



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA



Ingeniería Química
Ciclo Intermedio

Laboratorio y Taller de Proyectos
6° semestre

Fecha de aprobación: 23/07/24

Vigente hasta: 23/07/27



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS
DE 6° SEMESTRE



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|----------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 2 de 173 |

Profesores Participantes

IQ. Miguel Ángel Pérez Fajardo
Dr. Alejandro de la Cruz Rogel Ramírez
IQ. Emmanuel Alejandro Torres García
Dr. Rodolfo Herrera Toledo
I.B.Q. Paulette Tapia Torres
QFB. Erik Abel de los Santos Mata
M. en I. Elisa Blanca Viñas Reyes
M. en I. Yennifer Paola Arauz Torres
IQ. Aldo Fernando Varela Martínez



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS
DE 6° SEMESTRE



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|----------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 3 de 173 |

Se agradece la colaboración de los alumnos:

Alexxa Cruz González

Angel Leonardo García Morales

Angel Renne Mora Villanueva



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|----------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 4 de 173 |

Contenido

| | |
|---|-----|
| <i>INTRODUCCIÓN</i> | 5 |
| <i>OBJETIVOS DE LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS DE 6° SEMESTRE</i> | 7 |
| <i>LINEAMIENTOS DE LABORATORIO</i> | 8 |
| <i>LINEAMIENTOS DE PLANTA PILOTO</i> | 11 |
| <i>NORMAS DE SEGURIDAD</i> | 14 |
| <i>MANEJO DE RESIDUOS</i> | 15 |
| <i>TRATAMIENTO DE RESIDUOS PRODUCIDOS EN LAS ACTIVIDADES DE LABORATORIO DEL MODULO: MANEJO DE ENERGÍA</i> | 15 |
| <i>CRITERIOS DE EVALUACIÓN</i> | 17 |
| <i>L-1: DETERMINACIÓN DE LOS NIVELES DE TRES PROPIEDADES FÍSICAS, SU ANÁLISIS Y CORRELACIÓN</i> | 19 |
| <i>L-2: DETERMINACIÓN DE LA CORRELACIÓN DE VISCOSIDAD VS TEMPERATURA Y CONCENTRACIÓN EN LOS SISTEMAS GLICERINA-AGUA Y AZÚCAR-AGUA</i> | 29 |
| <i>L-3: ANÁLISIS DE UN SISTEMA DE MEZCLADO</i> | 41 |
| <i>L-4: ANÁLISIS DE UN SISTEMA DE SEDIMENTACIÓN</i> | 57 |
| <i>L-5: ANÁLISIS DE LA DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE PARTÍCULAS EN UN SISTEMA SÓLIDO</i> | 63 |
| <i>P-1:ANÁLISIS Y DETERMINACIÓN DE LAS CURVAS CARACTERÍSTICAS DE BOMBAS</i> | 72 |
| <i>P-2:ANÁLISIS Y DETERMINACIÓN DE LOS FACTORES DE FRICCIÓN, LONGITUDES EQUIVALENTES Y CALIBRACIÓN DE MEDIDORES DE FLUJO</i> | 90 |
| <i>P-3:ANÁLISIS Y OPERACIONES EN UN SISTEMA DE MOLIENDA</i> | 112 |
| <i>P-4: ANÁLISIS Y OPERACIÓN DE UN SISTEMA DE FILTRADO</i> | 124 |
| <i>P-5:ANÁLISIS DE UN SISTEMA DE INTERCAMBIO DE CALOR(VIDRIO)</i> | 136 |
| <i>P-6: ANÁLISIS DE UN SISTEMA DE INTERCAMBIO DE CALOR (METAL)</i> | 153 |
| <i>ANEXOS</i> | 169 |



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|----------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 5 de 173 |

INTRODUCCIÓN

El presente manual proporciona los elementos requeridos para que profesores y alumnos realicen las actividades experimentales del módulo manejo de energía y que de una forma paulatina conduzca al alumno al entendimiento y comprensión de los conceptos contenidos en el Plan de Estudios de la Carrera de Ingeniería química de la FES ZARAGOZA, correspondientes al sexto semestre de la carrera de Ingeniería Química.

En este contexto, este trabajo se presenta en dos secciones, la primera corresponde a los protocolos que se realizan de manera experimental dentro de los laboratorios, y la segunda sección son protocolos que se llevan a cabo en planta piloto para coadyuvar a los alumnos y entender las actividades experimentales que realizaron. Siendo así, en la primera sección las actividades son: **a) Análisis y determinación del nivel de correlación de tres propiedades físicas (solubilidad, densidad e índice de refracción)**, donde se presenta la metodología para determinar propiedades como densidad, índice de refracción y su dependencia de la temperatura y la composición. **b) Viscosimetría de fluidos newtonianos y no newtonianos**, se utilizan dos métodos para determinar la viscosidad: el de dos cilindros concéntricos, con el cilindro interior en movimiento y el externo fijo (Viscosímetro Brookfield) y el procedimiento gravimétrico que utiliza el viscosímetro de Ostwald. La importancia de las variables determinadas en estas dos actividades experimentales radica en el hecho de que están presentes en diversos procesos de Ingeniería Química, los cuales son descritos mediante modelos matemáticos y varios números adimensionales, que caracterizan patrones de flujo y de transferencia de calor. **c) Estudio de un sistema de mezclado**, se validan los diferentes modelos de mezclado, mediante el balance de masa de un trazador, utilizando colorimetría. **d) Análisis de un sistema de sedimentación**, se analizan las variables principales que caracterizan al proceso de sedimentación como: concentración de sólido, tamaño de partícula y velocidad de sedimentación. Finalmente, **e) en Análisis de la distribución de tamaño de partículas en un sistema sólido**, se estudia la distribución de tamaño de partículas en una muestra sólida, de acuerdo con la ley de Stokes.



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS
DE 6° SEMESTRE



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|----------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 6 de 173 |

En la segunda sección las actividades son: **a) Análisis y determinación de las curvas características de unas bombas**, donde, se presenta un análisis de las variables involucradas en el funcionamiento de un rotámetro y la operación de bombas centrífugas. Además, se describe la metodología para construirla curva de la presión proporcionada por una bomba contra el gasto que maneja, para cada bomba, de arreglos en serie y en paralelo de dos bombas, realizando un balance de energía de acuerdo con la ecuación de Bernoulli. **b) Análisis y determinación de factores de fricción, longitudes equivalentes y calibración de medidores de flujo**, se describen y analizan medidores de flujo como: placa de orificio, tubo Venturi y, manómetro diferencial; así como conceptos de longitud equivalente, factor de fricción de Darcy y de Fanning; además, válvulas de compuerta y de globo. **c) Análisis y operación de un sistema de molienda**, se avoca a la descripción y análisis de los diferentes tipos de molinos y la validación de los modelos matemáticos propuestos para describir el proceso de reducción del tamaño de partículas. **d) Análisis y operación de un sistema de filtrado**, se analizan las variables principales que caracterizan al proceso de filtración como: concentración de sólido, tamaño de partícula, propiedades del fluido, medio filtrante, sólido depositado y velocidad de filtración. **e) Análisis de un sistema de intercambio de calor (vidrio)**, se describen los procesos de transferencia de calor, las propiedades del fluido frío y del fluido caliente, las variables involucradas en los modelos matemáticos que describen el comportamiento de un intercambiador de calor como: coeficiente individual de transferencia de calor por el lado de los tubos y por el lado de la envolvente, tipos de flujo que se presentan en cada corriente. Finalmente, en la sección **f) Análisis de un intercambiador de calor (metal)**, se validan los modelos matemáticos correspondientes a intercambiadores de tubos concéntricos y de tubos y coraza. Con los datos experimentales obtenidos, en un intervalo de presión de vapor (de 0.5-5.5 kg/cm²) se puede simular el comportamiento térmico e hidrodinámico del intercambiador de calor.



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS
DE 6° SEMESTRE



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|----------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 7 de 173 |

OBJETIVOS DE LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS DE 6° SEMESTRE

Los objetivos establecidos en el vigente Plan de Estudios son:

Objetivos Generales

- Identificar y determinar las variables más importantes en los procesos de manejo de energía.
- Analizar las principales variables que intervienen en los procesos de tratamiento de efluentes de sólidos en suspensión como servicios complementarios a las plantas de procesos.
- Determinar los niveles de las principales variables que intervienen en los procesos de tratamiento de efluentes de sólidos en suspensión.

Objetivos Específicos

- Analizar cuantitativamente las variables involucradas en propiedades termo físicas como: densidad, índice de refracción, solubilidad, viscosidad y conductividad térmica de algunas sustancias.
- Validar los modelos matemáticos en prototipos en fenómenos como: sedimentación, mezclado, movimiento de partículas sólidas y filtración.
- Validar los modelos matemáticos en prototipos a nivel planta piloto de: Coeficientes de Transferencia de Calor e Intercambiadores de Tubos y Corazas, además, Tubos Concéntricos.
- Analizar la variación de los Coeficientes individuales y globales de Transferencia de Calor en función del número de Reynolds.

Los objetivos anteriores deberán estar relacionados con cualquiera de las orientaciones que tradicionalmente han representado las fortalezas de esta licenciatura: Creación de nuevas empresas, Ingeniería ambiental, ciencia de materiales o energías renovables.



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS
DE 6° SEMESTRE



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|----------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 8 de 173 |

LINEAMIENTOS DE LABORATORIO

1. Queda estrictamente prohibido realizar las prácticas del laboratorio sin la presencia del profesor responsable del grupo.
2. La asignación de actividades y de gavetas se realizará al inicio de cada semestre y es obligación de los estudiantes y maestros respetar la programación. Solo en casos justificados se podrá hacer reprogramación. Los alumnos que sean sorprendidos abriendo gavetas que no les correspondan serán consignados a la Unidad Jurídica de la Facultad.
3. Al inicio del semestre (la primera semana), el profesor junto con el alumno deberá identificar las áreas de seguridad, de material roto, de depósito temporal de residuos y también verificarán el funcionamiento de instalaciones eléctricas, gas, agua, aire y vacío. Así mismo deberá enseñarse a los alumnos el manejo de los equipos e instrumentos de laboratorio y el llenado de las bitácoras que utilizarán durante el semestre. En caso de alguna falla deberá reportarlo al coordinador de ciclo correspondiente.
4. Para hacer uso de los laboratorios, es obligatorio para alumnos y maestros usar bata blanca de manga larga y limpia; deberán sujetarse el cabello quien lo use largo, en el caso de las alumnas queda prohibido el uso de zapatillas dentro de las instalaciones; se deberá usar zapato cerrado y antiderrapante; deberán portar durante las actividades de laboratorio el equipo de seguridad correspondiente.
5. Queda estrictamente prohibido introducir y consumir alimentos dentro del laboratorio.
6. Queda estrictamente prohibido usar el audio y video de la computadora, teléfonos celulares u otros dispositivos, que no sean útiles para complementar la información o tema que se esté revisando en clase. El uso de estos dispositivos electrónicos es exclusivo como instrumento de trabajo.
7. Para solicitar material, equipo e instrumentos de laboratorio será el mismo día de la actividad, los servicios se deberán solicitar un día antes de realizar la actividad; el alumno presenta la credencial vigente de la institución, en ninguna circunstancia se hará préstamo de material con credenciales diferentes a ésta. Además, llenará los formatos de solicitud de préstamo de material, equipo, instrumentos de laboratorio y servicios.



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS
DE 6º SEMESTRE



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|----------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 9 de 173 |

8. La solicitud de reactivos se realizará con 24 a 48 horas de anticipación llenado el formato de solicitud de reactivos y firmado por el profesor responsable del grupo o el coordinador del ciclo correspondiente, presentarse con los recipientes adecuados para cada sustancia.
9. Es responsabilidad del alumno consultar las hojas de seguridad y manejo de los reactivos que utilizará con la finalidad de conocer las propiedades físicas, químicas y tóxicas de los reactivos y productos que se generan, como resultado de las actividades realizada
10. El material no podrá ser retenido por el alumno de una sesión a otra, ni de un día para otro; solo será autorizado por causa justificada por el coordinador del ciclo correspondiente. En caso de que no se acate este apartado se sancionará a los alumnos que retengan el material. Queda prohibido retener o guardar equipo e instrumentos de laboratorio.
11. Al solicitar o devolver material, equipo e instrumentos de laboratorio, el alumno tiene la obligación de verificar la limpieza, el buen estado y funcionamiento de estos, deberá reportar alguna anomalía en el momento.
12. Para cualquier actividad de laboratorio que involucre el empleo de equipo ubicado en el cuarto de pesado y en los laboratorios que tenga bitácora asignada, el alumno tiene la obligación de llenarla antes de usarlo, así como de operarlo correctamente y mantenerlo limpio.
13. Es responsabilidad de alumnos y profesores mantener limpia la mesa de trabajo, del buen uso de las tarjas y la campana de extracción de vapores y en general de la infraestructura. Deberán reportar cualquier desperfecto que se genere durante la sesión.
14. No verter los desechos tóxicos al drenaje, estos deberán ser colocados en recipientes debidamente identificados con la etiqueta oficial, en el lugar de confinación para tal fin.
15. En caso de que el alumno rompa material o equipo de laboratorio se le retendrá la credencial de la institución hasta que sea reemplazado y entregado el por el mismo.
16. Los reactivos ajenos a los protocolos que se necesiten se autorizarán por el profesor a cargo del grupo, debidamente identificados y siguiendo las medidas de seguridad necesarias.



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS
DE 6º SEMESTRE



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|-----------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 10 de 173 |

17. Al finalizar el curso es obligación de los alumnos desocupar las gavetas, de lo contrario serán abiertas (rompiendo los candados); el material y pertenencias que se encuentren en éstas serán puestos a disposición del responsable de entregar material de laboratorio.

18. Todas las actividades realizadas en los laboratorios deberán estrictamente apegarse a este reglamento.



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS
DE 6° SEMESTRE



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|-----------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 11 de 173 |

LINEAMIENTOS DE PLANTA PILOTO

Obligaciones de los usuarios

1. Portar bata blanca, casco y calzado cerrado antiderrapante. En caso de que las condiciones de la práctica lo requieran, deberá también portar guantes adecuados, lentes de protección y/o cubre bocas. El cabello largo debe estar recogido.
2. Respetar horarios de inicio y término de las prácticas programadas.
3. Es obligatorio el llenado de la bitácora del equipo correspondiente a la práctica que se esté realizando, la cual se pide y se devuelve al técnico académico responsable de planta.
4. En caso de encontrar algún desperfecto en el equipo, el alumno o profesor reportará en la bitácora del equipo el dañado, desperfecto, anomalía o uso indebido del o los equipos, así como avisar al técnico de planta del turno correspondiente y al responsable de planta. (para deslindar responsabilidades).
5. Los usuarios quedan obligados a cuidar los reactivos, el equipo y el material del que haga uso durante la práctica. El daño que les ocasione por su incorrecto empleo o por cualquier otra causa que demuestre descuido, el usuario es responsable de su reposición o reparación. Se sugiere revisar el estado del material y del equipo reportando en la papeleta en el caso del material y en la bitácora en caso del equipo además de informar inmediatamente al técnico en turno y al responsable de planta cualquier anomalía.
6. Hacer uso adecuado y racional de los servicios de planta: vacío, energía eléctrica, agua, vapor y aire comprimido.
7. Antes de salir de planta, el usuario deberá dejar su lugar ordenado y limpio. En especial enrollar y colocar las extensiones y mangueras en su lugar, así como mesas y pizarrones.
8. Al terminar cada actividad experimental el profesor-alumno debe verificar que el equipo se encuentre apagado, las válvulas cerradas, purgar el sistema y/o



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS
DE 6º SEMESTRE



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|-----------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 12 de 173 |

equipo, en resumen, sin novedades, así como verificar que se haya entregado la bitácora.

9. Es obligatorio el uso de la etiqueta oficial del Sistema de Gestión de la Calidad en los contenedores de residuos la cual debe solicitarse al responsable de planta.
10. Los contenedores de residuos deben ser colocados en el área de confinamiento temporal que se encuentra en planta piloto.

Prohibiciones

1. Queda prohibido comer, beber y fumar dentro de planta.
2. Por seguridad, queda prohibido el acceso a planta, a los estudiantes que porten bermudas, zapatillas o cualquier tipo de vestimenta que ponga en riesgo su seguridad.
3. Ningún estudiante puede realizar prácticas experimentales sin la presencia del profesor.
4. El profesor deberá permanecer en la planta durante todo el desarrollo de la práctica.
5. Realizar actividades que no estén relacionadas o que vayan en contra del desarrollo de las prácticas.
6. Asistir a los laboratorios con acompañantes ajenos al grupo que está desarrollando la práctica.
7. Por ningún motivo los usuarios pueden desarmar, sustraer piezas, modificar la configuración de los equipos sin autorización.
8. A la persona que se le sorprenda mutilando o haciendo mal uso del equipo o de las instalaciones, será reportado a las instancias correspondientes quienes determinarán la sanción.
9. El uso de teléfonos celulares, y reproductores de audio y/o video que nada tengan que ver con el desarrollo de la práctica.



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS
DE 6° SEMESTRE



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|-----------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 13 de 173 |

10. El material, equipo o instrumentos, no debe sacarse de la planta sin autorización del responsable y para el caso de equipo o instrumento especializado que requieran sacar hay que entregar al responsable de planta autorización firmada por el jefe de la carrera.
11. Queda prohibida la entrada al área del almacén y cuarto de máquinas a toda persona ajena.
12. Queda prohibido jugar, correr, obstruir salidas de emergencia o cualquier otra actividad que ponga en riesgo la integridad de los usuarios y la de los equipos.

Derechos

Los alumnos debidamente inscritos en el periodo escolar vigente tienen derecho a:

1. Solicitar durante la práctica en planta, un locker para el resguardo de objetos personales (bolsas, mochilas, libros, etc.). El estudiante debe solicitar la llave de uno de estos al encargado de planta y devolverla en cuanto se termine la práctica. Se requiere credencial institucional vigente.
2. El alumno tiene derecho a que se le proporcione mediante papeleta debidamente requisitada y credencial institucional vigente el material requerido para el desarrollo de cada práctica.
3. Solicitar los servicios (vapor, agua, energía eléctrica, vacío, etc.,) para prácticas mediante papeleta con firma de profesor responsable con al menos 24 horas de anticipación.
4. A que se proporcione en tiempo y forma los servicios y el material requerido para la realización de la práctica experimental correspondiente.
5. El profesor debe solicitar la reprogramación de la práctica en el caso que no se haya realizado por algunas de las causas mencionadas en el procedimiento 5 del Sistema de Gestión de la Calidad, haciendo uso del formato de reprogramación de práctica que es proporcionado por la responsable de planta piloto.



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS
DE 6º SEMESTRE



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|-----------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 14 de 173 |

NORMAS DE SEGURIDAD

La normatividad vigente que es aplicable a los laboratorios y que deberán cumplir los laboristas y centros de trabajo es el siguiente:

| NORMA OFICIAL MEXICANA | DESCRIPCIÓN | OBSERVACIONES |
|------------------------|---|---|
| NOM-002-STPS-2010 | Condiciones de seguridad para la prevención y protección contra incendios. | Esta norma establece las condiciones de seguridad para la prevención contra incendios. |
| NOM-005-STPS-1998 | Condiciones de seguridad para el almacenamiento, transporte y manejo de sustancias inflamables y combustibles. | Esta norma tiene por objetivo prevenir y proteger a los trabajadores contra riesgos de trabajo e incendio. |
| NOM-009-STPS-2011 | Seguridad e Higiene para el almacenamiento, transporte y manejo de sustancias corrosivas, irritantes y tóxicas. | Su objetivo es prevenir y proteger a los trabajadores contra los riesgos de quemaduras, irritaciones o intoxicaciones. |
| NOM-010-STPS-2014 | Seguridad e higiene en los centros de trabajo donde se produzcan, almacenen o manejen sustancias químicas capaces de generar contaminación en el medio ambiente laboral | Su objetivo es prevenir y proteger la salud de los trabajadores y mejorar las condiciones de seguridad e higiene donde se produzcan, almacenen o manejen sustancias químicas que, por sus propiedades, niveles de concentración y tiempo de acción sean capaces de contaminar el medio ambiente laboral y alterar la salud de los trabajadores, así como los niveles máximos permisibles de concentración de dichas sustancias, de acuerdo al tipo de exposición. |
| NOM-015-STPS-2001 | Protección personal para los trabajadores en los centros de trabajo | El objetivo de esta norma es establecer los requerimientos de la selección y uso del equipo de protección personal para proteger al trabajador de los agentes del medio ambiente de trabajo que puedan alterar su salud y vida. |
| NOM-020-STPS-2011 | Medicamentos, materiales de curación y personal que presta los primeros auxilios. | Establece las condiciones para brindar los primeros auxilios oportunos y eficazmente. Se aplica en todos los centros de trabajo, para organizar y prestar los primeros auxilios. |



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|-----------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 15 de 173 |

MANEJO DE RESIDUOS

Es obligación de los profesores recuperar en cada práctica los sobrantes de reactivos puros y aprovecharlos para su posterior uso. Así mismo optimizar el aprovechamiento de las soluciones de trabajo que se preparan, es decir una solución de trabajo puede ser utilizada por todo el grupo.

Los residuos generados deberán ser colocados en el recipiente adecuado e identificarlos, colocada una etiqueta visible y legible para posteriormente ser colocados en el lugar asignado.

Los residuos generados son identificados como residuo peligroso de acuerdo con la NOM- O52-SEMARNAT-2005 que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos.

Nota: En las Actividades experimentales realizadas en la Planta Piloto NO SE GENERAN RESIDUOS.

TRATAMIENTO DE RESIDUOS PRODUCIDOS EN LAS ACTIVIDADES DE LABORATORIO DEL MODULO: MANEJO DE ENERGÍA

- Actividad: Análisis y determinación del nivel de correlación de tres propiedades físicas (solubilidad, densidad e índice de refracción).

Sistemas: Fluorita-Agua
Ladrillita-Agua
Barita-Agua

Tratamiento: Sedimentación, decantación y secado

Sistemas: Azúcar-Agua
Cloruro de sodio-Agua

Tratamiento: Evaporación de agua

Sistema: Etanol-Agua

Tratamiento: Destilación a vacío



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS
DE 6º SEMESTRE



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|-----------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 16 de 173 |

- Actividad: Viscosimetría de fluidos newtonianos y no newtonianos.

Sistemas: Sacarosa-Agua

Sistemas: Azúcar-Agua

Glicerina-Agua

Tratamiento: Destilación al vacío

- Estudio de un sistema de mezclado

Sistemas: Ácido pícrico-Agua

Tratamiento: Evaporación de agua

- Análisis de un sistema de sedimentación

Sistemas: Fluorita-Agua

Ladrillita-Agua

Barita-Agua

Tratamiento: Sedimentación, decantación y secado

- Análisis de un sistema de sedimentación

Sistemas: Ladrillita-Agua

Tratamiento: Sedimentación, decantación y secado



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS
DE 6° SEMESTRE



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|-----------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 17 de 173 |

CRITERIOS DE EVALUACIÓN

Los criterios mínimos de evaluación final que dan cumplimiento al programa de la asignatura de Laboratorio y Taller de Proyectos de 6° semestre son:

| Criterio | Límite de porcentaje que el profesor a cargo del grupo puede considerar |
|---|---|
| 1. Desempeño integral durante el experimento (Trabajo en equipo, participación, puntualidad, cumplimiento del reglamento, manejo de equipo e instrumentación y/o toma de decisiones). | 35% al 60% |
| 2. Participar en el Congreso de Laboratorio y Taller de Proyectos. | 10% al 20% |
| 3. Reportes de trabajo en bitácora, electrónico o impreso. (Calidad de contenido, discusión de resultados, vinculación teórica-práctica, entre otros). | 20% al 30% |
| 4. Otros aspectos (Cuestionarios, exámenes, exposiciones, simulaciones, artículos de investigación, entre otros). | 10% a 15% |

Nota: El profesor a cargo del grupo, define los porcentajes de cada rubro asegurando que la suma total sea el 100%



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS
DE 6° SEMESTRE



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|-----------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 18 de 173 |

Características de la Bitácora

- Portada con el nombre de la asignatura, grupo, asesor, integrantes del equipo, ciclo escolar, fecha.
- Cronograma de actividades
- Lineamientos de Laboratorio y Planta Piloto
- Guía para el etiquetado de contenedores de residuos

Cada reporte debe incluir:

- Nombre de la actividad establecida en el proceso
- Objetivos
- Fundamento teórico
- Procedimiento
- Resultados
- Análisis y discusión de resultados
- Conclusiones
- Recomendaciones
- Referencias bibliográficas

Nota: Al finalizar el semestre el profesor debe entregar a la coordinación correspondiente en físico o electrónico y la bitácora.



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|-----------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 19 de 173 |

L-1: DETERMINACIÓN DE LOS NIVELES DE TRES PROPIEDADES FÍSICAS, SU ANÁLISIS Y CORRELACIÓN

1. OBJETIVOS

- 1.1. Determinar los valores de la densidad, solubilidad e índice de refracción de soluciones sólido-líquido y líquido-líquido.
- 1.2. Analizar el efecto que produce la variación de la concentración en la densidad y en el índice de refracción de disoluciones.
- 1.3. Analizar el efecto que produce la variación de la temperatura en la solubilidad de un sólido en agua (sacarosa, cloruro de sodio, barita y fluorita).

2. FUNDAMENTO TEÓRICO

➤ Densidad

La densidad (ρ) de una sustancia es una propiedad intensiva y es definida como la cantidad de masa contenida en una unidad de volumen. En términos generales, la densidad depende de la posición en el espacio, esto es:

$$\rho = \rho(x, y, z) \quad (1)$$

En este caso, la densidad se denomina densidad puntual y es la cantidad de masa (m) contenida en una diferencial de volumen

La densidad puntual, que es la misma en cualquier punto del sistema a nivel macroscópico, está referida a un sistema de coordenadas cartesianas o rectangulares, coordenadas polares, esféricas, cilíndricas, etc. La densidad promedio ($\hat{\rho}$) se define como:

$$\hat{\rho} = \frac{\iiint \rho(x, y, z)}{R \iiint dV} \quad (3)$$

Donde R es la región del espacio que ocupa un volumen V, entonces:

$$\hat{\rho} = \frac{1}{V} R \iiint \rho(x, y, z) \quad (4)$$

$$\hat{\rho} = \frac{R^m}{V} \quad (5)$$



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS
DE 6º SEMESTRE



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|-----------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 20 de 173 |

Donde R^m es la masa total contenida de la región R. Si la densidad puntual obtenida ρ , es independiente de la posición e igual a ρ_0 , entonces:

$$\hat{\rho} = \frac{\rho_0}{V} R \iiint dx dy dz \quad (6)$$

$$\text{ó} \quad \hat{\rho} = \rho_0 \left(\frac{V}{V} \right) = \rho_0 \quad (7)$$

Cuando la densidad es independiente de la posición en el espacio, se dice que el medio es isotrópico. La densidad es una propiedad que interviene en varios grupos adimensionales y modelos matemáticos que describen muchos procesos.

Algunos métodos para determinar la densidad:

- Determinación de la densidad de un sólido no poroso

Se pesa inicialmente el sólido y luego se coloca en un volumen de líquido previamente medido y en el cual el sólido no se disuelve.

El aumento de volumen del líquido corresponde al volumen del sólido. El procedimiento se ilustra esquemáticamente en la Figura 1.

- Método Hidrométrico para determinar la densidad de líquidos

Se basa en el principio de Arquímedes, que establece que un objeto flotante desplaza su propio peso en líquido. El flotador hidrométrico se construye de modo que los intervalos de la escala corresponden a volúmenes definidos y como su peso es conocido, la escala se calibra en unidades de densidad. Ver Figura 2. El hidrómetro mide la densidad relativa de la sustancia.

- Determinación de la densidad de un líquido usando un picnómetro

El picnómetro es un recipiente pequeño que tiene un volumen exacto conocido. Se pesa el picnómetro conteniendo aire (A). Se llena el picnómetro con el líquido de densidad desconocida y se pesa nuevamente (B). El peso del líquido se obtiene por diferencia de (B-A). La densidad relativa del líquido de densidad desconocida se



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS
DE 6º SEMESTRE



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|-----------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 21 de 173 |

obtiene conociendo el peso del picnómetro lleno con un líquido de densidad conocida.

➤ Solubilidad

La solubilidad de una sustancia en un disolvente es la concentración de esta en una disolución saturada. Una disolución está saturada cuando, a una cantidad dada de disolvente se le agrega soluto y no hay aumento neto en la concentración del material disuelto, sin importar cuánta sustancia no disuelta se encuentre presente. Cuando se disuelve en agua un sólido iónico, sus iones son los solutos reales. Por ejemplo, si se disuelve en agua cloruro de sodio, se establece el siguiente equilibrio:

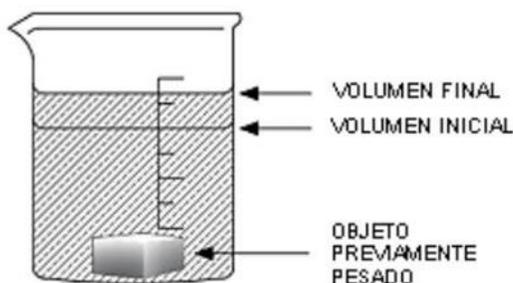
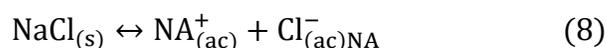
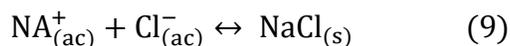


Figura 1. Determinación de la densidad de sólidos insolubles por desplazamiento de líquido.



Figura 2. Determinación de la densidad de un líquido empleando un picnómetro.

Del mismo modo, cuando se mezclan disoluciones del ion sodio y del ion cloruro, el equilibrio se logra partiendo de la reacción inversa:





SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS
DE 6º SEMESTRE



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|-----------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 22 de 173 |

El grado en que ocurren ambas reacciones está determinado por la solubilidad del cloruro de sodio. La expresión de constante de equilibrio (K) para el proceso de disolución puede escribirse de la manera siguiente:

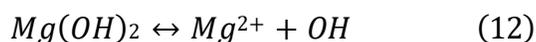
$$K = \frac{[\text{Na}^+][\text{Cl}^-]}{[\text{NaCl}]} \quad (10)$$

Sin embargo, puesto que la concentración (actividad) del cloruro de sodio sólido es constante, esta puede incorporarse en una nueva constante, definida por la ecuación:

$$K_{ps} = K[\text{NaCl}(s)] = [\text{Na}^+][\text{Cl}^-] \quad (11)$$

Donde K_{ps} se denomina constante de producto de solubilidad. Por convención esta constante de equilibrio se aplica al proceso en el cual la reacción directa es la disolución del sólido iónico K_{ps} es el límite de la solubilidad de la mezcla y se emplea para designar a sustancias poco solubles.

Para sustancias iónicas escasamente solubles y que tienen números no iguales de cationes y aniones, la expresión K_{ps} se escribe de acuerdo con las reglas análogas utilizadas para otro tipo de equilibrios químicos, como se muestra a continuación:



$$K_{ps} = [\text{Mg}^{2+}][\text{OH}^-]^2 \quad (13)$$

Si se conocen las concentraciones molares de los iones de una sustancia escasamente soluble, entonces pueden obtenerse los valores numéricos de K_{ps} . Recíprocamente, si se conoce K_{ps} puede calcularse las concentraciones de los iones en equilibrio con el sólido no disuelto.

➤ Índice de Refracción

El índice de refracción es una medida de la desviación que sufre una onda electromagnética al pasar de un medio a otro. Ver Figura 3 de acuerdo con la ley de Snell el índice de refracción se define como:

$$n = \frac{\text{sen}(i)}{\text{sen}(r)} \quad (14)$$



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS
DE 6º SEMESTRE



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|-----------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 23 de 173 |

En donde i es al ángulo de incidencia y r es el ángulo de refracción, ambos con respecto a la normal.

$$n = \frac{c}{v} \quad (15)$$

En donde c es la velocidad de la luz en el vacío y v es la velocidad de la luz en el medio 2. La utilidad del índice de refracción estriba en su aplicación al análisis de composición de mezclas binarias, entre otras.

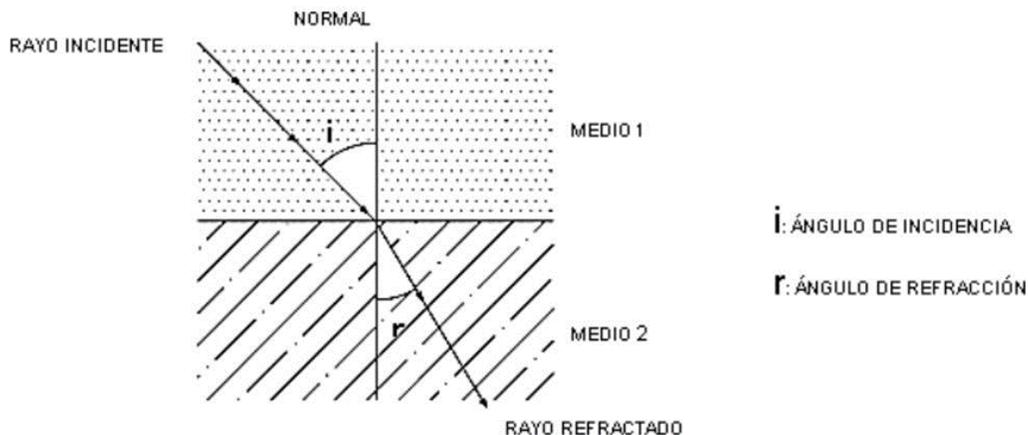


Figura 3. Índice de refracción, desviación de un haz luminoso al pasar de un medio a otro.

3. MATERIALES Y EQUIPO

3.1 MATERIALES.

- 1 vaso de precipitados de 1000 ml
- vasos de precipitados de 250 ml
- vasos de precipitados de 50 ml
- 2 probetas de 50 ml
- 3 picnómetros (de 10, 25 o 50 ml)
- 3 pipetas de 1 ml
- 3 pipetas volumétricas de 10 ml
- 1 vidrio de reloj de 8 cm de diámetro
- 1 termómetro de -10 a 100°C con resolución en 1°C



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS
DE 6º SEMESTRE



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|-----------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 24 de 173 |

- 2 espátulas con mango de madera chicas
- 1 piseta de 500 ml
- Algodón para limpiar los prismas del refractómetro

3.2 REACTIVOS.

- 5 g de fluorita
- 5 g de barita
- 100 ml de etanol

3.3. EQUIPO.

- 1 balanza analítica.
- 1 balanza granataria.
- 1 baño de temperatura constante con recirculación.
- 1 refractómetro
- 1 agitador cáframo con propela.

3.4. HERRAMIRNTAS .

- No se utilizarán herramientas

3.5. SERVICIOS.

- Electricidad.

3.6. MATERIAL BÁSICO

- Azúcar.
- Sal de mesa.
- Agua destilada.

Nota: No se requiere agua destilada para el baño de temperatura constante



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS
DE 6° SEMESTRE



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|-----------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 25 de 173 |

4. PROCEDIMIENTO

Preparar las siguientes disoluciones (se recomienda preparar primero la disolución etanol-agua y determinar inmediatamente su densidad e índice de refracción y después proceder con los otros sistemas). Disolución etanol-agua. Esta disolución se prepara de acuerdo con los valores mostrados en la Tabla 1

Tabla 1. Sistema Etanol- Agua (% en Volumen)

| %Etanol | % Agua | Vol. Etanol(ml) | Vol. Agua(ml) |
|---------|--------|-----------------|---------------|
| 100 | 0 | 30 | 0 |
| 75 | 25 | 22.5 | 7.5 |
| 50 | 50 | 15 | 15 |
| 25 | 75 | 7.5 | 22.5 |
| 0 | 100 | 0 | 30 |

Disoluciones sacarosa-agua y cloruro de sodio-agua. Estas disoluciones se prepararán de acuerdo con los valores mostrados en la Tabla 2.

Tabla 2. Sistema sacarosa (A) -agua y cloruro de sodio (B) - agua. (% en masa).

| % de A o B | % de Agua | Masa de A o B (g) | Masa de agua (g) |
|------------|-----------|-------------------|------------------|
| 0 | 100 | 0 | 50 |
| 10 | 90 | 5 | 45 |
| 30 | 70 | 15 | 35 |
| 50 | 50 | 25 | 25 |

➤ **Determinación de la densidad**

La densidad se determina utilizando un picnómetro limpio y seco. Inicialmente, se pesa el picnómetro junto con su tapa en la balanza analítica. La muestra se introduce con una pipeta volumétrica y se pesa nuevamente. La densidad de la muestra se determina con la relación:

$$\text{densidad} = \frac{\text{masa de la muestra}}{\text{volumen de la muestra}}$$

Se registra la temperatura ambiente. La muestra se devuelve a la disolución y el picnómetro se lava y seca antes de proseguir con la siguiente determinación.



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS
DE 6º SEMESTRE



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|-----------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 26 de 173 |

- Determinación del índice de refracción.

Calibrar el Refractómetro.

1. Conectar el enchufe del cordón con el transformador externo en la posición estándar de 115 v CA y de 50 a 60 Hz. Bajar el interruptor del iluminador.
2. Abrir la parte superior del prisma y limpiar cuidadosamente el prisma de medición, con algodón, sin presionar demasiado. Tener cuidado de no rayar el prisma.
3. Aplicar 1 o 4 gotas de agua destilada con una pipeta sin tocar la superficie del prisma
4. Bajar el interruptor del iluminador y usar el tornillo hasta ajustar el índice de la escala (visible a través del ocular) al valor de 1.332 a 20 °C.
5. Enfocar con el ocular para una mejor definición de la retícula y la escala.
6. Ajustar la posición del brazo del iluminador.
7. Usar el disco compensador o el tornillo para centrar la línea divisoria de reflexión, exactamente sobre el punto de intersección de la retícula.
8. Repetir la medición varias veces.
9. Si el índice de refracción se dispara y no coincide con el valor indicado anteriormente, se debe insertar la llave Allen que trae el aparato en el orificio junto al tornillo, ajustando la escala hasta obtener el valor exacto.
10. Para proceder a hacer las determinaciones de las muestras se siguen los mismos pasos, evitando la presencia de burbujas, y procurando que la superficie del prisma quede cubierta antes y después de cada determinación.

- Determinación de la solubilidad.

Sacarosa y Cloruro de sodio

En un vaso de precipitados de 250 ml se pesan 100 g de solvente en la balanza granataria y se coloca en un baño a temperatura constante con agitación. Se agrega la sustancia poco a poco a la que se le va a determinar la solubilidad y se espera hasta que se disuelva en su totalidad; se vuelve a agregar más sustancia hasta que la disolución se sature.



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS
DE 6º SEMESTRE



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|-----------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 27 de 173 |

Este punto se detecta cuando se observa que existe un remanente insoluble en la disolución. En ese momento se saca el vaso de precipitados del baño de temperatura, se seca exteriormente y se pesa de nuevo. La diferencia de peso constituye el soluto disuelto en 100 g de disolvente. Hacer las determinaciones a 30, 40 y 50 °C. En cada caso el disolvente es agua.

Fluorita y Barita.

Efectuar las mismas operaciones que con la sacarosa y el cloruro de sodio, excepto que se utilizará un vaso de precipitados de 1000 ml y se pesan 1000 g de solvente. La diferencia de peso constituye el soluto disuelto en 1000 g de solvente. La fluorita y en especial la barita son altamente insolubles en agua por lo que se recomienda adicionar cantidades muy pequeñas de soluto

5. TRATAMIENTO DE DATOS PRESENTACIÓN DE DATOS

Construir las siguientes gráficas:

- Densidad contra composición para los sistemas Etanol- Agua, Sacarosa-Agua y Cloruro de Sodio-Agua.
- Índice de refracción contra composición para los sistemas anteriores.
- Solubilidad contra temperatura para los sistemas:
 1. Barita-Agua
 2. Fluorita-Agua
 3. Sacarosa-Agua
 4. Cloruro de sodio-Agua

La solubilidad deberá estar reportada en g de soluto por 100 g de solvente. Obtener las correlaciones Temperatura vs Solubilidad, Temperatura vs Densidad, Temperatura vs Índice de refracción, Densidad vs Índice de refracción.



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS
DE 6º SEMESTRE



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|-----------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 28 de 173 |

6. MANEJO DE RESIDUOS

Los residuos generados son identificados como residuos peligrosos de acuerdo con el procedimiento SGC-FESZ-PO06 Manejo de residuos generados en los laboratorios de docencia, basado en la NOM-052-SEMARNAT-2005 que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos.

7. BIBLIOGRAFÍA

1. Shriner (1996). Identificación sistemática de compuestos orgánicos. Editorial Limusa. México.
2. Hess, George (1982). Química general experimental. Editorial Continental. México.
3. Brown, T. L.; Brown, T. E.; LeMay, Jr., H. E.; Escalona y García, H. J.; Bursten, B. E.; Burdge, J.R.; Escalona y García, R. (2004). Química: La ciencia central. 9ª Edición. Cap. 13. Editorial. Pearson Educación.
5. Durst, H. D., & Gokel, G. W. (1985). Química orgánica experimental. Reverté.
6. Atkins, P. W. (1992). Química general. Omega.



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS
DE 6° SEMESTRE



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|-----------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 29 de 173 |

L-2: DETERMINACIÓN DE LA CORRELACIÓN DE VISCOSIDAD VS TEMPERATURA Y CONCENTRACIÓN EN LOS SISTEMAS GLICERINA-AGUA Y AZÚCAR-AGUA

1. OBJETIVOS

- 1.1. Determinar la viscosidad a través de dos métodos experimentales.
- 1.2. Determinar el efecto que causa la variación de la composición y la temperatura de la viscosidad aparente en los sistemas propuestos.

2. FUNDAMENTO TEÓRICO

- Introducción general de fluidos newtonianos y no newtonianos.
- Concepto de viscosidad (modelos).
- Métodos experimentales (rotatorio y capilar).
- Incluir las figuras que correspondan.

Un fluido es una sustancia que al ser sometida a un esfuerzo cortante (Fuerza tangencial en dirección de la velocidad) se deforma continua e irreversiblemente. La resistencia que presenta al tratar de ser deformado es proporcional a la velocidad e inversamente proporcional a la distancia de las placas en las cuales se transfiere la cantidad de momento. Esta constante, se llama viscosidad aparente y para fluidos newtonianos se denomina con la letra griega μ y para fluidos no-newtonianos.

$$\mu = \mu(T, wt. \%, pH, \gamma). \quad (1)$$

Para los gases y los líquidos newtonianos, la viscosidad aparente es constante si permanecen constantes la presión y la temperatura.

Considérense dos capas de fluido, separados por una distancia de “y” en *m*, como se muestra en la Figura 1. La capa superior se mueve paralela a la capa inferior a una velocidad *u* en *m/s* con respecto a la capa inferior. Para un fluido newtoniano, se requiere una fuerza *F* para mantener este movimiento.



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS
DE 6º SEMESTRE



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|-----------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 30 de 173 |

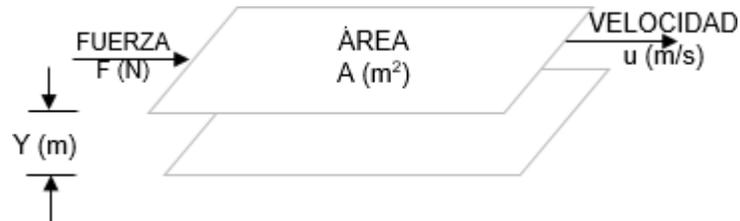


Figura 1. Dos capas de fluido en movimiento relativo

La magnitud de esta fuerza fue descrita en principio por Isaac Newton y es conocida como ley viscosidad de Newton.

$$F = \frac{\mu u A}{g_c} \quad (2)$$

La cual puede expresarse también en forma diferencial como:

$$\tau = \frac{\mu}{g_c} \left(\frac{du}{dy} \right) \quad (3)$$

Donde:

$\mu =$ Viscosidad del fluido $N / (m \cdot s) = kg / (m \cdot s)$

$\tau =$ Esfuerzo cortante $\frac{kg}{mh}$

$g_c =$ Constante $= 9.8066 \frac{m}{s}$

Fluido Newtoniano: Es aquel que no importa cómo se deforme, su viscosidad aparente real permanece constante.

Fluido No Newtoniano: Es aquel cuya viscosidad aparente es una función de la rapidez de deformación. En este caso, el modelo que describe a la viscosidad debe de ser modificado y se debe de llamar función viscosidad la cual, depende de la concentración, el pH y la segunda invariante del tensor rapidez de deformación, es decir de la rapidez de deformación.



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS
DE 6º SEMESTRE



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|-----------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 31 de 173 |

Un fluido invíscido (no viscoso) es un líquido o un gas que no ofrece resistencia a un esfuerzo cortante y por consiguiente su viscosidad es cero. Por lo regular, los gases se asemejan a este comportamiento.

Los viscosímetros generalmente miden la resistencia al flujo, o al arrastre o torque producido por el movimiento de un elemento a través del fluido. Cada tipo de aparato normalmente se usa en un intervalo estrecho de viscosidades. La calibración empírica encada intervalo permite su uso para los fluidos newtonianos y no newtonianos.

Los viscosímetros que se analizan son:

A.- El de tipo rotatorio, el cual se basa en la medición del torque, que es la fuerza inducida por la componente r del tensor de esfuerzos multiplicada por el brazo de palanca $r = \alpha$, en función de la velocidad angular, respectivamente. Este sistema presenta la siguiente ecuación:

$$\tau = 4\pi\mu\Omega_0 R^2 L \frac{k^2}{1-k^2} \quad (4)$$

Arreglando esta expresión, se tiene el siguiente análisis:

$$\left(\frac{1-k^2}{k^2}\right) \frac{\tau}{4\pi R^2 L} = \mu \Omega_0 \quad (5)$$

Es decir, el alumno debe de ser capaz de llegar a esta expresión a partir de las ecuaciones correspondientes. En este punto se recomienda que vaya a la literatura básica (Bird et al. 1977).

B. Cálculo de la viscosidad aparente a partir de la velocidad terminal de una esfera cayendo en el seno de un líquido viscoso.

El balance de fuerzas está dado por la siguiente expresión:

$$\frac{4}{3}\pi R^3 \rho_s g = \frac{4}{3}\pi R^3 \rho + 6\mu\pi R V_t \quad (6)$$

Despejando la velocidad terminal de la partícula en el seno del fluido newtoniano:

$$\frac{\frac{2}{9}R^2(\rho_s - \rho)g}{\mu} = V_t \quad (7)$$



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS
DE 6º SEMESTRE



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|-----------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 32 de 173 |

A partir de cálculos de velocidad terminal en función del radio de la esfera de acero, se puede obtener la viscosidad aparente del sistema. Sin embargo, este método no toma en cuenta los efectos de rotación y traslación de la partícula, en este punto se recomienda usar esferas de masa considerable con el fin de evitar estos efectos.

El balance de fuerzas puede ser reescrito en la siguiente forma:

$$\mu = \frac{1}{V_t} \frac{(m_s - m)g}{6\pi R} \quad (8)$$

Aquí se varía la masa de la esfera y se toman datos de velocidad terminal en función del radio de la esfera y a partir de estos, se construye una línea de regresión con el fin de obtener por medio del ajuste por mínimos cuadrados la pendiente y consecuentemente la viscosidad aparente.

C. Viscosimetría capilar.

Las viscosimetrías de este tipo determinan la viscosidad aparente a partir del tiempo de flujo de un sistema. La ecuación representativa del modelo de Poiseville está dada por:

$$\frac{\pi R^4 (P_0 - P_L)}{8\mu L} \quad (9)$$

En la ecuación anterior, Q es el flujo volumétrico, R es el radio del capilar, μ es la viscosidad aparente del fluido, $\frac{(P_0 - P_L)}{L}$ es el gradiente de presión en el sistema. La ecuación anterior puede ser escrita en términos de cantidades medibles. Si suponemos las siguientes igualdades:

$$Q = \frac{V}{t}, \quad \frac{(P_0 - P_L)}{L} = \rho_f g \quad (10)$$

Al sustituir en las expresiones anteriores, se tiene lo siguiente:

$$\frac{1}{t_f} = \frac{\pi R^4 g / 8V}{\mu_f} \rho_f \frac{1}{t_f} = K \frac{\rho_f}{\mu_f}; \quad K = \frac{\rho R^4 g}{8V} \quad (11)$$

En donde la constante K del viscosímetro solo depende de propiedades geométricas del sistema.

$$K = \frac{\pi R^4 g}{8V} = \frac{R^2 g}{8L} \quad (12)$$



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS
DE 6º SEMESTRE



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|-----------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 33 de 173 |

Combinando las ecuaciones que involucran a la constante K , se tiene lo siguiente:

$$\frac{\mu_f}{\frac{\rho_f}{t_f}} = K \quad (13)$$

En particular para el agua se tiene lo siguiente:

$$\frac{\mu_{H_2O}}{\frac{\rho_{H_2O}}{t_{H_2O}}} = K \quad (14)$$

Al igualar las dos expresiones y despejando la viscosidad del fluido problema se tiene lo siguiente:

$$\mu_f = \rho_{H_2O} \left(\frac{t_f}{t_{H_2O}} \right) \left(\frac{\rho_f}{\rho_{H_2O}} \right) \quad (15)$$

Es decir, esta expresión nos permite determinar el valor de la viscosidad en función de los tiempos experimentales y del cociente de densidades.

Se tiene entonces:

Para una disolución: $\mu = \mu$ (Temperatura, composición)

A temperatura constante: $\mu = \mu$ (Composición)

A composición constante: $\mu = \mu$ (Temperatura)

Se tratará de generar la función $\mu = \mu$ (Temperatura, composición) para los sistemas glicerina- agua y sacarosa-agua, experimentalmente.

3. MATERIALES Y EQUIPO

3.1. MATERIALES.

- 2 termómetros
- 2 soporte universal
- 2 vidrio de reloj grandes
- 2 espátulas con mango de madera
- 2 pinzas de tres dedos con nuez
- 8 vasos de precipitado largos de 600 ml (Brookfield)



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS
DE 6º SEMESTRE



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|-----------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 34 de 173 |

- 5 vasos de precipitado de 500 ml
- 1 probeta de 100 ml
- 1 probeta de 500 ml
- 1 picnómetro de Gauss de 10 ml
- 1 picnómetro de Gauss de 25 ml
- 1 viscosímetro Cannon – Fenske No.100
- 1 viscosímetro Cannon – Fenske No.200
- 1 viscosímetro Cannon – Fenske No.300
- 1 viscosímetro Cannon – Fenske No.450

3.2. REACTIVOS.

- 500 g de azúcar de caña (traída por el alumno)
- Soluciones preparadas de glicerina-agua (solicitar al interlaboratorio)

Nota: Etiquetar primero sus vasos para verter el reactivo correspondiente y evitar contaminar y/o diluir el sistema

3.3. EQUIPO.

- 1 viscosímetro de Brookfield
- Husillos para el viscosímetro
- 1 baño de temperatura constante con recirculador
- 1 elevador mecánico
- 1 sistema de agitación (caframo o baño con recirculación)

3.4. HERRAMIENTAS.

- En esta actividad no se utilizan herramientas

3.5. SERVICIOS.

- Electricidad



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS
DE 6° SEMESTRE



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|-----------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 35 de 173 |

3.6. MATERIAL BÁSICO

- Etiquetas
- Jeringa de 20 ml
- Manguera de látex de 0.5 cm y 1 cm
- Piseta

4. PROCEDIMIENTO

- Preparación de sistemas .

Las disoluciones de glicerina-agua a utilizar son señaladas en la **Tabla 1**.

Las soluciones de azúcar-agua se preparan de acuerdo con la **Tabla 2**.

Tabla 1. Disolución glicerina-agua (%vol.)

| % Glicerina. | % Agua. | Vol. Glicerina (ml) | Vol. Agua (ml) |
|--------------|---------|---------------------|----------------|
| 0 | 100 | 0 | 500 |
| 25 | 75 | 125 | 375 |
| 50 | 50 | 250 | 250 |
| 75 | 25 | 375 | 125 |
| 100 | 0 | 500 | 0 |

Tabla 2. Disolución azúcar-Agua (%masa)

| % Sacarosa | % Agua | Masa de azúcar (g) | Masa de agua (g) |
|------------|--------|--------------------|------------------|
| 0 | 100 | 0 | 600 |
| 20 | 80 | 120 | 480 |
| 40 | 60 | 240 | 360 |

Cada sistema se tratará por separado. Se recomienda empezar con el sistema azúcar- agua y una vez terminado el estudio de este sistema, proceder con el sistema glicerina- agua.

Preparar el baño de temperatura constante inicialmente a 30°C, determinar entonces la viscosidad con el equipo Brookfield a cada muestra a 30, 40 y 50° C. Se recomienda hacer primero todas las determinaciones a la misma temperatura y entonces proceder a cambiarla temperatura a un nivel más alto. Se deben hacer varias lecturas para hacer un tratamiento estadístico de datos.



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS
DE 6º SEMESTRE



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|-----------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 36 de 173 |

Al cambiar de disolución, las pesas del viscosímetro y cualquier parte del equipo que esté en contacto con la disolución deberán ser lavados.

Cuidadosamente antes de proceder con la solución siguiente. Para cada disolución se recomienda probar con las diferentes pesas del viscosímetro y hacer las anotaciones correspondientes para determinar cuál es la pesa adecuada en cada caso. Una vez terminada la operación con el viscosímetro de Brookfield, se procederá a hacer las determinaciones en el viscosímetro de Ostwald, para el mismo sistema. Es importante que se siga el orden sugerido para efectuar las determinaciones adecuadamente.

Las disoluciones deberán ser colocadas en recipientes señalados tal efecto, tomando las precauciones necesarias para no contaminar las mismas, una vez que se termine la actividad.

Viscosímetro de Brookfield (Figura.2)

- 1.- Colocar el soporte .
- 2.- Montar el equipo y conectar a la fuente
- 3.- Colocar el husillo, atornillándolo en sentido contrario a las manecillas del reloj
- 4.- Nivelar el equipo, observando que la burbuja de aire quede centrada .
- 5.- Poner el elevador mecánico y centrar el vaso de precipitado de 600 ml
- 6.- Colocar el vaso de precipitado con la disolución a utilizar de los sistemas
- 7.- Elevar el vaso hasta la marca del husillo procurando centrar y evitar que haga contacto con el fondo del vaso
- 8.- Comenzar con la velocidad angular más baja; dejar que el sistema alcance el estado estable y tomar lectura
- 9.- Repetir el procedimiento para cada velocidad angular



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS
DE 6º SEMESTRE



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|-----------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 37 de 173 |

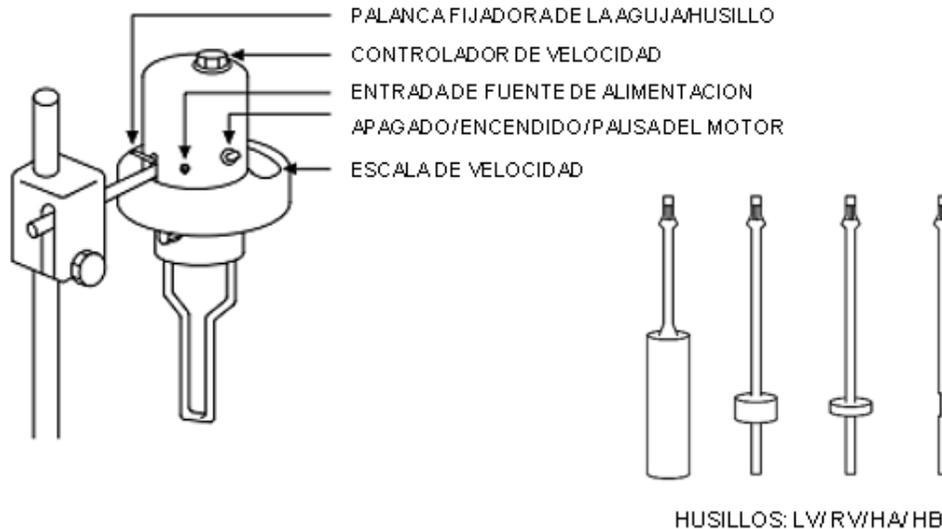


Figura 2. Determinación de la viscosidad con el viscosímetro de Brookfield

Nota: El alumno puede solicitar el manual de uso del equipo y los husillos en el Inter laboratorio.

Viscosímetro de Cannon – Frenske (Figura 3)

- 1.- Lavar y secar el viscosímetro previamente antes de realizar la medición. Llenado el viscosímetro de manera invertida:
- 2.- El capilar delgado “A” sumergirlo en el líquido, succionando por “B” mediante una jeringa y un tramo de manguera, lo cual produce una elevación en la muestra, hasta la línea “D”. En ese momento se invierte el viscosímetro en su posición normal, y obstruyendo con el dedo el punto A se registra el tiempo que tarda el menisco en descender de la marca “C” a la marca “D”.
- 3.-Repetirlo por triplicado para obtener un promedio con cada capilar
- 4.-Colocar y nivelar de manera vertical en el soporte universal
- 5.-Succionar por el capilar de mayor diámetro “B” elevando la muestra hasta la marca “C”
- 6.-Se toma el tiempo, dejando que la muestra descienda libremente, desde la marca “C” hasta la marca “D”
- 7.-Para repetir la prueba, es necesario rehacer los pasos “5 y 6”



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS
DE 6º SEMESTRE



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|-----------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 38 de 173 |

8.- La viscosidad se calcula multiplicando el tiempo de descenso por la constante del viscosímetro, para lo cual es necesario consultar la tabla de constantes para los diferentes viscosímetros (Tabla 3.)

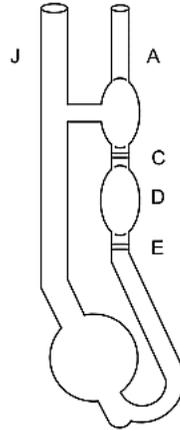


Figura 3. Viscosímetro Cannon – Fenske.

5. TRATAMIENTO DE DATOS

➤ PRESENTACIÓN DE DATOS

De los datos obtenidos para cada sistema se concluirá lo siguiente:

- Pesa(s) del viscosímetro de Brookfield más adecuada en cada caso, con base en la exactitud y precisión de la medición (una variable que tiene un amplio rango de variación no está midiendo con precisión, una variable que esta medida lejos de su valor real no está medida con exactitud). Para comparar la exactitud se deberá recurrir a datos, reportados en la literatura (tabla 3), para comparar la precisión se deberá calcular la varianza de las mediciones. Se hará lo mismo con el viscosímetro Ostwald.
- Método más recomendable en cada caso (entre Brookfield y Ostwald).
- Construir la gráfica de viscosidad contra composición en cada caso para los diferentes niveles de temperatura.
- Proponer una función del tipo:

$$\mu = \mu (\text{Composición a temperatura constante})$$



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS
DE 6º SEMESTRE



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|-----------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 39 de 173 |

- e) Construir la gráfica de viscosidad contra temperatura en cada caso para las diferentes composiciones.
f) Proponer una función del tipo:

$$\mu = \mu (\text{Temperatura}) \text{ a composición constante}$$

- g) Proponer una ecuación del tipo:

$$\mu = \mu (\text{Composición, temperatura})$$

Los datos deben ser tratados con las incertidumbres correspondientes en todas las mediciones. Para el viscosímetro de Brookfield se debe calcular el torque-velocidad angular, para el segundo (velocidad terminal) en función del diámetro de la partícula, y el último quizá el más accesible, el de Ostwald, los tiempos del viscosímetro capilar, en función de las densidades y la viscosidad del fluido conocido.

Tabla 3. Intervalos de viscosidad recomendados para viscosímetros de Ostwald

| Viscosímetro Número | Constante Centistokes/s | Rango en Centistokes |
|---------------------|-------------------------|----------------------|
| 25 | 0.002 | 0.5 -2 |
| 50 | 0.004 | 0.8- 4 |
| 75 | 0.008 | 1.6- 8 |
| 100 | 0.015 | 3-15 |
| 150 | 0.035 | 7-35 |
| 200 | 0.1 | 20-100 |
| 300 | 0.25 | 50-250 |
| 350 | 0.5 | 100-500 |
| 400 | 1.2 | 240-1200 |
| 450 | 2.5 | 500-2500 |
| 500 | 8 | 1600-8000 |

Sugerencia: Para el viscosímetro de Brookfield (análogo) se recomienda que en las concentraciones del 75% al 100% se utilice un rango de velocidad de 4 rpm hasta las 50 rpm utilizando los husillos del No.1 al No.5 a una temperatura ambiente.

Para el caso del viscosímetro digital se recomienda utilizar los husillos “HSO1” a temperatura ambiente con un rango de velocidad de 10 rpm a 100rpm.



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS
DE 6° SEMESTRE



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|-----------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 40 de 173 |

6. MANEJO DE RESIDUOS

Los residuos generados son identificados como residuos peligrosos de acuerdo con el procedimiento SGC-FESZ-PO06 Manejo de residuos generados en los laboratorios de docencia, basado en la NOM-052-SEMARNAT-2005 que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos.

7. BIBLIOGRAFÍA

1. Mott, L. Robert, (2006). *Mecánica de Fluidos*. 6ta Edición. Editorial Pearson. México
2. Cengel, A. Yunus. (2006). *Mecánica de Fluidos*. 2da Edición. Editorial McGrawHill México.
3. Gerhart, Petter. (1992). *Fundamentos de Mecánica de Fluidos*. 2da Edición. EUA.
4. Hatschek, Email (1928). *The Viscosity of Liquids*. New York. Van Nostran



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS
DE 6º SEMESTRE



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|-----------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 41 de 173 |

L-3: ANÁLISIS DE UN SISTEMA DE MEZCLADO

1. OBJETIVOS

- 1.1. Analizar el fenómeno de mezclado para un fluido de baja viscosidad en un tanque agitado.
- 1.2. Determinar la eficiencia de mezclado utilizando una metodología estímulo-respuesta, en un sistema de flujo continuo.
- 1.3. Conocer los factores más importantes que afectan la eficiencia de mezclado, en un sistema de flujo continuo.

2. FUNDAMENTO TEÓRICO

La realización de muchos procesos depende de una eficaz agitación y mezcla de los líquidos que intervienen. Aunque se confunden con frecuencia, agitación y mezcla no son sinónimas. La agitación se refiere al movimiento inducido de un material, en forma determinada, generalmente circulatoria y dentro de algún recipiente.

La mezcla es la distribución al azar de dos fases inicialmente separadas.

Puede agitarse una sola sustancia homogénea, como un tanque de agua fría, pero no puede mezclarse a menos que se añada a la misma otra sustancia (una cierta cantidad de agua caliente o un sólido pulverizado).

El término mezcla se aplica a una gran variedad de operaciones que se diferencian en el grado de homogeneidad del material "mezclado". Consideremos en un caso dos gases que se ponen en contacto y se agitan en toda la masa y en otro caso arena, grava, cemento y agua que son revueltos durante algún tiempo en un tambor rotatorio.

En ambos casos, el producto final se dice que está mezclado, aunque no son homogéneos.

Las muestras de gases mezclados, incluso las más pequeñas tienen la misma composición, sin embargo, muestras pequeñas de hormigón difieren grandemente en composición.



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS
DE 6º SEMESTRE



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|-----------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 42 de 173 |

El mezclado se efectúa para lograr una distribución uniforme de los componentes entre sí, mediante el flujo. La teoría de la agitación o mezclado de fluidos se fundamenta en los componentes de velocidad inducida en un fluido por el agitador y están son:

1. Flujo radial: perpendicular al eje de rotación.
2. Flujo axial o longitudinal: paralelo al eje de rotación.
3. Flujo rotacional: alrededor del eje de rotación.

Los agitadores o propelas pueden clasificarse como:

1. Agitador de hélice: presenta flujo axial, se emplea a altas velocidades (hasta 1 800 rpm), aplicable a fluidos viscosos, hasta 4 000 cps, velocidad de agitación 400-800 rpm.
2. Agitador de turbina: presenta flujo radial, es decir el flujo choca con la pared, para fluidos con una viscosidad hasta 105 cps, cubren del 30-50% del diámetro del tanque de agitación.
3. Agitador de paletas: presenta flujo radial, velocidades bajas y moderadas (20-150 rpm), generan corrientes muy suaves y requieren la instalación de deflectores.

➤ Métodos experimentales para el análisis.

Cuando se estudia un sistema de mezclado, es conveniente definir los principales patrones de flujo que pueden presentarse y analizar los modelos más importantes que los representan. En este tipo de experimentación, estimulamos al sistema mediante una perturbación y vemos cómo responde a este estímulo; el análisis de la respuesta nos da información sobre el sistema, esta técnica experimental se conoce como estímulo-respuesta.

En nuestro caso, el estímulo es una inyección de trazador en el fluido que entra al recipiente, mientras que la respuesta es una representación del trazador a la salida del recipiente frente al tiempo. El trazador debe ser una especie no reactiva fácil de detectar, debe tener propiedades físicas similares a las de la mezcla y debe ser totalmente soluble en ella. Los materiales coloridos, radioactivos o las soluciones



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS
DE 6º SEMESTRE



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|-----------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 43 de 173 |

eléctricamente conductoras son los tipos de trazadores más comunes. Como ejemplos de trazadores se mencionan los siguientes:

➤ Trazadores salinos

Las sales inorgánicas como el NaCl y el KCl se han empleado como trazadores desde hace mucho tiempo aprovechando que su concentración puede determinarse mediante conductividad eléctrica.

➤ Trazadores colorantes

Este tipo de trazadores tienen la propiedad de absorber luz de cierta longitud de onda (excitación del espectro de absorción) y de emitir al mismo tiempo luz con longitudes de onda mayores. Ambos espectros son característicos para cada sustancia y, además, son constantes, en consecuencia, se pueden identificar por medio de sus propiedades espectrales mediante espectrofotometría. Ejemplos de este tipo de trazadores son: rodamina B, uranina y eosina.

➤ Trazadores radioactivos

Los más usados son el yodo 132, bromo 82, tienen la característica de que pueden ser detectados en concentraciones muy bajas, sin embargo, su utilización requiere de personal muy especializado.

La inyección del trazador puede ser cualquier tipo de señal de entrada: una señal al azar, una señal periódica, una señal en escalón, o una señal en impulso. Las dos últimas son las más empleadas por la facilidad en su tratamiento, aunque puede obtenerse la misma información con todos estos tipos diferentes de señales de entrada.

Patrones de flujo en el sistema de mezclado Con el fin de explicar el comportamiento del sistema se incluyen las siguientes definiciones y ecuaciones.

➤ Volumen efectivo de mezclado

Es la parte del volumen de un tanque agitado que está bien mezclado. El resto forma zonas estacionarias. Es la parte del volumen donde el mezclado es completo y se denomina también volumen efectivo de mezclado.

➤ Corto circuito

Este fenómeno ocurre cuando parte de la alimentación puede ir directamente a la salida sin ser mezclada. Esto depende de las posiciones relativas de la entrada de



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS
DE 6º SEMESTRE



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|-----------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 44 de 173 |

la alimentación y de la salida de un tanque agitado. El corto circuito se puede presentar en forma independiente y como único fenómeno en un sistema de mezclado. El sistema puede representarse como se muestra en las Figuras 1 y 2.

Se puede establecer el comportamiento de un trazador inerte en un sistema de mezclado con corto circuito de la forma siguiente:

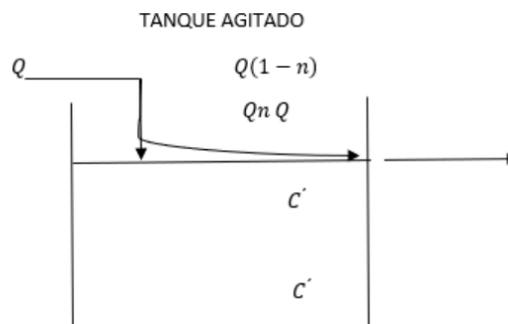


Figura 1. Mezclado con corto circuito.

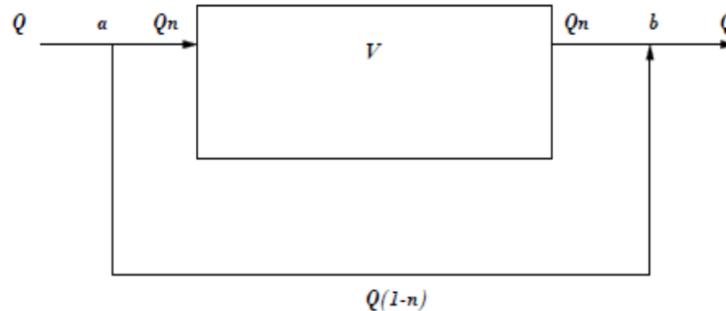


Figura 2. Representación gráfica del mezclado con corto circuito.

Donde:

Q = Flujo volumetrico, m^3/s

V = Volumen de fluido, m^3

n = Fracción del flujo que entra a la zona de mezclado

t = tiempo, s

C' = Concentración del trazador en el tanque y a la salida de este (antes del punto b) , Kg/m^3

C = La concentración del trazador a la salida del sistema (despues del punto b), Kg/m^3 .

Además no se alimenta trazador en la corriente de entrada y la concentración de este inicialmente es C_0



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS
DE 6° SEMESTRE



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|-----------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 45 de 173 |

Balance del trazador en el tanque:

$$-QnC'dt = VdC' \quad (1)$$

Balance en el punto *b*:

$$QnC' = CQ \quad (2)$$

La integración de la ecuación (3) de la respuesta del trazador a la salida del tanque:

$$\frac{dC'}{C'} = -\frac{Qn}{V} dt \quad (3)$$

C.I (condición inicial) a $t = 0$ $C' = C_0$

La integración de la ecuación (3) de la respuesta del trazador a la salida del tanque:

$$C' = C_0 \exp\left(-\frac{Qn}{V}t\right) \quad (4)$$

Con esta ecuación se obtiene respuesta del trazador a la salida del sistema.

➤ Flujo pistón

Este tipo de flujo se presenta cuando existe una zona de fluido estacionario (que no está incluido en la zona de mezclado) y la configuración de la salida del líquido es tal que permite que el fluido de la zona estancada salga del recipiente, siendo reemplazado por líquido de la zona bien mezclada.

➤ Mezclado parcial

En este tipo de sistemas, el volumen efectivo de mezclado es menor que el volumen del líquido. Se le conoce también como mezclado con espacios muertos en las figuras 3 y 4 se representa este tipo de mezclado. Bajo condiciones de flujo continuo, se puede establecer la respuesta de un trazador inerte el cual no es alimentado en la corriente de entrada.



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS
DE 6° SEMESTRE



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|-----------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 46 de 173 |

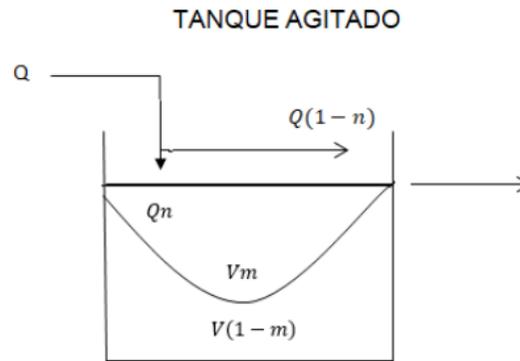


Figura 3. Mezclado parcial con corto circuito.

Donde:

m = Fracción de volumen del líquido bien mezclado

C = concentración del trazador a la salida del tanque, Kg/m^3

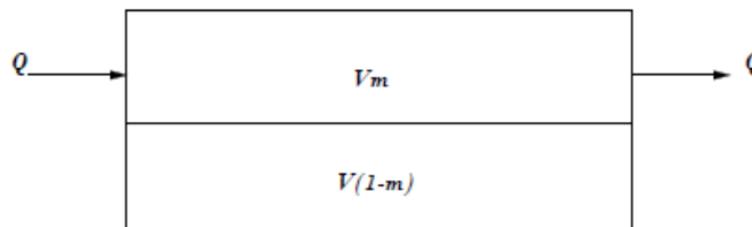


Figura 4. Mezclado parcial representación de cada zona.

Donde:

m = Fracción de volumen del líquido bien mezclado

C = concentración del trazador a la salida del tanque, Kg/m^3

Balace de masa del trazador.

$$-QCdt = Vm dC \quad (5)$$

La ecuación (6) se puede re arreglar en la forma siguiente:

$$\frac{dC}{C} = -\frac{Q}{Vm} dt \quad (6)$$



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS
DE 6º SEMESTRE



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|-----------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 47 de 173 |

C.I (condición inicial) a $t = 0$ $C' = C_0$

La integración de la ecuación (7) proporciona la respuesta del trazador a la salida del tanque:

$$C = C_0 \exp\left(-\frac{Q}{V_m} t\right) \quad (7)$$

➤ Mezclado parcial con corto circuito

Bajo esta situación, una fracción m del volumen del fluido se considera bien mezclada y una fracción n de la alimentación pasa a la zona de mezclado perfecto de acuerdo con la Figura 5. En la Figura 6 se presentan las zonas y flujos.

La respuesta de un trazador inerte para este sistema de mezclado se establece considerando lo siguiente:

C' = Concentración del trazador a la salida del tanque (antes del punto b), Kg/m^3

C = Concentración del trazador a la salida del sistema (después del punto b), Kg/m^3

C_0 = Concentración del trazador en la zona bien mezclada del tanque a tiempo inicial, Kg/m^3

Balance en la zona de mezclado perfecto:

$$-Q_n C' dt = V_m dC' \quad (8)$$

Balance en el punto b:

$$Q_n C' = Q C \quad (9)$$

La ecuación (10) se puede escribir como:

$$\frac{dC'}{C'} = -\frac{nQ}{mV} dt \quad (10)$$

C.I. (Condición inicial) a $t = 0$, $C' = C_0$



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS
DE 6° SEMESTRE



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|-----------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 48 de 173 |

La integración de la ecuación (11) proporciona la respuesta del trazador a la salida del tanque:

$$C' = C_0 \exp\left(-\frac{nQ}{mV}t\right) \quad (11)$$

Sustituyendo (12) en (13) se obtiene la respuesta del trazador a la salida del sistema:

$$C = C_0 \exp\left(-\frac{nQ}{mV}t\right) \quad (12)$$

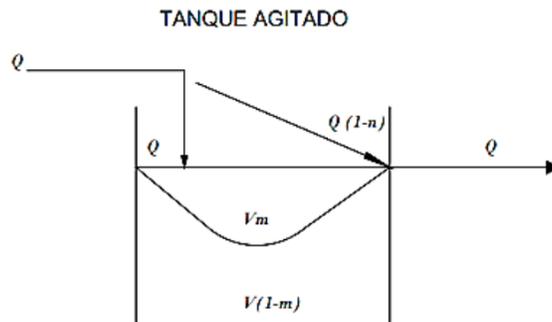


Figura 5. Mezclado parcial con cortocircuito

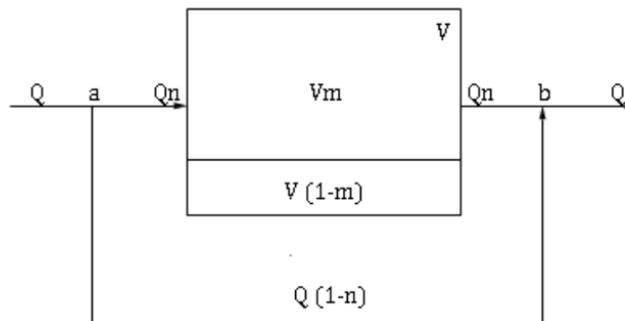


Figura 6. Mezclado parcial con cortocircuito representación de zonas y flujos.



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS
DE 6º SEMESTRE



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|-----------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 49 de 173 |

➤ Mezclado parcial con flujo pistón

En este sistema, la alimentación es introducida en la zona de mezclado perfecto, desplazándose un volumen igual hacia la zona estacionaria, el fluido desplazado de la zona estacionaria a su vez desplaza un volumen equivalente hacia la salida. La composición a la salida del sistema es aquella determinada por las propiedades del fluido en la zona estacionaria por lo menos durante un tiempo igual al necesario para desplazar a todo el fluido de esta zona. A partir de este momento, las propiedades del fluido a la salida del sistema estarán dadas por las del material que ha abandonado la zona de mezclado perfecto y ha atravesado la zona estacionaria por medio de un flujo de tipo pistón.

Para el caso del flujo pistón posterior a la zona de mezclado perfecto, es necesario puntualizar que, a partir del momento inicial, transcurre un cierto tiempo antes de que la concentración del trazador se modifique en la salida del sistema. Este es el tiempo necesario para desplazar el volumen del tanque agitado en el que se lleva a cabo el flujo pistón y es fácil demostrar que este tiempo es igual a $\frac{V(1-m)}{Q}$. En la figura 7 y 8 se presentan las características de este flujo.

Donde:

C' = Concentración del trazador a la salida de la zona de mezclado, Kg/m³

C = Concentración del trazador a la salida del sistema; Kg/m³

t_0 = El tiempo que tiene que transcurrir antes de que a la salida del sistema se detecte

la concentración del trazador a la salida de la zona de mezclado perfecto e igual a $\frac{v(1-m)}{Q}$, s.

Balance del trazador en la zona de mezclado perfecto:

$$-QC' dt = mVdC' \quad (\text{No se alimenta trazador}) \quad (13)$$



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS
DE 6º SEMESTRE



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|-----------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 50 de 173 |

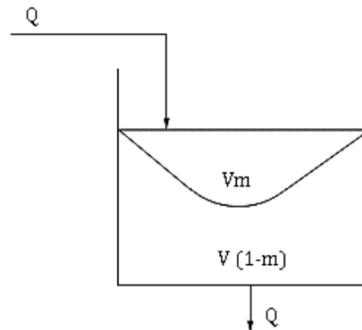


Figura 7. Mezclado parcial con flujo pistón.

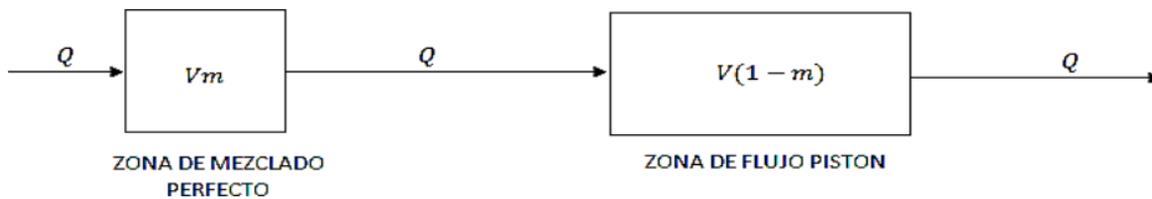


Figura 8. Mezclado parcial con flujo pistón representación de zonas y flujos.

La ecuación (13) tiene como solución:

$$C' = C_0 \exp\left(-\frac{Q}{V_m} t\right) \quad (14)$$

La concentración del trazador a la salida del sistema será igual a C' para tiempos iguales o mayores que $\frac{(1-m)V}{Q}$, entonces:

$$C = C_0 \exp\left[\left(-\frac{Q}{V_m}\right)\left(t - \frac{(1-m)V}{Q}\right)\right] \quad (15)$$



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS
DE 6º SEMESTRE



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|-----------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 51 de 173 |

3. MATERIALES Y EQUIPO

3.1. MATERIAL.

- 2 matraces aforados de 2 L
- 2 pisetas
- 1 probeta graduada de 250 ml
- 10 celdas cuadradas o celdas en forma de tubo para espectrofotómetro (celda negra cuadrada para calibración)
- 1 vaso de precipitado de 1000 ml
- 2 gradillas metálicas.
- 30 tubos de ensaye con capacidad de 10 ml
- 1 soporte Tripie
- 3 pinzas Hoffman (reguladoras)
- 3 pinzas Mohr
- 1 pipeta volumétrica de 1, 2, 3, 5, 10 ml
- 2 vidrios de reloj
- 2 espátulas
- 2 varillas de vidrio
- 2 propipetas 3 vías o 2 perillas de succión
- Agitador magnético

3.2. REACTIVOS.

- 51 g/l g de ácido pícrico por corrida

3.3. EQUIPO.

- 1 agitador cáframo completo, con soporte
- 1 propela tipo marino de 3 aspas
- 1 recipiente de mezclado de metal de acero inoxidable con capacidad de 2700 ml, con salida lateral e inferior
- espectrofotómetro de región visible
- 1 tanque de vidrio con sus especificaciones de 2 L
- balanza analítica
- Parrilla magnética



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS
DE 6° SEMESTRE



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|-----------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 52 de 173 |

3.4. HERRAMIENTAS.

- En esta actividad no se utilizan herramientas

3.5. MATERIAL BÁSICO.

- Etiquetas
- Agua del mismo tanque, potable
- Cronómetro

4. PROCEDIMIENTO

➤ Preparación de la disolución de ácido pícrico en agua (concentración 1 g/L)
Pesar 2g de ácido pícrico en la balanza analítica y disolverlo en un vaso de precipitados con agitador magnético, posteriormente llevarlo a un matraz aforado matraz volumétrico de 2 litros y homogeneizar, esperar unos 10 minutos a que el aire disuelto en la solución escape.

- Preparación de la curva estándar concentración-porciento de transmitancia (o absorbancia).

Preparar la serie de soluciones indicada en la Tabla 1, midiendo los volúmenes exactamente y teniendo cuidado de homogeneizar estas disoluciones. Leer el porcentaje de transmitancia (o absorbancia) de las soluciones en el colorímetro a 460 nanómetros (10-9 m) de longitud de onda. Usar como blanco la misma agua que se utiliza en el sistema. Construir una gráfica de porcentaje de transmitancia (o absorbancia) vs concentración.



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS
DE 6º SEMESTRE



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|-----------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 53 de 173 |

Tabla 1. Disoluciones empleadas para la construcción de la curva de calibración.

| Tubo de ensayo Nº | Vol. Agua ml | Vol. Disolución ml | Concentración g/l |
|----------------------|--------------|-----------------------|----------------------|
| 1 | 0 | 10 | |
| 2 | 1 | 9 | |
| 3 | 2 | 8 | |
| 4 | 3 | 7 | |
| 5 | 4 | 6 | |
| 6 | 5 | 5 | |
| 7 | 6 | 4 | |
| 8 | 7 | 3 | |
| 9 | 8 | 2 | |
| 10 | 9 | 1 | |

***NOTA 1.** El alumno deberá calcular el valor de la concentración.

➤ Operación del sistema.

Montar el equipo como se muestra en la Figura 9 y establecer el régimen permanente hidráulico abriendo simultáneamente la válvula reguladora de flujo y la válvula de salida del sistema (lateral o del fondo) utilizando agua. Colocar en el recipiente de mezclado la mitad de la solución de ácido pícrico sobrante. Tomar el flujo del rotámetro y proceder a tomar muestras del fluido a la salida del sistema (aproximadamente 10 ml cada 60 segundos). Las muestras se recogerán en las celdas previamente numeradas, se recomienda hacer cuando menos 20 tomas de muestra, Una vez terminada la corrida se procederá a medir el porcentaje de transmitancia o absorbancia, empleando como blanco el agua utilizada en el sistema.



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS
DE 6° SEMESTRE



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|-----------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 54 de 173 |

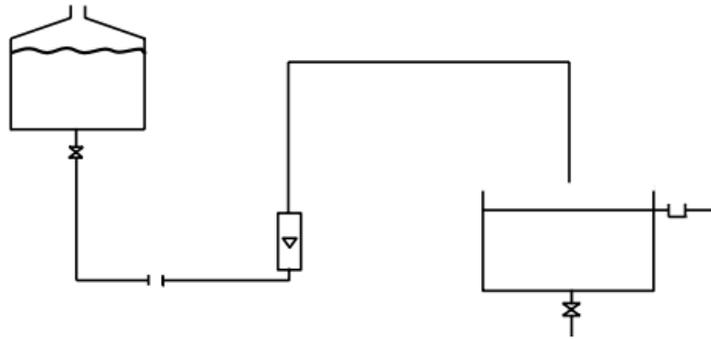


Figura 9. Diagrama de equipo para el estudio de diferentes tipos de mezclado.

5. TRATAMIENTO DE DATOS

➤ PRESENTACIÓN DE DATOS

Para cada una de las corridas los datos deben presentarse en la siguiente tabla:

| TIEMPO (s) | CONCENTRACIÓN (g/l) | ln(C/C ₀) |
|----------------|---------------------|-----------------------|
| 0 | C ₀ | 0 |
| t ₁ | C ₁ | |
| | | |

- Elaboración de datos

Hacer una gráfica de $\ln \frac{C}{C_0}$ contra t y analizar la validez de los siguientes modelos.

3. Mezclado perfecto.

$$\ln \frac{C}{C_0} = -\left(\frac{Q}{V}\right)t$$

Ordenada al origen = 0

$$\text{Pendiente} = -\left(\frac{Q}{V}\right)$$

4. Mezclado parcial.

$$\ln \frac{C}{C_0} = -\left(\frac{Q}{V_m}\right)t$$

Ordenada al origen = 0

$$\text{Pendiente} = -\left(\frac{Q}{V_m}\right)$$



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|-----------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 55 de 173 |

5. Cortocircuito.

$$\ln \frac{C}{C_0} = \ln(n) - \left(\frac{nQ}{V}\right)t$$

Ordenada al origen = $\ln(n)$

$$\text{Pendiente} = -nQ/V$$

6. Mezclado parcial con corto circuito

$$\ln \frac{C}{C_0} = \ln(n) - \left(\frac{nQ}{mV}\right)t$$

Ordenada al origen $\ln(n)$

$$\text{Pendiente} = -\left(\frac{nQ}{mV}\right)$$

7. Mezclado parcial con flujo pistón

$$\ln \frac{C}{C_0} = \frac{1-m}{m} - \left(\frac{Q}{Vm}\right)t$$

$$\text{ordenada al origen} = \frac{1-m}{m}$$

$$\text{Pendiente} = -\left(\frac{Q}{Vm}\right)$$

6. MANEJO DE RESIDUOS

Los residuos generados son identificados como residuos peligrosos de acuerdo con el procedimiento SGC-FESZ-PO06 Manejo de residuos generados en los laboratorios de docencia, basado en la NOM-052-SEMARNAT-2005 que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos.



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS



DE 6° SEMESTRE

| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|-----------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 56 de 173 |

7. BIBLIOGRAFÍA

1. Skoog, D. A. (2001) Análisis Instrumental. 5ta Edición, Editorial McGraw-Hill, México.
2. Mc. Cabe L. W., Smith J. (1978). Operaciones Básicas De Ingeniería Química. Ed. Reverté, España.
3. Pérez C., Galviz G. (1985). Análisis de flujos y factores que determinan los periodos de retención, Ed. Universidad del Valle, Colombia.
4. Perry H. Robert (1994). Manual del Ingeniero Químico tomo V, sexta edición, Ed. McGraw-Hill, México.



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|-----------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 57 de 173 |

L-4: ANÁLISIS DE UN SISTEMA DE SEDIMENTACIÓN

1. OBJETIVOS

- 1.1 Analizar el fenómeno de sedimentación en un sistema de partículas suspendidas.
- 1.2 Identificar las variables más importantes que afectan la velocidad de sedimentación.
- 1.3 Determinar la velocidad de sedimentación en un sistema de partículas suspendidas.

2. FUNDAMENTO TEÓRICO

La sedimentación es la remoción de partículas sólidas suspendidas de una suspensión mediante asentamiento por gravedad.

Una operación de sedimentación se puede dividir en dos partes, la primera de espesamiento y la segunda de clarificación.

El propósito del espesamiento es aumentar la concentración de un número relativamente grande de partículas sólidas suspendidas, mientras el objetivo de la clarificación es remover un número relativamente pequeño de partículas finas suspendidas y producir un líquido claro.

En el proceso de sedimentación de un sistema de partículas en suspensión intervienen varios factores los cuales son:

- La fuerza de empuje del medio fluido sobre la partícula
- La fuerza viscosa que se opone al movimiento de la partícula
- La fuerza de la gravedad
- La forma de la partícula
- El tamaño de la partícula
- La densidad de la partícula
- La densidad del medio fluido

En un sistema de partículas en sedimentación, pueden formarse las siguientes regiones:

- Una región en partículas sedimentadas las cuales se depositan en el fondo del recipiente en el cual se lleva a cabo el proceso.



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|-----------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 58 de 173 |

- Una región difusa que consiste en partículas de tamaño tal que sedimentarán conforme pasa el tiempo y de partículas de tamaño tal que permanecerá en suspensión por mucho más tiempo que el necesario para la sedimentación.
- Una región clara o de fluido clarificado con partículas muy pequeñas en suspensión.

En algunos sistemas, las regiones están nítidamente separadas y es posible observar la velocidad a la que cada región se va formando o desapareciendo. En otros casos, entre una región y otra no existe una delimitación clara que permita medir con precisión la velocidad de crecimiento de cada región.

Para fines de proceso, la variable más importante de un sedimentador es la velocidad a la que las partículas más pesadas se depositan en el fondo del equipo.

La velocidad de sedimentación puede establecerse en términos de las siguientes variables:

W= Masa de las partículas que se sedimentan, g

t=Tiempo en el cual ocurre la sedimentación, s.

$\frac{dW}{dt}$ = Velocidad de sedimentación

C= Concentración, ($\frac{\text{masa}}{\text{unidad}}$ de volumen) de partículas en la fase sedimentada, g/cm³

$\frac{dC}{dt}$ =Velocidad de sedimentación

h= Altura de la fase sedimentada, cm

$\frac{dh}{dt}$ = Velocidad de sedimentación



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|-----------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 59 de 173 |

3. MATERIALES Y EQUIPO.

3.1. MATERIALES.

- 4 conos Imhoff para sedimentación con soporte
- 4 probetas de 1L
- 4 vasos metálicos de 1L
- 4 agitadores de vidrio con gendarme
- 4 espátulas con mango de madera chicas
- 4 vidrios de reloj de 10cm de diámetro
- 4 cronómetros
- 1 calibrador (Vernier)
- 1 lámpara

3.2. REACTIVOS

- 50 g de Fluoruro de calcio (fluorita)
- 50 g de sulfato de bario (barita)
- Ladrillita

3.3. EQUIPO

- 1 balanza granataria
- 1 estufa
- Tamizador y mallas Tyler de (el profesor definirá la malla)
- Base y tapa para tamizador
- Lámpara

NOTA: Tamizar y secar la ladrillita contenida en los conos, no se puede verter a la tarja. La fluorita y la barita se dejan en residuos debidamente etiquetados.

3.4. HERRAMIENTAS.

- Llaves para tamizador

3.5. MATERIAL BÁSICO

- Etiquetas
- Regla de 30cm
- Cronómetro (reloj de mano o celular)
- Papel filtro



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|-----------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 60 de 173 |

4. PROCEDIMIENTO

- Análisis cualitativo del proceso de sedimentación

Observación del sistema fluorita-agua

Preparar una suspensión de 25g/l de fluorita en agua. Agitar vigorosamente con la varilla de vidrio durante 5 minutos por lo menos. Sin dejar de agitar, vaciar la suspensión a uno de los conos firmemente sujeto e inmóvil y empezar a medir el tiempo con un cronómetro.

Observar cuidadosamente el fenómeno tomando nota de la apariencia de la suspensión cada 2 minutos, durante los primeros 10 minutos y después de cada 5 minutos. Para observar mejor el fenómeno, se usará el foco encendido colocándolo a la distancia que considere conveniente, y con la ayuda de la lupa se podrá estudiar mejor lo que ocurre. Ambos dispositivos se usarán en todas las corridas, tanto en análisis cualitativo como en el cuantitativo.

Observación del sistema Barita-Agua

Proceder de manera análoga al sistema de Barita-agua

Observación del sistema Ladrillita-Agua

Proceder de manera análoga al sistema ladrillita-agua

- Análisis cuantitativo del proceso de sedimentación

Determinación de la velocidad de sedimentación de los siguientes sistemas de Ladrillita-Agua

La velocidad de sedimentación se determina para los cuatro diferentes tamaños de partícula, elegidos por el profesor.

El procedimiento es el mismo en los cuatro casos.

Antes de proceder a hacer la medición en cada sistema se recomienda hacer una corrida en la que se medirá el tiempo en el que sedimenta la mayor parte de las partículas, para poder seleccionar así el intervalo de tiempo más adecuado para la medición en cada caso. La suspensión se preparará siguiendo el procedimiento descrito en 4. Una vez que se ha vaciado la suspensión en el cono, se miden las siguientes variables:

- Tiempo en el cronómetro



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|-----------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 61 de 173 |

- Altura del sedimentado desde la punta del cono hasta la medida horizontal de la interfase sedimentada y la fase difusa
- A tiempo inicial, la altura total de la suspensión en el cono

Los intervalos de medición serán de acuerdo con lo determinado en la corrida de prueba.

Se recomienda proceder de la siguiente manera:

- Tamaño de partícula fino, medir tiempo cada 10 segundos
- Tamaño de partícula intermedio, medir tiempo cada 15 segundos
- Tamaño de partícula grueso, medir tiempo cada 30 segundos

5. TRATAMIENTO DE DATOS

➤ PRESENTACIÓN DE DATOS

Los datos obtenidos de análisis cuantitativo de cada sistema ladrillita-agua deberán graficarse en forma siguiente:

- Altura del sedimentado h contra tiempo t
- $\frac{dh}{dt}$ contra t
- $\frac{dh}{dt}$ contra h
- Gráfica de velocidad de sedimentación.

La relación entre la altura del sedimentado y el volumen de este se establece mediante la siguiente ecuación (volumen de un cilindro):

Volumen:

$$V = \frac{1}{3} \pi r^2 h \quad (1)$$

Donde:

r = Radio del cono, cm

h = Altura del cono, cm

La relación $\frac{r}{h} = k$ es una constante que puede determinarse de las dimensiones del cono de sedimentación.

Luego

$$r = kh \quad (2)$$



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|-----------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 62 de 173 |

Finalmente

$$V = \frac{1}{3} \pi k^2 h^3 \quad (3)$$

De donde

$$h = \left(\frac{3V}{\pi k^2} \right)^{1/3} \quad (4)$$

6. MANEJO DE RESIDUOS

Los residuos generados son identificados como residuos peligrosos de acuerdo con el procedimiento SGC-FESZ-PO06 Manejo de residuos generados en los laboratorios de docencia, basado en la NOM-052-SEMARNAT-2005 que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos.

No desechar los sólidos a la tarja, revisar con ayuda del profesor de qué manera se pueden recuperar.

7. BIBLIOGRAFÍA

1. MccACBEL.wARREN. (2007) *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química*. McGraw-Hill. 7ª Edición, D.F.México
2. Quintana-Puchol, R (2004) *Procesos de separación sólido-líquido*. Monografía, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Santa Clara.Editorial Feijoo.53 pp.
3. Barskii, L.A, et al. (1978) *sistemas de análisis del enriquecimiento de minerales*. Ed. Nedra, Moscú, 486 pp.
4. Mirza, S., et al. (1979), *Sedimentation of suspensions of particle of two or more sizes*. Chem. Engng. Sci. 34 pp. 447
5. Foust, S. A., Clump, W. C., Wenzel, A. L., Maus, L. Y Andersen, L. B. (1980) *Principio de operaciones unitarias*. México, Compañía Editorial Continental.



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|-----------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 63 de 173 |

L-5: ANÁLISIS DE LA DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE PARTÍCULAS EN UN SISTEMA SÓLIDO

1. OBJETIVO

- 1.1 Analizar las variables que afectan el movimiento de partículas sólidas en un fluido.
- 1.2 Determinar la distribución de tamaño de partículas en un sistema sólido, experimentalmente.

2. FUNDAMENTO TEORICO

De acuerdo con la ley de Stokes, una partícula esférica se mueve en un medio fluido con velocidad límite constante dada por:

$$u = \frac{2(\rho_p - \rho_F)g r^2}{9\mu} \quad (1)$$

En donde:

u = Velocidad límite, cm/s

ρ_p = Densidad de la partícula, g/cm^3

ρ_F = Densidad del fluido, g/cm^3

g = Aceleración gravitacional, $9.81 cm/s^2$

r = Radio de la partícula, cm

μ = Viscosidad del fluido, $\frac{g}{cm * s}$

En términos del diámetro de la partícula (d_p), la ecuación de Stokes queda como:

$$u = \frac{1}{18} \frac{(\rho_p - \rho_F)g d_p^2}{\mu} \quad (2)$$

Dado que el movimiento de las partículas, en condiciones de velocidad límite, es rectilíneouniforme esta correrá distancias iguales en tiempos iguales.

Sea el tiempo que tarda tal partícula en recorrer una distancia L , entonces:

$$u = \frac{L}{D} = \frac{1}{18} \frac{(\rho_p - \rho_F)g d_p^2}{\mu} \quad (3)$$

Supóngase ahora que se tiene un sistema de partículas cuya velocidad límite en un fluido es u , suspendidas homogéneamente en un fluido de volumen V dado por:

$$V = AL \quad (4)$$



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|-----------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 64 de 173 |

Donde:

A = Área de la sección transversal

L = Longitud del volumen V

Supóngase también que, a tiempo cero, las partículas inicialmente suspendidas en el fluido empieza a depositarse en el fondo del volumen V a velocidad constante u , a lo largo de L , (Ver figura 1).

Si la concentración de las partículas en el fluido es C (g/cm^3) la velocidad de deposición en el fondo del volumen V está dada por:

$$G = uC \quad 0 \leq t \leq \theta \quad (5)$$

Donde:

G = Masa velocidad de deposición ($g/cm^2 \cdot seg$)

Una vez transcurrido el tiempo t , todas las partículas se han depositado y la masa total m de las partículas colectadas es, entonces.

$$m = AG = AuC \quad (6)$$

Como $u = \frac{L}{\theta}$, entonces:

$$m = ALC \quad (7)$$

Donde, la concentración inicial de las partículas colectadas es:

$$C = \left(\frac{m}{AL} \right) = \frac{m}{V} \quad (8)$$

Masa de partículas colectadas, m_c (Figura 1).

(a) $m_c = 0$

(b) $m_c = \frac{m}{2}$

(c) $m_c = m$

| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|-----------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 65 de 173 |

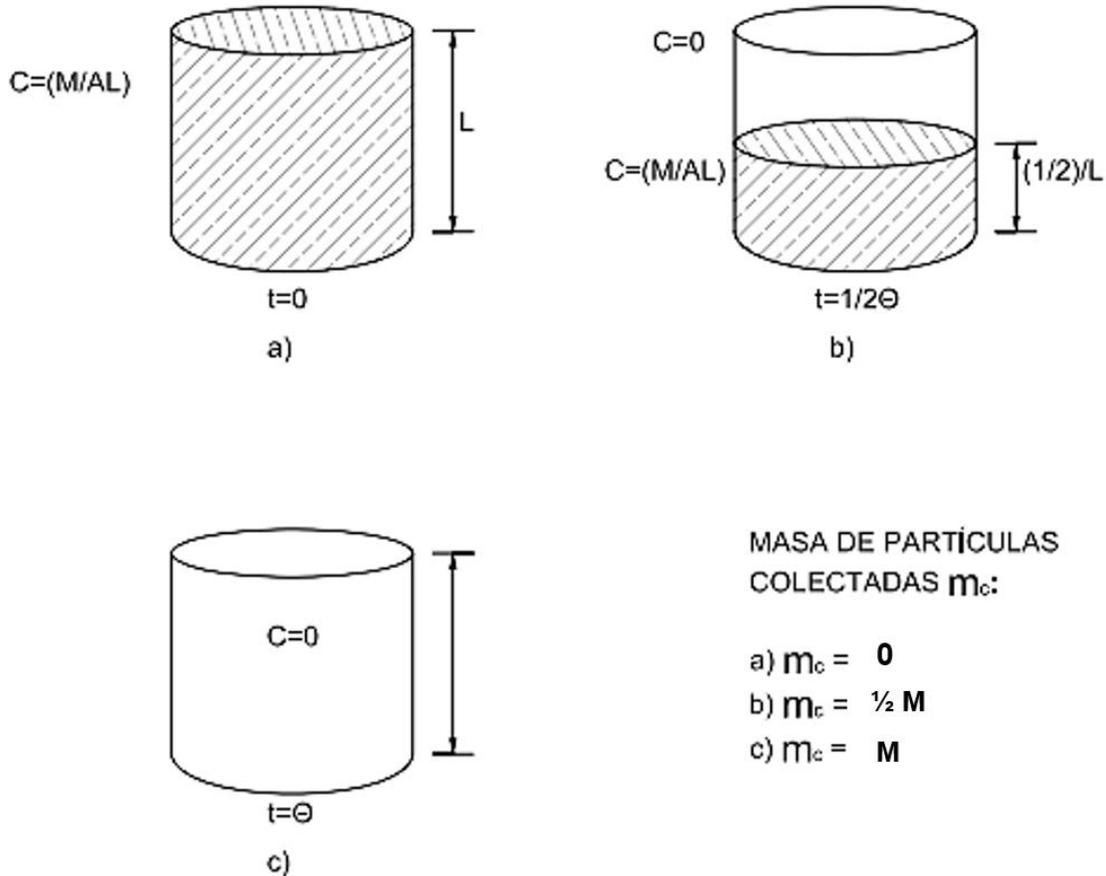


Figura 1. Deposición de partículas a velocidad constante u .

Es importante señalar que las partículas se depositan a velocidad constante G , durante el intervalo de tiempo $0 \leq t \leq \theta$, y para t , ya no se depositan más partículas porque todas ya alcanzaron el fondo del volumen V .

Ahora, si el sistema está compuesto por dos fracciones de partículas en tiempos θ_1 y θ_2 , las cuales tardan θ_1 y θ_2 , en recorrer la distancia L a las velocidades L/θ_1 y L/θ_2 , la velocidad de deposición estará dada por:

$$G = u_1 C_1 + u_2 C_2 \quad 0 \leq t \leq \theta \quad (9)$$

$$G = u_2 C_2 \quad \theta_1 \leq t \leq \theta_2 \quad (10)$$

En general, si el sistema está compuesto de n fracciones de partículas f_1, f_2, \dots, f_n las cuales tardan $\theta_1, \theta_2 \dots \theta_n$ en recorrer la distancia las velocidades u_1, u_2, \dots, u_n , la velocidad de deposición es entonces:



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|-----------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 66 de 173 |

$$G = u_1 C_1 + u_2 C_2 + \dots + U_n C_n \quad 0 \leq t \leq \theta_1 \quad (11)$$

$$G = u_2 C_2 + \dots + U_n C_n \quad \theta_1 \leq t \leq \theta_2 \quad (12)$$

$$G = u_3 C_3 + \dots + U_n C_n \quad \theta_2 \leq t \leq \theta_3 \quad (13)$$

$$G = u_i C_i + \dots + U_n C_n \quad \theta_{k-1} \leq t \leq \theta_k \quad (14)$$

$$G = u_n C_n \quad \theta_{n-1} \leq t \leq \theta_n \quad (15)$$

Ahora, como:

$$U_k = \frac{L}{\theta_k} \quad (16)$$

$$C = (\text{masa de } f_k / \text{vol. del sistema}) = \frac{M f_k}{AL} \quad (17)$$

M = masa total del sistema, g

C_k = Concentración de partículas con diametro d_k , g/L

f_k = Fracción, k

A = Área de sección transversal, cm^2

L = Distancia total, cm

Entonces:

$$G = \sum_{i=k}^n u_i C_i = \sum_{i=k}^n \left[\left(\frac{L}{\theta_i} \right) \left(\frac{M f_i}{AL} \right) \right] \quad \theta_{k-1} \leq t \leq \theta_k \quad (18)$$

$$G = \frac{M}{A} \sum_{i=k}^n \left[\left(\frac{f_i}{\theta_i} \right) \right] \quad \theta_{k-1} \leq t \leq \theta_k \quad (19)$$

La masa de partículas colectadas entre $\theta_{k-1} \leq t \leq \theta_k$ en el área A es:

$$m_k = (\theta_k - \theta_{k-1}) AG = (\theta_k - \theta_{k-1}) M \sum_{i=k}^n \left(\frac{f_i}{\theta_i} \right) \quad \theta_{k-1} \leq t \leq \theta_k \quad (20)$$

y la masa colectada en el intervalo $\theta_n \leq t \leq \theta_{n-1}$ en el área A es:

$$m_n = (\theta_n - \theta_{n-1}) m \left(\frac{f_n}{\theta_n} \right) \quad (21)$$

Donde:

$$f_n = \left(\frac{\theta_n}{\theta_n - \theta_{n-1}} \right) \left(\frac{m_n}{m} \right) \quad (22)$$



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|-----------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 67 de 173 |

Para, $\theta_{n-1} \leq t \leq \theta_{n-2}$ la masa depositada de las partículas m_{n-1} , en el área A es:

$$m_{n-1} = (\theta_{n-1} - \theta_{n-2}) m \left(\frac{f_n}{\theta_n} + \frac{f_{n-1}}{\theta_{n-1}} \right) \quad (23)$$

Y se tiene :

$$f_{n-1} = (m_{n-1}/m) \left(\frac{\theta_{n-1}}{\theta_{n-1} - \theta_{n-2}} \right) - \theta_{n-1} \left(\frac{f_n}{\theta_n} \right) \quad (24)$$

$$f_K = (m_K/m) \left(\frac{\theta_K}{\theta_K - \theta_{K-1}} \right) - \theta_K \sum_{i=K+1}^n \left(\frac{f_i}{\theta_i} \right) \quad (25)$$

$$f_1 = (m_1/m) \left[\frac{\theta_1}{\theta_1 - \theta} \right] - \theta_1 \left(\frac{f_2}{\theta_2} + \frac{f_3}{\theta_3} + \dots + \frac{f_n}{\theta_n} \right) \quad (26)$$

La aplicación de la ecuación (26) desde n hasta 1, permite conocer las fracciones $f_1 \dots f_n \dots$ si se conocen: m, m_1, m_2, \dots, m_n y $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$.

Considérese ahora el sistema de partículas con fracciones f_1, f_2, \dots, f_n en donde todas las partículas están colocadas a una distancia L del fondo del Volumen V y a tiempo cero empiezan a desplazarse hacia el fondo con velocidades $u_1, u_2 \dots u_n$.

Entonces:

$$\begin{aligned} &(\text{Variación de } f_i \text{ en el tiempo}) = (\text{forma que varia } f_i \text{ a lo largo del volumen}) \\ &(\text{velocidad de pasaje de } f_i \text{ lo largo del volumen}) \end{aligned}$$

Esto es :

$$\frac{df_i}{dt} = \left(\frac{df_i}{dx} \right) \left(\frac{dx}{dt} \right) \quad (27)$$

Sustituyendo la ecuación (2) en (26) se tiene:

$$f_1 = \left(\frac{\theta_1}{\theta_1 - \theta} \right) \left(\frac{m_1}{M} \right) - \theta_1 \left(\frac{f_2}{\theta_2} \right) - \theta_2 \left(\frac{f_3}{\theta_3} \right) - \theta_3 \left(\frac{f_4}{\theta_4} \right) - \theta_4 \left(\frac{f_5}{\theta_5} \right) - \theta_5 \left(\frac{f_6}{\theta_6} \right) - \theta_6 \left(\frac{f_6}{\theta_6} \right) - \theta_7 \left(\frac{f_7}{\theta_7} \right) \quad (28)$$



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|-----------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 68 de 173 |

3. MATERIALES Y EQUIPO

3.1. MATERIALES.

- 2 matraces de 250 ml.
- 1 matraz de 600 ml.
- 1 matraz Erlenmeyer de 2000 ml.
- 1 probeta de 100 ml.
- 1 espátula mediana.
- 1 pipeta de 5 ml.
- 10 tubos de ensayo.
- 1 espátula chica.
- 1 vidrio de reloj.
- 1 piseta.
- 1 embudo de vidrio de tallo largo.
- pinzas de Mohr.

3.2. REACTIVOS

- Ladrillita

NOTA: Tamizar ladrillita en caso de que no esté tamizada, el tamaño de partícula la definirá el profesor.

3.3. HERRAMIENTAS

- Llaves para el tamiz

3.4. EQUIPO

- Tamiz y mallas Tyler (copiar la de L3)
- 1 gradilla

3.5. SERVICIOS

- Electricidad

3.6. MATERIAL BÁSICO

- Papel Filtro (especificar el tamaño del poro).
- Cronómetro (reloj de mano o celular).

| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|-----------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 69 de 173 |

4. PROCEDIMIENTO

➤ PROCEDIMIENTO A

1. Medir la densidad de las partículas pesando 20 g. de las mismas e introduciendo las en una probeta de 100 ml. Que contenga 50 ml de agua destilada. Una vez que todas las partículas han sedimentado, medir el aumento de volumen en la probeta, y a partir de esto determinar la densidad.
2. Preparar una suspensión de partículas de 20 g. En 100 ml de agua destilada en un vaso de precipitado y agitar vigorosamente.
3. Montar el aparato que se muestra en la Figura 2, llenándola con agua destilada hasta la altura H
4. Con ayuda de un embudo, adicionar la suspensión de partículas a la columna hasta una altura $H + L$ y empezar a registrar el tiempo.
5. Observar en qué momento se depositan las primeras partículas en el fondo y empezar a tomar muestras de aproximadamente 5 ml y registrar el tiempo.
6. Se recomiendan los siguientes tiempos de muestreo: Tiempo después de que se depositan las primeras partículas: $\frac{1}{2}$, 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, minutos.

➤ PROCEDIMIENTO B

1. Montar el aparato anteriormente descrito, pero ahora llenándolo con agua destilada casi hasta el borde de la columna.
2. Pesar una muestra del sistema de partículas de aproximadamente 10 g.
3. Con cuidado depositar la muestra de partículas sobre la superficie del fluido en lo alto de la columna, para que a partir de ahí empiece a caer hacia el fondo.
4. Una vez que visualmente se detecta que las partículas llegan al fondo de la columna, empezar a tomar muestras de aproximadamente 5 ml. En los tiempos recomendados anteriormente. Tratar las muestras como se describió antes.

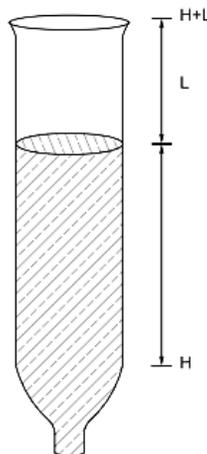


Figura 2. Torre de fraccionamiento



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|-----------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 70 de 173 |

5. TRATAMIENTO DE DATOS

Datos recolectados de acuerdo con el procedimiento A.

Tabla 1. Preparar la siguiente tabla para la presentación de datos.

| t_i | θ_i | $u = (L/\theta)$ | Masa de la muestra | f_i | Σf_i | d_i (ecuación de Stokes) |
|-------|------------|------------------|--------------------|-------|--------------|----------------------------|
| 0 | 0 | ----- | 0.0 | 0 | 0 | 0 |
| t_1 | θ_1 | u_1 | m_1 | f_1 | f_1 | d_1 |
| -- | -- | ----- | ----- | -- | ---- | ----- |
| t_n | θ_1 | u_n | u_n | f_n | 1.00 | d_n |

En donde:

$$\theta_i = \left(\frac{L}{L + H} \right) t_i$$

$$m = m_1 + m_2 + m_3 + \dots + m_n$$

$f_1, f_2, f_3, \dots, f_n$ Calculadas con las ecuaciones 22 a 25 es un error calcular f_i como m_1/m .

Tabla 2. Datos colectados de acuerdo con el procedimiento B. Preparar la siguiente tabla para la presentación de datos.

| MASA DE LA MUESTRA | f_i | t_i | df_i/dt | df_i/dx | d_i |
|--------------------|-------|-------|-----------|-----------|-------|
| m_1 | f_1 | t_1 | | | d_1 |
| ----- | --- | --- | | | --- |
| m_n | f_n | t_n | | | d_n |

En donde:

$$m = m_1 + m_2 + m_3 + \dots + m_n$$

$$f_i = \frac{m_i}{m}$$

Además, graficar f_i contra θ_i y de las gráficas calcular por aproximación numérica

$$\frac{df_i}{dt} \text{ y } \frac{fd_i}{dx} \text{ y } fd_i/dx = f_i/L$$

Y de la ecuación (28) estimar el diámetro de las partículas correspondientes a cada fracción f_i .



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|-----------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 71 de 173 |

Para los datos colectados de acuerdo con el procedimiento A construir las gráficas de:

$$f_i \text{ vs } \theta_i, \sum f_i \text{ vs } \theta_i, f_i \text{ vs } d_{pi}, \text{ y } \sum f_i \text{ vs } d_{pi}$$

Para los datos colectados de acuerdo con el procedimiento B construir las gráficas de:

$$f_i \text{ vs } \theta_i, \sum f_i \text{ vs } \theta_i, f_i \text{ vs } d_{pi}, \text{ y } \sum f_i \text{ vs } d_{pi}$$

Discutir los resultados obtenidos por ambos métodos.

6. MANEJO DE DATOS

No desechar los sólidos a la tarja, revisar con ayuda del profesor de qué manera se pueden recuperar.

7. BIBLIOGRAFIA

1. McCabe L.Warren. (2007) *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química*. McGraw-Hill. 7ª Edición, D.F. México.
2. Quintana-Puchol, R. (2004) *Procesos de separación sólido-líquido. Monografía*, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Santa Clara. Editorial Feijoo. 53pp.
3. Barskii, L.A., *et al* (1978) *Sistemas de análisis del enriquecimiento de minerales*. Ed. Nedra, Moscú, 486 pp.
4. Mirza, S., *et al*. (1979) *Sedimentation of suspensions of particle of two or more sizes*. *Chem. Engng. Sci.* 34 pp. 447.
5. Foust, S. A., Clump, W. C., Wenzel, A. L., Maus, L. Y Andersen, L. B. (1980) *Principio de operaciones unitarias*. México, Compañía Editorial



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|-----------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 72 de 173 |

P-1:ANÁLISIS Y DETERMINACIÓN DE LAS CURVAS CARACTERÍSTICAS DE BOMBAS

1. OBJETIVOS

- 1.1. Identificar los distintos tipos de bombas que hay en planta piloto
- 1.2. Obtener las curvas características de una bomba centrífuga
- 1.3. Obtener las curvas características de un arreglo en serie y un arreglo en paralelo de dos bombas centrífugas

2. FUNDAMENTO TEORICO

En las plantas químicas, por las necesidades de los procesos que se llevan a cabo en ellas, frecuentemente se requiere del transporte de diversos materiales “como los fluidos”, a distintos lugares y en gran variedad de tipos de flujos, por lo que es necesario utilizar ciertos dispositivos que proporcionen la energía necesaria para transportar a los diversos materiales. Para los líquidos se usan las bombas, para los gases los compresores, ventiladores y sopladores y para los sólidos los transportadores mecánicos. Los fluidos líquidos y gases se transportan a través de tuberías y accesorios de control y cambio de dirección. Todo equipo que mueve a un fluido agrega energía a éste. El incremento de energía se usa para: aumentar la presión a un recipiente, aumentar su velocidad o para llevar el fluido de una altura a otra mayor.

Al seleccionar una bomba para un trabajo o fin específico, el ingeniero debe tomar en cuenta algunos factores, como los que se enumeran a continuación:

1. Naturaleza del fluido a transportar, por ejemplo: corrosividad, incrustación, toxicidad, temperatura, punto de inflamación, presión de vapor, viscosidad, densidad (ρ) o gravedad específica (γ o Sp. Gr.), sólidos en suspensión, etc.
2. Rango de capacidad o caudal del equipo y capacidad requerida de la bomba en la descarga.
3. Condiciones de potencia o cabeza en la succión y en la descarga.
4. Tipo de servicio: continuo o intermitente.
5. Lugar de operación de la bomba: espacio disponible, espacio requerido, a prueba de agua y humedad.
6. Diseño.



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|-----------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 73 de 173 |

➤ Clasificación de las bombas

Las bombas, en general, pueden clasificarse en dos grupos principales: de desplazamiento positivo (Tabla 1) y centrífugo (Tabla 2) y estos a su vez en varios subgrupos, como se muestra en las tablas siguientes:

Tabla 1. Bombas de Desplazamiento Positivo

| | | |
|-------------------------|------------------------|--------------------|
| Desplazamiento positivo | Reciprocantes | Pistón |
| | | Émbolo |
| | | Diafragma |
| | Rotatorias, deposición | Engranajes |
| | | Tornillos |
| | | Lóbulos |
| | Diseño especial | Pistón con volumen |
| | | Variable |

Tabla 2. Bombas Centrífugas

| | | |
|-------------|-----------------------------|-----------------|
| Centrífugas | Diseño interno del impulsor | Voluta difusora |
| | | Turbina |
| | | Propela |
| | Posición | Eje vertical |
| | | Eje horizontal |
| | Posición de succión | Superior |
| | | Inferior |
| | Tipo de impulsor | Abierto |
| | | Semiabierto |
| | | Cerrado |
| | Dirección de la carga | Radial |
| | | Axial |
| | Acoplamiento con el motor | Flecha |
| | | Banda |
| | | Cadena |



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|-----------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 74 de 173 |

➤ Bombas de desplazamiento positivo

Reciprocantes

Este tipo de bomba agrega energía, a un volumen definido de fluido, por medio de un pistón, émbolo o diafragma. Los principios de la dinámica de los fluidos son de poca importancia, ya que el flujo del fluido se determina por la geometría de la bomba. Por cada golpe del elemento desplazante, una cantidad definida de fluido se descarga desde la bomba y la cantidad depende solamente del volumen de la cámara que contenga al elemento desplazante y al número de veces que se desplace a través de la cámara. La descarga del líquido es pulsante y puede ser disminuida utilizando un amortiguador de pulsaciones.

Rotatorias

Este tipo de bomba puede caracterizarse por el método de admitir y descargar el fluido. A diferencia de las bombas reciprocantes, las cuales dependen de válvulas de retención para el control de entrada y descarga, la bomba rotatoria atrapa una cantidad de líquido y lo mueve hasta el punto de descarga. Las bombas rotatorias pueden manejar casi cualquier líquido libre de abrasivos y son especialmente adecuadas para fluidos de alta viscosidad. Estos dispositivos descargan a capacidad casi constante contra todas las presiones, dentro del límite de diseño de la bomba. El flujo de descarga varía directamente con la velocidad del dispositivo mecánico que se encuentra dentro de este tipo de bomba. La descarga es libre de pulsaciones, particularmente en el caso de la de engranes.

Bombas centrífugas

Las bombas centrífugas son ampliamente usadas en la industria de proceso, debido a la simplicidad de su diseño, bajo costo inicial, así como de mantenimiento y flexibilidad de aplicación. En una bomba centrífuga el líquido penetra a través de una unión de succión, concéntrica con el eje que es de una pieza y gira a gran velocidad, llamada impulsor o rodete. El rodete está provisto de álabes radiales que son solidarios con el mismo impulsor. El líquido circula hacia afuera por los espacios que existen entre los álabes y abandona al impulsor con una velocidad mucho mayor que la de entrada al mismo. El líquido que sale periféricamente del impulsor se recoge en una carcasa en espiral, llamada voluta y sale de la bomba a través de una conducción tangencial de descarga. En la voluta, la carga de velocidad del líquido



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|-----------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 75 de 173 |

procedente del impulsor se convierte en carga de presión. El fluido recibe energía del impulsor, que a su vez se transmite al mismo mediante el par de un eje rotatorio, generalmente es accionado mediante una conexión directa a un motor de velocidad constante.

Existen muchos otros tipos de diseños de bombas, además de la sencilla máquina de voluta. Un tipo muy común emplea un rodete de doble succión, que toma el líquido por ambos lados del rodete. Por otra parte, el impulsor puede ser abierto, cerrado o reforzado. En los manuales y libros sobre bombas centrífugas y especialmente en los catálogos de las casas constructoras se encuentran diversos tipos, tamaños y diseños.

➤ Características de una bomba

Para seleccionar una bomba se necesita conocer las características de ésta, como son:

Capacidad

Se define la capacidad de una bomba como la cantidad de fluido manejado por unidad de tiempo.

La capacidad de la bomba se debe identificar, con la temperatura de operación para determinar la potencia y los efectos de viscosidad.

Presión

En los problemas de bombas, generalmente se consideran tres tipos de presión: absoluta, manométrica y de columna. Se usa un cuarto término, vacío, cuando se opera debajo de la presión atmosférica, pero no es un término de presión positiva, en el mismo sentido como en los tres primeros términos.

Presión o cabezal total

En la presión disponible de descarga de una bomba como cambio de energía mecánicamente entrada a energía cinética y potencial. Esto representa la energía total dada al líquido por la bomba. Se expresa en el sistema inglés como TH y FPSH en pies de líquido bombeado a una presión dada en HP. La presión o cabeza producida por una bomba es independiente del fluido que esté bombeando y es por lo tanto la misma que para cualquier fluido que se bombee a una velocidad de rotación y caudal o capacidad dada.

La cabeza total desarrollada por la bomba se compone de la diferencia entre la cabeza estática, la cabeza de presión y la cabeza de velocidad más las pérdidas

| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|-----------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 76 de 173 |

de cabeza por fricción: a la entrada y salida, para la succión y descarga de una bomba, ver las Figuras 1 y 2. En la Figura 1, se muestra la ecuación(1).

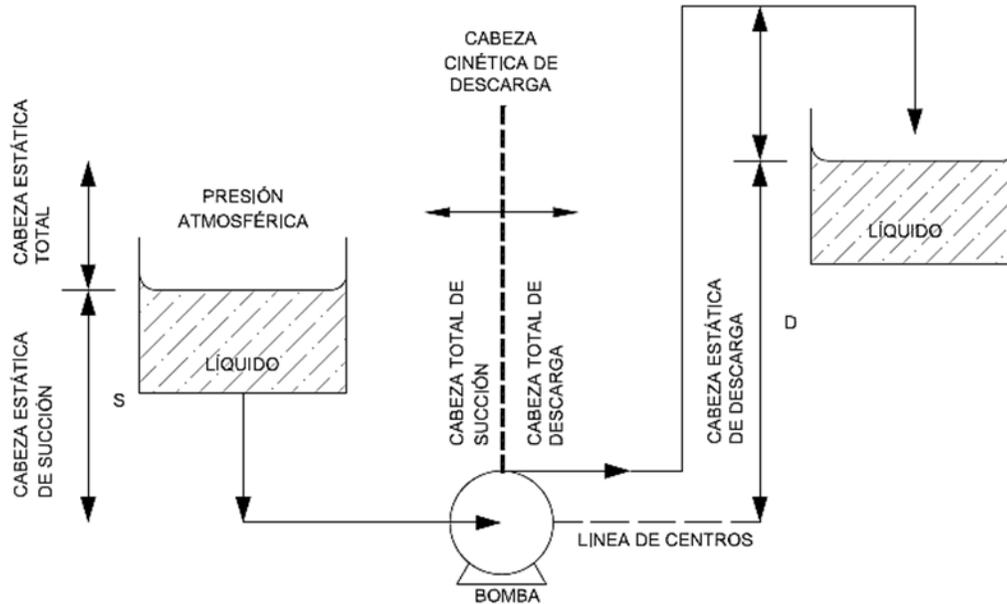


Figura 1. Sistema característico de una bomba.

$$H = h_D - h_s = \frac{P_D - P_s}{\rho} \quad (1)$$

Donde:

$H =$ Cabeza total, m

$h_D =$ Cabeza de descarga, m, h_s : Cabeza de succión, m

$P_D =$ Presión de escarga, m, donde $\frac{P}{\gamma}$

$P_s =$ presión de succión, m, donde $\frac{P}{\gamma}$

$\gamma =$ Peso específico, $\frac{Kg}{(s^2 * m^2)} = \rho * g$

$\rho =$ Densidad del fluido $\frac{Kg}{(m^3)}$

| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|-----------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 77 de 173 |

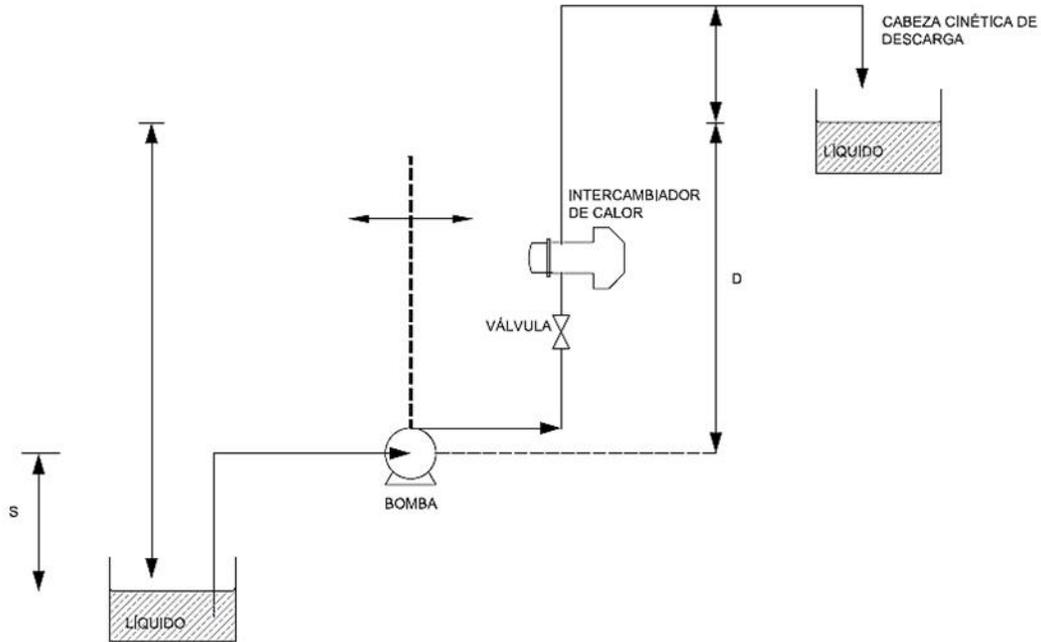


Figura 2. Sistema característico de presión de una bomba entre tanques, con un intercambiador de calor.

Cabeza de succión

Es la diferencia de elevación entre el líquido en el lado de la succión y la línea de centros de la bomba (más la cabeza de velocidad). Note que la cabeza de succión es positiva cuando el líquido se encuentra arriba de la línea de centros y decrece cuando se incrementan las pérdidas por fricción en la tubería de succión, ver Figura 3.

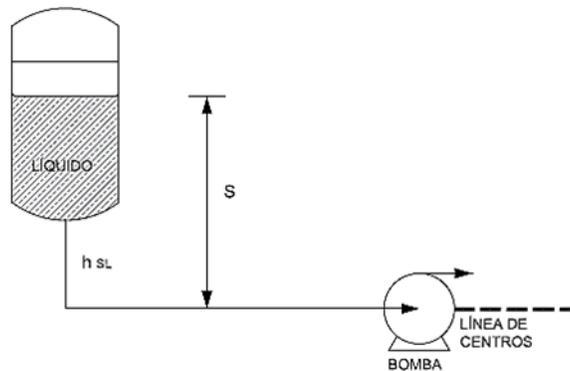


Figura 3. Sistema característico de carga de una bomba en la presión de succión (ecuación 2.)

| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|-----------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 78 de 173 |

$$h_S = S - h_{SL} + P \quad (2)$$

Donde:

h_S = Cabeza de succión, m

S = Elevación de líquido sobre la línea de centros, m

h_{SL} = Pérdidas por succión en la tubería de succión, m

P = presión del recipiente, m, donde P/γ

γ = Peso específico, = $\text{kg}/(\text{s}^2 * \text{m}^2) = \rho * g$

La cabeza de succión es negativa cuando el nivel del líquido se encuentra por debajo de la línea de centros o cuando la presión en el recipiente está por debajo de la presión atmosférica, ver Figura 4.

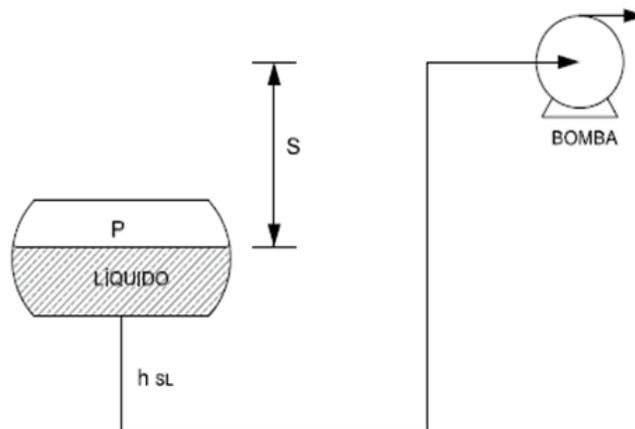


Figura 4. Sistema de succión negativa de una bomba. (Ecuación 3)

$$h_S = -S - h_{SL} + P \quad (3)$$

Donde:

h_S : Cabeza de succión, m

$-S/\gamma$: Presión negativa o disminución de cabeza sobre la línea de centros, m

h_{SL} : Desgastes por fricción, m

P : Presión en el recipiente, m

γ : Peso específico, $\text{Kg}/(\text{s}^2 * \text{m}^2)$

| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|-----------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 79 de 173 |

Cabeza de descarga

La cabeza de descarga de una bomba es la cabeza medida en la brida de descarga (manométrica o absoluta) y se compone de los mismos factores básicos anteriormente mencionados:

1. Cabeza estática
2. Pérdidas por fricción a través de tubos, accesorios, contracciones, expansiones, entradas y salidas de equipos,
3. Presión final en el sistema.

Algunos sistemas de descarga de tanques cerrados y abiertos se muestran en las figuras 5y 6.

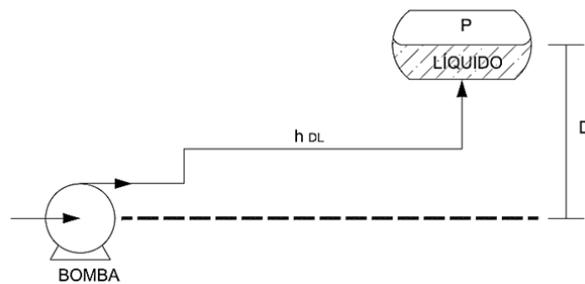


Figura 5. Representación de la cabeza estática y presión final del sistema.

Y sus ecuaciones son:

$$h_D = D + h_{DL} + P \quad (4)$$

$$h_D = D + d_{DL} \quad (5)$$

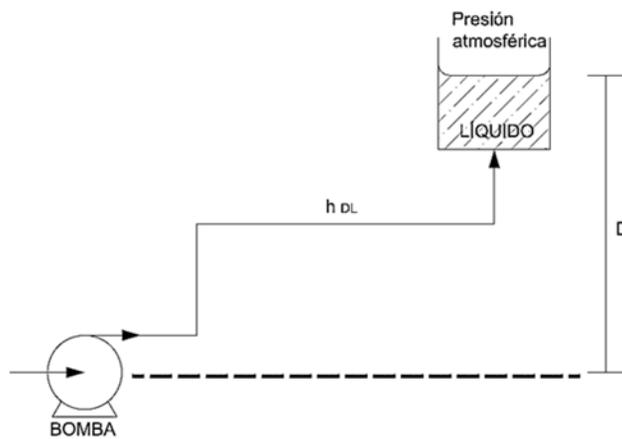


Figura 6. Diagrama de cabeza estática y presión de descarga atmosférica.



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|-----------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 80 de 173 |

Donde:

D = Elevación de descarga, m

h_{DL} = Pérdidas por fricción, m

P = Presión de descarga, m

Esta ecuación se aplica también a los sistemas representados en las Figuras 3, 4, 5 y 6, donde es importante analizar las posiciones de los tanques y los puntos de referencia 1 y 2 entre los cuales se está realizando el balance de energía de la bomba(s). De acuerdo con la primera Ley de la Termodinámica, aplicada en la Ecuación de Bernoulli que es:

$$\frac{V^2}{2} + P + \rho \times g \times z = \text{constante} \quad (6)$$

La ecuación se realiza aplicando las siguientes suposiciones:

1. La viscosidad (fricción interna) es nula
2. El caudal se mantiene constante
3. El fluido es incompresible, $\rho = \text{constante}$
4. Se aplica bajo una línea de corriente, como el flujo de agua en una tubería

Esta ecuación se puede presentar como la suma de la energía dinámica, y otra estática como constante.

La primera Ley de la Termodinámica es un balance de energía entre los límites de un volumen de control dado, por lo que permite expresar los intercambios energéticos a lo largo de una corriente de fluido, como son las pérdidas por fricción que restan energía a las bombas o ventiladores que dan mayor energía al fluido. La presentación general de la Ecuación de Bernoulli, sin considerar las pérdidas por fricción entre dos puntos de referencia es:

$$\frac{V_1^2}{2 \times g} + \frac{P_1}{\gamma} + Z_1 \times \frac{g}{g_c} + W_f = \frac{V_2^2}{2 \times g} + \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 \times \frac{g}{g_c} \quad (7)$$

Reagrupando los términos, se encuentra el trabajo de bombeo:

$$W_f = \frac{P_2 - P_1}{\gamma} + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2 \times g} + Z_2 - Z_1 = T \quad (8)$$



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|-----------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 81 de 173 |

En las siguientes secciones los términos se analizarán mejor, con la descripción de términos y de sus unidades que en las secciones de trabajo de bombeo y potencia hidráulica.

Trabajo de bombeo

El trabajo que se debe proporcionar a un sistema para llevar un cierto gasto de fluido a una cierta altura y distancia, por medio de la tubería, recibe el nombre de trabajo de bombeo. Este trabajo suele llamarse también cabeza total de una bomba. En el Sistema Internacional (SI) se expresa en metros de líquido.

Potencia hidráulica

Es el trabajo requerido para cambiar a un líquido de posición, presión y velocidad a otra posición, posición, presión y velocidad en un tiempo dado, existen distintas formas de expresar la potencia hidráulica, a saber, por las ecuaciones:

$$P_h = \tau * L \quad (9)$$

$$P_h = H * Q * \rho \quad (10)$$

$$P_h = \Delta P * Q \quad (11)$$

Donde:

P_h = Potencia hidráulica, *Watt* o *J/s*

τ = Trabajo de bombeo, *m*

\dot{m} = Flujo másico, *kg/s*

H = Cabeza total, *m*

\dot{V} = Gasto volumétrico, *m³/s* o *l/s*

ρ = Densidad del fluido, *kg/m³*

ΔP = Presión de descarga menos presión de succión, *m*

Cabeza Neta de Succión positiva, NPSH

La cabeza neta de succión positiva (NPSH), que debe estar por arriba de la presión de vapor del fluido a la temperatura de bombeo, es la presión absoluta disponible en la brida o acoplamiento de succión de la bomba y es una consideración muy importante que hay que hacer en la selección de una bomba que maneje líquidos cerca de su sitio de ebullición líquidos de altas presiones de vapor.



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|-----------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 82 de 173 |

Si la consideración de los valores del NPSH se ignora, la bomba puede ser inoperativa en el sistema o puede limitar el límite de uso y llegar a presentar problemas de operación y costo. El significado del NPSH es asegurar suficiente cabeza de líquido a la entrada del impulsor de la bomba. La ecuación que representa al NPSH es:

$$\text{NPSH} = \frac{v}{g} S + (P_a - P^{\circ}_v) - h_{SL} \quad (12)$$

Donde:

NPSH = Cabeza neta de succión positiva, m

S = Elevación del líquido sobre la línea de centros, m

P_a = Presión absoluta en el recipiente, presión en el recipiente, donde P/γ

P°_v = Presión de vapor del líquido, donde P/γ

h_{SL} = Pérdidas por fricción, m

ΔP = Presión en el recipiente, donde P/γ

γ = Peso específico, $kg (s^2 * m^2)$

Curvas características de una bomba

El comportamiento de una bomba centrífuga se puede expresar convenientemente por tres curvas, Figura 7:

1. Presión o cabeza (H) contra caudal o capacidad (\dot{V})
2. Potencia (P) contra caudal o capacidad (\dot{V})
3. Eficiencia (E) contra caudal o capacidad (\dot{V})

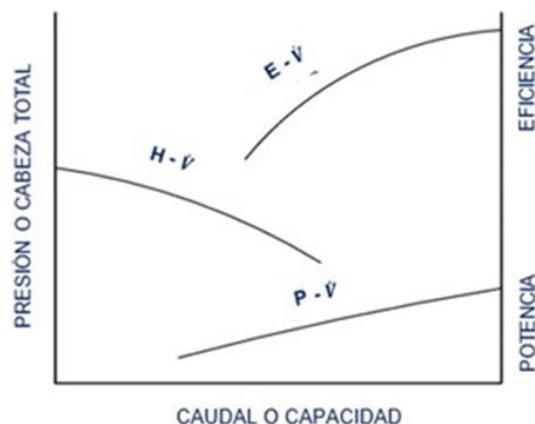


Figura 7. Curvas características de una bomba.

| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|-----------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 83 de 173 |

➤ Bombas en serie

Algunas veces, en un proceso es ventajoso o económico usar un sistema con dos o más bombas acopladas en serie para alcanzar la presión de descarga deseada. En esta situación el caudal se ve limitado por la bomba que maneje el menor gasto y a su velocidad de operación. La presión o cabeza total de descarga de la última bomba es la suma de las presiones de descarga individuales.

Para bombas idénticas, el caudal total es de una de las bombas y la presión o cabeza de descarga de la última bomba es la suma de las cabezas individuales de cada bomba actuando como una sola unidad simple. Así, para dos bombas idénticas la cabeza de descarga total es dos veces la presión o cabeza de una de las bombas al flujo de diseño, ver la figura 8:

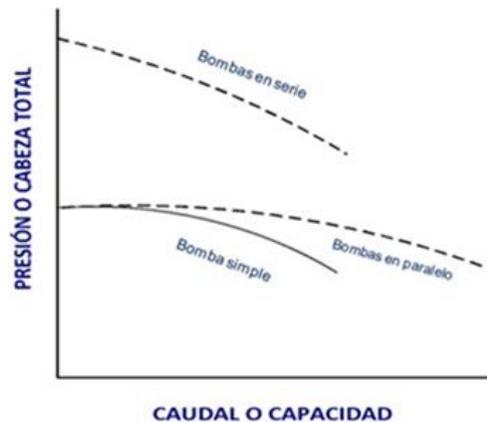


Figura 8. Curvas características en diferentes arreglos de bombas.

Cuando por necesidad de operación se quiere tener una presión de descarga elevada a un gasto constante se colocan un sistema de bombas en serie como se muestra en las Figuras 9 a, b y c.

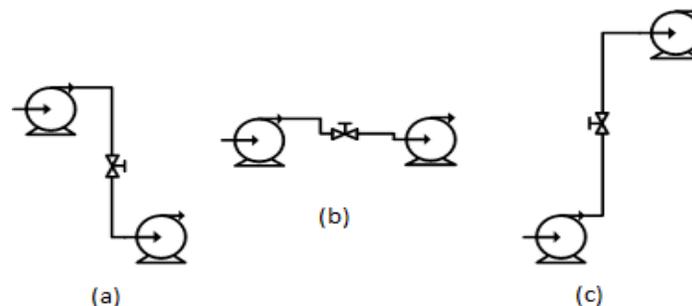


Figura 9. Diferentes arreglos de bombas conectadas en serie.

| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|-----------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 84 de 173 |

➤ Bombas en paralelo

Las bombas se operan en paralelo para dividir el caudal o capacidad entre dos o más bombas más pequeñas preferentemente, para no usar una bomba más grande, o para proporcionar un caudal adicional a un sistema de poco caudal, o por otras razones. La figura 10 ilustra la curva de operación de dos bombas idénticas acopladas en paralelo, cada bomba maneja su caudal a las condiciones de presión o cabeza de su diseño. En el arreglo en paralelo de dos o más bombas de las mismas o diferentes curvas características, el caudal de cada bomba se suma, a la siguiente, para obtener la distribución de caudal total. Cada bomba no tiene que manejar el mismo caudal; pero cada una operará sobre su propia curva característica y debe distribuir la presión o cabeza requerida. En un punto común de unión en la descarga de todas las bombas, la presión o cabeza será la misma para cada bomba, sin importar su flujo.

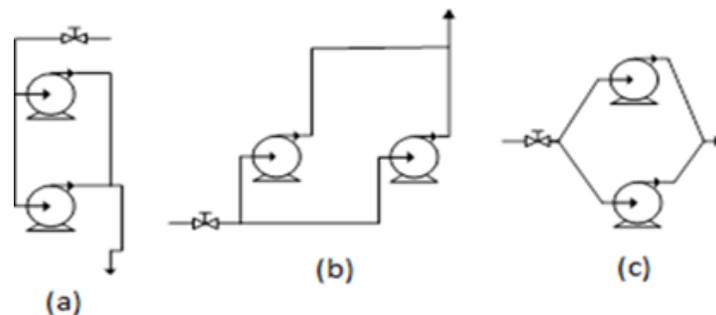


Figura 10. Diferentes arreglos de bombas en paralelo.

3. MATERIALES Y EQUIPO

3.1. MATERIALES.

- 1 flexómetro
- 1 cronómetro

3.2. REACTIVOS.

- No se utilizan reactivos

3.3. HERRAMIENTAS.

- No se utilizan herramientas



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|-----------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 85 de 173 |

3.4. EQUIPO.

- Sistema de flujo de fluidos de metal con la tubería, válvulas de control, accesorios e instrumentos que se tienen actualmente

3.5. SERVICIOS

- Electricidad
- Agua de la línea de servicios generales o
- Agua de la torre de enfriamiento

3.6. MATERIAL BÁSICO

- Pueden requerirse etiquetas o plumón para marcar

4. PROCEDIMIENTO

- Calibración de rotámetros

Para conocer a cerca de una calibración de rotámetros, puede consultarlo con la responsable de Planta Piloto y consultado el Anexo 1.

- Uso de las bombas individualmente

1. Una vez calibrados los rotámetros se procederá a determinar las variables del comportamiento de las bombas individualmente, presentados en la Tabla 1.
2. Se alinea el sistema para usar cualquiera de las dos bombas y se recircula el fluido al mismo tanque que está alimentando a la bomba que se está usando.

Hacer lo mismo con la otra bomba.

3. Las variables que se usarán son: Para cada % de caudal o gasto leído en el rotámetro calibrado se lee la presión de descarga en el manómetro a su salida.

Los datos obtenidos para cada bomba, BC-1 o BC-2 y se presentan en la Tabla 1.



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|-----------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 86 de 173 |

Tabla 1. Presentación de los datos individuales de las bombas

| BC-1 | | | | | BC-2 | | | | |
|--------|-------------|---|---|---------------|--------|-------------|---|---|---------------|
| Caudal | P. descarga | S | P | P°_v | Caudal | P. descarga | S | P | P°_v |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |

➤ Uso de las bombas en serie

Haciendo uso del Anexo 1, en donde puede observarse cómo alinear el sistema para llevar el fluido de un tanque a otro, se opera:

1. Llenar el tanque TA-1.
2. Alinear el equipo para que las bombas trabajen en serie y para que recircule el fluido al TA-1, abriendo V-5, V-9, V-12, V-20, V-22, V-23 y V-3.
3. Arrancar la bomba BC-1 e inmediatamente después la BC-2, regular el flujo con V-3.
4. Leer el flujo, la presión de descarga de la bomba BC-1 y BC-2.
5. Cuando se tengan los suficientes datos apagar las bombas simultáneamente y cerrar todas las válvulas.

Los datos obtenidos un arreglo de bombas en serie se presenta en la Tabla 2.

Tabla 2. Presentación de datos de bombas en serie.

| Caudal | P. descarga BC-1 | P. descarga BC-2 |
|--------|------------------|------------------|
| | | |
| | | |
| | | |

➤ Arreglo de las bombas en paralelo

1. Llenar el tanque TA-1.
2. Alinear el equipo para que las bombas trabajen en paralelo y para que recircule el fluido al tanque TA-1, abriendo las siguientes válvulas: V-3, V-5, V-9, V-10, V-19, V-20, V-21, V-22 y V-23.
3. Arrancar las bombas BC-1 y BC-2



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|-----------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 87 de 173 |

- Regular el flujo de las bombas con V-11 y V-13, hasta que las presiones en los manómetros sean aproximadamente iguales, cuando esto suceda, leer el valor de las presiones en los manómetros y de los flujos en los rotámetros,
- Cuando se tengan los suficientes datos apagar las bombas simultáneamente y cerrar todas las válvulas.

En la tabla se llenan los valores experimentales de las bombas en paralelo.

Tabla 3. Presentación de datos de bombas en arreglo en paralelo.

| Caudal del R-1 | Caudal del R-2 | P. descarga BC-1, kg/cm ² | P. descarga BC-2, kg/cm ² |
|----------------|----------------|---|---|
| | | | |
| | | | |
| | | | |

87 de 177

Nota: Observaciones y recomendaciones importantes.

Al principio de cualquiera de las actividades mencionadas, todas las válvulas deberán estar cerradas y solamente se abrirán aquellas que sean necesarias, por ello es importante que los alumnos que realicen una actividad experimental en este equipo identifiquen las válvulas.

5. TRATAMIENTO DE DATOS

➤ PRESENTACIÓN DE DATOS

- Para cada bomba utilizada individualmente se presentarán los resultados obtenidos experimentalmente en la Tabla 4.

Tabla 4. Resultados de las mediciones de las bombas individuales.

| BC-1 | | | | | |
|-----------|------------|-------------|------------|---|------|
| \dot{V} | P. Succión | P. Descarga | ΔP | H | NPSH |
| | | | | | |
| | | | | | |
| BC-2 | | | | | |
| \dot{V} | P. Succión | P. Descarga | ΔP | H | NPSH |
| | | | | | |
| | | | | | |



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|-----------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 88 de 173 |

2. Con los datos obtenidos en el inciso anterior se construirá para cada bomba las siguientes ecuaciones:
- Cabeza total en metros H vs Caudal en m³/s o Capacidad de flujo en LPM
 - Potencia en Watt vs Caudal en m³/s o Capacidad de flujo en LPM
 - Para las bombas alineadas en serie se reportan los resultados de los datos como se presentarán en la Tabla 5.

Tabla 5. Resultados de las mediciones en arreglo en serie

| \dot{V} | P. Succión, BC-1 | P. Descarga, BC-2 | ΔP | H, (m) |
|-----------|------------------|-------------------|------------|--------|
| | | | | |
| | | | | |

3. Con los datos obtenidos en el inciso anterior se construirá para cada bomba las siguientes curvas:
- Cabeza total en metros H vs Caudal en m³/s o Capacidad de flujo en LPM
 - Potencia en Watt vs Caudal en m³/s o Capacidad de flujo en LPM
 - Para las bombas alineadas en paralelo se reportan los resultados de los datos como se presentarán en la Tabla 6.

Tabla 6. Resultados de las mediciones de bombas en paralelo.

| \dot{V} , BC-1 | \dot{V} , BC-2 | Q_T (BC-1+ BC-2) | P. Succión, BC-1 | P. Succión, BC-2 | Descarga, BC-1 |
|------------------|------------------|--------------------|------------------|------------------|----------------|
| | | | | | |
| | | | | | |

Tabla 7. Resumen de resultados.

| P.Descarga, BC-2 | ΔP , BC-1 | ΔP , BC-2 | H, BC-1, (m) | H, BC-2, (m) |
|------------------|-------------------|-------------------|--------------|--------------|
| | | | | |
| | | | | |

4. Con los datos obtenidos en el inciso anterior se construirá para cada bomba las siguientes curvas:
- Cabeza total en metros H vs Caudal en m³/s o Capacidad de flujo en LPM
 - Potencia en Watt vs Caudal en m³/s o Capacidad de flujo en LPM



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS



DE 6° SEMESTRE

| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|-----------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 89 de 173 |

6. MANEJO DE RESIDUOS

Los residuos generados son identificados como residuos peligrosos de acuerdo con el procedimiento SGC-FESZ-PO06 Manejo de residuos generados en los laboratorios de docencia, basado en la NOM-052-SEMARNAT-2005 que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos.

7. BIBLIOGRAFÍA

1. Progress in pumps / New York (1989) *Chemical engineering*. McGraw-Hill.
2. Mejía Jaramillo, Iván, (1987) *Instalación de bombas centrifugas* / México: CECSA.
3. Luszczewski i Kudra, Antoni, (2004) *Redes industriales de tubería: bombas para agua, ventiladores y compresores: diseño*.
4. Shames, I. (1995) "La mecánica de los fluidos" Ed. McGraw Hill.
5. Streeter, V. (1989) "Mecánica de los fluidos" Ed. McGraw Hill.

| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|-----------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 90 de 173 |

P-2: ANÁLISIS Y DETERMINACIÓN DE LOS FACTORES DE FRICCIÓN, LONGITUDES EQUIVALENTES Y CALIBRACIÓN DE MEDIDORES DE FLUJO

1. OBJETIVOS

- 1.1. Determinar experimentalmente el factor de fricción de los tubos lisos.
- 1.2. Evaluar experimentalmente la longitud equivalente en válvulas y accesorios.
- 1.3. Calibrar un medidor de placa de orificio, Venturi y rotámetro.
- 1.4. Determinar la variación del factor de fricción y de los coeficientes de descarga de medidores de flujo con respecto al número de Reynold.

2. FUNDAMENTO TEORICO

➤ Fluido Newtoniano

Experimentalmente se observa que cuando se tienen dos placas paralelas separadas por una sustancia que se encuentra entre ellas a una distancia L muy pequeña, como se muestra en la Figura 1, al aplicar una fuerza F_1 , por pequeña que sea en la placa inferior, la sustancia se deforma. Esta deformación consiste en un desplazamiento gradual de todas las capas de dicha sustancia, hasta alcanzar una distribución decreciente y lineal de velocidad V , de la placa en movimiento hasta la velocidad cero de la placa que está en reposo. La deformación de las capas de fluido resulta de la acción de corte ejercida inicialmente por la fuerza F_1 , sobre la capa de fluido adherida a la placa inferior y a la resistencia del fluido deformable.

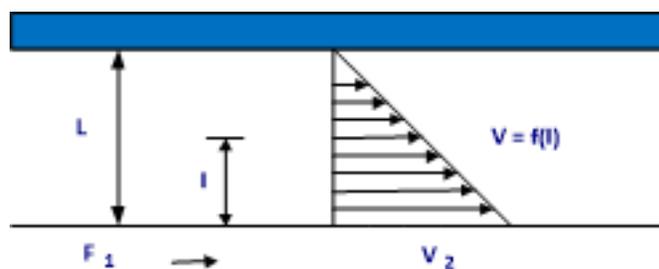


Figura 1. Aplicación de una fuerza en un sistema de placas paralelas separadas por una sustancia

Una vez que se ha alcanzado el régimen permanente, bastará que se mantenga la fuerza F_1 para que la placa inferior se conserve a la velocidad V y se comprueba que la fuerza F que actúa sobre una lámina de fluido en particular, es directamente proporcional a la disminución de la velocidad con la distancia L y el área de corte de dicha lámina, o sea:



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|-----------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 91 de 173 |

$$F\alpha - A \times \frac{dV}{dL} \quad (1)$$

$$F = -\mu \times A \times \frac{dV}{dL} \quad (2)$$

Resulta conveniente considerar la relación entre la fuerza y el área sobre la que actúa, de manera que:

$$\frac{F}{A} = T \quad (3)$$

La relación anterior se conoce como esfuerzo cortante r , cuya característica consiste en que la dirección de F , es paralela al área A , sustituyendo (3) en (2) se tiene:

$$-\mu \times \frac{dV}{dL} \quad (4)$$

Obsérvese que en la ecuación 4 el símbolo μ es el factor de proporcionalidad y se le llama viscosidad.

La ecuación anterior fue establecida por primera vez por Newton y en su honor a los fluidos que siguen esta ley se les conoce como fluidos Newtonianos.

Cuando a una sustancia se le aplica una fuerza cortante mínima y se logra que se deforme continuamente en el sentido de la aplicación de dicha fuerza, se dice que es un fluido.

➤ Tipos de flujo

Al tener movimiento un fluido se constituye un flujo y existirá un patrón de flujo de acuerdo con las condiciones que prevalezcan sobre éste. Pueden existir diversos tipos de flujo; entre ellos, entre los de mayor interés se tienen: flujo turbulento, laminar, permanente, no-permanente y uniforme. De todos los patrones de flujo, los más importantes, en ingeniería, son el laminar y el turbulento.

Un fluido puede moverse, en cualquier punto a lo largo de una corriente; en flujo laminar o en flujo turbulento; la diferencia entre los dos modelos fue demostrada por primera vez por Osborne Reynolds.

El experimento clásico de Reynolds consistió en hacer fluir agua a través de un tubo de vidrio y observar la trayectoria de una corriente fina de agua colorida, introducida en el centro de la corriente principal. Se encontró que, a pequeñas velocidades de flujo, el colorante se transportaba en línea recta y paralela a las paredes de la



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|-----------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 92 de 173 |

tubería, mostrando de esta manera que el flujo del fluido era en líneas rectas; a este tipo de flujo se le llamó fluido laminar o viscoso.

Cuando la velocidad se incrementó, se observó que el colorante se mezclaba en toda la sección de flujo, con lo cual el movimiento del fluido ya no era ordenado, es decir este movimiento dejó de ser en un solo sentido y se convirtió en un movimiento en todas direcciones; a este tipo de flujo se le llama flujo turbulento.

➤ Número de Reynolds

Reynolds observó que el flujo laminar se convertía en flujo turbulento a cierta velocidad crítica, mayor a aquella en la que cambiaba de flujo turbulento a flujo laminar; la primera recibe el nombre de velocidad crítica superior y la segunda velocidad crítica inferior. También encontró que esta velocidad crítica a la cual el flujo cambia de uno a otro tipo depende de cuatro cantidades: diámetro del tubo, viscosidad, densidad del fluido y velocidad media lineal a la cual está fluyendo. Encontró posteriormente que estos cuatro factores pueden ser combinados en un grupo adimensional y que el cambio de tipo de flujo ocurre en una magnitud definida de este grupo. La expresión establecida fue:

$$Re = \frac{D \times v \times \rho}{\mu} = \frac{D \times G}{\mu} = \frac{D \times v}{\nu} \quad (5)$$

Donde:

Re = Número de Reynolds adimensional

D = Diámetro del tubo, m

v_m = Velocidad media lineal, m/s

μ = Viscosidad absoluta, Pa · s

G = Masa velocidad, Kg/(s · m²)

ν = Viscosidad cinemática, m²/s

El flujo laminar en tubos circulares se encuentra siempre a números de Reynolds bajos, aunque también puede ser de varios miles. Para efectos de ingeniería puede decirse que a $Re \leq 2\ 100$ el flujo está en un régimen laminar y a $Re \geq 4\ 000$ el flujo es turbulento, observándose que entre estos dos valores se encuentra la llamada zona de transición, donde puede existir flujo laminar, flujo turbulento o efectivamente presentar un estado de transición.



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|-----------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 93 de 173 |

En flujo laminar, la teoría y la experimentación muestra que la distribución de velocidades es una parábola y que la velocidad media es exactamente la mitad de la velocidad máxima. En flujo turbulento, la curva de distribución de velocidades es más plana que en flujo laminar y que la mayor parte del cambio ocurre en las etapas cercanas a la pared.

➤ Factor de fricción

La fuerza que ejerce el fluido sobre las paredes puede ser de dos tipos: cuando el fluido está en reposo, tiene una magnitud definida y cuando está en movimiento se le asocia una cantidad de fuerza adicional que se puede expresar así:

$$F = A \times E_c \times f \quad (6)$$

Donde:

A = Área característica en donde flujo ejerce fuerza, m²

E_c = Energía cinética característica por unidad de volumen, J/m³

f = Cantidad adimensional llamada factor de fricción

La ecuación (6) es una definición arbitraria que ayuda a comprender el significado del factor de fricción, puesto que “f” no se define hasta que A y E_c son especificadas.

Generalmente para el flujo a través de tuberías A es la superficie mojada y E_c, es: $\frac{1}{2} \frac{\rho v^2}{2} \cdot f$, para tubos de radio R y longitud L, se tiene:

$$F = 2 \times \pi \times R \times L \times \frac{1}{2} \times \frac{\rho \times v^2}{2} \times f \quad (7)$$

Puesto que experimentalmente solo se puede conocer la caída de presión que ejerce un fluido a través de una tubería, se hace uso de la definición de presión:

$$F = (P_0 - P_1) \times \pi \times R^2 \quad (8)$$

Sustituyendo (7) en (8), se obtiene:

$$f = \frac{\Delta P \times D}{2L \times V^2 \times \rho} \quad (9)$$



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|-----------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 94 de 173 |

$$f' = \frac{2\Delta P}{LV^2} \quad \text{o,} \quad f' = 4 \times f \quad (10)$$

Donde:

f = Factor de fricción de Fanning

f' = Factor de fricción de Darcy

ΔP = Caída de presión en el tubo

D = diametro del tubo, m

L = longitud del tubo, m

V = velocidad del fluido, m³/s

ρ = Densidad del fluido, kg/m³

g_c = Factor de conversión, 9.8066, \vec{m}/s

➤ Ecuación de Hagen y Poiseuille

G. Hagen y J. L. Poiseuille dedujeron una importante ley que relaciona el caudal volumétrico y las fuerzas que causan el flujo, o sea las fuerzas asociadas con la caída de presión y la aceleración de la gravedad. Las suposiciones que implican el desarrollo de esta ley son las siguientes:

- El flujo es laminar a Re menor de 2100
- La densidad es constante (fluido incompresible)
- El flujo es independiente del tiempo (régimen permanente)
- Los efectos terminales son casi nulos
- El fluido es continuo
- No hay bordes en la pared.

La expresión obtenida por Hagen-Poiseuille es:

$$v = \frac{(P_0 - P_1) \times R^2 \times g_c}{8 \times \mu \times L} \quad (11)$$

Sustituyendo el valor de la velocidad promedio de la ecuación (11) en la ecuación (9) del factor de fricción de Fanning, se obtiene:

$$f = \frac{16}{Re} \quad (12)$$

Por métodos experimentales se puede calcular " f " y hacer la gráfica correspondiente de " f " contra " Re " para tubos de rugosidad mínima, obteniendo curvas continuas, las cuales reflejan el tipo de flujo: laminar o turbulento, en lisos, largos circulares. La parte de la curva para régimen laminar sigue la Ley de Hagen-Poiseuille.



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|-----------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 95 de 173 |

Para flujo turbulento en tubos lisos, Prandtl desarrolló una ecuación empírica aproximada para calcular el factor de fricción.

$$f = 0.0032 + \frac{0.221}{\text{Re}^{0.237}} \quad (13)$$

➤ Ecuaciones de Von Karman y Nikuradse

Para la zona turbulenta Von Karman y Nikuradse proponen las siguientes ecuaciones para calcular el factor de fricción en función de la rugosidad relativa:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 4.0 \log \frac{\text{Re}}{\epsilon} + 3.36 \quad (14)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 4.0 \log \frac{\text{Re}}{\epsilon} + 3.48 \quad (15)$$

Donde ϵ es la rugosidad absoluta, la cual representa la rugosidad promedio o profundidad promedio de las irregularidades de la superficie del tubo.

Existe otro camino importante para definir, la rugosidad relativa, la cual se obtiene como la relación adimensional de la rugosidad absoluta del tubo al diámetro interno del mismo, es decir.

$$\text{Rugosidad relativa} = \frac{\epsilon}{D} \quad (16)$$

➤ Pérdidas de energía por fricción de accesorios

En las secciones anteriores se ha planteado la necesidad de estimar, ya sea teórica o experimentalmente las pérdidas de energía por fricción en tubos rectos; sin embargo, esta posibilidad resulta aislada cuando se considera una instalación real, en donde además de tubos se tienen accesorios. La evaluación en este caso del término f resulta de obtener por separado las pérdidas de energía ocasionadas por todos a los tramos de tubo recto, además de las pérdidas de energía debidas a los accesorios que se encuentran instalados.



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|-----------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 96 de 173 |

➤ Fricción de pared y fricción de forma

Cuando un fluido pasa a través de un accesorio, por ejemplo, una válvula, presenta dos tipos de fricción: la fricción y la fricción de forma. En un sistema de flujo, en general, se encuentran ambos tipos.

➤ Longitud equivalente

Aplicando los conceptos anteriores a un sistema de flujo, la fricción de pared se encuentra generalmente sobre la superficie interna de un tubo recto en contacto con el fluido y el factor correspondiente a este tipo de fricción se evalúa en forma apropiada mediante una relación entre el factor de fricción y el número de Reynolds, con parámetros de rugosidad relativa.

Cuando se tiene un sistema en el cual el fluido tiene que pasar a través de válvulas y conexiones, el tipo de fricción que predomina es de forma y en este caso es el factor de fricción no se puede evaluar mediante las gráficas antes citadas, por lo que se tiene que usar un término denominado “Longitud Equivalente”.

Longitud equivalente es un término que representa una longitud hipotética de tramo de tubo recto, que originaría la misma pérdida de energía por fricción que la producida por el accesorio de que se trate.

Al valor que se obtiene de la medición de la longitud equivalente de un accesorio en unidades de longitud de tubo recto se le denomina “Longitud Equivalente Absoluta” y si esta cantidad se expresa como múltiplo del diámetro de tubo, se le llama “Longitud Equivalente Relativa” y es adimensional.

Una forma de estimar la longitud equivalente absoluta es por medio de la siguiente ecuación:

$$(Le)_a = \left(\frac{\Delta P_a}{\frac{\Delta P}{Lt}} \right) \quad (17)$$

Donde:

$(Le)_a$ = Longitud equivalente absoluta

ΔP_a = Caída de presión a travez del accesorio

$\left(\frac{\Delta P}{Lt} \right)$ = Caída de presión por unidad de longitud del tramo de tubo recto de referencia



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|-----------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 97 de 173 |

➤ Medidores de flujo

Para el control de procesos industriales, es necesario conocer la cantidad de material que entra y sale del proceso. Teniendo en cuenta que, siempre que es posible, los materiales se transportan en forma de fluidos, es de gran importancia medir la cantidad de flujo que pasa a través de una tubería. Existen varios métodos de medir el flujo, los cuales se pueden clasificar en dos grupos:

Métodos directos. Consisten en determinar el volumen o peso del fluido que pasa por una sección en un intervalo de tiempo específico.

Métodos indirectos. Requieren la determinación de una carga manométrica, una diferencia de presiones o la velocidad en varios puntos de una sección transversal para posteriormente, con base en estos datos, se calcule el gasto.

➤ Métodos directos.

Miden en forma directa la cantidad de flujo que se está manejando en una tubería. Para la aplicación de estos métodos hay una gran variedad de medidores, los cuales se dividen dependiendo del uso que se les vaya a dar, a saber:

- Medidores de desplazamiento positivo.
- Medidores magnéticos.
- Medidores de turbina

La medición directa muy pocas veces se usa cuando se desea un control automático, se usa principalmente para dosificar, o simplemente para cuantificar la cantidad de flujo a través de una tubería.

➤ Métodos indirectos.

Estos métodos determinan un parámetro de flujo, para después calcular el gasto que fluye por la tubería, con base en los valores del parámetro. Para la aplicación de estos métodos existen dos tipos de medidores, los cuales se clasifican como:

- De área fija, por ejemplo: placa de orificio, Venturi, tubo Pitot, anular, etc.
- De área variable: rotámetro

➤ Ecuación general de los medidores de área fija

El gasto que fluye a través de una tubería puede ser cuantificado con la aplicación de la ecuación de continuidad, esto es:

| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|-----------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 98 de 173 |

$$Q = VA = \text{Constante} \quad (18)$$

$$W = VA\rho = \text{Constante} \quad (19)$$

Donde:

Q = Gasto Volumetrico m^3/s

W = Gasto másico, Kg/s

V = Velocidad del fluido, l/s

A = Área de paso, m^2

ρ = Densidad del fluido, Kg/m^3

Aplicando la ecuación de Bernoulli al sistema mostrado en la Figura 2, se obtiene la siguiente expresión:

$$Z_1 \frac{g}{g_c} + \frac{P_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2 g_c} = Z_2 \frac{g}{g_c} + \frac{P_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2 g_c} + H_{fs} \quad (20)$$

Cancelando los términos de energía potencial y de trabajo de bomba, se obtiene:

$$V_2^2 - V_1^2 = 2 g_c \left[\frac{P_1 - P_2}{\rho} - H_{fs} \right] = - \left[2 g_c \left[\frac{P_2 - P_1}{\rho} \right] + H_{fs} \right] \quad (21)$$

De la ecuación (19), se obtiene:

$$W_1 = W_2 = V_1 A_1 \rho_1 = V_2 A_2 \rho_2 \quad (22)$$

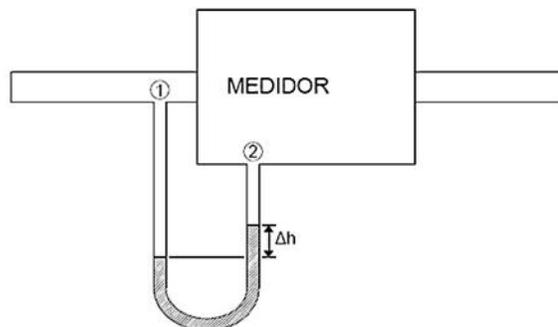


Figura 2. Esquema de un medidor de diferencia de presión.

Si $\rho_1 = \rho_2$

Entonces:

$$V_2 = V_1 \frac{A_1}{A_2} \quad (23)$$



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|-----------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 99 de 173 |

Sustituyendo (23) en (21) entonces:

$$V_1^2 \frac{A_1^2}{A_2^2} - V_1^2 = -2 \text{ gc} \left[\frac{P_1 - P_2}{\rho} + H_{fs} \right] \quad (24)$$

$$Y \quad V_1 = \sqrt{\frac{2 \text{ gc} \left[-\frac{\Delta P}{\rho} - H_{fs} \right]}{\frac{A_1^2}{A_2^2} - 1}} \quad (25)$$

El término dentro de los corchetes representa la caída de presión atribuible a los cambios de energía cinética entre los puntos 1 y 2.

La ecuación (25) recibe el nombre de ecuación general de medidores, esta ecuación se aplica a cada tipo especial de medidor de área fija.

➤ Placa de orificio

Este medidor consiste en una placa de metal con una abertura que se instala perpendicularmente a la dirección del flujo, obligando al fluido a pasar a través del hueco. El hueco se localiza por lo general en el centro de la tubería y tiene un diámetro que fluctúa entre el 30 y 80% del diámetro interior de la tubería. El paso de un fluido a través de un orificio se ilustra en la Figura 3.

En zonas cercanas al orificio corriente arriba, los elementos de fluido próximos a la pared del tubo se dirigen hacia el centro para pasar a través de la abertura. Después de la placa ocurre la separación de la capa límite y la pérdida de energía es considerable debido a la turbulencia. Las líneas de flujo alcanzan un mínimo de sección transversal después de la placa y este punto es conocido como vena contracta, en donde se tiene la máxima caída de presión y a medida que se va ensanchando se tiene una recuperación de la caída de presión máxima, la cual depende de la relación de diámetro del tubo y de la placa.

El efecto del orificio sobre el flujo se puede analizar a partir de la ecuación general de los medidores.

| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|------------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 100 de 173 |

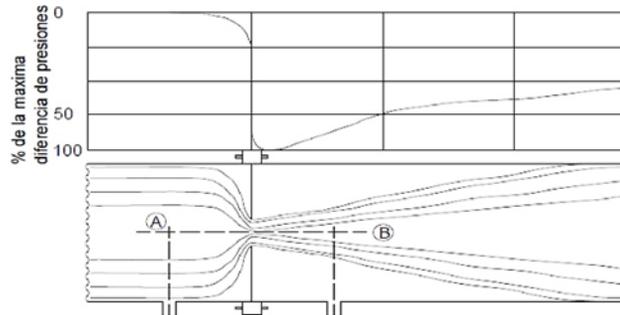


Figura 3. Esquema del perfil de presión en una placa de orificio.

Analizando el término dentro del corchete de la ecuación (25), el término $\left(\frac{-\Delta P}{\rho}\right)$ representa la diferencia de presión entre los puntos A y B, y H_{fs} representa todas las pérdidas de energía por fricción entre los puntos antes mencionados. La suma de estas dos cantidades puede ser expresada como una fracción de la caída de presión total entre los dos puntos en cuestión, esto es:

$$-\frac{\Delta P}{\rho} - H_{fs} = C_1^2 \left(-\frac{\Delta P}{\rho}\right) \quad (26)$$

En donde C_1^2 es el factor de proporcionalidad. Combinando la ecuación (26) con la (25) se obtiene:

$$V_1 = C_1 \sqrt{\frac{2gc \left[-\frac{\Delta P}{\rho}\right]}{\frac{A_1^2}{A_0^2} - 1}} \quad (27)$$

Aunque las tomas de presión se pueden colocar sobre la vena contracta, es difícil medir con precisión el área seccional de ella, sin embargo, por geometría, se tiene:

$$A_2 = C_2 A_0 \quad (28)$$

Donde:

C_2 = Constante de proporcionalidad

A_0 = Área de sección transversal del orificio



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|------------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 101 de 173 |

Combinando la ecuación (28) con la (27) se obtiene finalmente:

$$V_1 = C_0 \sqrt{\frac{2gc - \left[\frac{-\Delta P}{\rho}\right]}{\frac{A_1^2}{A_0^2} - 1}} \quad (29)$$

Donde:

C_0 = Coeficiente de descarga de la placa de orificio

ΔP = Caída de presión

A_1 = Área del tubo, m^2

A_0 = Área del orificio, mm

ρ = Densidad del fluido, Kg/m^3

El coeficiente de descarga de la placa de orificio se correlaciona con el número de Reynolds a través del orificio. Para ello, se ajustan los valores experimentales de C_0 contra el número de Reynolds en el orificio. Cuando el número de Reynolds en el orificio está por encima de 30000 el resultado puede predecirse usando el valor $C_0 = 0.61$, independientemente de la relación de diámetros. El valor numérico del coeficiente de descarga depende de la localización de las tomas de presión, así como de la relación de los diámetros y del número de Reynolds en el orificio.

➤ Tubo Venturi

Este medidor está formado básicamente por dos conos, una garganta y presenta la distribución de presiones mostradas en la Figura 4, también se muestran las medidas críticas.

El medidor Venturi opera bajo el mismo principio que el medidor de placa de orificio ya que indica el decremento de la presión debido a un aumento en la velocidad del fluido causada por una reducción del área de flujo insertada en el tubo.

En el tubo Venturi, las pérdidas por fricción son considerablemente menores que las correspondientes a una placa de orificio, debido a que la energía cinética se recupera como presión gracias al aumento gradual de la sección transversal de flujo del medidor.

| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|------------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 102 de 173 |

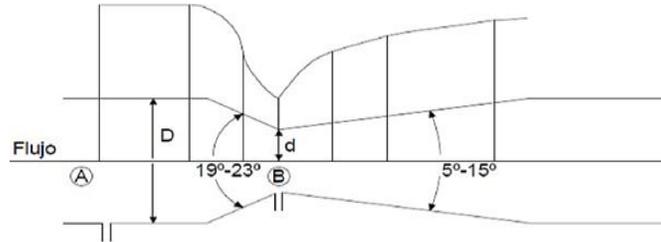


Figura4.Diagrama y perfil de presión en un tubo Venturi.

Las ecuaciones para el medidor Venturi son similares a las de la placa de orificio. Y en el rango usual de operación (para Reynolds, mayores de 10000) el coeficiente de descarga del Venturi es mayor que el correspondiente a la placa de orificio.

$$V_1 = C_V \sqrt{\frac{2gc \left[-\frac{\Delta P}{\rho} \right]}{\frac{A_1^2}{A_V^2} - 1}} \quad (30)$$

En donde C_V es el coeficiente de descarga del Venturi cuyo valor es de 0.98 para un número de Reynolds mayores de 10000.

➤ Rotámetro

El rotámetro es un instrumento de medición de flujo volumétrico para fluidos en estado líquido o gaseoso. Su principal característica es la de tener un área de flujo variable.

El rotámetro, Figura 5, consiste en un flotador con libertad para moverse dentro de un tubo de vidrio vertical cerrado. El fluido entra en el fondo del tubo y al fluir hacia arriba ejerce una fuerza sobre el fondo del flotador.

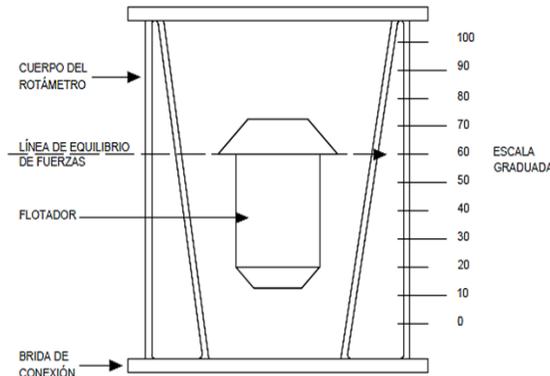


Figura 5. Diagrama de un rotámetro.

| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|------------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 103 de 173 |

Cuando la fuerza hacia arriba sobre el flotador es igual a la fuerza gravitacional que actúa hacia abajo sobre el mismo, éste se detiene en algún punto dentro del tubo. El área disponible para el flujo es el anillo entre las paredes del tubo y el flotador. La caída constante de presión depende de dos factores: el cambio de energía cinética y la fricción del fluido. La fricción de la forma es más significativa en este caso. Los flotadores pueden ser diseñados de tal manera que la fricción de la forma resulte o no un factor significativo.

La Figura 6 muestra esquemáticamente un rotámetro con su flotador en posición estable. En estas condiciones, las fuerzas que actúan sobre el flotador deben balancearse puesto que no existe una fuerza neta que mueva al flotador. Las fuerzas presentes son: La fuerza de gravedad (F_G) que actúa hacia abajo sobre el flotador; el empuje hacia arriba del fluido sobre el flotador (F_B) y una fuerza de resistencia.

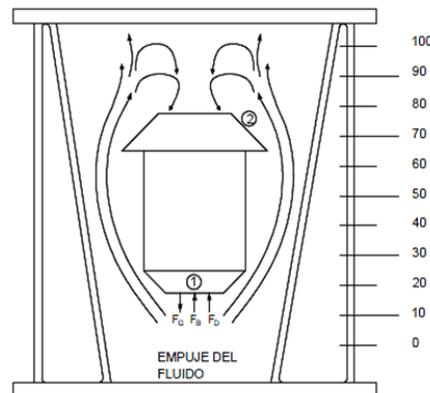


Figura 6. Esquema de fuerzas presentes en un rotámetro

Al movimiento (F_D) resultante de la fricción de la forma y de la superficie del flujo alrededor del flotador. Por tanto, en el estado estable:

$$F_D = F_G - F_B = V_f \rho_f \frac{g}{gc} - V_f \rho \frac{g}{gc} = V_f (\rho_f - \rho) \frac{g}{gc} \quad (31)$$

Donde:

V_f = Volumen del flotador
 ρ_f = Densidad del flotador
 ρ = Densidad del fluido

Los factores que contribuyen a la fuerza de resistencia al movimiento pueden ser analizados por medio de un balance de energías entre el punto 1, precisamente antes del flotador, y el punto 2 en la sección transversal mayor del flotador.



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|------------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 104 de 173 |

Entre estos dos puntos la ecuación de Bernoulli se reduce a:

$$\frac{P_2 - P_1}{\rho} + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2 gc} + H_{fs} = 0 \quad (32)$$

Usando la ecuación de continuidad, la ecuación (32) puede ser re arreglada y se obtiene:

$$V_1^2 \left(\frac{A_1^2}{A_2^2} - 1 \right) = -2 gc \left[\frac{P_2 - P_1}{\rho} + H_{fs} \right] \quad (33)$$

Como en el caso de los medidores de orificio, el término dentro del paréntesis cuadrangular en la ecuación (33), puede ser representada por la ecuación (26), de donde:

$$V_1 = C_1 \sqrt{\frac{2 gc \left[-\frac{\Delta P_{12}}{\rho} \right]}{\left(\frac{A_1^2}{A_2^2} - 1 \right)}} \quad (34)$$

La diferencia de presión que actúa sobre la máxima sección transversal del flotador no es idéntica a $[-\Delta P_{12}]$, porque una fracción se recupera cuando la corriente regresa a ocupar el diámetro completo del tubo y la velocidad disminuye proporcionalmente. La fracción recuperada será pequeña y como en el caso de la pérdida permanente de presión en el medidor de orificio, no depende de la velocidad.

Entonces:

$$F_D = [-\Delta P_f] A_f = [-\Delta P_{12}] C_f^2 A_f \quad (35)$$

Donde:

$-\Delta P_f$ = Pérdida de presión que actúa en la parte superior.

C_f^2 = Fracción de la pérdida máxima de presión $[-\Delta P_{12}]$ que no se recupera y actúa en la parte superior del flotador.



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|------------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 105 de 173 |

Así pues, si la ecuación (34) se combina con las ecuaciones (31) y (35) resulta:

$$V_1 = C_R \sqrt{\frac{2 g c V_f (\rho_f - \rho) \frac{g}{g c}}{A_f \rho \left(\frac{A_1^2}{A_2^2} - 1 \right)}} \quad (36)$$

Donde:

C_R = Coeficiente de rotámetro

Puesto que el tubo en un rotámetro práctico se inclina gradualmente, $A_f = A_1 - A_2$ y la ecuación (36) se simplificar para dar:

$$V_1 = C_R \frac{A_2}{A_f} \sqrt{\frac{2 g V_f (\rho_f - \rho)}{\rho (A_1 - A_2)}} \quad (37)$$

El coeficiente del rotámetro C_R , como en el caso del coeficiente de la placa de orificio, es una función del número de Reynolds a través de la sección transversal mínima y de la forma del flotador.

Para un rotámetro el número de Reynolds a través de la sección transversal mínima se obtiene con la siguiente ecuación:

$$Re = \frac{D_{eq} v \rho}{\mu} \quad (38)$$

Donde:

D_{eq} = Diametro equivalente para aberturas anulares entre el tubo y el flotador

esto es igual a cuatro veces el área transversal entre el perimetro mojado

v = Velocidad a través del diametro equivalente, m/s

ρ = Densidad del fluido, Kg/m³

μ = Viscosidad del fluido, N s/m²

Una ecuación simplificada de la ecuación (37), es la que se obtiene de suponer que A_2 es muy pequeña comparada con A_f y convirtiendo la ecuación (37) en su forma de flujo de masa a través del uso de la ecuación de continuidad se obtiene:

$$\dot{m} = C_R A_2 \sqrt{\frac{2 g V_f (\rho_f - \rho)}{A_f}} (\rho) \quad (39)$$



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|------------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 106 de 173 |

Donde:

\dot{m} = flujo de masa, kg/s

3. MATERIALES Y EQUIPO

3.1. MATERIALES.

- Probetas graduadas de 2 L o una cubeta de 40-50 L
- Flexómetro
- Cronómetro

3.2. REACTIVOS.

- No se utilizan reactivos

3.3. HERRAMIENTAS.

- No se utilizan herramientas

3.4. EQUIPO.

- El equipo de flujo de fluidos de vidrio

3.5. SERVICIOS

- Agua de servicio

3.6. MATERIAL BÁSICO

- El especificado por el profesor.

4. PROCEDIMIENTO

- Caída de Presión en Tramo Recto y Factor de Fricción

1. Familiarizarse con el equipo, ver Figura 7 Cerrar todas las válvulas.
2. Abrir V-2, V-5 y V-9 (se efectúa este paso si TA-1 está lleno de agua, si esto no sucediera. Habrá que llenar el tanque TA-1 abriendo V-1 y cerrándola inmediatamente que se haya llenado).
3. Encender el motor de la bomba. Regular el flujo en el sistema con V-3, observar el porcentaje de escala en el rotámetro.
4. Medir la diferencia de alturas en los manómetros para diferentes gastos a través del sistema.

- Longitudes Equivalentes

1. Familiarizarse con el equipo, ver Figura 7. Cerrar todas las válvulas.
2. Abrir V-2, V-7 y V-9.



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS



DE 6° SEMESTRE

| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|------------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 107 de 173 |

3. Repetir los incisos 3 y 4 del apartado anterior.
4. Cerrar todas las válvulas.

➤ Calibración de la Placa de Orificio y del Venturi

1. Abrir V-2, V-4 y V-9.
2. Encender la bomba BA-1 y con V-3 regular un porcentaje de la escala en el rotámetro.
3. Medir la diferencia de alturas en los niveles de mercurio de los manómetros en la placade orificio y en el tubo Venturi.
4. Se regula otro porcentaje del rotámetro con V-3 y se mide otra vez la diferencia de alturas en los niveles de mercurio en los manómetros y así sucesivamente.
5. Apagar la bomba y cerrar todas las válvulas.

➤ Uso de los manómetros

Para medir las diferencias de alturas en los manómetros es necesario purgarlos en la formasiguiente, ver Figura 7:

1. Abrir V-13.
2. Después abrir V-14 y V-15, dejando salir agua hasta que no se observen burbujas en los manómetros.
3. Cerrar las válvulas en el orden siguiente: Primero V-14 y V-15 por último V-13.

➤ Observaciones y recomendaciones importantes:

- Después de encender la bomba, se debe ventear el equipo abriendo V-12 y cerrándola inmediatamente después de que salga agua por ella.
- Se recomienda que los porcentajes de la escala del rotámetro sean de 10 a 100 en los intervalos que se consideren convenientes.
- Se recomienda que la apertura de las válvulas de los manómetros se haga lo más lentamente posible, para evitar que el mercurio se pase al equipo de flujo de fluidos. Además, se recomienda que antes de empezar la actividad se cercioren de que las mangueras de los manómetros no estén pegadas.



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|------------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 108 de 173 |

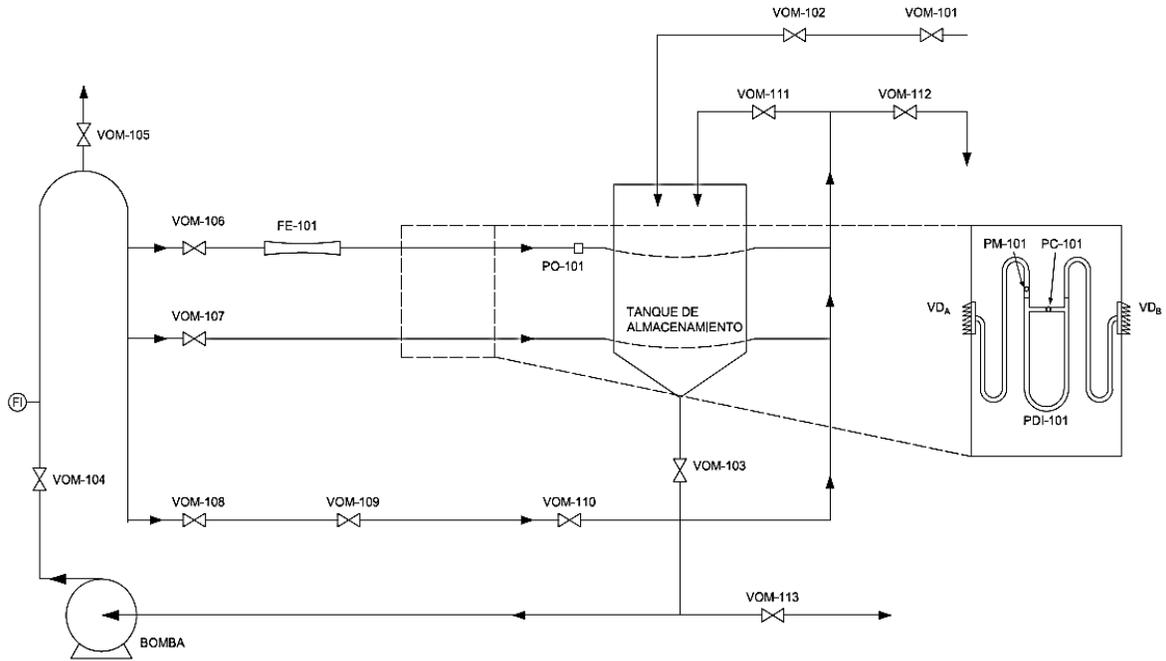


Figura 7. Equipo de flujo de fluidos de vidrio.

5. TRATAMIENTO DE DATOS

➤ PRESENTACIÓN DE DATOS

Se presentarán las siguientes tablas de datos:

➤ Para la caída de presión:

Tabla 1. Presentación de datos para la Caída de presión.

| No. Corrida | Caudal | Δh manómetro (mm) |
|-------------|--------|---------------------------|
| | | |
| | | |
| | | |



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS



DE 6° SEMESTRE

| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|------------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 109 de 173 |

➤ Para las longitudes equivalentes:

Tabla 2. Presentación de datos para las longitudes equivalentes a apertura total de las válvulas.

| No. Corrida | Caudal | Δh válvula globo (mm) | Δh válvula compuerta (mm) |
|-------------|--------|-------------------------------|-----------------------------------|
| | | | |
| | | | |
| | | | |

Tabla 3. Presentación de datos para la Longitudes Equivalentes a 3/4 de apertura de las válvulas.

| No. Corrida | Caudal | Δh válvula globo (mm) | Δh válvula compuerta (mm) |
|-------------|--------|-------------------------------|-----------------------------------|
| | | | |
| | | | |
| | | | |

Tabla 4. Presentación de datos para las longitudes equivalentes a 1/2 de apertura de las válvulas.

| No. Corrida | Caudal | Δh válvula globo (mm) | Δh válvula compuerta (mm) |
|-------------|--------|-------------------------------|-----------------------------------|
| | | | |
| | | | |
| | | | |

➤ Para los medidores de flujo:

Tabla 5. Presentación de datos para la Placa de Orificio y Venturi.

| No. Corrida | Caudal | Δh placa orificio (mm) | Δh venturi (mm) |
|-------------|--------|--------------------------------|-------------------------|
| 1 | | | |
| 2 | | | |
| N | | | |

Con los datos anteriores se procederá a calcular los parámetros restantes los cuales se presentarán, en las siguientes tablas:

➤ Para las caídas de presión:

Tabla 6. Resultado de las mediciones de las caídas de presión.

| \dot{V} | v | Re | ΔP | f |
|-----------|-----|------|------------|-----|
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |

Con los datos de la Tabla 6 construir una gráfica de Re vs f .



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|------------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 110 de 173 |

➤ Para las longitudes equivalentes:

Tabla 7. Resultados de las mediciones de las longitudes equivalentes para la válvula de globo.

| \dot{V} | ΔP | | | <i>Le absoluta</i> | | |
|-----------|-----------------------|----------------------------------|----------------------------------|-----------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| (lpm) | <i>apertura total</i> | $\frac{3}{4}$ <i>apertura</i> | $\frac{1}{2}$ <i>apertura</i> | <i>apertura total</i> | $\frac{3}{4}$ <i>apertura</i> | $\frac{1}{2}$ <i>apertura</i> |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |

Tabla 8. Resultados de las mediciones de las longitudes equivalentes para la válvula de compuerta.

| \dot{V} | P | | | <i>Le absoluta</i> | | |
|-----------|-----------------------|----------------------------------|----------------------------------|-----------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| (lpm) | <i>apertura total</i> | $\frac{3}{4}$ <i>apertura</i> | $\frac{1}{2}$ <i>apertura</i> | <i>apertura total</i> | $\frac{3}{4}$ <i>apertura</i> | $\frac{1}{2}$ <i>apertura</i> |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |

➤ Para los medidores de flujo:

Para la placa de orificio se calcularán los parámetros tras siguientes y se presentarán como se indica en la Tabla 9.

Tabla 9. Resultados de la placa de orificio.

| No. Corrida | ΔP | μ | Re_0 | \dot{V} | C_0 |
|-------------|------------|-------|--------|-----------|-------|
| 1 | | | | | |
| 2 | | | | | |
| n | | | | | |

Con los datos de la Tabla 9 se hará una gráfica de C_0 vs Re_0

Para el tubo Venturi se calcularán los siguientes parámetros y se presentarán como se indica en la Tabla 10.

Tabla 10. Resultados para el tubo Venturi.

| No. Corrida | ΔP | μ | Re_v | \dot{V} | C_v |
|-------------|------------|-------|--------|-----------|-------|
| 1 | | | | | |
| 2 | | | | | |
| n | | | | | |

Con los datos de la tabla 10 se trazará la gráfica de C_v vs Re_v



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|------------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 111 de 173 |

Para el rotámetro se calcularán los siguientes parámetros y se presentarán como, se indica en la Tabla 11.

Tabla 11. Resultados del Rotámetro.

| No. Corrida | h en (mm) del rotámetro | μ | Re_R | C_R | \dot{V} |
|-------------|------------------------------|-------|--------|-------|-----------|
| 1 | | | | | |
| 2 | | | | | |
| N | | | | | |

Con los datos la Tabla 11 se hará una gráfica de C_v vs Re_v

Para el rotámetro se hará una gráfica de altura del flotador contra gasto. Para el tubo Venturi y la placa de orificio se hará una gráfica de Q vs. ΔP .

6. MANEJO DE RESIDUOS

Los residuos generados son identificados como residuos peligrosos de acuerdo con el procedimiento SGC-FESZ-PO06 Manejo de residuos generados en los laboratorios de docencia, basado en la NOM-052-SEMARNAT-2005 que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos.

7. BIBLIOGRAFÍA

1. Mott, L. Robert, (2006). Mecánica de Fluidos, Ed. Pearson. 6ta Edición. México.
2. Binder, R. Charles, (1991). Mecánica de Fluidos, Ed. Trillas. México.
3. Cengel, A. Yunus. (2006). Mecánica de Fluidos. McGraw Hill, 2da Edición. México.
4. Gerhart, Petter. (1992). Fundamentos de Mecánica de Fluidos. 2da Edición. EUA.



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|------------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 112 de 173 |

P-3:ANÁLISIS Y OPERACIONES EN UN SISTEMA DE MOLIENDA

1.OBJETIVOS

- 1.1 Conocer un molino de martillos e identificar las partes que lo componen.
- 1.2 Realizar un análisis de distribución de tamaño del producto obtenido del molino.
- 1.3 Determinar la energía requerida para la reducción del tamaño de algunas partículas de un molino de martillos.

2. FUNDAMENTO TEORICO

Los términos utilizados para designar las partes de esta operación unitaria de subdivisión mecánica de sólidos, que es continua, se utilizan rara vez con un significado muy definido. Los términos trituración y molienda normalmente están asociadas con el significado de subdividir de mayor a menor volumen una cantidad de material, pero ninguno de los dos términos se utiliza con un significado preciso. Se pueden procesar desde pocos kilogramos por hora, operación a baja escala; hasta cientos de toneladas por hora, ejemplo en la industria minera. A pesar del empleo tan amplio de la maquinaria de trituración en el trabajo de rocas duras en minería, realmente se conoce muy poco de la teoría básica del proceso. Como en otros campos, esta laguna en la teoría y la total confianza en la observación empírica han conducido a una amplia variedad de tipos de maquinaria. Por un proceso de selección natural, más que de análisis; ciertos dispositivos se han hecho indispensables para la trituración de rocas duras y como resultado de ello, la industria de la minería en años recientes se ha normalizado prácticamente, en ciertos tipos, las máquinas para campos específicos de trituración y molienda.

➤ Clasificación de maquinaria de trituración y molienda

Debido a la gran variedad de dispositivos utilizados, es extremadamente difícil hacer una clasificación rígida de la maquinaria de trituración y molienda. La única clasificación en la que pueden establecerse limitaciones definidas de los grupos es la división de: trituradores bastos, trituradores intermedios y molinos finos. Los trituradores bastos se definen como aquellos tipos de maquinaria que pueden desarrollarse para tomar, como alimentación, masas tan grandes como se desee. Los trituradores intermedios son aquellas máquinas que pueden tomar masas grandes como alimentación y producen un producto que no pase por el tamiz de



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS



DE 6° SEMESTRE

| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|------------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 113 de 173 |

malla 200. Los molinos finos se definen como aquellas máquinas que pueden dar un producto que pase por un tamiz de malla 200.

De los diferentes dispositivos mencionados una clasificación puede comprender los siguientes tipos:

- Trituradores bastos
- Trituradores de mandíbulas o de quijada
 1. Blake
 2. Dodge
 3. Excéntrico superior

- Trituradores Intermedios
 1. De rodillos
 2. De disco,
 3. De muelas verticales
 4. Desintegradores
 5. De martillos

- Molinos finos
 1. Centrífugos,
 2. De piedras de molino
 3. De rodillos,
 4. De bolas y de tubo
 5. Molinos ultrafinos

Otra clasificación es presentada en la tabla 1, de acuerdo con el tamaño del producto final.

| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|------------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 114 de 173 |

Tabla 1. Clasificación de molinos por tamaño de producto.

| Rango de reducción de tamaño | Nombre genérico del equipo | Tipo de equipo |
|------------------------------|-----------------------------------|--|
| Grueso e intermedio | Molino de gruesos “Crushers” | <ul style="list-style-type: none"> ● De rodillos |
| Intermedio y fino | Molinos finos: “Mills o Grinders” | <ul style="list-style-type: none"> ● De martillo ● De disco de atrición ● De rodillos |
| Fino y ultrafino | “Ultrafinegrinders” | <ul style="list-style-type: none"> ● De martillos ● De bolas |

Las siguientes figuras muestran, algunos de los diseños mencionados:

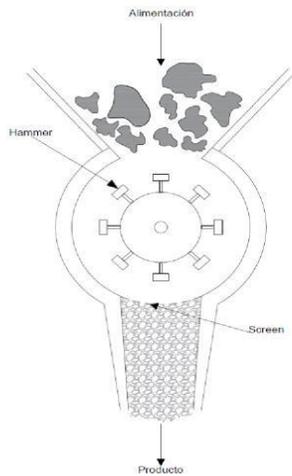


Figura 1. Molino de martillos

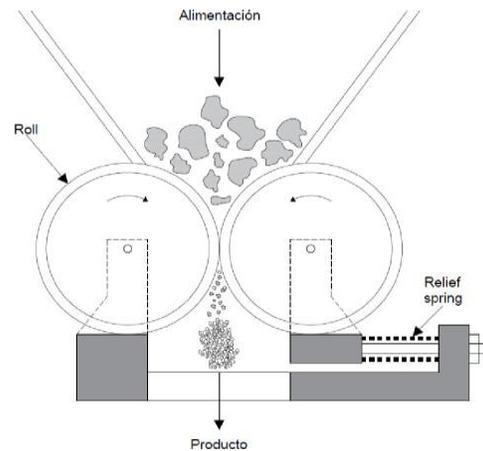


Figura 2. Molino de gruesos rodillos.

| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|------------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 23/07/2024 | 3 | 115 de 173 |

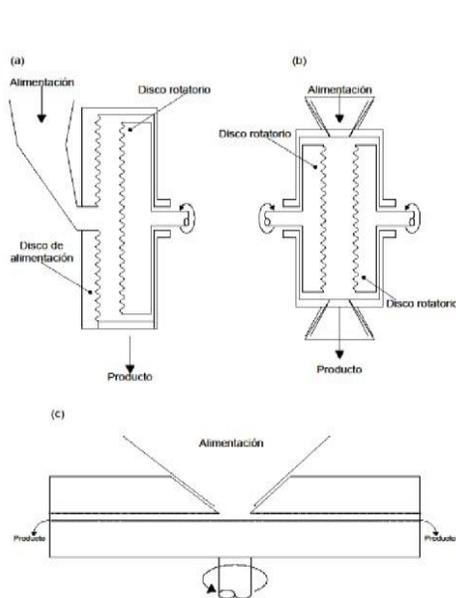


Figura 3. Molino de atrición de discos, a) molino de disco, b) molino de dos discos, c) molino tipo Buhr.

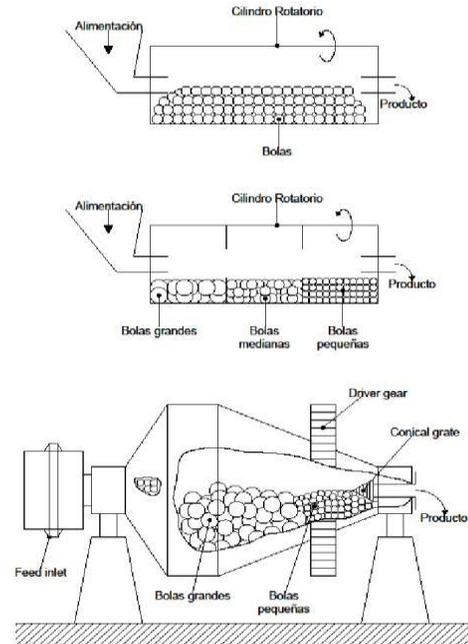


Figura 4. Molino de tambor, a) de flujo rebasante, b) molino de compartimientos, c) molino cónico.

La Tabla 2 Muestra algunas aplicaciones del *molino de martillos*:

Tabla 2. Algunos usos de los molinos de martillos

| Tamaño de molienda: | Aplicaciones: |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> ● Intermedios ● Finos/Ultrafinos | <ul style="list-style-type: none"> ● Frutas secas ● Vegetales secos ● Granos ● Pimienta ● Sal ● Especies ● Azúcar, como el “piloncillo” |

Hay otras clasificaciones que están en función de diseños de los fabricantes de las empresas que los manufacturan, así como de los que los comercializan con diferentes marcas para mercados especializados donde requieren la reducción del tamaño de materiales, o bien para los clientes que quieren compactar, padecería, para los diferentes usuarios, en diversos negocios.



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS
DE 6° SEMESTRE



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|------------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 00/00/2024 | 3 | 116 de 173 |

➤ Generalidades

Se reconoce que en esta operación unitaria hay un consumo de energía. Esta se presenta en dos etapas en la rotura tanto de materiales muy duros como muy frágiles, que pueden presentarse en la fractura a lo largo de fisuras existentes en el material, y en la formación de nuevas fisuras, con su posterior fractura.

También, se reconoce que sólo un pequeño porcentaje de la energía suministrada al equipo se usa para la operación de rotura. Se han reportado eficiencias menores al 2%, lo cual indica un proceso muy ineficiente. Gran parte de la energía suministrada se libera como calor, lo cual debe considerarse al procesar alimentos.

Estudios teóricos, realizados en etapas intermitentes, indican que la energía suministrada por unidad de masa procesada para producir un pequeño cambio de tamaño puede expresarse como una función del tipo ley de la potencia con respecto al tamaño de las partículas, como se presenta en la siguiente ecuación general:

$$\frac{dE}{dx} = \frac{K}{x^n} \quad (1)$$

Donde K es una constante y x es el tamaño de la partícula (diámetro). La ecuación (1) se conoce como la ley general de la ruptura, y una interpretación de esta se presenta en varias leyes propuestas por diferentes investigadores:

Rittinger en **1886** consideró que cuando se muele un material. La energía requerida debería guardar relación con la nueva superficie generada durante la molienda. A continuación, se presenta la deducción:

Masa inicial: $m_1 = N_1 \cdot \rho_p \cdot k_y \cdot x_1^3 \quad (2)$

Masa inicial: $m_2 = N_2 \cdot \rho_p \cdot k_y \cdot x_2^3 \quad (3)$

Donde k_y es un factor de forma de volumen (por ejemplo, si la partícula es esférica) ($k_y = \frac{\pi}{6}$), N_1 y N_2 representan el número de partículas antes y después de la molienda, respectivamente.

Como las masas iniciales y finales del material a moler y molido deben de ser iguales, puede encontrarse la siguiente relación, empleando las ecuaciones (3) y (2)



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS
DE 6º SEMESTRE



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|------------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 00/00/2024 | 3 | 117 de 173 |

$$N_2 = N_1 \cdot \frac{x_1^3}{x_2^3} \quad (4)$$

La nueva superficie generada durante la ruptura puede calcularse a partir de las superficies inicial y final:

$$\text{Área inicial:} \quad S_1 = N_1 \cdot k_s \cdot x_1^2 \quad (5)$$

$$\text{Área final:} \quad S_2 = N_2 \cdot k_s \cdot x_2^2 \quad (6)$$

Donde k_s es un factor de forma de la superficie (por ejemplo, si la partícula es esférica, ($k_s = \pi$)).

$$\text{Área generada:} \quad N_2 \cdot k_s \cdot x_2^2 - N_1 \cdot k_s \cdot x_1^2 \quad (7)$$

Reemplazando la ecuación (4) en (7) resulta:

Energía consumida:

Energía consumida por la masa es:

$$\text{Unidad de masa molida:} \quad E = \frac{E'}{m_1} = \frac{k_s}{k_v \cdot \rho_p} \cdot \left(\frac{1}{x_2} - \frac{1}{x_1} \right) = C_R \cdot \left(\frac{1}{x_2} - \frac{1}{x_1} \right) \quad (9)$$

Por esta razón en la Ley general de ruptura, la expresión de **Rittinger** puede expresarse como (uso de una potencia de $n = 2$, obteniéndose la ecuación:

$$\left(\frac{dE}{dx} = -\frac{K}{x^2} \right) \quad (10)$$

Cuando la población no es mono dispersa, (de diferentes tamaños) en la expresión de **Rittinger** debería utilizarse los diámetros medios en superficie (x_{NS}).

En la práctica se requiere una energía mucho mayor a la requerida para crear una nueva superficie, por esta razón la ecuación de **Rittinger** es una buena aproximación cuando se busca generar una alta superficie, es decir cuando se realiza una molienda muy fina del material.



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS
DE 6º SEMESTRE



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|------------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 00/00/2024 | 3 | 118 de 173 |

Hay otras ecuaciones teóricas para explicar la reducción de tamaño, como es la Ley de **Kick**, propuesta en **1885**, en donde propone que la energía requerida para moler debe ser proporcional a la reducción del tamaño, respecto al inicial.

$$\text{Tamaño inicial: } x_1 \quad (11)$$

$$\text{Tamaño final: } x_2 = x_1 - \Delta x \quad (12)$$

En otras palabras, la energía es proporcional a:

$$\Delta E \propto \frac{\Delta x}{x} \quad (13)$$

Aplicando el límite para cuando Δx tiende a 0, conduce a la ecuación de Kick (potencia 1 en la Ley general de rotura):

$$E = K \cdot \ln \left(\frac{x_1}{x_2} \right) \quad (14)$$

La ecuación (14) indica que puede usarse para moler un material de $10 \mu m$ a $1 \mu m$, o de una roca de $1 m$ a bloques de $10 cm$. Obviamente esto no es posible, en un solo equipo. La ecuación de Kick es razonable cuando se procesan materiales gruesos.

La ecuación más usada es de la Ley de Bond propuesta en 1952, la cual se expresa como sigue:

$$E = W_1 \left(\frac{10}{\sqrt{x_2}} - \frac{10}{\sqrt{x_1}} \right) \quad (15)$$

En esta ecuación x_1 y x_2 son el tamaño del tamiz (expresado en micrones) por el cual el 80% del material (de la alimentación y del producto) pasa. W_1 Se denomina índice de trabajo de Bond (Bond workindex). Este parámetro representa la energía requerida, por unidad de masa, para moler un material de tamaño infinito a un tamaño de 100 micrones. En términos de la ley general de ruptura, la ecuación de Bond puede expresarse como:

$$\frac{dE}{dx} = -\frac{K}{x^{1.5}} \quad (16)$$

La ecuación de **Bond** permite representar la molienda razonablemente para materiales gruesos y finos.



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS
DE 6° SEMESTRE



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|------------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 00/00/2024 | 3 | 119 de 173 |

Las ecuaciones presentadas permiten caracterizar la molienda de manera global, y son herramientas útiles para una primera caracterización del proceso de ruptura. De cualquier manera, si se desea conocer el proceso de separación por dispersión del producto de la molienda, el balance de materia es la única herramienta que puede proveer tal información.

Ejemplo 1

Para moler partículas de 25 mm se requiere una energía de 20 kJ/kg. Si la constante de **Kirk** es de 15.7 kJ/kg. Estimar el tamaño de las partículas obtenidas.

Solución:

Datos:

$$E = 20 \text{ kJ/kg}$$

$$x_1 = 25 \text{ kJ/kg}$$

$$K = 15.7 \text{ kJ/kg}, \text{ despejando, } x_2 \text{ de la ecuación (10)}$$

$$x_1 = \frac{x_2}{\exp\left(\frac{E}{K}\right)} = 7\text{mm}$$

3. MATERIALES Y EQUIPO

3.1 MATERIALES.

- Recipiente para 6 kg de materia prima.
- Espátula mediana.

3.2. REACTIVOS. (Definidos por el profesor)

- Bagazo de caña.
- Olotes de maíz.
- Cáscaras secas.
- Granos secos de semillas.
- Trozos de ladrillo (de 5-6 cm).

3.3.HERRAMIENTAS.

- No se utilizan herramientas



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS
DE 6º SEMESTRE



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|------------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 00/00/2024 | 3 | 120 de 173 |

3.4. EQUIPO.

- Molino de Martillos, ver esquema en Anexo 3.3.1.
- Tamizadora.
- Juego de Tamices, de la misma marca.
- Dos sacos, de lona o nylon con asas para recibir el producto del equipo.

3.5. SERVICIOS

- Energía Eléctrica.

3.6. MATERIAL BÁSICO

- En esta práctica no se utiliza material básico

4. PROCEDIMIENTO

1. Familiarizarse con el equipo, conociendo sus partes internas.
 2. Colocar los sacos en las dos salidas del equipo, fijándolos con una cuerda.
 3. Cerrar la tapa de la tolva.
 4. Accionar el interruptor eléctrico del motor del equipo.
 5. Alimentar por la tolva, la materia prima poco a poco, verificando que cuando se llene un primer saco, mover la manija del equipo para descargar el producto al otro saco.
 6. Cuando se haya recolectado el material introducido, apagar el motor.
 7. Identificar la intensidad y tensión de corriente (amperaje y voltaje), la potencia eléctrica y determinar el consumo, estimando un factor de potencia de $\varphi = 0.8$.
- Observaciones y recomendaciones
1. En la operación es importante tomar las siguientes medidas de seguridad: Los alumnos que están cerca del equipo deben tener: bata, casco, guantes de carnaza, careta transparente, tapa boca, y tapa oídos.
 2. Cuando el equipo esté operado no meter las manos dentro del equipo, ni acercarse a la cara, ya que eventualmente el material es proyectado hacia afuera de la tolva.
 3. No hacer cambios en el equipo si estos no son autorizados por el responsable de la planta piloto.
 4. Al terminar de usar el equipo limpiar la parte interna del equipo, así como el piso donde haya caído material alimentado y producto, así como los sacos en los que se colectó el producto.



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS
DE 6° SEMESTRE



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|------------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 00/00/2024 | 3 | 121 de 173 |

- Determinación del tamaño de partícula mediante tamizado.
 - Tomar tres o más muestras de 200-300 g, del material molido.
 - Cada muestra se coloca en la malla superior de un juego de tamices de la misma marca, desde el mayor gramaje como el No. 10, intermedios que pueden ser, 40, 80, 120, 170, 230. 400, la selección se realiza por experiencia del profesor, con cada material determinado.
 - Arrancar la tamizadora, con un tiempo de operación programado de 15-20 minutos
 - Recolectar la cantidad de material retenido en cada tamiz y pesarlos, para calcular el peso total del producto obtenido.

5. TRATAMIENTRO DE DATOS

➤ PRESENTACIÓN DE DATOS

Se realizan con las ecuaciones presentadas en la sección de generalidades, con las ecuaciones de **Rittinger**, **Kick** o **Bond**. También aplicando un **Balance de Materia y Energía**, considerando que todo el material que entra sale. Se requieren muchos análisis particulares de diversas muestras. Los datos recolectados se tabulan en las Tablas siguientes:

Tabla 3. Datos para un Análisis de Partículas

| Muestra 1 | | | Muestra 2 | | | Muestra 3 | | |
|-----------|---------------|----------|-----------|---------------|----------|-----------|---------------|---------|
| No. Malla | Diámetro (cm) | Peso (g) | No. Malla | Diámetro (cm) | Peso (g) | No. Malla | Diámetro (cm) | Peso(g) |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |

Con los datos de la Tabla 3 y un análisis pertinente se presentan los siguientes resultados.



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS
DE 6° SEMESTRE



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|------------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 00/00/2024 | 3 | 122 de 173 |

a.- Análisis diferencial

Tabla 4. Resultados del análisis diferencial

| Muestra 1 | | | Muestra 2 | | | Muestra 3 | | |
|-----------|------------------|--------|-----------|------------------|--------|-----------|------------------|--------|
| No. Malla | $\Delta\theta_n$ | DP_n | No. Malla | $\Delta\theta_n$ | DP_n | No. Malla | $\Delta\theta_n$ | DP_n |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |

b.- Análisis acumulativo

Tabla 5. Resultados del análisis acumulativo

| Muestra 1 | | | Muestra 2 | | | Muestra 3 | | |
|-----------|-------------|-------|-----------|-------------|-------|-----------|-------------|-------|
| Malla | \emptyset | D_p | Malla | \emptyset | D_p | Malla | \emptyset | D_p |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |

Con los datos del análisis diferencial, se grafica $\Delta\emptyset_n$ vs DP_n en papel logarítmico y se ajustan los puntos a una recta para calcular los valores de K, E' y E para cada muestra. Que son similares a los predichos mediante la Ecuación de **Rittinger**.

6. MANEJO DE RESIDUOS

Los residuos generados son identificados como residuos peligrosos de acuerdo con el procedimiento SGC-FESZ-PO06 Manejo de residuos generados en los laboratorios de docencia, basado en la NOM-052-SEMARNAT-2005 que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos.



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS
DE 6º SEMESTRE



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|------------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 00/00/2024 | 3 | 123 de 173 |

7. BIBLIOGRAFÍA

1. Mc. Cabe L Warren. (1978) *Operaciones Básicas De Ingeniería Química* Ed. En español editorial Reverté, Barcelona.
2. Perry H. Robert *Manual del Ingeniero Químico* tomo V, sexta edición, McGraw-Hill, México.
3. Dekker Lu, G. Q. (2004) *Modeling and simulation of material selection and mechanical design*/New York: M. Nanoporus materials, London: imperial college press.
4. Austin, L.G., Trass O., (1997) *Size Reduction of Solids Crushing and Grinding Equipment*, Capítulo 12 en Handbook of Powder Science & Technology, editado por Fayed, M.E., Otten, L., Chapman & Hall, N.Y.
5. Gupta, A., Yan, D., (2006) *Mineral Processing and Operation*, Elsevier.
6. Litster, J. Ennis, B., Liu, L., (2004) *The Science and Engineering of Granulation Process*, Kluwer Academic Publishers.
7. Ramkrishna, D., Population Balances. (2000) *Theory and Applications to Particulate Systems in Engineering*, Academic Press, USA.



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|------------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 00/00/2024 | 3 | 124 de 173 |

P-4: ANÁLISIS Y OPERACIÓN DE UN SISTEMA DE FILTRADO

1. OBJETIVOS

- 1.1. Identificar las variables que intervienen en la operación unitaria de filtración.
- 1.2. Analizar el comportamiento de un filtro prensa que opera a presión constante con base a los modelos matemáticos.
- 1.3. Realizar el balance de materia del filtro de marcos y placas.

2. FUNDAMENTO TEÓRICO

La filtración es una operación unitaria en la que el componente insoluble de una suspensión sólido-líquido se separa del líquido al hacerlos pasar por una membrana porosa (medio filtrante) que retiene las partículas sólidas, en una superficie, o dentro de una estructura, como los “marcos de un filtro prensa”; mediante la aplicación de una fuerza impulsora en un periodo de tiempo determinado. A los sólidos separados se les llama “torta”. En algunas ocasiones el líquido “el filtrado” constituye el producto deseado. Las variables más importantes que afectan al proceso de este tipo de separación mecánica, que deben considerarse para operar, seleccionar o diseñar un equipo como estos son:

- Concentración de sólidos
- Tamaño de partícula
- Viscosidad, densidad y pH
- Temperatura

VARIABLES DE DISEÑO:

- Área de filtración
- Caída de presión a través del filtro
- Resistencia del medio filtrante
- Cantidad de sólidos retenidos
- Flujo de filtrado
- Humedad de la torta
- Tiempo de lavado

La sedimentación es la remoción de partículas sólidas suspendidas de una suspensión mediante asentamiento por gravedad.



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS
DE 6º SEMESTRE



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|------------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 00/00/2024 | 3 | 125 de 173 |

➤ Ecuaciones básicas sobre filtración

En un equipo de filtración es importante calcular su capacidad de operación, que resulta al analizar la diferencial de presión (ΔP) o fuerza impulsora a través del medio filtrante, donde se genera una resistencia (R) al flujo, así como la forma que opera el equipo por su diseño mecánico. La ecuación general de filtración se expresa como:

$$q \propto \frac{(\Delta P)}{R} \quad (1)$$

$$q = K' \cdot \frac{\Delta P}{R} \quad (2)$$

Donde:

k' = constante de proporcionalidad

Durante la filtración los sólidos se depositan sobre el medio filtrante, y el espesor de la capa de sólido (torta) se incrementa, al mismo tiempo se forman canales o capilares entre los sólidos por donde fluye el filtrado en su camino hacia la salida. La resistencia al flujo de la suspensión se incrementa debido al aumento del espesor de la torta depositada, consecuentemente el flujo de filtrado disminuye, si la suspensión se alimenta a presión constante.

La ecuación que permite cuantificar la velocidad del fluido en canales es la ecuación de Poiseuille, quién la publicó en 1842, siendo una relación matemática del flujo de un líquido a través de capilares:

$$q = \frac{\pi \cdot r^4 (\Delta P)}{8(\mu \cdot L)} \quad (3)$$

Dónde:

q =Flujo del fluido, m^3/s

r =Radio del capilar, m

(ΔP) =Caída de presión a través del capilar, Pa

μ =Viscosidad dinámica del fluido, $Pa \cdot s$

L =Longitud del capilar, m

La importancia de esta ecuación y su uso es que permite predecir el efecto potencial en la disminución del tamaño del capilar sobre el flujo y en el caso de filtración sobre la resistencia de la torta formada.



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS
DE 6º SEMESTRE



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|------------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 00/00/2024 | 3 | 126 de 173 |

Posteriormente Darcy, en 1856, describió la velocidad del flujo de aguas subterráneas en estratos del suelo mediante la siguiente ecuación:

$$u = (K_1) \left(\frac{\Delta P}{L} \right) \quad (4)$$

Donde:

u = Velocidad de flujo, m/s

K_1 = Coeficiente de permeabilidad del lecho, m/s

ΔP = Caída de presión a través del lecho, Pa

L = Espesor del lecho poroso, m

Desde un punto de vista práctico experimental es más importante determinar el flujo de filtrado q , o caudal que la velocidad del fluido u .

Si el flujo volumétrico en un canal se define como:

$$q = \frac{dV}{dt} = u \cdot A \quad (5)$$

Donde:

$\frac{dV}{dt}$ = Es el cambio de volumen con respecto al tiempo, flujo volumétrico, m^3/s

A = Área transversal del canal, m^2

Entonces, si la ecuación (4) se multiplica por el área transversal A y se introduce la viscosidad del fluido como otra resistencia al flujo y se sustituye en la ecuación (5), se obtiene la ecuación modificada de Darcy:

$$q = \frac{dV}{dt} = K_1 \cdot \frac{(\Delta P)}{\mu \cdot L} \cdot A \quad (6)$$

Si la ecuación de Poiseville, (3) se multiplica también por el área se puede presentar como:

$$q = \frac{dV}{dt} = \frac{\pi r^4 (\Delta P)}{8 \cdot \mu \cdot L} \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (7)$$

Agrupando las constantes, también puede presentarse como:

$$q = \frac{dV}{dt} = K \cdot \frac{(\Delta P)}{\mu \cdot L} \cdot A \quad (8)$$



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS
DE 6º SEMESTRE



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|------------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 00/00/2024 | 3 | 127 de 173 |

Entonces las ecuaciones (6) y (8) son equivalentes y el coeficiente de permeabilidad K_{per}

puede presentarse como:

$$K_{per} = \frac{\mu \cdot L}{(\Delta P) \cdot A \cdot \frac{dV}{dt}} \quad (9)$$

Esta es la primera aportación de la teoría para determinar la permeabilidad del lecho y semide como la cantidad de fluido que pasa, en la unidad de tiempo. Para algunos autores de materiales reportados la unidad de permeabilidad es el Darcy.

Aplicación de las ecuaciones desarrolladas a la filtración para:

- Determinar la resistencia, del equipo.
- Determinar los efectos de la presión en la resistencia de la torta.

Determinar las resistencias, de la torta y del medio filtrante.

Si la permeabilidad es la facilidad con que fluye el filtrado, el recíproco es la resistencia al paso del filtrado:

$$K = \frac{1}{R} \quad (10)$$

La resistencia tiene dos componentes, el de los sólidos depositados (α), torta y el otro, del medio filtrante (r).

Resistencia de torta, se obtiene, empezando con la ecuación (8), que puede escribirse como:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{(\Delta P)}{\mu \cdot L} \cdot A \quad (11)$$

Despejando α :

$$\alpha = \frac{A(\Delta P)}{\mu \cdot L} \cdot \left(\frac{dt}{dV} \right) \quad (12)$$

La ecuación (12) permite determinar la permeabilidad a través de la torta de un espesor fijo L , pero este cambia continuamente, suponiendo que cada capa que se deposita es constante, entonces, el producto del espesor L por el área de filtración, es el volumen de la torta depositada (v) por unidad del correspondiente volumen filtrado.



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS
DE 6º SEMESTRE



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|------------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 00/00/2024 | 3 | 128 de 173 |

Si V es el volumen total de filtrado, entonces el volumen total de la torta depositada es:

$$A \cdot L = V \cdot v \quad (13)$$

Despejando L :

$$L = \frac{V \cdot v}{A} \quad (14)$$

La ecuación (14), se puede sustituir en la (12), quedando la resistencia de la torta:

$$\alpha = \frac{A^2 \cdot (\Delta P)}{\mu \cdot v \cdot V} \left(\frac{dt}{dV} \right) \quad (15)$$

➤ Resistencia del medio filtrante:

Sperry, D.R., fue de los primeros en establecer que la resistencia a la filtración está compuesta por dos resistencias en serie, la de la torta y la del medio filtrante, esta consideración se sustituye en la ecuación (15) y se obtiene:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\Delta P \cdot A^2}{\mu \cdot (\alpha \cdot v \cdot V + r \cdot A)} \quad (16)$$

Al poner el recíproco de la ecuación (16), queda:

$$\frac{dt}{dV} = \frac{\mu \cdot \alpha \cdot v}{\Delta P \cdot A^2 \cdot g_c} \cdot V + \frac{\mu \cdot r}{\Delta P \cdot A \cdot g_c} \quad (17)$$

Al separar variables e integrar desde $t = 0$ a $t = t$ y $V = 0$ a $V = V$ queda:

$$\int_0^t dt = \frac{\mu \cdot \alpha \cdot v}{\Delta P \cdot A^2 \cdot g_c} \cdot \int_0^V V dV + \frac{\mu \cdot r}{\Delta P \cdot A \cdot g_c} \cdot \int_0^V dV \quad (18)$$

De la integración de la ecuación (18), a presión constante, se puede despejar el tiempo de filtrado t :

$$t = \frac{\alpha \mu v}{2 \Delta P A^2 g_c} \cdot V^2 + \frac{\mu r}{\Delta P A g_c} \cdot V \quad (19)$$

Donde:

V = Volumen de filtrado, en (m^3) recolectado en el tiempo (s)

ΔP = Caída de presión, Pa



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS
DE 6° SEMESTRE



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|------------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 00/00/2024 | 3 | 129 de 173 |

A = Área de filtración en, m^2

μ = Viscosidad del filtrado, $Pa \cdot s$

g_c = Factor de conversión de 9.81, $Kg \cdot m / Kg_f \cdot s^2$

Al medir el tiempo desde que cae la primera gota de filtrado hasta que se termina la filtración, se obtienen una serie de datos que, al hacer una gráfica de volumen de filtrado contra tiempo, se obtiene la gráfica de la Figura 1. Aquí para $t = 0$, $V = 0$

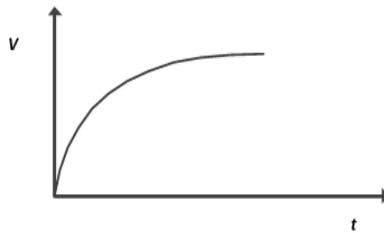


Figura 1. Gráfica de la relación de volumen filtrado (v) vs tiempo (t).

En una filtración a presión constante, considerando un valor constante de todas las variables excepto el volumen de filtrado (V), la ecuación (17) puede escribirse como:

$$\frac{dt}{dV} = K_1 \cdot V + K_2 \quad (20)$$

$$K_1 = \frac{\mu \cdot \alpha \cdot v}{\Delta P \cdot A^2 \cdot g_c} \quad (21)$$

$$K_2 = \frac{m_r}{\Delta P A g_c} \quad (22)$$

Si durante una prueba experimental se obtienen datos de la variación del volumen de filtrado (dV) para intervalos de tiempo (dt), al graficar dt/dv vs V se obtiene una línea recta como la que se muestra en la Figura 2.

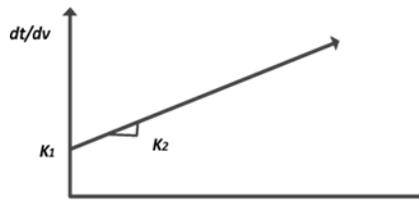


Figura 2. Gráfica de la relación dt/dv vs V .

En donde la pendiente de la recta es K_1 y la ordenada al origen es K_2 , definidos anteriormente en las ecuaciones (21) y (22), respectivamente.



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS
DE 6º SEMESTRE



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|------------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 00/00/2024 | 3 | 130 de 173 |

Con estos valores de K_1 y K_2 se pueden despegar α y r , esto es:

$$\alpha = K_1 \cdot \frac{A^2(\Delta P) \cdot g_c}{\mu \cdot v} \quad (23)$$

$$r = K_2 \cdot \frac{A \cdot (\Delta P) \cdot g_c}{\mu} \quad (24)$$

Se pueden hacer experimentalmente varias determinaciones a diferentes presiones, de esta manera calcular la variación de la resistencia con respecto a la presión.

Otra determinación importante es medir los efectos de la compresión con respecto a la resistencia de la torta, cuando la torta es compresible. La correlación propuesta por Almy y Lewis es la siguiente:

$$\alpha = \alpha_0 \cdot (\Delta P)^s \quad (25)$$

Donde:

α_0 = Resistencia específica a una presión de cero, m/Kg

s = Factor de compresibilidad (sin dimensiones).

Cuando el valor de s es igual a cero, se dice que la torta es incompresible; cuando este valor es mayor de cero, se dice que la torta es compresible, como los materiales que se usan en los clarificadores de agua residual.

3. MATERIALES Y EQUIPO.

3.1. MATERIALES.

- 30 lonas de algodón, poliéster o nylon, del tamaño de los marcos.
- 1 agitador para ayudar al desazolve del tanque de alimentación.
- 3 probetas Graduadas de 2L
- 3 cubetas de Plástico.
- Espátula (1 por persona)
- Cronómetro (reloj de mano o celular)

3.2. REACTIVOS.

- Carbonato de Calcio, 10 kg.

Nota: reutilizar el carbonato que está en el tambo TA-402 .



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|------------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 00/00/2024 | 3 | 131 de 173 |

3.3. EQUIPO.

- Filtro prensa (ver apartado del filtro)
- 1 balanza granataria
- 1 Horno o mufla
- Charolas de lámina galvanizada

3.4. SERVICIOS AUXILIARES.

- Agua de servicio.
- Aire comprimido.
- Electricidad.

3.5. MATERIAL BÁSICO.

- Papel aluminio

➤ Filtro Prensa

Un tanque de alimentación, de acero al carbón, abierto con, diámetro interno de 83 cm, altura recta 49.5 cm, con tapa inferior en forma cónica 49.5 cm, al cono tiene soldado a un cople de $\frac{3}{4}$ " , para alimentar a la moto bomba y para drenar el tanque con una válvula de compuerta, de 1", el equipo está anclado al piso en una estructura de ángulos de acero al carbón, ver el esquema de flujo en la figura 3.

- Tubería y sus accesorios de tubería de acero galvanizado, cédula 40, alimentan a la succión de una moto bomba de c-a de $\frac{3}{4}$ HP. 220 V, 2.5 A, con un factor de potencia $\varphi = 0.8$, 60 Hz, 3500 RPM.

La tubería y sus accesorios son parte del equipo, Equipo, con nueve placas y siete marcos, construido de acero al carbón, el área de cada placa corrugada es de (18 x 18) cm², con un espesor de 1 cm. el área de cada marco hueco es de (15 x 15) cm, con un espesor de 1.5 cm, dando un volumen estimado de torta húmeda en el interior de cada marco de 937.5 cm³, el total de los siete marcos es 6,562.5 cm³; cada marco tiene cuatro aperturas en la entrada del efluente dentro del marco y se va acumulando la torta húmeda, ya que el medio filtrante (MF) impide que salgan partículas de sólido, según, la trama de la tela que se usa como (MF) por una apertura inferior sale el líquido que no retuvo el (MF), que normalmente son las lonas de algodón o nylon, o mixtas, de 10 micras que se mide en el tiempo en la descarga del efluente en periodos de tiempo estimados conforme se va formando la torta. El equipo se encuentra montado en un soporte de hierro, anclado al piso, en donde al término de la operación se recibe la torta, del medio filtrante y las fugas salen del equipo pasan a la tapa inferior del recipiente que es parte del soporte metálico del equipo, ver Figura 4.

| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|------------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 00/00/2024 | 3 | 132 de 173 |

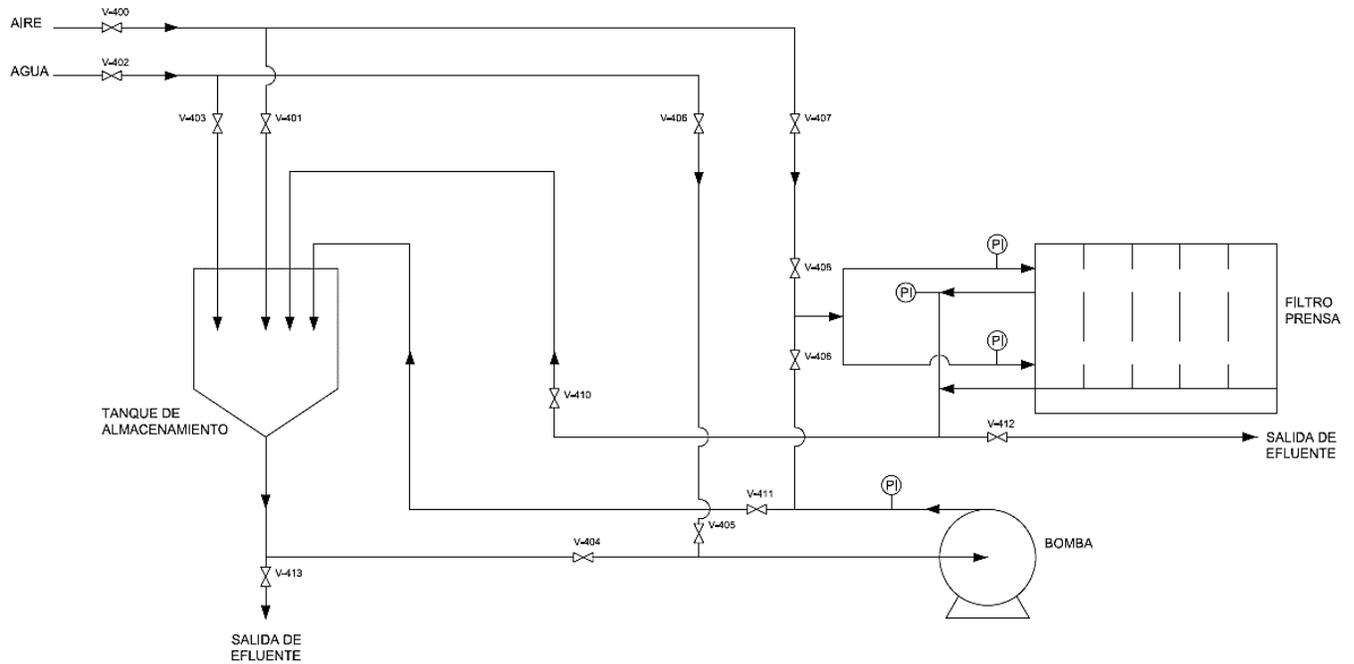


Figura 3. Esquema de sistema flujo de equipo que está en planta piloto.

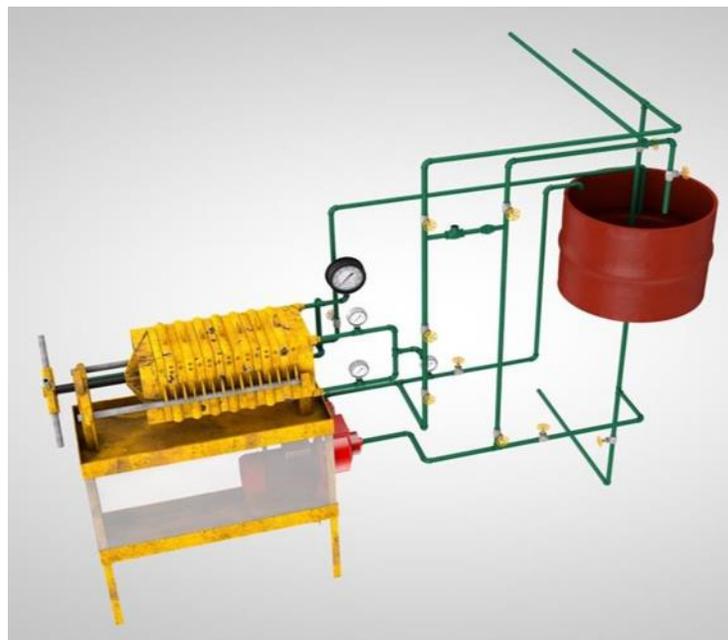


Figura 4. Imagen del filtro prensa.

| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|------------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 00/00/2024 | 3 | 133 de 173 |

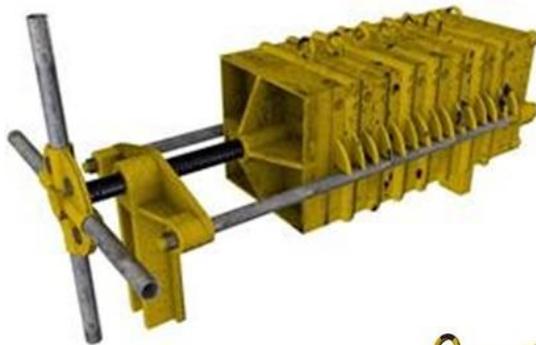


Figura 5 Isométrico del filtro prensa

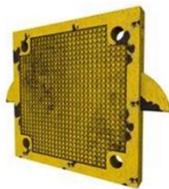


Figura 5a. Placa



Figura 5b. Marco

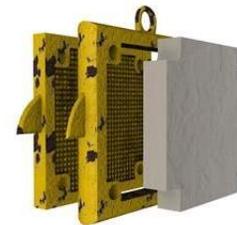


Figura 5c. Placa-marco con el material filtrado

4. PROCEDIMIENTO

1. Familiarizarse con el equipo.
2. Llenar el tanque de almacenamiento (tanque rojo) con agua para identificar su volumen.
3. Preparar una suspensión de 8kg de Carbonato de Calcio (CaCO_3). Si se cuenta con la suspensión proveniente del tanque de residuos TA-402 determinar la concentración.
4. Realizar una prueba hidrostática alineando la tubería para verificar que no se encuentre obstruida y que no haya fugas en el filtro prensa.
5. Utilizar el aire comprimido para homogenizar en la suspensión el tanque de alimentación.
6. Colocar las placas, los marcos y dobles medios filtrantes en el filtro prensa, verificando la orientación de acuerdo con la **figura 5c.** para evitar fugas.
7. Alinear los orificios del medio filtrante, marco y placa, apretando con el maneral.
8. Verter el carbonato en el tanque de almacenamiento de acuerdo con la **figura 5ª y 5b.**
9. Después de la prueba hidrostática previamente realizada, accionar la bomba de alimentación, recirculando la suspensión para homogenizar durante 20 minutos y posteriormente alimentar al filtro.
10. Mantener la operación a una presión constante en la alimentación al filtro



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS
DE 6º SEMESTRE



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|------------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 00/00/2024 | 3 | 134 de 173 |

- hasta el final de la operación.
11. Para la toma de muestras, cerrar la recirculación y abrir la válvula de salida V-412. Tomar alícuotas constantes midiendo 2L en un determinado tiempo, apoyándose con una cubeta para retirar la probeta.
 12. Medir el flujo volumétrico del filtrado.
 13. Una vez terminada la experimentación, solo apagar la bomba y circular aire por el medio filtrante para disminuir la humedad de la torta.
Nota: Cuidar que se siga homogenizando manualmente la suspensión del tanque de almacenamiento rojo.
 14. Retirar los marcos y con ayuda de las espátulas, recolectar las tortas y pesarlas.
 15. Determinar la humedad de una muestra representativa.
 16. El remanente de la torta se regresa al tanque de residuos TA-402, el total de la torta se seca de manera natural y posteriormente se entrega al técnico.
 17. Dejar limpio el equipo.

5. TRATAMIENTO DE DATOS

La información experimental se presenta en las tablas siguientes:

Tabla 1. Registro de datos de la operación de filtración

| Volumen filtrado (m^3) | Tiempo (s) | ΔV filtrado (m^3) | Δt (s) | $\frac{\Delta V}{\Delta t}$, ($\frac{m^3}{s}$) |
|----------------------------|------------|-------------------------------|----------------|---|
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |

A partir de los datos de la Tabla 1 se llena la Tabla 2:

Tabla 2. Valores de variables determinados experimentalmente.

| | |
|---|--|
| Concentración de la suspensión (kg/m^3) | |
| Dimensiones físicas de los marcos (m) | |
| Área de filtración experimental (m^2) | |
| Volumen de filtrado (m^3) | |
| Peso de los sólidos húmedos retenidos (kg) | |
| Contenido de humedad de la torta (m^3) | |
| Peso de los sólidos secos retenidos (kg) | |



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS
DE 6º SEMESTRE



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|------------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 00/00/2024 | 3 | 135 de 173 |

6. MANEJO DE RESIDUOS

Los residuos generados son identificados como residuos peligrosos de acuerdo con el procedimiento SGC-FESZ-PO06 Manejo de residuos generados en los laboratorios de docencia, basado en la NOM-052-SEMARNAT-2005 que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos.

7. BIBLIOGRAFÍA

1. Geankoplis, C. J. (1998). *Procesos de transporte y operaciones unitarias*. Compañía Editorial Continental.
2. Cases, M. V., & Hens, A. G. (1988). *Técnicas analíticas de separación*. Reverté.
3. McCabe, W; Smith J. (2007) "*Operaciones Unitarias en Ingeniería Química*",
4. Editorial McGraw-Hill
5. King, C. J. (2003). *Procesos de separación*. Reverté.
6. Foust, AS, Wenzel, LA, Clump, CW, Maus, L., y Andersen, LB (2008). *Principios de operaciones unitarias*. John Wiley & Sons.
7. Manual de Operación del Filtro Prensa elaborado en el PAPIME-105219



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|------------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 00/00/2024 | 3 | 136 de 173 |

P-5: ANÁLISIS DE UN SISTEMA DE INTERCAMBIO DE CALOR (VIDRIO)

1. OBJETIVOS

- 1.1. Obtener experimentalmente el coeficiente de transferencia de calor del equipo en posición horizontal.
- 1.2. Determinar la variación del coeficiente global de transferencia de calor con respecto al número de Reynolds.
- 1.3. Comparar los datos experimentales con los que predice la teoría.

2. FUNDAMENTO TEORICO

Se denomina transferencia de calor al transporte de energía dentro de un sistema o de un sistema a otro, debido a un gradiente de temperatura. Aun cuando el calor transferido no puede ser medido ni observado directamente, sus efectos como la variación del contenido de energía interna de los sistemas involucrados, permiten su cuantificación.

La transferencia de calor puede llevarse a cabo mediante tres mecanismos distintos: *conducción*, *convección* y *radiación*. En la mayoría de los procesos reales, la transferencia de calor depende de que ocurran dos o incluso los tres mecanismos simultáneamente.

A.- Mecanismo de Conducción

Se presenta cuando la transferencia de calor es realizada mediante colisiones de los átomos que forman la materia. La conducción es la transferencia de energía desde las partículas más energéticas hacia las menos energéticas de una sustancia, causada por las interacciones entre las mismas.

La velocidad de transferencia de calor por conducción está determinada por la Ley de Fourier (macroscópicamente), la cual establece que la variación temporal de la transferencia de calor por conducción en una dirección dada es directamente proporcional al área normal a la dirección del flujo de calor, A y al gradiente de la temperatura en esa dirección, dT . Para un flujo unidimensional de calor, en la dirección, r en coordenadas cilíndricas se tiene (Figura 1):

$$\frac{dQ_x}{dt} = -kA \frac{dT}{dr} \quad (1)$$

| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|------------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 00/00/2024 | 3 | 137 de 173 |

Donde:

$\frac{dQ_x}{dt}$ = Velocidad de transferencia de calor por conducción que atraviesa el área A , en la dirección x

dr = Espesor, m

k = Constante de proporcionalidad llamada conductividad térmica, $\frac{W}{m-K}$

T = Temperatura, K

dt = Tiempo, s.

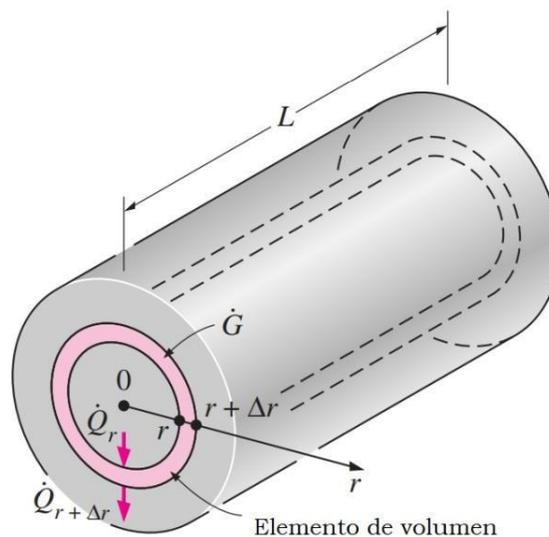


Figura 1. Volumen de control sistema térmico (Fuente: Cengel, Transferencia de calor)

La convección es la transferencia de energía causada por el movimiento de un fluido. Cuando un cuerpo está en contacto con un medio líquido o gaseoso que tiene una temperatura más baja o alta, se transfiere calor entre la superficie del cuerpo y el fluido. El intercambio de calor produce una variación en la densidad del fluido. Este cambio es grande en el caso de un gas y está expresado por las leyes de los gases, de modo que las fuerzas de flotación del gas positivas (o negativas) adyacentes a la superficie caliente (o fría) hacen que se mueva. Entonces, una nueva cantidad de fluido entra en contacto con la superficie y se repite el proceso. Este movimiento de la masa del fluido adyacente a la superficie se denomina convección. En el caso de los líquidos la variación de densidad es menor, pero la convección se induce también en estos materiales. Un ejemplo claro de este fenómeno es el termosifón, utilizado para mover el fluido de trabajo en los tubos de los colectores solares (agua, agua con etilenglicol, metanol, acetona, mezclas de estas sustancias).



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS
DE 6º SEMESTRE



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|------------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 00/00/2024 | 3 | 138 de 173 |

Hay dos tipos de convección: la convección natural y la convección forzada.

En la **convección natural**, la fuerza motriz procede de la variación de densidad en porciones del fluido, como consecuencia del contacto con una superficie a temperatura diferente, lo que da lugar a fuerzas tensoriales. El fluido próximo a la superficie adquiere una velocidad debida únicamente a esta diferencia de densidades, sin ninguna influencia de fuerza motriz exterior.

La convección natural ayuda a explicar muchos de los sistemas naturales de la Tierra, como las corrientes oceánicas y las capas atmosféricas. Por ejemplo, cuando la superficie terrestre absorbe la radiación solar aumenta su temperatura, y el aire que está en contacto con el suelo es casi siempre más caliente que el aire en las capas superiores. El calor incrementa los espacios entre las moléculas, haciendo que el aire más ligero se eleve por encima de la superficie. Como el aire se aleja de la superficie caliente de tierra, las moléculas se enfrían y se comprimen. Sobre este aire frío actúa la gravedad que lo lleva hacia abajo, donde se calienta de nuevo y comienza un nuevo ciclo.

La **convección forzada**, se presenta cuando una fuerza motriz exterior mueve un fluido sobre una superficie que se encuentra a una temperatura mayor o menor que la del fluido. Esa fuerza motriz exterior puede ser el viento, un ventilador, una bomba, etc. Debido a que la velocidad del fluido en la convección forzada es mayor que en la convección natural se transfiere, por lo tanto, una mayor cantidad de calor para un determinado gradiente de temperatura.

La transferencia de calor por convección se determina mediante la Ley de enfriamiento de Newton considerando que $T_0 > T_f$:

$$\frac{dQ}{dt} = h_{conv} A (T_0 - T_f) \quad (2)$$

Donde:

$\frac{dQ}{dt}$ = Velocidad de transferencia de calor por convección, W

h_{conv} = Coeficiente de transferencia de energía por convección, W/m^2K , depende de la rugosidad, forma y posición de la superficie, así como de las características del flujo.

T_0 = Temperatura de la superficie, °C



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|------------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 00/00/2024 | 3 | 139 de 173 |

T_f = Temperatura del fluido, °C

A = Área de superficie, m^2

➤ Balances de energía

El tratamiento cuantitativo de los problemas de transmisión de calor se fundamenta en los balances de energía. La mayoría de los equipos de transmisión de calor operan en un régimen estacionario, y este tipo de operación será el considerado en las siguientes ecuaciones:

La ecuación general de balance de energía en un volumen de control total se plantea en la ecuación:

$$m_1 \left(h_1 + \frac{v_1^2}{2} + z_1 g + \frac{p_1}{\rho} \right) + Q = m_2 \left(h_2 + \frac{v_2^2}{2} + z_2 g + \frac{p_2}{\rho} \right) + \tau \quad (3)$$

Aplicando la ecuación (3) en uno de los fluidos del intercambiador de calor y considerando iguales la energía cinética, potencial y de presión en los estados termodinámicos 1 y 2 y despreciando la disipación viscosa:

$$\frac{v_1^2}{2} = \frac{v_2^2}{2}; \quad z_1 g = z_2 g; \quad \frac{p_1}{\rho} = \frac{p_2}{\rho}; \quad \tau = 0$$

Por lo tanto: $m_1 h_1 + Q = m_2 h_2$

Entonces:

La transferencia de calor ganada o cedida por el fluido será:

$$Q = m \cdot (h_2 - h_1) \quad (4)$$

Donde:

m = Flujo másico, $\frac{kg}{s}$

h_2 = Entalpía específica en el estado 2, $\frac{kJ}{kg}$

h_1 = Entalpía específica en el estado 1, $\frac{kJ}{kg}$

La ecuación (4) puede escribirse para cada una de las corrientes que circulan a través de un intercambiador de calor, suponiendo que el equipo está aislado convenientemente



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS
DE 6º SEMESTRE



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|------------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 00/00/2024 | 3 | 140 de 173 |

Para el fluido caliente:

$$Q_c = m_c (h_2 - h_1) \quad (5)$$

Para el fluido frío:

$$Q_f = m_f (h_2 - h_1) \quad (6)$$

Donde:

Q_c = Calor transferido por el fluido caliente, $\frac{kJ}{s}$ ó kW

Q_f = Calor ganado por el fluido, $\frac{kJ}{s}$ ó kW

m_c = Flujo másico del fluido caliente $\frac{kg}{s}$

m_f = Flujo másico masa del fluido frío $\frac{kg}{s}$

h_c = Entalpía específica del fluido caliente $\frac{kJ}{kg}$

h_f = Entalpía específica del fluido frío $\frac{kJ}{kg}$

Ahora bien, el calor cedido por el fluido caliente lo gana el fluido frío, por lo tanto:

$$Q_c = Q_f \quad (7)$$

0

$$m_c (h_1 - h_2) = m_f (h_2 - h_1) \quad (8)$$

Para el cálculo de las entalpías, se consideran capacidades caloríficas constantes del fluido caliente y frío, para fluidos sin cambio de fase la ecuación (8) se presenta en la forma siguiente:

$$m_c \cdot Cp_c \cdot (T_2 - T_1) = m_f \cdot Cp_f \cdot (T_1 - T_2) \quad (9)$$

Donde:

Cp_c y Cp_f ; son las capacidades caloríficas del fluido caliente y frío, respectivamente. $\frac{kJ}{kg \cdot K}$



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS
DE 6º SEMESTRE



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|------------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 00/00/2024 | 3 | 141 de 173 |

Si uno de los fluidos se condensa, la ecuación (9) se escribe como:

$$Q = m_v \cdot \lambda = m_f \cdot Cp_f \cdot (T_1 - T_2) \quad (10)$$

Donde:

m_v = Flujo másico de vapor condensado, $\frac{Kg}{s}$

λ = Entalpía de vaporización a la temperatura de condensación, $\frac{KJ}{kg}$

En la ecuación (10) se supone que el vapor llega al condensador como vapor saturado y que el condensado sale a la temperatura de saturación.

Si el condensado sale a una (T_b) menor que la temperatura (T_a) de saturación, la ecuación (10) se expresa en la forma siguiente:

$$m_v(\lambda + Cp_c(T_a - T_b)) = m_f \cdot Cp_f \cdot (T_{1f} - T_{2f}) \quad (11)$$

Donde:

C_{pc} = Capacidad calorífica de agua líquida $\frac{kJ}{kg \cdot K}$

λ = Entalpía de vaporización a la temperatura de condensación $\frac{kJ}{kg}$

Coeficiente total de transferencia de calor

Los cálculos para el diseño de un intercambiador de calor se basan en la ecuación de Fourier, esta es:

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T \quad (12)$$

Donde:

Q = Calor transferido, kW ó kJ/s ; ($1 cal = 4.184 J$)

U = Coeficiente Global de Transferencia de Calor, $\frac{W}{m^2 K}$

A = Área Total de Transferencia de Calor, m^2

ΔT = Diferencia de Temperaturas representativa del intercambiador, K , $^{\circ}C$

Si la ecuación (12) se aplica a un elemento diferencial del intercambiador, la transferencia de este se expresa como:

$$dQ = U \cdot A \cdot dT \quad (13)$$



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS
DE 6º SEMESTRE



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|------------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 00/00/2024 | 3 | 142 de 173 |

Dado que normalmente la temperatura de al menos uno de los fluidos varía en la mayoría de los intercambiadores, la fuerza impulsora entre los fluidos caliente y frío también varía. Estos cambios tienen como consecuencia, alteraciones en los valores de Q y U , debido a las variaciones de las propiedades físicas de los fluidos y del cambio en el régimen de flujo, en donde la integración de la ecuación (13) se torna difícil, separando variables:

$$\int_0^A dA = \int_0^Q \frac{dQ}{U\Delta T} \quad (14)$$

Para integrar la ecuación (14) con mayor facilidad, hay que tomar en cuenta las siguientes suposiciones con el fin de simplificarla:

- El coeficiente global de transferencia de calor varía al cambiar las temperaturas de los fluidos (ya que cambian todas las propiedades de los fluidos), el cambio se lleva a cabo de forma gradual. Cuando se presentan diferencias de temperatura moderadas como en el equipo de planta piloto, la suposición de que U , permanece constante no conduce a un error significativo. Por lo tanto, el coeficiente total de transferencia de calor U se considera constante.
- Las capacidades caloríficas de los fluidos caliente y frío Cp_c y Cp_f son constantes.
- El intercambio de calor con el medio ambiente es despreciable.
- El flujo de calor es a régimen permanente y tiene lugar en corriente en paralelo o a contracorriente.

Tomando en cuenta las suposiciones anteriores e integrando la ecuación (12), el resultado es el siguiente:

$$Q = U \cdot A \cdot \left[\frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln \frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}} \right] = U \cdot A \cdot (DTML) \quad (15)$$

Donde:

$DTML$ = Es diferencia de temperaturas media logarítmica, K o $^{\circ}C$

Ahora bien, para un flujo en paralelo:

$$\Delta T_2 = T_1 - t_1 \quad (16)$$

$$\Delta T_1 = T_2 - t_2 \quad (17)$$



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS
DE 6º SEMESTRE



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|------------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 00/00/2024 | 3 | 143 de 173 |

Para un flujo a contracorriente:

$$\Delta T_2 = T_1 - t_2 \quad (18)$$

$$\Delta T_1 = T_2 - t_1 \quad (19)$$

Donde:

T_1 =Temperatura de entrada del fluido caliente K o °C

T_2 =Temperatura de salida del fluido caliente K o °C

t_1 =Temperatura de entrada del fluido frío K o °C

t_2 =Temperatura de salida del fluido frío K o °C

Resistencias térmicas del intercambiador de calor.

La resistencia global al flujo de calor desde el fluido caliente al frío es el resultado de la disposición en serie de tres resistencias independientes separadas (sin considerar ensuciamiento); dos de las resistencias son las que ofrecen los fluidos individualmente, la tercera corresponde a la pared que separa los dos fluidos. El coeficiente global se puede evaluar a partir de los coeficientes individuales (también llamados coeficientes convectivos o coeficientes de película) y a la resistencia térmica de la pared del tubo.

Puesto que Q es igual a $\frac{\Delta T}{R}$, y considerando que el espesor del tubo es muy pequeño se tiene:

$$R = \frac{1}{h_i} + \frac{L_m}{k_m} + \frac{1}{h_o} \quad (20)$$

Donde:

R =Resistencia térmica total, $\frac{K}{W}$

h_i =Coeficiente de película interior, $\frac{J}{Kg}$

h_o =Coeficiente de película exterior, $\frac{J}{Kg}$

L_m =Longitud media, m

K_m =Conductividad térmica, $\frac{W}{m \cdot K}$



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS
DE 6º SEMESTRE



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|------------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 00/00/2024 | 3 | 144 de 173 |

Inicialmente se desprecia la pared del tubo bajo estas condiciones podemos considerar que la resistencia total es el inverso de la constante de proporcionalidad de transferencia de calor en el intercambiador de calor, $\frac{1}{U} = R$. Ya que el tubo tiene dos diferentes áreas, interior y la exterior, los h_i y h_o deben referirse a la misma área superficial de transferencia de calor o en otra forma tendríamos que manejar dos valores de coeficiente global U_i y U_o referidas al área interior y exterior del intercambiador respectivamente. Normalmente la transferencia de calor se utiliza como referencia el área exterior del tubo interno, entonces h_i debe multiplicarse por $\frac{A_i}{A}$ para dar el valor que tendría h_i si se calculará originalmente con base en el área mayor A en lugar de A_i . Para una tubería de pared gruesa la ecuación (20) se transforma en:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_i \cdot \left(\frac{A_i}{A}\right)} + \frac{D_e}{2k_m} \ln\left(\frac{D_o}{D_i}\right) + \frac{1}{h_o} = \frac{1}{h_i \cdot \left(\frac{D_i}{D_o}\right)} + \frac{D_o}{2k_m} \ln\left(\frac{D_o}{D_i}\right) + \frac{1}{h_o} \quad (21)$$

Usando la simplificación de que la resistencia térmica de la pared de un tubo delgado es despreciable para paredes metálicas, la ecuación (21) se puede escribir como:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_i \cdot \left(\frac{A_i}{A_o}\right)} + \frac{1}{h_o} = \frac{1}{h_i \cdot \left(\frac{D_i}{D_o}\right)} + \frac{1}{h_o} \quad (22)$$

Determinación de los coeficientes de película

Lado de los tubos, calentamiento de un líquido por el interior de un tubo:

Flujo turbulento:

$$\frac{h_i D}{k} = 0.023 \left(\frac{DG}{\mu}\right)^{0.8} \left(\frac{C_p \mu}{k}\right)^{0.33} \quad (23)$$

Para fluidos muy viscosos con $Re < 8000$:

$$\frac{h_i D}{k} = 0.023 \left(\frac{DG}{\mu}\right)^{0.8} \left(\frac{C_p \mu}{k}\right)^{0.33} \left(\frac{\mu}{\mu_s}\right)^{0.14} \quad (24)$$

Flujo laminar

$$\frac{h_i D}{k} = 2 \left(\frac{m C_p}{k L}\right)^{0.33} \left(\frac{m C_p}{k L}\right)^{0.33} \left(\frac{\mu}{\mu_s}\right)^{0.14} \quad (25)$$

Si $C = \text{Masa velocidad} = \frac{N_t \cdot a_t}{n}$



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS
DE 6º SEMESTRE



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|------------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 00/00/2024 | 3 | 145 de 173 |

Donde:

μ_s = Viscosidad a la temperatura de la superficie metálica, $Pa \cdot s$

m = Masa del fluido, kg

N_t = Número de tubos, tubos

a_t = Área de paso por cada tubo, $\frac{m^2}{\text{tubo}}$

n = Número de pasos, adimensional, $\frac{x}{x}$

L = Longitud del tubo, $\frac{m}{\text{tubo}}$

2. Lado de la coraza.

Enfriamiento de vapor por el interior de la coraza: Condensación de un vapor por el exterior de los tubos:

$$h = 0.0084 \left(\frac{m}{\mu D_0} \right)^{0.14} \left(\frac{k^3 \rho^2 g}{\mu^2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (26)$$

Donde:

m = Flujo másico del condensado, $\frac{kg}{s}$

μ = Viscosidad del condensado, $Pa \cdot s$ ó $\frac{kg}{m \cdot s}$ ó $\frac{N \cdot s}{m^2}$

D_0 = Diámetro externo de los tubos, m

k = Conductividad térmica del condensado, $\frac{W}{m \cdot K}$

ρ = Densidad del condensado, $\frac{Kg}{m^3}$

$g_c = 980.665 \frac{cm}{g_f \cdot s^2}$

La ecuación (33) es válida para valores de:

$$\frac{m}{\mu D_0} > 1200$$



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS
DE 6° SEMESTRE



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|------------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 00/00/2024 | 3 | 146 de 173 |

Para valores menores se recomienda la ecuación:

$$h = 0.943 \left(\frac{\rho^2 \cdot k^3 \cdot g \cdot \lambda}{L \cdot \mu \cdot \Delta T_o} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (27)$$

Las propiedades físicas de las ecuaciones (26) y (27) se evalúan a la temperatura promedio de la película t_f la cual se considera:

$$t_f = t_v - 0.75(t_v - t_w) = t_v - 0.75\Delta T_o. \quad (28)$$

Donde:

t_w = Temperatura de la pared, K o °C

t_v = Temperatura del vapor saturado, K o °C

3. MATERIALES Y EQUIPOS

3.1. MATERIALES.

- 2 probetas de 2 L
- 2 cubetas de 40 L

3.2. REACTIVOS.

- En esta práctica no se utilizarán reactivos.

3.3 HERRAMIENTAS.

- Una llave de tipo perico

3.4 EQUIPO.

- 1 intercambiador de calor de vidrio, de tubos y coraza, Figura 2.
- 1 cronómetro

3.5 SERVICIOS.

- Electricidad.
-
- Agua de línea de servicios generales o agua de la torre de enfriamiento



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS
DE 6º SEMESTRE



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|------------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 00/00/2024 | 3 | 147 de 173 |

3.6. MATERIAL BÁSICO.

- Un flexómetro, o una cinta métrica

4. PROCEDIMIENTO

La unidad fue diseñada para mostrar el balance de calor global en un intercambiador de calor de tubos y coraza, opera como condensador usando vapor y agua de forma horizontal, aunque por el diseño del equipo puede colocarse en posición vertical o intermedia.

➤ Especificaciones:

1. La alimentación de agua fría pasa por un rotámetro, entra a un cabezal de entrada, con tres bridas de acero inoxidable, con espárragos metálicos de ajuste para fijarlo al cuerpo de la coraza, por la que pasan a siete tubos de vidrio que descargan al cabezal desalida con tres bridas de acero inoxidable con espárragos de ajuste, Nota (el cabezal de entrada se rompió y actualmente se usa un cono de acero inoxidable). El número de tubos del equipo es de siete tubos, con siete deflectores de teflón. El agua calentada de salida sale a una rejilla de drenaje. A contracorriente pasa por la coraza vapor. El vapor que entra pasa a una válvula reguladora de presión que está conectada a un manómetro de carátula y a un termómetro de carátula, a la salida del vapor condensado hay una trampade vapor para medir la cantidad y temperatura de condensado que sale

2. Las especificaciones técnicas del fabricante son:

- El vidrio del equipo tipo: QFV
- Máxima presión de agua de servicio: $3.5 \frac{kg}{cm^2}$,
- Rango de presión de vapor de operación: $(1.0 - 3.5) \frac{kg}{cm^2}$,
- Área de transferencia de calor: $0.5 m^2$,
- Coeficiente total de transferencia de calor, aprox: $250 \frac{kcal}{h m^2 ^\circ C}$
- Capacidad térmica: $(5000 - 8300) \frac{kcal}{h}$,
- Consumo de vapor: $15.3 \frac{kg}{h}$,
- Consumo de agua: $1 \frac{L}{h}$,
- Capacidad del rotámetro: $1 \frac{L}{h}$,



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS
DE 6° SEMESTRE



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|------------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 00/00/2024 | 3 | 148 de 173 |

- La temperatura del agua de servicio se hace con un termómetro de carátula a la entrada y otro de mercurio en el termo pozo de la salida del equipo. Las temperaturas de entrada y de salida del vapor se realiza con dos termómetros, también se puede emplear un manómetro de carátula y con un manómetro y una tabla de presión vapor a la presión de la Ciudad de México, se puede ver la temperatura de salida o bien con el termómetro de mercurio.
- El consumo de potencia de los recursos de servicio es. Para el vapor de agua: $3.5 \frac{Kg}{cm^2}$ para el rotámetro da un valor máximo de $1 \frac{L}{h}$
- El diámetro externo de los tubos es de 1.053" con una longitud de 79 cm; los deflectores de teflón son circulares con esparcimiento entre ellos de 10 cm; el diámetro externo de la coraza es de 4.5", con una longitud de 0.88 m
- El equipo está montado en una estructura metálica tubular, anclada al piso, la parte media del soporte del equipo está unido a dos chumaceras con baleros para que gire el equipo, con guías de apoyo para que el equipo se quede en posición horizontal, vertical o intermedia.

En la Figura 2, muestra el equipo en posición horizontal y las tuberías e instrumentos más importantes.

A.- Arranque

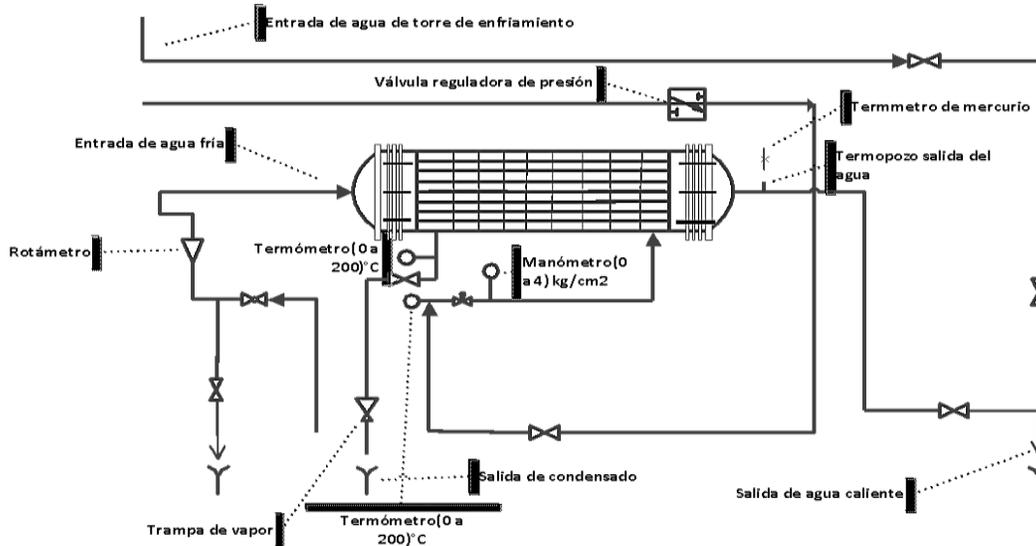
- 1.- Familiarizarse con el equipo, observando un esquema de este en la Figura 2.
 - 2.- Cerrar todas las válvulas,
- Abrir el suministro de agua de la torre de enfriamiento al equipo, con las válvulas.
 - V-1 y V-2. Así como alinear las válvulas de la torre de enfriamiento, de salida y su retorno.
 - Calibrar el rotámetro, a diferentes aperturas, midiendo el porcentaje de descargade (0 a 100) %, a diversas vueltas de apertura de la válvula V-2,
 - Con un cronómetro medir el tiempo que tarda en llenar los recipientes de bajo volumen como probetas y los de mayor capacidad como cubetas, lo que indica el flujo o caudal medido con la apertura de la válvula V-3.



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS
DE 6° SEMESTRE



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|------------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 00/00/2024 | 3 | 149 de 173 |



| | | | | | |
|---|-------------------------------|--------|-----------|------------------|-------------|
| INTERCAMBIADOR DE CALOR DE VIDRIO DE TUBOS Y CORAZA | | TAMAÑO | Nº DE FAX | Nº DIBUJO | REV. |
| DIBUJADO | L.Q. Hugo H. Martínez y Rojas | | | 1 DE 1 | 1 |
| EMITIDO | CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA | ESCALA | 1:1 | EN PLANTA PILOTO | HOJA 1 DE 1 |

Figura 2. Esquema del equipo de intercambio de calor

- Abrir la válvula V-4 para el suministro de vapor a la coraza del equipo pasa el flujo a una válvula reguladora de presión, V-5, ajustando la presión con un manómetro de carátula, de manera que la presión de vapor en el equipo esté abajo de 3.5 kg/cm^2 , que es la recomendada por el fabricante, por ser vidrio el material de construcción.
- Abrir la válvula V-6, el vapor pasa por un manómetro y a un termómetro de carátula para después a la salida del condensado descargar a una trampa de vapor, y medir con
- más exactitud la temperatura de condensado, abriendo periódicamente la válvula V- 7, con un termómetro de mercurio.
- Medir la temperatura del agua caliente que sale del cabezal de los tubos de agua caliente del equipo, con un termo pozo con un termómetro de mercurio, que tiene el equipo.



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS
DE 6º SEMESTRE



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|------------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 00/00/2024 | 3 | 150 de 173 |

- Abrir las válvulas V-8 y V-9, para regresar el agua calentada a la torre de enfriamiento. 10.-Tomar las temperaturas del agua y del vapor a la entrada y salida del intercambiador, así como la presión de entrada de vapor.
- Variar los gastos de agua de entrada al equipo con el rotámetro a diversas aperturas de la válvula V-2.
- Variar los gastos de vapor con la válvula reguladora de presión y la válvula V-4, a una presión regulada definida de la válvula V-5,
- Repetir los incisos 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 y 12. Para obtener los datos experimentales que se presentan en las Tablas de Tratamiento de Datos y Análisis de los Datos, que se verán posteriormente.

B-PARO

- Cerrar el suministro de vapor por medio de la válvula V-4 y V-6, observando que el manómetro ya no indique presión de vapor, así que la temperatura del termómetro de carátula sea la ambiental y que deje de salir vapor por la trampa de vapor. Dejar de circular el agua, hasta que la temperatura en la coraza sea igual a la temperatura ambiente.
- Cerrar las válvulas de entrada de agua V-1, y V-2. Así como de salida V-8, V-9. Abrir todas las válvulas de dren de agua y condensados, V-3, V-7, V-10 y V-11, para que no quede agua en el equipo ni en las tuberías.

Nota: (En Aclaraciones se mencionan propuestas para evitar el problema que existe en el equipo de quedarse al arranque y paro con agua).

- a. Con cada corrida del inciso 14, se toman los datos a un gasto y las temperaturas, medidas del agua, así como del vapor-condensado: Se repiten por lo menos seis veces los datos para obtener una Tabla y emplear sus valores promedio,
- b. En la Tabla de resultados se ponen escalas de aperturas de % del rotámetro, a una presión determinada. Y sus valores promedio.
- c. Se realiza la Tabla de resultados de temperaturas a la entrada y salida del agua y del vapor, manteniendo una apertura 0 % de caudal del rotámetro fijo y se varía el consumo salida del condensado de vapor.



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS
DE 6º SEMESTRE



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|------------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 00/00/2024 | 3 | 151 de 173 |

5. TRATAMIENTO DE DATOS

➤ PRESENTACIÓN DE DATOS

Los datos recolectados en la actividad del grupo de trabajo, se presentará la Tabla 1, para cada una de las presiones a las cuales se trabaje.

Tabla 1. Datos de temperaturas para una presión de vapor determinada

| No Corrida | P_1 , entrada (kPa) | t_1 , de vapor fijado (°C) | t_2 , de salida vapor (°C) | $T_{entrada}$, de agua (°C) | T_{salida} , de agua (°C) | $T_{entrada}$, de vapor (°C) | T_{salida} , de condensado (°C) |
|------------|-----------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|---|
| 1 | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | |

Con los datos obtenidos de la Tabla 1 y con las ecuaciones pertinentes, se elaborará la tabla de resultados, para a cada una de las presiones a las que se trabajó y los resultados se pondrán en el formato de la Tabla

Tabla 2. Resultados obtenidos para una presión de vapor específica

| No Corrida | Gasto vapor | Gasto agua | Q | U_{exp} | Re , tubos | h_i | h_0 | $U_{teórico}$ |
|------------|-------------|------------|---|-----------|-----------------|-------|-------|---------------|
| 1 | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | | |

Hacer una Gráfica por cada tabla de U_{exp} vs Re_{tubos} .

Hacer una Gráfica por cada Tabla del $U_{teórico}$ vs Re_t



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS
DE 6º SEMESTRE



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|------------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 00/00/2024 | 3 | 152 de 173 |

6. MANEJO DE RESIDUOS

Los residuos generados son identificados como residuos peligrosos de acuerdo con el procedimiento SGC-FESZ-PO06 Manejo de residuos generados en los laboratorios de docencia, basado en la NOM-052-SEMARNAT-2005 que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos.

7. BIBLIOGRAFÍA

1. Cengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2007). Transferencia de calor y masa. McGraw-Hill Interamericana. Levenspiel J. Octave. (2002) Flujo de fluido e intercambio de calor.
2. Kern, DQ (2008). Procesos de transferencia de calor (No. TJ263 K45).
3. Warren, M., & Julian, S. M. I. T. H. (1998). Operaciones unitarias en ingeniería química. 1199 p.
4. McCabe, W. L., Smith, J., & Harriott, P. (1991). Operaciones Básicas de Ingeniería Química, Ed.



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|------------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 00/00/2024 | 3 | 153 de 173 |

P-6: ANÁLISIS DE UN SISTEMA DE INTERCAMBIO DE CALOR (METAL)

1. OBJETIVOS

- 1.1. Obtener experimentalmente los coeficientes de transferencia de calor en un intercambiador de calor de tubos concéntricos y otro de tubos coraza.
- 1.2. Analizar el efecto de las variables de operación en el comportamiento por el diseño de ambos equipos.

2. FUNDAMENTO TEÓRICO

Se denomina transferencia de calor al transporte de energía dentro de un sistema o de un sistema a otro, debido a un gradiente de temperatura. Aun cuando el calor transferido no puede ser medido ni observado directamente, sus efectos como la variación del contenido de energía interna de los sistemas involucrados, permiten su cuantificación.

La transferencia de calor puede llevarse a cabo mediante tres mecanismos distintos: *conducción*, *convección* y *radiación*. En la mayoría de los procesos reales, la transferencia de calor depende de que ocurran dos o incluso los tres mecanismos simultáneamente.

A.- Mecanismo de Conducción

Se presenta cuando la transferencia de calor es realizada mediante colisiones de los átomos que forman la materia. La conducción es la transferencia de energía desde las partículas más energéticas hacia las menos energéticas de una sustancia, causada por las interacciones entre las mismas.

La velocidad de transferencia de calor por conducción está determinada por la Ley de Fourier (macroscópicamente), la cual establece que la variación temporal de la transferencia de calor por conducción en una dirección dada es directamente proporcional al área normal a la dirección del flujo de calor, A y al gradiente de la temperatura en esa dirección, dT . Para un flujo unidimensional de calor, en la dirección, r en coordenadas cilíndricas se tiene (Figura 1):

$$\frac{dQ_x}{dt} = -kA \frac{dT}{dr} \quad (1)$$



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS
DE 6º SEMESTRE



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|------------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 00/00/2024 | 3 | 154 de 173 |

Donde:

$\frac{dQ_x}{dt}$ = Velocidad de transferencia de calor por conducción que atraviesa el área A, en la dirección X.

dr = espesor, m

k = Constante de proporcionalidad llamada conductividad térmica, W / m – K

T = Temperatura, K

dt = Tiempo · seg

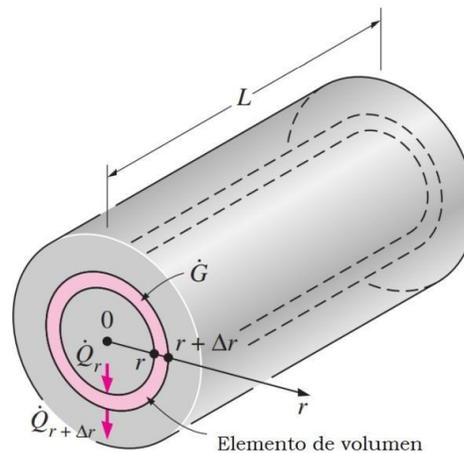


Figura 1. Volumen de control sistema térmico

B.- Mecanismos de Convección

La convección es la transferencia de energía causada por el movimiento de un fluido. Cuando un cuerpo está en contacto con un medio líquido o gaseoso que tiene una temperatura más baja o alta, se transfiere calor entre la superficie del cuerpo y el fluido. El intercambio de calor produce una variación en la densidad del fluido. Este cambio es grande en el caso de un gas y está expresado por las leyes de los gases, de modo que las fuerzas de flotación del gas positivas (o negativas) adyacentes a la superficie caliente (o fría) hacen que se mueva. Entonces, una nueva cantidad de fluido entra en contacto con la superficie y se repite el proceso. Este movimiento de la masa del fluido adyacente a la superficie se denomina convección. En el caso de los líquidos la variación de densidad es menor, pero la convección se induce también en estos materiales. Un ejemplo claro de este fenómeno es el termosifón, utilizado para mover el fluido de trabajo en los tubos de los colectores solares (agua, agua con etilenglicol, metanol, acetona, mezclas de estas sustancias).



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS
DE 6º SEMESTRE



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|------------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 00/00/2024 | 3 | 155 de 173 |

Hay dos tipos de convección: la convección natural y la convección forzada.

En la **convección natural**, la fuerza motriz procede de la variación de densidad en porciones del fluido, como consecuencia del contacto con una superficie a temperatura diferente, lo que da lugar a fuerzas tensoriales. El fluido próximo a la superficie adquiere una velocidad debida únicamente a esta diferencia de densidades, sin ninguna influencia de fuerza motriz exterior.

La convección natural ayuda a explicar muchos de los sistemas naturales de la Tierra, como las corrientes oceánicas y las capas atmosféricas. Por ejemplo, cuando la superficie terrestre absorbe la radiación solar aumenta su temperatura, y el aire que está en contacto con el suelo es casi siempre más caliente que el aire en las capas superiores. El calor incrementa los espacios entre las moléculas, haciendo que el aire más ligero se eleve por encima de la superficie. Como el aire se aleja de la superficie caliente de tierra, las moléculas se enfrían y se comprimen. Sobre este aire frío actúa la gravedad que lo lleva hacia abajo, donde se calienta de nuevo y comienza un nuevo ciclo.

La **convección forzada**, se presenta cuando una fuerza motriz exterior mueve un fluido sobre una superficie que se encuentra a una temperatura mayor o menor que la del fluido. Esa fuerza motriz exterior puede ser el viento, un ventilador, una bomba, etc. Debido a que la velocidad del fluido en la convección forzada es mayor que en la convección natural se transfiere, por lo tanto, una mayor cantidad de calor para un determinado gradiente de temperatura.

La transferencia de calor por convección se determina mediante la Ley de enfriamiento de Newton considerando que $T_0 > T_f$:

$$\frac{dQ}{dt} = h_{\text{conv}} A (T_0 - T_f) \quad (2)$$

Donde:

$\frac{dQ}{dt}$ = velocidad de transferencia de calor por convección, W

h_{conv} = Coeficiente de transferencia de energía por convección, W / m²K, depende de la rugosidad, forma y posición de la superficie, así como de las características del flujo.

T_0 = Temperatura de la superficie, °C

T_f = Temperatura del fluido, °C

A = Área de superficie, m²



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS
DE 6º SEMESTRE



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|------------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 00/00/2024 | 3 | 156 de 173 |

➤ Balances de energía

El tratamiento cuantitativo de los problemas de transmisión de calor se fundamenta en los balances de energía. La mayoría de los equipos de transmisión de calor operan en un régimen estacionario, y este tipo de operación será el considerado en las siguientes ecuaciones:

La ecuación general de balance de energía en un volumen de control total se plantea en la ecuación:

$$m_1 \left(h_1 + \frac{v_1^2}{2} + z_1 g + \frac{p_1}{\rho} \right) + Q = m_2 \left(h_2 + \frac{v_2^2}{2} + z_2 g + \frac{p_2}{\rho} \right) + \tau \quad (3)$$

Aplicando la ecuación (3) en uno de los fluidos del intercambiador de calor y considerando iguales la energía cinética, potencial y de presión en los estados termodinámicos 1 y 2 y despreciando la disipación viscosa:

$$\frac{v_1^2}{2} = \frac{v_2^2}{2}; \quad z_1 g = z_2 g; \quad \frac{p_1}{\rho} = \frac{p_2}{\rho}; \quad \tau = 0$$

$$\therefore m_1 h_1 + Q = m_2 h_2 \quad (4)$$

Entonces:

La transferencia de calor ganada o cedida por el fluido será:

$$Q = m \cdot (h_2 - h_1) \quad (5)$$

Dónde:

m = Flujo másico, kg/s

h_1 = Entalpía específica en el estado 1, kJ/kg

h_2 = Entalpía específica en el estado 2, kJ/kg

La ecuación (5) puede escribirse para cada una de las corrientes que circulan a través de un intercambiador de calor, suponiendo que el equipo está aislado convenientemente

Para el fluido caliente:

$$Q_c = m_c (h_1 - h_2)_c \quad (6)$$

Para el fluido frío:

$$Q_f = m_f (h_2 - h_1)_f \quad (7)$$

Donde:

Q_c = Calor transferido por el fluido caliente kJ/s ó kW

Q_f = Calor ganado por el fluido, kJ/s ó kW

m_c = Flujo másico del fluido caliente kg/s

m_f = Flujo másico masa del fluido frío kg/s



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS
DE 6º SEMESTRE



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|------------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 00/00/2024 | 3 | 157 de 173 |

h_c = Entalpía específica del fluido caliente kJ/kg

h_f = Entalpía específica del fluido frío kJ/kg

Ahora bien, el calor cedido por el fluido caliente lo gana el fluido frío, por lo tanto:

$$Q_c = Q_f \quad (8)$$

$$\text{o} \quad m_c(h_1 - h_2)_c = m_f(h_2 - h_1)_f \quad (9)$$

Para el cálculo de las entalpías, se consideran capacidades caloríficas constantes del fluido caliente y frío, para fluidos sin cambio de fase la ecuación (11) se presenta en la forma siguiente:

$$m_c \cdot C_{p_f} \cdot (T_1 - T_2)_c = m_f \cdot C_{p_f} \cdot (T_1 - T_2)_f \quad (10)$$

Dónde:

C_{p_c} y C_{p_f} ; son las capacidades caloríficas del fluido caliente y frío, respectivamente.
kJ/(kg · K)

Si uno de los fluidos se condensa, la ecuación (10) se escribe como:

$$Q = m_v \cdot \lambda = m_f \cdot C_{p_f} \cdot (T_1 - T_2)_f \quad (11)$$

Donde:

m_v = Flujo másico de vapor condensado kg/s

λ = Entalpía de vaporización a la temperatura de condensación kJ/kg

En la ecuación (11) se supone que el vapor llega al condensador como vapor saturado y que el condensado sale a la temperatura de saturación.

Si el condensado sale a una (T_b) menor que la temperatura (T_a) de saturación, la ecuación (11) se expresa en la forma siguiente:

$$m_v(\lambda + C_{p_c}(T_a - T_b)) = m_f \cdot C_{p_f} \cdot (T_{1f} - T_{2f}) \quad (12)$$

Donde:

C_{p_c} = Capacidad calorífica de agua líquida kJ/kg · K

λ = Entalpía de vaporización a la temperatura de condensación kJ/kg

➤ Coeficiente total de transferencia de calor

Los cálculos para el diseño de un intercambiador de calor se basan en la ecuación de Fourier, esta es:

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T \quad (13)$$



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS
DE 6º SEMESTRE



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|------------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 00/00/2024 | 3 | 158 de 173 |

Donde:

Q = Calor transferido, kW ó kJ/s; (1 cal = 4.184 J)

U = Coeficiente Global de Transferencia de Calor, $W/(m^2 K)$

A = Área Total de Transferencia de Calor, m^2

ΔT = Diferencia de Temperaturas representativa del intercambiador, K, $^{\circ}C$

Si la ecuación (13) se aplica a un elemento diferencial del intercambiador, la transferencia de este se expresa como:

$$dQ = U \cdot A \cdot dT \quad (14)$$

Dado que normalmente la temperatura de al menos uno de los fluidos varía en la mayoría de los intercambiadores, la fuerza impulsora entre los fluidos caliente y frío también varía. Estos cambios tienen como consecuencia, alteraciones en los valores de Q y U , debido a las variaciones de las propiedades físicas de los fluidos y del cambio en el régimen de flujo, en donde la integración de la ecuación (14) se torna difícil, separando variables:

$$\int_0^A dA = \int_0^Q \frac{dQ}{U \Delta T} \quad (15)$$

Para integrar la ecuación (15) con mayor facilidad, hay que tomar en cuenta las siguientes suposiciones con el fin de simplificarla:

- El coeficiente global de transferencia de calor varía al cambiar las temperaturas de los fluidos (ya que cambian todas las propiedades de los fluidos), el cambio se lleva a cabo de forma gradual. Cuando se presentan diferencias de temperatura moderadas como en el equipo de planta piloto, la suposición de que U , permanece constante no conduce a un error significativo. Por lo tanto, el coeficiente total de transferencia de calor U se considera constante.
- Las capacidades caloríficas de los fluidos caliente y frío C_{pc} y C_{pf} son constantes.
- El intercambio de calor con el medio ambiente es despreciable.
- El flujo de calor es a régimen permanente y tiene lugar en corriente en paralelo o a contracorriente.

Tomando en cuenta las suposiciones anteriores e integrando la ecuación (13), el resultado es el siguiente:

$$Q = U \cdot A \cdot \left[\frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln \frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}} \right] = U \cdot A \cdot (DTML) \quad (16)$$



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS
DE 6º SEMESTRE



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|------------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 00/00/2024 | 3 | 159 de 173 |

Donde:

$DTML$ = Es diferencia de temperaturas media logarítmica, K o $^{\circ}C$

Ahora bien, para un flujo en paralelo:

$$\Delta T_2 = T_1 - t_1 \quad (17)$$

$$\Delta T_1 = T_2 - t_2 \quad (18)$$

Para un flujo a contracorriente:

$$\Delta T_2 = T_1 - t_2 \quad (19)$$

$$\Delta T_1 = T_2 - t_1 \quad (20)$$

Donde:

T_1 = Temperatura de entrada del fluido caliente, K o $^{\circ}C$.

T_2 = Temperatura de salida del fluido caliente, K o $^{\circ}C$.

t_1 = Temperatura de entrada del fluido frío, K o $^{\circ}C$.

t_2 = Temperatura de salida del fluido frío, K o $^{\circ}C$.

Resistencias térmicas del intercambiador de calor.

La resistencia global al flujo de calor desde el fluido caliente al frío es el resultado de la disposición en serie de tres resistencias independientes separadas (sin considerar ensuciamiento); dos de las resistencias son las que ofrecen los fluidos individualmente, la tercera corresponde a la pared que separa los dos fluidos. El coeficiente global se puede evaluar a partir de los coeficientes individuales (también llamados coeficientes convectivos o coeficientes de película) y a la resistencia térmica de la pared del tubo.

Puesto que Q es igual a $\Delta T/R$, y considerando que el espesor del tubo es muy pequeño se tiene:

$$R = \frac{1}{h_i} + \frac{L_m}{k_m} + \frac{1}{h_o} \quad (21)$$

Donde:

R = Resistencia termica total, K/W

h_i = Coeficiente de pelicula interior, J/kg

h_o = Coeficiente de pelicula exterior, J/kg

L_m = Longitud media, m

K_m = Conductividad termica media $W/(m \cdot K)$

Inicialmente se desprecia la pared del tubo bajo estas condiciones podemos considerar que la resistencia total es el inverso de la constante de proporcionalidad



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS
DE 6º SEMESTRE



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|------------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 00/00/2024 | 3 | 160 de 173 |

de transferencia de calor en el intercambiador de calor, $1/U = R$. Ya que el tubo tiene dos diferentes áreas, interior y la exterior, los h_i y h_o deben referirse a la misma área superficial de transferencia de calor o en otra forma tendríamos que manejar dos valores de coeficiente global U_i y U_o referidas al área interior y exterior del intercambiador respectivamente. Normalmente la transferencia de calor se utiliza como referencia el área exterior del tubo interno, entonces h_i debe multiplicarse por A_i/A para dar el valor que tendría h_i si se calculará originalmente con base en el área mayor A en lugar de A_i . Para una tubería de pared gruesa la ecuación (21) se transforma en:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_i \cdot \left(\frac{A_i}{A}\right)} + \frac{D_e}{2k_m} \ln \left(\frac{D_o}{D_i}\right) + \frac{1}{h_o} = \frac{1}{h_i \cdot \left(\frac{D_i}{D_o}\right)} + \frac{D_o}{2k_m} \ln \left(\frac{D_o}{D_i}\right) + \frac{1}{h_o} \quad (22)$$

Usando la simplificación de que la resistencia térmica de la pared de un tubo delgado es despreciable para paredes metálicas, la ecuación (22) se puede escribir como:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_i \cdot \left(\frac{A_i}{A_o}\right)} + \frac{1}{h_o} = \frac{1}{h_i \cdot \left(\frac{D_i}{D_o}\right)} + \frac{1}{h_o} \quad (23)$$

Correcciones en la diferencia de temperaturas media logarítmica para intercambiadores de pasos múltiples.

En la Figura 1 se muestra un esquema típico de un intercambiador de calor de dos pasos por los tubos y uno por el ánulo, o coraza y en la Figura 2 se muestran los perfiles de temperaturas desarrolladas a lo largo de los tubos y de la coraza, con los fluidos respectivos.

| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|------------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 00/00/2024 | 3 | 161 de 173 |

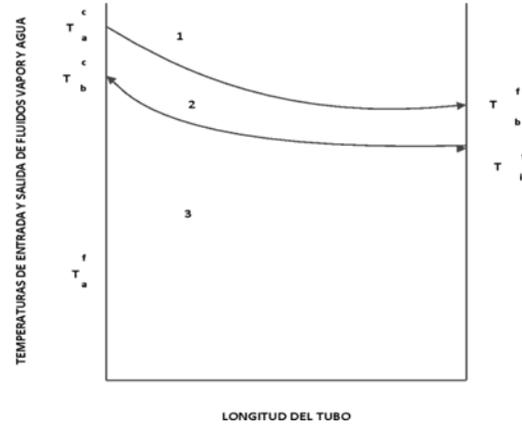
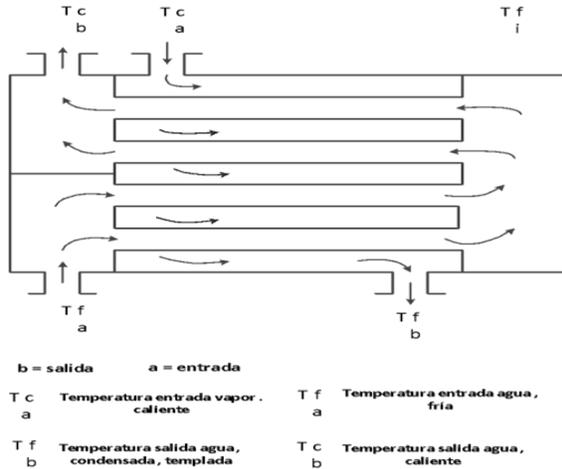


Figura 1. Intercambiador de calor de múltiples pasos

Figura 2. Perfiles de temperatura por coraza y tubos para flujo a contracorriente

La curva (1) $t_a^c \rightarrow t_b^f$, se aplica para el fluido del lado de la coraza, que es del fluido caliente, como vapor, La curva (3) $t_a^f \rightarrow t_i^f$, es el primer paso del fluido por el lado de los tubos, como agua y la curva (2) $t_i^f \rightarrow t_b^c$, corresponde al segundo paso. Las curvas (1) y (2) corresponden a las de un intercambiador a contracorriente. La media logarítmica de las temperaturas se aplica a un flujo en paralelo o a un flujo a contracorriente simple, pero no a una combinación. Cuando aparecen tipos de flujo diferentes a los paralelos o contracorrientes simples, es costumbre definir un factor de corrección F, que, al multiplicarse por la DTML, determina la DTML Correcta. El factor de F siempre es menor que la unidad. El factor de F es función de dos números adimensionales definidos por:

$$X = \frac{t_a^c - t_a^f}{t_a^c - t_b^f}. \text{ Tambien se define X como: } X = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1} \quad (24)$$

$$Z = \frac{t_a^c - t_b^f}{t_a^c - t_a^f}. \text{ Tambien se define Z como } Z = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1} \quad (25)$$

En donde “c” y “f”, se refieren al fluido caliente y frío respectivamente, “a” y “b” a la entrada y salida de flujo. Así como T_1, T_2 , son las temperaturas de entrada y salida



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS
DE 6º SEMESTRE



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|------------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 00/00/2024 | 3 | 162 de 173 |

del ánulo o coraza y t_1 , t_2 , son las temperaturas de entrada y salida de la tubería. El factor Z es la relación de la caída de temperatura del fluido caliente al aumento de temperatura del fluido frío. El factor X es la eficiencia de calentamiento o la relación del aumento de temperatura del fluido frío o al aumento de temperatura máxima posible.

En el Anexo 3, se muestra un esquema de un Intercambiador de calor de tubos concéntricos.

Cambiador de calor de tubos concéntricos.

Coeficientes de película para fluidos en tuberías:
Flujo turbulento.

$$\frac{h_i \cdot D}{k} = 0.023 \left(\frac{Dv\rho}{\mu} \right)^{0.8} \left(\frac{C_p\mu}{k} \right)^{0.33} \quad (26)$$

Fluidos muy viscosos con $Re < 8\ 000$:

$$\frac{h_i D}{k} = 0.027 \left(\frac{Dv}{\mu} \right)^{0.8} \left(\frac{C_p\mu}{k} \right)^{0.33} \left(\frac{\mu}{\mu_s} \right)^{0.14} \quad (27)$$

Flujo laminar

$$\frac{h_i D}{k} = 2 \left(\frac{m C_p}{k L} \right)^{0.33} \left(\frac{\mu}{\mu_s} \right)^{0.14} \quad (28)$$

Donde:

h_i = Coeficiente de transferencia de calor para el fluido en el interior del tubo, $\frac{W}{m^2K}$

D = Diámetro del tubo, m

k = Conductividad térmica del fluido, W/mK

v = Velocidad lineal del fluido, m/s

ρ = Densidad del fluido, kg/m^3

μ = Viscosidad del fluido, Pa - s

C_p = Calor específico del fluido, J/kg - K

μ_p = Viscosidad a la temperatura de pared, Pa - s

m = Flujo másico del fluido, kg/ s

L = Longitud del tubo, m



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|------------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 00/00/2024 | 3 | 163 de 173 |

Fluidos que se desplazan en un ánulo:

Diámetro equivalente

Cuando un fluido se desplaza en el interior de un conducto que tienen una sección transversal diferente a la circular, como en un ánulo, es conveniente expresar los coeficientes de transferencia de calor y factores de fricción mediante los mismos tipos de ecuaciones para tuberías. Para realizar este tipo de representación se ha encontrado ventajoso utilizar un diámetro equivalente (D_e), que es igual a:

$$D_e = \frac{4 \times \text{área de flujo}}{\text{perímetro húmedo}} = \frac{4(D_2^2 - D_1^2)}{4D_1} = \frac{(D_2^2 - D_1^2)}{D_1} \quad (29)$$

Donde:

D_e = Diámetro equivalente, m

D_2 = Diámetro interior del tubo exterior, m

D_1 = Diámetro exterior del tubo interior, m

Coefficientes de película para fluidos en ánuos

Cuando el diámetro equivalente de la ecuación (29) se sustituye a D , en las ecuaciones 30, 31 y 32, el coeficiente que se determina es el exterior o del ánulo (h_o). Aun cuando D difiera de D_e , h_o es efectivo en el diámetro exterior del tubo interior. En intercambiadores de doble tubo es costumbre usar la superficie exterior del tubo interior como la superficie de referencia y puesto que h_i se ha determinado para A_i y no para A , el coeficiente debe ser corregido, esto es:

$$h_{i0} = h_i \frac{A_i}{A} = h_i \frac{DI}{DE} \quad (30)$$

➤ Intercambiador de tubos y coraza

Coefficiente de película del lado de los tubos

a.- Flujo turbulento

$$\frac{h_i \cdot D}{k} = 0.023 \cdot \left(\frac{DG}{\mu}\right)^{0.8} \cdot \left(\frac{C_p \cdot \mu}{k}\right)^{0.33} \quad (31)$$

$$G = \frac{W_t}{a_t} = \frac{W_t}{\frac{N_t a'_t}{n}} \quad (32)$$



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS
DE 6º SEMESTRE



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|------------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 00/00/2024 | 3 | 164 de 173 |

Donde:

- G = Masa velocidad, $\text{kg}/(\text{s m}^2)$
 a_t = Área total de paso, m^2
 m_t = Flujo másico total, kg/s
 N_t = Número de tubos, tubos
 a' = Área de flujo por cada tubo, m^2/tubos
 n = Número de pasos
 D = Diámetro de un tubo, m

b.- Flujo laminar

$$\frac{h_i D}{k} = 2 \cdot \left(\frac{m \cdot C_p}{k \cdot L} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_0} \right)^{0.14} \quad (33)$$

Donde:

m = Flujo másico por tubo, kg/s

El coeficiente obtenido por estas ecuaciones también debe ser corregido por la ecuación (33)

$$h_{i0} = h_i \cdot \frac{A_i}{A} = h_i \cdot \frac{DI}{DE} \quad (34)$$

Coeficiente de película del lado de la coraza

La ecuación utilizada para el cálculo del vapor que condensa del lado de la coraza es la siguiente:

$$h \left(\frac{\mu_f^2}{k_f^3 \rho_f^2 g} \right)^{1/3} = 1.5 \left(\frac{4G''}{\mu_f} \right)^{-1/3} \quad (35)$$

$$G'' = \frac{W_t}{LN_t^{\frac{3}{2}}} \quad (36)$$

Donde:

- μ_f = Viscosidad del fluido a la temperatura de la película, $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$
 k_f = Conductividad térmica a la temperatura de la película, $\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$
 ρ_f = Densidad a la temperatura de la película, kg/m^3
 g = Aceleración gravitacional m/s^2



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|------------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 00/00/2024 | 3 | 165 de 173 |

Evaluación de las propiedades:

Las propiedades del fluido son las correspondientes a la temperatura media de la película condensada, la cual se determina con la siguiente ecuación:

$$t_f = t_v - \frac{3(t_v - t_w)}{4} \quad (37)$$

Donde:

t_f = Temperatura media de película, °C o K

t_v = Temperatura de vapor saturado °C o K

t_w = Temperatura de pared °C o K

Como la temperatura de la superficie externa del tubo t_w la mayoría de las veces se desconoce, se supone una muy cercana a la temperatura del vapor y se resuelve mediante iteración. Para corroborar se utiliza la ecuación siguiente:

$$h_o(t_v - t_w) = h_i(t_w - t_m) \quad (38)$$

y

$$t_m = \frac{t_e + t_s}{2} \quad (39)$$

Donde:

t_m = Temperatura media, °C o K

t_e = Temperatura de entrada del fluido frío, °C o K

t_s = Temperatura de salida del fluido frío, °C o K

Coefficiente total limpio:

Cuando se usan los coeficientes individuales para la obtención del coeficiente total, se denomina coeficiente total limpio y se expresa por:

$$U_c = \frac{h_{io} h_o}{h_{io} + h_o} \quad (40)$$

3. MATERIALES Y EQUIPO

3.1. MATERIALES.

- 1 probeta de 1 L

3.2. REACTIVOS

- No se requieren reactivos



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS
DE 6º SEMESTRE



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|------------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 00/00/2024 | 3 | 166 de 173 |

3.3. HERRAMIENTAS

- 1 flexómetro
- 1 vernier

3.4. EQUIPO.

- Un Intercambiador de Calor de Metal, de Tubos y Coraza, Ver figura 1.

3.5. SERVICIOS.

- Agua de la Torre de Enfriamiento
- Vapor

3.6. MATERIAL BÁSICO

- El especificado por el profesor

4. PROCEDIMIENTO

A.- ARRANQUE

- Familiarizarse con el equipo, observando un esquema de este en el Anexo 2 y 3.
- Cerrar todas las válvulas.
- Abrir el suministro de agua de la torre de enfriamiento al equipo, con la válvula V-2. Así como alinear las válvulas de la torre de enfriamiento, de salida y su retorno.
- Calibrar el rotámetro, a diferentes aperturas, midiendo el porcentaje de descarga de 0 a 100%, a diversas vueltas de apertura de la válvula V-2.
- Con un cronómetro medir el tiempo que tarda en llenar los recipientes de bajo volumen como probetas y los de mayor capacidad como cubetas, lo que indica el flujo o caudal medido con la apertura de la válvula V-2.
- Abrir la válvula V-59, V-54 y V-56 para el suministro de vapor a la coraza del equipo, ajustando la presión de alimentación de vapor al intercambiador de calor con V-56, leyendo ésta en el manómetro P₁. La temperatura de entrada del vapor se lee en T₁.
- Abrir la válvula V-53, el vapor pasa por un manómetro y a un termómetro de carátula para después a la salida del condensado descargar a una trampa de vapor, y medir con más exactitud la temperatura de condensado, con un termómetro de mercurio. Medir el flujo másico del vapor, con una probeta de plástico de 1 litro de capacidad.



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS
DE 6º SEMESTRE



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|------------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 00/00/2024 | 3 | 167 de 173 |

- Abrir las válvulas V-42 y V-41, V-40, V-44 y V-49 para regresar el agua calentada a la torre de enfriamiento.
- Tomar las temperaturas del agua y del vapor a la entrada y salida del intercambiador, así como la presión de entrada de vapor.
- Variar los gastos de agua de entrada al equipo con el rotámetro a diversas aperturas de la válvula V-2.
- Variar los gastos de vapor con la válvula V-56, variando de 5-5.5 Kg/cm².
- Obtener los datos experimentales y presentar en las Tablas de Tratamiento de Datos y Análisis de los Datos, que se verán posteriormente.

B.- PARO

- Cerrar el suministro de vapor por medio de la válvula V-56 V-58, V-54 y V-59, observando que el manómetro ya no indique presión de vapor, así que la temperatura del termómetro de carátula sea la ambiental y que deje de salir vapor por la trampa de vapor. Dejar de circular el agua, hasta que la temperatura en la coraza sea igual a la temperatura ambiente.
- Cerrar las válvulas de entrada de agua V-1, o V-2. Así como de salida V-42, V-41 y V-40. Abrir todas las válvulas de drene de agua y condensados, para que no quede agua en el equipo ni en las tuberías.

5. PRESENTACIÓN Y TRATAMIENTO DE DATOS

➤ **PRESENTACIÓN DE DATOS**

Los datos recolectados en la actividad del grupo de trabajo, se presentará la Tabla 1, paracada una de las presiones a las cuales se trabaje.

Tabla 1. Datos de temperaturas para una presión de vapor determinada

| No Corrida | P_1 , entrada (kPa) | t_1 , de vapor fijado (°C) | t_2 , de salida vapor (°C) | $T_{entrada}$ de agua (°C) | T_{salida} de agua (°C) | $T_{entrada}$ de vapor (°C) | T_{salida} de condensado (°C) |
|------------|-----------------------|------------------------------|------------------------------|----------------------------|---------------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| 1 | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | |



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS
DE 6º SEMESTRE



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|------------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 00/00/2024 | 3 | 168 de 173 |

- Con los datos obtenidos de la Tabla 1 y con las ecuaciones pertinentes, se elaborará la tabla de resultados, para cada una de las presiones a las que se trabajó y los resultados se pondrán en el formato de la Tabla 2.

Tabla 2. Resultados obtenidos para una presión de vapor específica.

| No Corrida | Flujo vapor | Flujo agua | Q | U_{exp} | Re, tubos | h_i | h_0 | h_{i0} | $U_{teórico}$ |
|------------|-------------|------------|---|-----------|-----------|-------|-------|----------|---------------|
| 1 | | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | | | |

- Hacer una Gráfica por cada tabla de U_{exp} vs Re_{tubos} ,
- Construir un diagrama que muestre los perfiles de temperatura desarrollados a lo largo de cada intercambiador de calor, en cada corrida.
- Realizar un balance de materia y energía del sistema para cada intercambiador de calor y para cada corrida.
- Hacer una Gráfica por cada Tabla del $U_{teórico}$ Vs Re_t .
- Obtener con los valores experimentales del coeficiente global de transferencia de calor para cada corrida y cambiador y presentar una tabla.

6. MANEJO DE RESIDUOS

Los residuos generados son identificados como residuo peligroso de acuerdo con la NOM-O52-SEMARNAT-2005 que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos.

7. BIBLIOGRAFÍA

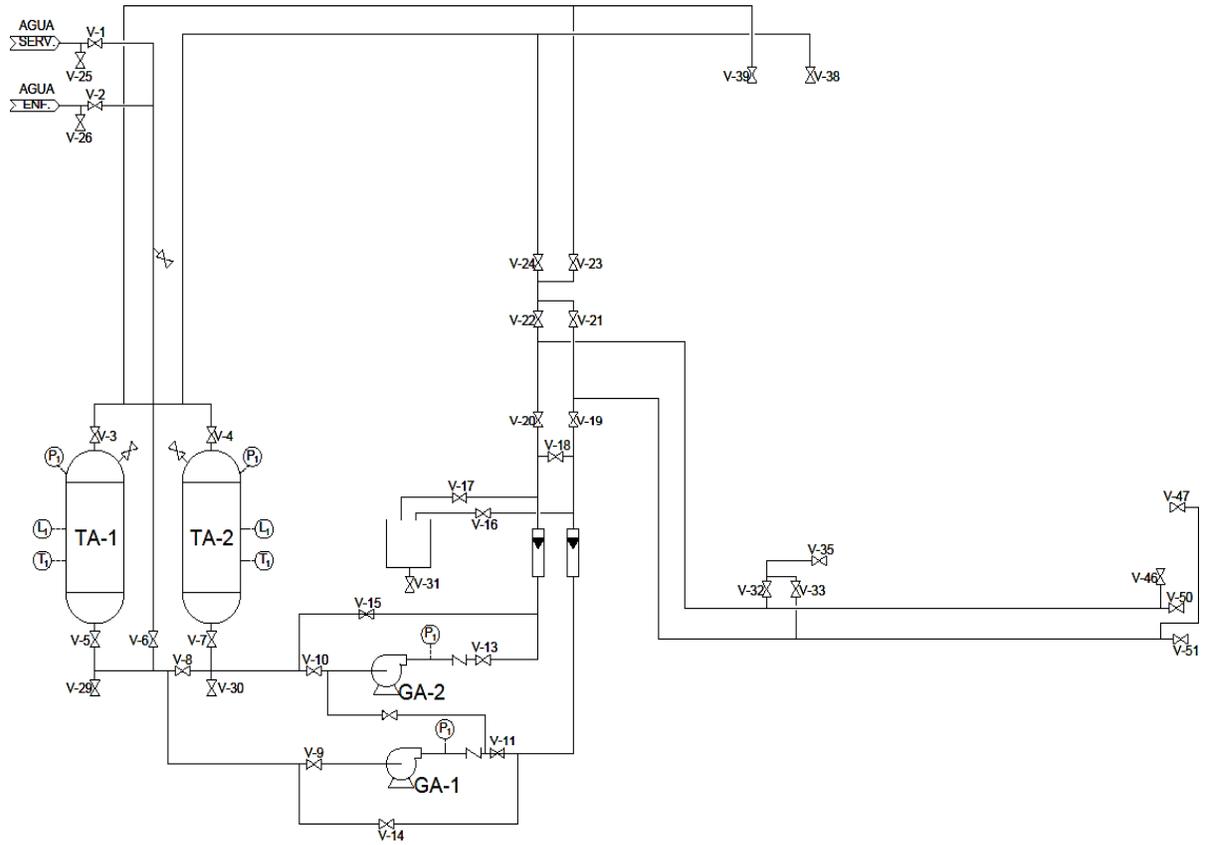
1. Cengel, Yunus A. (2011) Transferencia de calor y masa: fundamentos y aplicaciones. México. McGraw-Hill Interamericana.
2. Levenspiel J. Octave. (2002) Flujo de fluido e intercambio de calor.
3. Kern, Donald. (1998) "Procesos de transferencia de calor". Editorial continental S. México.
4. McCabe L. Warren. (2007) Operaciones Unitarias en Ingeniería Química. McGraw-Hill. 7ª Edición, D.F. México.



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|------------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 00/00/2024 | 3 | 169 de 173 |

ANEXOS

ANEXO 1-Diagrama de bombas, correspondiente al protocolo P1. Identificación de válvulas para manipulación del sistema.



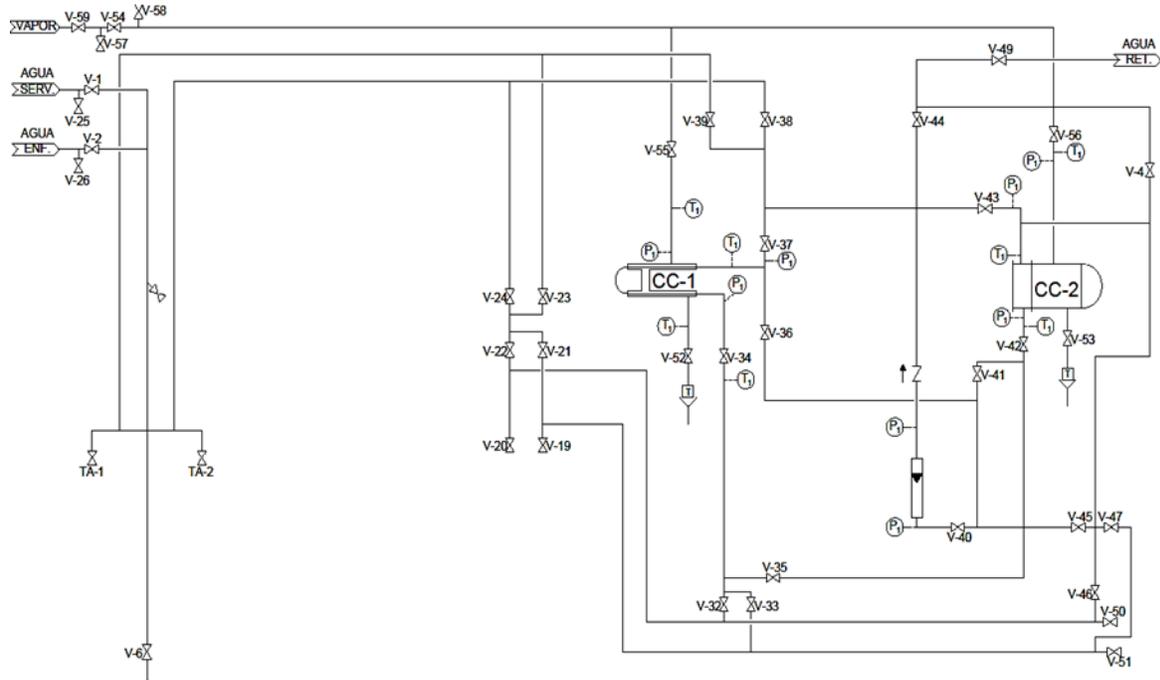


SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS
DE 6º SEMESTRE



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|------------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 00/00/2024 | 3 | 170 de 173 |

ANEXO 2. Diagrama de intercambiador de calor (metal), correspondiente al protocolo P6. Identificación de válvulas para manipulación del sistema.



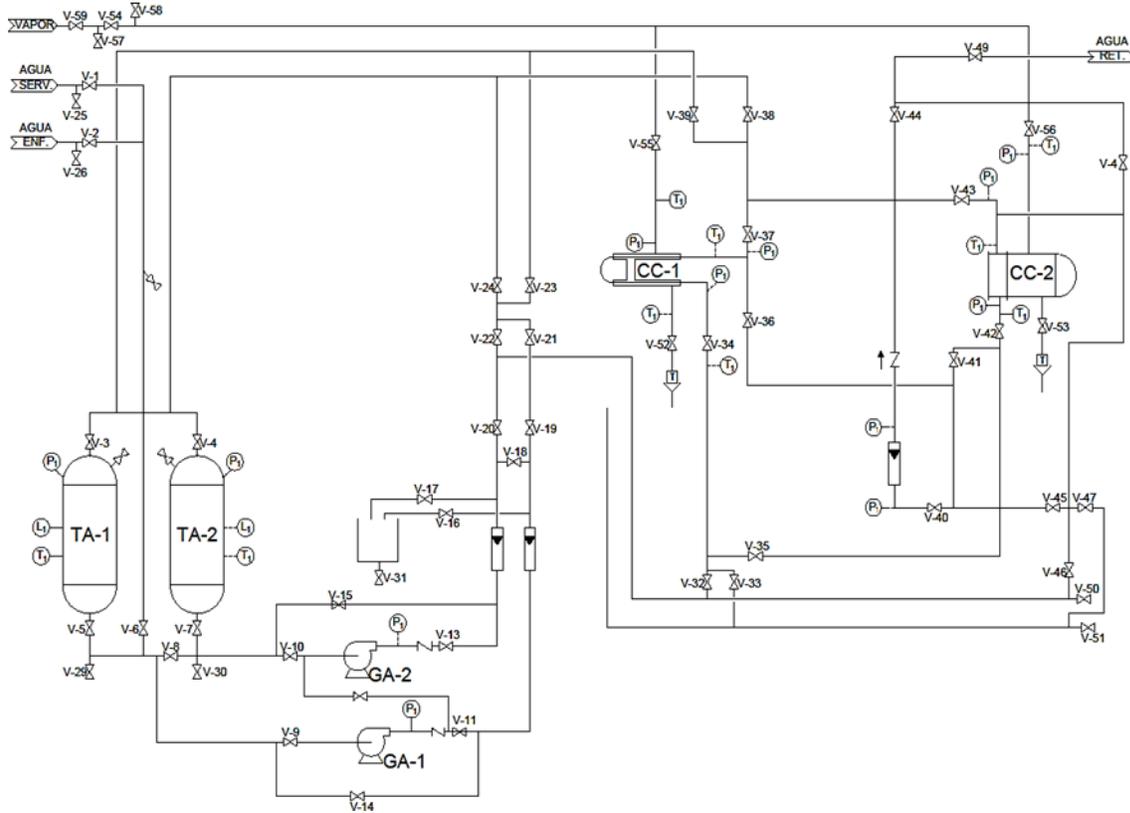


SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS
DE 6º SEMESTRE



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|------------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 00/00/2024 | 3 | 171 de 173 |

ANEXO 3. Diagrama de intercambiador de calor (metal), correspondiente al protocolo P6. Identificación de válvulas para manipulación del sistema.





SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS
DE 6º SEMESTRE

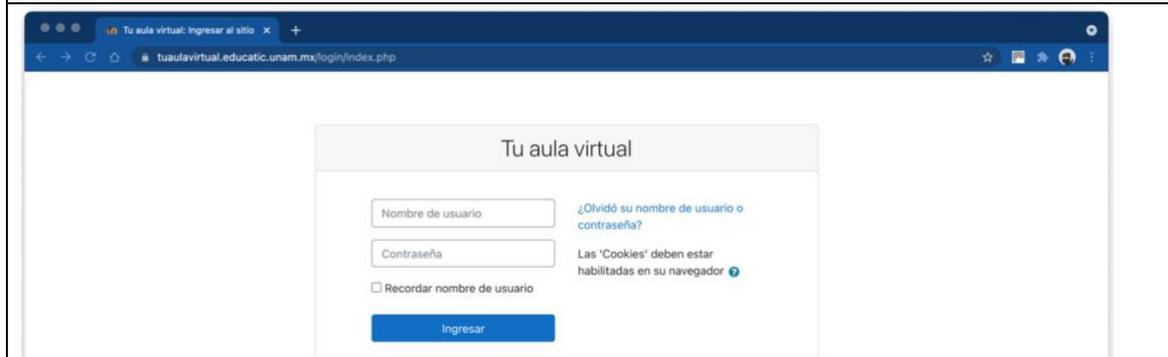


| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|------------------|---------------------|---------|------------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 00/00/2024 | 3 | 172 de 173 |

ANEXO 4. Para consultar información correspondiente al laboratorio y planta piloto, podrá consultar las siguientes páginas de internet:



Para la consultar el blog, deberá ingresar en la siguiente liga: <https://www.ltpiq.info/> o desde tu celular por código QR



Para consultar el aula virtual, para consultar el uso y manejo de los equipos de plantapiloto, deberá ingresar en la siguiente liga: <https://tuaulavirtual.educatic.unam.mx/course/view.php?id=5153>

Recuerda ingresar y seguir las instrucciones de registro y acceder con la Clave de inscripción: **LTP**



SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD
LABORATORIO Y TALLER DE PROYECTOS
DE 6º SEMESTRE



| Código | Fecha de aprobación | Versión | Página |
|-------------------------|---------------------|---------|-------------------|
| SGC-FESZ-IQ-ML01 | 00/00/2024 | 3 | 173 de 173 |

