lo que es necesario conocer el consumo total que tendrá el sistema. Por lo que debemos conocer factores importantes como demandas de todas las herramientas de aire, equipos y otras variables de consumo de aire.

- Capacidad de aire de compresor, caballos de fuerza (HP)

Identificando SCFM como pies cúbicos estándar por minuto, esta es una especificación que indica el volumen de aire que un compresor de aire puede proporcionar a una cierta presión, para lo que se designan los siguientes valores correspondientes para determinar la capacidad de un compresor:

- Demanda total determinada SCFM = D

Se debe agregar un 20 % para las variables que se puedan agregar al sistema, añadir un % de crecimiento futuro. Tomando los siguientes parámetros:

$$D1 = D * 1.2$$

$$\text{Si } D1 \leq 100 \text{ SCFM: HP} = D/4$$

$$\text{Si } D1 > 100 \text{ SCFM: HP} = D/5$$

2.2. Depósitos de acumulación

El depósito de acumulación funciona como un depósito pulmón, que permite reducir el número de arranques del compresor para hacer frente a la demanda de aire comprimido cada vez que se produzca. Generalmente es recomendable que un compresor tenga un régimen de arranques y paradas que se sitúe entre las 5 – 10 veces/hora.

2.2.1. Tipos de depósitos de acumulación

Los depósitos de aire comprimido son horizontales o verticales. Se elaboran con material de acero, formando una parte cilíndrica llamada virola, y de dos fondos repujados con convexidad exterior. Los fondos son generalmente

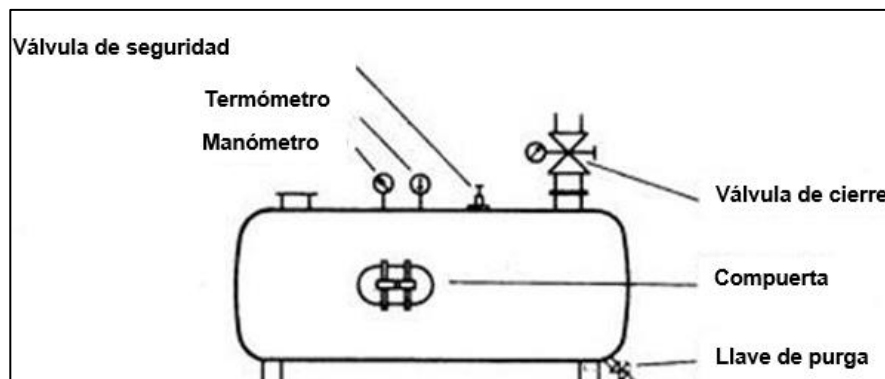
embutidos y tienen forma de bóveda esférica, van unidos mediante una curva de enlace.

El depósito de aire se proporciona como almacenamiento para reducir fluctuaciones y mantener un flujo suave en el sistema de aire comprimido.

Los depósitos deben tener los siguientes accesorios:

- Válvula de seguridad, que permita la evacuación total del caudal del compresor con sobrecarga que no exceda del manómetro.
- Llave o grifo de purga o válvula automática en su fondo que permita la evacuación del agua condensada y el aceite.
- Agujero de limpieza. Como su nombre lo indica, este permite al tanque de almacenamiento liberar residuos de aceite o agua.
- Termómetro.
- Compuerta.

Figura 4. **Esquema de depósito horizontal**

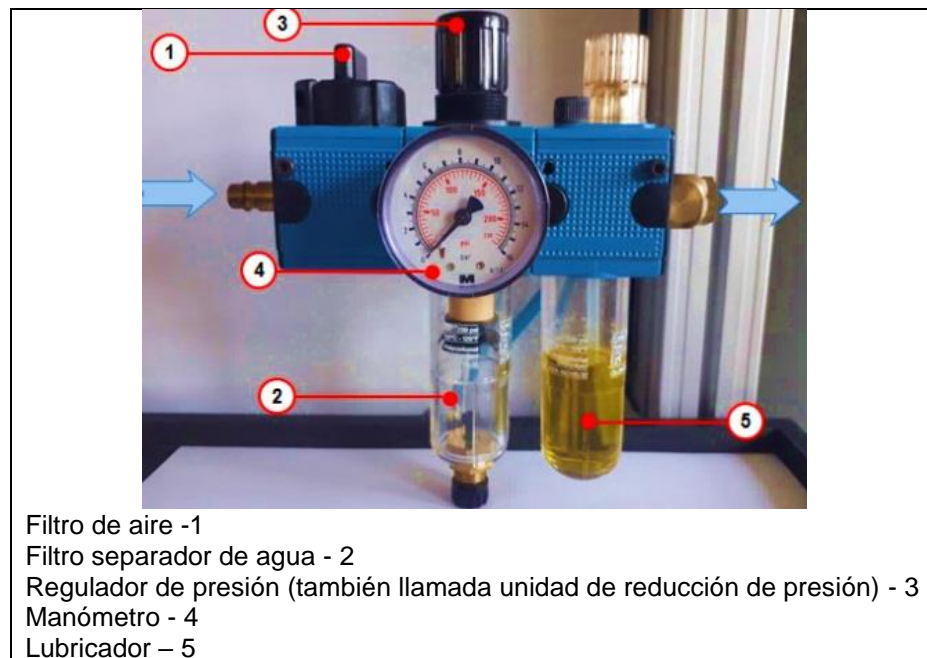


Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2018.

2.3. Unidad de mantenimiento

La unidad de mantenimiento es una combinación de los siguientes componentes, que cumplen una función particular dentro del sistema de distribución de aire comprimido. Está conformada por:

Figura 5. **Unidad de mantenimiento**



Fuente: Canal de Ingeniería. *Equipo empresarial*. <https://learnchannel-tv.com/es/pneumatics/maintenance-unit/>. Consulta: 20 de marzo de 2021.

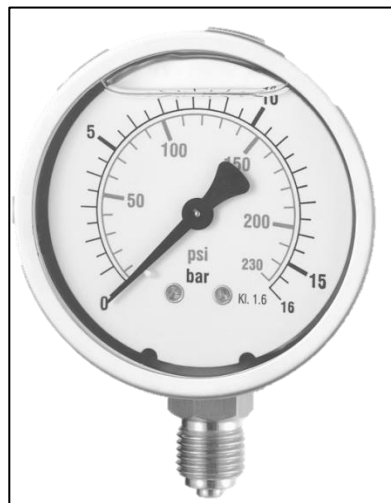
2.4. Manómetros

Es un indicador que representa de manera continua en el tiempo la evolución de la magnitud de la presión de un gas o líquido, como agua, aceite o aire.

Es necesario mencionar que principalmente los manómetros nos indican la presión que se ejerce en un área en un momento determinado.

Todos los componentes del manómetro deben elegirse teniendo en cuenta las condiciones de funcionamiento de los medios ambientales a los que se van a exponer para evitar una mala aplicación. Una aplicación incorrecta puede ser perjudicial para el manómetro, causar fallos y posibles lesiones personales o daños materiales. Estos pueden tener diferentes escalas.

Figura 6. **Manómetro**



Fuente: Free PNG. *Manómetros medición de presión neumática WIKA.*
<https://www.freepng.es/png-ytnril/>. Consulta: 6 de julio de 2020.

2.5. Tuberías

Los tubos de presión se emplean para conducir fluidos o gases a temperaturas o presiones normales, debajo de cero o elevadas, o combinaciones de ambas condiciones.

Es indispensable que las tuberías a utilizar para el uso industrial, comercial y doméstico, cuenten con especificaciones técnicas para su uso correcto. En Guatemala no se cuenta con una normativa propia para gases, donde generalicen y describan el tipo de tuberías que deben utilizarse para cada actividad y cuáles están autorizadas.

En la industria, se toman como referencia las normas internacionales para tener criterios de aceptación. Entre las normas principales internacionales que dan directrices para el uso de tuberías, de acuerdo a su clasificación y uso de las mismas, se encuentran las siguientes:

- El ASME *Boiler and Pressure Vessel Code* (código para calderas y recipientes a presión de la ASME).
- Sección II: *Material Specifications* (especificaciones de los materiales), suministra las especificaciones detalladas de los materiales que resulten aceptables según este código.
- Sección VIII: *Unfired Pressure Vessels* (recipientes a presión no calentados), se refiere solo hasta el punto de las conexiones con bridas o roscadas al recipiente a presión, excepto que se aplicara toda la sección en aquellos casos especiales en los que los recipientes a presión se construyen a partir de tubos y sus accesorios.
- Algunas otras sociedades de ingeniería y asociaciones del ramo han publicado también normas que cubren las tuberías. Las más sobresalientes entre estas son la American Society for Testing and Materials (ASTM, Sociedad Americana para Pruebas y Materiales), el American National Standard Institute (ANSI, Instituto Nacional Americano

de Normas) y el American Petroleum Institute (API, Instituto Americano del Petróleo).

Los tipos de tuberías que se estudiarán son las siguientes:

2.5.1. Tuberías de cobre

Las tuberías que conducen aire comprimido son de un grado de pureza de hasta el 99,9 %, a los cuales, para hacerlas más resistentes a la corrosión, se agrega un 0,02 % de fósforo.

En el caso que la tubería tenga que estar expuesta a la intemperie, pero sin peligro de esfuerzos mecánicos, es recomendable instalarla de cobre, pues se cubre con una capa verdosa oscura de óxido de cobre que con el tiempo se transforma en carbonato de cobre que les proporciona una mayor resistencia a las inclemencias ambientales, del subsuelo, a solventes, a materiales de acabados.

Se pueden clasificar seis tipos de tubos de cobre y su selección depende de la aplicación, de consideraciones ambientales, presión del fluido y las propiedades de este.

Los usos más comunes para cada tipo de tubo de cobre son:

- Tipo K: usado para el servicio con agua, combustibles, gas natural y aire comprimido.
- Tipo L: parecido al tipo K tiene un espesor de pared menor.

- Tipo M: semejante a los tipos K y L, sin embargo tiene un espesor de pared más reducido y es requerido para gran parte de los servicios hidráulicos y aplicaciones de calor a presiones moderadas.
- Tipo DWV: empleado a drenajes, desechos y ventilación en sistemas de plomería.
- Tipo ACR: empleado para acondicionar aire, refrigeración, gas natural, gas licuado de petróleo (LP) y aire comprimido.
- Tipo OXY/MED: empleado para distribuir oxígeno o gases medicinales, aire comprimido en la medicina y aplicaciones de vacío.

2.5.1.1. Características de la tubería de cobre

- Delgadez de los tramos debido al reducido espesor de su pared, lo que facilita el transporte e instalación de los mismos.
- Su fabricación sin costura permite que las tuberías según el tipo de estas resistan las presiones de trabajo previstas con un alto factor de seguridad.
- Su pared interior completamente lisa permite que los fluidos, al circular, sufran un mínimo de pérdidas por fricción.
- Alta resistencia a la corrosión, que permite tener una vida útil de cada una de las instalaciones (vida útil del material de 25 a 30 años).

Figura 7. **Tuberías de cobre en instalaciones hidráulicas**



Fuente: Silver Tubos. *Conexiones de cobre*. <https://silvertubos.com/conexiones/cobre/>. Consulta 21 de febrero de 2021.

Se presenta la tabla de diámetros comerciales de tubería de cobre, en el mercado de Guatemala. Para uso domiciliario y comercial.

Tabla VIII. **Diámetros comerciales de tubería de cobre**

Medida nominal Pulgadas Milímetros	Diámetro exterior Pulgadas Milímetros	Diámetro interior Pulgadas milímetros	Espesor de pared Pulgadas milímetros	Peso Lb/pie Kg/m
1/4" 6,35 mm	0,375" 9,525	0,315" 8,001	0,030" 0,762	0,126 0,188
3/8" 9,5 mm	0,500" 12,700	0,430" 10,922	0,035" 0,889	0,198 0,295
1/2" 12,7 mm	0,625" 15,875	0,545" 13,845	0,040" 1,016	0,285 0,424
5/8" 15,785 mm	0,750" 19,050	0,666" 16,916	0,042" 1,067	0,363 0,539
3/4" 19 mm	0,875" 22,225	0,785" 19,939	0,045" 1,143	0,455 0,678
1" 25 mm	1,125" 28,575	1,025" 26,035	0,050" 1,270	0,655 0,976

Fuente: elaboración propia.

2.5.2. Tubería de hierro galvanizado

Son tubos de acero que tienen un recubrimiento de zinc interna y externamente logrado a través de un proceso de inmersión en caliente. El zinc utilizado para el recubrimiento debe contar con especificaciones de pureza y las superficies del acero deben estar preparadas.

Existen factores que hacen al hierro galvanizado una opción favorable para su uso por ser un material barato, aunque la mano de obra es evidentemente más laboriosa y tardada al tenerse la necesidad de agregar accesorios para hacer cambios de dirección o uniones, aun sin considerar que la vida útil del material galvanizado es mínima en comparación con el material de cobre.

Las tuberías de hierro galvanizado están fabricadas para trabajar a presiones máximas de 10,5 kg/cm² y 21,2 kg/cm².

2.5.2.1. Características de hierro galvanizado

- Baja expansión, conserva su forma y es resistente al fuego.
- Es un material muy económico respecto a otros materiales, debido a que el proceso de galvanizado cuesta menos que otros métodos comunes de protección de tuberías.
- El costo de mantenimiento es menor, debido a su vida útil. Puede durar más de 50 años en áreas rurales y un poco más de 25 de años en áreas urbanas.

- Fácil inspección, es simple y directa, ya que los recubrimientos galvanizados se pueden examinar a simple vista.

Figura 8. **Tubería de hierro galvanizado roscada y lisa**



Fuente: Direct Industry. *Tubos de hierro galvanizado*. <https://www.directindustry.es/prod/steel-tubes-india/product-55721-1436757.html>. Consulta 14 de marzo de 2021.

Se presenta una tabla de los diámetros comerciales de hierro galvanizado, usados para transportar diferentes tipos de fluidos.

Tabla IX. **Diámetros comerciales de hierro galvanizado**

Medida nominal Pulgadas	Diámetro exterior Milímetros	Diámetro interior milímetros	Espesor de pared milímetros
1/2"	21,34	15,80	0,762
3/4"	26,67	20,93	0,889
1"	33,40	26,64	1,016
1"- 1/4"	42,16	35,05	1,067
1"- 1/2"	48,26	40,89	1,143
2"	60,33	52,50	1,270

Fuente: elaboración propia

2.5.3. Tubería de Pe-Al-Pe

Las tuberías Pe-Al-Pe son las multicapas, es decir un tubo flexible de aluminio, recubierto en su interior y exterior por una capa de polietileno (HDPE) adherida por el sistema de extrusión y resistente a los rayos UV y diferentes agentes químicos.

Para su fabricación se utiliza tecnología de ultrasonido y métodos de soldadura de arco argón, de acuerdo con los estándares internacionales, garantizando así la hermeticidad total en la tubería.

Este tipo de tubería permite conducir gases de manera más higiénica, ya que no permite el cultivo de microorganismos, haciendo además que la instalación sea más sencilla, al requerir menos accesorios, con mayor duración y un ciento por ciento de impermeabilidad.

Este tipo de tubería presenta resistencia a la abrasión, resistencia química, liviana y es resistente al calor.

2.5.3.1. Características de la tubería de PE-AL-PE

- Concentra ventajas de las tuberías metálicas y plásticas, ya que es un material totalmente resistente a la corrosión y resistente a temperaturas extremas.
- Protege al medio ambiente, ya que su vida útil es más duradera que la del hierro fundido.

- Su instalación es económica, limpia y segura; en su instalación se aplica la técnica de fundir-juntar, así la resistencia del punto unido no disminuye.
- Las longitudes de los tubos suelen ser mucho más extensas al ser un material mucho más flexible y liviano, los tubos son más largos, esto consigue que disminuya el número de uniones.

Figura 9. **Tubería de Pe-Al-Pe**



Fuente: Plomerama. *Tubería de Pe-Al-Pe*. <https://www.plomerama.mx/mangueras-para-gas-natural-pe-al-pe/>. Consulta 12 de marzo de 2021.

En la siguiente tabla se presentan los diámetros para tuberías comerciales de Pe-Al-Pe.

Tabla X. **Diámetros para tuberías comerciales de Pe-Al-Pe**

Diámetro nominal	Designación	Diámetro exterior		Ovalamiento		Diámetro Interno (mm)	Espesor de pared (mm)
		Min. (mm)	Max. (mm)	Min. (mm)	Max. (mm)		
16	12-16	16	16,4	15,6	16,8	12,0	1,6
18	14-18	18	18,4	17,6	18,8	14,0	1,8
20	16-20	20	20,4	19,4	21,0	16,0	2,0
25	20-25	25	25,5	24,3	26,2	20,0	2,2

Fuente: elaboración propia.

2.6. Accesorios

En toda instalación que conlleve el uso de tuberías es indispensable el uso de accesorios, estos tienen la finalidad de poder adaptar una instalación, dar dirección, añadir, completar una fase o disminuir el diámetro de una tubería, para poder cumplir satisfactoriamente las necesidades que se deseen cubrir.

Los accesorios se especifican por el diámetro nominal de la tubería, el nombre del accesorio y el material. Se agrupan en tres clases generales:

- **Accesorios roscados:** se usan generalmente en instalaciones de tuberías de 2 ½ pulgadas de diámetro, o menos. La rosca normalizada americana es de dos clases: cónica o paralela.
- **Accesorios soldados:** se usan cuando las conexiones deben ser permanentes y en líneas de alta presión y temperatura. Se pueden usar anillos de empalme cuando la tubería soldada se debe desmontar periódicamente.

- Accesorios de bridas: proporcionan una forma rápida de desarmar tuberías. Las bridas se unen a los extremos de las tuberías por medio de soldadura, rosca o solapándolas. Las caras de las bridas se acoplan entonces por medio de pernos, cuyo tamaño y espaciamiento se determina por el tamaño y presión del trabajo de acoplamiento.

Figura 10. **Clasificación de accesorios**



Fuente: elaboración propia.

2.6.1. Codos

Son accesorios de forma curva que se utilizan para cambiar la dirección del flujo de las líneas tantos grados como lo especifiquen los planos de las tuberías. Son utilizados cuando el acoplamiento del espacio es limitado o cuando el diseño de la tubería lo amerita. Los codos pueden ser: codos iguales cuando poseen

dimensiones iguales en sus extremos, y codos desiguales cuando hay variaciones de diámetros en sus extremos.

Debido al cambio de dirección que puede poseer un circuito se puede contar con codos a 90°, que son rectos, y codos a 45°, estos le pueden dar direcciones inclinadas directamente a los circuitos.

Figura 11. **Tipos de codos**

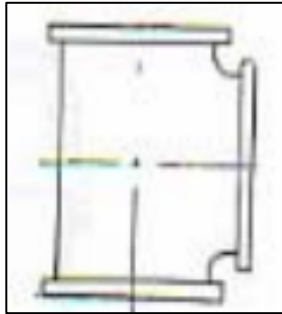


Fuente: Slideshare. *Accesorios de la tubería hg*. <https://es.slideshare.net/nosequeponercarajo/accesorios-de-la-tuberia-hg>. Consulta: 10 de marzo de 2021.

2.6.2. **Tees**

Por lo general, la unión Tee para tubos estándar se emplea para unir tuberías con un mismo diámetro, también para unir tramos de tuberías con diferentes diámetros cuando se incorpora un reductor para los tubos.

Figura 12. **Tee**

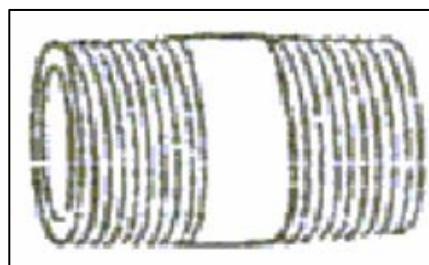


Fuente: ROSALES, Robert. *Manual de mantenimiento Industrial*. p. 10.

2.6.3. **Niples**

Son accesorios que sirven como enlace entre tubos del mismo diámetro. La unión posee una rosca hembra mientras el niple tiene rosca doble macho.

Figura 13. **Niple**



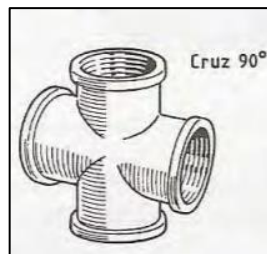
Fuente: ROSALES, Robert. *Manual de mantenimiento Industrial*. p. 12.

2.6.4. Cruces

Son elementos de conexión, los cuales sirven para acoplar cuatro tuberías en un mismo plano, son utilizados para hacer derivaciones. No es necesario reforzar las uniones entre tubería y accesorio.

Cruz recta, se puede usar en tuberías de alta presión para gas y petróleo y en los pozos de gas para controlar la presión de los cabezales. También se puede usar para operaciones de descarga o regulación conectando la cruz a las válvulas y tubos correspondientes. La cruz de reducción se puede conectar a tubos de un diámetro inferior al de la tubería principal.

Figura 14. **Cruz recta**

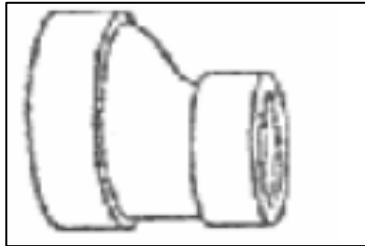


Fuente: Centro Integrado de Formación Profesional. *Técnicas de montaje de instalaciones*. p. 1.

2.6.5. Reducciones

Estos son elementos que acoplan conducciones de diferentes diámetros, sirven para aumentar o disminuir el diámetro según sea la dirección del flujo.

Figura 15. **Reducción**



Fuente: ROSALES, Robert. *Manual de Mantenimiento Industrial*. p. 10.

2.6.6. **Adaptadores**

Son elementos de unión que admiten un enlace de tuberías con distintas roscas.

Figura 16. **Adaptadores**

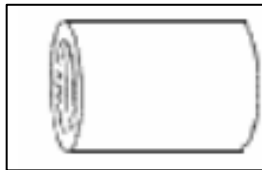


Fuente: Alibaba. *Accesorios de tubería*. <https://spanish.alibaba.com/product-detail/bathroom-names-of-cpvc-pipe-fittings-cpvc-fitting-60707474519.html>. Consulta: 18 de marzo de 2021.

2.6.7. Uniones

Estos son accesorios utilizados como enlaces entre tubos del mismo diámetro, teniendo la unión rosca hembra.

Figura 17. **Unión**



Fuente: ROSALES, Robert. *Manual de mantenimiento Industrial*. p. 12.

2.6.8. Acoples rápidos

Son accesorios utilizados para unir de una manera fácil y veloz elementos neumáticos de la red, son utilizados cuando se debe acoplar y desacoplar diferentes máquinas o accesorios de una red a un mismo punto de conexión.

Los acoples rápidos cuentan con un sistema interno que cierra automáticamente con un dispositivo el paso de aire al desconectar el equipo independiente, así se evita cualquier escape innecesario de aire.

Figura 18. **Acoples rápidos**



Fuente: Pacifiko. *Kit de acoples rápidos*. <https://www.pacifiko.com/>. Consulta: 13 de marzo de 2021.

3. PÉRDIDAS DE PRESIÓN EN TUBERÍAS CON FLUIDO GASEOSO

A medida que un fluido fluye por un conducto, tubería o algún otro dispositivo, ocurren pérdidas de energía debido a la fricción. Tales energías traen como resultado una disminución de la presión entre dos puntos del sistema de flujo, por lo que cuando hablamos de pérdidas de presión de tuberías es necesario conocer las causas de estas pérdidas de presión en tramos de tuberías y las variables de las cuales dependen.

Las pérdidas pueden ser continuas, a lo largo de conductos regulares, o accidentales o localizadas, debido al paso del flujo en accesorios tales como un estrechamiento, un cambio de dirección o la presencia de una válvula.

Las pérdidas de energía en un sistema se contabilizan en términos de energía por unidad de peso del fluido que circula por él. Esto también se conoce como carga.

3.1. Pérdidas continuas o por fricción

Las pérdidas por fricción suceden a medida que un fluido se desplaza por un conducto forzado, ocurren pérdidas de energía debido a la fricción, entre las mismas partículas del fluido y entre el fluido con las paredes de la tubería.

Debido a la viscosidad del fluido, se crea un esfuerzo cortante entre sus capas. Se pierde energía del fluido por la acción de las fuerzas de fricción que hay que vencer, y que son producidas por el esfuerzo cortante.

Las pérdidas por fricción en tuberías vienen representadas por las caídas de presión ocasionadas por la longitud de tubería que puede tener un circuito.

Los términos y las unidades de pérdida por fricción en accesorios se presentan a continuación según la siguiente tabla:

Tabla XI. **Pérdida por fricción en accesorios**

Accesorios	Tamaño nominal de la tubería (Pulg)						
	1/2	3/4	1	1 1/4	1 1/2	2	2 1/2
Codo	1.55	2.06	2.62	3.45	4.02	5.17	6.16
Válvula de compuerta	0.36	0.48	0.61	0.81	0.94	1.21	1.4
Válvula de ángulo	6.65	11.4	14.6	19.1	22.4	28.7	34.3
Válvula de globo	17.3	22.9	29.1	38.3	44.7	57.4	66.5
Tees	0.62	0.82	1.05	1.38	1.61	2.07	2.47
Reducción	0.066	0.132	0.165	0.198	0.231	0.33	0.66
Cuello de cisne	0.627	0.66	0.825	1.07	1.32	1.65	
Filtro separador	0.66	0.99	1.32	1.65	1.96	2.31	3.3

Fuente: CARNICER, Enrique. *Aire comprimido teoría y cálculo de las instalaciones*. p. 300.

3.1.1. Factores que influyen en las pérdidas de carga por fricción

Podemos clasificar algunos factores que influyen directamente en la pérdida de carga producida por la fricción, siendo estas características del fluido:

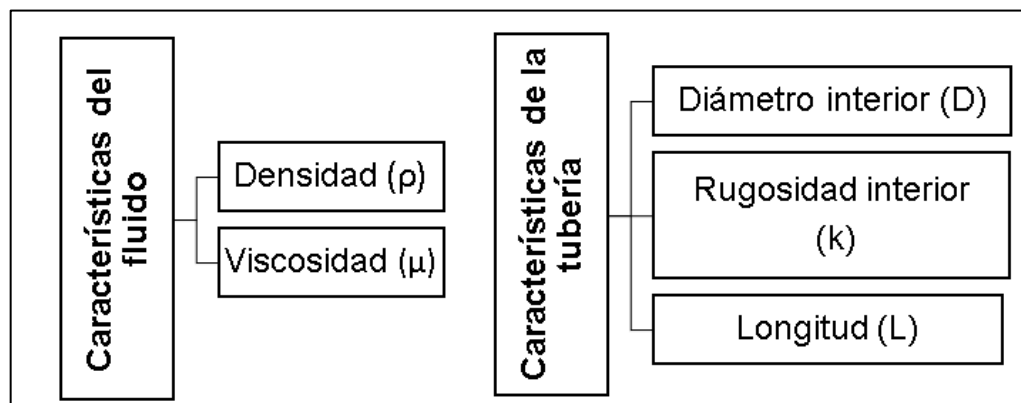
- Densidad, nos ayuda a determinar la cantidad.

- Viscosidad, nos da la cantidad del fluido que pueda quedarse adherida en las paredes de las tuberías.

Y estas son las características de la tubería:

- Diámetro interior, a menor sección de tubería mayor pérdida de carga.
- Rugosidad interior, a mayor rugosidad mayor pérdida de carga en las tuberías, esto depende también del tipo de material de la tubería.
- Longitud, siendo esta una de las variables más importantes debido a que a mayor longitud mayor pérdida de carga.

Figura 19. **Factores que influyen en la pérdida de carga por fricción**



Fuente: elaboración propia.

3.2. Pérdidas localizadas

Las pérdidas de carga localizadas, también llamadas pérdidas secundarias o accidentales, son pérdidas de carga debidas a elementos singulares de la tubería tales como codos, estrechamientos, válvulas, entre otros, causadas por el cambio de movimiento que experimenta el fluido cuando cambia de dirección.

A diferencia de la pérdida continua, no son causadas por la fricción, sino por fenómenos de turbulencia originados en puntos específicos de los sistemas de tuberías.

Las pérdidas localizadas se expresan como una fracción o un múltiplo de la altura de velocidad de la forma:

$$h_v = K \frac{v^2}{2g}$$

Donde:

- h_v = pérdida de carga localizada.
- K = coeficiente determinado en forma empírica para cada accesorio según corresponda.
- v = velocidad media del fluido, antes o después del accesorio a estudiar según corresponda [m/s].

Los factores de pérdida por fricción en accesorios están indicados en la siguiente tabla de acuerdo al diámetro de la tubería.

3.3. Pérdidas por temperatura

Para entender el concepto de pérdidas de energía por temperatura es necesario entender la Ley de Gay Lussac.

- Ley de Gay Lussac

Si el volumen de una masa gaseosa es constante la presión es directamente proporcional a la temperatura.

- Si aumenta la temperatura (T), la presión (P) aumenta
- Si disminuye la temperatura (T), la presión (P) disminuye

$$V \text{ constante} \rightarrow \frac{P}{T}$$

Las moléculas de un gas se encuentran siempre en movimiento, colisionando contra las paredes de la tubería que las contiene, estas colisiones son las causantes de la presión interna. Por lo tanto, si la tubería experimenta un aumento de temperatura, las moléculas aumentarán su velocidad de movimiento y energía cinética derivando en un aumento de presión sobre las paredes de la tubería.

Por el contrario, si la tubería experimenta una disminución de temperatura, la velocidad de movimiento y energía cinética también se verán disminuidas ocasionando un descenso de presión sobre las paredes de la tubería.

3.4. Ecuaciones de pérdidas de presión por fricción

A continuación, se presentan la ecuación de Renouard, la ecuación de Hazen-Williams y la ecuación de Darcy-Weisbach, las cuales describen las pérdidas ocasionadas por fricción en la tubería.

3.4.1. Ecuación de Renouard

Para el cálculo de la pérdida de carga en un trayecto de la instalación se utiliza una ecuación lineal para el rango menor a 50 mbar y una ecuación cuadrática para un rango mayor a 50 mbar.

- Ecuación de Renouard lineal ($P < 0,05$ bar)

$$\Delta P = 232 * d_s * L_e * Q^{1,82} * D^{-4,82}$$

Donde:

ΔP = diferencia de presión [bar]

d_s = densidad relativa corregida

L_e = longitud equivalente del tramo en metros

Q = caudal en m^3/h

D = diámetro interior de la conducción en mm

- Ecuación Renouard cuadrática ($0,05 \text{ bar} < P < 5$ bar)

$$p_A^2 - p_B^2 = 51,5 * d_c * L_e * Q^{1,82} * D^{-4,82}$$

Donde:

P_A = presión absoluta inicial (bar)

P_B = presión absoluta final (bar)

d_s = densidad corregida del gas (sin unidades)

L_e = longitud equivalente del tramo (m)

Q = caudal en (m^3/h)

D = diámetro interior de la conducción en (mm)

Esta ecuación es conveniente para la determinación del diámetro de las tuberías en instalaciones receptoras de gases combustibles que trabajan a baja presión. Esto es conveniente para instalaciones individuales o privadas.

3.4.2. Ecuación de Darcy – Weisbach

Es una de las ecuaciones más utilizadas para el cálculo de pérdida de energía por fricción, a través de la relación de pérdida de presión a lo largo de un determinado tramo de tubería. Esta ecuación permite evaluar factores importantes que pueden perjudicar directamente en la pérdida de energía en una tubería.

Una de las ventajas de esta ecuación es que se puede aplicar a cualquier tipo de flujo hidráulico, estos pueden ser flujos monofásicos totalmente desarrollados, constantes e incompresibles.

La ecuación se define matemáticamente de la siguiente manera:

$$h_f = f * \frac{l}{D} * \frac{v^2}{2g}$$

Donde:

h_f = pérdida de carga debido a la fricción [mca]

f = factor de fricción de Darcy

L = longitud de la tubería [m]

D = diámetro de la tubería [m]

v = velocidad media del flujo [m/s]

g = aceleración de la gravedad [m/s²]

De la anterior expresión todos los parámetros son conocidos salvo el factor de fricción (f). En efecto, la velocidad del aire por la tubería (v) está relacionada con el caudal o flujo de aire (Q), que es un dato conocido proveniente del consumo necesario de cada punto de suministro.

$$Q = v * A$$

Donde:

Q = es el caudal volumétrico o flujo de aire [m³/s]

v = es la velocidad del aire en el interior de la tubería [m/s]

A = es el área de la sección interna de la tubería ($\pi \cdot D^2 / 4$) [m²]

En las instalaciones de aire comprimido la velocidad máxima recomendada para la circulación del aire por las tuberías está entre los 5-10 m/s, por lo que conocido el caudal (Q) necesario para el consumo y tomando una velocidad de circulación en ese intervalo, se obtiene de la expresión anterior el diámetro interior de la tubería (D). Por lo tanto, es el factor de fricción (f) la gran incógnita a calcular.

El factor de fricción (f) es un parámetro adimensional que depende del número de Reynolds (Re) del fluido (en este caso, del aire) y de la rugosidad relativa de la tubería (ϵ_r).

$$f = f(Re, \epsilon_r)$$

Donde el número de Reynolds (Re) viene expresado por la siguiente ecuación:

$$Re = \frac{\rho * v * D}{\mu}$$

Donde:

ρ = la densidad del fluido, en este caso del aire ($\rho_{\text{aire}} = 1,18 \text{ kg/m}^3$ a $25 \text{ }^\circ\text{C}$).

v = es la velocidad del aire en el interior de la tubería (m/s).

D = es el diámetro interior de la tubería (m).

μ = es viscosidad dinámica del fluido, en este caso del aire ($\mu_{\text{aire}} = 1,76 \times 10^{-5} \text{ kg/m}\cdot\text{s}$).

Por otro lado, la rugosidad relativa de la tubería (ϵ_r) viene dada en función de la rugosidad absoluta (K) del material del que está fabricada la tubería y de su diámetro interior (D) de acuerdo a la siguiente expresión:

$$\epsilon_r = \frac{K}{D}$$

En la siguiente tabla se muestran los valores de rugosidad absoluta para distintos materiales:

Tabla XII. **Rugosidad absoluta de materiales**

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

Fuente: elaboración propia.

Por otro lado, en el transporte de fluidos por el interior de tuberías, y el aire es un fluido, existen dos regímenes: laminar y turbulento. Para cada fluido, y para una sección de tubería, a una temperatura determinada, existe una velocidad crítica (v_c) por debajo de la cual el régimen es laminar. Este valor crítico que marca la transición entre los dos regímenes, el laminar y el turbulento, se corresponde con un $Re = 2\ 300$, aunque en la práctica entre $2\ 000$ y $4\ 000$ la situación es bastante imprecisa. Por lo tanto, en función del valor del número de Reynolds (Re) se tiene que:

- $Re < 2\ 000$: régimen laminar
- $2000 < Re < 4\ 000$: zona crítica o de transición
- $Re > 4\ 000$: régimen turbulento

Este concepto es importante conocerlo, porque la expresión para calcular el factor de fricción (f) es distinta según si el régimen es laminar o turbulento. Así se tiene que:

- Régimen laminar

En este caso el factor de fricción (f) depende únicamente del número de Reynolds a través de la ecuación de Poiseuille:

$$f = \frac{64}{Re}$$

Expresión que resulta sencilla de aplicar para calcular el factor de fricción (f) en función del Reynolds (Re).

- Régimen turbulento

Para el régimen turbulento este cálculo ya no es tan inmediato dado que el factor de fricción (f) depende tanto del número de Reynolds como de la rugosidad relativa de la tubería. En este caso existen diversas formulaciones que pueden ser utilizadas para el cálculo del factor de fricción.

Además de estas expresiones existen representaciones gráficas y ábacos empíricos que permiten calcular de una forma conveniente.

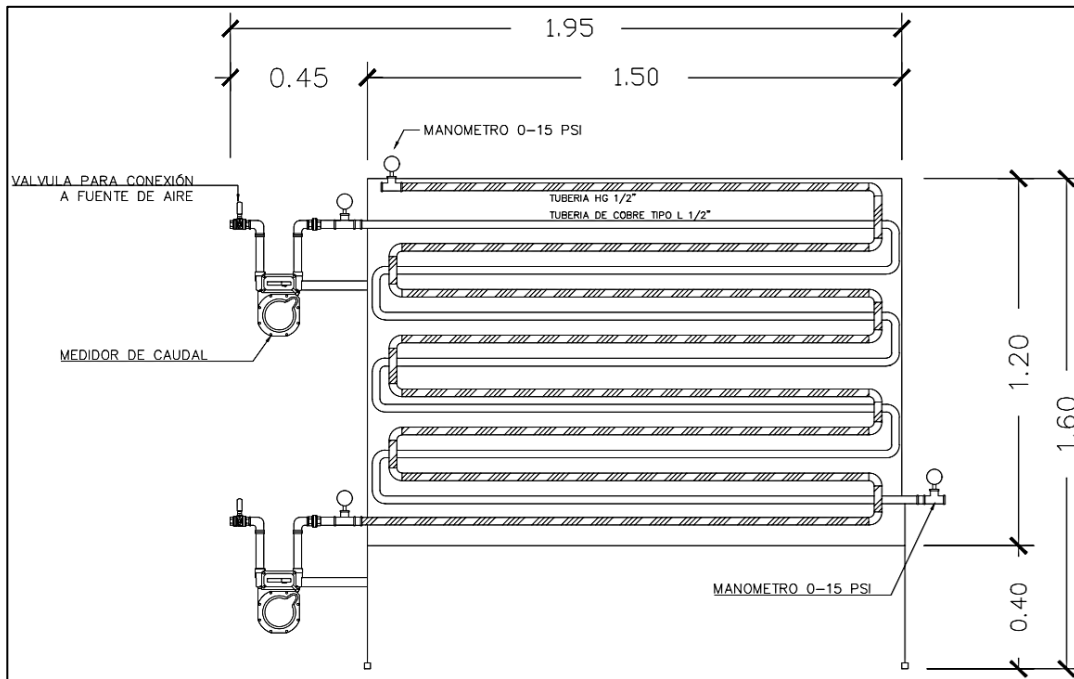
4. ENSAYOS

La metodología utilizada en esta investigación consistió en realizar pruebas experimentales de flujo de aire a través de tuberías de cobre, tuberías de hierro galvanizado y tuberías de PE-AL-PE a diferentes caudales. En las pruebas se recabó datos geométricos de la tubería y propiedades termodinámicas como presión y temperatura del aire que ingresa y circula por las tuberías. Con los datos experimentales se realizó análisis de regresión cuadrática de la caída de presión en función del caudal, corregido a condiciones estándar para verificar si tienen tendencia o relación cuadrática como las ecuaciones de Renouard, Hazen-Williams y Darcy-Weisbach.

4.1. Diseño y fabricación del módulo experimental

En la figura 20 se muestra el esquema de módulo experimental que se implementó para realizar las pruebas de laboratorio. Este corresponde al boceto del modelo utilizado para realizar los ensayos, teniendo el sistema los tres tipos de tubería a evaluar. El modelo fue adaptado para ubicarlo en un espacio asignado en el laboratorio de hidráulica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Figura 20. Diagrama de módulo experimental para realizar ensayos



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2018.

El circuito consta de los siguientes componentes:

- Un compresor de aire, que proporciona este gas a una presión en un rango de 1 a 115 psi. Posee un sistema de control automático de presión para activar y desactivar el motor del compresor de una potencia de 3 HP Marca Silverline.

Figura 21. **Compresor utilizado para realizar ensayos**



Fuente: Laboratorio de Hidráulica, Facultad de Ingeniería USAC.

- Una válvula de paso de tipo esférica de ¼ pulgada de diámetro nominal, para regular el flujo de aire desde el compresor hacia la tubería de cobre, tubería de hierro galvanizado y tubería de Pe-Al-Pe.

Figura 22. **Llave de paso tipo esférica de compresor**



Fuente: Laboratorio de Hidráulica, Facultad de Ingeniería USAC.

- Manguera de alta presión de 10 mm de diámetro externo, que permite transportar al aire del compresor a la tubería de cobre.
- Válvula de paso de ½ de pulgada, que permite regular el flujo y presión de aire que ingresa al medidor volumétrico de flujo y tubería de cobre, tubería de hierro galvanizado y tubería de Pe-Al-Pe (indicada en la figura 22).
- Medidor volumétrico de gas, que permite medir el flujo volumétrico del aire. Para un caudal máximo de 3 m³/h y una presión máxima de 10 kPa. Fabricado en material de aluminio para el cuerpo y acero para las roscas de salida. Los diámetros de las roscas para la instalación de las tuberías de ingreso y salida de aire son de ½ de pulgada.

Figura 23. **Medidor volumétrico de flujo**



Fuente: Laboratorio de Hidráulica, Facultad de Ingeniería USAC.

- Tubo rígido de cobre tipo L, adaptado en dos puntos para la medición de presión, siendo estos en el punto A el punto de entrada y el punto B para el punto de salida. Los puntos para medición de presión están separados por una distancia de 11,70 m, en los tres tipos de tubos empleados para los ensayos (diámetros externos nominales: 13 mm).
- Tubo de hierro galvanizado, adaptado en dos puntos para la medición de presión, siendo estos en el punto A, el punto de entrada y el punto B para el punto de salida (diámetros externos nominales: 12,70 mm).
- Tubería de PE-AL-PE, adaptada en dos puntos para la medición de presión, siendo estos en el punto A, el punto de entrada, y el punto B para el punto de salida, así como para su instalación y desinstalación dentro del módulo (diámetros externos nominales: 12 mm).

Figura 24. **Módulo experimental utilizado en el ensayo, cobre, hierro galvanizado y Pe-Al-Pe**



Fuente: Laboratorio de Hidráulica, Facultad de Ingeniería USAC.

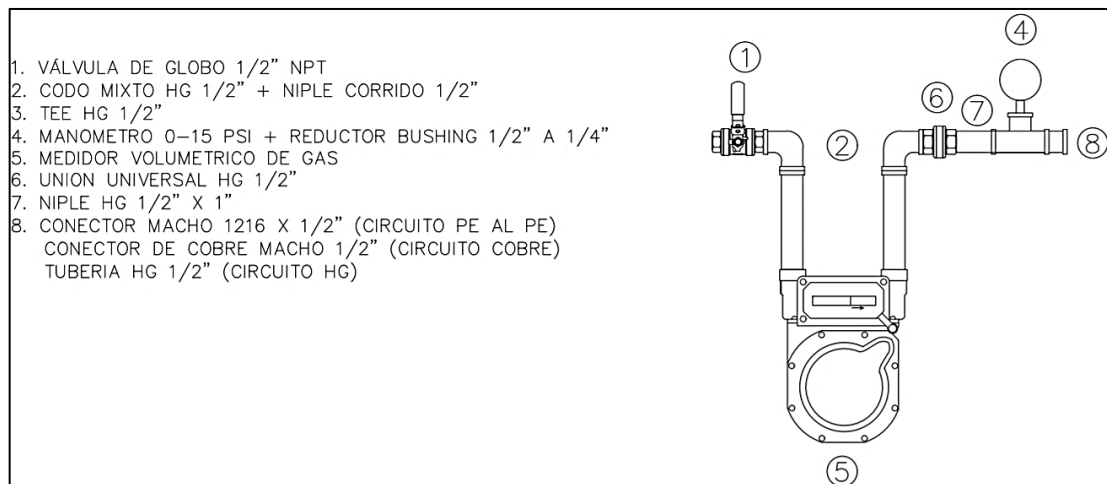
- Manómetros, utilizados para leer las presiones iniciales y finales de cada circuito. Calibrados para realizar mediciones en un rango de 0 a 15 psi.

Figura 25. **Manómetros utilizados en medición de presión**



Fuente: Laboratorio de Hidráulica, Facultad de Ingeniería USAC.

Figura 26. **Detalle de módulo de medición de caudal**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2018.

4.2. Procedimiento experimental para determinar la pérdida de presión

Los ensayos se deben realizar en cada tipo de tubería (tubería de cobre, tubería de hierro galvanizado, tubería de Pe-Al-Pe), los manómetros y el medidor de flujo se utilizan para los tres tipos de tuberías, para lo cual se deben conectar en el respectivo circuito a ensayar. El compresor debe conectarse a la tubería que se va a ensayar. Los pasos para realizar los ensayos son los siguientes:

- Paso 1. Conectar el manómetro de entrada y de salida, el medidor de flujo, el cual monitorea la presión a la entrada del circuito.
- Paso 2. Llenar el depósito del compresor con la cantidad de aire comprimido necesaria, para suministrar el flujo constante al circuito.
- Paso 3. Abrir la válvula de paso para provocar flujo y obtener diferencia de presión en los manómetros 1 y 2.
- Paso 4. Con el termómetro, medir la temperatura del ambiente.
- Paso 5. Medir el volumen de aire que se circula en el medidor de flujo, durante un periodo de 10 segundos para presiones menores a 5 psi en el manómetro 1, y durante un periodo de 5 segundos para presiones mayores de 5 psi en el manómetro 1.
- Paso 6. Anotar la lectura del medidor de flujo de inicio, y la lectura al finalizar el periodo del tiempo asignado.
- Paso 7. Anotar la lectura del manómetro de entrada y del manómetro de salida del circuito, los cuales están en psi.

- Paso 8. Aumentar el flujo para obtener un nuevo caudal y repetir los pasos del 1 al 7, 3 veces para cada valor de presión asignado hasta obtener por lo menos 10 tomas de lectura.
- Paso 9. Continuar con incrementos en la lectura manométrica utilizando los valores de [1, 2, 2,5, 3, 5, 6, 7, 8, 10, 12, 15] psi.
- Paso 10. Cerrar la llave de paso, que alimenta al sistema de tuberías del circuito de entrada antes de apagar el compresor.

4.3. Ensayos en circuito de tubería de cobre

Para obtener los resultados se hizo circular el flujo a diferentes caudales a través del circuito de la tubería de cobre, esto con la finalidad de poder obtener lecturas de presión al inicio y final del circuito, y con ello determinar la pérdida de presión debido a la fricción. Todo esto es realizado bajo condiciones ideales y controladas en el Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

4.3.1. Datos tomados en laboratorio

Para la realización de los ensayos se consideró el procedimiento descrito en la sección 4.2.

Los datos obtenidos se detallan en la siguiente tabla:

Tabla XIII. **Resultados experimentales en circuito de tubería de cobre**

No.	Presión inicial [psi]	Presión final [psi]	Lectura inicial de medidor de flujo [m ³]	Lectura final de medidor de flujo [m ³]	Tiempo [s]
1	1,00	0,90	2434,4980	2434,5010	10,00
	1,00	0,90	2434,9070	2434,9090	10,00
	1,00	0,90	2435,2610	2435,2640	10,00
2	2,00	1,95	2435,8800	2435,8830	10,00
	2,00	1,85	2435,2350	2435,2380	10,00
	2,00	1,90	2435,4510	2435,4540	10,00
3	2,50	2,35	2435,2270	2435,2300	10,00
	2,50	2,30	2435,2860	2435,2900	10,00
	2,50	2,40	2435,3040	2435,3070	10,00
4	3,00	2,90	2434,4510	2434,4550	10,00
	3,00	2,85	2435,2060	2435,2100	10,00
	3,00	2,80	2434,8560	2434,8590	10,00
5	5,00	4,80	2434,4210	2434,4250	10,00
	5,00	4,75	2434,7230	2434,7270	10,00
	5,00	4,85	2434,8335	2434,8370	10,00
6	6,00	5,85	2434,4050	2434,4070	5,00
	6,00	5,75	2434,7050	2434,7070	5,00
	6,00	5,80	2434,8160	2434,8180	5,00
7	8,00	7,75	2434,6820	2434,6840	5,00
	8,00	7,85	2434,7910	2434,7930	5,00
	8,00	7,65	2435,1460	2435,1490	5,00
8	10,00	9,65	2434,7740	2434,7780	5,00
	10,00	9,55	2435,0970	2435,1000	5,00
	10,00	9,60	2435,1270	2435,1290	5,00
9	12,00	11,65	2434,6500	2434,6532	5,00
	12,00	11,55	2434,7600	2434,7631	5,00
	12,00	11,45	2434,9800	2434,9833	5,00
10	15,00	14,45	2434,6290	2434,6325	5,00
	15,00	14,35	2435,0380	2435,0415	5,00
	15,00	14,55	2435,0510	2435,0545	5,00

Fuente: elaboración propia.

Con los datos obtenidos se procede a calcular: caída de presión, caudal y velocidad.

Caída de presión: utilizando las lecturas de presión en los manómetros 1 y 2, de la siguiente forma:

$$\Delta P = P_1 - P_2$$

Donde:

ΔP = caída de presión en psi

P_1 = presión en manómetro 1 en psi

P_2 = presión en manómetro 2 en psi

Donde $P_1 = 1,00$ y $P_2 = 0,90$

Corrida 1

$$\Delta P = 1,00 - 0,90 = 0,10 \text{ psi}$$

Estos resultados se encuentran en la fila No. 1 de la tabla XIV de resultados.

Caudal volumétrico: utilizando las lecturas del medidor de flujo inicial y final del periodo de tiempo correspondiente, de la siguiente forma:

$$Q = \frac{Vol_f - Vol_o}{t}$$

Donde:

Q = caudal calculado en m^3/s

Vol_f = lectura final de medidor de flujo volumétrico en m^3

Vol_o = lectura inicial de medidor de flujo volumétrico en m^3

t = tiempo de observación en segundos

Corrida 1.

$$\text{Vol}_f = 2434,4980$$

$$\text{Vol}_o = 2434,5010$$

$$t = 10$$

$$Q = \frac{2434,501 - 2434,498}{10} = 0,0003 \text{ m}^3/\text{s}$$

Estos resultados se encuentran en la fila No. 1 de la tabla No. XV de resultados.

Área: utilizando el radio de la tubería de cobre, de la siguiente forma:

$$A = \pi r^2$$

Donde:

A = área en m^2

r = radio en m

Corrida 1.

$$r = 0,00635$$

$$A = \pi(0,00635)^2 = 0,000126676 \text{ m}^2$$

Estos resultados se encuentran en la fila No. 1 de la tabla No. XV de resultados.

Velocidad: utilizando el caudal y área, de la siguiente forma:

$$v = \frac{Q}{A}$$

Donde:

v = velocidad en m/s

Q = caudal en m^3/s

A = área en m^2

Corrida 1

$Q = 3,00 \times 10^{-4} m^3/s$

$A = 1,26676 \times 10^{-4} m^2$

$$v = \frac{3,00 \times 10^{-4} m^3/s}{1,26676 \times 10^{-4} m^2} = 2,37 m/s$$

Los datos obtenidos se encuentran en la primera línea de la tabla XV.

Tabla XIV. **Datos calculados con datos obtenidos en laboratorio para tubería de cobre**

No.	Pérdida de presión [psi]	Diferencial de lecturas medidor de flujo [m^3]	Caudal [m^3/s]	Área [m^2]	Velocidad [m/s]
1	0,1	0,003	0,0003	$0,127 \times 10^{-3}$	2,37
	0,1	0,002	0,0002	$0,127 \times 10^{-3}$	1,58
	0,1	0,003	0,0003	$0,127 \times 10^{-3}$	2,37
2	0,05	0,003	0,0003	$0,127 \times 10^{-3}$	2,37
	0,15	0,003	0,0003	$0,127 \times 10^{-3}$	2,37
	0,10	0,003	0,0003	$0,127 \times 10^{-3}$	2,37
3	0,15	0,003	0,0003	$0,127 \times 10^{-3}$	2,37
	0,20	0,004	0,0004	$0,127 \times 10^{-3}$	3,16
	0,10	0,003	0,0003	$0,127 \times 10^{-3}$	2,37
4	0,10	0,004	0,0004	$0,127 \times 10^{-3}$	3,16
	0,15	0,004	0,0004	$0,127 \times 10^{-3}$	3,16
	0,20	0,003	0,0003	$0,127 \times 10^{-3}$	2,37

Continuación de la tabla XIV.

5	0,20	0,004	0,0004	$0,127 \times 10^{-3}$	3,16
	0,25	0,004	0,0004	$0,127 \times 10^{-3}$	3,16
	0,15	0,0035	0,00035	$0,127 \times 10^{-3}$	2,76
6	0,15	0,002	0,0004	$0,127 \times 10^{-3}$	3,16
	0,25	0,002	0,0004	$0,127 \times 10^{-3}$	3,16
	0,20	0,002	0,0004	$0,127 \times 10^{-3}$	3,16
7	0,25	0,002	0,0004	$0,127 \times 10^{-3}$	3,16
	0,15	0,002	0,0004	$0,127 \times 10^{-3}$	3,16
	0,35	0,003	0,0006	$0,127 \times 10^{-3}$	4,74
8	0,35	0,004	0,0008	$0,127 \times 10^{-3}$	6,32
	0,45	0,003	0,0006	$0,127 \times 10^{-3}$	4,74
	0,40	0,002	0,0004	$0,127 \times 10^{-3}$	3,16
9	0,35	0,0032	0,00064	$0,127 \times 10^{-3}$	5,05
	0,45	0,0031	0,00062	$0,127 \times 10^{-3}$	4,89
	0,55	0,0033	0,00066	$0,127 \times 10^{-3}$	5,21
10	0,55	0,0035	0,0007	$0,127 \times 10^{-3}$	5,53
	0,65	0,0035	0,0007	$0,127 \times 10^{-3}$	5,53
	0,45	0,0035	0,0007	$0,127 \times 10^{-3}$	5,53

Fuente: elaboración propia.

4.3.2. Promedio de resultados experimentales para circuito de tubería de cobre

Para cada valor de presión inicial se realizaron tres tomas de datos, para posteriormente hallar el promedio de la presión inicial, presión final, pérdida de presión, volumen de flujo, caudal y velocidad.

A continuación se muestra el procedimiento:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N} = \frac{Q_1 + Q_2 + Q_3}{N}$$

Siendo (X_1, X_2, \dots, X_N) el conjunto de observaciones.

\bar{X} = promedio

N = el número de observaciones

Q = el valor de los datos observados

Corrida 1

N= 3 (valor de datos observados)

Q₁ = 0,003 m³/s

Q₂ = 0,002 m³/s

Q₃ = 0,003 m³/s

$$\bar{X} = \frac{0,003 + 0,002 + 0,003}{3} = 2,67 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$$

Los datos obtenidos se encuentran en la primera línea de la tabla XVI en la columna de caudal promedio.

Tabla XV. **Resultados experimentales en circuito de tubería de cobre**

No.	Presión promedio inicial [psi]	Presión promedio final [psi]	Pérdida de presiones promedio [psi]	Volumen promedio [m ³]	Caudal promedio [m ³ /s]	Velocidad [m/s]
1	1,00	0,90	0,10	0,0027	0,267x10 ⁻³	2,11
2	2,00	1,90	0,10	0,0030	0,300x10 ⁻³	2,37
3	2,50	2,35	0,15	0,0023	0,333x10 ⁻³	2,63
4	3,00	2,85	0,15	0,0037	0,367x10 ⁻³	2,89
5	5,00	4,80	0,20	0,0038	0,383x10 ⁻³	3,03
6	6,00	5,80	0,20	0,0020	0,400x10 ⁻³	3,16
7	8,00	7,75	0,25	0,0013	0,467x10 ⁻³	3,68
8	10,00	9,60	0,40	0,0030	0,600x10 ⁻³	4,74
9	12,00	11,55	0,45	0,0032	0,640x10 ⁻³	5,05
10	15,00	14,45	0,55	0,0035	0,700x10 ⁻³	5,53

Fuente: elaboración propia.

4.4. Ensayos en circuito de tubería de hierro galvanizado

Para obtener los resultados se hizo circular el flujo a diferentes caudales a través del circuito de la tubería de hierro galvanizado, esto con la finalidad de obtener lecturas de presión al inicio y final del circuito, y con ello determinar la pérdida de presión debido a la fricción. Todo esto es realizado bajo condiciones ideales y controladas en el Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

4.4.1. Datos tomados en laboratorio al circuito de tubería de hierro galvanizado

Para la realización de los ensayos, se consideró el procedimiento descrito en la sección 4.2.

Los datos obtenidos se detallan en la siguiente tabla:

Tabla XVI. **Resultados experimentales en circuito de tubería de hierro galvanizado**

No.	Presión inicial [psi]	Presión final [psi]	Lectura inicial en medidor de flujo [m ³]	Lectura final en medidor de flujo [m ³]	Tiempo [s]
1	1,00	0,95	2436,4980	2436,5020	10
	1,00	0,90	2436,9070	2436,9100	10
	1,00	0,85	2436,2610	2436,2640	10
2	2,00	1,75	2436,8800	2436,8840	10
	2,00	1,85	2436,2350	2436,2390	10
	2,00	1,80	2436,4510	2436,4550	10
3	2,50	2,25	2436,2270	2436,2310	10
	2,50	2,30	2435,2860	2435,2900	10
	2,50	2,20	2435,3040	2435,3100	10

Continuación de la tabla XVI.

4	3,00	2,65	2436,4510	2436,4570	10
	3,00	2,65	2435,2060	2435,2110	10
	3,00	2,80	2435,8560	2435,8610	10
5	5,00	4,65	2435,4210	2435,4260	10
	5,00	4,70	2435,7230	2435,7290	10
	5,00	4,60	2435,8340	2435,8400	10
6	6,00	5,60	2436,4050	2436,4080	5
	6,00	5,65	2436,7050	2436,7080	5
	6,00	5,55	2436,8160	2436,8190	5
7	8,00	7,55	2435,6820	2435,6860	5
	8,00	7,60	2435,6910	2435,6940	5
	8,00	7,50	2435,1460	2435,1490	5
8	10,00	9,45	2435,6740	2435,7780	5
	10,00	9,50	2436,0970	2436,1000	5
	10,00	9,40	2436,1270	2436,1310	5
9	12,00	11,40	2436,6500	2436,6540	5
	12,00	11,30	2436,7600	2436,7640	5
	12,00	11,50	2436,7800	2436,7840	5
10	15,00	14,40	2436,3290	2436,3330	5
	15,00	14,35	2436,0380	2436,0430	5
	15,00	14,30	2436,0410	2436,0450	5

Fuente: elaboración propia.

Con los datos obtenidos se procede a calcular: caída de presión, caudal y velocidad, de la misma forma que en 4.3.1.

Tabla XVII. Resultados de datos calculados en circuito de tubería de hierro galvanizado

No.	Pérdida de presión [psi]	Volumen [m ³]	Caudal [m ³ /s]	Área [m ²]	Velocidad [m/s]
1	0,05	0,004	0,0004	0,127x10 ⁻³	3,16
	0,10	0,003	0,0003	0,127x10 ⁻³	2,37
	0,15	0,003	0,0003	0,127x10 ⁻³	2,37
2	0,25	0,004	0,0004	0,127x10 ⁻³	3,16
	0,15	0,004	0,0004	0,127x10 ⁻³	3,16
	0,20	0,004	0,0004	0,127x10 ⁻³	3,16

Continuación de la tabla XVII.

3	0,25	0,004	0,0004	$0,127 \times 10^{-3}$	3,16
	0,20	0,004	0,0004	$0,127 \times 10^{-3}$	3,16
	0,30	0,006	0,0006	$0,127 \times 10^{-3}$	4,74
4	0,35	0,006	0,0006	$0,127 \times 10^{-3}$	4,74
	0,35	0,005	0,0005	$0,127 \times 10^{-3}$	3,95
	0,20	0,005	0,0005	$0,127 \times 10^{-3}$	3,95
5	0,35	0,005	0,0005	$0,127 \times 10^{-3}$	3,95
	0,30	0,006	0,0006	$0,127 \times 10^{-3}$	4,74
	0,40	0,006	0,0006	$0,127 \times 10^{-3}$	4,74
6	0,40	0,003	0,0006	$0,127 \times 10^{-3}$	4,74
	0,35	0,003	0,0006	$0,127 \times 10^{-3}$	4,74
	0,45	0,003	0,0006	$0,127 \times 10^{-3}$	4,74
7	0,45	0,004	0,0008	$0,127 \times 10^{-3}$	6,32
	0,40	0,003	0,0006	$0,127 \times 10^{-3}$	4,74
	0,50	0,003	0,0006	$0,127 \times 10^{-3}$	4,74
8	0,55	0,104	0,0008	$0,127 \times 10^{-3}$	6,32
	0,50	0,003	0,0006	$0,127 \times 10^{-3}$	4,74
	0,60	0,004	0,0008	$0,127 \times 10^{-3}$	6,32
9	0,60	0,004	0,0008	$0,127 \times 10^{-3}$	6,32
	0,70	0,004	0,0008	$0,127 \times 10^{-3}$	6,32
	0,50	0,004	0,0008	$0,127 \times 10^{-3}$	6,32
10	0,60	0,004	0,0008	$0,127 \times 10^{-3}$	6,32
	0,75	0,005	0,0010	$0,127 \times 10^{-3}$	7,89
	0,70	0,004	0,0008	$0,127 \times 10^{-3}$	6,32

Fuente: elaboración propia.

4.4.2. Promedio de resultados experimentales para circuito de tubería de hierro galvanizado

Se procedió de la misma forma que en la sección 4.3.2, obteniendo los siguientes datos:

Tabla XVIII. **Resultados promedio experimentales en tubería de hierro galvanizado**

No.	Presión promedio inicial [psi]	Presión promedio final [psi]	pérdida de presiones promedio [psi]	Volumen promedio [m ³]	caudal promedio [m ³ /s]	velocidad [m/s]
1	1,00	0,90	0,10	0,0033	0,333x10 ⁻³	2,63
2	2,00	1,80	0,20	0,0040	0,400x10 ⁻³	3,16
3	2,50	2,50	0,25	0,0027	0,467x10 ⁻³	3,68
4	3,00	2,70	0,30	0,0053	0,533x10 ⁻³	4,21
5	5,00	4,65	0,35	0,0057	0,567x10 ⁻³	4,47
6	6,00	5,60	0,40	0,0030	0,600x10 ⁻³	4,74
7	8,00	7,55	0,45	0,0023	0,667x10 ⁻³	5,26
8	10,00	9,45	0,55	0,0037	0,733x10 ⁻³	5,79
9	12,00	11,40	0,60	0,0040	0,800x10 ⁻³	6,32
10	15,00	14,35	0,65	0,0043	0,867x10 ⁻³	6,84

Fuente: elaboración propia.

4.5. Resultados de ensayos para circuito de tubería Pe-Al-Pe

Para obtener los resultados se hizo circular el flujo a diferentes caudales a través del circuito de la tubería de Pe-Al-Pe, esto con la finalidad de obtener lecturas de presión al inicio y final del circuito, y con ello determinar la pérdida de presión debido a la fricción. Todo esto es realizado bajo condiciones ideales y controladas en el Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

4.5.1. Resultados de ensayos para circuito de tubería de Pe-Al-Pe

Para la realización de los ensayos, se consideró el proceso detallado en la sección 4.2.

Tabla XIX. **Resultados experimentales en circuito de tubería de Pe-Al-Pe**

No.	Presión inicial [psi]	Presión final [psi]	Lectura inicial en medidor de flujo [m ³]	Lectura final en medidor de flujo [m ³]	Tiempo [s]
1	1,00	0,90	2438,3980	2438,4000	10
	1,00	0,85	2438,6070	2438,6090	10
	1,00	0,80	2438,3610	2438,3640	10
2	2,00	1,80	2438,7800	2438,7820	10
	2,00	1,75	2438,1350	2438,1380	10
	2,00	1,85	2438,4510	2438,4540	10
3	2,50	2,30	2438,2270	2438,2290	10
	2,50	2,25	2438,2860	2438,2900	10
	2,50	2,20	2438,3040	2438,3070	10
4	3,00	2,80	2438,4510	2438,4540	10
	3,00	2,70	2438,2060	2438,2100	10
	3,00	2,60	2438,8560	2438,8590	10
5	5,00	4,65	2439,4210	2439,4240	10
	5,00	4,70	2438,7230	2438,7270	10
	5,00	4,60	2438,8340	2438,8380	10
6	6,00	5,55	2438,4050	2438,4070	5
	6,00	5,60	2438,6050	2438,6070	5
	6,00	5,65	2438,8160	2438,8180	5
7	8,00	7,55	2439,6820	2439,6840	5
	8,00	7,50	2439,7910	2439,7931	5
	8,00	7,60	2439,1460	2439,1482	5
8	10,00	9,55	2439,7740	2439,7760	5
	10,00	9,45	2439,0970	2439,0995	5
	10,00	9,50	2439,1270	2439,1290	5
9	12,00	11,45	2439,6500	2439,6524	5
	12,00	11,40	2439,7600	2439,7622	5
	12,00	11,50	2438,9800	2438,9821	5
10	15,00	14,30	2438,6290	2438,6314	5
	15,00	14,40	2439,0180	2439,0200	5
	15,00	14,50	2439,0410	2439,0435	5

Fuente: elaboración propia.

Con los datos obtenidos se procede a calcular: caída de presión, caudal y velocidad, de la misma forma que en 4.3.1.

Tabla XX. Resultados calculados en tubería de Pe-Al-Pe

No.	Pérdida de presión [psi]	Volumen [m ³]	Caudal [m ³ /s]	Área [m ²]	velocidad [m/s]
1	0,10	0,0020	0,200x10 ⁻³	0,127x10 ⁻³	1,58
	0,15	0,0020	0,200x10 ⁻³	0,127x10 ⁻³	1,58
	0,20	0,0030	0,300x10 ⁻³	0,127x10 ⁻³	2,37
2	0,20	0,0020	0,200x10 ⁻³	0,127x10 ⁻³	1,58
	0,25	0,0030	0,300x10 ⁻³	0,127x10 ⁻³	2,37
	0,15	0,0030	0,300x10 ⁻³	0,127x10 ⁻³	2,37
3	0,20	0,0020	0,200x10 ⁻³	0,127x10 ⁻³	1,58
	0,25	0,0040	0,400x10 ⁻³	0,127x10 ⁻³	3,16
	0,30	0,0030	0,300x10 ⁻³	0,127x10 ⁻³	2,37
4	0,20	0,0030	0,300x10 ⁻³	0,127x10 ⁻³	2,37
	0,30	0,0040	0,400x10 ⁻³	0,127x10 ⁻³	3,16
	0,40	0,0030	0,300x10 ⁻³	0,127x10 ⁻³	2,37
5	0,35	0,0030	0,300x10 ⁻³	0,127x10 ⁻³	2,37
	0,30	0,0040	0,400x10 ⁻³	0,127x10 ⁻³	3,16
	0,40	0,0040	0,400x10 ⁻³	0,127x10 ⁻³	3,16
6	0,45	0,0020	0,400x10 ⁻³	0,127x10 ⁻³	3,16
	0,40	0,0020	0,400x10 ⁻³	0,127x10 ⁻³	3,16
	0,35	0,0020	0,400x10 ⁻³	0,127x10 ⁻³	3,16
7	0,45	0,0020	0,400x10 ⁻³	0,127x10 ⁻³	3,16
	0,50	0,0021	0,420x10 ⁻³	0,127x10 ⁻³	3,32
	0,40	0,0022	0,440x10 ⁻³	0,127x10 ⁻³	3,47
8	0,45	0,0020	0,400x10 ⁻³	0,127x10 ⁻³	3,16
	0,55	0,0025	0,500x10 ⁻³	0,127x10 ⁻³	3,95
	0,50	0,0020	0,400x10 ⁻³	0,127x10 ⁻³	3,16
9	0,55	0,0024	0,480x10 ⁻³	0,127x10 ⁻³	3,79
	0,60	0,0022	0,440x10 ⁻³	0,127x10 ⁻³	3,47
	0,50	0,0021	0,420x10 ⁻³	0,127x10 ⁻³	3,32
10	0,70	0,0024	0,480x10 ⁻³	0,127x10 ⁻³	3,79
	0,60	0,0020	0,400x10 ⁻³	0,127x10 ⁻³	3,16
	0,50	0,0025	0,500x10 ⁻³	0,127x10 ⁻³	3,95

Fuente: elaboración propia.

4.5.2. Promedio de resultados experimentales para circuito de tubería de Pe-Al-Pe

Se procedió de la misma forma que en la sección 4.3.2, obteniendo los siguientes datos:

Tabla XXI. **Resultados experimentales promedio en circuito de tubería de Pe-Al-Pe**

No.	Presión promedio inicial [psi]	Presión promedio final [psi]	Pérdida de presiones promedio [psi]	Volumen promedio [m ³]	Caudal promedio [m ³ /s]	velocidad m/s
1	1,00	0,85	0,15	0,0023	0,233x10 ⁻³	1,84
2	2,00	1,80	0,20	0,0027	0,267x10 ⁻³	2,11
3	2,50	2,25	0,25	0,0020	0,300x10 ⁻³	2,37
4	3,00	2,70	0,30	0,0033	0,333x10 ⁻³	2,63
5	5,00	4,65	0,35	0,0037	0,367x10 ⁻³	2,89
6	6,00	5,60	0,40	0,0020	0,400x10 ⁻³	3,16
7	8,00	7,55	0,45	0,0014	0,420x10 ⁻³	3,32
8	10,00	9,50	0,50	0,0022	0,433x10 ⁻³	3,42
9	12,00	11,45	0,55	0,0022	0,447x10 ⁻³	3,53
10	15,00	14,40	0,60	0,0023	0,460x10 ⁻³	3,63

Fuente: elaboración propia.

4.6. **Cálculo teórico de pérdidas de presión con la ecuación de Renouard**

La ecuación de Renouard se utilizó para evaluar la pérdida de presión en cada circuito de tubería de forma teórica, de manera que se puedan tener los datos para el análisis teórico experimental comparativo.

4.6.1. **Cálculo teórico de pérdidas de presión con la ecuación de Renouard para el circuito de cobre**

Los cálculos se realizaron con información obtenida en los ensayos de laboratorio detallados en las tablas del inciso 4.3.1 e inciso 4.3.2.

Ecuación de Renouard lineal:

$$H = 232 * s * l * \frac{Q^{1,82}}{D^{4,82}}$$

Donde:

H = pérdida de carga en (bar)

S = densidad del fluido a utilizar (adimensional)

L = longitud de tubería en (m)

Q = caudal en (m³/h)

D = diámetro interno en (mm)

Donde:

S= 1,18

L = 11,60 m

Q = 1,20 m³/h

D = 15,80 mm

Corrida 1

$$H = 232 * 1,18 * 11,60 * \frac{1,20^{1,82}}{15,80^{4,82}} = 0,0074 \text{ bar}$$

Los datos obtenidos se encuentran en la primera línea de la tabla No. IV en la columna de pérdida teórica [bar].

Tabla XXII. **Pérdidas de presión con la ecuación de Renouard para el circuito de cobre**

No	S	L [m]	Q [m ³ /h]	D [mm]	Pérdida teórica [bar]	Pérdida teórica [psi]
1	1,18	11,60	1,20	15,80	0,0074	0,1071
2	1,18	11,60	1,44	15,80	0,0103	0,1493
3	1,18	11,60	1,68	15,80	0,0136	0,1976
4	1,18	11,60	1,92	15,80	0,0174	0,2520
5	1,18	11,60	2,04	15,80	0,0194	0,2814
6	1,18	11,60	2,16	15,80	0,0215	0,3122
7	1,18	11,60	2,40	15,80	0,0261	0,3782
8	1,18	11,60	2,64	15,80	0,0310	0,4499
9	1,18	11,60	2,88	15,80	0,0363	0,5271
10	1,18	11,60	3,12	15,80	0,0420	0,6097

Fuente: elaboración propia.

4.6.2. **Cálculo teórico de pérdidas de presión con la ecuación de Renouard para el circuito de hierro galvanizado**

Los cálculos se realizaron con información obtenida en los ensayos de laboratorio detallados en las tablas del inciso 4.3.1 e inciso 4.3.2, utilizando la ecuación detallada del inciso 4.6

Tabla XXIII. **Pérdidas de presión con la ecuación de Renouard para el circuito de hierro galvanizado**

No.	S	L [m]	Q [m ³ /h]	D [mm]	Pérdida teórica [bar]	Pérdida teórica [psi]
1	1,18	11,60	1,20	15,80	0,0074	0,1071
2	1,18	11,60	1,44	15,80	0,0103	0,1493
3	1,18	11,60	1,68	15,80	0,0136	0,1976
4	1,18	11,60	1,92	15,80	0,0174	0,2520
5	1,18	11,60	2,04	15,80	0,0194	0,2814
6	1,18	11,60	2,16	15,80	0,0215	0,3122
7	1,18	11,60	2,40	15,80	0,0261	0,3782

Continuación de la tabla XXIII.

8	1,18	11,60	2,64	15,80	0,0310	0,4499
9	1,18	11,60	2,88	15,80	0,0363	0,5271
10	1,18	11,60	3,12	15,80	0,0420	0,6097

Fuente: elaboración propia.

4.6.3. Cálculo teórico de pérdidas de presión con la ecuación de Renouard para el circuito de Pe-Al-Pe

Los cálculos se realizaron con información obtenida en los ensayos de laboratorio detallados en las tablas del inciso 4.3.1 e inciso 4.3.2, utilizando la ecuación detallada en el inciso 4.6

Tabla XXIV. Pérdidas de presión con la ecuación de Renouard para el circuito de Pe-Al-Pe

No.	S	L [m]	Q [m ³ /h]	D [mm]	Pérdida teórica [bar]	Pérdida teórica [psi]
1	1,18	11,60	0,84	12	0,0145	0,2108
2	1,18	11,60	0,96	12	0,0185	0,2688
3	1,18	11,60	1,08	12	0,0230	0,3330
4	1,18	11,60	1,20	12	0,0278	0,4034
5	1,18	11,60	1,32	12	0,0331	0,4798
6	1,18	11,60	1,44	12	0,0388	0,5622
7	1,18	11,60	1,51	12	0,0424	0,6144
8	1,18	11,60	1,56	12	0,0448	0,6503
9	1,18	11,60	1,61	12	0,0474	0,6872
10	1,18	11,60	1,66	12	0,0500	0,7250

Fuente: elaboración propia

4.7. Cálculo teórico de pérdida de presión con la ecuación de Darcy-Weisbach

El cálculo realizado empleando la ecuación de Darcy-Weisbach se presenta a continuación:

$$h_f = f * \frac{L}{D} * \frac{v^2}{2g}$$

Donde:

h_f = pérdida de carga debida a la fricción (mca)

f = factor de fricción (adimensional)

g = gravedad (m²/s)

V = velocidad (m/s)

D = diámetro de tubería (m)

L = longitud equivalente del tramo (m)

En donde f es:

$$f = \frac{64}{N_R}$$

Por lo que se debe determinar si el flujo es laminar o turbulento usando la ecuación de Reynolds:

$$N_R = \frac{vD\rho}{\mu}$$

Donde:

N_R = número de Reynolds

μ = viscosidad dinámica (Pa·s)

ρ = densidad (kg/m³)

v = velocidad (m/s)

D = diámetro (m)

Corrida 1:

Para obtener los datos de velocidad y el coeficiente f , se tienen los siguientes datos:

$$Q = 0,00027$$

$$A = 0,12667$$

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{0,00027}{0,12667} = 2,11 \text{ m/s}$$

Para obtener coeficiente f , se debe calcular el número de Reynolds:

$$\mu = 0,0000174 \text{ (Pa·s)}$$

$$\rho = 1,205 \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

$$v = 2,11 \text{ (m/s)}$$

$$D = 0,013 \text{ (m)}$$

$$N_R = \frac{2,11 * 0,013 * 1,205}{0,0000174} = 1895,18$$

Donde:

$$f = \frac{64}{1895,18} = 0,034$$

A continuación, se calcula la pérdida con la ecuación de Darcy-Weisbach:

$$h_f = 6,81 \text{ (mca)}$$

$$f = 0,034 \text{ (adimensional)}$$

$$V = 2,11 \text{ (m/s)}$$

$$D = 0,013 \text{ (m)}$$

$$L = 11,60 \text{ (m)}$$

$$g = 9,8 \text{ (m}^2\text{/s)}$$

$$h_f = 0,034 * \frac{11,60}{0,013} * \frac{2,11^2}{2(9,8)} = 6,81 \text{ mca}$$

Los datos obtenidos se encuentran en la primera línea de la tabla No. XXIX en la columna de pérdida teórica [mca].

4.7.1. Cálculo teórico de pérdida de presión con la ecuación de Darcy-Weisbach en circuito de cobre

Los cálculos se realizaron con información obtenida en los ensayos de laboratorio detallados en las tablas del inciso 4.3.1 e inciso 4.3.2 y utilizando la ecuación detallada en el inciso 4.8.

Tabla XXV. **Pérdida de presión con la ecuación de Darcy-Weisbach en circuito de cobre**

No	Reynolds Re	Coef. F	L [m]	D [m]	V [m/s]	g [m ² /s]	pérdida teórica [mca]	Pérdida teórica [psi]
1	1895,18	0,034	11,6	0,013	2,11	9,8	6,81	9,69
2	2132,08	0,030	11,6	0,013	2,37	9,8	7,66	10,90
3	2368,98	0,027	11,6	0,013	2,63	9,8	8,52	12,11
4	2605,88	0,025	11,6	0,013	2,89	9,8	9,37	13,32
5	2724,33	0,023	11,6	0,013	3,03	9,8	9,79	13,93
6	2842,78	0,023	11,6	0,013	3,16	9,8	10,22	14,53
7	3316,57	0,019	11,6	0,013	3,68	9,8	11,92	16,95
8	4264,17	0,040	11,6	0,013	4,74	9,8	40,74	57,93
9	4548,44	0,039	11,6	0,013	5,05	9,8	45,44	64,61
10	4974,86	0,038	11,6	0,013	5,53	9,8	52,90	75,22

Fuente: elaboración propia.

4.7.2. **Cálculo teórico de pérdida de presión con la ecuación Darcy-Weisbach en circuito de hierro galvanizado**

Los cálculos se realizaron con información obtenida en los ensayos de laboratorio detallados en las tablas del inciso 4.4.1 e inciso 4.4.2 y utilizando la ecuación detallada en el inciso 4.8.

Tabla XXVI. **Pérdida de presión con la ecuación Darcy-Weisbach en circuito de hierro galvanizado**

No.	Reynolds Re	Coef. F	L [m]	D [m]	v [m/s]	g [m ² /s]	pérdida teórica [mca]	pérdida teórica [psi]
1	2368,98	0,027	11,6	0,0158	2,63	9,8	7,01	9,96
2	2842,78	0,023	11,6	0,0158	3,16	9,8	8,41	11,96
3	3316,57	0,019	11,6	0,0158	3,68	9,8	9,81	13,95
4	3790,37	0,017	11,6	0,0158	4,21	9,8	11,21	15,94
5	4027,27	0,055	11,6	0,0158	4,47	9,8	41,22	58,61
6	4264,17	0,054	11,6	0,0158	4,74	9,8	45,79	65,11

Continuación de la tabla XXVI.

7	4737,96	0,054	11,6	0,0158	5,26	9,8	55,63	79,10
8	5211,76	0,053	11,6	0,0158	5,79	9,8	66,39	94,41
9	5685,55	0,052	11,6	0,0158	6,32	9,8	78,09	111,04
10	6159,35	0,052	11,6	0,0158	6,84	9,8	90,71	128,99

Fuente: elaboración propia.

4.7.3. Cálculo teórico de pérdida de presión con la ecuación Darcy-Weisbach en circuito de Pe-Al-Pe

Los cálculos se realizaron con información obtenida en los ensayos de laboratorio detallados en las tablas del inciso 4.5.1 e inciso 4.5.2 y utilizando la ecuación detallada en el inciso 4.8.

Tabla XXVII. Pérdida de presión con la ecuación Darcy-Weisbach en circuito de Pe-Al-Pe

No	Reynolds Re	Coef. F	L [m]	D [m]	v [m/s]	g [m ² /s]	pérdida teórica (mca)	Pérdida teórica (psi)
1	1658,29	0,039	11,60	0,012	1,84	9,8	6,46	9,18
2	1895,18	0,034	11,60	0,012	2,11	9,8	7,38	10,50
3	2132,08	0,030	11,60	0,012	2,37	9,8	8,30	11,81
4	2368,98	0,027	11,60	0,012	2,63	9,8	9,23	13,12
5	2605,88	0,025	11,60	0,012	2,89	9,8	10,15	14,43
6	2842,78	0,023	11,60	0,012	3,16	9,8	11,07	15,74
7	2984,92	0,021	11,60	0,012	3,32	9,8	11,62	16,53
8	3079,68	0,021	11,60	0,012	3,42	9,8	11,99	17,05
9	3174,43	0,020	11,60	0,012	3,53	9,8	12,36	17,58
10	3269,19	0,020	11,60	0,012	3,63	9,8	12,73	18,10

Fuente: elaboración propia

4.8. Comparación de resultados teóricos versus experimentales en circuito de tubería de cobre

Por medio de esta comparación se podrá observar la variación entre los datos experimentales y los obtenidos teóricamente, reflejados como porcentaje de error.

4.8.1. Comparación de resultados teóricos versus experimentales empleando ecuación de Renouard

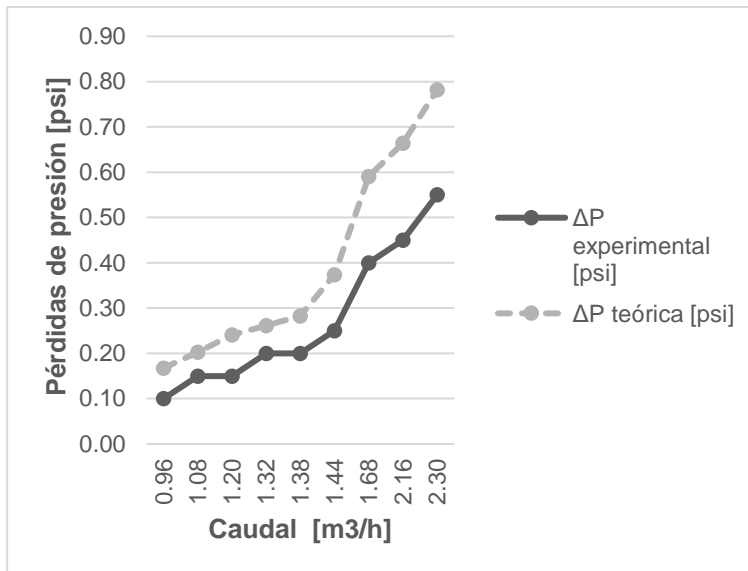
A continuación, se presenta la comparación de resultados teóricos versus experimentales, con su respectiva gráfica.

Tabla XXVIII. Resultados teóricos versus experimentales empleando ecuación de Renouard

No.	Q [m ³ /h]	Presión inicial [psi]	Presión final [psi]	ΔP experimental [psi]	ΔP teórica [psi]	% error teórico
1	0,96	1,00	0,90	0,10	0,1350	34,99
2	1,08	2,00	1,90	0,10	0,1673	67,27
3	1,20	2,50	2,35	0,15	0,2026	35,08
4	1,32	3,00	2,85	0,15	0,2410	60,67
5	1,38	5,00	4,80	0,20	0,2613	30,66
6	1,44	6,00	5,80	0,20	0,2824	41,18
7	1,68	8,00	7,75	0,25	0,3738	49,52
8	2,16	10,00	9,60	0,40	0,5906	47,65
9	2,30	12,00	11,55	0,45	0,6642	47,60
10	2,52	15,00	14,45	0,55	0,7819	42,16

Fuente: elaboración propia.

Figura 27. **Comparación de resultados teóricos versus experimentales empleando ecuación de Renouard**



Fuente: elaboración propia.

4.8.2. **Comparación de resultados teóricos versus experimentales empleando la ecuación de Darcy-Weisbach**

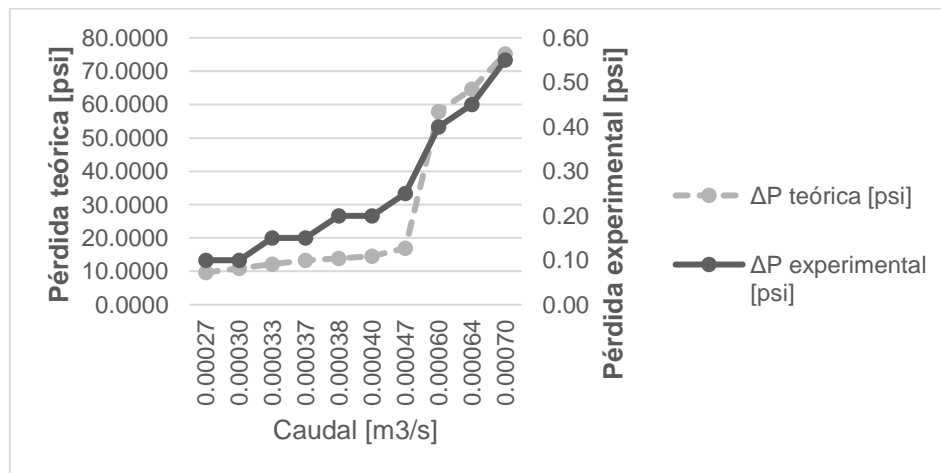
A continuación se presenta la comparación de resultados teóricos versus experimentales, con su respectiva gráfica.

Tabla XXIX. **Resultados teóricos versus experimentales empleando la ecuación de Darcy-Weisbach**

No.	Q [m ³ /s]	Presión inicial [psi]	Presión final [psi]	ΔP experimental [psi]	ΔP teórica [psi]	% error teórico
1	0,00027	1,00	0,90	0,10	9,6878	9587,85
2	0,00030	2,00	1,90	0,10	10,8988	1079,83
3	0,00033	2,50	2,35	0,15	12,1098	7973,21
4	0,00037	3,00	2,85	0,15	13,3208	8780,53
5	0,00038	5,00	4,80	0,20	13,9263	6863,14
6	0,00040	6,00	5,80	0,20	14,5318	7165,89
7	0,00047	8,00	7,75	0,25	16,9537	6681,49
8	0,00060	10,00	9,60	0,40	57,9261	14381,53
9	0,00064	12,00	11,55	0,45	64,6119	14258,21
10	0,00070	15,00	14,45	0,55	75,2194	13576,25

Fuente: elaboración propia.

Figura 28. **Comparación de resultados teóricos versus experimentales empleando la ecuación de Darcy-Weisbach**



Fuente: elaboración propia.

4.8.3. Resumen de resultados teóricos versus experimentales en circuito de tubería de cobre

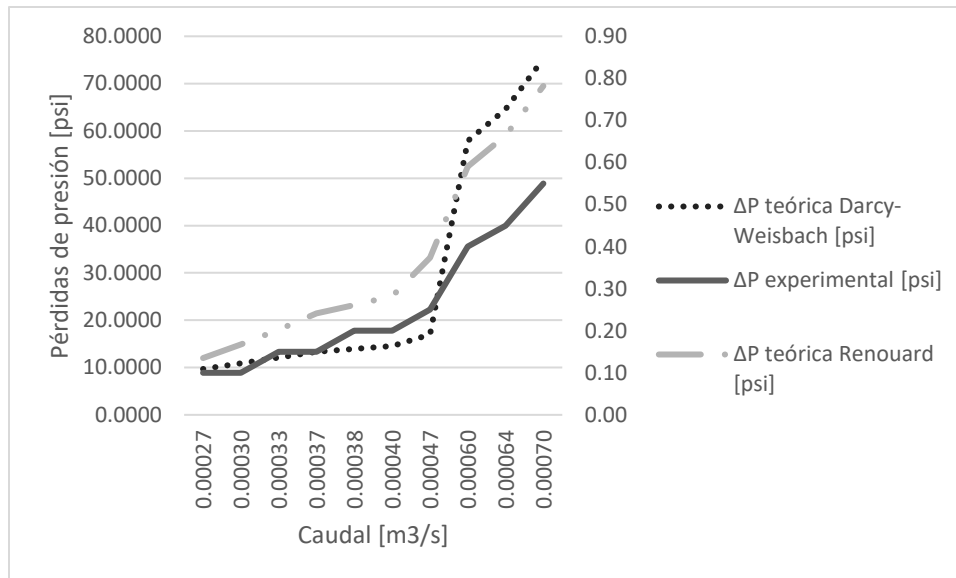
A continuación se presenta la comparación de resultados experimentales versus teóricos, empleando las ecuaciones de Renouard y Darcy Weisbach, con su respectiva gráfica.

Tabla XXX. Resultados teóricos versus experimentales en circuito de tubería de cobre

No.	Q [m ³ /s]	ΔP experimental [psi]	ΔP teórica Renouard [psi]	ΔP teórica Darcy-Weisbach [psi]
1	0,00027	0,10	0,1350	9,6878
2	0,00030	0,10	0,1673	10,8988
3	0,00033	0,15	0,2026	12,1098
4	0,00037	0,15	0,2410	13,3208
5	0,00038	0,20	0,2613	13,9263
6	0,00040	0,20	0,2824	14,5318
7	0,00047	0,25	0,3738	16,9537
8	0,00060	0,40	0,5906	57,9261
9	0,00064	0,45	0,6642	64,6119
10	0,00070	0,55	0,7819	75,2194

Fuente: elaboración propia

Figura 29. **Comparación de resultados teóricos versus experimentales en circuito de tubería de cobre**



Fuente: elaboración propia.

4.9. Comparación de resultados teóricos versus experimentales en circuito de tubería de hierro galvanizado

Por medio de esta comparación se podrá observar la variación entre los datos experimentales y los obtenidos teóricamente, reflejados como porcentaje de error.

4.9.1. Comparación de resultados teóricos versus experimentales empleando la ecuación Renouard

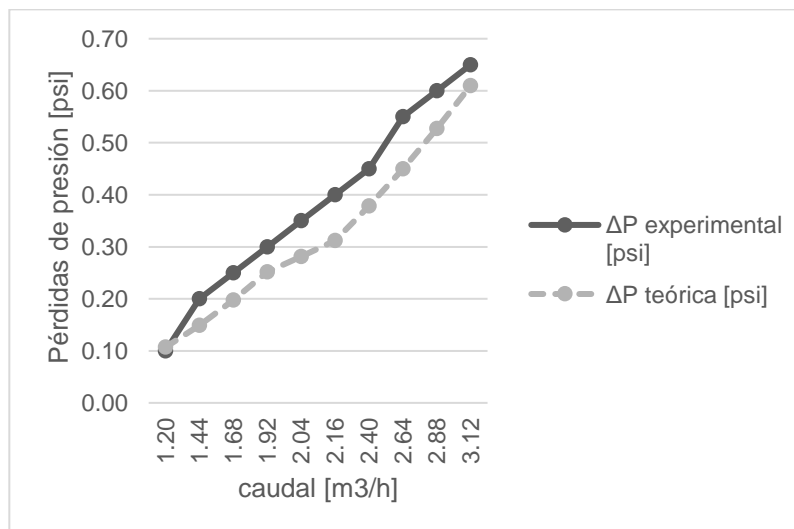
A continuación se presenta la comparación de resultados teóricos versus experimentales, con su respectiva gráfica.

Tabla XXXI. **Resultados teóricos versus experimentales empleando la ecuación Renouard**

No.	Q [m ³ /h]	Presión inicial [psi]	Presión final [psi]	ΔP experimental [psi]	ΔP teórica [psi]	% error teórico
1	1,20	1,00	0,90	0,10	0,1071	7,13
2	1,44	2,00	1,80	0,20	0,1493	25,36
3	1,68	2,50	2,25	0,25	0,1976	20,95
4	1,92	3,00	2,70	0,30	0,2520	16,00
5	2,04	5,00	4,65	0,35	0,2814	19,60
6	2,16	6,00	5,60	0,40	0,3122	21,94
7	2,40	8,00	7,55	0,45	0,3782	15,95
8	2,64	10,00	9,45	0,55	0,4499	18,20
9	2,88	12,00	11,40	0,60	0,5271	12,15
10	3,12	15,00	14,35	0,65	0,6097	6,19

Fuente: elaboración propia.

Figura 30. **Comparación de resultados teóricos versus experimentales empleando la ecuación Renouard**



Fuente: elaboración propia.

4.9.2. Comparación de resultados teóricos versus experimentales empleando ecuación de Darcy-Weisbach

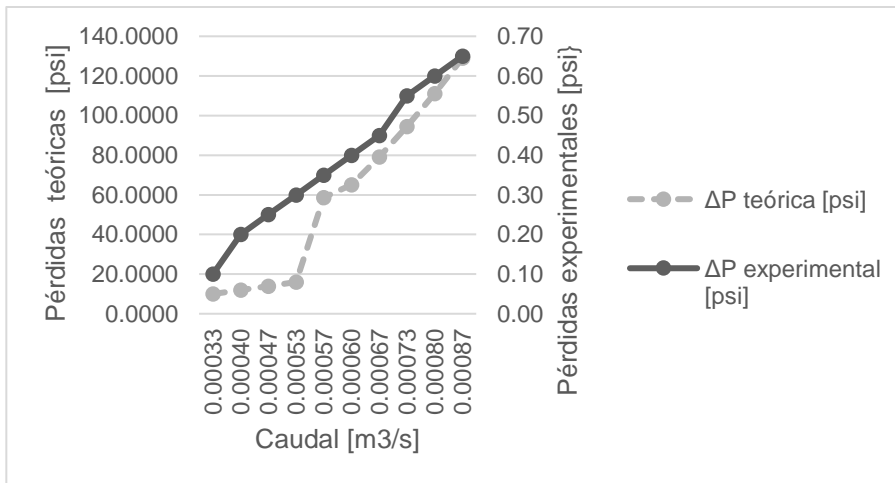
A continuación se presenta la comparación de resultados teóricos versus experimentales, con su respectiva gráfica.

Tabla XXXII. **Resultados teóricos versus experimentales empleando ecuación de Darcy-Weisbach**

No.	Q [m ³ /s]	Presión inicial [psi]	Presión final [psi]	ΔP experimental [psi]	ΔP teórica [psi]	% error teórico
1	0,00033	1,00	0,90	0,10	9,9638	9863,77
2	0,00040	2,00	1,80	0,20	11,9565	5878,26
3	0,00047	2,50	2,25	0,25	13,9493	5479,71
4	0,00053	3,00	2,70	0,30	15,9420	5214,01
5	0,00057	5,00	4,65	0,35	58,6077	16645,07
6	0,00060	6,00	5,60	0,40	65,1080	16177,01
7	0,00067	8,00	7,55	0,45	79,1006	17477,91
8	0,00073	10,00	9,45	0,55	94,4131	17066,03
9	0,00080	12,00	11,40	0,60	111,0431	18407,19
10	0,00087	15,00	14,35	0,65	128,9884	19744,37

Fuente: elaboración propia.

Figura 31. **Comparación de resultados teóricos versus experimentales empleando ecuación de Darcy-Weisbach**



Fuente: elaboración propia.

4.9.3. Resumen de resultados teóricos versus experimentales en circuito de tubería de hierro galvanizado

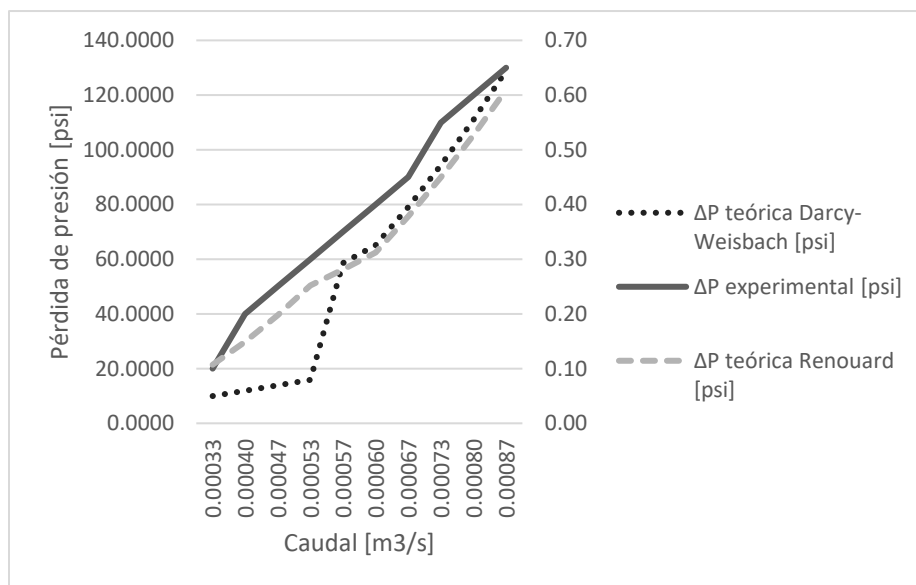
A continuación se presenta la comparación de resultados experimentales versus teóricos, empleando las ecuaciones de Renouard y Darcy Weisbach, con su respectiva gráfica.

Tabla XXXIII. **Resultados teóricos versus experimentales en circuito de tubería de hierro galvanizado**

No.	Q [m ³ /s]	ΔP experimental [psi]	ΔP teórica Renouard [psi]	ΔP teórica Darcy- Weisbach [psi]
1	0,00033	0,10	0,1071	9,9638
2	0,00040	0,20	0,1493	11,9565
3	0,00047	0,25	0,1976	13,9493
4	0,00053	0,30	0,2520	15,9420
5	0,00057	0,35	0,2814	58,6077
6	0,00060	0,40	0,3122	65,1080
7	0,00067	0,45	0,3782	79,1006
8	0,00073	0,55	0,4499	94,4131
9	0,00080	0,60	0,5271	111,0431
10	0,00087	0,65	0,6097	128,9884

Fuente: elaboración propia.

Figura 32. **Comparación de resultados teóricos versus experimentales en circuito de tubería de hierro galvanizado**



Fuente: elaboración propia.

4.10. Comparación de resultados teóricos versus experimentales en circuito de tubería de Pe-Al-Pe

Por medio de esta comparación se podrá observar la variación entre los datos experimentales y los obtenidos teóricamente, reflejados como porcentaje de error.

4.10.1. Comparación de resultados teóricos versus experimentales empleando ecuación de Renouard

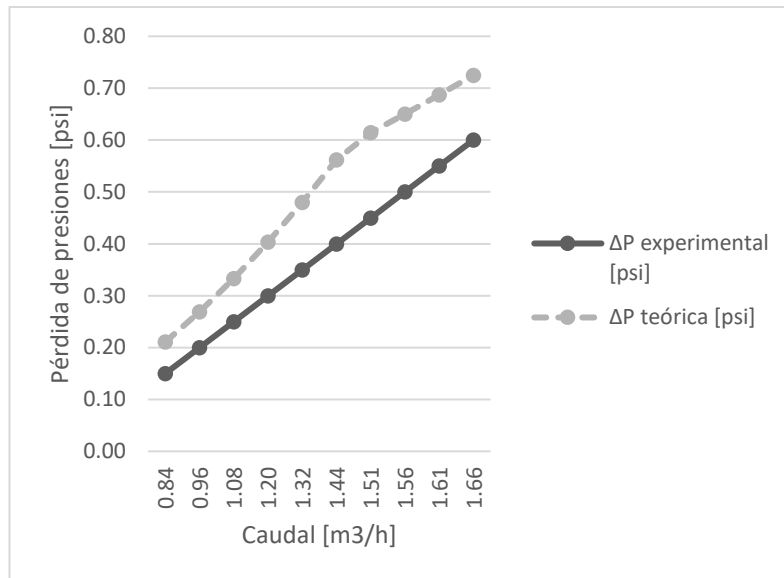
A continuación se presenta la comparación de resultados teóricos versus experimentales, con su respectiva gráfica.

Tabla XXXIV. Resultados teóricos versus experimentales empleando ecuación de Renouard

No.	Q [m ³ /h]	Presión inicial [psi]	Presión final [psi]	ΔP experimental [psi]	ΔP teórica [psi]	% error teórico
1	0,84	1,00	0,85	0,15	0,2108	40,52
2	0,96	2,00	1,80	0,20	0,2688	34,39
3	1,08	2,50	2,25	0,25	0,3330	33,21
4	1,20	3,00	2,70	0,30	0,4034	34,48
5	1,32	5,00	4,65	0,35	0,4798	37,10
6	1,44	6,00	5,60	0,40	0,5622	40,54
7	1,51	8,00	7,55	0,45	0,6144	36,53
8	1,56	10,00	9,50	0,50	0,6503	30,07
9	1,61	12,00	11,45	0,55	0,6872	24,95
10	1,66	15,00	14,40	0,60	0,7250	20,84

Fuente: elaboración propia.

Figura 33. **Comparación de resultados teóricos versus experimentales empleando ecuación de Renouard**



Fuente: elaboración propia.

4.10.2. Comparación de resultados teóricos versus experimentales empleando ecuación de Darcy-Weisbach

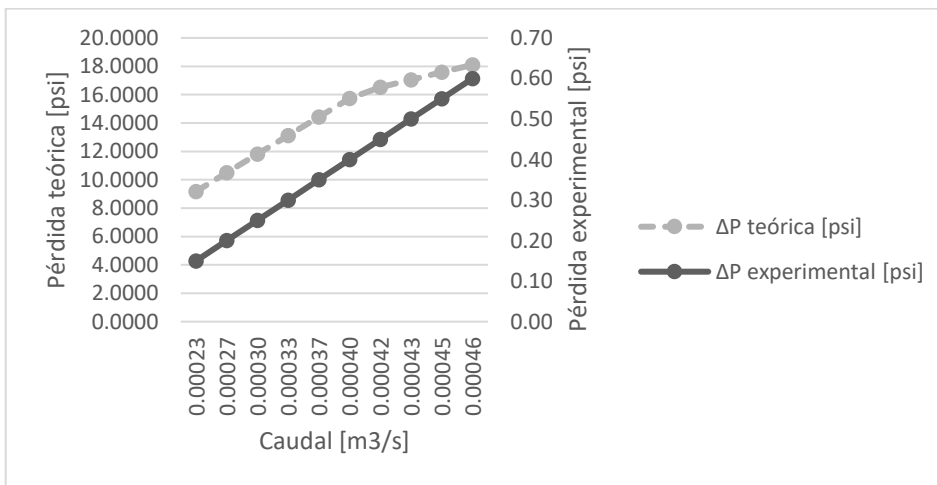
A continuación se presenta la comparación de resultados teóricos versus experimentales, con su respectiva gráfica.

Tabla XXXV. **Resultados teóricos versus experimentales empleando ecuación de Darcy-Weisbach**

No.	Q [m ³ /s]	Presión inicial [psi]	Presión final [psi]	ΔP experimental [psi]	ΔP teórica [psi]	% error teórico
1	0,00023	1,00	0,85	0,15	9,1833	6022,18
2	0,00027	2,00	1,80	0,20	10,4952	5147,59
3	0,00030	2,50	2,25	0,25	11,8071	4622,83
4	0,00033	3,00	2,70	0,30	13,1190	4272,99
5	0,00037	5,00	4,65	0,35	14,4309	4023,10
6	0,00040	6,00	5,60	0,40	15,7428	3835,69
7	0,00042	8,00	7,55	0,45	16,5299	3573,31
8	0,00043	10,00	9,50	0,50	17,0547	3310,93
9	0,00045	12,00	11,45	0,55	17,5794	3096,26
10	0,00046	15,00	14,40	0,60	18,1042	2917,36

Fuente: elaboración propia.

Figura 34. **Comparación de resultados teóricos versus experimentales empleando ecuación de Darcy-Weisbach**



Fuente: elaboración propia.

4.10.3. Resumen de resultados teóricos versus experimentales en circuito de tubería de Pe-Al-Pe

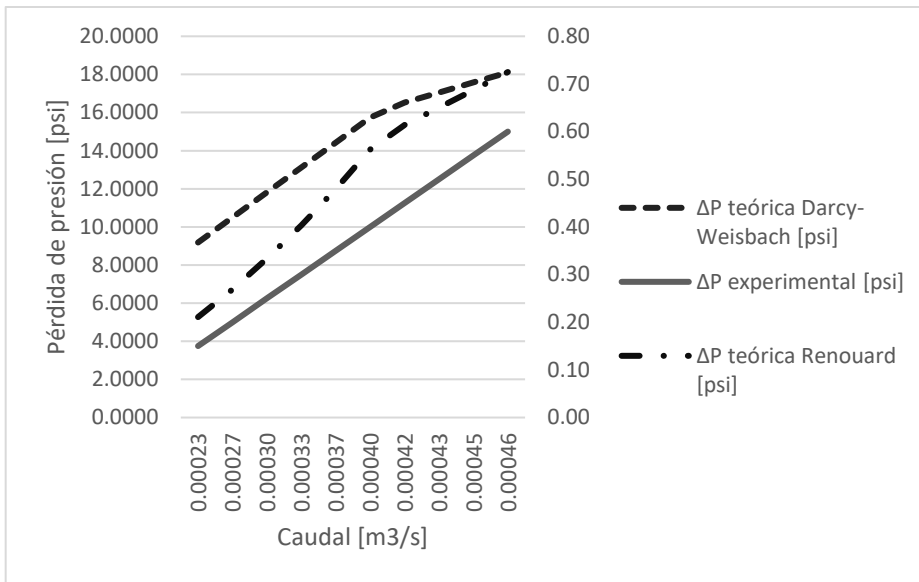
A continuación se presenta la comparación de resultados experimentales versus teóricos, empleando las ecuaciones de Renouard y Darcy Weisbach, con su respectiva gráfica.

Tabla XXXVI. Resultados teóricos versus experimentales en circuito de tubería de Pe-Al-Pe

No.	Q [m ³ /s]	ΔP experimental [psi]	ΔP teórica Renouard [psi]	ΔP teórica Darcy- Weisbach [psi]
1	0,00023	0,15	0,2108	9,1833
2	0,00027	0,20	0,2688	10,4952
3	0,00030	0,25	0,3330	11,8071
4	0,00033	0,30	0,4034	13,1190
5	0,00037	0,35	0,4798	14,4309
6	0,00040	0,40	0,5622	15,7428
7	0,00042	0,45	0,6144	16,5299
8	0,00043	0,50	0,6503	17,0547
9	0,00045	0,55	0,6872	17,5794
10	0,00046	0,60	0,7250	18,1042

Fuente: elaboración propia

Figura 35. **Comparación de resultados teóricos versus experimentales en circuito de tubería de Pe-Al-Pe**



Fuente: elaboración propia.

4.11. Cálculo del coeficiente para ecuación de Renouard

Luego de realizar la comparación de los resultados teóricos con los experimentales, se hace necesario el cálculo de un coeficiente para las diferentes ecuaciones estudiadas, para ajustar los resultados teóricos y de esa manera disminuir el porcentaje de error.

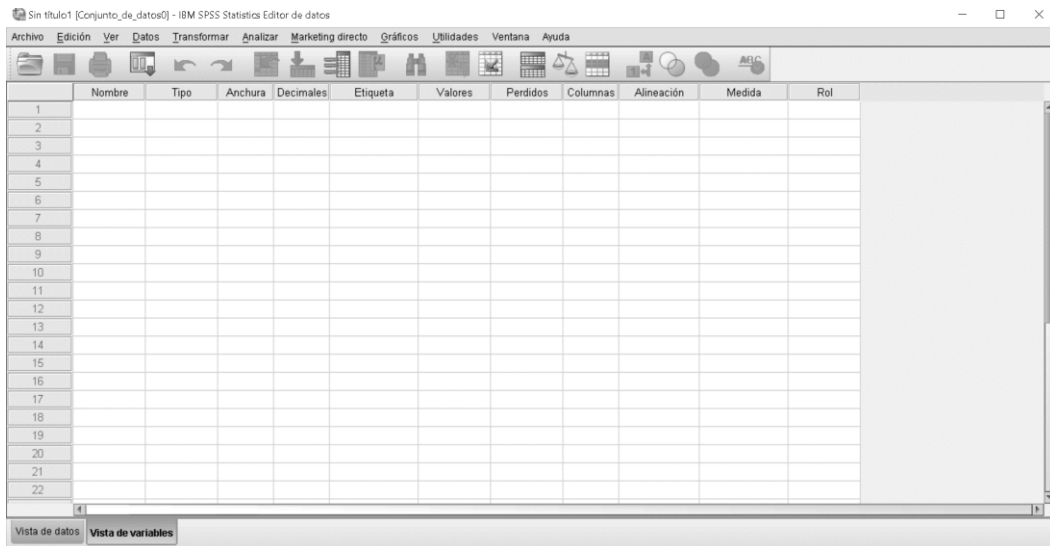
Para obtener el coeficiente de pérdida de presión, se hace uso del programa SPSS versión 21, teniendo como base los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio.

El proceso a realizar para hallar el coeficiente de pérdida que afectará a las diferentes ecuaciones estudiadas se detalla a continuación.

4.11.1. Cálculo de coeficientes para tubería de cobre

Al ingresar a SPSS 21, se encuentra la pantalla principal donde se ubican las pestañas, vistas de variables donde se les dará formato y vista de datos, donde se ingresan los datos para analizar, siendo estos los datos obtenidos en los ensayos de laboratorio.

Figura 36. SPSS, programa estadístico



Fuente: elaboración propia, empleando SPSS statistics 21.

En la pestaña de vista de variables, se etiquetan las variables, según corresponda.

Figura 37. Vista de variables SPSS, programa estadístico

	Nombre	Tipo	Anchura	Decimales	Etiqueta	Valores	Perdidos	Columnas	Alineación	Medida	Rol
1	S	Numérico	8	2	Densidad de aire	Ninguna	Ninguna	8	Derecha	Desconocido	Entrada
2	L	Numérico	8	2	Longitud de tub...	Ninguna	Ninguna	8	Derecha	Desconocido	Entrada
3	O	Numérico	8	2	Caudal	Ninguna	Ninguna	8	Derecha	Desconocido	Entrada
4	D	Numérico	8	2	Diámetro	Ninguna	Ninguna	8	Derecha	Desconocido	Entrada
5	H	Numérico	8	2	Pérdidas de pre...	Ninguna	Ninguna	8	Derecha	Desconocido	Entrada
6											
7											
8											
9											
10											
11											
12											
13											
14											
15											
16											
17											
18											
19											
20											
21											
22											

Fuente: elaboración propia, empleando SPSS statistics 21.

Para definir la ecuación y encontrar el valor de pérdida de presión (K), es necesario ingresar los resultados obtenidos en los ensayos realizados en laboratorio. Luego en la pestaña de vista de datos se define el formato a las variables, como se muestra a continuación.

Figura 38. Vista de datos SPSS, programa estadístico

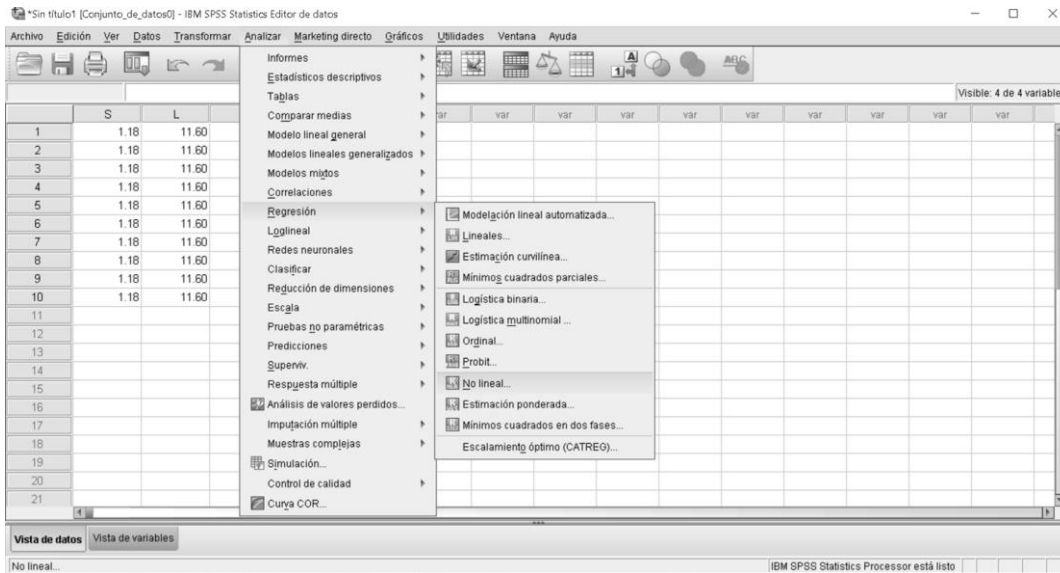
The screenshot shows the SPSS Statistics Editor de datos window. The title bar reads '*Sin título1 [Conjunto_de_datos0] - IBM SPSS Statistics Editor de datos'. The menu bar includes Archivo, Edición, Ver, Datos, Transformar, Analizar, Marketing directo, Gráficos, Utilidades, Ventana, and Ayuda. The toolbar contains various icons for file operations and analysis. The main data grid shows 21 rows and 15 columns. The first five columns are labeled S, L, O, D, and H. The first ten rows contain data, with the last column showing values from .01 to .04. The remaining ten rows are empty. The status bar at the bottom indicates 'Vista de datos' and 'Vista de variables'.

	S	L	O	D	H	var	var	var	var	var	var	var	var	var	var
1	1.18	11.60	1.20	15.80	.01										
2	1.18	11.60	1.44	15.80	.01										
3	1.18	11.60	1.68	15.80	.02										
4	1.18	11.60	1.92	15.80	.02										
5	1.18	11.60	2.04	15.80	.02										
6	1.18	11.60	2.16	15.80	.03										
7	1.18	11.60	2.40	15.80	.03										
8	1.18	11.60	2.64	15.80	.04										
9	1.18	11.60	2.88	15.80	.04										
10	1.18	11.60	3.12	15.80	.04										
11															
12															
13															
14															
15															
16															
17															
18															
19															
20															
21															

Fuente: elaboración propia, empleando SPSS statistics 21.

En la barra de menú se elige la opción a analizar, luego regresión y, por último, regresión no lineal, se abrirá una ventana, para definir la ecuación a analizar.

Figura 39. **Análisis de datos en SPSS, programa estadístico**



Fuente: elaboración propia, empleando SPSS statistics 21.

Luego de ingresar los datos al programa, y desplegar el menú de analizar y regresión no lineal, se define la ecuación de la siguiente forma:

$$H = k(232 * S * L * \frac{Q^{1,82}}{D^{4,82}})$$

Donde:

H: pérdida de presión en mca

K: valor a determinar en SPSS

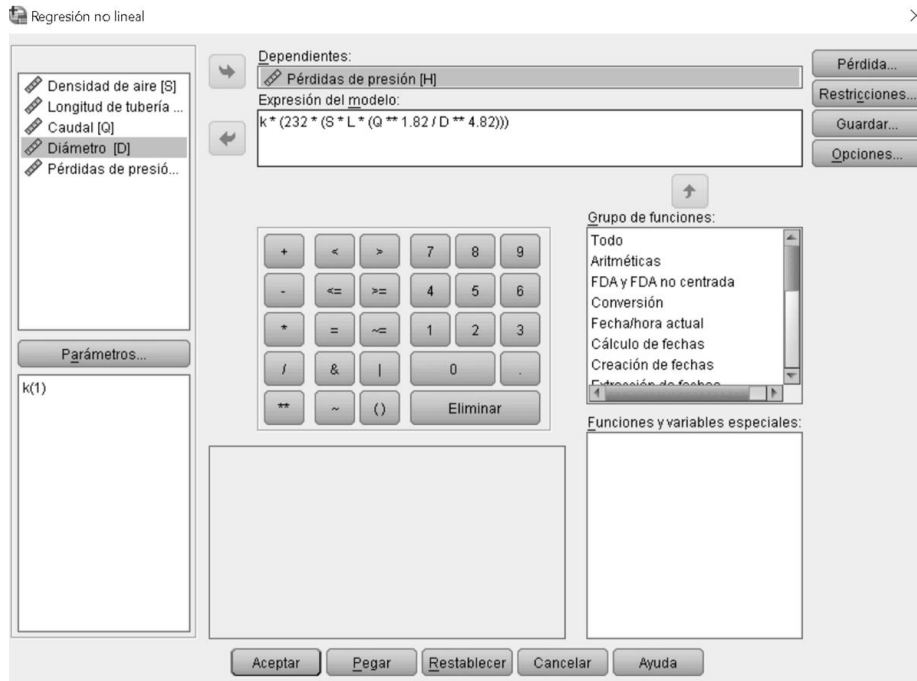
S: densidad, adimensional

L: longitud de tubería en m

Q = caudal en m³/h

D = diámetro de tubería en mm

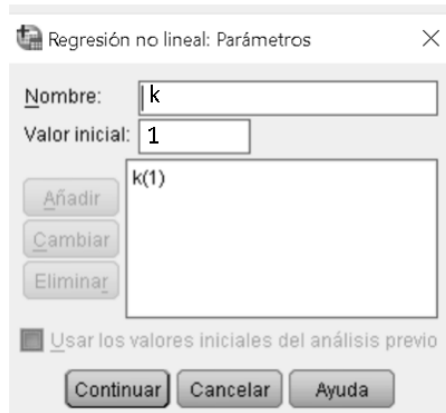
Figura 40. Definición de ecuación en SPSS



Fuente: elaboración propia, empleando SPSS Statistics 21.

Para el recuadro Parámetros se define el coeficiente de pérdida con el nombre de K, y se asigna un valor inicial de 1.

Figura 41. **Parámetros en SPSS**



Fuente: elaboración propia, empleando SPSS Statistics 21.

Para concluir el proceso de regresión no lineal, se debe dar clic en aceptar para que el programa pueda determinar los valores solicitados, en este caso para K.

A continuación se muestra el cálculo para k para la ecuación de Renouard, con los datos obtenidos del circuito en tubería de cobre

Tabla XXXVII. **Estimación de parámetros en SPSS**

Parámetro	Estimación	Error típico	Intervalo de confianza al 95 %	
			Límite inferior	Límite superior
K	0,690	0,009	0,669	0,710

Fuente: elaboración propia, empleando SPSS Statistics 21.

Del procesamiento de datos realizado por el programa se obtiene un valor para $k = 0,69$, por lo cual se procede a sustituir los valores en el modelo matemático planteado, quedando de la siguiente forma:

$$H = 0,69(232 * S * L * \frac{Q^{1,82}}{D^{4,82}})$$

4.11.2. Cálculo de coeficientes para tubería de hierro galvanizado

A continuación se muestra el cálculo para k para la ecuación de Renouard, con los datos obtenidos del circuito en tubería de hierro galvanizado.

Tabla XXXVIII. Estimación de parámetros en SPSS

Parámetro	Estimación	Error típico	Intervalo de confianza al 95 %	
			Límite inferior	Límite superior
k	1,161	0,026	1,102	1,221

Fuente: elaboración propia, empleando SPSS Statistics 21.

Para el coeficiente del procesamiento de datos realizado por el programa, se obtiene un valor para $k = 1,161$, por lo cual se procede a sustituir los valores en el modelo matemático planteado, quedando de la siguiente forma:

$$H = 1,161(232 * S * L * \frac{Q^{1,82}}{D^{4,82}})$$

4.11.3. Cálculo de coeficientes para tubería de Pe-Al-Pe

A continuación se muestra el cálculo para k para la ecuación de Renouard, con los datos obtenidos del circuito en tubería de Pe-Al-Pe.

Tabla XXXIX. Estimación de parámetros en SPSS

Parámetro	Estimación	Error típico	Intervalo de confianza al 95 %	
			Límite inferior	Límite superior
K	0,766	0,013	0,736	0,797

Fuente: elaboración propia, empleando SPSS Statistics 21.

Para el coeficiente del procesamiento de datos realizado por el programa, se obtiene un valor para $k = 0,766$, por lo cual se procede a sustituir los valores en el modelo matemático planteado, quedando de la siguiente forma:

$$H = 0,766 \left(232 * S * L * \frac{Q^{1,82}}{D^{4,82}} \right)$$

4.11.4. Resumen de coeficientes y ecuaciones experimentales, a partir de la ecuación de Renouard

A continuación se muestran los valores de los coeficientes de pérdida calculados para la ecuación de Renouard, en los diferentes materiales de tubería ensayados.

Tabla XL. **Coeficientes para ecuaciones experimentales de Renouard**

Material	Coeficiente de pérdida (k)
Cobre	0,69
Hierro galvanizado	1,161
Pe-Al-Pe	0,766

Fuente: elaboración propia, empleando SPSS Statistics 21.

A continuación se muestra el modelo matemático experimental a partir de la ecuación de Renouard para tubería de cobre:

$$H = 0,69(232 * S * L * \frac{Q^{1,82}}{D^{4,82}})$$

A continuación se muestra el modelo matemático experimental a partir de la ecuación de Renouard para tubería de hierro galvanizado:

$$H = 1,161(232 * S * L * \frac{Q^{1,82}}{D^{4,82}})$$

A continuación se muestra el modelo matemático experimental a partir de la ecuación de Renouard para tubería de Pe-Al-Pe:

$$H = 0,766 (232 * S * L * \frac{Q^{1,82}}{D^{4,82}})$$

4.12. Cálculo del coeficiente para ecuación de Darcy-Weisbach

Como punto de partida se debe ingresar los datos obtenidos en el laboratorio, y realizar la misma operación realizada con la ecuación del inciso 4.12, usando la ecuación de Darcy-Weisbach.

4.12.1. Cálculo de coeficientes para tubería de cobre

A continuación se muestra el cálculo para k para la ecuación de Darcy-Weisbach, con los datos obtenidos del circuito en tubería de cobre.

Tabla XLI. Estimación de parámetros en SPSS

Parámetro	Estimación	Error típico	Intervalo de confianza al 95 %	
			Límite inferior	Límite superior
K	0,008	0,001	0,006	0,009

Fuente: elaboración propia, empleando SPSS Statistics 21.

Para el coeficiente del procesamiento de datos realizado por el programa, se obtiene un valor para k = 0,008, por lo cual se procede a sustituir los valores en el modelo matemático planteado:

$$h_f = 0,008 \left(f * \frac{L}{D} * \frac{v^2}{2g} \right)$$

4.12.2. Cálculo de coeficientes para tubería de hierro galvanizado

A continuación se muestra el cálculo para k para la ecuación de Darcy-Weisbach, con los datos obtenidos del circuito en tubería de hierro galvanizado:

Tabla XLII. Estimación de parámetros en SPSS

Parámetro	Estimación	Error típico	Intervalo de confianza al 95 %	
			Límite inferior	Límite superior
K	0,006	0,000	0,005	0,007

Fuente: elaboración propia, empleando SPSS Statistics 21.

Para el coeficiente del procesamiento de datos realizado por el programa, se obtiene un valor para k = 0,006, por lo cual se procede a sustituir los valores en el modelo matemático planteado:

$$h_f = 0,006 \left(f * \frac{L}{D} * \frac{v^2}{2g} \right)$$

4.12.3. Cálculo de coeficientes para tubería de Pe-Al-Pe

A continuación se muestra el cálculo para k para la ecuación de Darcy-Weisbach, con los datos obtenidos del circuito en tubería de Pe-Al-Pe.

Tabla XLIII. **Estimación de parámetros en SPSS**

Parámetro	Estimación	Error típico	Intervalo de confianza al 95 %	
			Límite inferior	Límite superior
K	0,027	0,002	0,023	0,030

Fuente: elaboración propia, empleando IBM SPSS Statics 21.

Para el coeficiente del procesamiento de datos realizado por el programa, se obtiene un valor para $k = 0,027$, por lo cual se procede a sustituir los valores en el modelo matemático planteado:

$$h_f = 0,027 \left(f * \frac{L}{D} * \frac{v^2}{2g} \right)$$

4.12.4. **Resumen de coeficientes y ecuaciones experimentales, a partir de la ecuación de Darcy-Weisbach**

A continuación se muestran los valores de los coeficientes de pérdida calculados para la ecuación de Darcy-Weisbach, en los diferentes materiales de tubería ensayados.

Tabla XLIV. **Coefficientes para ecuaciones experimentales de Darcy-Weisbach**

Material	Coefficiente de pérdida (k)
Cobre	0,008
Hierro galvanizado	0,006
Pe-Al-Pe	0,027

Fuente: elaboración propia.

A continuación se muestra el modelo matemático experimental a partir de la ecuación de Darcy-Weisbach para tubería de cobre:

$$h_f = 0,008(f * \frac{L}{D} * \frac{v^2}{2g})$$

A continuación se muestra el modelo matemático experimental a partir de la ecuación de Darcy-Weisbach para tubería de hierro galvanizado:

$$h_f = 0,006(f * \frac{L}{D} * \frac{v^2}{2g})$$

A continuación se muestra el modelo matemático experimental a partir de la ecuación de Darcy-Weisbach para tubería de Pe-Al-Pe:

$$h_f = 0,027(f * \frac{L}{D} * \frac{v^2}{2g})$$

4.13. Cálculo de pérdida de presión utilizando ecuaciones experimentales para tubería de cobre

Se presentan los cálculos de pérdida de presión utilizando las ecuaciones experimentales para la tubería de cobre, generadas a partir de las ecuaciones Renouard, Hazen-Williams y Darcy-Weisbach.

4.13.1. Cálculo de pérdida de presión, empleando la ecuación experimental de Renouard

A continuación se muestra el cálculo de pérdida de presión empleando la ecuación experimental obtenida a partir de la ecuación de Renouard.

$$H = 0,69(232 * S * L * \frac{Q^{1,82}}{D^{4,82}})$$

Siendo:

S = densidad del flujo, para este caso 1,18 (adimensional).

L = longitud de tubería, para este caso 11,60 (m).

D = diámetro de tubería, para este caso 13,843 (mm).

Q = caudal del flujo que pasa a través de la tubería, para este caso variable según se muestra en la siguiente tabla.

Tabla XLV. **Pérdida de presión, empleando la ecuación experimental de Renouard**

No.	Q [m ³ /h]	Coefficiente (k)	ΔP experimental de Renouard [psi]
1	0,96	0,69	0,0931
2	1,08	0,69	0,1154
3	1,20	0,69	0,1398
4	1,32	0,69	0,1663
5	1,38	0,69	0,1803
6	1,44	0,69	0,1948
7	1,68	0,69	0,2579
8	2,16	0,69	0,4075
9	2,30	0,69	0,4583
10	2,52	0,69	0,5395

Fuente: elaboración propia.

4.13.2. Cálculo de pérdida de presión, empleando la ecuación experimental de Darcy-Weisbach

A continuación se muestra el cálculo de pérdida de presión empleando la ecuación experimental obtenida a partir de la ecuación de Darcy-Weisbach.

$$h_f = 0,008 \left(f * \frac{L}{D} * \frac{v^2}{2g} \right)$$

Donde:

f = factor de fricción, depende del tipo de flujo (laminar o turbulento).

L = longitud de tubería 11,60 (m).

D = diámetro de tubería, 0,013 (m).

v = velocidad depende del caudal a evaluar, para este caso variable según se muestra en la siguiente tabla.

g = gravedad, 9,8 (m/s²)

Tabla XLVI. **Pérdida de presión, empleando la ecuación experimental de Darcy-Weisbach**

No.	Q [m ³ /s]	Coficiente (k)	ΔP experimental Darcy- Weisbach [psi]
1	0,00027	0,008	0,0775
2	0,00030	0,008	0,0872
3	0,00033	0,008	0,0969
4	0,00037	0,008	0,1066
5	0,00038	0,008	0,1114
6	0,00040	0,008	0,1163
7	0,00047	0,008	0,1356
8	0,00060	0,008	0,4634
9	0,00064	0,008	0,5169
10	0,00070	0,008	0,6018

Fuente: elaboración propia.

4.14. Cálculo de pérdida de presión utilizando coeficientes para tubería de hierro galvanizado

Se presentan los cálculos de pérdida de presión utilizando las ecuaciones experimentales para la tubería de cobre, generadas a partir de las ecuaciones Renouard, Hazen-Williams y Darcy-Weisbach.

4.14.1. Cálculo de pérdida de presión, empleando la ecuación experimental de Renouard

A continuación se muestra el cálculo de pérdida de presión empleando la ecuación experimental obtenida a partir de la ecuación de Renouard.

$$H = 1,161(232 * S * L * \frac{Q^{1,82}}{D^{4,82}})$$

Siendo:

S = densidad de flujo, 1,18 (adimensional).

L = longitud de tubería, 11,60 (m).

Q = caudal, para este caso variable según se muestra en la siguiente tabla.

D = diámetro 15,80 (mm).

Tabla XLVII. **Pérdida de presión, empleando la ecuación experimental de Renouard**

No.	Q [m ³ /h]	Coeficiente (k)	ΔP experimental Renouard [psi]
1	1,20	1,161	0,1244
2	1,44	1,161	0,1733
3	1,68	1,161	0,2294
4	1,92	1,161	0,2926
5	2,04	1,161	0,3267
6	2,16	1,161	0,3625
7	2,40	1,161	0,4391
8	2,64	1,161	0,5223
9	2,88	1,161	0,6119
10	3,12	1,161	0,7079

Fuente: elaboración propia.

4.14.2. **Cálculo de pérdida de presión, empleando la ecuación experimental de Darcy-Weisbach**

A continuación se muestra el cálculo de pérdida de presión empleando la ecuación experimental obtenida a partir de la ecuación de Darcy-Weisbach.

$$h_f = 0,006 \left(f * \frac{L}{D} * \frac{v^2}{2g} \right)$$

Donde:

f = factor de fricción, depende del tipo de flujo (laminar o turbulento).

L = longitud de tubería 11,60 (m).

D = diámetro de tubería, 0,013 (m).

v = velocidad depende del caudal a evaluar, para este caso variable según se muestra en la siguiente tabla:

$g = \text{gravedad, } 9,8 \text{ (m/s}^2\text{)}$

Empleando ecuación de Darcy-Weisbach:

Tabla XLVIII. **Pérdida de presión, empleando la ecuación experimental de Darcy-Weisbach**

No.	Q [m ³ /s]	Coficiente (k)	ΔP experimental Darcy- Weisbach [psi]
1	0,00033	0,006	0,0598
2	0,00040	0,006	0,0717
3	0,00047	0,006	0,0837
4	0,00053	0,006	0,0957
5	0,00057	0,006	0,3516
6	0,00060	0,006	0,3906
7	0,00067	0,006	0,4746
8	0,00073	0,006	0,5665
9	0,00080	0,006	0,6663
10	0,00087	0,006	0,7739

Fuente: elaboración propia.

4.15. **Cálculo de pérdida de presión utilizando coeficientes para tubería de Pe-Al-Pe**

Se presentan los cálculos de pérdida de presión utilizando las ecuaciones experimentales para la tubería de cobre, generadas a partir de las ecuaciones Renouard, Hazen-Williams y Darcy-Weisbach.

4.15.1. Cálculo de pérdida de presión, empleando la ecuación experimental de Renouard

A continuación, se muestra el cálculo de pérdida de presión empleando la ecuación experimental obtenida a partir de la ecuación de Renouard.

$$H = 0,766(232 * S * L * \frac{Q^{1.82}}{D^{4.82}})$$

Siendo:

S = densidad de flujo, 1,18 (adimensional).

L = longitud de tubería, 11,60 (m).

Q = caudal, para este caso variable según se muestra en la siguiente tabla.

D = diámetro 12,00 (mm).

Tabla XLIX. **Pérdida de presión, empleando la ecuación experimental de Renouard**

No.	Q [m ³ /h]	Coficiente (k)	ΔP experimental Renouard [psi]
1	0,84	0,766	0,16146
2	0,96	0,766	0,20588
3	1,08	0,766	0,25510
4	1,20	0,766	0,30903
5	1,32	0,766	0,36756
6	1,44	0,766	0,43063
7	1,51	0,766	0,47062
8	1,56	0,766	0,49816
9	1,61	0,766	0,52641
10	1,66	0,766	0,55536

Fuente: elaboración propia.

4.15.2. Cálculo de pérdida de presión, empleando la ecuación experimental de Darcy-Weisbach

A continuación se muestra el cálculo de pérdida de presión empleando la ecuación experimental obtenida a partir de la ecuación de Darcy-Weisbach.

$$h_f = 0,027 \left(f * \frac{L}{D} * \frac{v^2}{2g} \right)$$

Donde:

f = factor de fricción, depende del tipo de flujo (laminar o turbulento)

L = longitud de tubería 11,60 (m)

D = diámetro de tubería, 0,012 (m)

v = velocidad depende del caudal a evaluar, según la siguiente tabla

g = gravedad, 9,8 (m/s²)

Tabla L. **Pérdida de presión, empleando la ecuación experimental de Darcy-Weisbach**

No.	Q [m ³ /s]	Coficiente (k)	ΔP experimental Darcy-Weisbach [psi]
1	0,00023	0,027	0,2479
2	0,00027	0,027	0,2834
3	0,00030	0,027	0,3188
4	0,00033	0,027	0,3542
5	0,00037	0,027	0,3896
6	0,00040	0,027	0,4251
7	0,00042	0,027	0,4463
8	0,00043	0,027	0,4605
9	0,00045	0,027	0,4746
10	0,00046	0,027	0,4888

Fuente: elaboración propia.

4.16. Comparación de resultados utilizando ecuaciones experimentales versus obtenidos en laboratorio, en tubería de cobre

Se comparan los resultados obtenidos en el laboratorio versus los resultados obtenidos utilizando las ecuaciones experimentales planteadas para la tubería de cobre, a partir de la ecuación de Renouard, ecuación de Hazen-Williams y ecuación de Darcy-Weisbach.

4.16.1. Comparación de resultados utilizando ecuación experimental de Renouard versus obtenidos en laboratorio

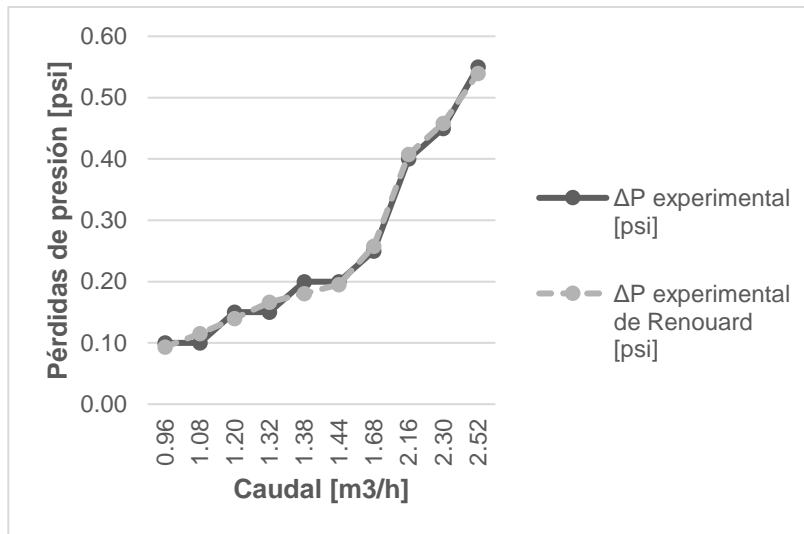
A continuación se muestra la comparación de resultados utilizando la ecuación experimental para la tubería de cobre, obtenida a partir de la ecuación de Renouard versus los resultados experimentales obtenidos en los ensayos de laboratorio. Se presentan las tablas de resultados y su respectiva gráfica.

Tabla LI. Resultados utilizando ecuación experimental de Renouard versus obtenidos en laboratorio

No.	Q [m ³ /h]	ΔP experimental en laboratorio [psi]	ΔP Ecuación experimental de Renouard [psi]	% error
1	0,96	0,10	0,0931	6,85
2	1,08	0,10	0,1154	15,41
3	1,20	0,15	0,1398	6,79
4	1,32	0,15	0,1663	10,86
5	1,38	0,20	0,1803	9,85
6	1,44	0,20	0,1948	2,59
7	1,68	0,25	0,2579	3,17
8	2,16	0,40	0,4075	1,88
9	2,30	0,45	0,4583	1,84
10	2,52	0,55	0,5395	1,91

Fuente: elaboración propia.

Figura 42. **Comparación de resultados utilizando ecuación experimental de Renouard versus obtenidos en laboratorio**



Fuente: elaboración propia.

4.16.2. Comparación de resultados utilizando ecuación experimental Darcy-Weisbach versus obtenidos en laboratorio

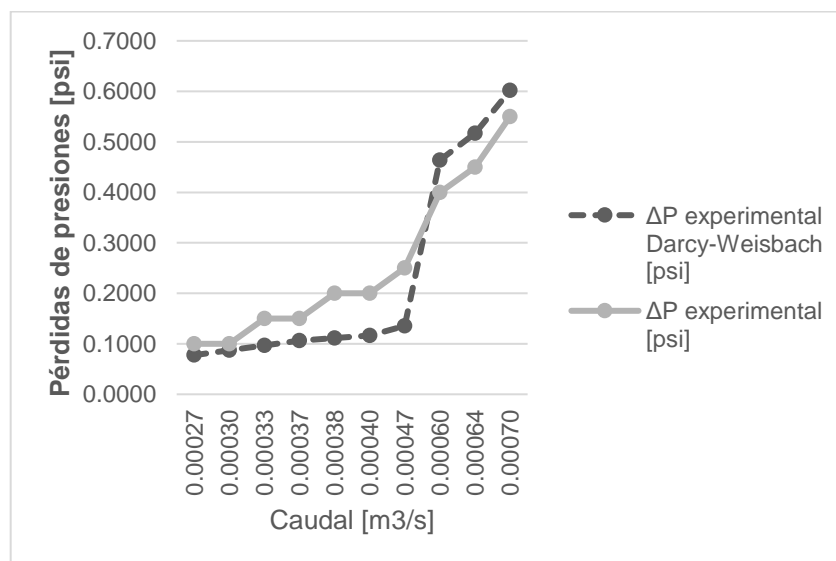
A continuación se muestra la comparación de resultados utilizando la ecuación experimental para la tubería de cobre, obtenida a partir de la ecuación de Darcy-Weisbach versus los resultados experimentales obtenidos en los ensayos de laboratorio. Se presentan las tablas de resultados y su respectiva gráfica:

Tabla LII. **Resultados utilizando ecuación experimental Darcy-Weisbach versus obtenidos en laboratorio**

No.	Q [m ³ /s]	ΔP experimental [psi]	ΔP experimental Darcy-Weisbach [psi]	% error
1	0,00027	0,10	0,0775	22,50
2	0,00030	0,10	0,0872	12,81
3	0,00033	0,15	0,0969	35,41
4	0,00037	0,15	0,1066	28,96
5	0,00038	0,20	0,1114	44,29
6	0,00040	0,20	0,1163	41,87
7	0,00047	0,25	0,1356	45,75
8	0,00060	0,40	0,4634	15,85
9	0,00064	0,45	0,5169	14,87
10	0,00070	0,55	0,6018	9,41

Fuente: elaboración propia.

Figura 43. **Comparación de resultados utilizando ecuación experimental Darcy-Weisbach versus obtenidos en laboratorio**



Fuente: elaboración propia.

4.16.3. Resumen de resultados experimentales obtenidos a partir de ecuaciones versus experimentales en circuito de tubería de cobre

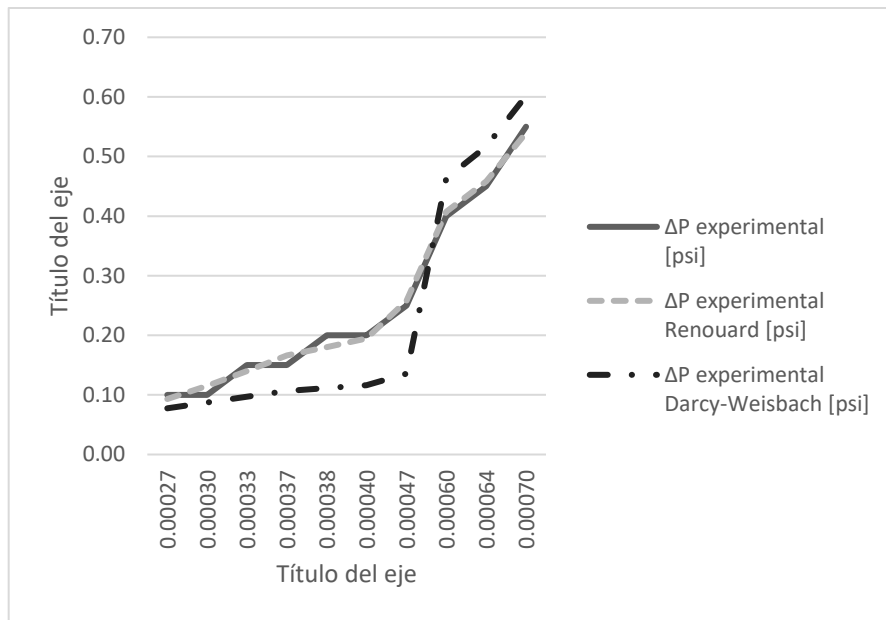
A continuación se presenta la comparación de resultados experimentales obtenidos en laboratorio versus los resultados obtenidos con las ecuaciones experimentales para tubería de cobre, generadas a partir de las ecuaciones de Renouard, Hazen-Williams y Darcy-Weisbach, con su respectiva gráfica.

Tabla LIII. **Resultados experimentales obtenidos a partir de ecuaciones versus experimentales en circuito de tubería de cobre**

No.	Q [m ³ /s]	ΔP experimental [psi]	ΔP experimental Renouard [psi]	ΔP experimental Darcy- Weisbach [psi]
1	0,00027	0,10	0,0931	0,0775
2	0,00030	0,10	0,1154	0,0872
3	0,00033	0,15	0,1398	0,0969
4	0,00037	0,15	0,1663	0,1066
5	0,00038	0,20	0,1803	0,1114
6	0,00040	0,20	0,1948	0,1163
7	0,00047	0,25	0,2579	0,1356
8	0,00060	0,40	0,4075	0,4634
9	0,00064	0,45	0,4583	0,5169
10	0,00070	0,55	0,5395	0,6018

Fuente: elaboración propia.

Figura 44. **Comparación resultados experimentales obtenidos a partir de ecuaciones versus experimentales en circuito de tubería de cobre**



Fuente: elaboración propia.

4.17. **Comparación de resultados utilizando ecuaciones experimentales versus obtenidos en laboratorio, en tubería de hierro galvanizado**

Se comparan los resultados obtenidos en el laboratorio versus los resultados obtenidos utilizando las ecuaciones experimentales planteadas para la tubería de hierro galvanizado, a partir de la ecuación de Renouard, ecuación de Hazen-Williams y ecuación de Darcy-Weisbach.

4.17.1. Comparación de resultados utilizando ecuación experimental Renouard versus obtenidos en laboratorio

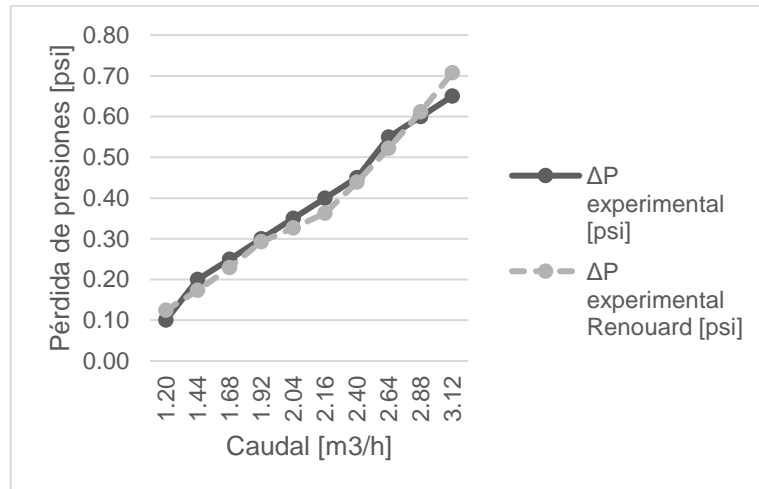
A continuación se muestra la comparación de resultados utilizando la ecuación experimental para la tubería de hierro galvanizado, obtenida a partir de la ecuación de Renouard versus los resultados experimentales obtenidos en los ensayos de laboratorio. Se presentan las tablas de resultados y su respectiva gráfica.

Tabla LIV. **Resultados utilizando ecuación experimental Renouard versus obtenidos en laboratorio**

No.	Q [m ³ /h]	ΔP experimental [psi]	ΔP experimental Renouard [psi]	% error
1	1,20	0,10	0,1244	24,37
2	1,44	0,20	0,1733	13,34
3	1,68	0,25	0,2294	8,22
4	1,92	0,30	0,2926	2,48
5	2,04	0,35	0,3267	6,66
6	2,16	0,40	0,3625	9,37
7	2,40	0,45	0,4391	2,41
8	2,64	0,55	0,5223	5,03
9	2,88	0,60	0,6119	1,99
10	3,12	0,65	0,7079	8,91

Fuente: elaboración propia.

Figura 45. **Comparación de resultados utilizando ecuación experimental Renouard versus obtenidos en laboratorio**



Fuente: elaboración propia.

4.17.2. **Comparación de resultados utilizando ecuación experimental Darcy-Weisbach versus obtenidos en laboratorio**

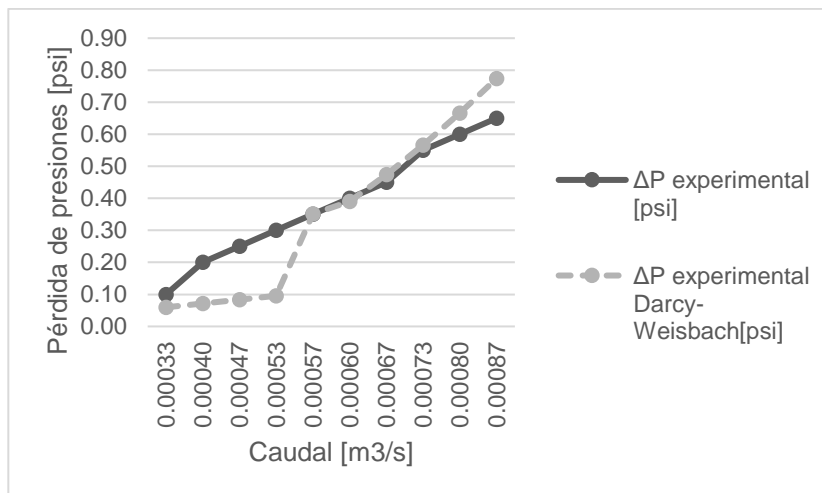
A continuación se muestra la comparación de resultados utilizando la ecuación experimental para la tubería de hierro galvanizado, obtenida a partir de la ecuación de Darcy-Weisbach versus los resultados experimentales obtenidos en los ensayos de laboratorio. Se presentan las tablas de resultados y su respectiva gráfica:

Tabla LV. **Resultados utilizando ecuación experimental Darcy-Weisbach versus obtenidos en laboratorio**

No.	Q [m ³ /s]	ΔP experimental [psi]	ΔP experimental Darcy-Weisbach [psi]	% error
1	0,00033	0,10	0,0598	40,22
2	0,00040	0,20	0,0717	64,13
3	0,00047	0,25	0,0837	66,52
4	0,00053	0,30	0,0957	68,12
5	0,00057	0,35	0,3516	0,47
6	0,00060	0,40	0,3906	2,34
7	0,00067	0,45	0,4746	5,47
8	0,00073	0,55	0,5665	3,00
9	0,00080	0,60	0,6663	11,04
10	0,00087	0,65	0,7739	19,07

Fuente: elaboración propia

Figura 46. **Comparación de resultados utilizando ecuación experimental Darcy-Weisbach versus obtenidos en laboratorio**



Fuente: elaboración propia.

4.17.3. Resumen de resultados experimentales obtenidos a partir de ecuaciones versus experimentales en circuito de tubería de hierro galvanizado

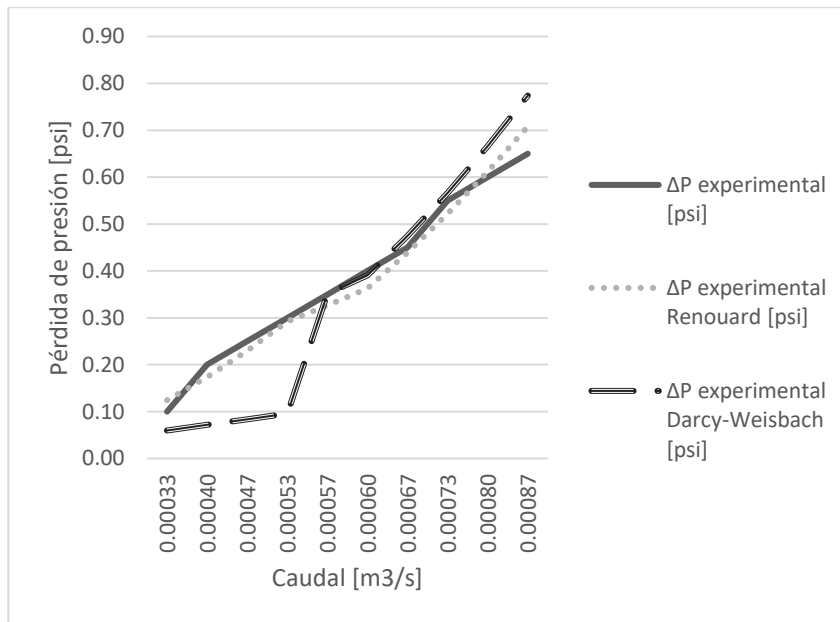
A continuación se presenta la comparación de resultados experimentales obtenidos en laboratorio versus los resultados obtenidos con las ecuaciones experimentales para tubería de hierro galvanizado, generadas a partir de las ecuaciones de Renouard y Darcy-Weisbach, con su respectiva gráfica.

Tabla LVI. **Resultados experimentales obtenidos a partir de ecuaciones versus experimentales en circuito de tubería de hierro galvanizado**

No.	Q [m ³ /s]	ΔP experimenta l [psi]	ΔP experimental Renouard [psi]	ΔP experimenta l Darcy- Weisbach [psi]
1	0,00033	0,10	0,1244	0.0598
2	0,00040	0,20	0,1733	0.0717
3	0,00047	0,25	0,2294	0.0837
4	0,00053	0,30	0,2926	0.0957
5	0,00057	0,35	0,3267	0.3516
6	0,00060	0,40	0,3625	0.3906
7	0,00067	0,45	0,4391	0.4746
8	0,00073	0,55	0,5223	0.5665
9	0,00080	0,60	0,6119	0.6663
10	0,00087	0,65	0,7079	0.7739

Fuente: elaboración propia.

Figura 47. **Comparación resultados experimentales obtenidos a partir de ecuaciones versus experimentales en circuito de tubería de hierro galvanizado**



Fuente: elaboración propia.

4.18. **Comparación de resultados utilizando ecuaciones experimentales corregidos versus obtenidos en laboratorio, en tubería de Pe-Al-Pe**

A continuación se muestra la comparación de resultados utilizando la ecuación experimental para la tubería de Pe-Al-Pe, obtenida a partir de la ecuación de Renouard versus los resultados experimentales obtenidos en los ensayos de laboratorio.

4.18.1. Comparación de resultados teóricos corregidos versus experimentales empleando ecuación de Renouard

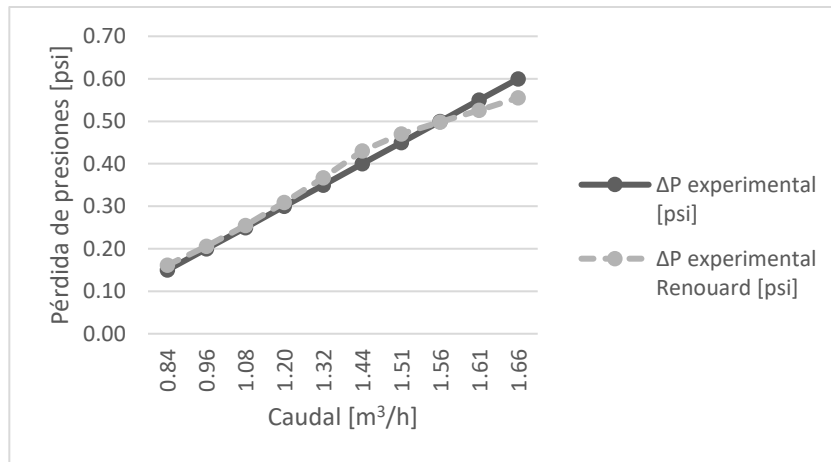
A continuación se muestra la comparación de resultados utilizando la ecuación experimental para la tubería de Pe-Al-Pe, obtenida a partir de la ecuación de Renouard versus los resultados experimentales obtenidos en los ensayos de laboratorio. Se presentan las tablas de resultados y su respectiva gráfica.

Tabla LVII. Resultados teóricos corregidos versus experimentales empleando ecuación de Renouard

No.	Q [m ³ /h]	ΔP experimental [psi]	ΔP experimental Renouard [psi]	% error
1	0,84	0,15	0,16146	7,64
2	0,96	0,20	0,20588	2,94
3	1,08	0,25	0,25510	2,04
4	1,20	0,30	0,30903	3,01
5	1,32	0,35	0,36756	5,02
6	1,44	0,40	0,43063	7,66
7	1,51	0,45	0,47062	4,58
8	1,56	0,50	0,49816	0,37
9	1,61	0,55	0,52641	4,29
10	1,66	0,60	0,55536	7,44

Fuente: elaboración propia.

Figura 48. **Comparación de resultados teóricos corregidos versus experimentales empleando ecuación de Renouard**



Fuente: elaboración propia.

4.18.2. **Comparación de resultados teóricos corregidos versus experimentales empleando ecuación de Darcy-Weisbach**

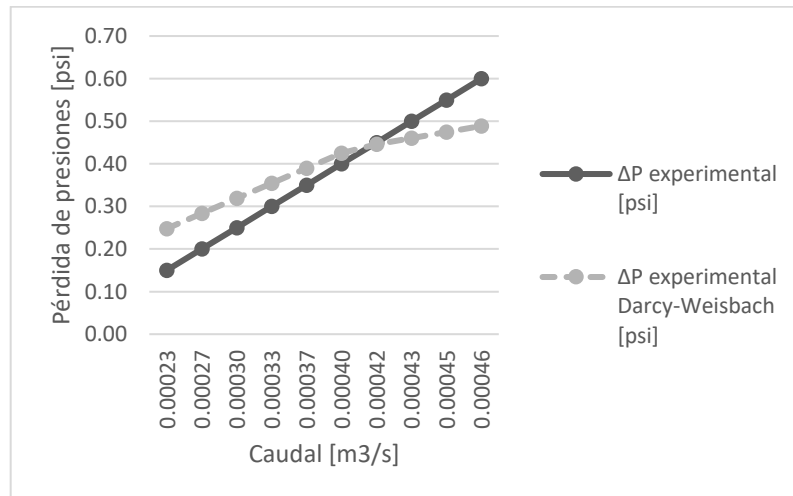
A continuación se muestra la comparación de resultados utilizando la ecuación experimental para la tubería de Pe-Al-Pe, obtenida a partir de la ecuación de Darcy-Weisbach versus los resultados experimentales obtenidos en los ensayos de laboratorio. Se presentan las tablas de resultados y su respectiva gráfica.

Tabla LVIII. **Resultados teóricos corregidos versus experimentales empleando ecuación de Darcy-Weisbach**

No.	Q [m ³ /s]	ΔP experimental [psi]	ΔP experimental Darcy- Weisbach [psi]	% error
1	0,00023	0,15	0,2479	65,30
2	0,00027	0,20	0,2834	41,68
3	0,00030	0,25	0,3188	27,52
4	0,00033	0,30	0,3542	18,07
5	0,00037	0,35	0,3896	11,32
6	0,00040	0,40	0,4251	6,26
7	0,00042	0,45	0,4463	0,82
8	0,00043	0,50	0,4605	7,90
9	0,00045	0,55	0,4746	13,70
10	0,00046	0,60	0,4888	18,53

Fuente: elaboración propia.

Figura 49. **Comparación de resultados teóricos corregidos versus experimentales empleando ecuación de Darcy-Weisbach**



Fuente: elaboración propia.

4.18.3. Resumen de resultados experimentales obtenidos a partir de ecuaciones versus experimentales en circuito de tubería de Pe-Al-Pe

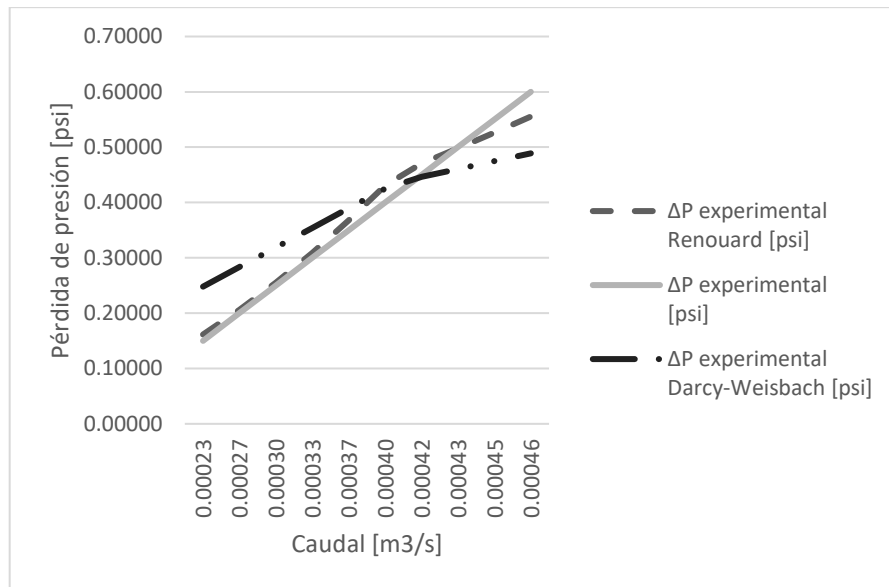
A continuación se presenta la comparación de resultados experimentales obtenidos en laboratorio versus los resultados obtenidos con las ecuaciones experimentales para tubería de Pe-Al-Pe, generadas a partir de las ecuaciones de Renouard y Darcy-Weisbach, con su respectiva gráfica.

Tabla LIX. **Resultados experimentales obtenidos a partir de ecuaciones versus experimentales en circuito de tubería de Pe-Al-Pe**

No.	Q [m ³ /s]	ΔP experimental [psi]	ΔP experimental Renouard [psi]	ΔP experimental Darcy- Weisbach [psi]
1	0,00023	0,15	0,16146	0,2479
2	0,00027	0,20	0,20588	0,2834
3	0,00030	0,25	0,25510	0,3188
4	0,00033	0,30	0,30903	0,3542
5	0,00037	0,35	0,36756	0,3896
6	0,00040	0,40	0,43063	0,4251
7	0,00042	0,45	0,47062	0,4463
8	0,00043	0,50	0,49816	0,4605
9	0,00045	0,55	0,52641	0,4746
10	0,00046	0,60	0,55536	0,4888

Fuente: elaboración propia.

Figura 50. **Comparación de resultados experimentales obtenidos a partir de ecuaciones versus experimentales en circuito de tubería de Pe-Al-Pe**



Fuente: elaboración propia.

4.19. Modelo matemático de Vivian Orozco

Modelo generado con los datos obtenidos en los ensayos de laboratorio, definiendo las siguientes variables para determinar los coeficientes generados por medio del software SPSS, siendo estas las siguientes:

Q = caudal (m3/s)

L = longitud del tramo a evaluar (m)

D = diámetro de tubería a evaluar (m)

Definiendo el siguiente modelo:

$$h_f = k \frac{Q^{k_2}}{D^{k_3}} L$$

Donde:

H_f = pérdida en mca

K = coeficiente, adimensional

Q = caudal en m³/s

D = diámetro en m

L = longitud en m

Siendo K , K_2 , K_3 obtenidas mediante una regresión no lineal ejecutada en el software SPSS.

4.19.1. Tubería de material de cobre

Para desarrollar la estimación de parámetros de tubería de cobre, se empleó el proceso detallado en el numeral 4.11.

Tabla LX. **Estimación de parámetros para tubería de cobre**

Parámetro	Estimación	Error típico	Intervalo de confianza al 95 %	
			Límite inferior	Límite superior
K	4,948	15290050,225	-36155218,621	36155228,517
K ₂	1,820	0,071	1,651	1,989
K ₃	1,918	721981,316	-1707212,612	1707216,447

Fuente: elaboración propia.

Definiendo modelo de la siguiente manera:

$$h_f = 4,948 \frac{Q^{1.820}}{D^{1.918}} L$$

Empleando los datos obtenidos en los ensayos del laboratorio, descritos en el numeral 4.3. Con los datos obtenidos se procede a calcular: pérdida de energía, usando caudal y diámetro determinado para tubería de cobre, de la siguiente forma:

H_f = pérdida en mca

K_1 = coeficiente, adimensional

K_2 = coeficiente, adimensional

K_3 = coeficiente, adimensional

Q = caudal en m³/s

D = diámetro en m

L = longitud en m

Corrida 1:

H_f = 0,066 mca

K_1 = 4.948, adimensional

K_2 = 1,820, adimensional

K_3 = 1,918, adimensional

Q = 0,00027 en m³/s

D = 0,013843 en m

L = 11,60 en m

$$h_f = 4,948 \frac{0,00027^{1,820}}{0,013843^{1,918}} * 11,60 = 0,066 \text{ mca}$$

Estos resultados se encuentran en la fila No. 1 de la tabla No. LXI de resultados

Tabla LXI. **Resultados para ecuación empleando SPSS para tubería de cobre**

No.	Caudal (m ³ /S)	Diámetro (m)	Longitud (m)	Pérdida (m.c.a)
1	0,00027	0,013843	11,6	0,066
2	0,00030	0,013843	11,6	0,082
3	0,00033	0,013843	11,6	0,099
4	0,00037	0,013843	11,6	0,118
5	0,00038	0,013843	11,6	0,128
6	0,00040	0,013843	11,6	0,138
7	0,00047	0,013843	11,6	0,183
8	0,00060	0,013843	11,6	0,289
9	0,00064	0,013843	11,6	0,325
10	0,00070	0,013843	11,6	0,382

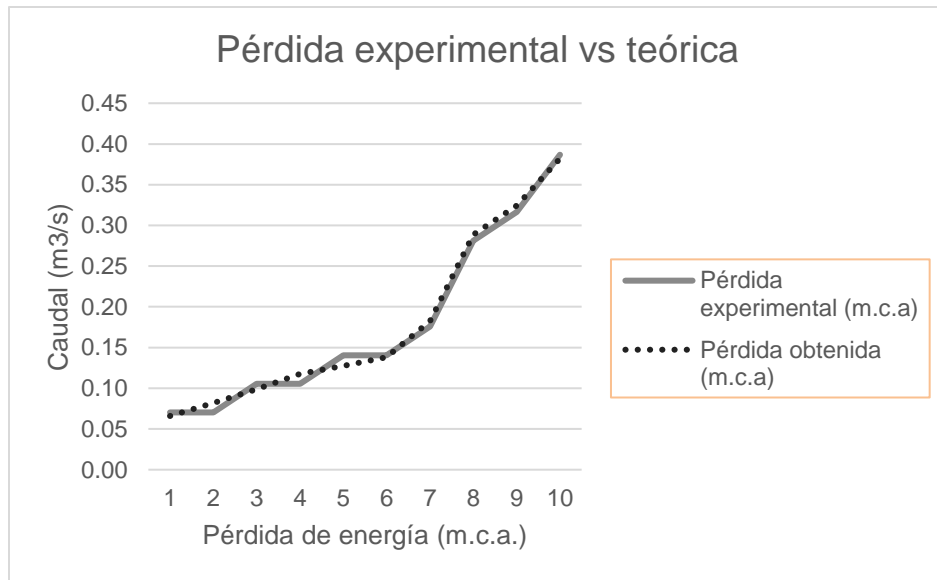
Fuente: elaboración propia.

Tabla LXII. **Comparación de pérdida de energía teórica versus pérdida experimental para tubería de cobre**

No.	Pérdida experimental (psi)	Pérdida experimental (m.c.a)	Pérdida obtenida (m.c.a)	Porcentaje de error
1	0,10	0,07	0,066	6,207
2	0,10	0,07	0,082	16,217
3	0,15	0,11	0,099	6,145
4	0,15	0,11	0,118	11,632
5	0,20	0,14	0,128	9,221
6	0,20	0,14	0,138	1,910
7	0,25	0,18	0,183	3,887
8	0,40	0,28	0,289	2,585
9	0,45	0,32	0,325	2,552
10	0,55	0,39	0,382	1,230

Fuente: elaboración propia.

Figura 51. **Comparación de resultados de pérdida experimental versus teórica en tubería de cobre**



Fuente: elaboración propia.

4.19.2. Tubería de material de hierro galvanizado

Para desarrollar la estimación de parámetros de tubería de cobre se empleó el proceso detallado en el numeral 4.11.

Tabla LXIII. **Estimación de parámetros para tubería de hierro galvanizado**

Parámetro	Estimación	Error típico	Intervalo de confianza al 95 %	
			Límite inferior	Límite superior
K	4,148	26099786,226	-61716183,324	61716191,619
K2	1,511	0,186	1,070	1,951
K3	1,447	1517071,627	-3587302,913	3587305,808

Fuente: elaboración propia.

$$h_f = 4.148 \frac{Q^{1.511}}{D^{1.447}} L$$

Los siguientes resultados descritos en la tabla LXIV se obtienen aplicando las ecuaciones de la misma forma que se realizó en el numeral 4.19.2.

Tabla LXIV. **Resultados para ecuación empleando SPSS para tubería de hierro galvanizado**

No	Caudal (m ³ /s)	Diámetro (m)	Longitud (m)	Pérdida (m.c.a)
1	0,0003	0,0158	11,6	0,108
2	0,0004	0,0158	11,6	0,143
3	0,0005	0,0158	11,6	0,256
4	0,0005	0,0158	11,6	0,220
5	0,0006	0,0158	11,6	0,242
6	0,0006	0,0158	11,6	0,374
7	0,0007	0,0158	11,6	0,309
8	0,0007	0,0158	11,6	0,357
9	0,0008	0,0158	11,6	0,578
10	0,0009	0,0158	11,6	0,459

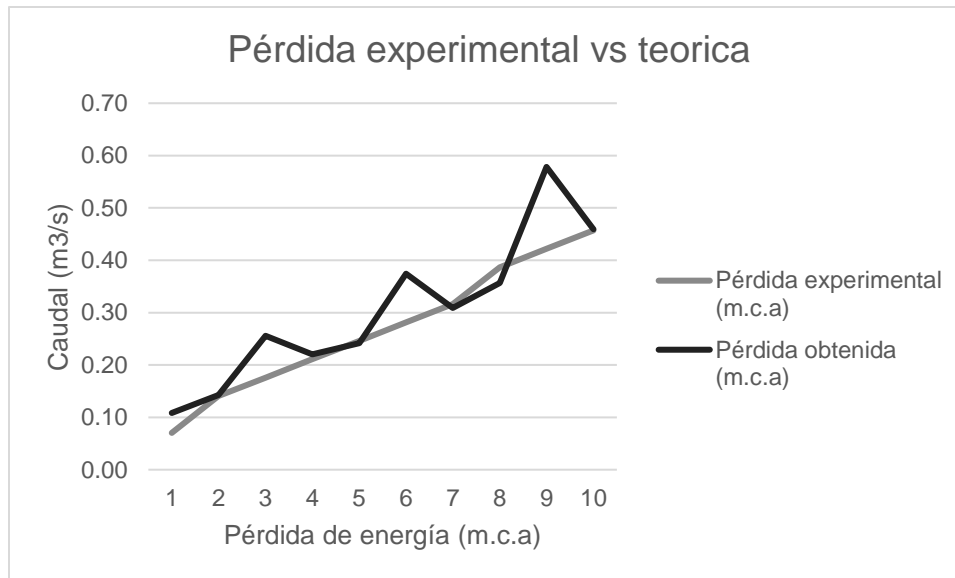
Fuente: elaboración propia.

Tabla LXV. **Comparación de pérdida de energía teórica versus pérdida experimental para tubería de hierro galvanizado**

No.	Pérdida experimental (psi)	Pérdida experimental (m.c.a)	Pérdida obtenida (m.c.a)	Porcentaje de error
1	0,10	0,07	0,108	54,102
2	0,20	0,14	0,143	1,490
3	0,25	0,18	0,256	45,627
4	0,30	0,21	0,220	4,499
5	0,35	0,25	0,242	1,837
6	0,40	0,28	0,374	33,091
7	0,45	0,32	0,309	2,399
8	0,55	0,39	0,357	7,775
9	0,60	0,42	0,578	37,077
10	0,65	0,46	0,459	0,443

Fuente: elaboración propia.

Figura 52. **Comparación de resultados de pérdida experimental versus teórica en tubería de hierro galvanizado**



Fuente: elaboración propia.

4.19.3. Tubería de material Pe-Al-Pe

Para desarrollar la estimación de parámetros de tubería de cobre se empleó el proceso detallado en el numeral 4.11.

Tabla LXVI. **Estimación de parámetros para tubería de Pe-Al-Pe**

Parámetro	Estimación	Error típico	Intervalo de confianza al 95 %	
			Límite inferior	Límite superior
K	3,885	7893235,611	-18664532,463	18664540,234
K2	2,004	0,124	1,710	2,298
K3	2,414	459355,103	-1086199,802	1086204,631

Fuente: elaboración propia.

Modelo empleando los coeficientes obtenidos en el software de SPSS:

$$h_f = 3,885 \frac{Q^{2,004}}{D^{2,414}} L$$

Los siguientes resultados de la tabla LXVII se obtienen aplicando las ecuaciones de la misma forma que se realizó en el numeral 4.19.2.

Tabla LXVII. **Resultados para ecuación empleando SPSS para tubería de Pe-Al-Pe**

No	Caudal (m3/s)	Diámetro (m)	Longitud (M)	Pérdida (m.c.a)
1	0,00023	0,012	11,60	0,103
2	0,00027	0,012	11,60	0,134
3	0,00030	0,012	11,60	0,170
4	0,00033	0,012	11,60	0,210
5	0,00037	0,012	11,60	0,254
6	0,00040	0,012	11,60	0,303
7	0,00042	0,012	11,60	0,334
8	0,00043	0,012	11,60	0,356
9	0,00045	0,012	11,60	0,378
10	0,00046	0,012	11,60	0,401

Fuente: elaboración propia.

Tabla LXVIII. **Comparación de pérdida de energía teórica versus pérdida experimental para tubería de Pe-Al-Pe**

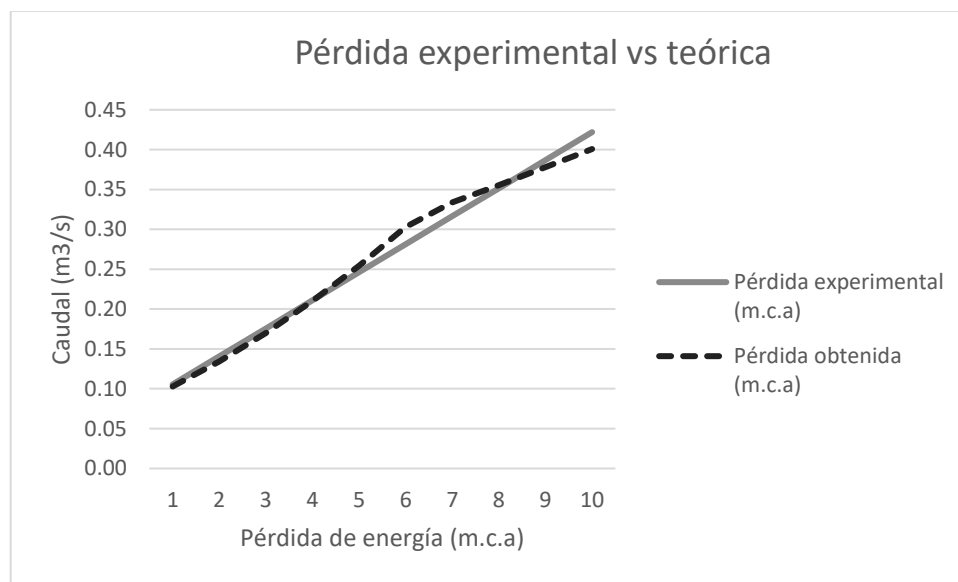
No.	Pérdida experimental (psi)	Pérdida experimental (m.c.a)	Pérdida obtenida (m.c.a)	Porcentaje de error %
1	0,15	0,11	0,103	2,515
2	0,20	0,14	0,134	4,453
3	0,25	0,18	0,170	3,213
4	0,30	0,21	0,210	0,383
5	0,35	0,25	0,254	3,356
6	0,40	0,28	0,303	7,665

Continuación de la tabla LXVIII.

7	0,45	0,32	0,334	5,532
8	0,50	0,35	0,356	1,118
9	0,55	0,39	0,378	2,319
10	0,60	0,42	0,401	5,023

Fuente: elaboración propia.

Figura 53. **Comparación de resultados de pérdida experimental versus teórica en tubería de Pe-Al-Pe**



Fuente: elaboración propia.

4.20. Comparaciones de ecuaciones corregidas, modelo matemático de Vivian Orozco y experimental

A continuación se presentan las comparaciones:

4.20.1. Comparaciones de ecuaciones corregidas, modelo matemático de Vivian Orozco y experimental para tubería de cobre

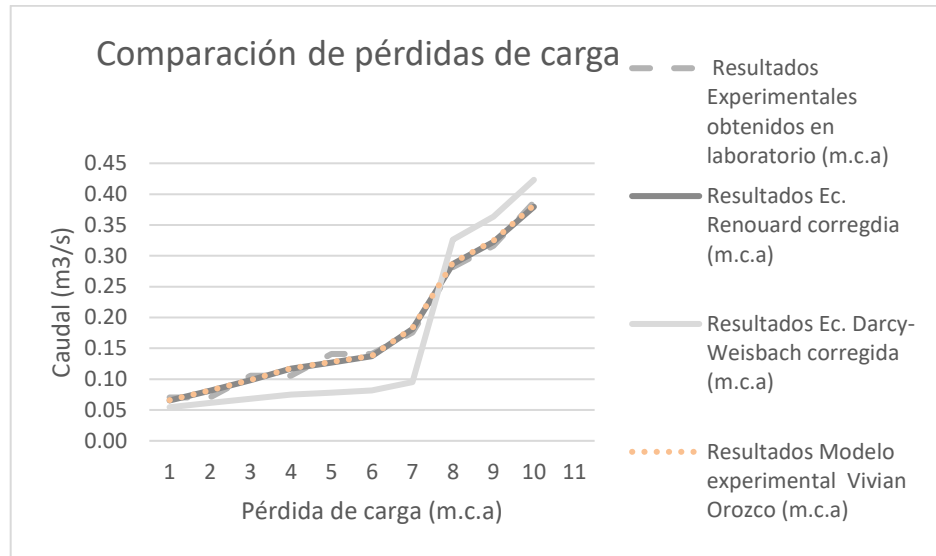
Se presentan en la siguiente tabla:

Tabla LXIX. Resultados de comparaciones en ecuaciones corregidas, experimentales y modelo matemático para tubería de cobre

No.	Resultados Experimentales obtenidos en laboratorio (m.c.a)	Resultados Ec. Renouard corregida (m.c.a)	% error	Resultados Ec. Darcy-Weisbach corregida (m.c.a)	% error	Resultados Modelo experimental Vivian Orozco (m.c.a)	% error
1	0,07	0,065	6,90	0,0545007	22,50	0,066	6,21
2	0,07	0,081	15,40	0,06132208	12,80	0,082	16,22
3	0,11	0,098	6,80	0,06814346	35,40	0,099	6,15
4	0,11	0,117	10,87	0,07496484	28,93	0,118	11,63
5	0,14	0,127	9,85	0,07834037	44,30	0,128	9,22
6	0,14	0,137	2,60	0,08178622	41,85	0,138	1,91
7	0,18	0,181	3,16	0,09535865	45,76	0,183	3,89
8	0,28	0,287	1,87	0,32587904	15,85	0,289	2,58
9	0,32	0,322	1,84	0,36350211	14,87	0,325	2,55
10	0,39	0,379	1,91	0,42320675	9,42	0,382	1,23

Fuente: elaboración propia.

Figura 54. **Comparación pérdida de carga en tubería de cobre**



Fuente: elaboración propia.

4.20.2. **Comparaciones de ecuaciones corregidas, modelo matemático de Vivian Orozco y experimental para tubería de hierro galvanizado**

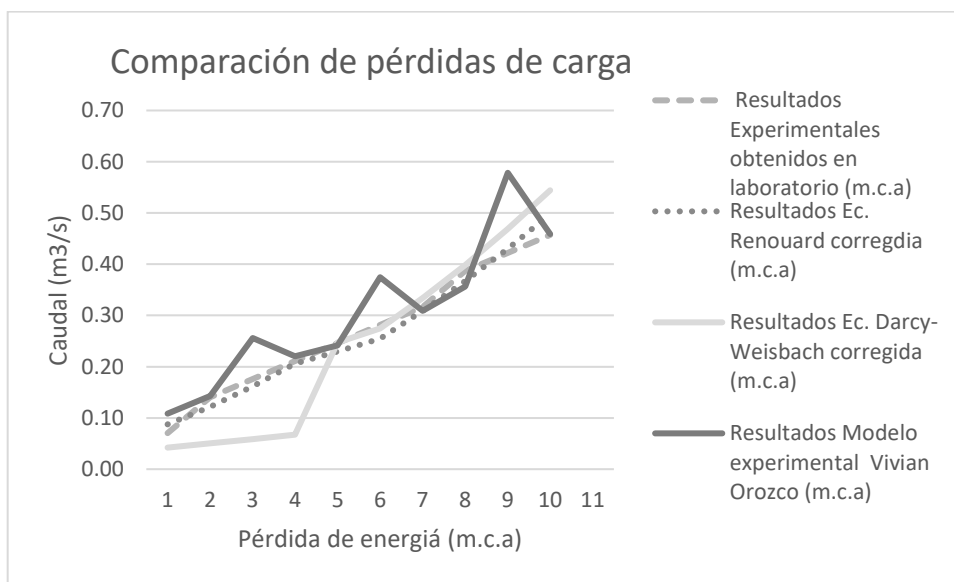
La tabla y figura correspondientes se presentan en la siguiente página:

Tabla LXX. **Resultados de comparaciones en ecuaciones corregidas, experimentales y modelo matemático para tubería de hierro galvanizado**

No.	Resultados Experimentales obtenidos en laboratorio (m.c.a)	Resultados Ec. Renouard corregida (m.c.a)	% error	Resultados Ec. Darcy-Weisbach corregida (m.c.a)	% error	Resultados Modelo experimental Vivian Orozco (m.c.a)	% error
1	0,07	0,087	24,40	0,042	40,20	0,108	54,10
2	0,14	0,122	13,35	0,050	64,15	0,143	1,49
3	0,18	0,161	8,24	0,059	66,52	0,256	45,63
4	0,21	0,206	2,47	0,067	68,10	0,220	4,50
5	0,25	0,230	6,66	0,247	0,46	0,242	1,84
6	0,28	0,255	9,38	0,275	2,35	0,374	33,09
7	0,32	0,309	2,42	0,334	5,47	0,309	2,40
8	0,39	0,367	5,04	0,398	3,00	0,357	7,78
9	0,42	0,430	1,98	0,469	11,05	0,578	37,08
10	0,46	0,498	8,91	0,544	19,06	0,459	0,44

Fuente: elaboración propia.

Figura 55. **Comparación de pérdida de carga en tubería de hierro galvanizado**



Fuente: elaboración propia.

4.20.3. Comparaciones de ecuaciones corregidas, modelo matemático de Vivian Orozco y experimental para tubería de Pe-Al-Pe

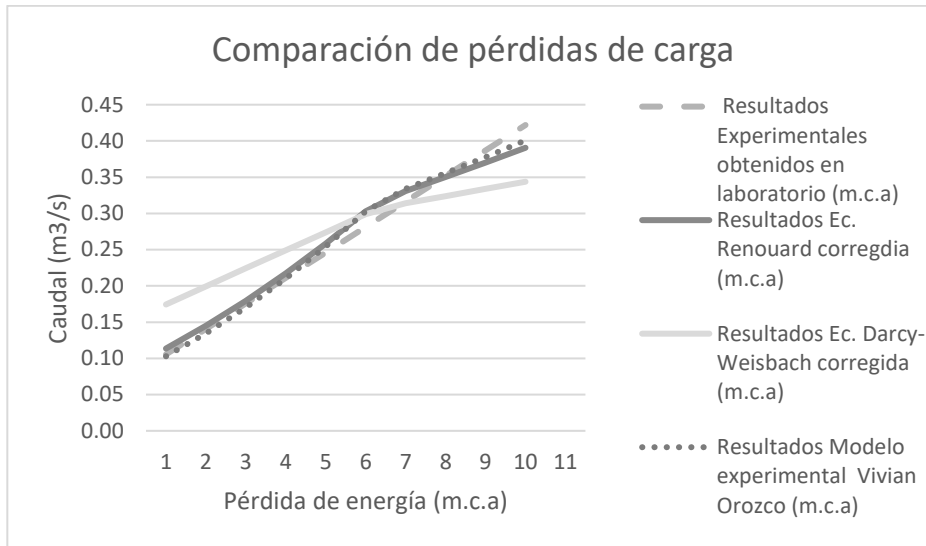
Las comparaciones de ecuaciones corregidas se presentan a continuación:

Tabla LXXI. **Resultados de comparaciones en ecuaciones corregidas, experimentales y modelo matemático para tubería de Pe-Al-Pe**

No.	Resultados Experimentales obtenidos en laboratorio (m.c.a)	Resultados Ec. Renouard corregida (m.c.a)	% error	Resultados Ec. Darcy-Weisbach corregida (m.c.a)	% error	Resultados Modelo experimental Vivian Orozco (m.c.a)	% error
1	0,11	0,114	7,64	0,174	65,27	0,103	2,51
2	0,14	0,145	2,94	0,199	41,70	0,134	4,45
3	0,18	0,179	2,04	0,224	27,52	0,170	3,21
4	0,21	0,217	3,01	0,249	18,07	0,210	0,38
5	0,25	0,258	5,02	0,274	11,31	0,254	3,36
6	0,28	0,303	7,66	0,299	6,27	0,303	7,66
7	0,32	0,331	4,58	0,314	0,82	0,334	5,53
8	0,35	0,350	0,37	0,324	7,90	0,356	1,12
9	0,39	0,370	4,29	0,334	13,71	0,378	2,32
10	0,42	0,391	7,44	0,344	18,53	0,401	5,02

Fuente: elaboración propia.

Figura 56. **Comparación de pérdida de carga en tubería de Pe-Al-Pe**



Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

1. Al comparar los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio con los resultados de las ecuaciones teóricas de Renouard y Darcy-Weisbach, se observa que hay una diferencia considerable en el resultado, por lo que se concluye que es necesario corregir dichas ecuaciones.
2. Para la tubería de cobre el factor de corrección (K), obtenido para la ecuación de Renouard, es igual a 0,69, el cual reduce el error a 1,84 % como se midió en la tabla de comparación LXIX; y para la ecuación de Darcy-Weisbach 0,008 reduce el error a 9,42 % descrito en la tabla LXIX.
3. Para la tubería de hierro galvanizado el factor de corrección (K), obtenido para la ecuación de Renouard, es igual 1,161, el cual reduce el error a 1,98 % como se midió en la tabla de comparación LXX; y para la ecuación de Darcy-Weisbach 0,006, el cual reduce el error a 0,46 % descrito en la tabla LXX.
4. Para la tubería de Pe-Al-Pe el factor de corrección (K), obtenido para la ecuación de Renouard, es igual a 0,766, el cual reduce el error a 0,82 % como se midió en la tabla de comparación LXXI; y para la ecuación de Darcy-Weisbach 0,027, el cual reduce el error a 0,37 % descrito en la tabla LXXI.
5. Al realizar las comparaciones de los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio, se determinó que la tubería de cobre genera menor pérdida

de energía por fricción, seguido de la tubería de Pe-Al-Pe y por último la tubería de hierro galvanizado.

6. A partir del procesamiento de los datos obtenidos en el laboratorio utilizando el software SPSS, se obtuvieron los siguientes modelos experimentales:

Ecuación experimental para tubería de cobre de Vivian Orozco:

$$H_f = 4,948 * Q^{1,820} / D^{1,918} * L$$

Ecuación experimental para tubería de hierro galvanizado de Vivian Orozco:

$$H_f = 4,148 * Q^{1,511} / D^{1,447} * L$$

Ecuación experimental para tubería de Pe-Al-Pe de Vivian Orozco:

$$H_f = 3,885 * Q^{2,004} / D^{2,414} * L$$

7. Al realizar la comparación para la tubería de cobre se observaron los siguientes promedios de errores. La ecuación de Renouard corregida presenta un promedio de error de 6,12 %, la ecuación experimental de Vivian Orozco 6,16 % y la ecuación de Darcy-Weisbach corregida 27,17 %.

Para la tubería de hierro de galvanizado la ecuación de Renouard corregida presenta un promedio de error de 8,28 %, la ecuación

experimental de Vivian Orozco 18,83 % y la ecuación de Darcy-Weisbach corregida 28,04 %.

Para la tubería de Pe-Al-Pe la ecuación de Renouard corregida presenta un promedio de error de 4,50 %, la ecuación experimental de Vivian Orozco 3,56 % y la ecuación de Darcy-Weisbach corregida 21,11 %.

RECOMENDACIONES

1. Realizar los aforos es necesario tener el ingreso del flujo constante y realizar la medición de una manera rápida, debido al mecanismo de funcionamiento del sistema del compresor, el mismo no puede mantener el flujo permanente por periodos largos de tiempo, ya que es un sistema que debe recargarse al perder el volumen de aire en su depósito.
2. Revisar que los manómetros sean de rango pequeño para que no presenten variaciones significativas al realizar las mediciones de presiones, al ingresar el flujo al sistema, así como a la salida del flujo, para tener una correcta lectura de pérdidas de presiones en el sistema.
3. Verificar las condiciones y calidad de aire, ya que son importantes debido a que estas entran en el sistema y pueden provocar contaminación en el sistema, afectando las tuberías internas y disminuyendo el tiempo de vida de las mismas. Es necesario controlar la temperatura del ambiente, para tener una densidad de aire comprimido particular.
4. Medir el caudal es necesario tener el medidor de volumen de flujo en condiciones óptimas, así como se recomienda dar mantenimiento preventivo periódico al medidor de volumen de flujo para evitar lecturas de caudal erróneas, así como seguir las especificaciones de diseño del circuito para garantizar una lectura correcta.

5. Dar a conocer los resultados de esta investigación a los estudiantes del curso de hidráulica e implementar este ensayo en el programa de prácticas del curso.

BIBLIOGRAFÍA

1. CARNICER, Enrique. *Aire comprimido teoría y cálculo de las instalaciones*. Barcelona, España: Paraninfo, 1977. 296 p.
2. LÓPEZ SOPEÑA, José Emilio. *Manual de instalaciones de GLP*. Madrid, España: CEPESA, Opción K, 2001. 299 p.
3. MOTT, Robert. *Mecánica de fluidos aplicada*. 6a ed. México: Pearson Educación, 2006. 644 p.
4. PÉREZ, Carlos. *Manual de laboratorio neumático*. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, 2001.
5. RODRÍGUEZ GUTIÉRREZ, Ervin Joel. *Diseño de la línea de aire comprimido para herramienta neumática en la empresa Turboservicios de C.A., S.A.* Trabajo de graduación de Ing. Mecánica. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2005. 105 p.
6. STEETER, Víctor. *Mecánica de fluidos*. 6a ed. México: McGraw-Hill, 2000. 434 p.
7. _____. *Mecánica de fluidos*. 9a ed. México: McGraw-Hill, 2006. 741 p.

