

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA AMAZONÍA PERUANA

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

TESIS

**“DISEÑO, CONSTRUCCIÓN E INSTALACIÓN DE UN EQUIPO DE
REYNOLDS PARA SU USO EN OPERACIONES UNITARIAS”**

PARA OPTAR EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

AUTORES

BACH. JEAN PAUL ENCINAS CHONG

BACH. ROCÍO DEL PILAR DÁVILA DÍAZ

ASESOR

ING. OSCAR ALBERTO VÁSQUEZ GIL

IQUITOS – PERÚ

2011



UNAP

Facultad de **Ingeniería Química**



ACT

En la ciudad de Iquitos, a las... *diez y quince am.* del primer día del mes de diciembre del año dos mil doce, en el Auditorio de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional de la Amazonía Peruana, se dio inicio al acto de Sustentación Pública de la tesis titulada: **"DISEÑO, CONSTRUCCIÓN E INSTALACIÓN DE UN EQUIPO DE REYNOLDS PARA SU USO EN EL LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS DE LA FIQ-UNAP"**, presentada por los bachilleres: **JEAN PAUL ENCINAS CHONG y ROCÍO DEL PILAR DÁVILA DÍAZ** para optar el **TÍTULO PROFESIONAL de INGENIERO QUÍMICO** que otorga la UNAP, de acuerdo a la Ley 23733 y el Estatuto General de la Universidad Nacional de la Amazonía Peruana.

El Jurado Calificador nombrado por la Dirección de Escuela de Formación Profesional, está integrado por los siguientes catedráticos:

- | | |
|---|-------------------|
| ING. RAFAEL TRIGOSO VÁSQUEZ, Mgr. | Presidente |
| ING. COCLE RAFAEL CUZCANO VILLALOBOS | Miembro |
| ING. JORGE CORNEJO ORBE | Miembro |

Luego de haber escuchado con mucha atención la exposición y formuladas las preguntas respectivas las que fueron respondidas en forma *satisfactoria*, el Jurado Calificador -previa deliberación- llegó a las siguientes conclusiones:

1º El Informe ha sido: *aprobado* Por: *unanimidad*

Con calificación de: *Buena*

2º Observaciones: *en hoja aparte*

Siendo las *once y media am.* Se dio por terminado el acto, felicitando a los sustentantes por sus exposición.

[Signature]
ING. RAFAEL TRIGOSO VÁSQUEZ, Mgr.
Presidente

[Signature]
ING. COCLE RAFAEL CUZCANO VILLALOBOS
Miembro

[Signature]
ING. JORGE CORNEJO ORBE
Miembro

I. ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE CONTENIDO	I
INTRODUCCIÓN	II
ANTECEDENTES	III
OBJETIVOS	IV
JUSTIFICACIÓN	V
CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO	1
1.1. DEFINICIONES Y PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS	1
1.1.1. DEFINICIONES	1
1.1.2. PROPIEDADES	1
1.1.2.1. Propiedades internas o termodinámicas	2
1.1.2.2. Propiedades externas o mecánicas	5
1.1.2.3. Propiedades extensivas	10
1.1.2.4. Propiedades intensivas	10
1.1.2.5. Propiedades específicas	10
1.2. LEY DE NEWTON DE LA VISCOSIDAD	11
1.3. MOVIMIENTO DE FLUIDOS	13
1.3.1. FLUJO LAMINAR	13
1.3.2. FLUJO ESTACIONARIO	14
1.3.3. FLUJO TURBULENTO	14
1.3.4. FLUJO ROTACIONAL E IRROTACIONAL	15
1.3.5. FLUJO VARIABLE O NO PERMANENTE	15
1.3.6. FLUJO UNIFORME	15
1.4. NÚMERO DE REYNOLDS	16
1.5. ECUACIÓN DE CONTINUIDAD	18
1.6. ECUACIÓN GENERAL DE ENERGÍA	20
1.6.1. PÉRDIDA DE ENERGÍA DEBIDO A LA FRICCIÓN Y ACCESORIOS	23

1.6.1.1.	Pérdidas de energía debido a la fricción	23
1.6.1.2.	Pérdidas debido a los accesorios	25
1.7.	DESCRIPCIÓN DEL DISEÑO DEL EQUIPO DE REYNOLDS	28
1.8.	APLICACIONES DE LA ECUACIÓN DE CONTINUIDAD AL EQUIPO DE REYNOLDS	32
1.9.	APLICACIONES DE LA ECUACIÓN GENERAL DE ENERGÍA AL EQUIPO DE REYNOLDS	34
1.10.	VARIABLES DE OPERACIÓN EN EL EQUIPO DE REYNOLDS	38
1.11.	CRITERIOS Y VARIABLES MÁS IMPORTANTES PARA EL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO DE REYNOLDS	39
CAPÍTULO II: CÁLCULOS DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN		43
2.1.	CONDICIONES INICIALES A CONSIDERARSE EN EL DISEÑO	43
2.2.	CÁLCULOS DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN	45
2.2.1.	CÁLCULO DEL RANGO DE CAUDAL AL QUE TRABAJA LA ELECTROBOMBA	45
2.2.2.	CÁLCULO DE LA VELOCIDAD PROMEDIO MÍNIMA DEL LÍQUIDO EN EL TUBO DE VIDRIO	45
2.2.3.	CÁLCULO DE LA LONGITUD DEL TUBO DE VIDRIO	46
2.2.4.	CÁLCULO DE LA ALTURA MÁXIMA DE PRESIÓN EN EL PUNTO DE INYECCIÓN DEL COLORANTE	46
CAPÍTULO III: CONSTRUCCIÓN E INSTALACIÓN DEL EQUIPO		55
3.1.	MATERIALES EMPLEADOS	55
3.2.	ESPECIFICACIÓN DE LOS COMPONENTES PRINCIPALES DEL EQUIPO	56
3.2.1.	TANQUE RESERVORIO	56
3.2.2.	LÍNEA DE PURGA	57
3.2.3.	LÍNEA DE SUCCIÓN DE LA ELECTROBOMBA	57

3.2.4.	ELECTROBOMBA	58
3.2.5.	TRAMO CD	58
3.2.6.	LÍNEA DE RETORNO D_1D_2	59
3.2.7.	TRAMO D_3E	59
3.2.8.	LÍNEA DE RETORNO $E_1 E_2$	60
3.2.9.	TRAMO $E_3 F$	60
3.2.10.	RECIPIENTE DE COLORANTE	61
3.2.11.	LÍNEA DE INYECCIÓN DE COLORANTE	61
3.2.12.	INSTALACIÓN ELÉCTRICA	62
3.2.13.	ESTRUCTURA METÁLICA	62
3.3.	DISPOSICIÓN ADECUADA DEL EQUIPO EN EL LABORATORIO	62
3.4.	DESPIECE DEL EQUIPO	63

CAPÍTULO IV: EVALUACIÓN DE LAS VARIABLES DE FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO **68**

4.1.	DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO	68
4.2.	INSTRUCCIONES PARA EL FUNCIONAMIENTO Y CÁLCULO DE LAS VARIABLES DE OPERACIÓN DEL EQUIPO	70
4.3.	HIGIENE Y SEGURIDAD INDUSTRIAL	75
4.4.	ENSAYOS Y PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO	75
4.5.	CÁLCULOS Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS	78

CAPÍTULO V: ANÁLISIS DE COSTO	82
5.1. COSTO DE DISEÑO	82
5.2. COSTO DE CONSTRUCCIÓN E INSTALACIÓN	82
5.3. COSTO DE MATERIALES	83
5.4. OTROS COSTOS	85
5.5. COSTO TOTAL	85
CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	86
6.1. CONCLUSIONES	86
6.2. RECOMENDACIONES	87
BIBLIOGRAFÍA	88
ANEXOS	90
ANEXO 1: Curvas de operación de las tres electrobombas	91
ANEXO 2: Característica del flujo laminar, correspondiente a la primera prueba	92
ANEXO 3: Característica del flujo transitorio, correspondiente a la tercera prueba	93
ANEXO 4: Característica del flujo turbulento, correspondiente a la cuarta prueba	94
ANEXO 5: Vista del equipo, indicando algunos de sus componentes principales	95
ANEXO 6: Vista del equipo, indicando la línea de inyección y el recipiente de colorante	96
ANEXO 7: Vista del equipo, indicando el tubo de vidrio, punto de descarga y el recipiente para recepción del líquido	97

DEDICATORIA

A:

Dios, por estar siempre conmigo en cada paso que doy, por fortalecer mi corazón e iluminar mi mente y por haber puesto en mi camino a aquellas personas que han sido mi soporte y compañía durante todo el periodo de estudio.

Mi esposo Rafael, por darme apoyo infinito y motivarme para que pudiera lograr mis sueños, te amo.

Mispadres Tito y Mercedes, por darme la vida, quererme mucho, creer en mí y porque siempre me apoyaron. Gracias por darme una carrera para mi futuro, todo esto se lo debo a Uds.

Mis abuelos Mercedes, Prudencio, Demetrio y Natividad, mis ángeles, gracias por quererme con ese amor único, siempre estarán presentes en mí, esto también se lo debo a ustedes.

Mis hermanos, Luis Miguel, Paolo, Jhuliana y Rubí, por ese cariño que sólo nosotros entendemos, por estar conmigo y apoyarme siempre, los quiero mucho.

Mi sobrinita hermosa, Yarely, por iluminar nuestros días con tu mágica sonrisa.

Para mi ángel, mi hermanita, Paola Melissa, porque siempre estás junto a mí, aún están intactos los recuerdos de los momentos vividos junto a ti, te querré por siempre.

Para mis hermanos, confidentes y amigos del FRU, con Uds. estos años de estudio fueron inolvidables, llenos de anécdotas desesperantes y a la vez graciosas, mil gracias por hacerme más fuerte cada día y por considerarme parte de Uds., son mi ejemplo de superación, Dios los bendiga siempre.

Rocío.

DEDICATORIA

A Dios Padre y a mi Querida Madre Elvira Chong, todo se los debo por sus apoyo incondicional e iluminar mi camino, muchas gracias.

Jean.

II. INTRODUCCIÓN

La naturaleza del flujo en un conducto cerrado, puede ser investigada haciendo circular agua u otro líquido incoloro por un tubo de vidrio; cuando la velocidad del fluido es baja, el fluido tiende a **moverse en capas** y se dice, por lo tanto, que **el flujo es laminar**. Cuando se introduce un líquido coloreado en el centro de una corriente con flujo laminar, el líquido coloreado tiende a permanecer en el centro de la corriente. Por el contrario, cuando la velocidad del fluido es alta, el fluido tiende a realizar un **movimiento desordenado**, denominándose **flujo turbulento**, que, cuando se introduce un líquido coloreado tiende a moverse en distintas direcciones.

En el presente trabajo de tesis, se plantea una revisión específica sobre los principios de la mecánica de fluidos, aplicados a los diferentes tipos de regímenes de flujo de fluidos incompresibles en canales cerrados. La experimentación permite determinar el régimen de flujo para un fluido incompresible en un canal cerrado, esto mediante la obtención de valores para el número de Reynolds, sujeto a las condiciones bajo las cuales se realicen. Teniendo conocimiento de este criterio, es que en el presente trabajo de tesis, se ha diseñado, construido e instalado un equipo de Reynolds para su uso en operaciones unitarias, este equipo ha sido ideado con el propósito de servir como ayuda didáctica a docentes y estudiantes de la FIQ-UNAP en temas relacionados al transporte de líquidos en conductos cerrados, permitiendo reproducir el experimento de Osborne Reynolds (sección 1.4 del informe final), mediante el cual pudo observar la existencia del flujo laminar, del flujo transitorio y del flujo turbulento para un mismo fluido que es transportado bajo diferentes condiciones; de esa forma el estudiante podrá observar de una manera muy práctica las características principales de estos tres tipos de flujos, y a su vez asociarlos con los conocimientos teóricos adquiridos previamente.

Como se puede ver en la sección 1.7 del informe final, el equipo de Reynolds cuenta con una serie de componentes, pero quizá el componente más importante es el tubo de vidrio, pues es en este donde se reproduce el experimento de Osborne Reynolds y se

realizan las mediciones de la velocidad, el caudal y el número de Reynolds de un fluido en cada uno de los tres regímenes de flujo mencionados.

En forma paralela a las mediciones, se puede observar las características para cada uno de los tres regímenes de flujo.

El equipo de Reynolds, se diseñó y construyó haciendo la aplicación de los principios básicos de la mecánica de fluidos, mediante los cuales se determinaron las variables de operación y las variables de diseño y construcción, para esto véanse las secciones 1.8, 1.9, 1.10 y 1.11.

III. ANTECEDENTES

En la Facultad de Ingeniería Química (FIQ) de la Universidad Nacional de la Amazonía Peruana (UNAP), desde el año 1984 se vienen construyendo equipos, mediante los proyectos de tesis que tienen aplicación directa del curso de mecánica de fluidos, como son los siguientes casos:

- **(RAMÍREZ N. 1984)**, ha realizado un trabajo de tesis sobre “**Diseño, Construcción e Instalación de un Equipo de Transporte de Fluidos para el Laboratorio de Procesos y Operaciones Unitarias de la FIQ-UNAP**”, Iquitos-Perú, el cual consta de tramos de tubería recta, codos, válvulas, 1 electrobomba de 1Hp y medidores de flujo como el Venturímetro, rotámetro y el de placa y orificio. Este equipo ha sido diseñado con el fin de que se realicen las prácticas de laboratorio en el curso de mecánica de fluidos, en la cual se hacen uso de las ecuaciones de continuidad y balance general de energía (ampliación de la ecuación de Bernoulli), para el cálculo de pérdidas de carga en tramos de tubería recta y accesorios.

- **(SALAS F, LOVERA M. 2002)**, en la **FIQ-UNAP**, Iquitos-Perú, han realizado la tesis de “**Diseño, Construcción e Instalación de un Sistema para Medición de Caudal Utilizando el Tubo de Pitot**”, el cual consta de tramos de tubería recta, codos, 1 válvula de compuerta, 2 cilindros, un tubo de Pitot, un manómetro diferencial y 1 electrobomba de 2Hp. Las prácticas que se realizan en este sistema, consisten en la medición de las velocidades locales en una tubería de 3 pulgadas de diámetro, para esto se utiliza un tubo de Pitot el cual está conectado a un manómetro diferencial donde se capta la diferencia entre la presión dinámica y la presión estática. Por medio de la ecuación de Bernoulli, los autores de este trabajo, encontraron una ecuación que relaciona la velocidad local con el diferencial de presión, calculándose de esta forma la velocidad local. Después de medir cinco velocidades locales proceden a la integración gráfica de las mismas por medio de un modelo matemático que también dedujeron.

Eso con el fin de calcular la velocidad promedio que multiplicada al área de flujo permite calcular o medir el caudal.

- **(GRÁNDEZ A, GARCÍA R. 2002)**, en la **FIQ-UNAP**, Iquitos-Perú, han realizado la tesis de “**Diseño, Construcción e Instalación de un Sistema de Medición en Canal Abierto**”. Este equipo consta básicamente de un canal abierto de forma rectangular, a la salida del mismo se colocan placas rectangulares de diferentes dimensiones, las cuales sirven como vertederos. Las prácticas que se llevan a cabo en este equipo, consisten básicamente en la medición del caudal en un canal abierto de forma rectangular, para esto hace uso de una ecuación que relaciona el caudal con la altura del líquido en el vertedero rectangular. Este mismo procedimiento se realiza para cada una de las placas de diferentes tamaños.

Con respecto a estos tres trabajos de tesis, quizá en ninguno se haga mención específica sobre el experimento de Reynolds, sin embargo, el informe final de la tesis que se ha realizado debe tener la misma estructura que estos trabajos, pues es un trabajo de diseño y construcción. Además, en todos estos trabajos se tratan temas específicos de la mecánica de fluidos en canales cerrados, como la ecuación de continuidad y la ecuación general de energía, las cuales se han tenido en cuenta para deducir las ecuaciones que rigen el comportamiento de las variables de operación en el equipo de Reynolds.

- En la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Iberoamericana de México, **(RIOS G, MONTALVO S. 2003)**, han diseñado, construido y montado un equipo para la demostración del experimento de Osborne Reynolds. Este equipo consiste de un tubo de vidrio de 1” de diámetro, iluminado en su parte superior por una lámpara fluorescente, por el cual fluye agua regulada por medio de una válvula. Un colorante (violeta de genciana en solución) se mantiene en un recipiente y se inyecta en la corriente de agua mediante un tubo metálico insertado en el tubo de vidrio. Posteriormente la corriente de agua se recoge en un tanque de 21 centímetros de diámetro, provisto de un medidor de nivel de tubo de vidrio.

Este trabajo, es el antecedente que tiene relación directa con el que se realizó, pues poseen casi los mismos componentes principales y se realizan las mediciones de las mismas variables de operación (velocidad, caudal y número de Reynolds).

IV. OBJETIVOS

A. GENERAL

- Diseñar, construir e instalar un equipo de Reynolds para el Laboratorio de Procesos y Operaciones Unitarias de la FIQ-UNAP

B. ESPECÍFICOS

- Determinar variables de diseño y construcción del equipo.
- Seleccionar los materiales adecuados para la construcción del equipo.
- Construir el equipo e instalarlo.
- Determinar y optimizar las variables de operación del equipo.
- Elaborar el instructivo para el funcionamiento y cálculo de las variables de operación del equipo.
- Elevar el nivel académico de los alumnos de la FIQ-UNAP.

V. JUSTIFICACIÓN

Actualmente el Laboratorio de procesos y Operaciones de la FIQ-UNAP, no cuenta con un equipo en el cual se pueda realizar el experimento de Osborne Reynolds, lo cual hace que los alumnos de los últimos niveles no puedan realizar todas las prácticas que corresponden a los cursos de mecánica de fluidos y operaciones unitarias. De esta forma en el presente trabajo de tesis se presenta la propuesta de diseñar, construir e instalar un equipo de Reynolds para su uso en operaciones unitarias a fin de determinar el número de Reynolds y con ello demostrar visual y matemáticamente los flujos laminar, transitorio y turbulento.

Existe la mística de profesores y estudiantes de volver a tener una facultad monolítica que buscan permanentemente la superación académica, intelectual y moral. A todo este esfuerzo se presenta ciertas dificultades para poder ofrecer una preparación integral y eficiente al futuro profesional.

En consecuencia se requiere ampliar las prácticas académicas, teniendo en cuenta la necesidad de más equipos de laboratorio y su continua operatividad en el desarrollo de las prácticas estudiantiles, precedidas de las cátedras teóricas.

El ingeniero debe estar preparado para proyectar, desarrollar, dirigir y supervisar tanto los procesos, la construcción y la fabricación eficientemente con economía y seguridad de conciencia ambiental.

En el mismo orden de ideas, mediante el presente trabajo de tesis, se pretende concientizar a los estudiantes de la FIQ-UNAP para diseñar, construir y equipar nuestro Laboratorio de Procesos y Operaciones Unitarias, ya que a través de este equipo, se pueda promover la investigación e iniciar el desarrollo de nuestra propia tecnología y de esta forma demostrar la capacidad de nuestros egresados y contribuir con el desarrollo de nuestra Amazonía.

CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO

1.1. DEFINICIONES Y PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS

1.1.1. DEFINICIONES

En general, la materia puede clasificarse por las formas físicas en que se presenta. Estas formas, conocidas como fases, son la sólida, la líquida y la de gas o vapor. Los **fluidos** comprenden las fases **líquida y gaseosa** (o de vapor) de la materia. **(PERY J. 2001)**.

Un fluido se define como una sustancia que cambia su forma continuamente siempre que esté sometida a un esfuerzo cortante, sin importar qué tan pequeño sea, y debido a su poca cohesión intramolecular carece de forma propia y adopta la forma del recipiente que lo contiene. **(SHAMES I. 1995)**.

Un fluido es una porción de materia incapaz de contrarrestar el efecto de fuerzas que producen deformaciones sin cambio de volumen. **(PERY J. 2001)**.

Un fluido es toda sustancia que se deforma continuamente cuando se le somete a un esfuerzo cortante por pequeño que este esfuerzo sea. Un fluido se diferencia de un sólido, debido a que cuando un sólido es empujado por una fuerza, ésta tendrá que ser no tan pequeña para empezar a deformarlo. **(UGARTE F. 1990)**

1.1.2. PROPIEDADES

Son las características descriptivas del estado de un fluido que identifica a dicho estado.

Estado. Se denomina de esta manera a cualquier situación particular en la que se encuentre un fluido y se distingue o identifica por los valores que poseen sus propiedades.

1.1.2.1. Propiedades internas o termodinámicas.

Son aquellas que para su cuantificación no requieren un marco de referencia y dependen de la situación molecular en la que se encuentra el fluido. Las propiedades internas están relacionadas entre sí, por ejemplo: densidad, el peso específico, la presión, la temperatura, el volumen específico, la viscosidad, etc.

Densidad. La densidad de un fluido, es el cociente que relaciona la masa y el volumen de dicha sustancia y se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$\rho = \frac{M_{\text{Fluido}}}{V_{\text{Fluido}}} \quad (1.1)$$

Donde:

ρ : Densidad del fluido (Kg/m³)

M_{Fluido} : Masa del fluido (Kg)

V_{Fluido} : Volumen del fluido (m³)

En el presente trabajo, se utiliza el Sistema Internacional de Unidades, es decir las unidades para la densidad deben ser Kilogramo (Kg) sobre metro cúbico (m³).

Peso específico. El peso específico de un fluido, es el cociente que relaciona el peso y el volumen de dicho fluido.

En los líquidos, el peso específico puede considerarse constante para las variaciones ordinarias de presión. (GEANKOPLIS. 1998)

El peso específico de un fluido se define mediante la siguiente ecuación:

$$\gamma = \frac{W_{\text{Fluido}}}{V_{\text{Fluido}}} \quad (1.2)$$

Donde:

γ : Peso específico del fluido (N/m³)

W_{Fluido} : Peso del fluido (N)

V_{Fluido} : Volumen del fluido (m³)

En el Sistema Internacional de Unidades, las unidades para el peso específico deben ser el Newton (N) sobre metro cúbico (m³).

Volumen específico. El volumen específico de una sustancia es el volumen ocupado por unidad de masa de la sustancia. Es la inversa de la densidad y no depende de la cantidad de materia.

Por ejemplo, dos pedazos de hierro de distinto tamaño tienen diferente peso y volumen, pero la densidad es igual y por ende el volumen específico de ambos será igual.

El volumen específico se simboliza por V_{esp} y se puede calcular mediante las siguientes ecuaciones:

$$V_{\text{esp}} = \frac{V_{\text{Sustancia}}}{M_{\text{Sustancia}}} \quad (1.3)$$

$$V_{\text{esp}} = \frac{1}{\rho} \quad (1.4)$$

Viscosidad. La viscosidad de un fluido es aquella propiedad que determina la cantidad de resistencia opuesta a las fuerzas cortantes. La viscosidad se debe primordialmente a las interacciones entre las moléculas del fluido.

En los líquidos, la viscosidad disminuye al aumentar la temperatura, pero no se ve afectada apreciablemente por las variaciones de la presión. (GEANKOPLIS. 1998)

En **un líquido** las moléculas tienen una movilidad limitada con fuerzas cohesivas grandes presentes entre las mismas. Esto se manifiesta en la propiedad del fluido que se ha llamado viscosidad. Un aumento en la temperatura disminuye la cohesión entre las moléculas (en promedio, se apartan más) y existe un decrecimiento en la “**pegajosidad**” del fluido, es decir, un descenso en la viscosidad. En un gas las moléculas tienen una gran movilidad y generalmente están apartadas, pues en contraste con un líquido existe poca cohesión entre ellas. Se puede predecir la viscosidad de la mayor parte de los fluidos; en algunos la viscosidad depende del trabajo que se haya realizado sobre ellos.

Entre algunos fluidos con viscosidades distintas se puede encontrar a la tinta de imprenta, las papillas de pulpa de madera y la salsa de tomate. Existe gran confusión respecto a las unidades que se utilizan para expresar la viscosidad; de ahí la importancia de utilizar las unidades adecuadas cuando se sustituyen los valores de la viscosidad en las fórmulas.

- **Viscosidad dinámica o absoluta.** Se define como el tiempo en que tarda, un fluido, en fluir a través de un tubo capilar a una determinada temperatura. Siendo muy utilizada a fines prácticos. La unidad de viscosidad dinámica en el Sistema Internacional es el Pascal por segundo (Pa.s) o también Newton por segundo sobre metro cuadrado (N.s/m^2), es decir kilogramo sobre metro-segundo (Kg/m.s). El poise es la unidad correspondiente en el Sistema Inglés (C.G.S) de unidades y tiene dimensiones de dina por segundo sobre centímetro cuadrado o de gramos sobre centímetro-segundo. El submúltiplo centipoise (cp), 10^{-2} poises, es la unidad más utilizada para expresar la viscosidad dinámica y esta situación parece que va a continuar durante algún tiempo. La relación entre el Pascal por segundo y el centipoise es: $1\text{Pa.s} = 1 \text{ N.s/m}^2 = 1 \text{ Kg/m.s} = 10^3\text{cp}$ y $1\text{cp} = 10^{-3} \text{ Pa.s}$. La viscosidad dinámica o absoluta se simboliza por μ
- **Viscosidad cinemática o relativa.** Es el cociente entre la viscosidad dinámica y la densidad. En el Sistema Internacional la unidad de viscosidad cinemática es el metro cuadrado sobre segundo (m^2/s).

En (C.G.S), la unidad correspondiente es el Stoke (St), con dimensiones de centímetro cuadrado sobre segundo y el centistoke (cSt) = 10^{-2} Stokes, que es el submúltiplo más utilizado.

La viscosidad cinemática o relativa se simboliza por ν y se puede calcular, mediante la siguiente ecuación:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1.5)$$

1.1.2.2. Propiedades externas o mecánicas.

Son aquellas que para su cuantificación requieren un marco de referencia. Por ejemplo: la velocidad, la energía cinética, el esfuerzo cortante, el esfuerzo normal, la energía potencial, la presión, etc.

Presión. En forma general, la presión es una magnitud física que mide la fuerza por unidad de superficie, y sirve para caracterizar como se aplica una determinada fuerza resultante sobre una superficie. La presión, se transmite con igual intensidad en todas las direcciones y actúa perpendicularmente a cualquier superficie plana. (UGARTE F. 1990)

En la figura 1.1, se puede observar que la fuerza F actúa en forma perpendicular sobre la superficie S , entonces la presión que ejerce la fuerza F sobre la superficie S se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$P = \frac{F}{A} \quad (1.6)$$

Donde:

P : Presión (N/ m²)

F : Fuerza (N)

A : Área de la superficie (m²)

En el Sistema Internacional, las unidades para la presión deben ser Newton (N) sobre metro cuadrado (m^2) o Pascal (Pa).

Téngase en cuenta que: $1\text{Pa} = 1\text{N}/\text{m}^2$

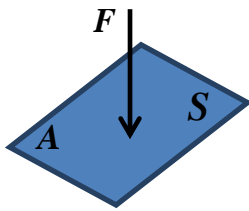


Figura 1.1. Fuerza perpendicular sobre la superficie S de área A

Fuente: (SHAMES I. 1995).

Presión atmosférica. Sobre la superficie de un líquido reina la presión del aire o gas que sobre ella existe. Esta presión puede adquirir un valor cualquiera en un recipiente cerrado; pero si el recipiente está abierto sobre la superficie libre del líquido reina la presión atmosférica, debido al peso de la columna de aire que gravita sobre el fluido.

La presión atmosférica se mide con un dispositivo llamado barómetro. La presión atmosférica varía con la temperatura y la altitud. La presión media normal a 0°C y al nivel del mar es de: $1.01325 \times 10^5 \text{ Pa} = 760 \text{ mm Hg} = 1\text{atm}$ y se llama atmósfera normal. En la técnica se utiliza mucho la atmósfera técnica, que es igual a 1bar. (MATAIX C 1982).

La presión atmosférica se simboliza como P_{atm}

Presión relativa o manométrica. Los dispositivos que sirven para medir la presión manométrica, se llaman manómetros, y están construidos de manera que miden presiones relativas con relación a la atmósfera local. (PERY J. 2001).

Por ejemplo, en la figura 1.2, se puede ver claramente que sobre el punto M (punto sumergido sobre un fluido), existe una columna de fluido h .

Entonces, la presión relativa o manométrica en el punto M se puede calcular de la siguiente forma:

$$P_{\text{man}} = \rho g h \quad (1.7)$$

Donde:

P_{man} : Presión manométrica (N/m^2)

g : Aceleración de la gravedad (m/s^2)

h : Altura de líquido (m)

Observe en la figura 1.2, que la presión manométrica en el punto M , se transmite con igual intensidad en todas las direcciones y como $\gamma = \rho g$, se le puede expresar en función del peso específico, es decir:

$$P_{\text{man}} = \gamma h \quad (1.8)$$

Presión absoluta. Con respecto a la figura 1.2, para hallar la presión absoluta con exactitud en el punto M , habrá que sumar la presión manométrica (debido a la columna de líquido de altura h) con la presión atmosférica local medida con un barómetro.

La presión absoluta se simboliza por P_{abs} y se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$P_{\text{abs}} = P_{\text{man}} + P_{\text{atm}} \quad (1.9)$$

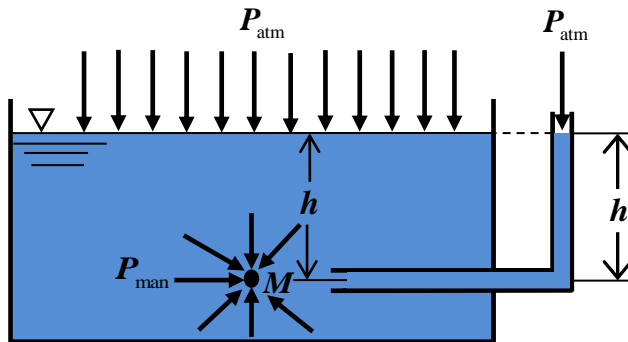


Figura 1.2. Esquema que muestra, como actúan la presión atmosférica y la presión manométrica, sobre un punto M sumergido en un fluido.

Fuente: (SHAMES I. 1995).

Nota.

En el caso de un gas, la presión se considera más como una propiedad interna o termodinámica, porque esta depende de la situación molecular del gas o está relacionada con otras propiedades como la temperatura y el volumen. Por ejemplo, si se hace uso de la ecuación de los gases ideales.

En el caso de un líquido, la presión se considera más como una propiedad externa o mecánica, porque para la cuantificación de esta se necesita un marco de referencia. Por ejemplo, si se desea calcular la presión en un punto que se encuentra sumergido a una determinada profundidad. Es decir, la presión depende de la posición.

Esfuerzo cortante. Es llamado también esfuerzo de cizalladura o esfuerzo tangencial. Cuando se aplica una fuerza F_t sobre una superficie S de área A , como se muestra en la figura 1.3, el esfuerzo cortante se define como:

$$\tau = \frac{F_t}{A} \tag{1.10}$$

El esfuerzo cortante se simboliza como τ

Las unidades en el (SI) son las mismas que de la presión

Donde:

τ : Esfuerzo cortante (N/ m²)

F_t : Fuerza tangencial a la superficie S (N)

A : Área de la superficie S (m²)

Esfuerzo normal. Con respecto a la figura 1.3, el esfuerzo normal se define como:

$$P_N = \frac{F_N}{A} \quad (1.11)$$

La ecuación (1.11), indica que el esfuerzo normal P_N sobre la superficie S , es el cociente que resulta de dividir la fuerza normal F_N con el área A de la misma superficie S . Véase la figura 1.3.

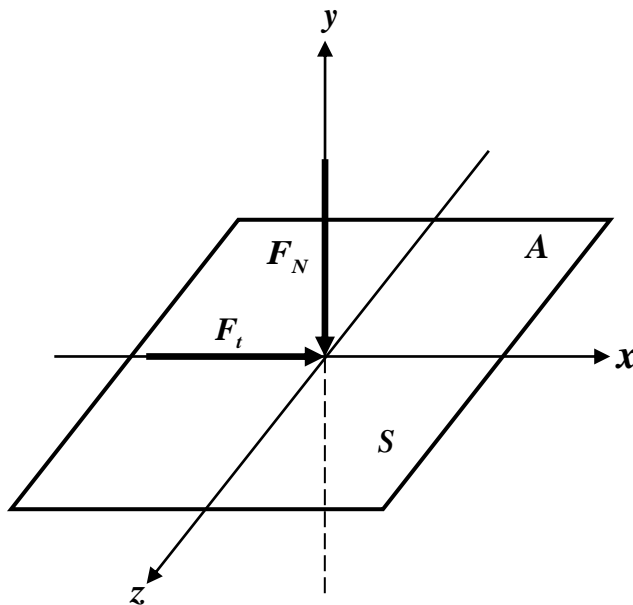


Figura 1.3. Esquema que muestra, como actúan el esfuerzo cortante y el esfuerzo normal sobre una superficie S de área A .

Fuente: (GUZMAN A. 1998).

1.1.2.3. Propiedades extensivas.

Son aquellas cuyo valor depende de la magnitud de la masa considerada. Por ejemplo: El volumen, la energía, el flujo (volumétrico, másico y molar), la cantidad de movimiento, etc.

Flujo. Se denomina así, en forma genérica, al movimiento de un fluido. En forma general el flujo se expresa como la relación de una variable extensiva con el tiempo. Por ejemplo: el flujo másico (Kg/s) es la relación de la masa con el tiempo, el flujo volumétrico o caudal (m³/s) es la relación del volumen con el tiempo y el flujo molar (moles/s) es la relación del número de moles con el tiempo.

1.1.2.4. Propiedades intensivas.

Son aquellas cuyo valor para un estado no cambia la magnitud de la masa considerada. Por ejemplo: la densidad, el peso específico, el volumen específico, etc.

1.1.2.5. Propiedades específicas.

Son las propiedades extensivas por unidad de masa o también por unidad de peso. Las propiedades específicas tienen cualidades similares a las propiedades intensivas, es decir son independientes de la magnitud de la masa considerada.

Por ejemplo, la energía potencial es una propiedad extensiva y su ecuación es $E_p = Mgz$. Entonces, las energías potenciales específicas por unidades de masa y de peso

serían $\frac{E_p}{M} = gz$ y $\frac{E_p}{Mg} = z$, respectivamente.

Note que las unidades en (SI) para las energías específicas por unidad de masa y unidad de peso son (m²/s²) y (m), respectivamente.

1.2. LEY DE NEWTON DE LA VISCOSIDAD

La figura 1.4, esquematiza cuando un fluido (líquido o gas) es sometido a la acción de un esfuerzo cortante.

Sea un fluido de viscosidad μ , que se encuentra inicialmente en reposo, entre dos placas planas paralelas de área A y separadas entre si por una distancia muy pequeña B .

Suponga que en el instante $t=0$, la placa superior se pone bruscamente en movimiento en la dirección x , con una velocidad constante igual a v_0 .

A medida que transcurre el tiempo el fluido gana cantidad de movimiento, y finalmente, para tiempos relativamente grandes, se establece una distribución de velocidad en régimen estacionario o estable. Es preciso aplicar una fuerza F para conservar el movimiento de la placa superior.

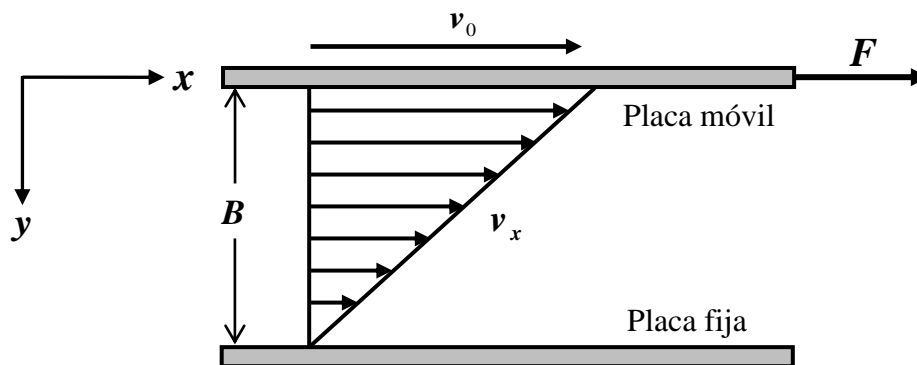


Figura 1.4. Esquema que muestra, cuando un fluido es sometido a un esfuerzo cortante

Fuente: (GUZMAN A. 1998).

La ley de Newton de la viscosidad establece que el esfuerzo cortante que se propaga a través del fluido es directamente proporcional a la gradiente negativa de la velocidad local, es decir:

$$\tau_{yx} = \frac{F_t}{A} \alpha \left(-\frac{dv_x}{dy} \right) \quad (1.12)$$

O también:

$$\tau_{yx} = \mu \left(-\frac{dv_x}{dy} \right) \quad (1.13)$$

Donde:

τ_{yx} : Esfuerzo cortante (N/ m²)

μ : Viscosidad del fluido (N.s/m²)

x, y : Coordenadas cartesianas de posición (m)

v_x : Velocidad local, en la dirección x (m/s)

$\left(-\frac{dv_x}{dy} \right)$: Gradiente negativa de la velocidad local (1/s)

De acuerdo a la (1.13) y a la figura 1.4, el esfuerzo cortante que la placa superior (placa móvil) comunica a la primera capa del fluido, está dada por:

$$\tau_{yx} \Big|_{y=0} = \frac{F}{A} \quad (1.14)$$

Este esfuerzo se transmite a través de capas de fluido, planas y paralelas, desde regiones de alta velocidad hacia regiones de baja velocidad (fluido adyacente a la placa fija). La distribución de velocidad en el seno del fluido es como se muestra en la figura 1.4, en ausencia de otras fuerzas (de presión, de gravedad, etc). La gradiente de velocidad se evalúa fácilmente como:

$$\frac{dv_x}{dy} = \frac{v_{x_2} - v_{x_1}}{y_2 - y_1} = \frac{0 - v_0}{B - 0} = -\frac{v_0}{B} \quad (1.15)$$

O también:

$$\left(-\frac{dv_x}{dy}\right) = \frac{v_0}{B} \quad (1.16)$$

Reemplazando la ecuación (1.16) en la ecuación (1.13), se tiene:

$$\tau_{yx} = \frac{\mu v_0}{B} \quad (1.17)$$

1.3. MOVIMIENTO DE FLUIDOS

La rama de la mecánica de fluidos que estudia el movimiento de fluidos, es la dinámica de fluidos. También, el movimiento de fluidos se refiere al desplazamiento en el espacio de las partículas de un fluido.

Como el flujo es una propiedad que determina el movimiento de un fluido, en el presente trabajo se ha visto conveniente dar a conocer los tipos de flujo.

1.3.1. FLUJO LAMINAR.

Es cuando las partículas fluidas se desplazan siguiendo trayectorias paralelas sin entrecruzarse unas con otras. (UGARTE F. 1990).

En el régimen laminar las partículas fluidas discurren según filetes paralelos, no existiendo componente transversal de la velocidad. El avance ordenado es tal que las partículas se mueven exactamente en **líneas rectas y paralelas y sin ninguna desviación**. Véase la figura 1.5. Entonces si se hecha un delgado filamento de colorante, este permanecerá tal cual sin difundirse. El flujo laminar está asociado con bajas velocidades. (UGARTE F. 1990).

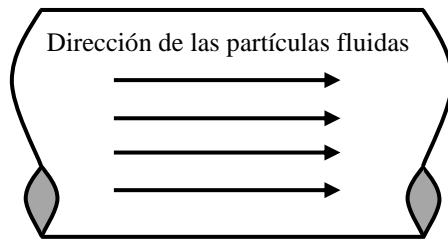


Figura 1.5. Flujo laminar, donde las partículas se mueven exactamente en líneas rectas y paralelas y sin ninguna desviación.

Fuente: (SHAMES I. 1995).

1.3.2. FLUJO ESTACIONARIO.

Este tipo de flujo se caracteriza porque las condiciones de velocidad de escurrimiento en cualquier punto no cambian con el tiempo, o sea que permanecen constantes con el tiempo, o bien, si las variaciones en ellas son tan pequeñas con respecto a los valores medios. Así mismo, en cualquier punto de un fluido con flujo permanente, no existen cambios en la densidad, presión o temperatura con el tiempo, es decir:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = 0, \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (1.18)$$

El flujo estacionario o permanente es más simple de analizar que el no permanente, por la complejidad que le adiciona el tiempo como variable independiente.

1.3.3. FLUJO TURBULENTO

El flujo turbulento consiste en un conjunto de torbellinos de diferentes tamaños, que coexisten en la corriente del fluido. Continuamente se forman torbellinos grandes, que se rompen en otros más pequeños, que a su vez se transforman en otros todavía menores, los cuales finalmente desaparecen. El tamaño del torbellino máximo es del mismo orden que la dimensión mínima de la corriente turbulenta. (OCON J, TOJO G. 1967). Véase la figura 1.6

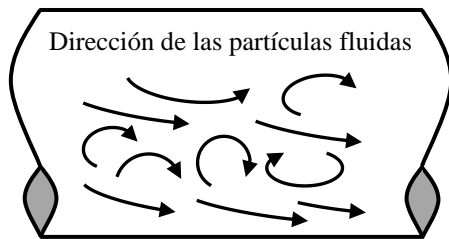


Figura 1.6. Flujo turbulento, donde las partículas fluidas forman un conjunto de torbellinos de diferentes tamaños, que coexisten en la corriente del fluido.

Fuente: (SHAMES I. 1995).

1.3.4. FLUJO ROTACIONAL E IRROTACIONAL

Es irrotacional cuando las partículas durante su desplazamiento no admiten ningún movimiento de rotación alrededor de algún eje, por lo tanto no se produce pares ni tensiones cortantes (es también flujo ideal). Es rotacional cuando las partículas rotan en torno a un eje que pasa por su centro de gravedad.

1.3.5. FLUJO VARIABLE O NO PERMANENTE

Se deduce que el flujo es variable o no permanente, cuando las propiedades como la densidad, la presión, la velocidad, la temperatura, etc, varían respecto al tiempo. Un ejemplo de este flujo, es cuando se realiza el drenaje de líquidos en tanques cilíndricos o cónicos. (OCON J, TOJO G. 1967).

1.3.6. FLUJO UNIFORME

Es aquel flujo en donde el módulo, la dirección y el sentido del vector velocidad no varían de un punto a otro. Es decir:

$$\frac{\partial v}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial v}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial v}{\partial z} = 0 \quad (1.19)$$

1.4. NÚMERO DE REYNOLDS

Los diferentes regímenes de flujo y la asignación de valores numéricos de cada uno fueron reportados por primera vez por Osborne Reynolds en 1883. Reynolds observó que el tipo de flujo adquirido por un líquido que fluye dentro de una tubería depende de la velocidad del líquido, el diámetro de la tubería y de algunas propiedades físicas del fluido. Así, el número de Reynolds es un número adimensional que relaciona algunas propiedades del fluido con la geometría del ducto por donde fluye:

$$N_{Re} = \frac{vD\rho}{\mu} \quad (1.20)$$

Donde:

N_{Re} : Número de Reynolds (sin dimensiones)

D : Diámetro interior del ducto (m)

ρ : Densidad del fluido (Kg/m³)

μ : Viscosidad del fluido (N.s/m²)

v : Velocidad media del fluido (m/s)

Generalmente cuando el número de Reynolds se encuentra por debajo de 2100 se sabe que el **flujo es laminar**, si el Reynolds es igual a 2100, se conoce como **Reynolds crítico**, en el intervalo por encima de 2100 y debajo de 4000 se considera como **flujo de transición** y para valores mayores de 4000 se considera como **flujo turbulento**. Este grupo adimensional es uno de los parámetros más utilizados en los diversos campos de la Ingeniería Química en los que se presentan fluidos en movimiento.

El número de Reynolds es la relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas de la corriente fluida. Esta relación es la que determina la inestabilidad del flujo que conduce a un régimen turbulento. Cuando un líquido fluye en un tubo y su velocidad es baja, fluye en **líneas paralelas** a lo largo del eje del tubo; a este régimen se le conoce como “**flujo laminar**”.

Conforme aumenta la velocidad y se alcanza la llamada “**velocidad crítica**”. El fluido se dispersa hasta que adquiere un movimiento de torbellino en el que se forman corrientes cruzadas y remolinos; a este régimen se le conoce como “**flujo turbulento**” (ver las figuras 1.7, 1.8 y 1.9).

El paso de régimen laminar a turbulento no es inmediato, sino que existe un comportamiento intermedio indefinido que se conoce como “**régimen de transición**”.

Experimento de Reynolds. Reynolds realizó sus experimentos utilizando un depósito de agua con un tubo de vidrio conectado horizontalmente. En el extremo del tubo colocó una válvula para regular el caudal. A través de una boquilla de inyección se introduce una corriente muy delgada y uniforme de solución colorante que se deja fluir en forma paralela al eje del tubo. Se abre la válvula y se deja circular el agua.

Seguidamente, se inyecta una corriente muy fina de algún líquido colorido en una tubería transparente que contiene otro fluido incoloro, se pueden observar los diversos comportamientos del líquido conforme varía la velocidad. Cuando el fluido se encuentra dentro del régimen laminar (velocidades bajas), el colorante aparece como una línea perfectamente definida (figura 1.7), cuando se encuentra dentro de la zona de transición (velocidades medias) (figura 1.8), el colorante se va dispersando a lo largo de la tubería y cuando se encuentra en el régimen turbulento (velocidades altas) el colorante se difunde a través de toda la corriente (figura 1.9).

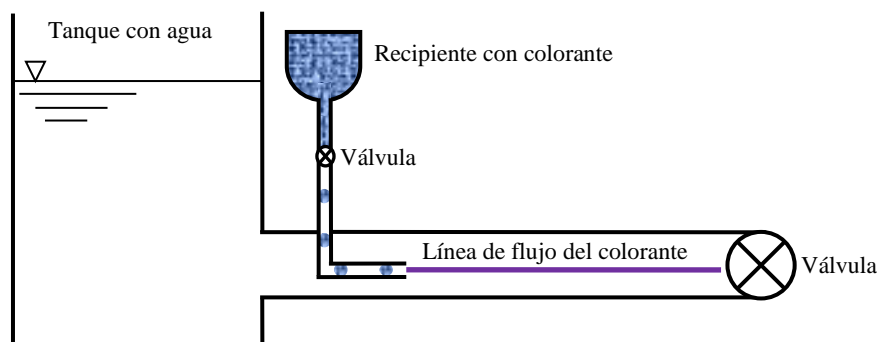


Figura 1.7. Experimento de Reynolds cuando el régimen de flujo es laminar
Fuente: (SHAMES I. 1995).

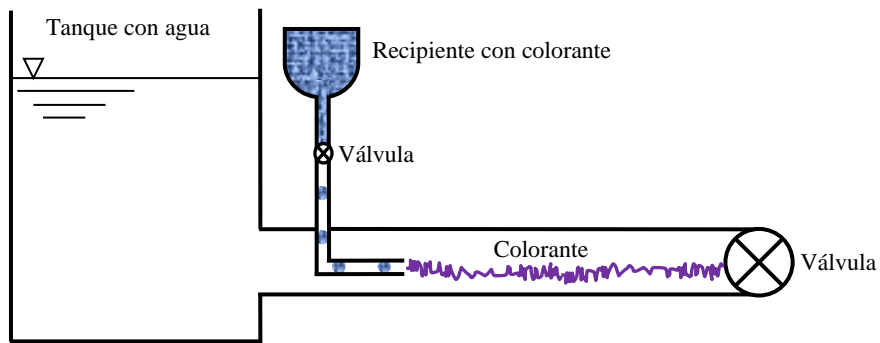


Figura 1.8. Experimento de Reynolds cuando el régimen de flujo es transitorio
Fuente: (SHAMES I. 1995).

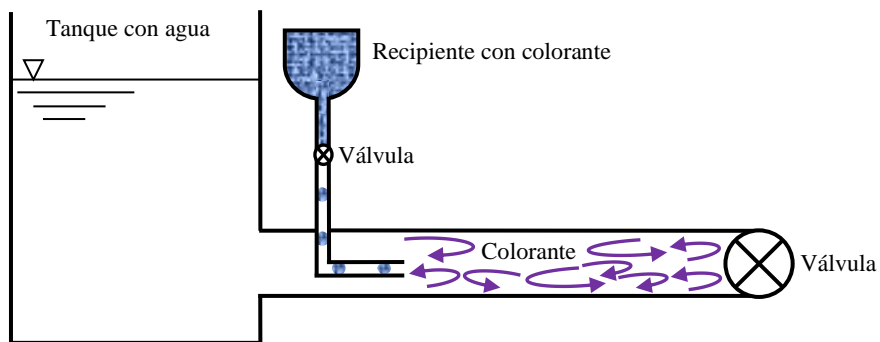


Figura 1.9. Experimento de Reynolds cuando el régimen de flujo es turbulento
Fuente: (SHAMES I. 1995).

1.5. ECUACIÓN DE CONTINUIDAD

La masa de un fluido en movimiento no cambia al fluir. Esto da pie a una importante relación cuantitativa llamada **ecuación de continuidad**. Considérese una porción de tubo en el cual está fluyendo un fluido entre dos secciones transversales estacionarias con áreas A_1 y A_2 . Las velocidades del fluido en estas secciones son v_1 y v_2 , respectivamente.

No fluye fluido por los costados del tubo porque la velocidad del fluido es tangente a la pared en todos sus puntos. Véase la figura 1.10.

Durante un tiempo corto dt , el fluido en A_1 se mueve una distancia $v_1 dt$, (dt es la diferencial de tiempo) de modo que un elemento diferencial del volumen de control para el fluido de altura $v_1 dt$ y volumen $dV_1 = A_1 v_1 dt$ fluye dentro del tubo a través de A_1 . Durante ese mismo lapso, un cilindro de volumen $dV_2 = A_2 v_2 dt$ sale del tubo a través de A_2 .

Considere primero el caso de un fluido incompresible cuya densidad ρ tiene el mismo valor en todos los puntos. La masa dm_1 que fluye al interior del tubo por A_1 en el tiempo dt es $dm_1 = \rho A_1 v_1 dt$. Así mismo, la masa dm_2 que sale por A_2 en el tiempo dt es $dm_2 = \rho A_2 v_2 dt$. En flujo estable la masa total en el tubo es constante, así que $dm_1 = dm_2$, o sea:

$$\rho A_1 v_1 dt = \rho A_2 v_2 dt \quad (1.21)$$

Como la densidad es constante y el valor de dt es bastante pequeño, la ecuación (1.21) puede convertirse en:

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 \quad (1.22)$$

El producto $A v$ es la razón de cambio de volumen por unidad de tiempo (caudal $Q = \frac{dV}{dt}$).

$$Q = \frac{dV}{dt} = A v \quad (1.23)$$

La ecuación (1.23) indica que la razón de cambio de volumen por unidad de tiempo (caudal), tiene el mismo valor en cualquier punto del tubo.

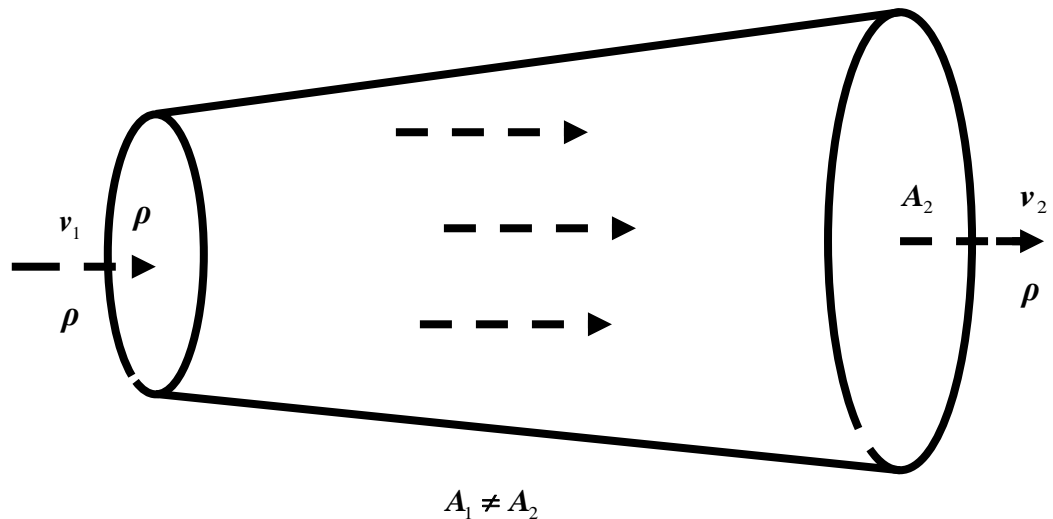


Figura 1.10. Esquema que ilustra la ecuación de continuidad.

Fuente: (GRÁNDEZ A, GARCÍA R. 2002)

1.6. ECUACIÓN GENERAL DE ENERGÍA

La ecuación de energía, como se utiliza en el presente trabajo, es una expansión de la ecuación de Bernoulli, que hace posible resolver problemas en los que se presentan pérdidas adicionales de energía. La interpretación lógica de la ecuación de energía puede verse en la figura 1.11, que representa un sistema de flujo. Los términos E_1 y E_2 denotan la energía que posee el fluido por unidad de peso en las secciones 1 y 2 respectivamente. También se muestran las adiciones, remociones y pérdida de energía, h_A , h_R , h_L . Para tal sistema la expresión del principio de conservación de energía es:

$$E_1 + h_A - h_R - h_L = E_2 \quad (1.24)$$

La energía que posee el fluido por unidad de peso es:

$$E = \frac{P}{\gamma} + Z + \frac{v^2}{2g} \quad (1.25)$$

La ecuación (1.24) queda entonces:

$$\frac{P_1}{\gamma} + Z_1 + \frac{v_1^2}{2g} + h_A - h_R - h_L = \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 + \frac{v_2^2}{2g} \quad (1.26)$$

Esta es la forma de la ecuación de energía que se utilizará con mayor frecuencia en el presente trabajo. Al igual que con la ecuación de Bernoulli, cada término de la ecuación (1.26) representa una cantidad de energía por unidad de peso de fluido que fluye en el sistema. Las unidades SI típicas son N.m / N o metros; las unidades en el sistema Británico son lbf-pie / lbf o pie.

Es de suma importancia que la ecuación general de energía que utilizaremos con mayor frecuencia esté escrita en la dirección de flujo, es decir, desde el punto de referencia, en la parte izquierda de la ecuación, al punto correspondiente, en el lado derecho. Los signos algebraicos juegan un papel crítico, debido a que el lado izquierdo de la ecuación (1.26) establece que un elemento de fluido que tenga una cierta cantidad de energía por unidad de peso en la sección 1, pueda tener una adición de energía ($+h_A$), una remoción de energía ($-h_R$) o una pérdida de energía ($-h_L$), antes de que alcance la sección 2. En tal punto contiene una cantidad diferente de energía por unidad de peso según lo que indican los términos de la parte derecha de la ecuación.

Por ejemplo, en la figura 1.11 los puntos de referencia son 1 y 2, y en cada uno de estos se indican las cabezas de presión, de velocidad y elevación. Después de que el fluido abandona el punto 1, entra a la bomba, donde se le agrega energía. Un movilizador principal, que podría ser un motor eléctrico, hace funcionar la bomba y su movilizador transfiere energía al fluido ($+h_A$). Entonces el sistema fluye por un sistema de conductos compuesto por una válvula, codos y tramos de conducto en los que la energía se disipa, es decir, el fluido pierde energía ($-h_L$).

Antes de alcanzar el punto 2, el fluido fluye a través de un motor de fluido (turbina) que retira algo de la energía para hacer funcionar un dispositivo externo ($-h_R$). La ecuación general de energía toma en cuenta todas esas energías.

En un problema particular no todos los términos de la ecuación se requieren. Por ejemplo, si no hay un dispositivo mecánico entre las secciones de interés, los términos h_A y h_R serán cero, y pueden sacarse de la ecuación. Si las pérdidas de energía son tan pequeñas que pueden ser despreciadas, el término h_L puede eliminarse. Si existen estas dos condiciones, se puede ver que la ecuación (1.26) se reduce a la ecuación de Bernoulli.

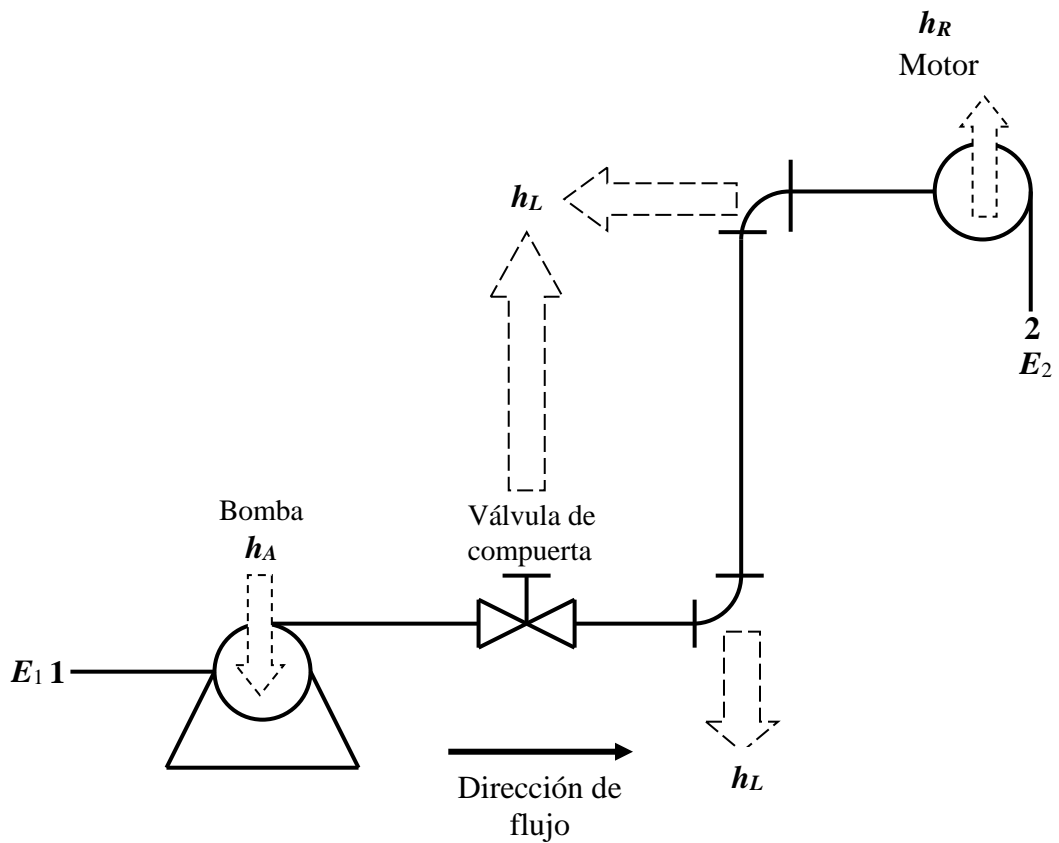


Figura 1.11. Sistema de flujo de fluido que ilustra la ecuación general de energía
Fuente: (MOTT R. 2002).

1.6.1. PÉRDIDA DE ENERGÍA DEBIDO A LA FRICCIÓN Y ACCESORIOS

1.6.1.1. Pérdidas de energía debido a la fricción

A medida que un fluido fluye por un conducto, tubo o algún otro dispositivo, ocurren pérdidas debido a la fricción interna en el fluido. Como se indica en la ecuación general de energía, tales pérdidas traen como resultado una disminución de la presión entre dos puntos del sistema de flujo. Es muy importante ser capaces de calcular la magnitud de dichas pérdidas de energía.

En la ecuación general de energía el término h_L se define como la energía por unidad de peso, perdida por el sistema. Una componente de pérdida de energía se debe a la fricción entre las paredes del conducto y el fluido en movimiento. La pérdida de energía por unidad de peso debido a la fricción es proporcional al factor de fricción, la cabeza de velocidad y al cociente de la longitud entre el diámetro de la corriente del fluido, para el caso de flujo en conductos y tubos. Lo anterior se expresa de manera matemática en la ecuación de Darcy:

$$h_L = f \times \frac{L}{D} \times \frac{v^2}{2g} \quad (1.27)$$

En la que:

h_L : Pérdida de energía por unidad de peso debido a la fricción (N.m / N)

L : Longitud de la corriente de fluido (m)

D : Diámetro del conducto (m)

v : Velocidad promedio del fluido (m /s)

f : Factor de fricción (sin dimensiones)

Para determinar el valor de f es necesario conocer lo siguiente:

Rugosidad relativa. La rugosidad relativa se define como $\frac{D}{\epsilon}$. Una alta rugosidad indica un valor bajo de $\frac{D}{\epsilon}$, es decir, un conducto rugoso. Algunos textos utilizan otras convenciones para representar la rugosidad relativa, como $\frac{\epsilon}{D}$, $\frac{\epsilon}{r}$ o $\frac{r}{\epsilon}$, en donde r es el radio del conducto.

Uso del diagrama de Moody

El diagrama de Moody se usa para determinar el valor del factor de fricción f , para flujo turbulento. Deben conocerse los valores del número de Reynolds y la rugosidad relativa. Por consiguiente, los datos básicos requeridos son el diámetro interior del conducto, el material con que el conducto está hecho, la velocidad del fluido, el tipo de fluido y su temperatura con los cuales se puede encontrar la viscosidad.

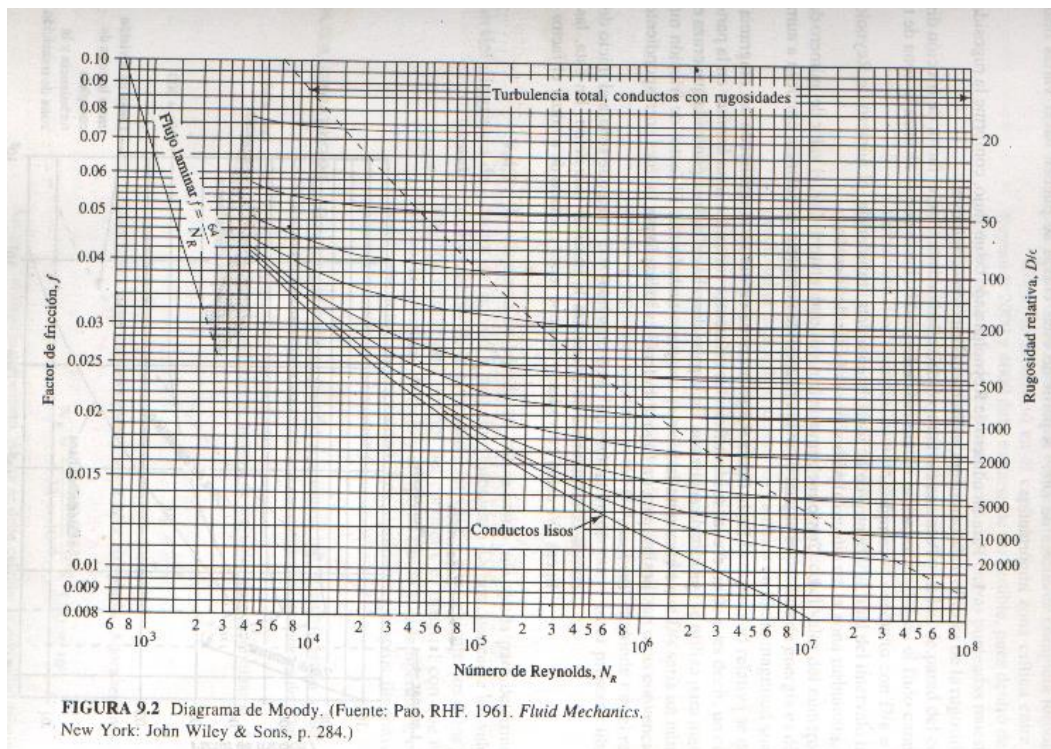


FIGURA 9.2 Diagrama de Moody. (Fuente: Pao, RHF. 1961. *Fluid Mechanics*. New York: John Wiley & Sons, p. 284.)

Figura 1.12. Diagrama de Moody.

Fuente: (MOTT R. 2002).

1.6.1.2. Pérdidas debido a los accesorios

Las pérdidas menores ocurren cuando hay un cambio en la sección cruzada de la trayectoria del fluido o en la dirección de flujo, o cuando la trayectoria del fluido se encuentra obstruida, como sucede con una válvula. La energía se pierde bajo estas condiciones debido a fenómenos físicos bastante complejos. La predicción teórica de la magnitud de estas pérdidas también es compleja, y por tanto, normalmente se usan los datos experimentales. Para determinar la pérdida de energía a través de una válvula o junta, es necesario conocer lo siguiente:

Coefficiente de resistencia. Las pérdidas de energía por unidad de peso de fluido son proporcionales a la cabeza de velocidad del fluido al fluir éste alrededor de un codo, o través de una válvula. Los valores experimentales de pérdidas de energía por unidad de peso de fluido generalmente se reportan en términos de un coeficiente de resistencia K , de la siguiente forma:

$$h_L = K \times \frac{v^2}{2g} \quad (1.28)$$

Se dispone de muchos tipos diferentes de válvulas y juntas de varios fabricantes para especificación e instalación en sistemas de flujo de fluidos. Las válvulas se utilizan para controlar la cantidad de flujo y pueden ser válvulas de globo, de ángulo, de mariposa, otros tipos de válvulas de verificación y muchas más. El coeficiente de resistencia K se reporta en la forma:

$$K = (L_e / D) f \quad (1.29)$$

Proporción de longitud equivalente. El valor de (L_e / D) llamado proporción de longitud equivalente, se reporta en la tabla 1.1 y se considera que es una constante para un tipo dado de válvula o junta.

El valor de Le se denomina la longitud equivalente y es la longitud del conducto recto del mismo diámetro nominal como la válvula que tendría la misma resistencia que ésta. Si se reemplaza la ecuación (1.29) en la ecuación (1.28), se tiene:

$$h_L = (Le / D) f \times \frac{v^2}{2g} \quad (1.30)$$

La pérdida de energía por unidad de peso h_L es directamente proporcional a (Le / D) , y por lo tanto, depende de la complejidad de la trayectoria del fluido a través del dispositivo. En algunos casos, particularmente con respecto de las válvulas de control en sistemas de potencia de fluidos, la pérdida de energía como tal no se reporta, en vez de esto, se reporta la magnitud de la caída de presión al fluir el fluido a través de la válvula a una cierta velocidad de volumen; lo cual puede convertirse a unidades de energía. La tabla 1.1 muestra los valores de (Le / D) para las distintas válvulas y accesorios.

Tipo	Longitud equivalente en diámetros de conducto
Válvula de compuerta – completamente abierta	8
– ¾ abierta	35
– ½ abierta	160
– ¼ abierta	900
Codo estándar de 90°	30
Codo de calle de 90°	16
Codo estándar de 45°	26
Té estándar – con flujo a través de un tramo	20
Té estándar – con flujo a través de una rama	60

Tabla 1.1. Resistencia en válvulas y juntas expresada como longitud equivalente.

Fuente: (MOTT R. 2002).

Pérdidas de entrada. Un caso especial de una contracción ocurre cuando un fluido fluye desde un depósito o tanque relativamente grande hacia un conducto. El fluido debe acelerar desde una velocidad relativamente despreciable a la velocidad del fluido del conducto. La facilidad con que se realiza la aceleración determina la cantidad de pérdida de energía y por lo tanto, el valor del coeficiente de resistencia de entrada depende de la geometría de la entrada. La figuras 1.13 (a) y (b), muestran configuraciones diferentes y el valor sugerido de K para cada una. Después de seleccionar un valor para el coeficiente de resistencia de la figura 1.13, podemos calcular la pérdida de energía por unidad de peso de fluido en una entrada a partir de:

$$h_L = K \times \frac{v_2^2}{2g} \quad (1.31)$$

Donde v_2 es la velocidad media del fluido en el conducto.

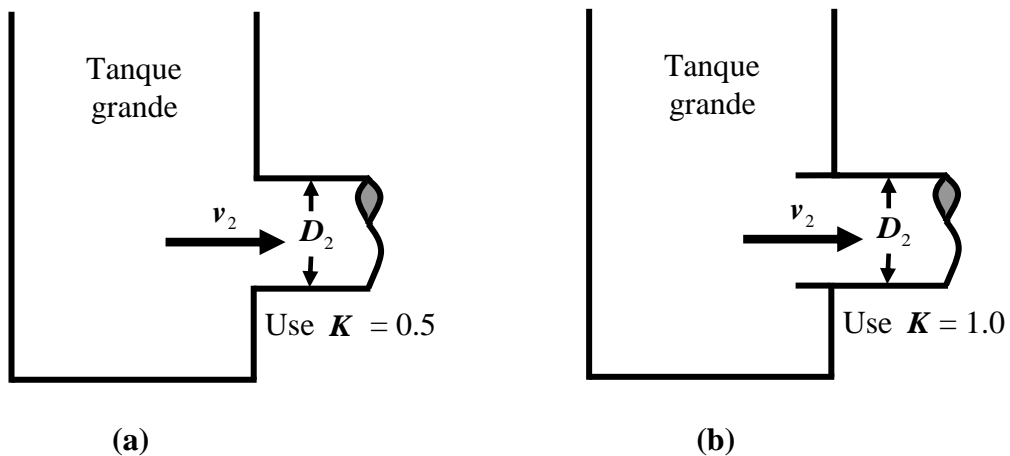


Figura 1.13. Coeficientes de resistencia de entrada

Fuente: (MOTT R. 2002).

1.7. DESCRIPCIÓN DEL DISEÑO DEL EQUIPO REYNOLDS

El equipo de Reynolds para el presente trabajo, se diseñó y construyó con fines académicos, es decir, se ha buscado que cuando los estudiantes y docentes de la FIQ-UNAP realicen prácticas en este equipo, puedan ver claramente las características del flujo para cada régimen. Para esto se ha visto conveniente que el equipo de Reynolds tenga una serie de componentes principales, los cuales cumplen una función específica cuando el equipo está en funcionamiento. A continuación se describe cada uno de estos componentes.

Tanque reservorio. Este componente tiene la función de almacenar agua y a la vez recepcionar la misma que sale de las líneas de retorno. Además la electrobomba succiona el agua de este tanque y la envía a través de las tuberías hacia el tubo de vidrio. Se puede notar en la figura 1.14, que la forma de este tanque es cilindro cónico.

Línea de purga. En la figura 1.14, se puede notar que la línea purga empieza en el punto A_1 y termina en el punto A_2 , siendo su accesorio principal la válvula 1. La línea de purga sirve para realizar el drenado del agua que está en el tanque reservorio, después de que se termine de realizar las prácticas en el equipo de Reynolds, para esto es necesario que la válvula 1 se abra completamente.

Línea de succión de la electrobomba. En la figura 1.14, este componente empieza en el punto A y termina en el punto B . A través de esta línea la electrobomba succiona el agua almacenada en el tanque reservorio y le impulsa empezando del punto C .

Electrobomba. Este componente tiene como función, succionar e impulsar el agua que está en el tanque reservorio, a través de las tuberías y accesorios que conforman el equipo de Reynolds. Además, el usar una electrobomba, garantiza que el flujo sea permanente en el tubo de vidrio, durante todo el tiempo que se realiza una medición. Por ejemplo, si para un determinado régimen de flujo, se realiza la medición del número de Reynolds del líquido que fluye por el tubo de vidrio, recepcionándose un volumen de 1 lt en 1 minuto, en todo este de tiempo el caudal será de 1 lt/min. Así, si se recepcionan 0.2 lt y 0.5 lt, los tiempos de recepción serian 0.2 minutos y 0.5 minutos, respectivamente.

Es decir la relación del volumen recepcionado con el tiempo de recepción sería constante

Tramo CD . Como se puede ver en la figura 1.14, este componente se encuentra a continuación de la electrobomba. Por medio de este componente la electrobomba descarga el agua que está en el tanque reservorio y la envía una parte hacia las líneas de retorno y otra parte a través del tramo E_3F

Línea de retorno D_1D_2 . Este componente está compuesto por tramos de tubería recta y accesorios. Dentro de sus accesorios principales se encuentra la válvula 2 y mediante esta se puede distribuir adecuadamente el caudal de agua que produce la electrobomba. Por ejemplo, si la electrobomba produce un caudal de 34 lt/min, mediante la válvula 2 se puede hacer que pase 25 lt/min a la línea de retorno D_1D_2 y al tramo D_3E sólo pase 9 lt/min. Para esto, la válvula 3 debe estar completamente abierta.

Tramo D_3E . Como se puede ver en la figura 1.14, este componente empieza en el punto D_3 y termina en el punto E . El tramo D_3E , conecta a la línea de retorno E_1E_2 y al tramo E_3F con el tramo CD .

Línea de retorno E_1E_2 . Este componente está compuesto por tramos de tubería recta y accesorios. Dentro de sus accesorios principales se encuentra la válvula 4. Si el caudal del líquido en el tramo D_3E es 9 lt/min, entonces por continuidad se puede distribuir este caudal, una parte hacia la línea de retorno E_1E_2 por medio de la válvula 4 y otra parte hacia el tramo E_3F por medio de la válvula 5.

Tramo E_3F . Como se puede ver en la figura 1.14, este componente está compuesto por tramos de tubería recta y accesorios, siendo sus principales componentes: la válvula 5 y el tubo de vidrio. La válvula 5 cumple una función importante en la regulación del caudal del líquido que fluye por el tubo de vidrio. Por ejemplo, Si el caudal del líquido en el tramo D_3E es 9 lt/min y se requiera que el caudal del líquido en el tubo de vidrio sea de 1 lt/min, la válvula 4 debe estar abierta en un porcentaje máximo y la válvula 5 en un porcentaje mínimo, es decir el caudal a través de la línea de retorno E_1E_2 debe ser 8 lt/min.

Recipiente de colorante. La función de este componente, es la de almacenar un líquido colorido (Violeta de Genciana), el cual se inyecta por medio de la línea de inyección de colorante, al líquido (agua) que fluye por el tramo E_3F . Los efectos de esta operación se pueden observar claramente en el tubo de vidrio, determinando de esta forma el régimen de flujo para el líquido (agua) que fluye por el tubo de vidrio.

Línea de inyección de colorante. Este componente está compuesto, principalmente por un tubo metálico (cobre) de 1/8" de diámetro y una válvula de bronce de 1/4" de diámetro, la cual sirve para regular el goteo de colorante hacia el tramo E_3F . Se puede notar en la figura 1.14, que la línea de inyección conecta al tanque de colorante con el tramo E_3F .

Recipiente para recepción del líquido. Como se puede ver en la figura 1.14, la función de este componente es recepcionar el líquido que sale del tramo E_3F . Mediante la relación del volumen recepcionado con el tiempo de recepción, se puede obtener el caudal, que por la ecuación de continuidad es el mismo para el líquido (agua) que fluye por el tubo de vidrio.

Notas

En la figura 1.14, se muestra claramente el equipo de Reynolds con sus componentes principales, no se muestran componentes auxiliares como la estructura metálica y las instalaciones eléctricas, pues las descripciones y especificaciones de estos componentes se muestran en detalle en capítulo 3.

Cuando se realice un experimento en el equipo de Reynolds, el caudal del líquido en el tubo de vidrio debe ser constante, es decir el flujo debe ser permanente durante todo el tiempo que se realice una medición, es precisamente por eso que se utiliza una electrobomba para hacer fluir el líquido (agua).

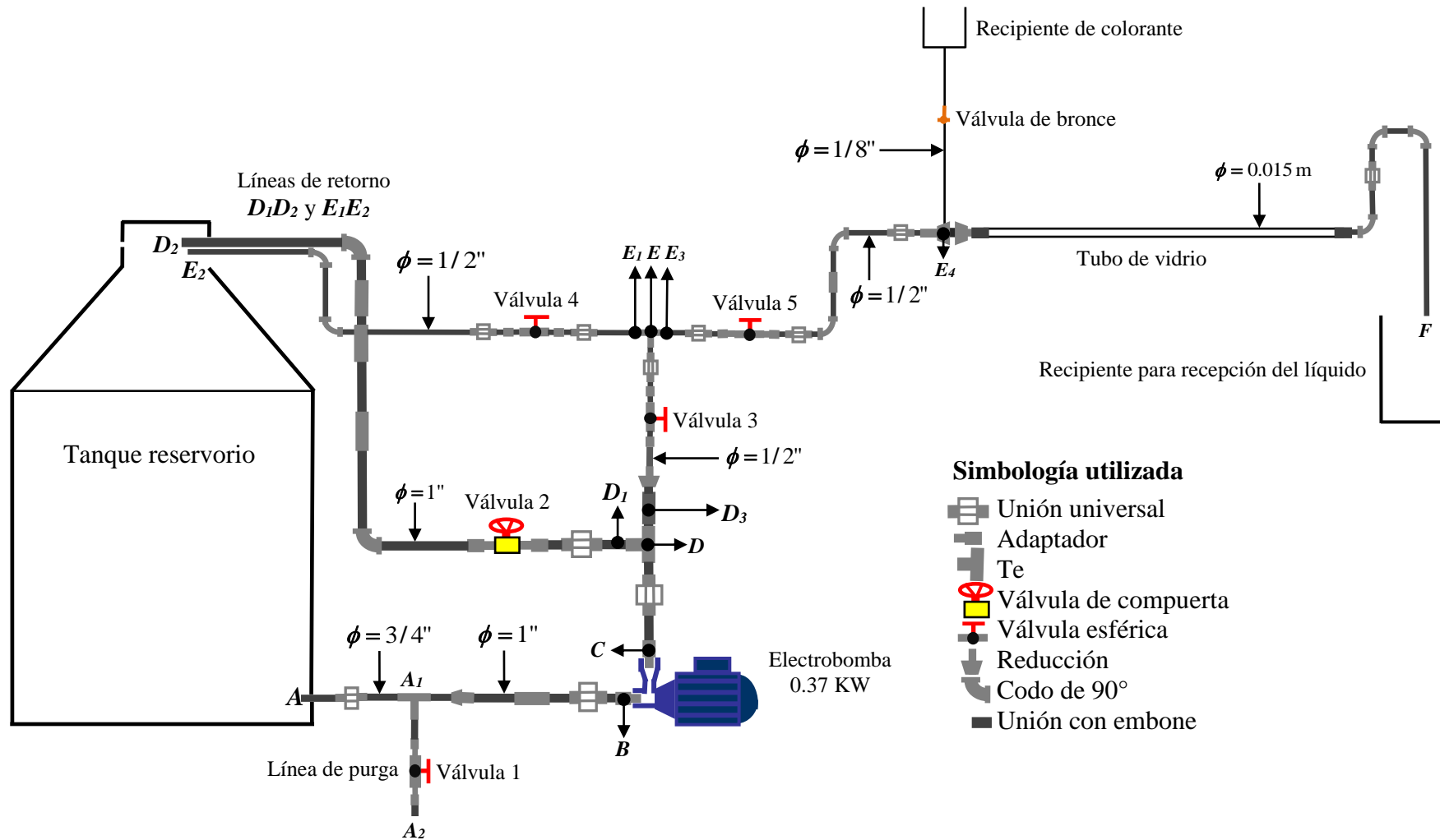


Figura 1.14. Equipo de Reynolds con sus componentes principales
Fuente: (Elaboración propia).

1.8. APLICACIONES DE LA ECUACIÓN DE CONTINUIDAD AL EQUIPO DE REYNOLDS

Como bien se sabe, el caudal del líquido que fluye por el tubo de vidrio, es el mismo que se obtiene al relacionar el volumen recepcionado con el tiempo de recepción, es decir:

$$Q_{\text{Tubode vidrio}} = \frac{V_R}{t_R} \quad (1.32)$$

Donde:

V_R : Volumen recepcionado (m^3)

t_R : Tiempo que dura la recepción del volumen V_R (s)

$Q_{\text{Tubode vidrio}}$: Caudal del líquido que fluye en el tubo de vidrio (m^3/s)

Por la ecuación de continuidad se tiene que:

$$Q_{\text{Tubode vidrio}} = v_{\text{Tubode vidrio}} \times \frac{\pi}{4} D_{i(\text{Tubode vidrio})}^2 \quad (1.33)$$

Donde:

$v_{\text{Tubode vidrio}}$: Velocidad media del líquido que fluye en el tubo de vidrio (m/s)

$D_{i(\text{Tubode vidrio})}$: Diámetro interior del tubo de vidrio (m)

Teniendo en cuenta la ecuación (1.20), se tiene que:

$$N_{\text{Re}} = \frac{v_{\text{Tubode vidrio}} D_{i(\text{Tubode vidrio})} \rho_{\text{H}_2\text{O}(^{\circ}\text{T})}}{\mu_{\text{H}_2\text{O}(^{\circ}\text{T})}} \quad (1.34)$$

Donde:

N_{Re} : Número de Reynolds del líquido que fluye en el tubo de vidrio

$\rho_{H_2O(^{\circ}T)}$: Densidad del líquido (agua) que fluye en el tubo de vidrio (Kg/m^3).

$\mu_{H_2O(^{\circ}T)}$: Viscosidad del líquido (agua) que fluye en el tubo de vidrio ($N.s/m^2$)

Relacionando las ecuaciones (1.33) y (1.34), se tiene que:

$$N_{Re} = \frac{4Q_{\text{Tubode vidrio}} \times \rho_{H_2O(^{\circ}T)}}{\pi \times \mu_{H_2O(^{\circ}T)} \times D_{i(\text{Tubode vidrio})}} \quad (1.35)$$

La ecuación (1.35), indica que el número de Reynolds N_{Re} , se puede expresar directamente en función del caudal $Q_{\text{Tubode vidrio}}$.

Nota

Para tener exactitud, en los cálculos que se realicen haciendo uso la ecuación (1.35), los valores de $\rho_{H_2O(^{\circ}T)}$ y $\mu_{H_2O(^{\circ}T)}$ deben ser de acuerdo a la temperatura que el líquido (agua) tenga al momento de realizar la práctica en el equipo de Reynolds.

*Otra aplicación que se puede hacer de la ecuación de continuidad al equipo de Reynolds, es precisamente en los puntos donde se distribuye el caudal, estos son **D** y **E**. Véase la figura 1.14. En el punto **D**, el caudal, se distribuye hacia la línea D_1D_2 y el tramo D_3E , es decir:*

$$Q_D = Q_{(\text{Línea } D_1D_2)} + Q_{(\text{Tramo } D_3E)} \quad (1.36)$$

Donde:

Q_D : Caudal del líquido en el punto **D** (m^3/s)

$Q_{(\text{Línea } D_1D_2)}$: Caudal del líquido en la línea D_1D_2 (m^3/s)

$Q_{(\text{Tramo } D_3E)}$: Caudal del líquido en el tramo D_3E (m^3/s)

En el punto E , el caudal se distribuye hacia la línea E_1E_2 y el tramo E_3F , es decir:

$$Q_E = Q_{(\text{Línea } E_1E_2)} + Q_{(\text{Tramo } E_3F)} \quad (1.37)$$

Donde:

Q_E : Caudal del líquido en el punto E (m^3/s)

$Q_{(\text{Tramo } E_1E_2)}$: Caudal del líquido en la línea E_1E_2 (m^3/s)

$Q_{(\text{Tramo } E_3F)}$: Caudal del líquido en el tramo E_3F (m^3/s)

Además, el caudal que produce la electrobomba será el mismo que en el punto D , es decir:

$$Q_{\text{Electrobomba}} = Q_D \quad (1.38)$$

Donde:

$Q_{\text{Electrobomba}}$: Caudal del líquido que produce la electrobomba (m^3/s)

1.9. APLICACIONES DE LA ECUACIÓN GENERAL DE ENERGÍA AL EQUIPO DE REYNOLDS

La ecuación general de energía se puede aplicar al equipo de Reynolds, independientemente de las siguientes formas: desde el punto A hasta el punto D_2 , desde el punto A hasta el punto E_2 y desde el punto A hasta el punto E_4 . Para esto, las válvulas 2, 3, 5 y 4 deben estar abiertas en un determinado porcentaje y la válvula 5 debe estar completamente cerrada. Aplicando la ecuación (1.26), entre los puntos A y D_2

$$\frac{P_A}{\gamma_{\text{H}_2\text{O}(^{\circ}\text{T})}} + Z_A + \frac{v_A^2}{2g} + h_{\text{Bomba}} - h_{L(\text{Total } AD_2)} = \frac{P_{D_2}}{\gamma_{\text{H}_2\text{O}(^{\circ}\text{T})}} + Z_{D_2} + \frac{v_{D_2}^2}{2g} \quad (1.39)$$

Teniendo en cuenta las siguientes consideraciones: $\frac{v_A^2}{2g} \approx 0$ y $P_{D_2} = P_{atm}$ la

ecuación (1.39) queda:

$$\frac{P_A}{\gamma_{H_2O(eT)}} + Z_A + h_{Bomba} - h_{L(Total AD_2)} = Z_{D_2} + \frac{v_{D_2}^2}{2g} \quad (1.40)$$

Donde:

h_{Bomba} : Altura dinámica de la electrobomba (m)

Z_A : Altura del punto A (m)

Z_{D_2} : Altura del punto D_2 (m)

v_{D_2} : Velocidad media del líquido en el punto D_2 (m/s)

$h_{L(Total AD_2)}$: Pérdida total de energía por unidad de peso, entre los puntos A y D_2 (m)

P_A : Presión manométrica del líquido en el punto A (N/m²)

$\gamma_{H_2O(eT)}$: Peso específico del líquido a la temperatura que se encuentre al momento de realizar la práctica en el equipo de Reynolds (N/m³).

Además téngase en cuenta que:

$$h_{L(Total AD_2)} = h_{L(Total AB)} + h_{L(Total CD)} + h_{L(Total D_1D_2)} \quad (1.41)$$

Donde:

$h_{L(Total AB)}$: Pérdida total de energía por unidad de peso, entre los puntos A y B (m)

$h_{L(Total CD)}$: Pérdida total de energía por unidad de peso, entre los puntos C y D (m)

$h_{L(Total D_1D_2)}$: Pérdida total de energía por unidad de peso, entre los puntos D_1 y D_2 (m)

Aplicando la ecuación (1.26), entre los puntos A y E_2

$$\frac{P_A}{\gamma_{H_2O(^{\circ}T)}} + Z_A + \frac{v_A^2}{2g} + h_{\text{Bomba}} - h_{L(\text{Total } AE_2)} = \frac{P_{E_2}}{\gamma_{H_2O(^{\circ}T)}} + Z_{E_2} + \frac{v_{E_2}^2}{2g} \quad (1.42)$$

Teniendo en cuenta la siguiente consideración: $P_{E_2} = P_{\text{atm}}$ la ecuación (1.42) queda:

$$\frac{P_A}{\gamma_{H_2O(^{\circ}T)}} + Z_A + h_{\text{Bomba}} - h_{L(\text{Total } AE_2)} = Z_{E_2} + \frac{v_{E_2}^2}{2g} \quad (1.43)$$

Donde:

Z_{E_2} : Altura del punto E_2 (m)

v_{E_2} : Velocidad media del líquido en el punto E_2 (m/s)

$h_{L(\text{Total } AE_2)}$: Pérdida total de energía por unidad de peso, entre los puntos A y E_2 (m)

Además téngase en cuenta que:

$$h_{L(\text{Total } AE_2)} = h_{L(\text{Total } AB)} + h_{L(\text{Total } CD)} + h_{L(\text{Total } D_3E)} + h_{L(\text{Total } E_1E_2)} \quad (1.44)$$

Donde:

$h_{L(\text{Total } D_3E)}$: Pérdida total de energía por unidad de peso, entre los puntos D_3 y E (m)

$h_{L(\text{Total } E_1E_2)}$: Pérdida total de energía por unidad de peso, entre los puntos E_1 y E_2 (m)

Aplicando la ecuación (1.26), entre los puntos A y E_4

$$\frac{P_A}{\gamma_{H_2O(^{\circ}T)}} + Z_A + h_{\text{Bomba}} - h_{L(\text{Total } AE_4)} = Z_{E_4} + \frac{v_{E_4}^2}{2g} \quad (1.45)$$

Donde:

Z_{E_4} : Altura del punto E_4 (m)

v_{E_4} : Velocidad media del líquido en el punto E_2 (m/s)

$h_{L(\text{Total } AE_4)}$: Pérdida total de energía por unidad de peso, entre los puntos A y E_4
(m)

Además téngase en cuenta que:

$$h_{L(\text{Total } AE_4)} = h_{L(\text{Total } AB)} + h_{L(\text{Total } CD)} + h_{L(\text{Total } D_3E)} + h_{L(\text{Total } E_3E_4)} \quad (1.46)$$

Donde:

$h_{L(\text{Total } D_3E)}$: Pérdida total de energía por unidad de peso, entre los puntos D_3 y E
(m)

$h_{L(\text{Total } E_3E_4)}$: Pérdida total de energía por unidad de peso, entre los puntos E_3 y E_4
(m)

1.10. VARIABLES DE OPERACIÓN EN EL EQUIPO DE REYNOLDS

Una variable de operación, es aquella que necesariamente, se requiere la medición de su magnitud cuando se lleva a cabo un experimento. Para la operación a llevarse a cabo en el equipo de Reynolds, las variables son:

- **Densidad del líquido.** Antes de iniciar cualquier práctica en el equipo de Reynolds, es importante que se mida la densidad del líquido a la temperatura que éste se encuentre. Esta densidad se denota por $\rho_{\text{H}_2\text{O}(^{\circ}\text{T})}$

- **Viscosidad del líquido.** De igual forma que la densidad, es necesario conocer la viscosidad, antes de que se realice cualquier práctica en el equipo de Reynolds. Esta viscosidad se denota por $\mu_{\text{H}_2\text{O}(^{\circ}\text{T})}$

- **Volumen recepcionado.** Una vez que se ha medido la densidad y la viscosidad del líquido, se puede iniciar la práctica en el equipo de Reynolds. La primera variable que se mide cuando se realiza la práctica, es el volumen recepcionado. Este volumen se denota como V_R

- **Tiempo que dura la recepción del volumen.** Este es el tiempo que se tarda en la recepción de V_R y se denota como t_R

- **Caudal del líquido en el tubo de vidrio.** Como se mencionó en la sección (1.8), la relación del volumen V_R con el tiempo t_R nos da el caudal del líquido en el tubo de vidrio $Q_{\text{Tubodevidrio}}$, es decir este caudal se puede calcular haciendo uso de la ecuación (1.32)

- **Velocidad media del líquido en el tubo de vidrio.** Conociendo $Q_{\text{Tubodevidrio}}$ y $D_{i(\text{Tubodevidrio})}$, se puede obtener la velocidad media del líquido en el tubo de vidrio $v_{\text{Tubodevidrio}}$, despejándola de la ecuación (1.33)

- **Número de Reynolds del líquido que fluye en el tubo de vidrio.** Una vez conocidas todas las anteriores variables de operación, se puede hacer uso de las ecuaciones (1.34) o (1.35) para calcular el número de Reynolds N_{Re}

1.11. CRITERIOS Y VARIABLES MÁS IMPORTANTES PARA EL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO DE REYNOLDS

El equipo de Reynolds, se diseñó y construyó de la forma como se muestra en la figura 1.14, porque el caudal del líquido que fluye en el tubo de vidrio debe ser bastante mínimo cuando el régimen de flujo sea laminar. Por ejemplo, si para observar el flujo laminar, se requiere que el caudal del líquido que fluye en el tubo de vidrio sea de 1 lt/min y si la electrobomba produce un caudal de 34 lt/min. Es precisamente por esto, que el caudal que produce la electrobomba se debe distribuir, haciendo que gran parte de este caudal pase a las líneas de retorno D_1D_2 y E_1E_2 , y solo una parte muy pequeña pase al tramo E_3F donde está el tubo de vidrio.

Del mismo modo, la presión del líquido en el punto E_4 , debe ser bastante pequeña, para que se pueda hacer con facilidad la inyección del colorante. Si la presión del líquido en el punto E_4 es grande, sería muy dificultoso hacer la inyección del colorante, pues el líquido subiría al tubo de cobre llenándolo completamente. En esto, las líneas de retorno D_1D_2 y E_1E_2 , cumplen una función muy importante, pues mediante estas la presión de descarga de la electrobomba (en el punto C), se distribuye una gran parte hacia las mismas y otra parte muy pequeña hacia el tramo E_3F donde está el punto E_4

Por todo lo que se acaba de mencionar, es que en el diseño del equipo de Reynolds, se incluyeron a las líneas de retorno D_1D_2 y E_1E_2

Una variable de diseño y construcción, es aquella que no necesariamente se requiere la medición de su magnitud cuando se lleva a cabo un experimento, pues este tipo de variable es la que está en función de las dimensiones de los componentes del equipo.

Para el equipo de Reynolds, se consideran las siguientes variables de diseño y construcción:

- **Rango de caudal al que trabaja la electrobomba.** Este rango se obtiene de la curvas de operación que proporciona el fabricante de una determinada marca de electrobombas.

Para el equipo de Reynolds, la electrobomba se elige teniéndose en cuenta que dicho rango no exceda grandemente al rango de caudal en el tubo de vidrio. El rango de caudal en el tubo de vidrio es: $(Q_{\max(\text{Tubode vidrio})} - Q_{\min(\text{Tubode vidrio})})$

El caudal máximo del líquido en el tubo de vidrio cuando el régimen es turbulento es $Q_{\max(\text{Tubode vidrio})}$ y $Q_{\min(\text{Tubode vidrio})}$ es el caudal mínimo del líquido en el tubo de vidrio cuando el régimen es laminar.

Cada fabricante proporciona un diagrama donde se muestran las curvas de operación para las diferentes electrobombas.

El rango de caudal para una determinada electrobomba se denota por r_{Caudal} . Por ejemplo, si el fabricante de una determinada marca nos proporciona un diagrama de tres electrobombas, se tendrá tres curvas de operación, es decir habrá $r_{\text{Caudal}}(1)$, $r_{\text{Caudal}}(2)$ y $r_{\text{Caudal}}(3)$. Entonces, para elegir la electrobomba para el equipo de Reynolds se debe tener en cuenta que:

$$\text{Min} \left\{ \begin{array}{l} \left[r_{\text{Caudal}}(1) - (Q_{\max(\text{Tubode vidrio})} - Q_{\min(\text{Tubode vidrio})}) \right] \\ \left[r_{\text{Caudal}}(2) - (Q_{\max(\text{Tubode vidrio})} - Q_{\min(\text{Tubode vidrio})}) \right] \\ \left[r_{\text{Caudal}}(3) - (Q_{\max(\text{Tubode vidrio})} - Q_{\min(\text{Tubode vidrio})}) \right] \end{array} \right\} \quad (1.47)$$

La ecuación (1.47), indica que para elegir la electrobomba para el equipo de Reynolds, la variación entre los rangos de caudal debe ser mínima.

- **Diámetro interior y longitud del tubo vidrio.** Deben ser lo suficientemente grandes como para poder apreciar las características que determinan el régimen de flujo.

El diámetro interior del tubo de vidrio $D_{i(\text{Tubode vidrio})}$, se puede determinar mediante la siguiente ecuación:

$$D_{i(\text{Tubode vidrio})} = \sqrt{\frac{4Q_{\min(\text{Tubode vidrio})}}{\pi \times v_{\min(\text{Tubode vidrio})}}} \quad (1.48)$$

Donde:

$v_{\min(\text{Tubode vidrio})}$: Velocidad promedio mínima del líquido en el tubo de vidrio (m/s)

La longitud del tubo de vidrio, se denota como $L_{\text{Tubode vidrio}}$. Para calcular esta variable, en el presente trabajo se tendrá en cuenta la siguiente ecuación:

$$L_{\text{Tubode vidrio}} = v_{\min(\text{Tubode vidrio})} t_{\max(\text{Tubode vidrio})} \quad (1.49)$$

Donde:

$t_{\max(\text{Tubode vidrio})}$: Tiempo máximo que demora en pasar por el tubo de vidrio, el volumen del líquido correspondiente a $Q_{\min(\text{Tubode vidrio})}$ (s)

Note que $v_{\min(\text{Tubode vidrio})}$, es correspondiente a $Q_{\min(\text{Tubode vidrio})}$

- **Espesor del tubo vidrio.** La pared del tubo de vidrio no debe ser demasiado pequeña, esto con el fin de que pueda aguantar la presión del fluido cuando el régimen de flujo sea turbulento.

- **Altura máxima de presión en el punto de inyección del colorante.** Para calcular esta variable, se puede aplicar la ecuación (1.26), entre los puntos *A* y *C*, y luego entre los puntos *C* y *E₄*

Aplicando la ecuación (1.26), entre los puntos *A* y *C*

$$\frac{P_A}{\gamma_{H_2O(^{\circ}T)}} + Z_A + h_{\text{Bomba}} - h_{L(\text{Total } AC)} = \frac{P_C}{\gamma_{H_2O(^{\circ}T)}} + Z_C + \frac{v_C^2}{2g} \quad (1.50)$$

Aplicando la ecuación (1.26), entre los puntos *C* y *E₄*

$$\frac{P_C}{\gamma_{H_2O(^{\circ}T)}} + \frac{v_C^2}{2g} + Z_C - h_{L(\text{Total } CE_4)} = \frac{P_{E_4}}{\gamma_{H_2O(^{\circ}T)}} + Z_{E_4} + \frac{v_{E_4}^2}{2g} \quad (1.51)$$

CAPÍTULO II: CÁLCULOS DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN

2.1. CONDICIONES INICIALES A CONSIDERARSE EN EL DISEÑO

- **Rango de caudal en el tubo de vidrio** ($Q_{\max(\text{Tubode vidrio})} - Q_{\min(\text{Tubode vidrio})}$). Al realizar sucesivas iteraciones, utilizando una hoja de cálculo de Microsoft Excel y la ecuación (1.35), se puede ver que si el tubo de vidrio tiene un diámetro interior de 0.015 m, los regímenes de flujo son como se muestran en la figura 2.1.

En el régimen laminar: el caudal varia de 0.25 lt/min hasta 1.4 lt/min, la velocidad de 0.0236 m/s hasta 0.1320 m/s y el número de Reynolds de 353.040206 hasta 1977

En el régimen transitorio: el caudal varia de 1.5 lt/min hasta 2.8 lt/min, la velocidad de 0.145 m/s hasta 0.2641 m/s y el número de Reynolds de 2118.241236 hasta 3954

En el régimen turbulento: el caudal varia de 2.9 lt/min hasta 5.0 lt/min, la velocidad de 0.2735 m/s hasta 0.4716 m/s y el número de Reynolds de 4095.266389 hasta 7060.80412

De esto se obtiene que:

$$Q_{\min(\text{Tubode vidrio})} = 0.25 \text{ lt/min y } Q_{\max(\text{Tubode vidrio})} = 5 \text{ lt/min}$$

Caudal mínimo del líquido que fluye por el tubo de vidrio, correspondiente al régimen laminar: $Q_{\min(\text{Tubode vidrio})}$

Caudal máximo del líquido que fluye por el tubo de vidrio, correspondiente al régimen turbulento: $Q_{\max(\text{Tubode vidrio})}$

	D_i (m)	ρ (Kg/m ³)	μ (Kg/m.s)	Q		v (m/s)	$N_{Re} = \frac{4Q \times \rho}{\pi \times \mu \times D_i}$	$N_{Re} = \frac{4Q \times \rho}{\pi \times \mu \times D_i} \quad (1.35)$
				lt/min	m ³ /s			
7	0.015	998.2	0.001	0.25	0.000004	0.0236	353.040206	← Q_{\min} (Tubo de vidrio)
8	0.015	998.2	0.001	0.5	0.000008	0.0472	706.080412	
9	0.015	998.2	0.001	1	0.000017	0.0943	1412.160824	
10	0.015	998.2	0.001	1.4	0.000023	0.1320	1977	
11	0.015	998.2	0.001	1.487	0.000025	0.1402	2100	← Régimen crítico
12	0.015	998.2	0.001	1.5	0.000025	0.1415	2118.241236	← Régimen transitorio
13	0.015	998.2	0.001	1.75	0.000029	0.1650	2471	
14	0.015	998.2	0.001	2	0.000033	0.1886	2824.321648	
15	0.015	998.2	0.001	2.8	0.000047	0.2641	3954	← Régimen turbulento
16	0.015	998.2	0.001	2.9	0.000048	0.2735	4095.266389	
17	0.015	998.2	0.001	4.5	0.000075	0.4244	6354.723708	
18	0.015	998.2	0.001	5	0.000083	0.4716	7060.80412	← Q_{\max} (Tubo de vidrio)

Figura 2.1. Rango de las variables (caudal, velocidad y número de Reynolds) en cada régimen de flujo, si el diámetro interior del tubo de vidrio es 0.015 m

Fuente: (Elaboración propia).

- **Rango de caudal al que trabaja la electrobomba.** Se considera a las curvas de operación de tres electrobombas, que otorga la marca Kaili. Esto se puede ver claramente en el anexo 1
- **Diámetro interior del tubo vidrio.** Se considera un valor de 1.5cm = 0.015 m, por ser la medida que más se puede encontrar comercialmente.
- **Tiempo máximo que demora en pasar por el tubo de vidrio el volumen correspondiente a Q_{\min} (Tubo de vidrio).** Se considera a t_{\max} (Tubo de vidrio) = 50 s

2.2. CÁLCULOS DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN

2.2.1. CÁLCULO DEL RANGO DE CAUDAL AL QUE TRABAJA LA ELECTROBOMBA

Como se ha considerado que el rango de caudal en el tubo de vidrio es:

$$(Q_{\max(\text{Tubode vidrio})} - Q_{\min(\text{Tubode vidrio})}) = (5 - 0.25)\text{lt/min} = 4.75 \text{ lt/min}$$

En el anexo 1, los rangos de caudal para las 3 electrobombas son:

1. KQB-60: $r_{\text{Caudal}(1)} = 35.0 \text{ lt/min}$

2. KQB-70: $r_{\text{Caudal}(2)} = 45.0 \text{ lt/min}$

3. KQB-80: $r_{\text{Caudal}(3)} = 55.0 \text{ lt/min}$

Aplicando la ecuación (1.47), se tiene:

$$\begin{aligned} & \text{Min}\{[35.0 - (4.75)] , [45.0 - (4.75)] , [55.0 - (4.75)]\} \text{ lt/min} \\ & = [35.0 - (4.75)] \text{ lt/min} \end{aligned}$$

Esto indica, que la diferencia entre el rango de caudal al que trabaja la electrobomba y el rango de caudal en el tubo de vidrio debe ser 30.25 lt/min . Es decir la electrobomba elegida para el equipo de Reynolds es: KQB-60

2.2.2. CÁLCULO DE LA VELOCIDAD PROMEDIO MÍNIMA DEL LÍQUIDO EN EL TUBO DE VIDRIO

Despejando $v_{\min(\text{Tubode vidrio})}$ de la ecuación (1.48), se tiene que:

$$v_{\min(\text{Tubode vidrio})} = \frac{4Q_{\min(\text{Tubode vidrio})}}{\pi \times D_i^2(\text{Tubode vidrio})}$$

$$Q_{\min(\text{Tubode vidrio})} = 0.25 \text{ lt/min} = 4.17 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$D_{i(\text{Tubode vidrio})} = 1.5 \text{ cm} = 0.015 \text{ m}$$

$$\Rightarrow v_{\min(\text{Tubode vidrio})} = \frac{4 \times 4.17 \times 10^{-6}}{\pi \times (0.015)^2} = 0.0236 \text{ m/s} \approx 0.024 \text{ m/s}$$

2.2.3. CÁLCULO DE LA LONGITUD DEL TUBO DE VIDRIO

Aplicando la ecuación (1.49), se tiene:

$$L_{\text{Tubode vidrio}} = v_{\min(\text{Tubode vidrio})} t_{\max(\text{Tubode vidrio})} = (0.024) \times (50) = 1.2 \text{ m}$$

2.2.4. CÁLCULO DE LA ALTURA MÁXIMA DE PRESIÓN EN EL PUNTO DE INYECCIÓN DEL COLORANTE

Teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

$$\frac{P_A}{\gamma_{\text{H}_2\text{O}(^{\circ}T)}} = 0.15 \text{ m} , h_{\text{Bomba}} = 1.35 \text{ m} , Z_C - Z_A = 0.1 \text{ m}$$

$$Q_{(\text{Tramo AC})} = Q_{(\text{Tramo AB})} = 34 \text{ lt/min} = 5.67 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$h_{L(\text{Total AC})} = h_{L(\text{Tubería recta AC})} + h_{L(\text{Accesorios AC})}$$

Tramo AC

Tubería recta de 3/4 de pulgada

Longitud total = 0.175 m

Diámetro interior = 0.023 m

Tubería recta de 1 pulgada

Longitud total = 0.375 m

Diámetro interior = 0.03 m

$$\Rightarrow v_{3/4''(AC)} = \frac{4 \times 5.67 \times 10^{-4}}{\pi \times (0.023)^2} = 1.36 \text{ m/s}$$

Por continuidad se tiene que:

$$\Rightarrow v_{3/4''(AC)} (0.023)^2 = v_{1''(AC)} (0.03)^2 \Rightarrow v_{1''(AC)} = 0.8 \text{ m/s}$$

La densidad y viscosidad del agua a 30°C son:

$$\Rightarrow \rho = 995.7 \text{ Kg/m}^3, \quad \mu = 0.0008 \text{ Kg/m.s}$$

$$N_{\text{Re}(3/4''AC)} = \frac{v_{(3/4''AC)} D_{i(3/4''AC)} \rho_{\text{H}_2\text{O}(^{\circ}T)}}{\mu_{\text{H}_2\text{O}(^{\circ}T)}} = \frac{1.36 \times 0.023 \times 995.7}{0.0008} = 38931.87$$

$$N_{\text{Re}(1''AC)} = \frac{v_{(1''AC)} D_{i(1''AC)} \rho_{\text{H}_2\text{O}(^{\circ}T)}}{\mu_{\text{H}_2\text{O}(^{\circ}T)}} = \frac{0.8 \times 0.03 \times 995.7}{0.0008} = 29871$$

Considerando los tubos lisos, del diagrama de Moody se obtiene:

$$f_{(3/4''AC)} = 0.022, \quad f_{(1''AC)} = 0.0235$$

$$h_{L(\text{Tubería recta AC})} = h_{L(\text{Tubería recta AC})(3/4'')} + h_{L(\text{Tubería recta AC})(1'')}$$

$$h_{L(\text{Tubería recta AC})} = 0.022 \times \frac{0.175}{0.023} \times \frac{(1.36)^2}{2 \times 9.81} + 0.0235 \times \frac{0.375}{0.03} \times \frac{(0.8)^2}{2 \times 9.81}$$

$$= 0.0158 + 0.00958 = 0.02538 \text{ m}$$

$$h_{L(\text{Accesorios AC})} = h_{L(\text{Accesorios AC})(3/4'')} + h_{L(\text{Accesorios AC})(1'')}$$

Accesorios de 3/4''

Te a través de un tramo: $0.022 \times 20 \times \frac{(1.36)^2}{2 \times 9.81} = 0.0415$. (Ver tabla 1.1)

Expansión de 3/4 a 1'' : $1 \times \frac{(1.36)^2}{2 \times 9.81} = 0.094$

$$h_{L(\text{Accesorios AC})(1'')} = 0 \text{ , } h_{L(\text{Accesorios AC})(3/4'')} = 0.1355 \text{ m}$$

$$h_{L(\text{Accesorios AC})} = 0.1355 \text{ m}$$

$$h_{L(\text{Total AC})} = 0.02538 + 0.1355 = 0.16088 \text{ m}$$

$$\frac{v_C^2}{2g} = \frac{v_{1''(AC)}^2}{2g} = \frac{(0.8)^2}{2 \times 9.81} = 0.0326$$

Reemplazando los valores calculados en la ecuación (1.50), se tiene:

$$\frac{P_C}{\gamma_{\text{H}_2\text{O}(\text{°T})}} = \frac{P_A}{\gamma_{\text{H}_2\text{O}(\text{°T})}} + h_{\text{Bomba}} - h_{L(\text{Total AC})} - (Z_C - Z_A) - \frac{v_C^2}{2g}$$

$$\frac{P_C}{\gamma_{\text{H}_2\text{O}(\text{°T})}} = 0.15 + 1.35 - 0.16088 - (0.1) - 0.0326 = 1.20652 \text{ m}$$

Realizando el mismo procedimiento desde el punto *C* hasta el punto *E*₄

Tramo *CD*

Tubería recta de 1 pulgada

Longitud total = 0.155 m

Diámetro interior = 0.03 m

Por continuidad se tiene:

$$Q_{(\text{Tramo } AC)} = Q_{(\text{Tramo } AB)} = 34 \text{ lt/min} = 5.67 \times 10^{-4} \text{ m}^3 / \text{s} = Q_{(\text{Tramo } CD)}$$

$$\Rightarrow v_{1''(AC)} = 0.8 \text{ m/s} = v_{1''(CD)} \quad , \quad N_{\text{Re}(1''AC)} = 29871 = N_{\text{Re}(1''CD)}$$

$$\Rightarrow f_{(1''AC)} = 0.0235 = f_{(1''CD)}$$

$$h_{L(\text{Tubería recta } CD)} = 0.0235 \times \frac{0.155}{0.03} \times \frac{(0.8)^2}{2 \times 9.81} = 0.00396 \text{ m}$$

Accesorios de 1"

$$\text{Te a través de un rama: } 0.0235 \times 60 \times \frac{(0.8)^2}{2 \times 9.81} = 0.046 \text{ m} \quad . \quad (\text{Ver tabla 1.1})$$

$$h_{L(\text{Total } CD)} = 0.00396 + 0.046 = 0.04996 \text{ m}$$

Tramo *D*₃*E*

Tubería recta de 1 pulgada

Longitud total = 0.02 m

Diámetro interior = 0.03 m

Por continuidad se tiene:

$$Q_{(\text{Tramo } D_3E)} = Q_{(\text{Tramo } CD)} - Q_{(\text{Tramo } D_1D_2)} \quad , \quad Q_{(\text{Tramo } D_1D_2)} = 25 \text{ lt/min}$$

$$Q_{(\text{Tramo } D_3E)} = 34 - 25 = 9 \text{ lt/min} = 1.5 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\Rightarrow v_{1''(\text{Tramo } D_3E)} = \frac{4 \times 1.5 \times 10^{-4}}{\pi \times (0.03)^2} = 0.2122 \text{ m/s}$$

$$N_{\text{Re}1''(\text{Tramo } D_3E)} = \frac{v_{1''(\text{Tramo } D_3E)} D_{i(1''D_3E)} \rho_{\text{H}_2\text{O}(^{\circ}\text{T})}}{\mu_{\text{H}_2\text{O}(^{\circ}\text{T})}} = \frac{0.2122 \times 0.03 \times 995.7}{0.0008} = 7953.28$$

Del diagrama de Moody, se tiene:

$$f_{1''(\text{Tramo } D_3E)} = 0.032$$

$$h_{L1''(\text{Tubería recta } D_3E)} = 0.032 \times \frac{0.02}{0.03} \times \frac{(0.2122)^2}{2 \times 9.81} = 0.000049 \text{ m}$$

Tubería recta de 1/2 pulgada

Longitud total = 0.145 m

Diámetro interior = 0.015 m

Por continuidad se tiene:

$$\Rightarrow v_{1''(\text{Tramo } D_3E)} (0.03)^2 = v_{1/2''(\text{Tramo } D_3E)} (0.015)^2 \Rightarrow v_{1/2''(\text{Tramo } D_3E)} = 0.8488 \text{ m/s}$$

$$N_{\text{Re}1/2''(\text{Tramo } D_3E)} = \frac{v_{1/2''(\text{Tramo } D_3E)} D_{i(1/2''D_3E)} \rho_{\text{H}_2\text{O}(^{\circ}\text{T})}}{\mu_{\text{H}_2\text{O}(^{\circ}\text{T})}}$$

$$= \frac{0.8488 \times 0.015 \times 995.7}{0.0008} = 15846.57$$

Del diagrama de Moody, se tiene:

$$f_{1/2}(\text{Tramo } D_3E) = 0.028$$

$$h_{L1/2}(\text{Tubería recta } D_3E) = 0.028 \times \frac{0.145}{0.015} \times \frac{(0.8488)^2}{2 \times 9.81} = 0.00993 \text{ m}$$

Accesorios de 1/2"

$$\text{Válvula esférica completamente abierta: } 0.028 \times 8 \times \frac{(0.8488)^2}{2 \times 9.81} = 0.00823 \text{ m}$$

$$\text{Te a través de un rama: } 0.028 \times 60 \times \frac{(0.8488)^2}{2 \times 9.81} = 0.061 \text{ m . (Ver tabla 1.1)}$$

$$\text{Reducción de 1 a 1/2" : } 1 \times \frac{(0.8488)^2}{2 \times 9.81} = 0.0367 \text{ m}$$

$$h_{L1/2}(\text{Accesorios } D_3E) = 0.00823 + 0.061 + 0.0367 = 0.1059 \text{ m}$$

$$h_{L1/2}(\text{Total } D_3E) = h_{L1/2}(\text{Tubería recta } D_3E) + h_{L1/2}(\text{Accesorios } D_3E)$$

$$h_{L1/2}(\text{Total } D_3E) = 0.00993 + 0.1059 = 0.11583 \text{ m}$$

$$h_{L(\text{Total } D_3E)} = h_{L1}(\text{Tubería recta } D_3E) + h_{L1/2}(\text{Total } D_3E)$$

$$h_{L(\text{Total } D_3E)} = 0.000049 + 0.11583 = 0.11583 \text{ m}$$

Tramo E_3E_4

Tubería recta de 1/2 pulgada

Longitud total = 0.4 m

Diámetro interior = 0.015 m

Por continuidad se tiene:

$$Q_{(\text{Tramo } E_3E_4)} = Q_{(\text{Tramo } D_3E)} - Q_{(\text{Tramo } E_1E_2)} \quad , \quad Q_{(\text{Tramo } E_1E_2)} = 4 \text{ lt/min}$$

$$Q_{(\text{Tramo } E_3E_4)} = 9 - 4 = 5 \text{ lt/min} = 8.33 \times 10^{-5} \text{ m}^3 / \text{s}$$

$$\Rightarrow v_{1/2''(\text{Tramo } E_3E_4)} = \frac{4 \times 8.33 \times 10^{-5}}{\pi \times (0.015)^2} = 0.4714 \text{ m/s}$$

$$N_{\text{Re } 1/2''(\text{Tramo } E_3E_4)} = \frac{v_{1/2''(\text{Tramo } E_3E_4)} D_{i(1/2''E_3E_4)} \rho_{\text{H}_2\text{O}(^{\circ}T)}}{\mu_{\text{H}_2\text{O}(^{\circ}T)} 1/2''}$$

$$= \frac{0.4714 \times 0.015 \times 995.7}{0.0008} = 8800.74$$

Del diagrama de Moody, se tiene:

$$f_{\text{Re } 1/2''(\text{Tramo } E_3E_4)} = 0.032$$

$$h_{L1/2''(\text{Tubería recta } E_3E_4)} = 0.032 \times \frac{0.4}{0.015} \times \frac{(0.4714)^2}{2 \times 9.81} = 0.00966 \text{ m}$$

Accesorios de 1/2''

$$\text{Válvula esférica completamente abierta: } 0.032 \times 8 \times \frac{(0.4714)^2}{2 \times 9.81} = 0.002899 \text{ m}$$

$$2 \text{ codos de } 90^\circ : 2 \times 30 \times 0.032 \times \frac{(0.4714)^2}{2 \times 9.81} = 0.0217 \text{ m}$$

$$\text{Expansión de } 1/2 \text{ a } 1'' : 1 \times \frac{(0.4714)^2}{2 \times 9.81} = 0.01132 \text{ m}$$

$$h_{L1/2''(\text{Accesorios } E_3E_4)} = 0.002899 + 0.0217 + 0.01132 = 0.0359 \text{ m}$$

$$h_{L1/2}(\text{Total } E_3E_4) = h_{L1/2}(\text{Tubería recta } E_3E_4) + h_{L1/2}(\text{Accesorios } E_3E_4)$$

$$h_{L1/2}(\text{Total } E_3E_4) = 0.00966 + 0.0359 = 0.04556 \text{ m}$$

$$h_{L(\text{Total } CE_4)} = h_{L(\text{Total } CD)} + h_{L(\text{Total } D_3E)} + h_{L1/2}(\text{Total } E_3E_4)$$

$$h_{L(\text{Total } CE_4)} = 0.04996 + 0.11583 + 0.04556 = 0.21135 \text{ m}$$

Por continuidad en el punto E_4

$$\Rightarrow v_{1/2}(\text{Tramo } E_3E_4)(0.015)^2 = v_{1''(E_4)}(0.03)^2 \Rightarrow v_{1''(E_4)} = 0.11785 \text{ m/s}$$

$$\frac{v_{1''(E_4)}^2}{2g} = \frac{(0.11785)^2}{2 \times 9.81} = 0.000708 \text{ m}$$

Aplicando la ecuación (1.53)

$$(Z_{E_4} - Z_C) = 0.85 \text{ m}$$

$$\frac{v_C^2}{2g} = 0.0326 \text{ m}$$

$$\frac{P_C}{\gamma_{H_2O}(\text{°T})} = 1.20652 \text{ m}$$

$$\frac{v_{E_4}^2}{2g} = 0.000708 \text{ m}$$

$$h_{L(\text{Total } CE_4)} = 0.21135 \text{ m}$$

Reemplazando los valores calculados en la ecuación (1.50), se tiene:

$$\frac{P_{E_4}}{\gamma_{H_2O}(\text{°T})} = \frac{P_C}{\gamma_{H_2O}(\text{°T})} + \frac{v_C^2}{2g} - (Z_{E_4} - Z_C) - h_{L(\text{Total } CE_4)} - \frac{v_{E_4}^2}{2g}$$

$$\Rightarrow \frac{P_{E_4}}{\gamma_{H_2O(^{\circ}T)}} = 1.20652 + 0.0326 - 0.85 - 0.21135 - 0.000708 = 0.177 \text{ m}$$

Esto indica que la altura de presión máxima en el punto E_4 es: $\frac{P_{E_4}}{\gamma_{H_2O(^{\circ}T)}} = 0.177 \text{ m}$

Esta situación se da cuando el caudal en el tubo de vidrio es 5lt/min.

Además se puede notar, que mediante el diseño que se ha realizado para el equipo, la altura de presión en el punto E_4 , es bastante menor que la altura de presión en el punto

C , es decir: $\frac{P_{E_4}}{\gamma_{H_2O(^{\circ}T)}} = 0.177 \text{ m}$ y $\frac{P_C}{\gamma_{H_2O(^{\circ}T)}} = 1.20652 \text{ m}$. Esto significa que la presión del

líquido a la salida de la electrobomba (punto C), se reduce grandemente hasta llegar al punto E_4 , haciendo posible la inyección del colorante.

CAPÍTULO III: CONSTRUCCIÓN E INSTALACIÓN DEL EQUIPO

3.1. MATERIALES EMPLEADOS

Un tubo de vidrio de 1.5 cm de diámetro, 1.2 m de longitud y 2.0 mm de espesor

Una electrobomba de ½ Hp

Una tubería de 1 pulgada de diámetro (PVC SAP)

Una tubería de 1/2 pulgada de diámetro (PVC SAP)

Una tubería de 3/4 pulgada de diámetro (PVC SAP)

Un tanque cilindro cónico de 350 lt

Una válvula de compuerta para tubería de 1 pulgada

Una válvula esférica PVC para tubería de 3/4 pulgada

Tres válvulas esféricas de PVC para tubería de 1/2 pulgada

Cuatro adaptadores PVC para tubería de 1 pulgada

Dos adaptadores PVC para tubería de 3/4 pulgada

Seis adaptadores PVC para tubería de 1/2 pulgada

Dos codos de 90° PVC para tubería de 1 pulgada

Cinco codos de 90° PVC para tubería de 1/2 pulgada

Una reducción PVC de 1 a 3/4 pulgada

Tres reducciones PVC de 1 a 1/2 pulgada

Una te PVC para tubería de 1 pulgada

Una te PVC para tubería de 3/4 pulgada

Una te PVC para tubería de 1/2 pulgada

Tres uniones universales PVC para tubería de 1 pulgada

Una unión universal PVC para tubería de 3/4 pulgada

Siete uniones universales PVC para tubería de 1/2 pulgada

Cinco uniones PVC con embone para tubería de 1 pulgada

Cinco uniones PVC con embone para tubería de 1/2 pulgada

Una válvula esférica de bronce de 1/4 pulgada de diámetro

Dos adaptadores de bronce de 1/4 pulgada de diámetro

Cinco reducciones de bronce de 1/4 a 1/8 de pulgada
Cincuenta centímetros de tubo de bronce de 1/8 de pulgada de diámetro
Seis carretes de cinta teflón
Dos envases medianos de pegamento para tubo
Una llave termomagnética de 2x16 amperios
Una caja para sobre poner la llave termomagnética
Cuatro metros de cable vulcanizado 2x16 AWG
Un enchufe bipolar
Cuatro abrazaderas de 1/2 pulgada
Cuatro Pegatodo (marca Chemer)
Una abrazadera de 1 pulgada
Un recipiente para el colorante (puede una capacidad de 1lt)
Un recipiente cilíndrico para recepción del líquido (puede ser de 20 lt)
Medio de galón de pintura esmalte (color aluminio)
Medio de galón de pintura esmalte (color negro)
Dos botellas de tiner
Dos hojas de cierra
Estructura metálica compuesta por angulares y platinas

3.5. ESPECIFICACIÓN DE LOS COMPONENTES PRINCIPALES DEL EQUIPO

3.5.1. TANQUE RESERVORIO

Material: Polietileno
Diámetro mayor = 0.7 m
Diámetro menor = 0.55 m
Altura total = 0.985 m
Capacidad total = 350 lt

3.5.2. LÍNEA DE PURGA

Accesorios

Una te PVC para tubería de 3/4 de pulgada

Una válvula esférica PVC para tubería de 3/4 de pulgada

Dos adaptadores PVC para tubería de 3/4 de pulgada

Tubería recta de 3/4 de pulgada de diámetro

Material: PVC SAP cédula 10

Longitud = 0.08 m

Diámetro interno = 0.023 m

Diámetro externo = 0.027 m

Espesor = 0.002 m

3.5.3. LÍNEA DE SUCCIÓN DE LA ELECTROBOMBA

Accesorios

Una unión universal PVC para tubería de 3/4 de pulgada

Una te PVC para tubería de 3/4 de pulgada

Una reducción PVC de 1 a 3/4 de pulgada

Una unión universal PVC para tubería de 1 pulgada

Un adaptador PVC para tubería de 1 pulgada

Una unión PVC con embone para tubería de 1 pulgada

Tubería recta de 3/4 de pulgada de diámetro

Material: PVC SAP cédula 10

Longitud = 0.125 m

Diámetro interno = 0.023 m

Diámetro externo = 0.027 m

Espesor = 0.002 m

Tubería recta de 1 pulgada de diámetro

Material: PVC SAP cédula 10

Longitud = 0.225 m

Diámetro interno = 0.03 m

Diámetro externo = 0.034 m

Espesor = 0.002 m

3.5.4. ELECTROBOMBA

Marca: Kaili

Voltaje: 220–230 voltios

Potencia nominal: 1/2 Hp

Caudal máximo: 35lt/min

Frecuencia: 60Hz

3.5.5. TRAMO *CD*

Accesorios

Un adaptador PVC para tubería de 1 pulgada

Una unión PVC con embone para tubería de 1 pulgada

Una unión universal PVC para tubería de 1 pulgada

Una te PVC para tubería de 1 pulgada

Tubería recta de 1 pulgada de diámetro

Material: PVC SAP cédula 10

Longitud = 0.105 m

Diámetro interno = 0.03 m

Diámetro externo = 0.034 m

Espesor = 0.002 m

3.5.6. LÍNEA DE RETORNO D_1D_2

Accesorios

Una unión universal PVC para tubería de 1 pulgada

Dos adaptadores PVC para tubería de 1 pulgada

Una válvula de compuerta de bronce grafitado para tubería de 1 pulgada

Dos codos de 90° PVC para tubería de 1 pulgada

Tres uniones PVC con embone para tubería de 1 pulgada

Tubería recta de 1 pulgada de diámetro

Material: PVC SAP cédula 10

Longitud = 1.31 m

Diámetro interno = 0.03 m

Diámetro externo = 0.034 m

Espesor = 0.002 m

3.5.7. TRAMO D_3E

Accesorios

Una reducción PVC de 1 a 1/2 de pulgada

Una válvula esférica PVC para tubería de 1/2 pulgada

Dos adaptadores PVC para tubería de 1/2 pulgada

Una unión universal PVC para tubería de 1 pulgada

Una te PVC para tubería de 1/2 pulgada

Tubería recta de 1 pulgada de diámetro

Material: PVC SAP cédula 10

Longitud = 0.02 m

Diámetro interno = 0.03 m

Diámetro externo = 0.034 m

Espesor = 0.002 m

Tubería recta de 1/2 pulgada de diámetro

Material: PVC SAP cédula 10

Longitud = 0.055 m

Diámetro interno = 0.015 m

Diámetro externo = 0.019 m

Espesor = 0.002 m

3.5.8. LÍNEA DE RETORNO $E_1 E_2$

Accesorios

Dos uniones universales PVC para tubería de 1/2 pulgada

Dos adaptadores PVC para tubería de 1/2 pulgada

Una válvula esférica PVC para tubería de 1/2 pulgada

Dos codos de 90° PVC para tubería de 1/2 pulgada

Una unión PVC con embone para tubería de 1/2 pulgada

Tubería recta de 1/2 pulgada de diámetro

Material: PVC SAP cédula 10

Longitud = 0.044 m

Diámetro interno = 0.015 m

Diámetro externo = 0.019 m

Espesor = 0.002 m

3.5.9. TRAMO $E_3 F$

Accesorios

Cuatro uniones universales PVC para tubería de 1/2 pulgada

Dos adaptadores PVC para tubería de 1/2 pulgada

Una válvula esférica PVC para tubería de 1/2 pulgada

Cinco codos de 90° PVC para tubería de 1/2 pulgada

Dos reducciones PVC de 1 a 1/2 de pulgada

Cuatro uniones con embone PVC para tubería de 1/2 pulgada

Tubo de vidrio

Longitud = 1.2 m

Diámetro interno = 0.015 m

Diámetro externo = 0.019 m

Espesor = 0.002 m

Tubería recta de 1/2 pulgada de diámetro

Material: PVC SAP cédula 10

Longitud = 0.985m

Diámetro interno = 0.015 m

Diámetro externo = 0.019 m

Espesor = 0.002 m

3.5.10. RECIPIENTE DE COLORANTE

Material: Polietileno

Altura total = 0.10 m

Diámetro menor = 0.095 m

Diámetro mayor = 0.1 m

Espesor = 0.001 m

3.5.11. LÍNEA DE INYECCIÓN DE COLORANTE**Accesorios**

Una válvula esférica de bronce para tubería de 1/4 pulgada

Dos adaptadores de bronce para tubería de 1/4 pulgada

Cinco reducciones de bronce de 1/4 a 1/8 de pulgada

Tubería recta de 1/8 pulgada de diámetro

Material: Cobre

Longitud = 0.375 m

Diámetro nominal = 1/8 de pulgada

3.5.12. INSTALACIÓN ELÉCTRICA

Llave termomagnética

Corriente = 2x16 Amperios

Cablería

Vulcanizado AWG N°16

Longitud = 4m

Enchufe

Bipolar monofásico 220V

3.5.13. ESTRUCTURA METÁLICA

Longitud total = 3.9 m

Ancho = 0.7 m

Altura total = 2 m

3.6. DISPOSICIÓN ADECUADA DEL EQUIPO EN EL LABORATORIO

Para trabajar cómodamente el equipo se debe ubicar en un lugar que tenga las siguientes dimensiones:

Largo = 4 m

Ancho = 3 m

Alto = 3m

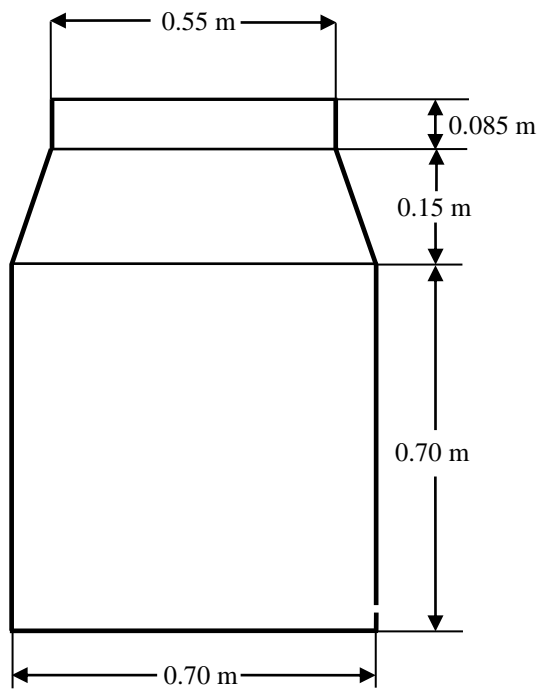
Además, este lugar debe contar por lo menos con lo siguiente:

- Un grifo para el suministro de agua al tanque reservorio
- Un tomacorriente bipolar (220V) para conectar el enchufe de la electrobomba

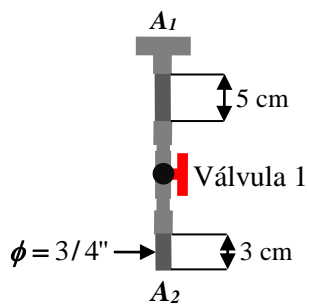
- Una rejilla con conexión a un desagüe, para hacer la descarga del líquido que está en el tanque reservorio

3.7. DESPIECE DEL EQUIPO

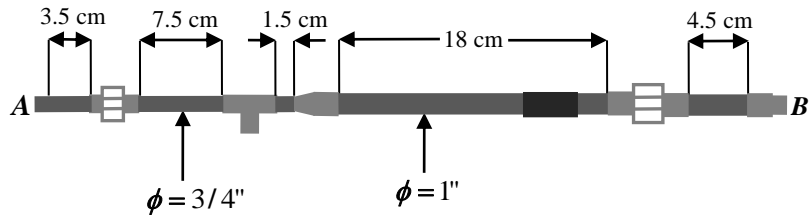
Tanque reservorio



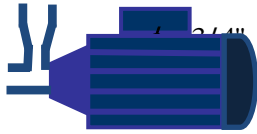
Línea de purga



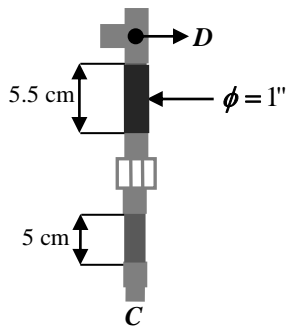
Línea de succión de la electrobomba



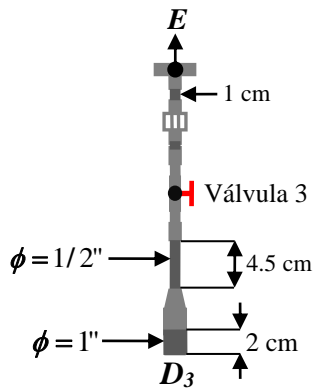
Electrobomba



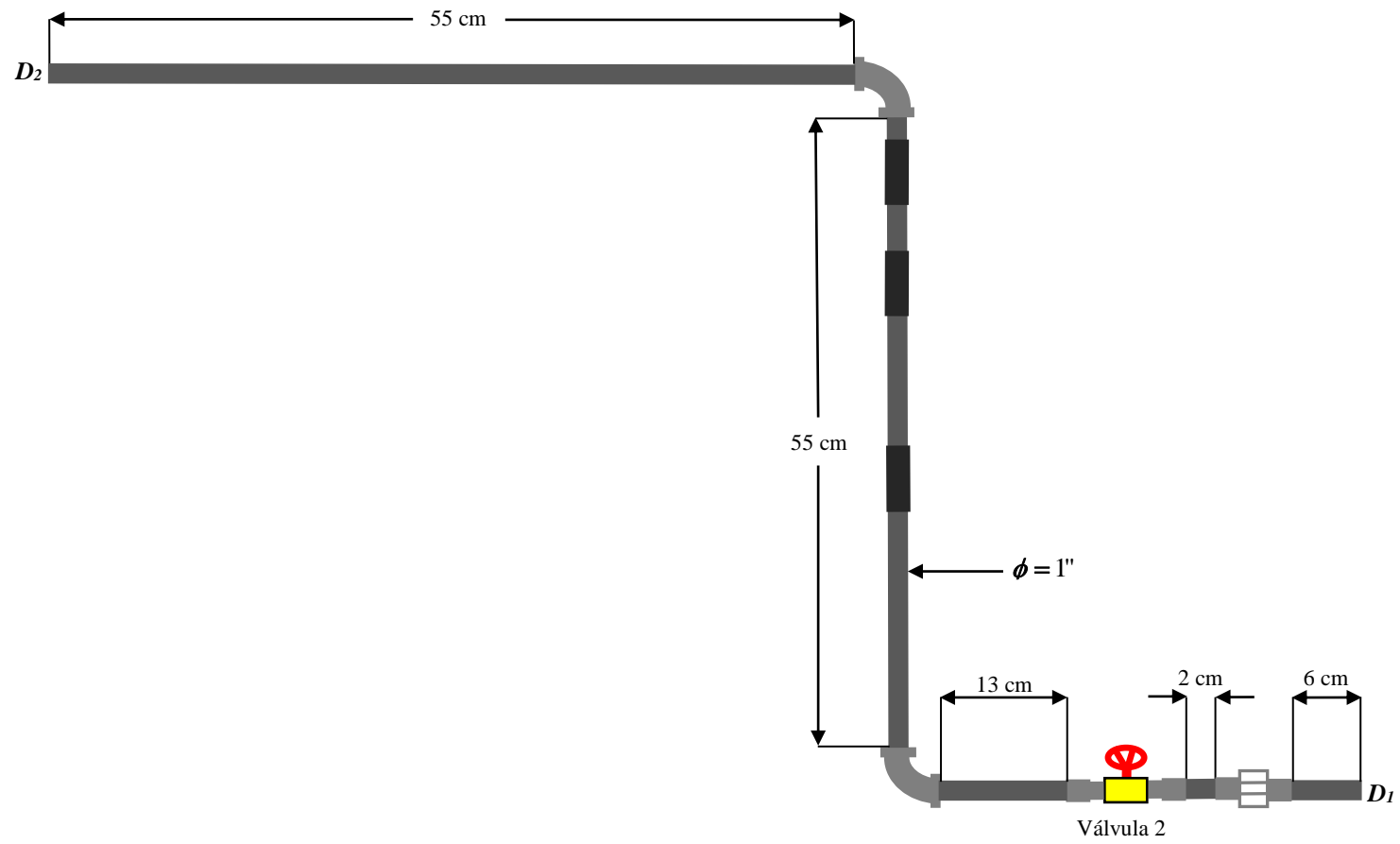
Tramo CD



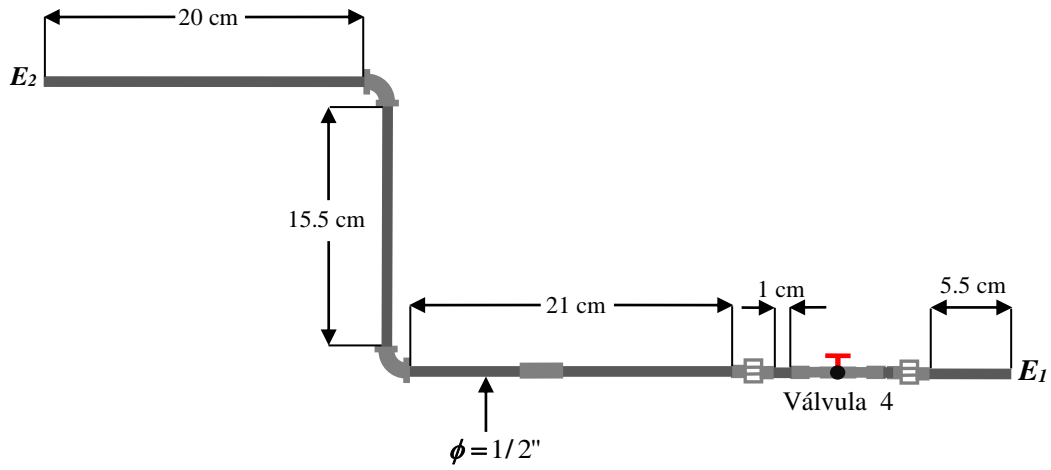
Tramo D₃E



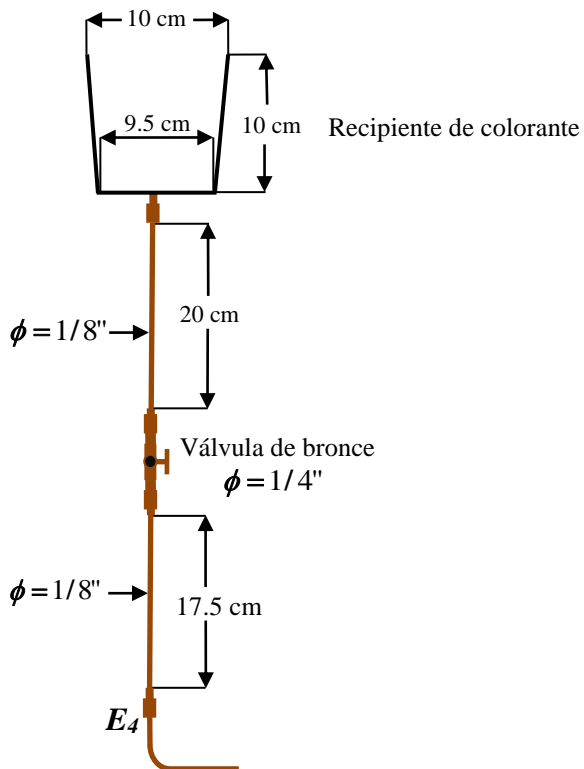
Línea de retorno $D_1 D_2$



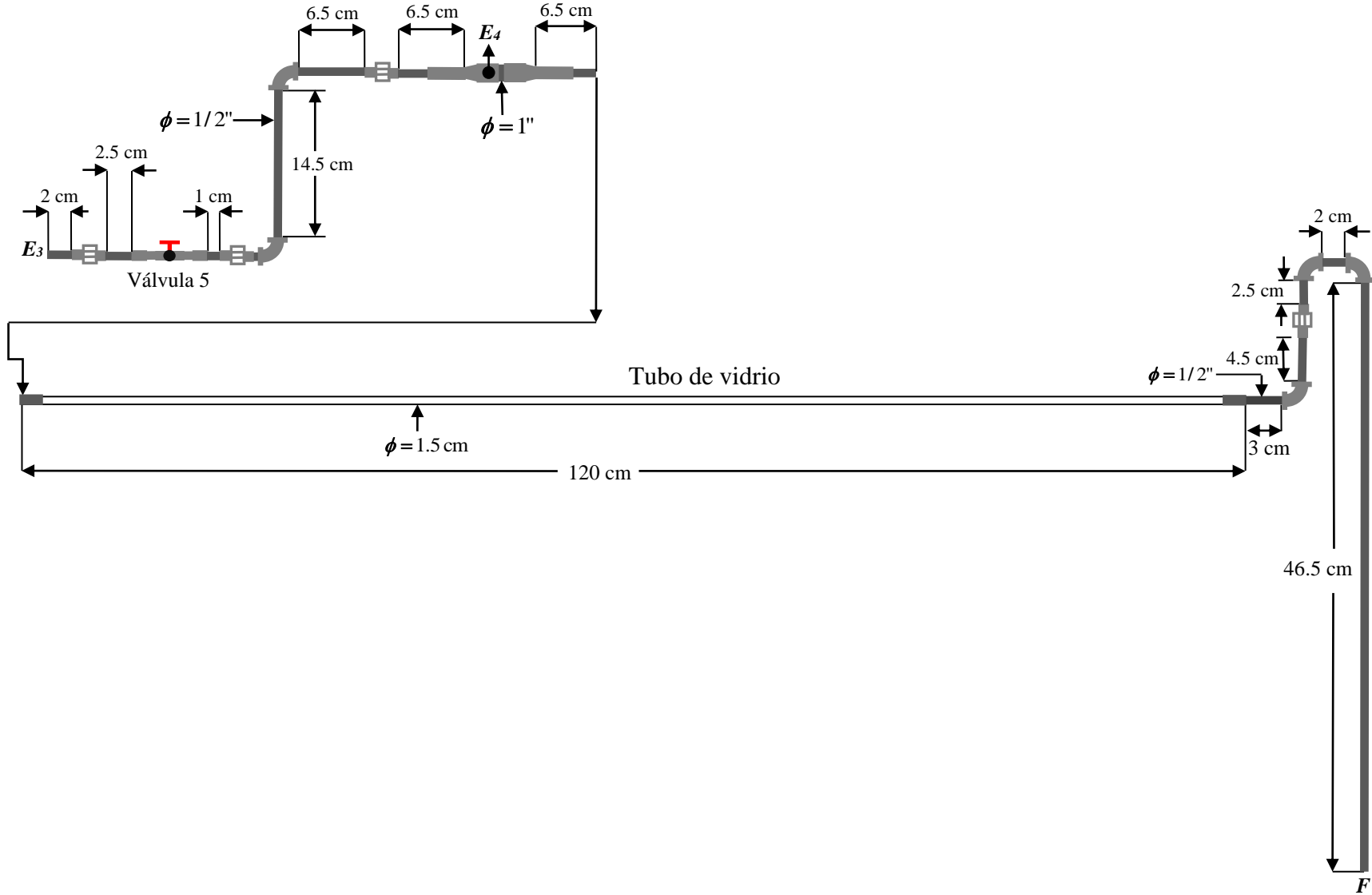
Línea de retorno $E_1 E_2$



Línea de inyección y recipiente de colorante



Tramo E_3F



CAPÍTULO IV: EVALUACIÓN DE LAS VARIABLES DE FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO

4.1. DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO

El equipo inicia su funcionamiento al momento que se prende la electrobomba, este prendido se realiza accionando la llave termomagnética. Como se mencionó en la sección 1.7, la electrobomba tiene por funciones: impulsar el líquido que se encuentra en el tanque reservorio a través del conjunto de tuberías que conforman el equipo y mantener el caudal del líquido continuo y permanente.

Cuando la electrobomba bombea el líquido desde el punto *A*, hasta los puntos *D*₂, *E*₂ y *F*, y si se desea que el flujo del líquido en el tubo de vidrio sea laminar, la válvula 1 debe estar totalmente cerrada, las válvulas 2, 3, 4, deben estar completamente abiertas y la válvula 5 debe abrirse en un porcentaje mínimo. Por ejemplo, de acuerdo a la figura 2.1, la hoja de cálculo muestra que para obtener un número de Reynolds de 706.080412 para el líquido que fluye por tubo de vidrio, el caudal y la velocidad deben ser, 0.5 lt/min y 0.0472 m/s, respectivamente. Para lograr esta situación, la válvula 1 debe estar completamente cerrada para que el líquido no pase a la línea de purga, entonces por la ecuación de continuidad el caudal en el punto *D* es igual al caudal que produce la electrobomba (34 lt/min), en el punto *D* el caudal se distribuye una gran parte hacia la línea de retorno *D*₁*D*₂ (la válvula 2 debe estar completamente abierta para que pase 25 lt/min a esta línea) y otra parte hacia el tramo *D*₃*E* (la válvula 3 debe estar completamente abierta para que pase 9 lt/min a este tramo). En el punto *E* los 9 lt/min se distribuyen una gran parte hacia la línea de retorno *E*₁*E*₂ (la válvula 4 debe estar completamente abierta para que pase 8.5 lt/min a esta línea) y otra parte hacia el tramo *E*₃*F* donde se encuentra el tubo de vidrio (la válvula 5 debe estar abierta en un porcentaje mínimo para que pase 0.5 lt/min a este tramo). En el punto *E*₄, se inyecta el colorante a través de la válvula de bronce que se encuentra en la línea de inyección, de esta forma se puede notar en el tubo de vidrio las características que corresponden al flujo laminar. El líquido termina su recorrido en el punto *F* del tramo *E*₃*F*, descargando en el tanque de recepción.

En el punto F , haciendo uso de una probeta graduada se puede medir el volumen recepcionado durante un determinado tiempo (tiempo de recepción) y mediante esto determinar el caudal del líquido que fluye por el tubo de vidrio, aplicando la ecuación (1.32).

Del mismo modo, si se desea que el flujo del líquido en el tubo de vidrio sea transitorio, la válvula 1 debe estar totalmente cerrada, las válvulas 2, 3 y 5, deben estar completamente abiertas y la válvula 4 se debe cerrar en un porcentaje mínimo. Esto hace que se tenga la siguiente situación: el caudal en el punto D es igual al caudal que produce la electrobomba (34 lt/min), distribuyéndose una gran parte hacia la línea de retorno D_1D_2 (la válvula 2 debe estar completamente abierta para que pase 25 lt/min a esta línea) y otra parte hacia el tramo D_3E (la válvula 3 debe estar completamente abierta para que pase 9 lt/min a este tramo), en el punto E los 9 lt/min se distribuyen una parte hacia la línea de retorno E_1E_2 (la válvula 4 no debe estar completamente abierta para que pase de 6.2 a 7.5 lt/min a esta línea) y otra parte hacia el tramo E_3F donde se encuentra el tubo de vidrio (la válvula 5 debe estar abierta completamente para que pase de 1.5 a 2.8 lt/min a este tramo)

Si se desea conseguir que el flujo del líquido en el tubo de vidrio sea turbulento, la situación debe ser la siguiente: el caudal en el punto D es igual al caudal que produce la electrobomba (34 lt/min), distribuyéndose una gran parte hacia la línea de retorno D_1D_2 (la válvula 2 debe estar completamente abierta para que pase 25 lt/min a esta línea) y otra parte hacia el tramo D_3E (la válvula 3 debe estar completamente abierta para que pase 9 lt/min a este tramo), en el punto E los 9 lt/min se distribuyen una parte hacia la línea de retorno E_1E_2 (la válvula 4 no debe estar completamente abierta para que pase de 4 a 6.1 lt/min a esta línea) y otra parte hacia el tramo E_3F donde se encuentra el tubo de vidrio (la válvula 5 debe estar abierta completamente para que pase de 2.9 a 5 lt/min a este tramo).

Del mismo modo que para el flujo laminar, en los flujos transitorio y turbulento, también se inyecta el colorante en el punto E_4 , a través de la válvula de bronce que se encuentra en la línea de inyección, notándose de esta forma en el tubo de vidrio las características que corresponden a cada flujo.

Se debe recordar que en todo momento que se está realizando las prácticas en el equipo, la válvula 1 debe estar cerrada.

4.2. INSTRUCCIONES PARA EL FUNCIONAMIENTO Y CÁLCULO DE LAS VARIABLES DE OPERACIÓN DEL EQUIPO

- Antes de empezar a realizar los experimentos en el equipo, es necesario que se ponga agua en el tanque reservorio, aproximadamente unos 200 lt. Después se debe medir la temperatura a la que está el agua, se puede emplear una hoja de cálculo de Microsoft Excel para que de ese modo se calculen los valores de la densidad y viscosidad. Para esto véase el siguiente procedimiento.

Suponga que la temperatura del líquido es 31°C, entonces se escribe este valor en la celda C11, tal como se muestra en la figura 4.1. Seguidamente se escribe el intervalo de temperaturas donde se encuentra la temperatura del líquido, esto en las celdas C15 y C16.

The screenshot shows a Microsoft Excel spreadsheet titled 'Prueba Reynolds - Microsoft Excel'. The spreadsheet contains a table of fluid properties and a section for temperature measurement. The table of properties is as follows:

$T(^{\circ}\text{C})$	$\rho(\text{Kg}/\text{m}^3)$	$\mu(\text{Kg}/\text{m}\cdot\text{s})$
0	999.8	0.001794
10	999.7	0.00131
20	998.2	0.001009
30	995.7	0.0008
40	992.2	0.000654

Below the table, there is a section for temperature measurement:

¿Cuánto es la temperatura del fluido en °C?

31

Escriba el intervalo de temperatura donde se encuentra la temperatura del fluido

Inicial	30
Final	40

Figura 4.1. Intervalo de temperatura donde se encuentra la temperatura del líquido

Fuente: (Elaboración propia).

Seguidamente, se escriben los valores de las densidades y las viscosidades, correspondientes al intervalo de temperatura donde se encuentra la temperatura del líquido, tal como se muestra en la figura 4.2.

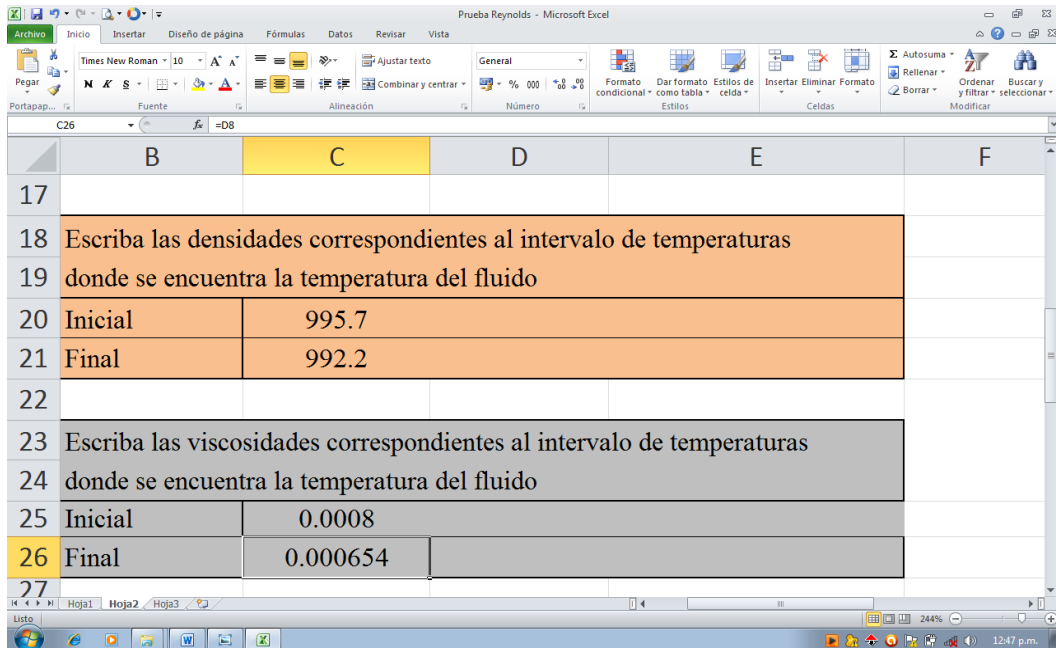


Figura 4.2. Densidades y viscosidades correspondientes al intervalo de temperatura donde se encuentra la temperatura del líquido

Fuente: **(Elaboración propia).**

De esta forma mediante la hoja de cálculo de Microsoft Excel se calculan los valores de la densidad (B36) y viscosidad (C36), correspondientes a la temperatura que se encuentra el líquido. Véanse las figuras 4.3 y 4.4.

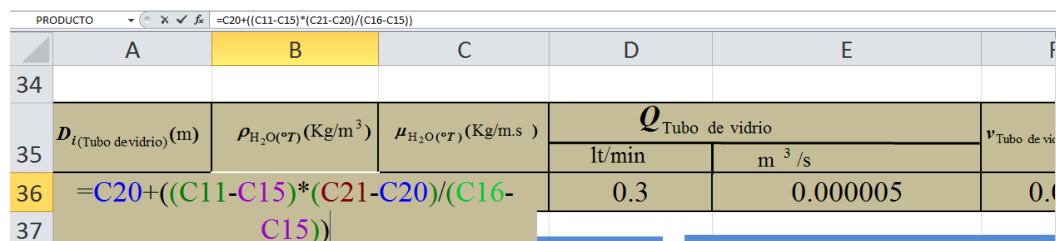


Figura 4.3. Cálculo de la densidad correspondiente a la temperatura que se encuentra el líquido

Fuente: **(Elaboración propia)**.

PRODUCTO						
=C25+((C11-C15)*(C26-C25)/(C16-C15))						
	A	B	C	D	E	
34						
35	$D_{I(\text{Tubo de vidrio})}$ (m)	$\rho_{\text{H}_2\text{O}(e_T)}$ (Kg/m ³)	$\mu_{\text{H}_2\text{O}(e_T)}$ (Kg/m.s)	$Q_{\text{Tubo de vidrio}}$		$v_{\text{Tubo de vidrio}}$
				lt/min	m ³ /s	
36	=C25+((C11-C15)*(C26-C25)/(C16-C15))			05	0.0	

Figura 4.4. Cálculo de la viscosidad correspondiente a la temperatura que se encuentra el líquido

Fuente: **(Elaboración propia)**

- El prendido y apagado de la electrobomba se hace por medio de la llave termomagnética. Véase el anexo 5
- La inyección del colorante se hace a través de la válvula de bronce que está en la línea de inyección. Véase el anexo 6
- La regulación del caudal a través de la línea de retorno E_1E_2 , se hace por medio de la válvula 4
- La regulación del caudal a través del tramo E_3F , se hace por medio de la válvula 5
- Las características que corresponden a cada régimen de flujo se pueden observar claramente en el tubo de vidrio. Por ejemplo, si se nota que se forman líneas rectas, entonces en la celda E29 de la hoja de cálculo se escribe **Laminar**, tal como se muestra en la figura 4.5.

F30				
	Fx			
	B	C	D	E
24	donde se encuentra la temperatura del fluido			
25	Inicial	0.0008		
26	Final	0.000654		
27				
29	Escriba el régimen de flujo que observa			Laminar

Figura 4.5. Régimen de flujo observado mediante inspección visual en el tubo de vidrio

Fuente: **(Elaboración propia)**

Si en caso la característica del flujo es ondulatoria se escribe **Transitorio**. Si la característica de flujo se observa como líneas entrecruzadas se escribe **Turbulento**

- La recepción del líquido que sale del punto **F** se hace por medio del tanque de recepción. Véase la figura 1.14.
- La medición de un determinado volumen recepcionado V_R , se puede realizar por medio de una probeta graduada o cualquier recipiente que tenga el volumen graduado en un rango de 0 a 2.5 lt
- El tiempo que dura la recepción t_R del volumen V_R , se puede medir utilizando un cronómetro
- Una vez que se conoce el valor de V_R y t_R , se puede utilizar la hoja de cálculo de Microsoft Excel y las ecuaciones (1.32) y (1.33), para calcular $Q_{\text{Tubode vidrio}}$ y $v_{\text{Tubode vidrio}}$, respectivamente, es decir:

$$Q_{\text{Tubode vidrio}} = \frac{V_R}{t_R} \quad \text{y} \quad v_{\text{Tubode vidrio}} = \frac{4Q_{\text{Tubode vidrio}}}{\pi \times D_i^2 (\text{Tubode vidrio})}$$

Por ejemplo, si después de afirmar que el flujo es laminar (celda E29), se obtienen los valores: $V_R = 0.3 \text{ lt}$ y $t_R = 60 \text{ s}$

Estos valores se escriben en las celdas E31 y E33 de la hoja de cálculo, tal como se muestra en la figura 4.6.

	B	C	D	E
27				
29	Escriba el régimen de flujo que observa			Laminar
30				
31	Escriba el volumen recepcionado en lt V_R			0.3
32				
33	Escriba el tiempo que dura la recepción en s t_R			60

Figura 4.6. Valor de V_R y t_R

Fuente: (Elaboración propia)

Después de escribir el valor de V_R y t_R , mediante la hoja de cálculo, se calcula automáticamente el valor de $Q_{\text{Tubode vidrio}}$ (D36 y E36) y $v_{\text{Tubode vidrio}}$ (F36). Véase la figura 4.7.

	A	B	C	D	E	F	G
34							
35	$D_i(\text{Tubo de vidrio})$ (m)	$\rho_{\text{H}_2\text{O}(\text{°T})}$ (Kg/m ³)	$\mu_{\text{H}_2\text{O}(\text{°T})}$ (Kg/m.s)	$Q_{\text{Tubo de vidrio}}$		$v_{\text{Tubo de vidrio}}$ (m/s)	N_{Re}
36	0.015	995.35	0.0007854	lt/min	m ³ /s	0.03	537.86436
37							
38	$Q_{\text{Tubo de vidrio}} = \frac{V_R}{t_R}$		$v_{\text{Tubo de vidrio}} = \frac{4Q_{\text{Tubo de vidrio}}}{\pi \times D_i^2(\text{Tubo de vidrio})}$		$N_{\text{Re}} = \frac{4Q_{\text{Tubo de vidrio}} \times \rho_{\text{H}_2\text{O}(\text{°T})}}{\pi \times \mu_{\text{H}_2\text{O}(\text{°T})} \times D_i(\text{Tubo de vidrio})}$		
39							
40							
41			Laminar	Transitorio	Turbulento		
42		Rango de N_{Re}	<0 -2100>	<2100 - 4000>	>4000		
43							
44	Afirmo o niegue si al número de Reynolds calculado le corresponde el régimen de flujo que observó						Si
45							
46							

Figura 4.7. Cálculo del valor de $Q_{\text{Tubode vidrio}}$, $v_{\text{Tubode vidrio}}$ y N_{Re}

Fuente: (Elaboración propia)

- Como se conoce $Q_{\text{Tubode vidrio}}$, $v_{\text{Tubode vidrio}}$ y el valor de la densidad y viscosidad, correspondientes a la temperatura que está el líquido (agua), se puede aplicar la ecuación (1.34) o la ecuación (1.35), para calcular el número de Reynolds, es decir:

$$N_{\text{Re}} = \frac{v_{\text{Tubode vidrio}} D_i(\text{Tubo de vidrio}) \rho_{\text{H}_2\text{O}(\text{°T})}}{\mu_{\text{H}_2\text{O}(\text{°T})}} \quad \text{ó} \quad N_{\text{Re}} = \frac{4Q_{\text{Tubode vidrio}} \times \rho_{\text{H}_2\text{O}(\text{°T})}}{\pi \times \mu_{\text{H}_2\text{O}(\text{°T})} \times D_i(\text{Tubo de vidrio})}$$

El cálculo del número de Reynolds, se efectúa en la celda G36 de la hoja de cálculo, tal como se mostró en la figura 4.7.

Después se debe afirmar o negar si al régimen de flujo observado mediante la inspección visual le corresponde el número de Reynolds calculado. Por ejemplo, para este caso el observado es el flujo laminar y el número de Reynolds calculado es 537.86437, es decir estos valores son correspondientes, por lo tanto se debe afirmar (escribir **Si** en la celda G44 de la hoja de cálculo).

- La descarga del líquido que está en el tanque reservorio, se puede realizar por medio de la válvula 1 que se encuentra en la línea de purga. Véase la figura 1.14.

4.3. HIGIENE Y SEGURIDAD INDUSTRIAL

- Al realizar los experimentos en el equipo, procurar estar con la vestimenta adecuada, es decir usar mandil y guantes
- Al realizar el prendido de la electrobomba, realizarlo con las manos secas y así evitar que se tenga una descarga eléctrica
- Se debe tener mucho cuidado al momento que se regula el goteo del líquido colorante, pues una sola gota de colorante que caiga sobre la ropa que se lleve puesta, puede provocar manchas difíciles de sacar.
- Al terminar de realizar la práctica en el equipo, se debe verificar que las tuberías, el tanque reservorio y el tanque de recepción, no contengan agua, esto con el fin de que no sean criaderos de larvas y zancudos.

4.4. ENSAYOS Y PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO

Primeramente se midió la temperatura del líquido, la cual resultó ser 31°C, seguidamente se han efectuado cinco pruebas, realizándose las siguientes observaciones y mediciones:

Cuadro N° 01: Observaciones y mediciones para la primera prueba

Parámetros		Característica de flujo observada	Régimen de flujo que corresponde	Situación del equipo
V_R	0.3 lt	Línea recta	Laminar	<ul style="list-style-type: none"> • Válvula 1 cerrada completamente • Válvulas 2, 3 y 5 abiertas completamente • Válvula 4 abierta en un porcentaje determinado
t_R	60 s			

Fuente: **(Elaboración propia)**

Cuadro N° 02: Observaciones y mediciones para la segunda prueba

Parámetros		Característica de flujo observada	Régimen de flujo que corresponde	Situación del equipo
V_R	0.5 lt	Línea recta	Laminar	<ul style="list-style-type: none"> • Válvula 1 cerrada completamente • Válvulas 2, 3 y 4 abiertas completamente • Válvula 5 abierta en un porcentaje determinado
t_R	60 s			

Fuente: **(Elaboración propia)**

Cuadro N° 03: Observaciones y mediciones para la tercera prueba

Parámetros		Característica de flujo observada	Régimen de flujo que corresponde	Situación del equipo
V_R	1.6 lt	Línea ondulada	Transitorio	<ul style="list-style-type: none"> • Válvula 1 cerrada completamente • Válvulas 2, 3, y 5 completamente abiertas completamente • Válvula 4 abierta casi totalmente
t_R	60 s			

Fuente: **(Elaboración propia)**

Cuadro N° 04: Observaciones y mediciones para la cuarta prueba

Parámetros		Característica de flujo observada	Régimen de flujo que corresponde	Situación del equipo
V_R	1.8 lt	Líneas entrecruzadas	Turbulento	<ul style="list-style-type: none"> • Válvula 1 cerrada completamente • Válvulas 2, 3, y 5 completamente abiertas completamente • Válvula 4 abierta en un porcentaje determinado
t_R	30 s			

Fuente: **(Elaboración propia)**

Cuadro N° 05: Observaciones y mediciones para la quinta prueba

Parámetros		Característica de flujo observada	Régimen de flujo que corresponde	Situación del equipo
V_R	2.4 lt	Líneas entrecruzadas	Turbulento	<ul style="list-style-type: none"> • Válvula 1 cerrada completamente • Válvulas 2, 3, y 5 completamente abiertas completamente • Válvula 4 abierta en un porcentaje determinado
t_R	30 s			

Fuente: **(Elaboración propia)**

4.5. CÁLCULOS Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

The screenshot shows an Excel spreadsheet titled "Prueba Reynolds - Microsoft Excel". The spreadsheet is used for determining the flow regime based on experimental data.

Input Data (Rows 29-33):

- Row 29: "Escriba el régimen de flujo que observa" (Write the flow regime you observe) → **Laminar**
- Row 31: "Escriba el volumen recepcionado en lt V_R " (Write the volume received in liters V_R) → 0.3
- Row 33: "Escriba el tiempo que dura la recepción en s t_R " (Write the time that lasts the reception in seconds t_R) → 60

Calculated Parameters (Row 35):

d_i (Tubo de vidrio) (m)	$\rho_{H_2O(\circ T)}$ (Kg/m ³)	$\mu_{H_2O(\circ T)}$ (Kg/m.s)	$Q_{\text{Tubo de vidrio}}$		$v_{\text{Tubo de vidrio}}$ (m/s)	N_{Re}
			lt/min	m ³ /s		
0.015	995.35	0.0007854	0.3	0.000005	0.03	537.86436

Formulas (Rows 38-39):

$$Q_{\text{Tubo de vidrio}} = \frac{V_R}{t_R}$$

$$v_{\text{Tubo de vidrio}} = \frac{4Q_{\text{Tubo de vidrio}}}{\pi \times d_i^2 \text{ (Tubo de vidrio)}}$$

$$N_{Re} = \frac{4Q_{\text{Tubo de vidrio}} \times \rho_{H_2O(\circ T)}}{\pi \times \mu_{H_2O(\circ T)} \times d_i \text{ (Tubo de vidrio)}}$$

Figura 4.8. Cálculo del valor de $Q_{\text{Tubode vidrio}}$, $v_{\text{Tubode vidrio}}$ y N_{Re} , para la primera prueba

Fuente: **(Elaboración propia)**

Se puede ver de la figura 4.8 que: $Q_{\text{Tubode vidrio}} = 0.3 \text{ lt/min}$, $v_{\text{Tubode vidrio}} = 0.03 \text{ m/s}$ y $N_{\text{Re}} = 537.86437$, para la primera prueba. El flujo observado visualmente (laminar), es correspondiente al número de Reynolds calculado $N_{\text{Re}} = 537.86437$

The screenshot shows an Excel spreadsheet with the following data and formulas:

	A	B	C	D	E	F	G
27							
29		Escriba el régimen de flujo que observa			Laminar		
31		Escriba el volumen recepcionado en lt V_R			0.5		
33		Escriba el tiempo que dura la recepción en s t_R			60		
35	D_i (Tubo de vidrio) (m)	$\rho_{H_2O(^{\circ}T)}$ (Kg/m ³)	$\mu_{H_2O(^{\circ}T)}$ (Kg/m.s)	$Q_{\text{Tubo de vidrio}}$		$v_{\text{Tubo de vidrio}}$ (m/s)	N_{Re}
36	0.015	995.35	0.0007854	lt/min	m ³ /s	0.05	896.44060
38	$Q_{\text{Tubo de vidrio}} = \frac{V_R}{t_R}$		$v_{\text{Tubo de vidrio}} = \frac{4Q_{\text{Tubo de vidrio}}}{\pi \times D_i^2}$		$N_{\text{Re}} = \frac{4Q_{\text{Tubo de vidrio}} \times \rho_{H_2O(^{\circ}T)}}{\pi \times \mu_{H_2O(^{\circ}T)} \times D_i}$		

Figura 4.9. Cálculo del valor de $Q_{\text{Tubode vidrio}}$, $v_{\text{Tubode vidrio}}$ y N_{Re} , para la segunda prueba

Fuente: **(Elaboración propia)**

Se puede ver de la figura 4.9 que: $Q_{\text{Tubode vidrio}} = 0.5 \text{ lt/min}$, $v_{\text{Tubode vidrio}} = 0.05 \text{ m/s}$ y $N_{\text{Re}} = 896.44061$, para la segunda prueba. El flujo observado visualmente (laminar), es correspondiente al número de Reynolds calculado $N_{\text{Re}} = 896.44061$

Se puede ver de la figura 4.10 que: $Q_{\text{Tubode vidrio}} = 1.6 \text{ lt/min}$, $v_{\text{Tubode vidrio}} = 0.15 \text{ m/s}$ y $N_{\text{Re}} = 2868.6099$, para la tercera prueba. El flujo observado visualmente (transitorio), es correspondiente al número de Reynolds calculado $N_{\text{Re}} = 2868.6099$

En la figura 4.11, se tiene que: $Q_{\text{Tubode vidrio}} = 3.6 \text{ lt/min}$, $v_{\text{Tubode vidrio}} = 0.34 \text{ m/s}$ y $N_{\text{Re}} = 6454.3724$, para la cuarta prueba. El flujo observado visualmente (turbulento), es correspondiente al número de Reynolds calculado $N_{\text{Re}} = 6454.3724$

En la figura 4.12, se tiene que: $Q_{\text{Tubode vidrio}} = 4.8 \text{ lt/min}$, $v_{\text{Tubode vidrio}} = 0.45 \text{ m/s}$ y $N_{\text{Re}} = 8605.8298$, para la quinta prueba. El flujo observado visualmente (turbulento), es correspondiente al número de Reynolds calculado $N_{\text{Re}} = 8605.8298$

$Q_{\text{Tubo de vidrio}}$		$v_{\text{Tubo de vidrio}}$ (m/s)	N_{Re}
lt/min	m^3/s		
1.6	0.000027	0.15	2868.6099

D_i (Tubo de vidrio) (m)	$\rho_{\text{H}_2\text{O}(\text{°T})}$ (Kg/m ³)	$\mu_{\text{H}_2\text{O}(\text{°T})}$ (Kg/m.s)	$Q_{\text{Tubo de vidrio}}$	$v_{\text{Tubo de vidrio}}$ (m/s)	N_{Re}
0.015	995.35	0.0007854	1.6	0.15	2868.6099

$$Q_{\text{Tubo de vidrio}} = \frac{V_R}{t_R}$$

$$v_{\text{Tubo de vidrio}} = \frac{4Q_{\text{Tubo de vidrio}}}{\pi \times D_i^2 (\text{Tubo de vidrio})}$$

$$N_{\text{Re}} = \frac{4Q_{\text{Tubo de vidrio}} \times \rho_{\text{H}_2\text{O}(\text{°T})}}{\pi \times \mu_{\text{H}_2\text{O}(\text{°T})} \times D_i (\text{Tubo de vidrio})}$$

Figura 4.10. Cálculo del valor de $Q_{\text{Tubode vidrio}}$, $v_{\text{Tubode vidrio}}$ y N_{Re} , para la tercera prueba

Fuente: (Elaboración propia)

	A	B	C	D	E	F	G
27							
29		Escriba el régimen de flujo que observa			Turbulento		
31		Escriba el volumen recepcionado en lt V_R			1.8		
33		Escriba el tiempo que dura la recepción en s t_R			30		
35	D_i (Tubo de vidrio) (m)	$\rho_{H_2O(^{\circ}T)}$ (Kg/m ³)	$\mu_{H_2O(^{\circ}T)}$ (Kg/m.s)	Q Tubo de vidrio		v Tubo de vidrio (m/s)	N_{Re}
36	0.015	995.35	0.0007854	lt/min	m ³ /s	0.34	6454.3723
36				3.6	0.000060		
38	$Q_{\text{Tubo de vidrio}} = \frac{V_R}{t_R}$		$v_{\text{Tubo de vidrio}} = \frac{4Q_{\text{Tubo de vidrio}}}{\pi \times D_i^2 (\text{Tubo de vidrio})}$		$N_{Re} = \frac{4Q_{\text{Tubo de vidrio}} \times \rho_{H_2O(^{\circ}T)}}{\pi \times \mu_{H_2O(^{\circ}T)} \times D_i (\text{Tubo de vidrio})}$		

Figura 4.11. Cálculo del valor de $Q_{\text{Tubo de vidrio}}$, $v_{\text{Tubo de vidrio}}$ y N_{Re} , para la cuarta prueba

Fuente: (Elaboración propia)

	A	B	C	D	E	F	G
27							
29		Escriba el régimen de flujo que observa			Turbulento		
31		Escriba el volumen recepcionado en lt V_R			2.4		
33		Escriba el tiempo que dura la recepción en s t_R			30		
35	D_i (Tubo de vidrio) (m)	$\rho_{H_2O(^{\circ}T)}$ (Kg/m ³)	$\mu_{H_2O(^{\circ}T)}$ (Kg/m.s)	Q Tubo de vidrio		v Tubo de vidrio (m/s)	N_{Re}
36	0.015	995.35	0.0007854	lt/min	m ³ /s	0.45	8605.8298
36				4.8	0.000080		
38	$Q_{\text{Tubo de vidrio}} = \frac{V_R}{t_R}$		$v_{\text{Tubo de vidrio}} = \frac{4Q_{\text{Tubo de vidrio}}}{\pi \times D_i^2 (\text{Tubo de vidrio})}$		$N_{Re} = \frac{4Q_{\text{Tubo de vidrio}} \times \rho_{H_2O(^{\circ}T)}}{\pi \times \mu_{H_2O(^{\circ}T)} \times D_i (\text{Tubo de vidrio})}$		

Figura 4.12. Cálculo del valor de $Q_{\text{Tubo de vidrio}}$, $v_{\text{Tubo de vidrio}}$ y N_{Re} , para la quinta prueba

Fuente: (Elaboración propia)

CAPÍTULO V: ANÁLISIS DE COSTO

5.1. COSTO DE DISEÑO

Cuadro N° 06: Costo de diseño

SERVICIO	CANTIDAD	P. UNITA (S/.)	P. TOTAL (S/.)
Dibujo del equipo	1	100	100
Consultoría y asesoramiento especializado en el desarrollo del informe final	-	800	800
TOTAL			900

Fuente: **(Elaboración propia)**

5.2. COSTO DE CONSTRUCCIÓN E INSTALACIÓN

Cuadro N° 07: Costo de construcción e instalación

SERVICIO	P. UNITA (S/.)	P. TOTAL (S/.)
Mano de obra de la estructura metálica	350	300
Instalación de tuberías y accesorios	120	120
Pintado de la estructura metálica y tuberías	30	30
Instalación eléctrica	25	20
TOTAL		470

Fuente: **(Elaboración propia)**

5.3. COSTO DE MATERIALES

Cuadro N° 08: Costo de materiales

ARTÍCULO	CANTIDAD	P. UNITA (S/.)	P. TOTAL (S/.)
Tubo de vidrio	1	80	80
Electrobomba de ½ Hp	1	150	150
Tubería de 1 " PVC	1	21	21
Tubería de 3/4 " PVC	1	14	14
Tubería de 1/2 " PVC	1	11	11
Válvula de compuerta de 1" (bronce)	1	25	25
Válvula esférica 3/4 " PVC	1	12	12
Válvula esférica 1/2 " PVC	3	8	24
Recipiente de 350 lt	1	300	300
Adaptador de 1" PVC	4	1.5	6
Adaptador de 3/4" PVC	2	1	2
Adaptador de 1/2" PVC	6	0.5	3
Codo de 90° de 1" PVC	2	1.5	3
Codo de 90° de 1/2" PVC	5	0.5	2.5
Reducción de 1 a 3/4" PVC	1	1.5	1.5
Reducción de 1 a 1/2" PVC	3	1.5	4.5
Te de 1" PVC	1	2	2
Te de 3/4" PVC	1	1.5	1.5
Te de 1/2" PVC	1	1.0	1.0
Unión universal de 1" PVC	3	7	21
Unión universal de 3/4" PVC	1	5	5
Unión universal de 1/2" PVC	7	3.5	24.5
Unión con embone de 1/2" PVC	5	0.5	2.5
Unión con embone de 1" PVC	5	1	5
Cinta teflón	6	1	6
Pegamento para tubo	2	5	10

Continuación del Cuadro N° 08

ARTÍCULO	CANTIDAD	P. UNITA (S/.)	P. TOTAL (S/.)
Válvula esférica de 1/4" (bronce)	1	25	25
Adaptador de 1/4" (bronce)	2	8	16
Reducción de 1/4 a 1/8"	5	6	30
Tubo de cobre de 1/8"	-	8	8
Llave termomagnética	1	9	9
Caja para sobre poner la llave termomagnética	1	3	3
Recipiente de recepción	1	18	18
Medio galón de pintura color negro	1	20	20
Medio galón de pintura color aluminio	1	20	20
Botella de tiner	2	3	6
Estructura metálica	1	350	350
Frasco de violeta de genciana	3	1	3
Abrazadera de 1"	1	3	3
Abrazadera de 1/2"	4	2	8
Hoja de cierra	2	3	6
TOTAL			1265

Fuente: **(Elaboración propia)**

5.4. OTROS COSTOS

Cuadro N° 09: Otros costos

ARTÍCULO	CANTIDAD	P. UNITA (S/.)	P. TOTAL (S/.)
Impresiones del informe final	10	25	250
Encuadernados	10	20	200
Pasajes y otros gastos	-	300	300
TOTAL			750

Fuente: **(Elaboración propia)**

5.5. COSTO TOTAL

$$C \text{ TOTAL (S.)} = 900 + 470 + 1265 + 750 = 3385$$

CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. CONCLUSIONES

- Se diseñó, construyó e instaló un equipo de Reynolds para el Laboratorio de Procesos y Operaciones Unitarias de la Facultad de Ingeniería química (FIQ) de la Universidad Nacional de la Amazonía Peruana (UNAP)
- Se determinó las variables de diseño y construcción del equipo, siendo las más importantes: el rango de caudal al que trabaja la electrobomba, diámetro interior y longitud del tubo de vidrio, altura de presión cuando el caudal en el tubo de vidrio es máximo, esto se puede ver claramente en la sección 1.11
- Se seleccionó los materiales adecuados para la construcción del equipo, esto se puede ver en las secciones 3.1 y 3.2.
- En la sección 1.10, se hizo aplicación directa de la ecuación de continuidad y se determinó las variables de operación del equipo, siendo las más importantes: el caudal, la velocidad y el número de Reynolds.
- Se realizaron 5 pruebas de funcionamiento, de lo cual se concluye que los cálculos realizados son correspondientes a las observaciones que se hicieron con respecto a cada régimen de flujo. Esto se puede ver en la sección 4.5.
- Se determinó el costo total para el equipo, de esta manera se tendrá una referencia de cuánto costaría construir un equipo similar.
- Al terminar este trabajo, se está contribuyendo a la implementación y mejora del Laboratorio de Procesos y Operaciones Unitarias de la (FIQ-UNAP). Esto se verá reflejado en el futuro, con la mejora del nivel académico de los estudiantes de la mencionada facultad.

6.2. RECOMENDACIONES

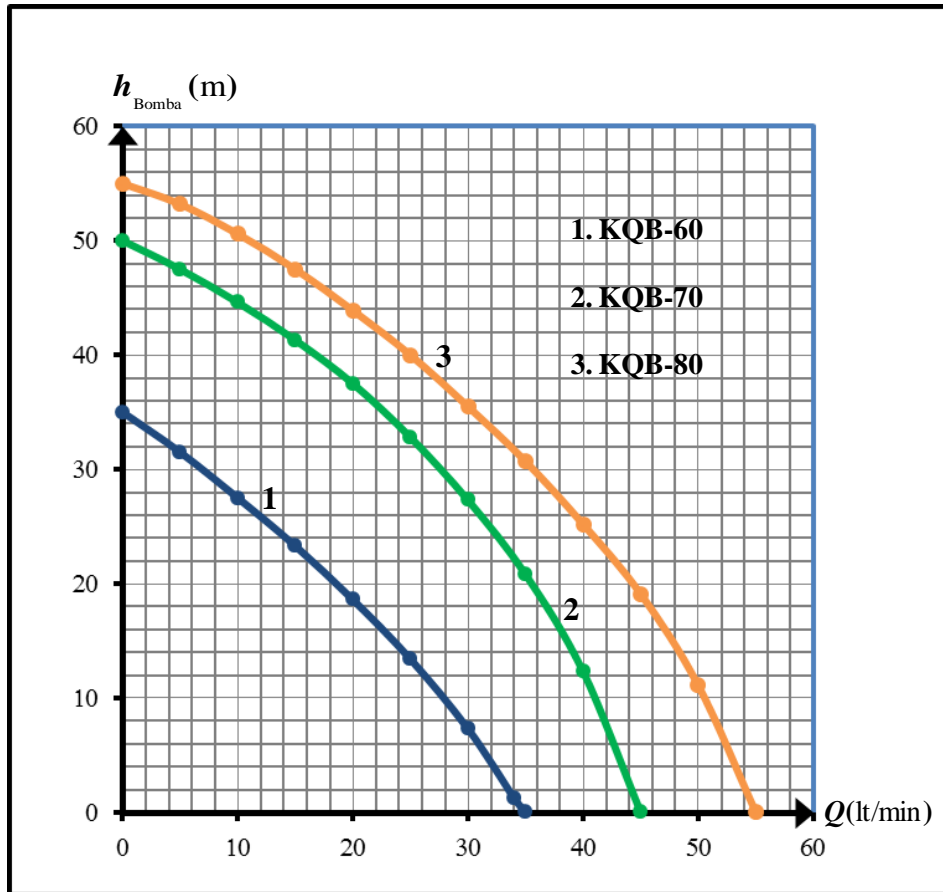
- Se recomienda realizar siempre una inspección para ver si todos los componentes del equipo están funcionando correctamente, como por ejemplo al prender la electrobomba, verificar que esta, no esté haciendo tierra con la estructura metálica, esto ayudará a evitar accidentes.
- Se recomienda tener muy en cuenta los aspectos de higiene y seguridad industrial
- Se recomienda realizar otros estudios en el equipo, como medir el perfil de velocidad del líquido que fluye por el tubo de vidrio, esto se podría realizar para cada régimen de flujo.
- Se recomienda que cuando se instale el equipo en el mencionado laboratorio, este debe tener su propia línea de alimentación de energía para la electrobomba, la cual debe estar muy cerca. Esto con el fin de no estar usando extensiones con alambre mellizo. Además el equipo debe instalarse en un lugar donde se cuente con un grifo de agua cerca para el llenado del tanque reservorio y que el piso esté nivelado.
- Se recomienda abordar otros desafíos con respecto al diseño y construcción de estos tipos de equipos, como por ejemplo diseñar y construir un equipo donde se pueda demostrar la ley de viscosidad de Newton.

BIBLIOGRAFÍA

- 1. GEANKOPLIS CH. (1998).** Procesos de transporte y operaciones unitarias. Compañía editorial Continental. Tercera edición. México.
- 2. GRANDEZ A, GARCÍA R. (2002).** Diseño y construcción de un sistema de medición de caudal en canal abierto. Tesis para optar el título de ingeniero químico. FIQ-UNAP. Iquitos-Perú
- 3. GUZMAN A. (1998).** Solucionario de fenómenos de transporte. Comercial librería San Marcos. Lima-Perú.
- 4. MOTT R. (2002).** Mecánica de fluidos aplicada. Editorial McGraw-Hill. Tercera edición
- 5. OCON J, TOJO G. (1967).** Problemas de ingeniería química. Tercera edición. Editorial Gráficas Rogar. Madrid-España.
- 6. PERRY J. (2001).** Manual del ingeniero químico. Séptima edición. Editorial McGraw-Hill. México
- 7. RAMÍREZ N. (1984).** Diseño, construcción e instalación de un equipo de transporte de fluidos para el Laboratorio de Procesos y Operaciones Unitarias de la FIQ-UNAP. Iquitos-Perú
- 8. RIOS G, MONTALVO S. (2003).** Diseño, construcción y montaje de un equipo para la demostración del experimento de Osborne Reynolds. Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Iberoamericana de México.
- 9. SALAS F J, LOVERA M CH. (2002).** Diseño y construcción de un sistema para medición de caudal utilizando el tubo de Pitot. Tesis para optar el título de ingeniero químico. FIQ-UNAP. Iquitos-Perú
- 10. SHAMES I. (1995).** Mecánica de fluidos. Editorial McGraw-Hill. Tercera edición.
- 11. UGARTE. F. (1990).** Mecánica de fluidos. Segunda edición. Lima-Perú

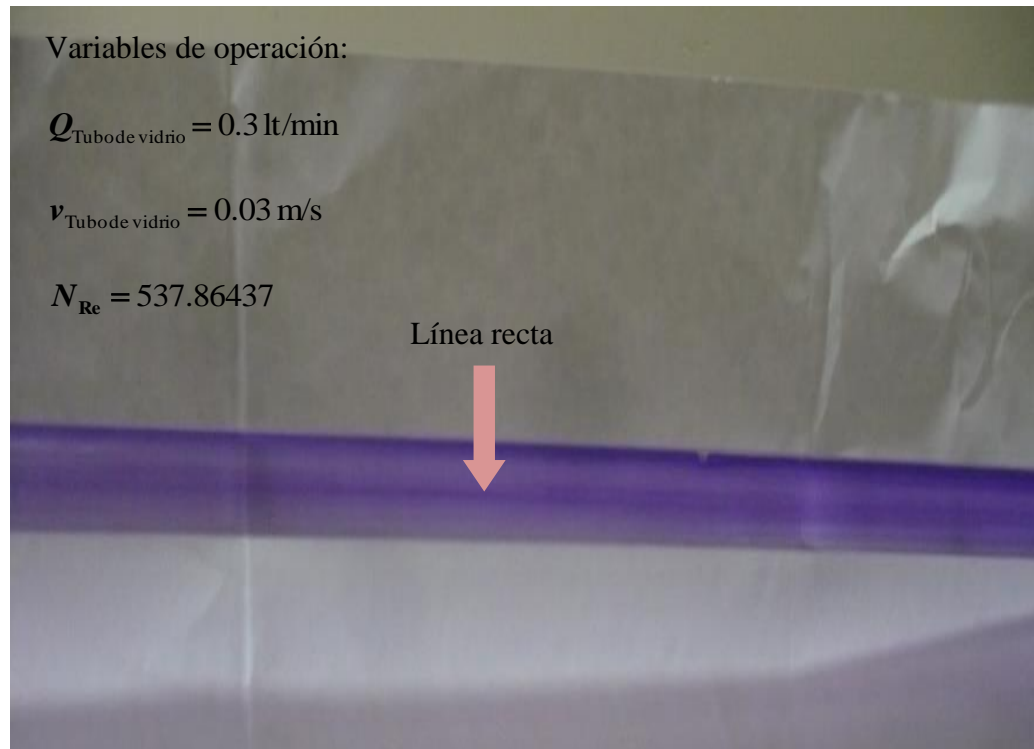
ANEXOS

ANEXO 1: Curvas de operación de las tres electrobombas



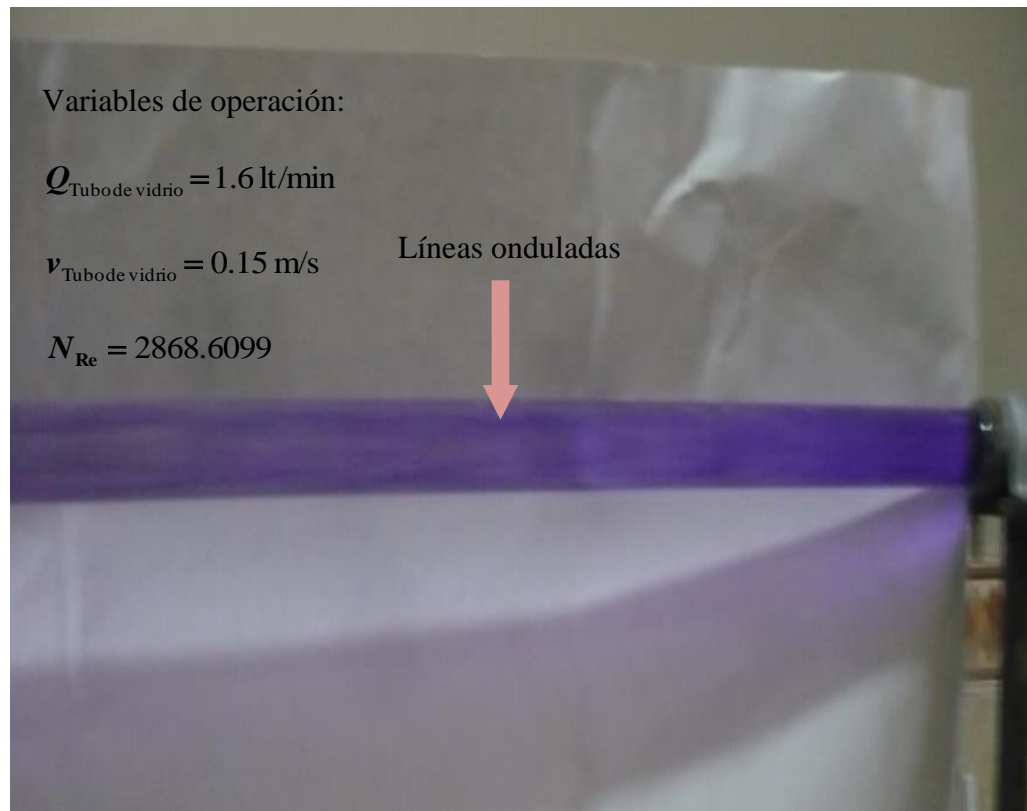
Fuente: Manual de operación de bombas centrifugas en las series KQB de la marca Kaili

ANEXO 2: Característica del flujo laminar, correspondiente a la primera prueba



Fuente: **(Elaboración propia)**

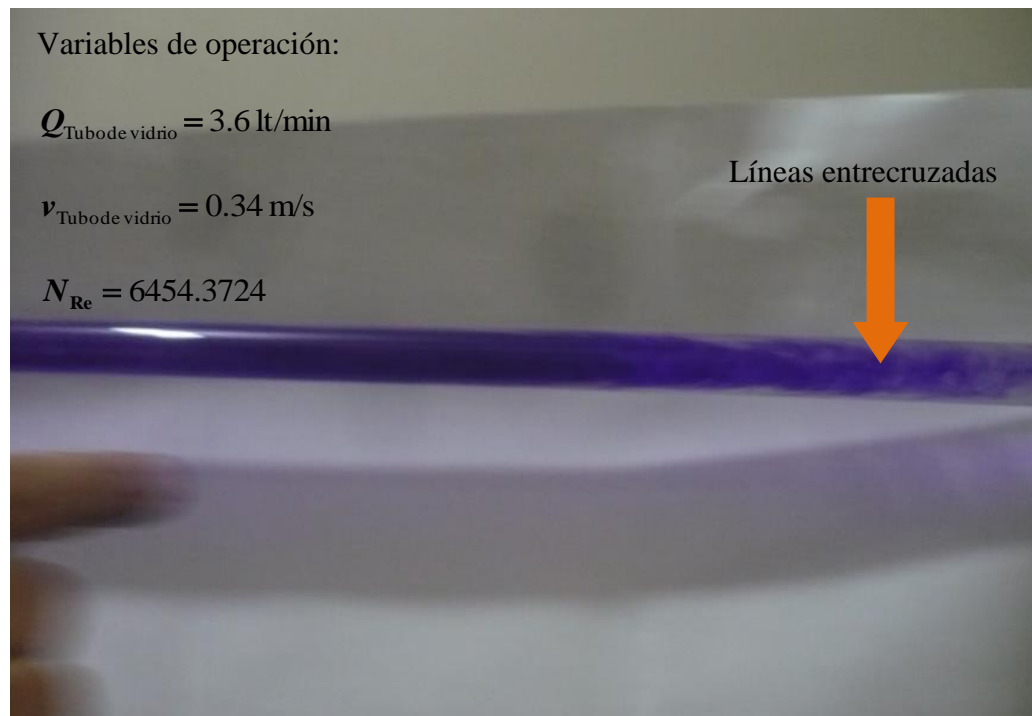
ANEXO 3: Característica del flujo transitorio, correspondiente a la tercera prueba



Fuente: **(Elaboración propia)**

Se puede ver de la figura 4.10 que, y, para la tercera prueba. El flujo observado visualmente (transitorio), es correspondiente al número de Reynolds calculado $N_{\text{Re}} = 2868.6099$

ANEXO 4: Característica del flujo turbulento, correspondiente a la cuarta prueba

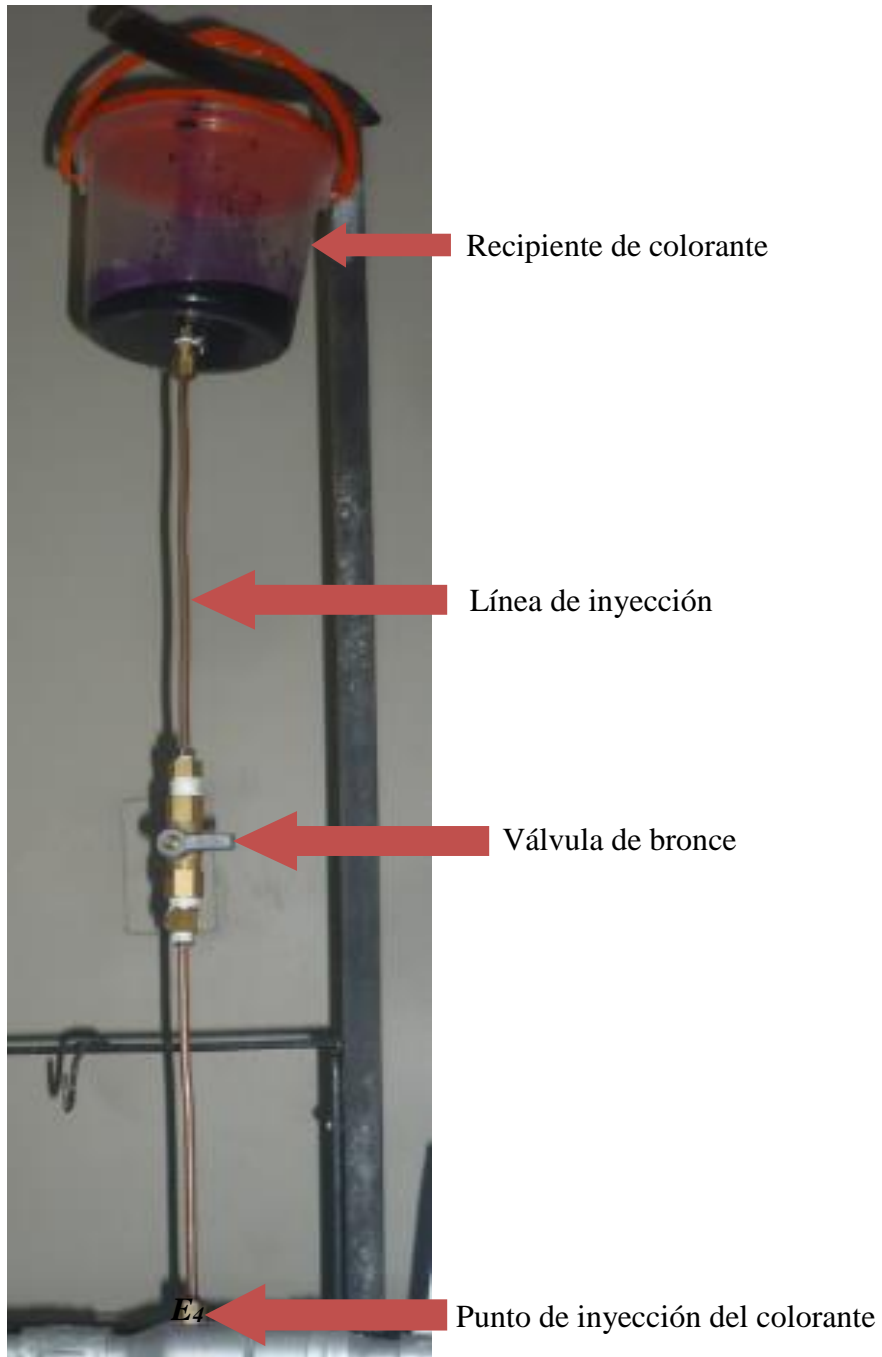


Fuente: **(Elaboración propia)**

ANEXO 5: Vista del equipo, indicando algunos de sus componentes principales

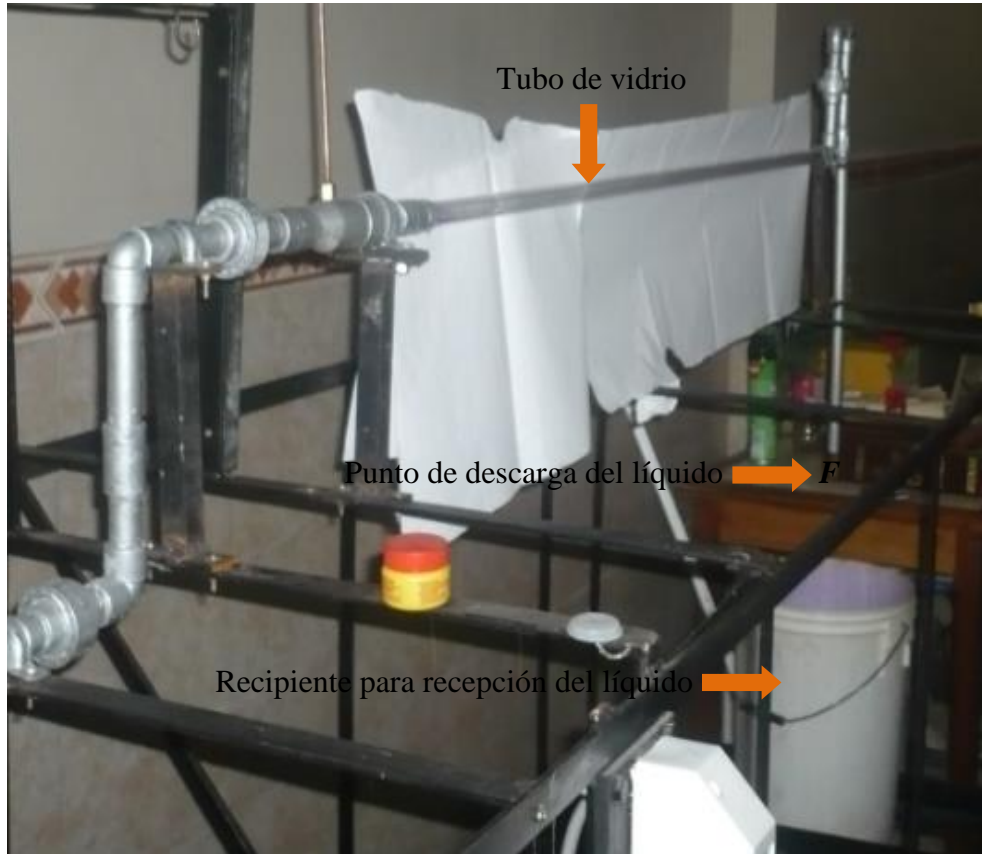


ANEXO 6: Vista del equipo, indicando la línea de inyección y el recipiente de colorante



Fuente: (Elaboración propia)

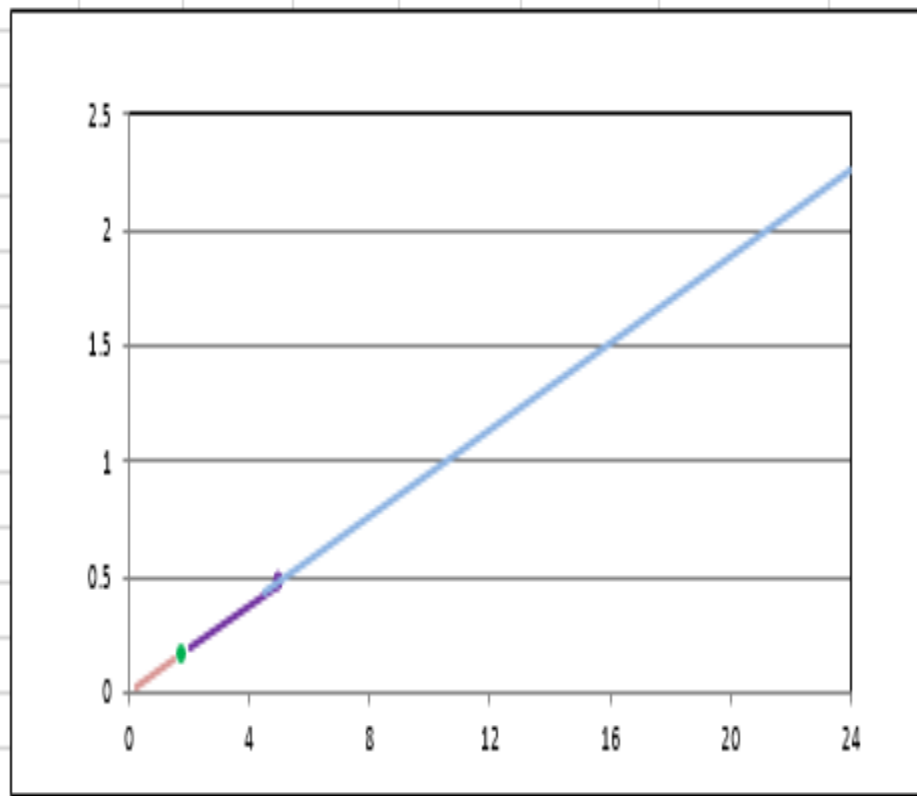
ANEXO 7: Vista del equipo, indicando el tubo de vidrio, punto de descarga y el recipiente para recepción del líquido



Fuente: (Elaboración propia)

Variables de operación 3 flujos

D_i (m)	ρ (Kg/m ³)	μ (Kg/m.s)	Q		v (m/s)	$N_{Re} = \frac{4Q \times \rho}{\pi \times \mu \times D_i}$	$N_{Re} = \frac{4Q \times \rho}{\pi \times \mu \times D_i}$ (1.35)	
			lt/min	m ³ /s				
0.015	998.2	0.001	0.25	0.000004	0.0236	353.040206	← Q_{min} (Tubo de vidrio)	
0.015	998.2	0.001	0.5	0.000008	0.0472	706.080412		Régimen laminar
0.015	998.2	0.001	1	0.000017	0.0943	1412.160824		
0.015	998.2	0.001	1.4	0.000023	0.1320	1977		
0.015	998.2	0.001	1.487	0.000025	0.1402	2100	← Régimen crítico	
0.015	998.2	0.001	1.5	0.000025	0.1415	2118.241236	Régimen transitorio	
0.015	998.2	0.001	1.75	0.000029	0.1650	2471		
0.015	998.2	0.001	2	0.000033	0.1886	2824.321648		
0.015	998.2	0.001	2.8	0.000047	0.2641	3954		
0.015	998.2	0.001	2.9	0.000048	0.2735	4095.266389	Régimen turbulento	
0.015	998.2	0.001	4.5	0.000075	0.4244	6354.723708		
0.015	998.2	0.001	5	0.000083	0.4716	7060.80412		← Q_{max} (Tubo de vidrio)
0.015	998.2	0.001	4.5	0.000075	0.42	6354.723708		
0.015	998.2	0.001	5	0.000083	0.47	7060.80412		
0.015	998.2	0.001	5.5	0.000092	0.52	7766.884532		
0.015	998.2	0.001	6	0.000100	0.57	8472.964944		
0.015	998.2	0.001	6.5	0.000108	0.61	9179.045356		
0.015	998.2	0.001	7	0.000117	0.66	9885.125767		
0.015	998.2	0.001	7.5	0.000125	0.71	10591.20618		
0.015	998.2	0.001	8	0.000133	0.75	11297.28659		
0.015	998.2	0.001	8.5	0.000142	0.80	12003.367		
0.015	998.2	0.001	9	0.000150	0.85	12709.44742		
0.015	998.2	0.001	9.5	0.000158	0.90	13415.52783		
0.015	998.2	0.001	10	0.000167	0.94	14121.60824		
0.015	998.2	0.001	10.5	0.000175	0.99	14827.68865		
0.015	998.2	0.001	11	0.000183	1.04	15533.76906		
0.015	998.2	0.001	11.5	0.000192	1.08	16239.84948		
0.015	998.2	0.001	12	0.000200	1.13	16945.92989		
0.015	998.2	0.001	12.5	0.000208	1.18	17652.0103		
0.015	998.2	0.001	13	0.000217	1.23	18358.09071		
0.015	998.2	0.001	13.5	0.000225	1.27	19064.17112		
0.015	998.2	0.001	14	0.000233	1.32	19770.25153		
0.015	998.2	0.001	14.5	0.000242	1.37	20476.33195	0.777546	
0.015	998.2	0.001	15	0.000250	1.41	21182.41236		
0.015	998.2	0.001	15.5	0.000258	1.46	21888.49277		
0.015	998.2	0.001	16	0.000267	1.51	22594.57318		
0.015	998.2	0.001	17	0.000283	1.60	24006.73401		
0.015	998.2	0.001	17.5	0.000292	1.65	24712.81442		
0.015	998.2	0.001	18	0.000300	1.70	25418.89483		
0.015	998.2	0.001	18.5	0.000308	1.74	26124.97524		
0.015	998.2	0.001	19	0.000317	1.79	26831.05565		
0.015	998.2	0.001	19.5	0.000325	1.84	27537.13607		
0.015	998.2	0.001	20	0.000333	1.89	28243.21648		
0.015	998.2	0.001	20.5	0.000342	1.93	28949.29689		
0.015	998.2	0.001	21	0.000350	1.98	29655.3773		
0.015	998.2	0.001	21.5	0.000358	2.03	30361.45771		
0.015	998.2	0.001	22	0.000367	2.07	31067.53813		
0.015	998.2	0.001	22.5	0.000375	2.12	31773.61854		
0.015	998.2	0.001	23	0.000383	2.17	32479.69895		
0.015	998.2	0.001	23.5	0.000392	2.22	33185.77936		
0.015	998.2	0.001	24	0.000400	2.26	33891.85977		



Procedimiento experimental

$T(^{\circ}\text{C})$	$\rho(\text{Kg/m}^3)$	$\mu(\text{Kg/m.s})$
0	999.8	0.001794
10	999.7	0.00131
20	998.2	0.001009
30	995.7	0.0008
40	992.2	0.000654

¿Cuánto es la temperatura del fluido en $^{\circ}\text{C}$?

31

Escriba el intervalo de temperatura donde se encuentra la temperatura del fluido

Inicial	30
Final	40

Escriba las densidades correspondientes al intervalo de temperaturas donde se encuentra la temperatura del fluido

Inicial	995.7
Final	992.2

Escriba las viscosidades correspondientes al intervalo de temperaturas donde se encuentra la temperatura del fluido

Inicial	0.0008
Final	0.000654

Escriba el régimen de flujo que observa

Turbulento

Escriba el volumen recepcionado en lt/s

2.4

Escriba el tiempo que dura la recepción en s

30

$D_{i(\text{Tubo de vidrio})}(\text{m})$	$\rho_{\text{H}_2\text{O}(T)}(\text{Kg/m}^3)$	$\mu_{\text{H}_2\text{O}(T)}(\text{Kg/m.s})$	$Q_{\text{Tubo de vidrio}}$		$v_{\text{Tubo de vidrio}}(\text{m/s})$	N_{Re}
			lt/min	m^3/s		
0.015	995.35	0.0007854	4.8	0.000080	0.45	8605.8298

$$Q_{\text{Tubo de vidrio}} = \frac{V_R}{t_R}$$

$$v_{\text{Tubo de vidrio}} = \frac{4Q_{\text{Tubo de vidrio}}}{\pi \times D_{i(\text{Tubo de vidrio})}^2}$$

$$N_{Re} = \frac{4Q_{\text{Tubo de vidrio}} \times \rho_{\text{H}_2\text{O}(T)}}{\pi \times \mu_{\text{H}_2\text{O}(T)} \times D_{i(\text{Tubo de vidrio})}}$$

Rango de N_{Re}	Laminar	Transitorio	Turbulento
	<0-2100>	<2100-4000>	>4000

Afirme o niegue si al número de Reynolds calculado le corresponde el régimen de flujo que observó

Si

Curvas de operación

0	35	0	50	0	55
5	31.5	5	47.5	5	53.2
10	27.5	10	44.6	10	50.6
15	23.3	15	41.3	15	47.5
20	18.6	20	37.5	20	43.9
25	13.4	25	32.8	25	40
30	7.3	30	27.3	30	35.5
34	1.35	35	20.8	35	30.7
35	0	40	12.3	40	25.2
		45	0	45	19.1
				50	11.1
				55	0

