

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE ENSAYOS PARA EL ESTUDIO
DE LA VISCOSIDAD CINEMÁTICA Y LA DEMULSIBILIDAD EN ACEITES
LUBRICANTES

EDINSON JESÚS MANTILLA JARAMILLO
JUAN SEBASTIÁN RUGELES CHACÓN

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA

2022

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE ENSAYOS PARA EL ESTUDIO
DE LA VISCOSIDAD CINEMÁTICA Y LA DEMULSIBILIDAD EN ACEITES
LUBRICANTES

EDINSON JESÚS MANTILLA JARAMILLO

JUAN SEBASTIÁN RUGELES CHACÓN

Director

Francisco José Saldivia Saldivia

Codirector

Óscar Rodolfo Bohórquez Becerra

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICO-MECÁNICAS

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

BUCARAMANGA

2022

DEDICATORIA

A mi padre, Edinson Mantilla, quien fue el primero que confió en mí y me apoyó incondicionalmente.

A mi familia, mi madre y mis hermanos por su gran compañía y apoyo incondicional.

A mis compañeros de la universidad por su amistad, en especial a Esmerly.

Edinson Jesús Mantilla Jaramillo

DEDICATORIA

A Dios, en primer lugar, por permitirme crecer en todos los aspectos de mi vida, ayudándome a no desfallecer en los momentos de adversidad para poder culminar con éxito esta etapa.

A mi madre, Inelda Chacón, por siempre confiar en mí. Por ser el pilar que me sostuvo durante todo este tiempo, siendo mi ejemplo, mi motor y mi inspiración para poder ser un hombre íntegro y luchador que sabe hacer frente a las situaciones de la vida.

A mi abuela, Josefina Osorio, por alentarme siempre a seguir adelante, por ponerme los pies sobre la tierra y por brindarme sabiduría y consejo en mis momentos de dificultad.

A mi novia, Lorena Cuéllar, por apoyarme en todo momento, por ser mi refugio en los momentos de dificultad brindándome amor, serenidad y comprensión.

A mi hermano, a mis tíos, por estar siempre presentes dispuestos a ayudarme siempre que los necesité.

A todos mis compañeros que hicieron parte del proceso, que de distintas maneras fueron partícipes de la consecución de este logro, en especial a Esmerly Díaz por ser tan incondicional.

Juan Sebastián Rugeles Chacón

AGRADECIMIENTOS

Ante todo, agradecemos a Dios por acompañarnos en esta fase de nuestras vidas y por darnos la fuerza para salir adelante con nuestras carreras.

A la UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER y sus profesores quienes nos compartieron sus conocimientos y experiencias, para formarnos y enseñarnos a ser correctos profesionales.

Edinson y Sebastián

TABLA DE CONTENIDO

1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	168
2. OBJETIVOS.....	20
2.1 OBJETIVO GENERAL	20
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
3. JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	21
4. MARCO TEORICO	22
4.1 ESTADO DEL ARTE	22
4.1.1 A nivel internacional.....	22
4.1.1.1 Estudio de la viscosidad y densidad de diferentes aceites para su uso como biocombustible.	22
4.1.1.2 Caracterización de un baño termostático para medir viscosidad cinemática.	23
4.1.2 A nivel nacional.....	23
4.1.2.1 Diseño e implementación de baño termostático para la caracterización de sistemas microfluídicos.....	23
4.2 TRIBOLOGÍA	24
4.3 ACEITES LUBRICANTES.....	25
4.3.1 Funciones.	26
4.3.2 Bases.....	27
4.3.2.1 Bases minerales	27
4.3.2.2 Bases sintéticas	27
4.3.2.3 Esteres sintéticos.....	28
4.3.2.4 Hidrocarburos sintéticos.....	28
4.3.2.5 Polioxietilenos	28
4.3.3 Aditivos.	28
4.3.4 Propiedades físicas de los lubricantes.....	29

4.3.4.1 Viscosidad.....	29
4.3.4.2 Índice de viscosidad.....	31
4.3.4.3 Punto de inflamación.....	31
4.3.4.4 Punto de congelación	31
4.3.4.5 Volatilidad	31
4.3.4.6 Azufre.....	31
4.3.4.7 Demulsibilidad.....	31
4.4 BAÑO TERMOSTÁTICO.....	32
4.4.1 Sensor de temperatura.	33
4.4.2 Resistencia eléctrica de calor o calefactoras.	34
4.4.3 Agitador mecánico.	35
4.4.4 Probeta.	36
4.4.5 Viscosímetro.	36
4.4.5 Cronometro digital.....	36
4.4.6 Pera de succión.	36
4.5 NORMAS	37
4.5.1 ASTM D445-19.	38
4.5.2 ASTM D1401-19.	39
5. DISEÑO METODOLÓGICO.....	41
6. DISEÑO CONCEPTUAL.....	44
6.1 CRITERIOS DE LA FUNCION DE CALIDAD (QFD).....	44
6.1.1 Requerimientos del cliente.....	44
6.1.2 Requerimientos del diseñador	44
6.2 MATRIZ DE CALIDAD.....	45
6.2.1 Ponderación de los resultados para la selección de alternativas.....	46
7. PLANTEAMIENTO DE ALTERNATIVAS.....	47
7.1 ALTERNATIVA 1	47
7.2 ALTERNATIVA 2.....	48

7.3 ALTERNATIVA 3.....	49
7.4 EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS.....	50
8. FASE DE DISEÑO EN DETALLE	51
8.1 SELECCIÓN DEL VISCOSÍMETRO	51
8.2 DIMENSIONAMIENTO DE LA ESTRUCTURA	55
8.2.1 Ancho del tanque.....	55
8.2.1.1 Selección del tipo de agitador	58
8.2.2 Altura.....	61
8.2.2.1 Selección de resistencia.	61
8.2.3 Largo.....	64
8.2.3.1 Velocidad de flujo.....	65
8.3 TRANSFERENCIA DE CALOR EN EL SISTEMA.....	81
8.3.1 Volumen del propeller.	93
8.3.2 Volumen del eje de agitación.	93
8.3.3 Volumen de sensor.	94
8.3.4 Volumen de la resistencia.	94
8.3.5 Volumen del viscosímetro.	95
8.3.6 Requerimiento de calor del aceite de motor.....	95
8.3.7 Potencia del agitador al tanque.....	95
9. FABRICACIÓN DEL BANCO DE PRUEBAS.....	98
9.1 CONSTRUCCIÓN DEL BANCO DE PRUEBAS	98
9.2 MONTAJE DEL SISTEMA ELÉCTRICO.....	104
10. PRESUPUESTO.....	106
11. ENSAYO DEL BANCO DE PRUEBAS	107
11.1 DISEÑO EXPERIMENTAL	107
11.1.1 Tratamiento estadístico.....	108
11.2 MATERIALES Y REACTIVOS.....	108
11.2.1 Materiales	108

11.2.1.1 Tanque de baño termostático 40 – 100 °C.....	108
11.2.1.2 Viscosímetro Cannon-Fenske tamaño 200	108
11.2.1.3 Termostato	108
11.2.1.4 Cronometro	108
11.2.2 Reactivos	108
11.2.2.1 Aceite mineral (Fluido de baño)	108
11.2.2.2 Aceite de motor (Fluido de prueba).....	108
11.3 DATOS TÉCNICOS Y ESPECIFICACIONES.....	108
11.3.1 Tanque de baño termostático	108
11.3.2 Viscosímetros	109
11.3.3 Termostato.....	109
11.3.4 Fluido de baño	109
11.4 PROCEDIMIENTO TÉCNICO PARA LAS PRUEBAS DE VISCOSIDAD CINEMÁTICA.....	110
11.5 DATOS EXPERIMENTALES PARA MEDICIÓN DE VISCOSIDAD	110
11.6 CÁLCULOS.....	111
11.6.1 Constante gravitacional del laboratorio	111
11.6.2 Viscosidad cinemática	112
11.6.3 Determinabilidad de la medición	113
11.6.4 Diferencia entre valores obtenidos.....	113
11.6.5 Criterio de aceptabilidad	113
11.7 PROCEDIMIENTO TÉCNICO PARA PRUEBAS DE DEMULSIBILIDAD	115
11.8 DATOS EXPERIMENTALES PARA LA MEDICIÓN DE DEMULSIBILIDAD .	116
11.8.1 Informe de pruebas demulsibilidad a 54 °C	116
12. CONCLUSIONES	117
13. RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS	118
14. BIBLIOGRAFÍA	119

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Pérdidas anuales por fricción y desgaste	25
Figura 2. Contacto en seco en la falda del pistón	27
Figura 3. Conducta de un fluido de flujo laminar entre dos placas paralelas	30
Figura 4. Presentación de barniz en un cojinete de turbina	32
Figura 5. Viscosímetro IONOMEX	33
Figura 6. Termómetro de precisión digital o DCT	34
Figura 7. Sensor digital de temperatura	34
Figura 8. Resistencia de calor	35
Figura 9. Motor DC (12v – 1500 rpm)	35
Figura 10. Paleta del agitador	35
Figura 11. Viscosímetro cannon-fenske	36
Figura 12. Pera de succión	37
Figura 13. Medidor de viscosidad cinemática LR-O011	48
Figura 14. Baño de viscosidad cinemática – ISI 090CHR	49
Figura 15. Baño de visibilidad PSL	49
Figura 16. Viscosímetro de rutina Cannon-Fenske para líquidos transparentes ...	52
Figura 17. Diagrama de diseño para el viscosímetro Cannon-Fenske	52
Figura 18. Soporte de neopreno para viscosímetros	53
Figura 19. Prisma rectangular	55
Figura 20. Patrones de flujo para los bancos de tubos alineados o escalonados..	56
Figura 21. Configuración de tubos en bancos escalonados	56
Figura 22. Vista superior de la configuración escalonada	57
Figura 23. Agitador propulsor de 3 aspas	59
Figura 24. Dimensiones de la turbina	60
Figura 25. Catálogo de resistencias tipo cartucho de inmersión	63
Figura 26. Casquillo roscado	63
Figura 27. Flujo de agitación	65

Figura 28. DCL del viscosímetro.....	66
Figura 29. Volumen del viscosímetro mediante software de diseño SolidWorks ...	67
Figura 30. Coeficiente de fricción neopreno/acero (Unlubricated)	70
Figura 31. Vista superior de las condiciones de frontera	75
Figura 32. Vista lateral de las condiciones de frontera	76
Figura 33. Iteración 11 para cambio de presión.....	76
Figura 34. Iteración 11 para cambio de velocidad	77
Figura 35. Cambio de presión respecto a X.....	79
Figura 36. Cambio de velocidad respecto a X	79
Figura 37. Simulación de fluido de agitación mediante SolidWorks.....	81
Figura 38. Diagrama del flujo a través de los viscosímetros.....	83
Figura 39. Temperatura máxima y mínima promedio de Bucaramanga	83
Figura 40. Número de potencia (N_p) en función del número de Reynold (Re) para turbinas e impulsores de alta eficiencia	96
Figura 41. Unión de placas de vidrio.....	99
Figura 42. Cubierta N°1	99
Figura 43. Cubierta N°2	100
Figura 44. Cubierta N°3	100
Figura 45. Soporte para resistencia.....	100
Figura 46. Soporte sensor	101
Figura 47. Soporte motor 1500 rpm.....	101
Figura 48. Soporte motor 1000 rpm	101
Figura 49. Eje de agitación del tanque.....	102
Figura 50. Paleta agitación	102
Figura 51. Soporte probeta demulsibilidad	103
Figura 52. Soporte viscosímetros	103
Figura 53. Torque presentado en la hélice	104
Figura 54. Motor 1000 rpm	104
Figura 55. Motor 1500 rpm	105
Figura 56. Sistema eléctrico en montaje.....	105

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Matriz de calidad.....	45
Tabla 2. Ponderación de resultados de la matriz de calidad.....	46
Tabla 3. Selección de alternativas	50
Tabla 4. Profundidad requerida para viscosímetros de 0 a 300000 mm ² /s.....	54
Tabla 5. Propiedades del aceite de motor	59
Tabla 6. Flujo de cuerpos	71
Tabla 7. Áreas de flujo para diferentes viscosímetros	72
Tabla 8. Pruebas entre la resistencia y la pared.....	77
Tabla 9. Correlaciones del número de Nusselt para arreglo escalonado.....	85
Tabla 10. Factor de corrección respecto al número de tubos	86
Tabla 11. Propiedades del aceite de motor (no usado)	91
Tabla 12. Propiedades SinteSolda Standard	98
Tabla 13. Presupuesto del banco de pruebas	106
Tabla 14. Especificaciones Tanque de baño termostático.....	108
Tabla 15. Especificaciones viscosímetros	109
Tabla 16. Especificaciones termostato	109
Tabla 17. Especificaciones fluido de baño.....	109
Tabla 18. Datos experimentales para medición de viscosidad	110
Tabla 19. Datos de ubicación geográfica del laboratorio	111
Tabla 20. Determinabilidad fluidos generales	114
Tabla 21. Registro general de mediciones.....	116
Tabla 22. Registro de mediciones a 54 °C.....	116

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1. Cálculo del esfuerzo cortante en fluido newtoniano	30
Ecuación 2. Cálculo de la distancia “z”	53
Ecuación 3. Diámetro de rotación del viscosímetro	53
Ecuación 4. Cálculo del paso transversal	57
Ecuación 5. Ancho ocupado por el fluido	58
Ecuación 6. Ancho del tanque	58
Ecuación 7. Diámetro del agitador	60
Ecuación 8. Diámetro de la resistencia.....	62
Ecuación 9. Longitud de roscado.....	64
Ecuación 10. Altura total del tanque	64
Ecuación 11. Peso del viscosímetro	67
Ecuación 12. Volumen del viscosímetro	68
Ecuación 13. Fuerza de empuje	68
Ecuación 14. Fuerza normal	69
Ecuación 15. Fuerza de arrastre.....	69
Ecuación 16. Fuerza de fricción.....	69
Ecuación 17. Fuerza de arrastre en función de la velocidad	70
Ecuación 18. Velocidad de flujo.....	71
Ecuación 19. Velocidad tangencial del agitador	73
Ecuación 20. Velocidad máxima de flujo	73
Ecuación 21. Relación de velocidades	74
Ecuación 22. Longitud sumergida de la resistencia.....	74
Ecuación 23. Distancia entre la resistencia y la pared del tanque	75
Ecuación 24. Largo del baño	80
Ecuación 25. Largo total del tanque	80
Ecuación 26. Área transversal	82
Ecuación 27. Área diagonal	82

Ecuación 28. Velocidad máxima de flujo para la configuración escalonada	82
Ecuación 29. Temperatura de superficie	84
Ecuación 30. Temperatura media	84
Ecuación 31. Número de Reynolds.....	85
Ecuación 32. Correlación de Zukauskas para el número de Nusselt.....	85
Ecuación 33. Coeficiente de transferencia de calor por convección	86
Ecuación 34. Área superficial	87
Ecuación 35. Flujo másico en los viscosímetros.....	87
Ecuación 36. Temperatura de salida	87
Ecuación 37. Diferencia media logarítmica de temperaturas.....	88
Ecuación 38. Tasa de transferencia de calor.....	88
Ecuación 39. Volumen en la sección L-13.....	89
Ecuación 40. Volumen en la sección N-8	89
Ecuación 41. Masa en las secciones L-13 y N-8	90
Ecuación 42. Masa de vidrio sumergida en el tanque.....	90
Ecuación 43. Calor del vidrio de borosilicato	90
Ecuación 44. Masa del fluido de prueba	91
Ecuación 45. Calor del fluido de prueba	92
Ecuación 46. Calor del viscosímetro.....	92
Ecuación 47. Tiempo necesario para calentar los viscosímetros	92
Ecuación 48. Volumen del fluido de baño sin objetos.....	93
Ecuación 49. Volumen del propeller	93
Ecuación 50. Volumen del eje del agitador.....	94
Ecuación 51. Volumen de la resistencia	94
Ecuación 52. Volumen del fluido de baño en el tanque	95
Ecuación 53. Calor del aceite de motor	95
Ecuación 54. Número de Reynolds con el motor seleccionado	96
Ecuación 55. Potencia que entrega el agitador al tanque.....	97
Ecuación 56. Tiempo requerido para calentar los viscosímetros.....	97
Ecuación 57. Constante gravitacional del laboratorio	111

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. MANUAL DE OPERACIÓN.....	122
ANEXO B. MANUAL DE MANTENIMIENTO	126
ANEXO C. GUIAS DE LABORATORIO	131
ANEXO D. FICHA TÉCNICA SOPORTE PROBETA DEMULSIBILIDAD.....	138
ANEXO E. PLANOS BANCO DE PRUEBAS DE VISCOSIDAD CINEMÁTICA Y DEMULSIBILIDAD EN ACEITES LUBRICANTES.....	140

RESUMEN

TÍTULO: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE ENSAYO PARA EL ESTUDIO DE LA VISCOSIDAD CINEMÁTICA Y LA DEMULSIBILIDAD EN ACEITES LUBRICANTES*

AUTOR: EDINSON JESÚS MANTILLA JARAMILLO, JUAN SEBASTIAN RUGELES CHACÓN**

PALABRAS CLAVE: ACEITES LUBRICANTES, VISCOSIDAD CINEMÁTICA, DEMULSIBILIDAD, MANTENIMIENTO, CAPILARIDAD

DESCRIPCIÓN: Toda máquina o herramienta con un conjunto de elementos móviles que se puede aprovechar para transformar energía u optimizar el esfuerzo se enfrenta a un constante ambiente en el cual se generan condiciones de trabajo que en todo momento tendrá contaminantes que afectará el área que genera el 60% de fallas en un equipo, la lubricación. Las empresas, para el mantenimiento de sus equipos, en muchos casos, solicitan de terceros para la realización de pruebas o evaluaciones de aceites lubricantes, dichos exámenes pocas veces se realizan en la zona donde se encuentra la empresa o la máquina, debido a que estos equipos cuentan con un alto costo y poco personal formado en el área de capilaridad, es así como se ve la necesidad de implementar el diseño de un banco para realizar estudios de aceites usados como lubricantes en base a normas establecidas por la ASTM (American Society for Testing and Materials) para las propiedades de viscosidad cinemática y demulsibilidad. En un principio se evalúan las necesidades mediante criterios de selección y se presenta la selección de la alternativa más viable para un adecuado funcionamiento, seguido de un diseño basado en calculo y simulaciones que permitan la comprobación del sistema y den paso a la selección de componentes.

Seguidamente se presenta la construcción de un banco y su respectivo montaje para la validación de un óptimo y correcto funcionamiento, resultando en una maquina idónea y practica para llevar a cabo las pruebas mencionadas en aceites lubricantes.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Francisco José Saldivia Saldivia.

ABSTRACT

TITLE: DESIGN AND CONSTRUCTION OF A TEST BENCH FOR THE STUDY OF KINEMATIC VISCOSITY AND DEMULSIBILITY IN LUBRICATING OILS*

AUTHOR: EDINSON JESÚS MANTILLA JARAMILLO, JUAN SEBASTIAN RUGELES CHACÓN**

KEY WORDS: LUBRICATING OILS, KINEMATIC VISCOSITY, DEMULSIBILITY, MAINTENANCE, CAPILLARITY

DESCRIPTION: Any machine or tool with a set of mobile elements that can be used to transform energy or optimize effort faces a constant environment in which working conditions are generated that at all times will have pollutants that will affect the area that generates 60% of equipment failures, lubrication. Companies, for the maintenance of their equipment, in many cases, request third parties to carry out tests or evaluations of lubricating oils, these tests are rarely carried out in the area where the company or the machine is located, because these equipment has a high cost and few personnel trained in the area of capillarity, this is how the need to implement the design of a bank to carry out studies of oils used as lubricants based on standards established by the ASTM (American Society for Testing and Materials) for kinematic viscosity and demulsibility properties. Initially, the needs are evaluated through selection criteria and the selection of the most viable alternative for proper operation is presented, followed by a design based on calculation and simulations that allow the verification of the system and give way to the selection of components.

Next, the construction of a bench and its respective assembly are presented for the validation of an optimal and correct operation, resulting in a suitable and practical machine to carry out the mentioned tests on lubricating oils.

* Degree Work

** Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Mechanical Engineering. Director: Francisco José Saldivia Saldivia

1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

De acuerdo con las estadísticas de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe, las hidroeléctricas aportaron 40,7% de energía eléctrica consumida en el año 2018, debido a fuertes lluvias que anunciaban que las turbinas hidráulicas¹ (eje principal de la producción eléctrica) trabajarían con un mayor caudal de agua, siendo esto el primer factor que causaría desgaste en el equipo², por ende, éstas máquinas y muchas más, requieren un gran cuidado y mantenimiento, que en cuestión de fallas, el 60% suelen ser producidas por las condiciones tribológicas³.

Los aceites lubricantes ideales para las turbinas pueden durar entre 15 y 30 años, pero para lograr esto hay que tener en cuenta que las inclemencias meteorológicas ocupan el 30% de los fallos en centrales hidroeléctricas⁴ y por ello, se buscan aceites con un alto índice de viscosidad y sensibilidad al agua, que, aun así, mediante seguimientos controlados, para detallar algún cambio en sus propiedades, prolongarían la vida de su equipo estableciendo un adecuado mantenimiento preventivo⁵.

Dejando de un lado las máquinas de generación eléctrica, en la actualidad, la productividad incursiona en equipos con menos componentes como los rodamientos, engranes, pistones y otros más, que deben estar convenientemente

¹ Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), Estadísticas de producción de electricidad de los países del Sistema de la Integración Centroamericana (SICA). Datos preliminares a 2018 (LC/MEX/TS.2019/7), Ciudad de México, 2019.

² SÖDERBERG, Axel y SÖDERBERG, Nils. Desgastes usuales en turbinas hidráulicas, para pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH's)

³ ATTEN2 ADVANCED MONITORING TECHNOLOGIES. La influencia de la lubricación en los elementos de desgaste de maquinaria industrial [Sitio web]. España. [Consultado: 13 de Febrero de 2022]. Disponible en: <https://blog.atten2.com/elementos-de-desgaste-de-maquinaria-industrial>

⁴ RYCHTARCIKOVA, Petra. ¿Cuáles son las causas más comunes de fallos en las centrales hidroeléctricas? [blog]. Telegrafia. Košice. [Consultado: 13 de Febrero de 2022]. Disponible en: <http://www.sirenaselectronicas.com/cuales-son-las-causas-mas-comunes-de-fallos-en-las-centrales-hidroelectricas/>

⁵ TERRADILLOS, Jesús y IGNACIO, José. Todo sobre la lubricación de las turbinas y su mantenimiento a través del análisis del aceite [en línea]. En: TEKNIKER: Lubrication management. Gipuzkoa. [Consultado: 14 de Febrero de 2022]. Disponible en: https://lubricationmanagement.com/wpcontent/uploads/sites/3/2014/07/An%C3%A1lisis_aceite_turbinas_ES.pdf

lubricados para un correcto uso y desarrollo a las que se destinan, debido a esto cada elemento nombrado y todos los demás existentes presentan necesidades específicas y normativas de lubricación que con el paso del tiempo, las condiciones y el uso, irán perdiendo sus propiedades, conociéndose como degradación o deterioro, provocando la reducción de la capacidad del aceite para cumplir con sus funciones básicas, dando comienzo al desgaste en los equipos causados por la oxidación, cambios de temperatura, contaminación y grandes velocidades de cizallamiento.

Mencionado lo anterior, algunas empresas se enfrentan a la problemática de no realizar un completo análisis del equipo y predisponer de servicios externos en lugar de implementar dentro de su gestión, un área específica que se enfoque en el estudio de los aceites lubricantes, ya que factores como el costo, personal capacitado, mantenimiento y practicidad del equipo son tomados en consideración al momento de incluir dichos instrumentos de medición.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Contribuir en la misión de la Universidad Industrial de Santander en la formación y la transferencia de conocimiento para futuros profesionales mediante el diseño y construcción de un banco de ensayos para el estudio de las propiedades físicas en los aceites lubricantes.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Diseñar y construir un baño termostático bajo las siguientes condiciones establecidas por las normas ASTM D445 y ASTM D1401:
 - Rango de viscosidad cinemática para la prueba de viscosidad (0.2-300.000 [mm²/s])
 - Rango de viscosidad cinemática para la prueba de demulsibilidad (28.8-90 [mm²/s])
2. Elaborar protocolos de plan de mantenimiento y manual de uso para un correcto funcionamiento y un mejor aprovechamiento del banco de pruebas.
3. Desarrollar y registrar pruebas en el banco que permitan la validación del diseño.

3. JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

Para satisfacer el funcionamiento óptimo en elementos mecánicos y obtener un resultado eficiente en máquinas, preside el correcto uso de aceites lubricantes, el cual permite prolongar su vida útil y, en consecuencia, la reducción de gastos en mantenimiento de carácter correctivo. Emplear correctamente estos fluidos precisa del estudio de la tribología, que, avanzando como una ciencia, se encarga de estudiar múltiples detalles en el campo de la ingeniería como los diferentes tipos de desgaste, diseños de cojinetes, recubrimientos, tratamientos, efectos térmicos y la producción de lubricantes con diversos aditivos o bases que buscan mejorar sus características en ambientes extremos. Dentro de estas investigaciones, la prioridad de esta ciencia es lograr la tecnología adecuada para evaluar con exactitud las propiedades químicas y mecánicas de estos fluidos.

Adquirir un baño termostático que evalúe estas propiedades suele presentar inconvenientes por factores como el costo de fabricación, operación de software (particular en ciertos equipos), productos importados y la dificultad de obtener los repuestos en el país al momento de presentar una avería, representa una clara observación de las causas por las cuales no es fácil la obtención de dicha tecnología.

De lo anterior, la elaboración de este proyecto tiene como propósito entregar un baño termostático como banco de pruebas para el laboratorio de mantenimiento para el estudio de las propiedades físicas en los aceites lubricantes para la escuela de ingeniería mecánica de la Universidad Industrial de Santander.

4. MARCO TEORICO

En esta sección se elabora una revisión bibliográfica de los conceptos generales a partir de los cuales se sustenta el análisis textual de este proyecto enfocado en el diseño y construcción de un banco de ensayos para el estudio de la viscosidad cinemática y la demulsibilidad en aceites lubricantes. Describe los fundamentos de este proyecto con el fin de que tanto para el lector ordinario como para el lector especializado sea sencillo comprender los fines de este trabajo.

También se exponen algunos antecedentes de proyectos anteriores, los cuales están relacionados con el diseño y construcción de baños termostáticos para fines similares y también con la caracterización y estudio de propiedades de los aceites lubricantes para sus diferentes aplicaciones. Estos proyectos han servido para darle una dirección y un propósito al proyecto, y tener una referencia para proseguir en la realización de este.

4.1 ESTADO DEL ARTE

4.1.1 A nivel internacional.

4.1.1.1 Estudio de la viscosidad y densidad de diferentes aceites para su uso como biocombustible.⁶ En este proyecto el requerimiento de hacer uso de aceites vegetales como biocombustibles para motores Diesel, conllevó a la realización de un estudio de viscosidad y densidad a diferentes aceites vegetales para comparar dichas propiedades con las del gasoil, de esta manera se determinó que para poder lograr dicho objetivo es necesario calentar los aceites antes de ser inyectados al motor. La caracterización de los aceites vegetales permitió conocer las temperaturas a las que se deben llevar dichos aceites para que operen con

⁶ LEGAZ Berbel, R. Estudio de la viscosidad y densidad de diferentes aceites para su uso como biocombustible. Barcelona: Trabajo de investigación (Especialidad en Química Industrial). Universitat Politècnica de Catalunya. 2010. p. 93.

viscosidades similares a las del gasoil convencional con temperatura de funcionamiento de 10 °C.

Para las mediciones de temperatura se introdujeron en el regulador de temperatura los valores deseados. El regulador utilizado en esa práctica constó de dos valores de regulación. Con el primero de ellos se daba la temperatura a la que cortaba la placa calefactora, y con el segundo se actuó directamente sobre la resistencia sumergida.

4.1.1.2 Caracterización de un baño termostático para medir viscosidad cinemática.⁷ Este artículo describe la geometría y características físicas de un baño termostático el cuál se utilizó para medir viscosidad cinemática, dicho baño termostático fue puesto a prueba para registrar valores de temperaturas con un termómetro de referencia fijo en su centro y con un termómetro auxiliar el resto de su volumen todo esto con la finalidad de poder estudiar la estabilidad térmica a largo plazo en el baño termostático registrando los gradientes de temperatura. De esa manera concluyeron que la estabilidad de temperatura en el baño termostático durante aproximadamente 15 horas es ≤ 5 mK.

4.1.2 A nivel nacional.

4.1.2.1 Diseño e implementación de baño termostático para la caracterización de sistemas microfluídicos.⁸ En este proyecto se requería diseñar e implementar un baño termostático para análisis de sistemas microfluídicos haciendo inmersión en agua. Para esto como primera instancia se seleccionó una resistencia eléctrica que cumpla con el requerimiento térmico, posteriormente se seleccionó el material y geometría específica para el recipiente donde se aloja el fluido de trabajo y a continuación se diseñó el circuito electrónico, de manera experimental se obtuvo

⁷ GALVÁN M. del C. TRUJILLO, S. "Caracterización de un baño termostático para medir viscosidad cinemática". {En línea}. {2 diciembre de 2021} disponible en: {<https://www.cenam.mx/Memorias/descarga/Memorias%20Simposio/documentos/ta-or076.pdf>}

⁸ SANCHEZ Araújo, S. Diseño e implementación de baño termostático para la caracterización de sistemas microfluídicos. Bogotá: Universidad de los Andes, Facultad de ingeniería. 2020. p. 53.

la función de transferencia del sistema y se realizaron pruebas de estabilización PID para temperaturas de 30 a 80 °C como puntos base de ajuste. A partir de esto, se concluyó que el control de temperatura requiere un sistema sobre amortiguado para garantizar que no se exceda el punto de ajuste. Esto último nos aclara el panorama para tomar la decisión de hacer selección de un controlador digital de temperatura disponible en el mercado que cumpla con los requerimientos del rango de temperatura de trabajo del baño termostático.

4.2 TRIBOLOGÍA

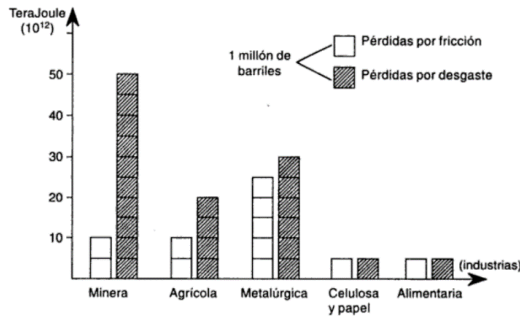
La tribología nace el 9 de marzo de 1966 como una disciplina científica y comienza a estar en el carácter multidisciplinario, en el que participaban grandes materias como la física, química y matemática.⁹

En 1978, expertos realizaron cálculos que llevaron a la conclusión que en Norteamérica las pérdidas por la fricción y el desgaste en equipos alcanza el valor de 20 millones de dólares, un equivalente a la cantidad de energía necesaria para mantener la ciudad de Nueva York durante un año. Para 1983, luego de contar con profesionales en esta ciencia, deciden hacer estudios en seis ramas (minera, agrícola, petroquímica, del papel, la celulosa y la alimentaria), en las que se producían las mayores pérdidas energéticas por concepto de la tribología.¹⁰ Las pérdidas se debían tanto a problemas de fricción como de desgaste, proporción que se muestra en la figura 1.

⁹ Noria. (Sitio Web). <https://noria.mx/lublearn/que-es-la-tribologia/> (Consultado: 20 de abril 2022).

¹⁰ MARTINEZ Pérez, F. La tribología: Ciencia y técnica para el mantenimiento. México: Editorial, Limusa, S.A. 2002. p. 15.

Figura 1. Pérdidas anuales por fricción y desgaste



Fuente: Martínez Pérez, Francisco. (1997). La tribología: ciencia y técnica para el mantenimiento (1ed. 1reimp. ed.). Limusa.

4.3 ACEITES LUBRICANTES

La lubricación ha formado parte de la vida útil de las máquinas hoy en día, pero ha sufrido varios cambios y estudios a lo largo de la historia del ser humano. El primer registro fue en la época de los egipcios, donde utilizaban aceite de oliva como lubricante para transportar grandes rocas en sus edificaciones, luego de la llegada de los carros de combate, la grasa de animal comenzó a usarse como un lubricante en el antiguo país Grecia.¹¹ En el siglo XIX el lubricante seguía con una composición que no se desviaba de los límites como aceite de animal o de plantas (esperma de ballena, aceite de ricino, aceite de cacahuate, aceite de colza, etc.), pero en ese momento, la lubricación no era exigente en máquinas, era solo una decisión que recaía en el cliente, por eso hasta finales de ese siglo los lubricantes se fabricaban en base a la experiencia y no por análisis científicos. El siglo XX fue la época de muchos estudios para los lubricantes, luego de que descubrieron que, al mezclar petróleo con aceites lubricantes, este alargaba el uso por 10 años e incluso más. Con la producción en crecimiento de máquinas más complejas y más delicadas se fueron exigiendo lubricantes que cumplieran con funciones y condiciones desafiantes (preservación de sus propiedades a temperaturas más altas y más bajas), con la llegada del método de refinado (extracción de líquidos condensados

¹¹ S-oil Seven. Historia de lubricante (Sitio Web). Corporación S-OIL SEVEN. <http://www.s-oil7.com/esp/knowledge/basic/history.jsp> (Consulta: 25 de julio 2021).

del petróleo con contenido de carbono en base a la cantidad de átomos de carbono para producir derivados comerciales) en los años 1920 y 1930, la noticia de usar aditivos para mejorar la calidad de los aceites lubricantes se esparció por todas las industrias a nivel global. Años más tarde el proceso de hidroisomerización formó parte en la creación de aceites lubricantes sintéticos, con un rango de temperatura más amplio y mayor uso en máquinas de diferente uso industrial. En la actualidad, ingenieros, científicos y más profesionales estudian químicos y procesos que logren establecer lubricantes con funciones a condiciones aún más exigentes que las de hoy en día, en busca de lubricantes de máximo nivel.

4.3.1 Funciones. Los aceites lubricantes cumplen con las siguientes funciones:

- **Reducir la fricción.** Evita que las piezas entren en contacto y se desgasten con el tiempo.
- **Enfriamiento o control de la temperatura.** Absorber calor y disiparlo a través del fluido, esto permite usarse como refrigerante en máquinas de corte.
- **Distribución de peso.** Mitigar el choque o peso de los componentes al disipar esta energía por todo el lubricante.
- **Protección ante la corrosión.** Busca proteger el mecanismo de la entrada de aire o algún otro fluido ajeno al lubricante que cause corrosión u oxidación en las piezas.
- **Limpieza.** Capacidad de arrastrar el material contaminante al tanque, donde permanecerá hasta su mantenimiento.
- **Función hermética.** Prevenir la salida de gas de combustible y entrada de material extraño al sistema es una función de algunos lubricantes para proteger el sistema de un aumento o disminución de potencia en la máquina.¹²

¹² Mobility Work. Lubricación y engrasado en la industria: tipos y características (Sitio Web). Corporación Mobility Work: Software de mantenimiento. 2016. <https://mobility-work.com/es/blog/lubricacion-engrasado- funcionamiento/> (Consulta: 01 agosto 2021).

En la figura 2 se puede observar como la falta de lubricante afecta la vida de elementos mecánicos.

Figura 2. Contacto en seco en la falda del pistón



Fuente: <https://www.motorok.com/noticias/pistones-gripados-por-marcha-en-seco/>

4.3.2 Bases. Ingrediente de mayor concentración en lubricantes y grasas, las cuales otorgan las propiedades de fondo.¹³

4.3.2.1 Bases minerales. Las bases con origen mineral no son completamente biodegradables, son convencionales a temperaturas altas, pero no muy buenas a temperaturas bajas, también sufren cambios con facilidad a condiciones extremas y es cuando se hacen uso de aditivos.

- **Bases convencionales.** Formados por aceites hidrocarbonados derivados del petróleo a través de dos procesos (desaromatizado y desparafinado).
- **Bases hidro-craqueadas.** Como la base convencional, pero este tiene un proceso de refinado al vacío (en orden: prehidrotratamiento para retirar azufre y nitrógeno, hidroisomerización, vacío, desparafinado y el desaromatizado).

4.3.2.2 Bases sintéticas. Son procesados en laboratorios, donde pueden ser o no de origen petrolífero. Adecuados para las más duras condiciones de trabajo.

¹³ SANZ Tejedor, M. Química Orgánica Industrial: Características de las bases lubricantes (Sitio Web) <https://www.eii.uva.es/organica/qoi/tema-13.php> (Consulta: 21 de septiembre 2021).

4.3.2.3 Esteres sintéticos. Derivados de la cadena larga de alcoholes y ácidos carboxílicos, son utilizados comúnmente en turbinas de aviones. Para la fabricación, se lleva a cabo 4 procesos (esterificación, neutralización, destilación y filtración) la desventaja es que presentan desgaste en contacto con el caucho, estos lubricantes desgastarían juntas, sellos y recubrimiento de algún polímero.

4.3.2.4 Hidrocarburos sintéticos. Esta base se segmenta en dos partes:

- **Poliolefinas.** Lubricante que se obtiene a partir del etileno mediante dos procesos (polimerización e hidrogenación). Son conocidos por tener baja viscosidad (2 – 10 cSt) a temperaturas altas.
- **Polisobutenos.** Su producción proviene de un proceso complejo (polimerización, craqueo de la fracción al vacío del petróleo y uso de catalizadores), esto puede controlar una viscosidad desde 1 a 45.000 cSt a 100 °C.

4.3.2.5 Polioxietilenos. Usados en sistemas hidráulicos que requieran resistencia al fuego, estos lubricantes se obtienen a partir de la polimerización de óxido de etileno y oxido de propeno con alcoholes o agua, donde se utilizan dos clases de polímeros (homopolímeros de óxidos de propeno y copolímeros de óxidos de etileno u oxido de propeno).

4.3.3 Aditivos. Son productos químicos o sustancias que se agregan a los lubricantes, conformando una propiedad más adversa ante las condiciones requeridas, el mejoramiento de propiedades se basa mucho en algunos aditivos, estos se clasifican en:

- **Mejora de viscosidad.** Conformados por polímeros que otorgan la denominación de aceites multigrados, la desventaja es que sufre de cambios en la viscosidad a bajas y altas temperaturas.
- **Anticongelantes.** Hecho a base de copolímeros de metacrilato, fenoles o naftalenos alquilados, cumple con la función de evitar la cristalización en el lubricante.

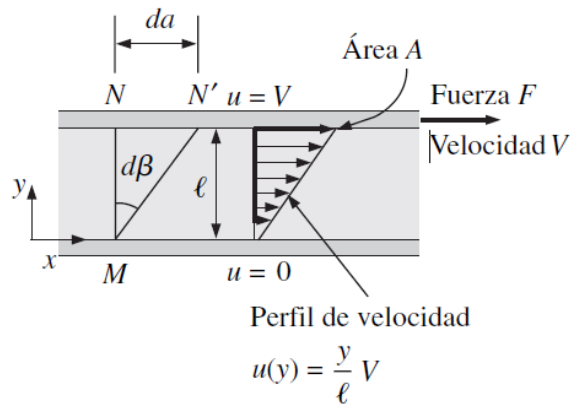
- **Antioxidantes.** Mejora la función de contrarrestar la oxidación de los lubricantes por medio de soluciones con compuestos en bases de fenoles, derivados de Zinc, esterres de azufre o aminas aromáticas.
- **Anticorrosivos.** Aditivo que previenen la contaminación de metales ferrosos debido a la combinación del agua con el aire, la película del fluido separa esta mezcla que podría afectar las superficies de contacto.
- **Dispersantes.** Estos aditivos conforman un lubricante capaz de mantener en suspensión los contaminantes o impurezas solidas que se forman en el funcionamiento del motor (gomas, hollines y lodo).
- **Detergentes.** Usando compuestos de nitrogenados básicos, impiden la formación de barniz en zonas calientes del sistema o del motor.
- **Antiespumante.** Aditivos compuestos de polidimetilsiloxanos o derivados acetilénicos, que impiden la formación de espuma o burbujas de aire en el aceite lubricante.

4.3.4 Propiedades físicas de los lubricantes. Son aquellas que permiten caracterizar los diferentes tipos de lubricantes.

4.3.4.1 Viscosidad. Tiene un concepto corto (resistencia del fluido a fluir¹⁴), pero esta propiedad es la más importante dentro de las condiciones de los lubricantes, también cabe mencionar que es una de las propiedades con la que se estudiaran los aceites lubricantes en este proyecto, esta propiedad, como se observa en la figura 3, se manifiesta cuando el fluido entra en movimiento causado por piezas móviles que están en contacto con el fluido, se genera una capa o película entre las piezas que se moverán entre sí, generando desplazamiento de la superficie metálica sin tener que entrar en contacto con otra, evitando desgaste de material y mejorando el rendimiento del sistema.

¹⁴ Reability Web. Los Lubricantes parte 1 (Sitio Web). <https://reabilityweb.com/sp/articles/entry/los-lubricantes> (Consulta: 30 de octubre 2021).

Figura 3. Conducta de un fluido de flujo laminar entre dos placas paralelas



Fuente: Cengel, Y.A., Cimbala, J.M.(2006). Mecánica de fluidos: fundamentos y aplicaciones. McGraw-Hill, p. 47.

En la ecuación 1 mostrada a continuación, se muestra que el esfuerzo cortante para fluidos newtonianos resulta ser directamente proporcional al gradiente de velocidad:¹⁵

$$\tau = \frac{du}{dy} = \frac{u_o}{y_o}$$

Ecuación 1. Cálculo del esfuerzo cortante en fluido newtoniano

Donde:

τ : Esfuerzo cortante

u_o : Velocidad de la placa superior

y_o : Distancia establecida entre las placas

¹⁵ CIMBALA, J. CENGEL, Y. Mecánica de fluidos fundamentos y aplicaciones. New York: Editorial McGrawHill. 2004. p. 10-11.

Pero para la realización del proyecto y el estudio de las propiedades de los lubricantes (viscosidad y demulsibilidad), se llevarán a cabo ecuaciones establecidas por las normas y que se discutirán más adelante.

4.3.4.2 Índice de viscosidad. Es la capacidad de mantener la viscosidad en un rango definido de temperaturas, a medida que la temperatura es baja, el índice de viscosidad es alto, pero si el índice de viscosidad de un aceite lubricante es bajo, esto indica que la viscosidad varía mucho con una temperatura alta.

4.3.4.3 Punto de inflamación. Punto que determina la temperatura que alcanzan los lubricantes y que pueden arder en presencia de una llama, puede indicarse como temperatura de inflamación (T_i), esta temperatura es alta si el aceite es pesado, para aceites ligeros, su temperatura de inflamación se acerca a los 105 °C.

4.3.4.4 Punto de congelación. Como el punto de inflamación, esta propiedad determina la temperatura en que el aceite presenta cristalización y congelamiento.

4.3.4.5 Volatilidad. Punto en el que las moléculas más livianas del aceite comienzan a evaporarse (aquí es donde por una chispa, se produciría una llama) y las moléculas más pesadas permanecen y causan un cambio en la viscosidad.

4.3.4.6 Azufre. Presente como una propiedad en todos los aceites lubricantes, la tendencia global es disminuir el uso de azufre en los lubricantes, porque este elemento tiene la desventaja de producir emisiones tóxicas para el ser humano y presentar un porcentaje en daño al medio ambiente. Por esto definir la propiedad es en base a cuanto menor es el contenido de azufre mayor es el refino.

4.3.4.7 Demulsibilidad. Definida como la capacidad que tiene el aceite lubricante de separarse del agua, (esta es otra propiedad que se estudiará en este proyecto), en el proceso educativo, las escuelas enseñan que el aceite y el agua se separan naturalmente (debido a la diferencia de densidades) y que el aceite vagamente es definido como hidrofóbico porque tiene la capacidad para repeler el agua, por tal motivo algunos aceites lubricantes presentan esta propiedad, como el aceite usado en turbinas (con viscosidades desde 28.8 mm²/s hasta 90 mm²/s a 40 °C). Dentro

de funcionamiento de las turbinas de vapor, es indispensable el uso de aceites lubricantes que cuenten con un alto grado de demulsibilidad, ya que es imposible no contar con un cierto porcentaje de agua en el sistema. Los fabricantes de turbinas recomiendan que por debajo de 500 PPM debe estar el nivel del agua antes de que el aceite presente descomposición, por otro lado, ASTM D4378-08 establece que el aceite no debe contener un nivel de agua superior a 1.000 PPM. Es importante controlar el aceite, de haber una cantidad desproporcionada de agua, traería problemas como la formación de ácido y la presentación de barniz en las superficies metálicas, como se puede observar en la figura 4.

Figura 4. Presentación de barniz en un cojinete de turbina



Fuente:

https://lubricationmanagement.com/wpcontent/uploads/sites/3/2014/07/An%C3%A1lisis_aceite_turbinas_ES.pdf

4.4 BAÑO TERMOSTÁTICO

La diversidad de las interacciones físicas y químicas en el desempeño de los lubricantes requiere una atención especial al desarrollo de nuevos métodos experimentales para estudiar y caracterizar superficies. Actualmente, muchos instrumentos y métodos se utilizan para caracterizar las superficies de estos fluidos, sin embargo, cada uno tiene dificultades y limitaciones. La mayoría de los métodos se basan en análisis posteriores a fallas y no brindan información directa sobre la

naturaleza del proceso tribológico. Existe la necesidad de desarrollar métodos capaces de analizar y diagnosticar los lubricantes en uso.

Con el fin de determinar propiedades de los aceites lubricantes, se fabrica el baño termostático, tal como se puede apreciar en la figura 5, un instrumento muy útil en un laboratorio se utiliza para contener el lubricante dentro de una probeta evaluando sus propiedades manteniendo una temperatura constante durante un tiempo establecido.¹⁶

Figura 5. Viscosímetro IONOMEX



Fuente: <http://www.laqq.com/ProductoVerMas.aspx?id=1818&guid=E66BAA94-BF32-EF45-3412-FDDE0C156B23>

El baño termostático cuenta con los instrumentos especificados por las normas (ASTM D445-19^a y ASTM D1401-19).

4.4.1 Sensor de temperatura. dispositivo que convierte cantidades físicas en resistencia y voltaje (convierte temperatura en magnitudes eléctricas). La norma indica usar un termómetro de contacto digital DCT o sensor digital de temperatura como se observa en las figuras 6 y 7.

¹⁶ Fricaval89. Baños Termostáticos para Laboratorios (Sitio Web) <http://fricaval89.com/productos/aparatos-instrumentos-materiales-equipos/banos/banos-termostaticos-laboratorio.html> (Consulta: 01 de noviembre 2021).

Figura 6. Termómetro de precisión digital o DCT



Fuente: <https://uk.vwr.com/store/product/598602/precision-digital-thermometer-traceable>

Figura 7. Sensor digital de temperatura

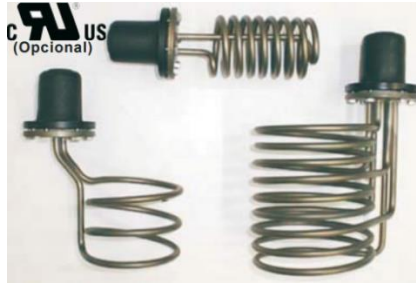


Fuente: <https://fisica-arduino.gitbook.io/sensores/sensores/sensor-de-temperatura-ds18b20>

4.4.2 Resistencia eléctrica de calor o calefactoras. Son dispositivos que reciben energía eléctrica y la convierten en calor. El físico inglés James Prescott Joule descubrió que, si en el material conductor se le aplica corriente eléctrica, la energía contenida por los electrones del material la transforman en calor, debido al movimiento de los electrones, el choque de los átomos elevará la temperatura del material conductor que conforma la resistencia de calor. La figura 8 revela algunas variedades de resistencias de calefacción¹⁷

¹⁷ LONDOÑO, F. Propuesta didáctica para promover el aprendizaje de los conceptos básicos de la electricidad, fundamentada en las instalaciones eléctricas domiciliarias (Sitio Web). https://revistas.uptc.edu.co/index.php/investigacion_uitama/article/view/2891 (Consulta: 03 de noviembre 2021).

Figura 8. Resistencia de calor



Fuente: <http://www.brototermic.com/docs/catalogo-resistencias-calefactoras.pdf>

4.4.3 Agitador mecánico. Para la determinación de la demulsibilidad, se usa un agitador (motor DC con revoluciones de 1500) con paletas de dimensiones específicas, como se observan en las figuras 9 y 10 respectivamente que se encargará de agitar las sustancias dentro de la probeta. El agitador se usa para estabilizar la temperatura del fluido en el tanque.

Figura 9. Motor DC (12v – 1500 rpm)



Fuente: <https://sumador.com/en/products/motor-dc-12v-1500-rpm>

Figura 10. Paleta del agitador



Fuente: <https://lazarsci.com/product/stirrer-paddle-96700-201/>

4.4.4 Probeta. De acuerdo con laboratorios de viscosidad, esta herramienta es un tubo de cristal alargado y graduado, cerrado por un extremo, usado como recipiente de líquidos o gases, el cual tiene como finalidad medir el volumen de estos.¹⁸

4.4.5 Viscosímetro. Es un instrumento de medición para determinar la resistencia a fluir, también denominado viscosidad, de diferentes líquidos, estas herramientas se usan principalmente en aplicaciones de laboratorio. En la figura 11 se puede observar su geometría.¹⁹

Figura 11. Viscosímetro cannon-fenske



Fuente: <https://cannoninstrument.com/manual-glass-viscometers/cannon-fenske-routine-viscometer.html>

4.4.5 Cronometro digital. Instrumento que permitirá determinar el tiempo de prueba en el baño termostático

4.4.6 Pera de succión. Instrumento de goma que se encarga de succionar líquidos (creando un vacío), en este caso, el aceite lubricante en las probetas cannon-fenske, desplazando el fluido desde la base hasta quedar por encima de la línea superior de evaluación. En la figura 12 se tienen cuatro peras de succión de diferentes tamaños.

¹⁸ TP- Laboratorio Químico. Probeta (Sitio Web). <https://www.tplaboratorioquimico.com/laboratorio-quimico/materiales-e-instrumentos-de-un-laboratorio-quimico/probeta-4.html> (Consulta: 10 de noviembre 2021).

¹⁹ PCE Ibérica S.L – Equipos de medida. Viscosímetro (Sitio Web). <https://www.pce-iberica.es/instrumentos-de-medida/metros/viscosímetros.htm> (Consulta: 18 de marzo 2022).

Figura 12. Pera de succión



Fuente: <https://materialesdelaboratoriohoy.us/goma/pera-de-succion-en-el-laboratorio/>

4.5 NORMAS

Las normas que se presentan en este proyecto son establecidas por la ASTM (American Society for Testing and Materials) que significa Asociación Americana para Ensayos de Materiales, es la organización internacional más grande en el mundo que busca el desarrollo de normas, ASTM cuenta también con participación de personas públicas de todo el mundo (consumidores, usuarios, productores, etc.) que contribuyen al desarrollo de nuevos estándares de consenso voluntario. Debido a esto son editores técnicos de normas, documentos técnicos e información relacionada más respetados del mundo. Aplicadas a casi todo, desde el petróleo y el acero hasta el cemento y la sostenibilidad, las normas ASTM ayudan a las empresas a mejorar la calidad y la competitividad al tiempo que mejoran la vida de millones de personas en todo el mundo todos los días.²⁰

Estas normas son una fuente confiable de materiales, los procedimientos indicados comprueban y dan la aceptación al producto para poder comercializarse a nivel mundial. Las normas de ASTM son de usos diversos para materiales como metales, pinturas, plásticos, textiles, petróleo, construcción, energía, análisis de medio ambiente, productos de consumidores finales, dispositivos médicos, productos

²⁰ ASTM Internacional. Seguridad, calidad y competitividad. <https://la.astm.org/la/> (Consulta: 10 de noviembre 2021).

electrónicos y (para este proyecto), investigación, comprobación y la calidad del aceite lubricante. Hoy en día ASTM cuenta con más de 12.000 estándares definidos.

4.5.1 ASTM D445-19. Esta norma establece el método de prueba estándar para la viscosidad cinemática y cálculo de la viscosidad dinámica (opcional) de líquidos transparentes y opacos, especifica que los procedimientos van enfocados en aceites lubricantes con base de productos petrolíferos tanto transparentes como opacos.²¹

El procedimiento de esta prueba se mencionará más adelante para elaborar los ensayos. A continuación, se mencionarán los temas abordados por la norma (recomendaciones), ya que pueden ser útiles para realizar el diseño:

- **Baño controlado por temperatura:** este tanque deberá llenarse con un fluido transparente para tener visibilidad al evaluar la probeta, el fluido usado debe cubrir un volumen tal, que su altura de superficie debe estar por encima de 20 mm de la muestra en el viscosímetro (línea donde comienza la caída del aceite lubricante) o la base del baño debe estar a menos de 20 mm del viscosímetro.
- **Control de temperatura:** el fluido usado en el baño termostático no debe tener una temperatura de fusión menor a los 100 °C, porque el baño debe poder controlar la temperatura dentro de una gamma de 15 a 100 °C y que, al estabilizarse, no debe variar más de 0.02 °C de la temperatura seleccionada para determinar la propiedad en el viscosímetro. También, si la temperatura sobrepasa los 100 °C, la variación no debe ser mayor a 0.05 °C.
- **Altura de la sonda de temperatura:** Dentro del tanque, la sonda no debe sumergirse menos de 3 veces la longitud del elemento sensor y debe alcanzar una distancia de al menos 100 mm o más desde la superficie del fluido en el baño termostático hasta el extremo del sensor. Se recomienda nivelar el elemento de detección de temperatura con la mitad inferior de

²¹ Designation: D445 – 19a Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids (and Calculation of Dynamic Viscosity) 1. doi:10.1520/D0445-19A.

capilar de trabajo, siempre y cuando cumpla con los requisitos mínimos de inmersión.

4.5.2 ASTM D1401-19. Esta norma cubre el método de prueba estándar para determinar la separabilidad del agua de aceites de petróleo y fluidos sintéticos. La norma específica que se deben utilizar aceites lubricantes de turbinas de vapor, que entran en un rango de viscosidades de 28.8 mm²/s a 90 mm²/s a 40 °C,²² de usarse lubricantes con viscosidades más altas, se recomienda usar el método de prueba ASTM D2711.

- **Temperatura de prueba:** la temperatura para determinar esta propiedad debe ser de 54 °C ±1 °C para viscosidades cercanas a 28.8 mm²/s o 82 °C ±1 °C para viscosidades cercanas a 80 mm²/s y debe mantenerse durante un tiempo determinado en la prueba.
- **Recipiente de prueba:** en el baño termostático, debe sumergirse un cilindro de vidrio o de vidrio de borosilicato resistente al calor que sea capaz de evaluar una cantidad de 100 mL y estar graduado con en divisiones de 1.0 mL, el cilindro debe comenzar sus mediciones desde 1 mL o 5 mL, el diámetro de la probeta no debe ser menor que 27 mm. La altura general de cilindro debe ser de 225 mm a 260 mm. No debe tener un error de graduación mayor a 1 mL.
- **Agitador mecánico:** el motor que forma el agitador debe alcanzar los 1500 rpm y la paleta de agitación debe estar hecha en un material de acero inoxidable o con un material metálico con un cromado, la paleta debe tener una longitud de 120 mm ±1.5 mm, ancho de 19 mm ±0.5 mm con un grosor de 1.5 mm ±0.15 mm y el radio de curvatura en las esquinas de las paletas debe ser de 1.6 mm máximo.

²² Standard Test Method for Water Separability of Petroleum Oils and Synthetic Fluids 1. doi:10.1520/D1401-19.

- **Baño termostático:** debe ser tan largo y profundo, que permita sumergir dos probetas hasta las graduaciones de 85 mL. El cilindro debe ser montado y asegurado en una posición en que el eje longitudinal le corresponda a la línea vertical central del cilindro, también se recomienda que el tanque debe tener una cara por donde observar el procedimiento.

5. DISEÑO METODOLÓGICO

La actual fase del proyecto pretende reunir la investigación anteriormente anexada y erigir un procedimiento con el propósito de diseñar y construir el banco de pruebas para la determinación de la viscosidad cinemática y demulsibilidad en aceites. El desarrollo de este plan consta de la siguiente serie de fases:

- Fase I: Estudio de información
- Fase II: Diseño conceptual
- Fase III: Análisis de alternativas
- Fase IV: Diseño en detalle
- Fase V: Construcción del proyecto
- Fase VI: Ensayos del banco de pruebas

En el presente siglo se han visto grandes avances tecnológicos y a medida que esto aumenta, la industria vuelve imprescindible la lubricación como prolongación de la vida útil en equipos, por esto la gestión de analizar los aceites lubricantes en base a las propiedades de aplicación en cada campo combinadas a los recursos de evaluación de mantenimiento predictivo permiten identificar las fallas y sus causas, mejorando la confiabilidad y disponibilidad de la maquinaria.²³

Fase I: Estudio de información

Para construir una idea de trabajo de grado, es necesario emplear herramientas o técnicas de información para encontrar la problemática a desarrollar, en este caso la **Observación indirecta** es usada para este proyecto, que se manifiesta de las necesidades de completar y afianzar los conocimientos experimentales en estudiantes de la escuela de ingeniería mecánica de la UIS, bajo esta premura se realiza un diagnóstico de bancos de pruebas respecto a las materias impartidas en la facultad junto a la indagación de artículos, libros y revistas que arrojan la

²³ AGUADO QUINTERO, Nain. LUBRICACION Y MANTENIMIENTO INDUSTRIAL. En: LubricarOnline. 2015. p. 17. ISSN 2500-4573.

importancia del mantenimiento y la tribología, dos asignaturas de la carrera profesional, que terminan por dar la base para iniciar con la investigación de un banco de pruebas que se enfoque en análisis de fluidos lubricantes en equipos.

FASE II: Diseño conceptual

Esta fase surge del desconocimiento físico de herramientas y metodologías de evaluación de aceites para adentrarse a la locución de entrevistas y preguntas a profesionales con conocimientos en el área de mantenimiento, con el fin de conseguir un banco que les permita tales análisis, estableciendo criterios que se objetarán y se evaluarán frente a los ofrecidos por el diseñador.

FASE III: Análisis de alternativas

Conforme a los aspectos contemplados en la fase I, se llevan a cabo investigaciones de diseños y bancos que cumplan con la perspectiva idealizada de cómo debería visualizarse la alternativa que se escogerá para guiar los parámetros y cálculos necesarios al ejecutar el desarrollo del proyecto.

FASE IV: Diseño en detalle

Resuelta la selección del diseño ejemplar, en esta etapa se extiende el proceso necesario para calcular los parámetros generales del tanque (Ancho, Alto y Largo) respecto a los equipos que conforman el banco de pruebas y que a continuación se especifican:

- **Selección del viscosímetro:** dentro de los objetivos, se menciona la capacidad de abarcar análisis desde 0 a 300.000 cts y dentro de la norma ASTM D446 se indican los factores de una serie de tubos capilares que se usaran para determinar el ancho y la profundidad de baño óptima.
 - **Selección del agitador:** de acuerdo con la dimensión anteriormente establecida y el fluido de baño a usar, se adopta el tipo de agitador mecánico rigiéndose por ecuaciones de diseño establecidas por la recopilación de información bibliográfica.

- **Selección de resistencia térmica:** acorde a la profundidad mínima del tanque, hallar la distancia entre la superficie del fluido de baño y la cubierta es redundante dentro de la norma (menores a 45 mm), es por esto que la sección de roscado de la resistencia completa este parámetro.

La última variable por encontrar consta de varios criterios, velocidad de flujo y dinámica de fluido computarizada (CFD), debido a que la posición de la resistencia es desconocida y para hallar dicho valor es necesario calcular una distancia de mínima turbulencia en el fluido a una velocidad que no contrarreste la fuerza de arrastre en los viscosímetros y causen errores significativos al momento de realizar las pruebas pertinentes.

FASE V: Construcción del proyecto

El avance de esta etapa comprende el traspaso de la teoría a la práctica, implementando conocimiento y herramientas de manufactura para lograr la correcta elaboración de piezas estructurales y mecánicas con materiales que cumplan al margen con los criterios ofrecidos por una matriz de calidad (QFD)

FASE VI: Ensayos del banco de pruebas

Una vez completadas las anteriores fases se lleva a cabo el montaje del banco en su respectivo espacio designado en el laboratorio de mantenimiento de la Escuela de Ingeniería Mecánica y el primer dato a obtener es el tiempo que toma el fluido de baño en alcanzar 40 °C, debido a que, como objetivo general, este proyecto será usado para ejecutar pruebas de conocimiento experimental y no debe tomar más de 1 hora en llegar a esa temperatura.

Finalmente, las revisiones restantes son visuales, el fluido de baño no debe presentar velocidades que alteren la estabilidad de los viscosímetros y no interfieran con la toma de análisis de aceites. En vista de que las normas trabajadas en esta tesis son válidas bajo un conjunto de profesionales, este trabajo de grado se da por concluido una vez que se puedan efectuar las pruebas de viscosidad cinemática y demulsibilidad.

6. DISEÑO CONCEPTUAL

La realización de este proyecto pasa por una revisión y una calificación ante otros diseños que han sido catalogados como baños termostáticos para pruebas de viscosidad, este diseño debe destacar en puntos clave que se determinarán a través de criterios para su selección.

6.1 CRITERIOS DE LA FUNCION DE CALIDAD (QFD)

Los listados que a continuación se establecen, parten de una serie de demandas básicas por los consumidores interesados o con conocimientos en el banco de pruebas y criterios establecidos por el diseñador.

6.1.1 Requerimientos del cliente

- Visibilidad durante el ensayo
- Fácil de operar
- Montaje y desmontaje sencillo
- Interfaz de control accesible
- Económico
- Facilidad para limpiar
- Mantenimiento sencillo
- Menor tiempo de calentamiento
- Localización de elementos
- Sencilla obtención de repuestos

6.1.2 Requerimientos del diseñador

- Estructura fiable
- Cantidad de probetas
- Interfaz humano – máquina
- Facilidad de transporte
- Costo de elementos
- Manual de uso
- Soporte para estructura
- Material de elementos
- Cubiertas intercambiables
- Dispuesto a modificaciones
- Dimensiones
- Cantidad de fluido de b

6.2 MATRIZ DE CALIDAD

El resultado es llevado a cabo en la tabla 1, donde evalúa con un enfoque cuantitativo los criterios ofrecidos por el diseñador respecto a los requerimientos del cliente.

Tabla 1. Matriz de calidad

REQUERIMIENTOS DEL CLIENTE	REQUERIMIENTOS DEL DISEÑADOR								
	Valor	Buena estructura		Cantidad de probetas		Interfaz humano - máquina		Facilidad de transporte	
Visibilidad durante el ensayo	9	5	45	0	0	0	0	0	0
Fácil de operar	5	7	35	2	10	10	50	2	10
Montaje y desmontaje sencillo	3	9	27	3	9	2	6	7	21
Interfaz de control accesible	8	0	0	0	0	9	72	0	0
Económico	10	5	50	9	90	0	0	1	10
Facil de limpiar	1	6	6	5	5	0	0	0	0
Mantenimiento sencillo	4	4	16	4	16	0	0	4	16
Menor tiempo de calentamiento	7	6	42	7	49	5	35	0	0
Localización de elementos	2	3	6	6	12	0	0	0	0
Portable	6	8	48	5	30	0	0	10	60
Total:			275		221		163		117
Porcentaje de incidencia:			10,81%		8,69%		6,41%		4,60%

REQUERIMIENTOS DEL CLIENTE	REQUERIMIENTOS DEL DISEÑADOR								
	Valor	Costo de elementos		Manual de operación		Soporte para estructura		Material de elementos	
Visibilidad durante el ensayo	9	0	0	0	0	7	63	7	63
Fácil de operar	5	0	0	8	40	0	0	2	10
Montaje y desmontaje sencillo	3	0	0	7	21	9	27	3	9
Interfaz de control accesible	8	0	0	8	64	0	0	0	0
Económico	10	10	100	0	0	7	70	9	90
Facil de limpiar	1	0	0	0	0	3	3	3	3
Mantenimiento sencillo	4	2	8	6	24	4	16	6	24
Menor tiempo de calentamiento	7	0	0	0	0	0	0	4	28
Localización de elementos	2	0	0	1	2	0	0	0	0
Portable	6	1	6	2	12	8	48	0	0
Total:			114		163		227		227
Porcentaje de incidencia:			4,48%		6,41%		8,92%		8,92%

REQUERIMIENTOS DEL CLIENTE	REQUERIMIENTOS DEL DISEÑADOR									
	Valor	Cubiertas intercambiables		Dispuesto a modificaciones		Dimensiones		Cantidad de fluido de baño	Total	
Visibilidad durante el ensayo	9	0	0	7	63	8	72	6	54	360
Fácil de operar	5	3	15	3	15	1	5	2	10	200
Montaje y desmontaje sencillo	3	9	27	2	6	5	15	0	0	168
Interfaz de control accesible	8	0	0	9	72	0	0	0	0	208
Económico	10	8	80	5	50	8	80	8	80	700
Facil de limpiar	1	1	1	4	4	3	3	4	4	29
Mantenimiento sencillo	4	2	8	5	20	2	8	0	0	156
Menor tiempo de calentamiento	7	0	0	7	49	7	49	9	63	315
Localización de elementos	2	8	16	6	12	6	12	0	0	60
Portable	6	7	42	8	48	9	54	0	0	348
Total:			189		339		298		211	2544
Porcentaje de incidencia:			7,43%		13,33%		11,71%		8,29%	100,00%

Fuente: Autores

6.2.1 Ponderación de los resultados para la selección de alternativas

Se extraen los valores obtenidos para los requerimientos del diseñador de la anterior tabla y se concentran en la siguiente tabla para enfocar el porcentaje de incidencia de cada criterio.

Tabla 2. Ponderación de resultados de la matriz de calidad

Requerimiento	Puntuación	Porcentaje
Buena estructura	275	11%
Cantidad de Probetas	221	9%
Interfaz humano- máquina	163	6%
Facilidad de transporte	117	5%
Costos	114	4%
Manual de operación	163	6%
Soporte de estructura	227	9%
Material de elementos	227	9%
Cubiertas intercambiables	189	7%
Dispuesto a modificaciones	339	13%
Dimensiones	298	12%
Cantidad de flujo de baño	211	8%
Total	2544	100%

Fuente: Autores

7. PLANTEAMIENTO DE ALTERNATIVAS

La elaboración completa del baño termostático permitirá conectar las ideas de los estudiantes por el conocimiento en práctica, ya que cuentan con la teoría ofrecida en los libros e impartida por los profesores de la escuela de Ingeniería Mecánica, llevar a cabo el funcionamiento de este elemento de laboratorio en un banco que ofrezca completa visibilidad del proceso, mejorará la interactividad en los estudiantes y aportará una mejor comprensión de los sucesos físicos presentados durante la realización de las pruebas, tales como:

- Agitación
- Dinámica de fluidos
- Fuerza de arrastre
- Presión hidrostática
- Transferencia de calor

Finalmente, se busca afianzar su estructura profesional, complementando su base académica con el mundo laboral y para esto se recurre a la selección de alternativas de diseño, el cual se busca escoger la alternativa que cumpla con los criterios anteriormente mencionados.

7.1 ALTERNATIVA 1

Medidor de viscosidad cinemática LR-O011, el cual se puede observar en la figura 13, cuenta con doble cilindro de baño termostático para un efecto de aislamiento, cuenta con iluminación desde el fondo de tres colores para una adecuada visibilidad, cuenta con un sistema inteligente para el control de temperatura y corrección de temperatura. Este diseño solo cubre pruebas de viscosidad cinemática en productos petrolíferos hasta la temperatura de 150 °C.

Figura 13. Medidor de viscosidad cinemática LR-O011



Fuente: <https://www.lonroy.com/product/lr-o011-kinematic-viscosity-meter>

7.2 ALTERNATIVA 2

Baño de viscosidad cinemática INSCIN modelo ISI-090CHR, el cual se puede observar en la figura 14, cuenta con capacidad para dos viscosímetros según la norma ASTM D445, contando con un calentador en la parte trasera del tanque, que abarca temperaturas de 5 a 120 °C y su control se basa en un sistema inteligente basado en un microprocesador digital con controlador PID. Este diseño permite observar por una cara del tanque las probetas que se encuentran dentro, recubriendo las demás caras con acero inoxidable 304 llega a ser el diseño más costoso para realizar unas pruebas más precisas.

La empresa bajo este diseño, INSCIN (Instrumentation and Scientific Instruments Private Limited), lleva en el mercado como fabricantes y proveedores de instrumentos, equipos y accesorios de investigación basados en temperatura y de laboratorio científico por más de 15 años brindando tanques con un mejor control de temperatura y vida útil en equipos.

Figura 14. Baño de viscosidad cinemática – ISI 090CHR



Fuente: <https://www.indiamart.com/proddetail/kinematic-viscosity-bath-22046172862.html>

7.3 ALTERNATIVA 3

Baño de visibilidad PSL, modelo mostrado en la figura 15, establece una fácil operación y la mayor visibilidad en baños termostáticos (5 caras transparentes), su control de temperatura también es basado por un controlador PID con un agitador que cumple con el objetivo de fluir uniformemente la temperatura en el baño y el cual abarca un rango que va desde 15 °C hasta 60 °C. Este diseño cuenta con la ventaja de estabilizarse a una temperatura de 40 °C sin requerir un enfriador.

Figura 15. Baño de visibilidad PSL



Fuente: <https://www.psl-rheotek.com/visibility-bath.html>

7.4 EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS

Las alternativas de baños termostáticos anteriormente mencionadas son evaluadas en la siguiente tabla bajo siete (7) parámetros de diseño que representan la mayoría del porcentaje para la selección.

Tabla 3. Selección de alternativas

Parámetros de diseño	%	Alternativa 1		Alternativa 2		Alternativa 3	
		Calif.	Pond.	Calif.	Pond.	Calif.	Pond.
Dispuesto a modificaciones	18,85%	5	0,943	3	0,566	8	1,508
Dimensiones	16,57%	5	0,829	4	0,663	7	1,16
Buena estructura	15,29%	7	1,071	9	1,377	5	0,765
Soporte de estructura	12,63%	8	1,01	6	0,758	7	0,884
Material de elementos	12,63%	6	0,758	5	0,631	8	1,01
Cantidad de probetas	12,29%	8	0,983	5	0,615	7	0,86
Cantidad de flujo de baño	11,74%	7	0,821	6	0,704	9	1,056
Total	100,00%		6,414		5,313		7,244

Fuente: Autores

Respecto a la anterior tabla, se puede concluir que la alternativa 3 cumple con los Parámetros de diseño más importantes para la elaboración del proyecto.

8. FASE DE DISEÑO EN DETALLE

En esta fase del proyecto se elaboran pautas y procedimientos para la elaboración del diseño tanto para los subsistemas como para los componentes que integran el baño termostático.

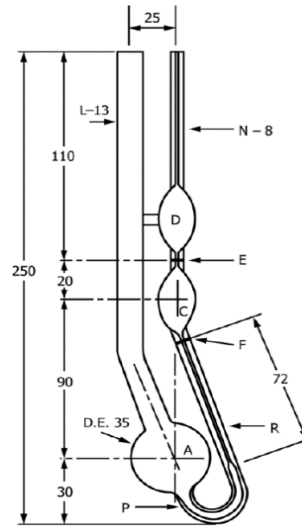
Todas las máquinas o productos se encuentran conformados por componentes totalmente diferentes entre ellos, ya que estos se diseñan en base a criterios que cada uno de estos debe cumplir en el sistema, variando totalmente en factores como la forma, el material, el proceso de fabricación, etc.

Tomando en cuenta los criterios de selección de la anterior fase se calculan y dimensionan las piezas por medio de ecuaciones desarrolladas en libros académicos, artículos científicos y, en caso de movimiento relativo de componentes, el modelado por medio de un sistema de diseño asistido por computadora (CAD).

8.1 SELECCIÓN DEL VISCOSÍMETRO

La selección de este elemento permite determinar parámetros del tanque que se ajusten al rango de viscosidad establecida por la norma ASTM D445 y para esto se busca el viscosímetro con el mayor diámetro de seguridad (diámetro que ocuparía el viscosímetro dentro del tanque en caso de mal manejo y su rotación intervenga con la visibilidad de la prueba) que pueda ofrecer la norma ASTM D446. De acuerdo con esto, se selecciona el tipo Cannon-Fenske (Figura 16).

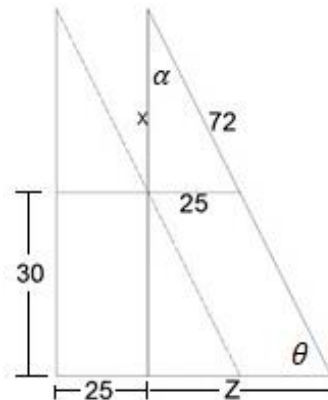
Figura 16. Viscosímetro de rutina Cannon-Fenske para líquidos transparentes



Fuente: ASTM D446-12(2017) Standard Specifications and Operating Instructions for Glass Capillary Kinematic Viscometers

Este viscosímetro, a diferencia de otros viscosímetros, presenta gran complejidad para determinar sus dimensiones. A continuación, se realiza un diagrama de la figura 16 que ayude a determinar el diámetro de seguridad de este elemento.

Figura 17. Diagrama de diseño para el viscosímetro Cannon-Fenske



Fuente: Autores

Para el cálculo de la distancia “z”, haciendo uso de las cotas (mm) que se muestran en la figura 17, se usan ecuaciones trigonométricas para obtener lo siguiente:

$$\frac{x + 30}{\sin(\theta)} = \frac{z}{\sin(\alpha)}$$

Ecuación 2. Cálculo de la distancia “z”

Con lo cual se obtiene que el valor de dicha distancia es:

$$z = 0,03611 \text{ m}$$

Para conocer el diámetro de seguridad de este viscosímetro, se observa que los soportes mostrados a continuación en la figura 18 para viscosímetros giran de forma concéntrica al agujero permitido por la norma (51 mm). Lo que permite determinar el centro entre los tubos L y N. que se observan en la figura 16.

Figura 18. Soporte de neopreno para viscosímetros



Fuente: <https://cannoninstrument.com/h110-rubber-viscometer-holder9726-m53.html>

De esta forma se procede a calcular el valor del diámetro de rotación del viscosímetro:

$$D_v = 2 \cdot \left[\frac{0,025}{2} + z \right] = 97,22 \text{ mm} = 0,09722 \text{ m}$$

Ecuación 3. Diámetro de rotación del viscosímetro

Donde:

D_v : Diámetro de rotación del viscosímetro, [m]

z : Distancia entre el tubo N-8 y el borde del viscosímetro, [m]

Conocido el anterior valor, en la siguiente tabla se observa que el modelo Cannon-Fenske cuenta con el diámetro más grande comparado con otros viscosímetros.

Haciendo uso de esta información se determina que el diámetro de rotación del viscosímetro de rutina de Cannon-Fenske como referencia para posteriormente realizar los cálculos que corresponden al dimensionamiento del tanque.

Tabla 4. Profundidad requerida para viscosímetros de 0 a 300000 mm²/s

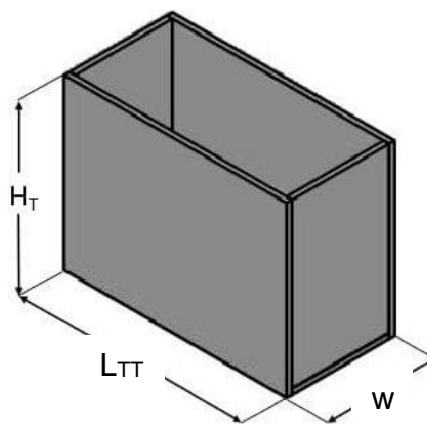
PARAMETROS DE LOS VISCOSIMETROS		
Tipo	Profundidad requerida (mm)	Diámetro de rotación (mm)
Cannon-Fenske	160	97,22
Zeitfuchs redondo	242,5	48,52
Zeitfuchs rectangular	242,5	46,42
SIL	245	46,48
Cannon-Manning semi-micro	195	38
BS/Tubo en U	245	60
BS/U/M miniatura	195	26
Pinkevitch	166	68
Ubbelohde	233	46,48
FitzSimons	285	≈72
Atlantic	280	22
Cannon-Ubbelohde (A)	235	65,2
Cannon-Ubbelohde (B)	285	65,2
Cannon-Manning semi-micro	235	65,2
BS/IP/SIL (S)	202	52,22
BS/IP/MSL	285	38,91
Zeitfuchs de brazo transversal	230	≈76
Cannon-Fenske opaco	200	55
Lantz-Zeitfuchs	85	48,55
BS/IP/RF tubo en U	100	47

Fuente: ASTM D446

8.2 DIMENSIONAMIENTO DE LA ESTRUCTURA

La estructura se basa en algunas características de la alternativa 3 evaluada anteriormente, esto es, usar la geometría de prisma rectangular (ver figura 19) que, con base en lo económico, se busca lograr dimensiones y cantidad de probetas mínimas, lo cual requiere seleccionar elementos del sistema a un bajo costo sin afectar los resultados y calidad de las pruebas.

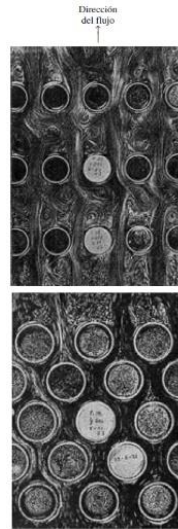
Figura 19. Prisma rectangular



Fuente: Autores

8.2.1 Ancho del tanque. Para la elaboración de este cálculo, se tienen en cuenta factores relacionados con la transferencia de calor. Los viscosímetros se someten a convección forzada, puesto que se induce un flujo causado por el agitador a través de una configuración de tubos, este método resulta ser el factor necesario para determinar la distancia entre los tubos. Se escoge un arreglo escalonado (ver figura 20) ya que la estela turbulenta detrás de cada tubo es menor comparada con la configuración o arreglo en línea. También cabe resaltar que esta configuración no reduce considerablemente la disipación de calor después del paso del fluido por el primer tubo, así que esto indica que los tres tubos o viscosímetros están calentándose al mismo tiempo.

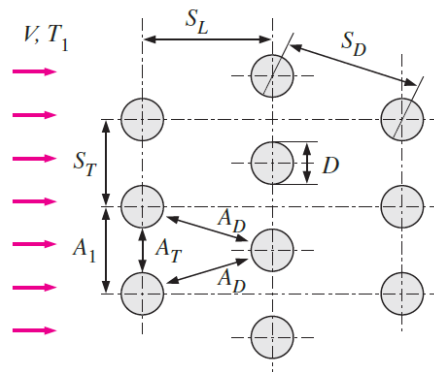
Figura 20. Patrones de flujo para los bancos de tubos alineados o escalonados



Fuente: CENGEL, Yunus A. y GHAJAR, Afshin J. Transferencia de calor y masa. México: McGraw-Hill, 2011. 439 p.

De acuerdo con la configuración entre tubos escogida, se emplean los parámetros de diseño que se ven la Figura 21.

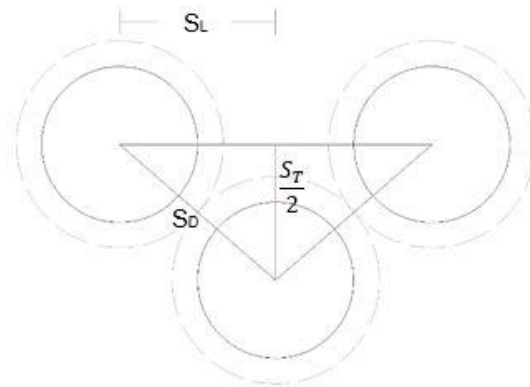
Figura 21. Configuración de tubos en bancos escalonados



Fuente: CENGEL, Yunus A. y GHAJAR, Afshin J. Transferencia de calor y masa. México: McGraw-Hill, 2011. 440 p.

Para determinar la distancia mínima entre tubos, se elabora un diagrama de vista superior (ver figura 22) donde se puede ver la disposición de los viscosímetros y los parámetros de interés.

Figura 22. Vista superior de la configuración escalonada



Fuente: Autores

Para conocer la geometría de la disposición mostrada en la figura 22, se hace uso de las siguientes ecuaciones:

$$\frac{S_T}{2} = \sqrt{S_D^2 - S_L^2}$$

Ecuación 4. Cálculo del paso transversal

Donde:

S_T : Paso transversal, [m]

S_D : Paso diagonal, [m]

S_L : Paso Longitudinal, [m]

$$S_D = D_v = 0,09722 \text{ m}$$

$$S_L = 0,051 \text{ m}$$

La ecuación 7 nos entrega el siguiente valor:

$$\frac{S_T}{2} = 0,08278 \text{ m}$$

Teniendo esto, el ancho que ocupa el fluido se calcula mediante:

$$D_t = \frac{S_T}{2} + D_v = 0,18 \text{ m}$$

Ecuación 5. Ancho ocupado por el fluido

Donde:

D_t : Ancho ocupado por el fluido, [m]

Por lo tanto,

$$W = D_t + 2 \cdot e$$

Ecuación 6. Ancho del tanque

Donde:

W : Ancho del tanque [m]

e : Espesor del vidrio = 0,01 [m]

Se obtiene finalmente que el ancho del tanque es:

$$W = 0,2 \text{ m}$$

8.2.1.1 Selección del tipo de agitador. Para fluidos con viscosidades inferiores a 3 Pa.s (3000 cp), propulsores o agitadores propulsores, se recomienda el agitador de tres aspas tipo marino (ver figura 23) que giran a velocidades de 400 a 1750 rpm (revoluciones por minuto) y son ideales para líquidos de baja viscosidad.²⁴

²⁴ GEANKOPLIS, Christie John. PROCESOS DE TRANSPORTE Y PRINCIPIOS DE PROCESOS DE SEPARACIÓN. 4ª ed. México: CONTINENTAL S.A., 2006. 161 p. ISBN 970-24-0856-3.

Figura 23. Agitador propulsor de 3 aspas



Fuente: <https://www.amazon.es/barco-pl%C3%A1stico-palas-h%C3%A9lice-giratoria/dp/B01F0T1N0Q>

Se usa este tipo de agitador puesto que el fluido de baño termostático seleccionado es el aceite de motor no usado, debido a parámetros de relación con el aceite mineral (fluido que cuenta con poca información para realizar pruebas CFD), la cual puede observarse en la tabla 5.

Tabla 5. Propiedades del aceite de motor

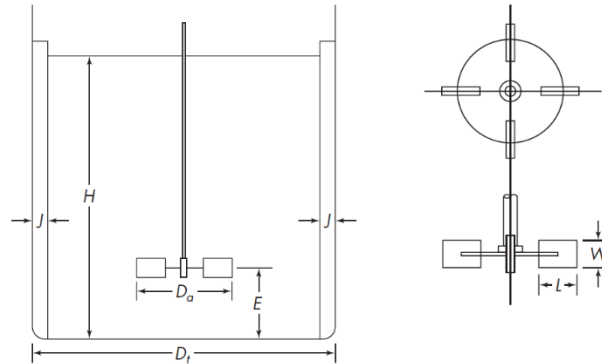
Temp. T , °C	Densidad ρ , kg/m ³	Calor específico c_p , J/kg · K	Conductividad térmica k , W/m · K	Difusividad térmica α , m ² /s	Viscosidad dinámica μ , kg/m · s	Viscosidad cinemática ν , m ² /s	Número de Prandtl Pr	Coef. de expansión volumétrica. β , 1/K
<i>Aceite de motor (no usado)</i>								
0	899.0	1797	0.1469	9.097×10^{-8}	3.814	4.242×10^{-3}	46,636	0.00070
20	888.1	1881	0.1450	8.680×10^{-8}	0.8374	9.429×10^{-4}	10,863	0.00070
40	876.0	1964	0.1444	8.391×10^{-8}	0.2177	2.485×10^{-4}	2,962	0.00070
60	863.9	2048	0.1404	7.934×10^{-8}	0.07399	8.565×10^{-5}	1,080	0.00070
80	852.0	2132	0.1380	7.599×10^{-8}	0.03232	3.794×10^{-5}	499.3	0.00070
100	840.0	2220	0.1367	7.330×10^{-8}	0.01718	2.046×10^{-5}	279.1	0.00070
120	828.9	2308	0.1347	7.042×10^{-8}	0.01029	1.241×10^{-5}	176.3	0.00070
140	816.8	2395	0.1330	6.798×10^{-8}	0.006558	8.029×10^{-6}	118.1	0.00070
150	810.3	2441	0.1327	6.708×10^{-8}	0.005344	6.595×10^{-6}	98.31	0.00070

Fuente: CENGEL, Y.A., CIMBALA, J.M. Mecánica de fluidos: fundamentos y aplicaciones. México: McGraw-Hill, 2006. p. 892.

De acuerdo con la realización del proyecto, estas pruebas se llevan en un medio ambiente con temperaturas mayores a 20 °C y a partir de esta temperatura, la viscosidad dinámica desciende desde 0,8374 Pa.s, con esto se determina que se puede usar el agitador tipo propulsor anteriormente mencionado.

En la figura 24 se muestra diseño “estándar” de turbina, el cual sirve de base para realizar los cálculos respectivos al diámetro del agitador.

Figura 24. Dimensiones de la turbina



Fuente: McCabe, W. L., Harriot, P., Piombo Herrera, A. C., & Smith, J. C. Operaciones unitarias en ingeniería química (7a. edición.). México: McGraw-Hill, 2007, p. 263.

Se procede a calcular el diámetro del agitador con las proporciones geométricas o ecuaciones estándar para un sistema de agitación con proporciones típicas.

$$\frac{D_a}{D_t} = \frac{1}{3}$$

Ecuación 7. Diámetro del agitador

Donde:

D_a : Diámetro del agitador, [m]

Con lo cual se obtiene que el diámetro del agitador es de:

$$D_a = 0,06 \text{ m}$$

Con este parámetro establecido, se puede determinar que el largo del tanque para la zona del agitador (D_{ta}) toma el valor del ancho interno del tanque.

$$D_{ta} = D_t = 0,18 \text{ m}$$

Siguiendo las especificaciones mencionadas en el libro de Operaciones Unitarias de McCabe: *Cuando el tanque es pequeño, el agitador debe estar descentrado del tanque*²⁵, por este motivo se ubica el agitador a una distancia D_{ta} luego de la distancia que ocupan los tres viscosímetros a lo largo del tanque, como se observa en la figura 22.

8.2.2 Altura

Se determina la altura del tanque de acuerdo con el viscosímetro de mayor profundidad requerida por la norma ASTM D445 con base en las dimensiones específicas de la norma ASTM D446 que se observa en la tabla 4.

De acuerdo con esto, se tiene que:

$$H = 285 \text{ mm}$$

Donde:

H: Profundidad mínima del baño, [mm]

Al tenerse una profundidad del líquido de baño, la norma ASTM D446 menciona que la superficie del líquido del baño no debe estar a más de 45 mm de la parte superior de la tapa del baño y que el agujero por donde pasa el viscosímetro debe tener un diámetro de 51 mm en la tapa del baño.

De acuerdo con lo anterior, esta distancia se puede determinar con la zona de no calentamiento que presentan las resistencias calefactoras.

8.2.2.1 Selección de resistencia. Respecto al volumen que ocupa el tanque de la alternativa 3, las resistencias calefactoras de agua, alcanzan potencias de 500 W, con esta potencia se tarda más de 30 minutos calentar el tanque y entre mayor es el tiempo de calentamiento, mayor es el tiempo para estabilizar el baño a una temperatura específica, pero resistencias mayores de 500 W de potencia cuentan con un diseño que alteraría el flujo de agitación en el tanque y para prevenir vórtices

²⁵ MCCABE, Warren L.; SMITH, Julian C. y HARRIOTT, Peter. Operaciones unitarias en ingeniería química. 7ª ed. México: McGRAW-HILL, 2007. 265 p. ISBN 0-07-284823-5.

o flujo que genere más potencia en el agitador, se recomienda instalar deflectores que impiden el flujo rotacional sin interferir con el flujo radial o longitudinal²⁶, por esto se selecciona una resistencia de inmersión tipo cartucho, que cuenta con un diseño semejante a los deflectores en tanques de agitación y mezclado. Para determinar el diámetro de la resistencia como dimensión de un deflector, se emplean las medidas dentro de un tanque de agitación como se ve en la figura 24.

Siendo J el parámetro para calcular el diámetro de la resistencia, este valor se puede determinar por medio de las ecuaciones de diseño estándar:

$$\frac{J}{D_t} = \frac{1}{12}$$

Ecuación 8. Diámetro de la resistencia

Donde:

J : Diámetro de la resistencia, [m]

Con lo cual se obtiene que el diámetro de la resistencia es:


$$J = 0,015 \text{ m}$$

Respecto al anterior resultado, se toma como guía la selección de una resistencia en el catálogo Wattco (figura 25) en relación con el diámetro J a una potencia de 1000 W para tener un tiempo aproximado de 15 minutos para el calentamiento del tanque.

²⁶ GEANKOPLIS, Christie John. PROCESOS DE TRANSPORTE Y PRINCIPIOS DE PROCESOS DE SEPARACIÓN. 4ª ed. México: CONTINENTAL S.A., 2006. 161 p. ISBN 970-24-0856-3.

Figura 25. Catálogo de resistencias tipo cartucho de inmersión

TABLE 1
Standard Watt Density Cartridge Heaters ...continued



SHEATH LENGTH in.	mm	WATTS	WATT DENSITY		CATALOG NUMBER	
			W/in. ²	W/cm ²	120V	240V
5/8" HOLE DIAMETER (0.622" SHEATH DIAMETER)						
7	177.8	500	39	6.0	WC60705001	WC60705002
7	177.8	1000	79	12.2	WC607010001	WC607010002
7	177.8	1500	118	18.3	WC607015001	WC607015002
8	203.2	500	34	5.3	WC60805001	WC60805002
8	203.2	850	58	9.0	WC60808501	WC60808502
8	203.2	1000	68	10.5	WC608010001	WC608010002
8	203.2	1500	102	15.8	WC608015001	WC608015002
10	254.0	500	27	4.2	WC61005001	WC61005002
10	254.0	1000	54	8.4	WC610010001	WC610010002
10	254.0	1500	81	12.6	WC610015001	WC610015002
10	254.0	2000	108	16.7	WC610020001	WC610020002
12	304.8	500	22	3.4	WC61205001	WC61205002
12	304.8	1000	45	7.0	WC612010001	WC612010002
12	304.8	1500	67	10.4	WC612015001	WC612015002
14	355.6	3700	140	21.7	WC614037001	WC614037002
15	381.0	2400	84	13.0	WC615024001	WC615024002
16	406.4	4500	148	22.9	WC616045001	WC616045002
18	457.2	1500	44	6.8	WC618015001	WC618015002
18	457.2	3000	87	13.5	WC618030001	WC618030002
18	457.2	4700	137	21.2	WC618047001	WC618047002
20	508.0	4700	123	19.1	WC620047001	WC620047002
36	914.4	3000	43	6.7	WC636030001	WC636030002

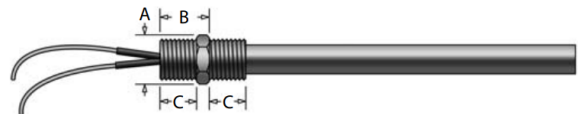
Fuente: https://1lw1tk46gr9aum2ilzzghvk5-wpengine.netdna-ssl.com/wp-content/uploads/2017/04/Cartridge_Heaters_993870331.pdf

Estas resistencias llevan un elemento de roscado que siempre va con rosca de gas y se pueden determinar sus dimensiones como se observa en la figura 26.

Figura 26. Casquillo roscado

CART. DIA.	A DIM. mm	B DIM. mm	STD. TAPER PIPE THD.
1/4"	11.9	15.2	1/8" NPT
3/8"	15.7	17.2	1/4" NPT
1/2"	17.2	21.7	3/8" NPT
5/8"	22.5	24.2	1/2" NPT
3/4"	26.8	26.5	3/4" NPT
1 19/64"	44.5	34.9	1 1/4" NPT

CART. DIA.	A DIM. mm	B DIM. mm	C DIM. mm	STD. TAPER PIPE THD.
1/4"	11.9	24.8	9.6	1/8" NPT
3/8"	15.7	27.6	10.4	1/4" NPT
1/2"	17.2	35.6	13.9	3/8" NPT
5/8"	22.1	38.2	16	1/2" NPT
3/4"	26.8	43.2	16.7	3/4" NPT
1 19/64"	44.5	60.3	25.4	1 1/4" NPT



Fuente: https://1lw1tk46gr9aum2ilzzghvk5-wpengine.netdna-ssl.com/wp-content/uploads/2017/04/Cartridge_Heaters_993870331.pdf

Se observa en la figura anterior que, para un diámetro de 5/8 in, la longitud de la rosca es de aproximadamente 24,2 mm (longitud dentro del rango para las normas).

A continuación, se calcula la longitud de roscado, a partir de la siguiente ecuación:

$$L_{Roscado} = B - \left(\frac{1}{4} in \times \frac{24,4 mm}{1 in} \times \frac{1 m}{1000 mm} \right)$$

Ecuación 9. Longitud de roscado

Donde:

L_R : Longitud de roscado, [m]

B : Longitud de la rosca, [m]

Por lo cual,

$$L_{Roscado} = 0,01785 m \approx 0,018 m$$

Teniendo los anteriores resultados, se puede calcular la altura total del tanque mediante:

$$H_T = H + L_{Roscado} + e$$

Ecuación 10. Altura total del tanque

Donde:

H_T : Altura total del tanque, [m]

$$H_T = 0,313 m$$

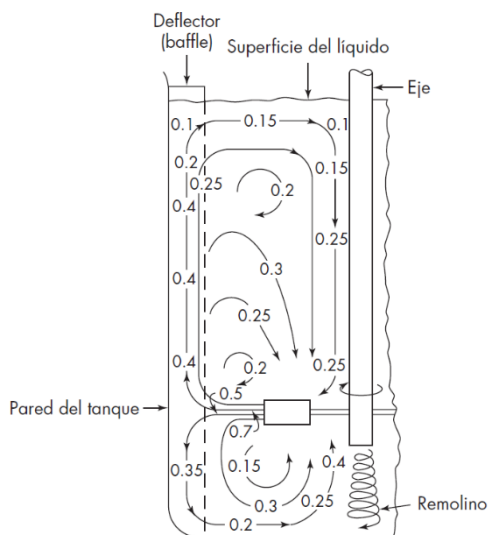
8.2.3 Largo

la determinación del largo del tanque está formada por el conjunto de cálculos realizados para los anteriores parámetros de diseño, pero es necesario conocer la distancia entre la resistencia y la pared del tanque. De acuerdo con Geankoplis, se puede usar este elemento como deflector y así reducir la turbulencia en la agitación, ya que la rosca de la resistencia sugiere una distancia de 2 mm. Por esto, se vuelve práctico usar CFD (Computational Fluid Dynamics), esto con el fin de observar el flujo que pasa por el espacio entre la resistencia y la pared del tanque con prueba y error hasta que presente un cambio de presión insignificante en la estela que se

genera. El CFD es realizado con el software de diseño SolidWorks, pero para proceder con la simulación de fluidos, es necesario conocer la velocidad del fluido.

8.2.3.1 Velocidad de flujo. Para una mejor visibilidad en la prueba, es necesario que el flujo de agitación (figura 27) no cause algún movimiento en los viscosímetros y para calcular esa velocidad de flujo, se interpreta como la fuerza que no debe vencer el rozamiento entre el soporte del viscosímetro y la tapa superior del tanque, destacando que ésta sería la fuerza mínima, ya que este depende del tipo de soporte que se use.

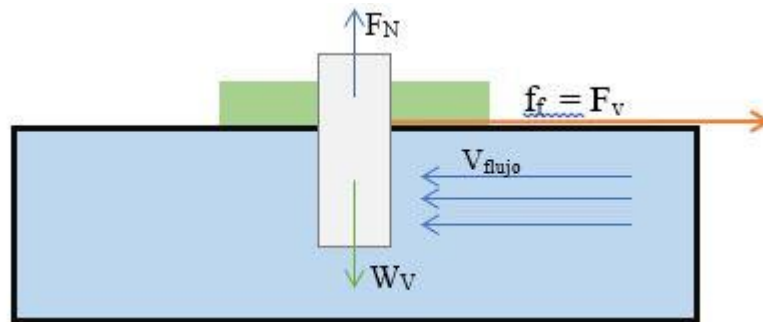
Figura 27. Flujo de agitación



Fuente: McCabe, W. L., Harriot, P., Piombo Herrera, A. C., & Smith, J. C. Operaciones unitarias en ingeniería química. 7ª ed. México: McGraw-Hill, 2011. p. 272.

Teniendo en cuenta la dirección que presenta el flujo en la zona de los viscosímetros, se pueden determinar las fuerzas que actúan sobre el soporte y así hallar la velocidad de flujo que se observa en la siguiente figura.

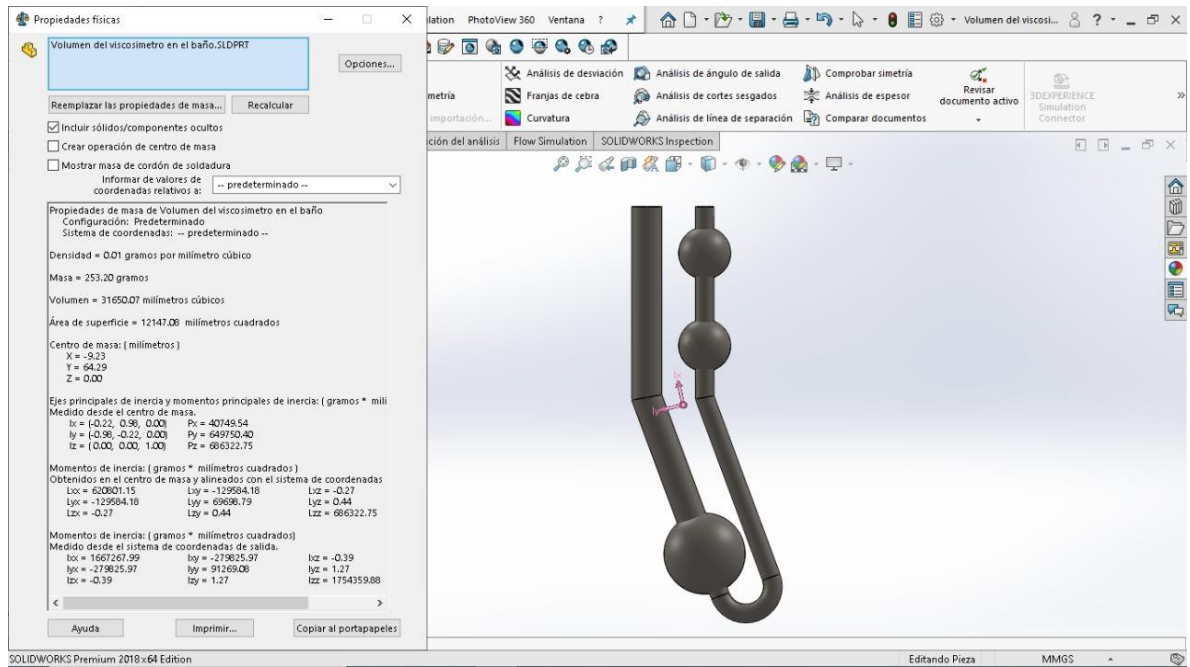
Figura 28. DCL del viscosímetro



Fuente: Autores

La geometría del viscosímetro presenta complejidad en su superficie, al no especificarse con claridad algunas dimensiones en la figura 17, es por esto que se realiza el modelo en SolidWorks (ver figura 29). Para evaluar 1,6 ml de fluido de prueba, la longitud sumergida de la probeta debe ser de 180 mm, esto con base en la norma ASTM D445 que especifica que la superficie del líquido de baño debe estar por lo menos a 20 mm del fluido de prueba, de modo que, cuando el fluido de prueba se succiona con una pera de succión, se deja por encima de la marca de prueba (línea E en los viscosímetros, ver figura 16), estos 40 mm por encima de la línea de prueba se toman de cálculos representativos por la figura 17, el cual se determina que entre la mitad de los bulbos hay 20 mm y esta mitad equivale a 1,55 ml o aproximadamente 1,6 ml. Este volumen es tomado en vista de que las dimensiones del bulbo no se interpretan en la norma o por parte de la empresa fabricante y tomar valores mayores son solo suposiciones.

Figura 29. Volumen del viscosímetro mediante software de diseño SolidWorks



Fuente: Elaboración computacional de diseño SolidWorks

Como se puede ver en la figura 28, se debe calcular la fuerza de arrastre, para esto es necesario conocer la fuerza normal que ejerce el fluido sobre el viscosímetro, el peso del viscosímetro y la fuerza de empuje. La fuerza normal se obtiene de la diferencia entre el peso del viscosímetro y el empuje ejercido por la glicerina.

Para calcular el peso del viscosímetro, se puede usar la siguiente ecuación:

$$W_v = m_v \cdot g$$

Ecuación 11. Peso del viscosímetro

Donde:

W_v : Peso del viscosímetro, [N]

m_v : Masa del viscosímetro = 0,1587565 [kg]

g : gravedad = 9,81 [m/s²]

$$W_v = 1,557401265N$$

Se calcula el volumen del viscosímetro a partir de la siguiente ecuación:

$$V_v = \frac{m_v}{\rho_v}$$

Ecuación 12. Volumen del viscosímetro

Donde:

V_v : Volumen del viscosímetro, [m³]

ρ_v : Densidad del vidrio de borosilicato = 2230 [kg/m³]

$$V_v = 0,0000711913 \text{ m}^3$$

El volumen sumergido (V_s) obtiene de un cálculo realizado con el software de diseño SolidWorks y que se puede observar en la figura 29.

$$V_s = 0,00003165007 \text{ m}^3$$

Con el volumen sumergido conocido, se puede calcular la fuerza de empuje del aceite de motor mediante la siguiente ecuación:

$$F_E = \rho \cdot V_s \cdot g$$

Ecuación 13. Fuerza de empuje

Donde:

F_E : Fuerza de empuje, [N]

ρ_{fb} : Densidad del fluido de baño a 40 °C = 876 [kg/m³]

$$F_E = 0,27171 \text{ N}$$

Conocidos el peso del viscosímetro y la fuerza de empuje, se puede calcular la fuerza normal que ejerce el fluido sobre el viscosímetro mediante la ecuación 17:

$$F_N = W_v - F_E$$

Ecuación 14. Fuerza normal

Donde:

F_N : Fuerza normal, [N]

$$F_N = 1,2857N$$

De la figura 28, se puede determinar que la fuerza de arrastre es igual a la fuerza de fricción, esto es:

$$F_v = f_f$$

Ecuación 15. Fuerza de arrastre

Donde:

F_v : Fuerza de arrastre, [N]

f_f : Fuerza de fricción, [N]

Con lo cual, se debe calcular la fuerza de fricción para conocer la fuerza de arrastre, esto se puede hacer mediante la siguiente ecuación:

$$f_f = \mu_f \cdot F_N$$

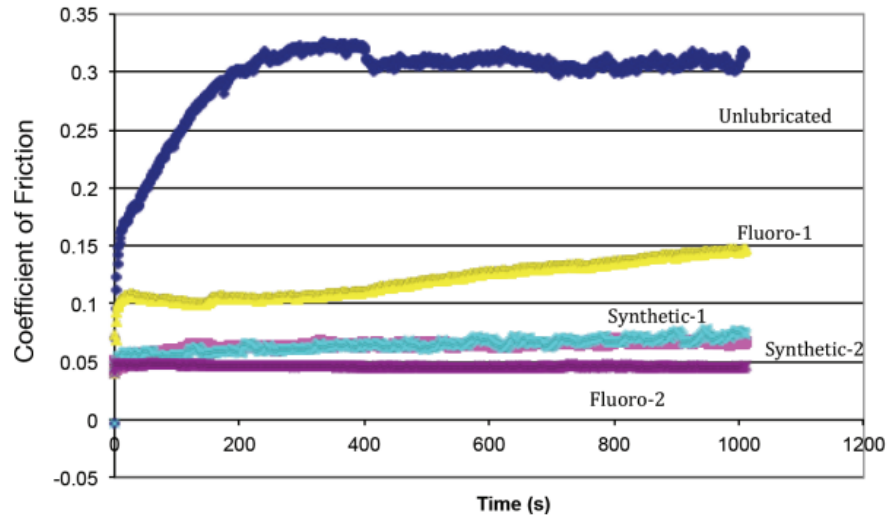
Ecuación 16. Fuerza de fricción

Donde:

μ_f : Coeficiente de fricción neopreno/acero = 0,3

El coeficiente de fricción del neopreno (material del soporte para viscosímetros) sobre el acero se obtiene de la siguiente gráfica.

Figura 30. Coeficiente de fricción neopreno/acero (Unlubricated)



Fuente: <https://www.lube-media.com/wp-content/uploads/2017/11/Lube-Tech106-PolymerTribology.pdf>

Con las ecuaciones 18 y 19 se obtiene que la fuerza de arrastre es:

$$F_v = 0,38571N$$

Conocida la fuerza de arrastre, se puede calcular la velocidad del flujo mediante la siguiente ecuación:

$$F_v = \frac{1}{2} \cdot C_d \cdot \rho_{fb} \cdot A \cdot (Vel)^2$$

Ecuación 17. Fuerza de arrastre en función de la velocidad

Donde:

C_d = Coeficiente de arrastre dependiente de la forma del cuerpo

A = Área proyectada perpendicularmente a la dirección del movimiento, [m²]

Vel = Velocidad del cuerpo, [m/s]

Despejando el parámetro de interés, la velocidad del flujo, se obtiene la siguiente expresión:


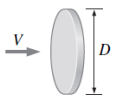
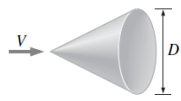
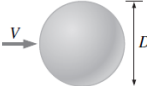
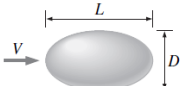
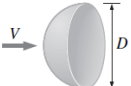
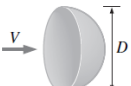
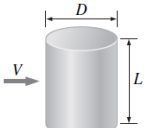
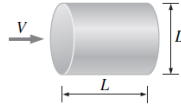
$$Vel = \sqrt{\frac{2 \cdot F_v}{C_d \cdot \rho \cdot A}}$$

Ecuación 18. Velocidad de flujo

Para determinar el C_d se hace uso de la Tabla 6.

Tabla 6. Flujo de cuerpos

TABLA 11-2
 Coeficientes de arrastre representativos C_D para varios cuerpos tridimensionales para $Re > 10^4$, con base en el área frontal (para usar en la relación de fuerza de arrastre $F_D = C_D A \rho V^2 / 2$ donde V es la velocidad corriente arriba)

Cubo, $A = D^2$  $C_D = 1.05$	Disco circular delgado, $A = \pi D^2 / 4$  $C_D = 1.1$	Cono (para $\theta = 30^\circ$), $A = \pi D^2 / 4$  $C_D = 0.5$																										
Esfera, $A = \pi D^2 / 4$  Laminar: $C_D = 0.5$ Turbulento: $C_D = 0.2$	Elipsoide, $A = \pi D^2 / 4$  <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">L/D</th> <th colspan="2">C_D</th> </tr> <tr> <th>Laminar</th> <th>Turbulento</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0.75</td> <td>0.5</td> <td>0.2</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0.5</td> <td>0.2</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>0.3</td> <td>0.1</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>0.3</td> <td>0.1</td> </tr> <tr> <td>8</td> <td>0.2</td> <td>0.1</td> </tr> </tbody> </table>	L/D	C_D		Laminar	Turbulento	0.75	0.5	0.2	1	0.5	0.2	2	0.3	0.1	4	0.3	0.1	8	0.2	0.1							
L/D	C_D																											
	Laminar	Turbulento																										
0.75	0.5	0.2																										
1	0.5	0.2																										
2	0.3	0.1																										
4	0.3	0.1																										
8	0.2	0.1																										
Hemisferio, $A = \pi D^2 / 4$  $C_D = 0.4$  $C_D = 1.2$	Cilindro corto, vertical, $A = LD$  <table border="1"> <thead> <tr> <th>L/D</th> <th>C_D</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>0.6</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>0.7</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>0.8</td> </tr> <tr> <td>10</td> <td>0.9</td> </tr> <tr> <td>40</td> <td>1.0</td> </tr> <tr> <td>∞</td> <td>1.2</td> </tr> </tbody> </table> Los valores son para flujo laminar	L/D	C_D	1	0.6	2	0.7	5	0.8	10	0.9	40	1.0	∞	1.2	Cilindro corto, horizontal, $A = \pi D^2 / 4$  <table border="1"> <thead> <tr> <th>L/D</th> <th>C_D</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0.5</td> <td>1.1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0.9</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>0.9</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>0.9</td> </tr> <tr> <td>8</td> <td>1.0</td> </tr> </tbody> </table>	L/D	C_D	0.5	1.1	1	0.9	2	0.9	4	0.9	8	1.0
L/D	C_D																											
1	0.6																											
2	0.7																											
5	0.8																											
10	0.9																											
40	1.0																											
∞	1.2																											
L/D	C_D																											
0.5	1.1																											
1	0.9																											
2	0.9																											
4	0.9																											
8	1.0																											

Fuente: CENGEL, Y.A., CIMBALA, J.M. Mecánica de fluidos: fundamentos y aplicaciones. México: McGraw-Hill, 2006. p. 574.

Establecer la velocidad mínima para el rango de viscosidad que abarca este proyecto, se lleva a cabo por el viscosímetro que cuente con la mayor área y coeficiente de arrastre en el baño, para esto se considera sustraer la altura del soporte y el roscado en la resistencia, expresada en la siguiente tabla.

Tabla 7. Áreas de flujo para diferentes viscosímetros

VISCOSIMETRO	Cd	A	Vel
Cannon-Fenske	0,9037179	0,0018785	0,720230221
Zeitfuchs redondo-rectangular	0,9157410	0,0047700	0,449001586
SIL	0,9309090	0,0023320	0,636906244
Cannon-Manning semi-micro	0,9184615	0,0026260	0,604248451
BS/Tubo en U	-	-	-
BS/U/M miniatura	0,9514286	0,0012460	0,861878959
Pinkevitch	0,9030952	0,0021420	0,674709592
Ubbelohde	0,9127273	0,0016720	0,759634611
FitzSimons	0,9878000	0,0020800	0,654677199
Atlantic	0,8000000	0,0024200	0,674435959
Cannon-Ubbelohde (A)	0,9300000	0,0032110	0,543039933
Cannon-Ubbelohde (B)	0,9300000	0,0032110	0,543039933
Cannon-Manning semi-micro	0,9248718	0,0029510	0,568025747
BS/IP/SIL (S)	0,9163636	0,0018040	0,729862758
BS/IP/MSL	0,9445455	0,0028270	0,574273874
Zeitfuchs de brazo transversal	1,0038900	0,0014820	0,769354021
Cannon-Fenske opaco	0,9197436	0,0026910	0,596489991
Lantz-Zeitfuchs	1,0128571	0,0021490	0,636064399
BS/IP/RF tubo en U	0,8826700	0,0020550	0,696768162

Fuente: Autores

De acuerdo con los datos obtenidos en la tabla 7, se puede evidenciar que el viscosímetro Zeitfuchs redondo-rectangular nos entrega la mayor área de flujo, por lo cual la velocidad es:

$$Vel = 0,449 \frac{m}{s}$$

De acuerdo con la figura 27, esta velocidad es el 10% de la velocidad que sale del agitador (velocidad tangencial). Por lo tanto:

$$Vel = 0,1 \cdot V_T$$

Ecuación 19. Velocidad tangencial del agitador

Donde:

V_T : Velocidad tangencial del agitador, [m/s]

$$V_T = 4,49 \frac{m}{s}$$

Con la velocidad tangencial del agitador, se puede calcular la velocidad angular del agitador conocido también el radio de este, mediante la siguiente ecuación:

$$\omega = 1429,2114 \text{ rpm}$$

Motores cercanos a los 1429,2114 rpm son los motores de 1000 rpm, así que este será usado para agitar el fluido del baño y esta velocidad angular es la que se usará en la ecuación de velocidad máxima para la transferencia de calor.

Por lo tanto, se toma la siguiente ecuación:

$$V_{max} = \omega_r \cdot r$$

Ecuación 20. Velocidad máxima de flujo

Donde:

V_{max} : Velocidad máxima de flujo, [m/s]

ω_r : Velocidad angular de un agitador comercial = 1000 [rpm]

$$V_{max} = 3,14159 \frac{m}{s}$$

Luego de tener la velocidad del flujo, se procede a realizar un CFD. En la figura 27 se puede observar que cambia la velocidad del flujo en el tanque que cuenta con las proporciones geométricas estándar, esta velocidad disminuye desde que sale del agitador hasta que llega a la pared del tanque, donde toma una dirección radial y vuelve a disminuir antes de llegar al agitador para la recirculación.

Con esta velocidad máxima de flujo calculada a partir de la velocidad angular de un motor de 1000 rpm, se procede a calcular la velocidad del flujo que llega a la pared del tanque a partir de la ecuación 25. Con este cálculo se puede obtener una velocidad aproximada que puede usarse para el CFD con la ubicación de la resistencia cerca a la pared del tanque de la siguiente manera:

$$\frac{V_f}{V_0} = \frac{1}{10}$$

Ecuación 21. Relación de velocidades

Donde:

V_0 : Velocidad en el agitador = 3,14159 [m/s]

V_f : Velocidad en la pared, [m/s]

$$V_f = 0,314159 \frac{m}{s}$$

El aceite de motor con esta velocidad a través de unas condiciones de frontera establecidas de forma apropiada para el dominio computacional se puede usar para modelar el flujo y obtener una solución del CFD más exacta. Para esto es necesario determinar la longitud de la resistencia que se encuentra sumergida en el fluido de baño.

La longitud de la resistencia dentro del fluido se puede determinar mediante:

$$L_f = L_T - B$$

Ecuación 22. Longitud sumergida de la resistencia

Donde:

L_f : Longitud sumergida de la resistencia, [m]

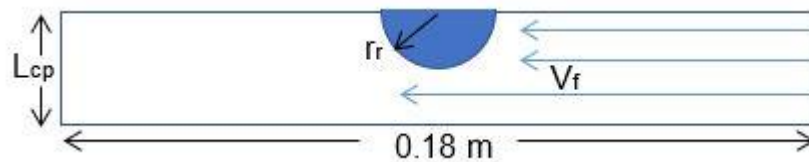
L_T : Longitud de la resistencia = 0,3 [m]

$$L_f \approx 0,2976 \text{ m}$$

El anterior parámetro forma uno de los lados del área transversal por el cual pasa el flujo, dejando así una variable a determinar, esta variable es la distancia entre la superficie de la resistencia y la pared del tanque. Este valor se calcula mediante iteración hasta que el flujo no presente algún cambio que genere turbulencia o vórtices.

En las figuras 31 y 32 se pueden observar las vistas superior y lateral de las condiciones de frontera respectivamente, para el análisis de la distancia entre la superficie de la resistencia y la pared del tanque.

Figura 31. Vista superior de las condiciones de frontera



Fuente: Autores

En las figuras anteriormente mencionadas se puede identificar la distancia entre el centro de la resistencia y la pared, conocido el radio de la resistencia, se itera la distancia que existe entre la resistencia y la pared del tanque. La relación de esos tres parámetros se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$L_{cp} = r_r + X$$

Ecuación 23. Distancia entre la resistencia y la pared del tanque

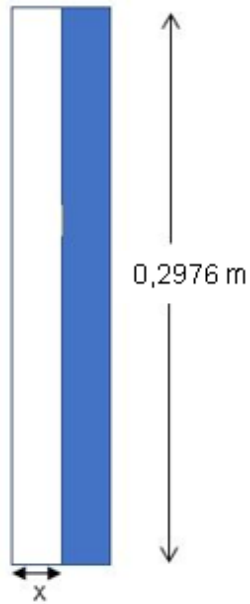
Donde:

L_{cp} : Distancia entre el centro de la resistencia y la pared, [m]

r_r : Radio de la resistencia = 0,00625 [m]

X : Distancia a iterar, [m]

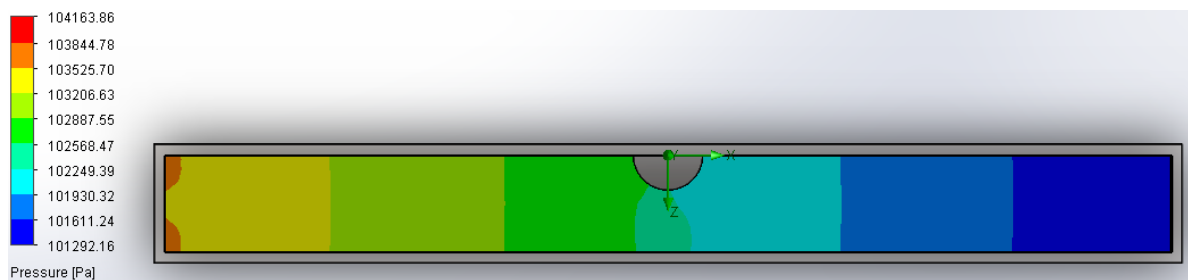
Figura 32. Vista lateral de las condiciones de frontera



Fuente: Autores

Se realizaron pruebas de simulación de fluido y se escoge la iteración que cuenta con una distancia entre la resistencia y la pared de 11 [mm] (ver figura 32), debido a que los valores menores a este presentarían cambios de velocidad y de presión que alterarían el flujo (ver tabla 8), y valores mayores a este resultarían con diferencias mínimas entre ellas tal como se observan en las figuras 33 y 34.

Figura 33. Iteración 11 para cambio de presión

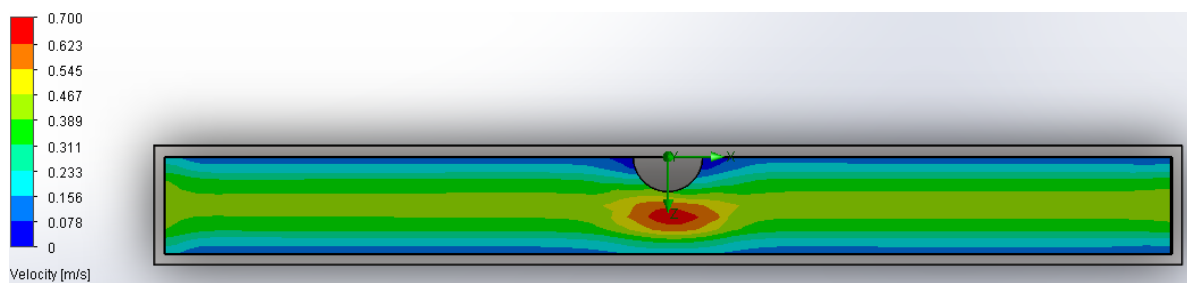


Fuente: Autores

Para $L_{cp} = 0,01725$ m se tiene el siguiente cambio de presión:

$$\Delta P = 638,16 \text{ Pa}$$

Figura 34. Iteración 11 para cambio de velocidad



Fuente: Autores

Para $L_{cp} = 0,01725$ mm se tiene el siguiente cambio de velocidad:

$$\Delta V = 0,311 \frac{m}{s}$$

En la tabla 8, se realiza una comparativa del flujo volumétrico, cambio de presión y cambio de velocidad en función de la distancia entre la resistencia y la pared del tanque por medio de CFD, respaldando la anterior selección.

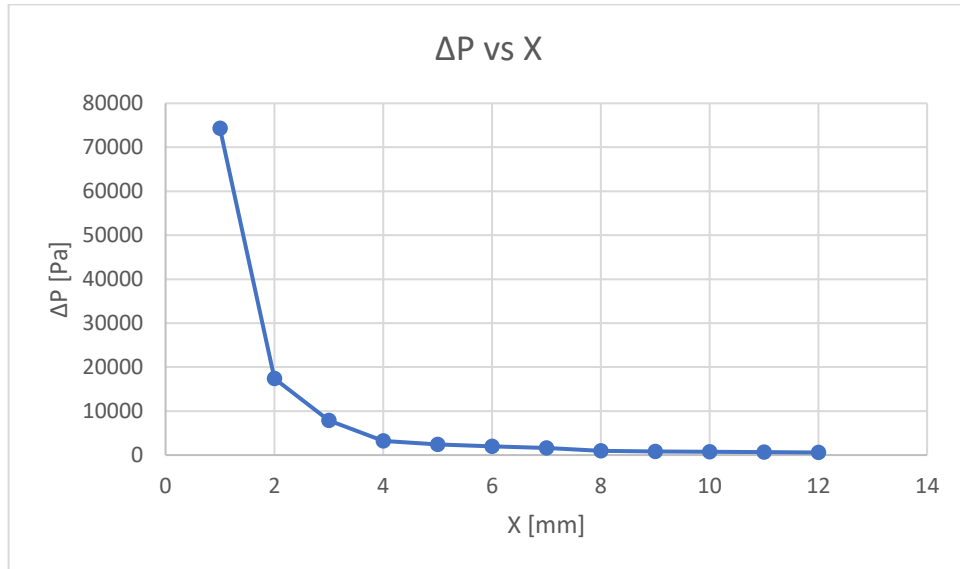
Tabla 8. Pruebas entre la resistencia y la pared

Iteración X [mm]	Flujo volumétrico [m ³ /s]	Cambio velocidad [m/s]	Cambio de presión [Pa]
1	0,314159	1,402	74334,82
2	0,628318	1,096	17422,91
3	0,942477	0,589	7884,23
4	1,256636	0,497	3247,99
5	1,570795	0,414	2440,68
6	1,884954	0,395	1965
7	2,199113	0,381	1642,29
8	2,513272	0,355	932,95
9	2,827431	0,335	809,57
10	3,14159	0,317	709,65
11	3,455749	0,311	638,16
12	3,769908	0,305	577,58

Fuente: Autores

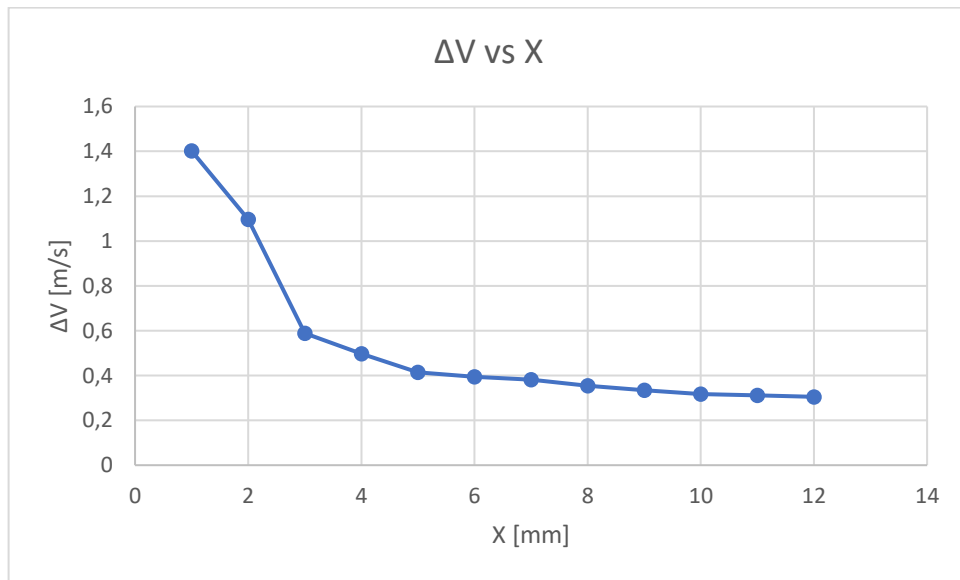
Como se observa en la tabla anterior, la iteración 12 ($L_{cp} = 18,25$ mm) arroja cambios de presión y velocidad poco significativos al de la iteración 11 ($L_{cp} = 17,25$ mm), lo que muestra que los parámetros evaluados en la iteración 11 son los que nos permiten definir una distancia óptima entre la resistencia y la pared del tanque. En las figuras 35 y 36 se realiza un gráfico comparativo de los cambios de presión y velocidad en función del parámetro “X”

Figura 35. Cambio de presión respecto a X



Fuente: Autores

Figura 36. Cambio de velocidad respecto a X



Fuente: Autores

Teniendo estos parámetros ya definidos, se puede calcular el largo del baño mediante:

$$L_B = 2 \cdot S_L + D_v + D_{ta} + X$$

Ecuación 24. Largo del baño

Donde:

L_B : Largo del baño, [m]

X : Distancia entre la resistencia y la pared del tanque = 11 [mm]

$$L_B \approx 0,391 \text{ m}$$

Ahora se procede a calcular el largo total del tanque mediante:

$$L_{TT} = L_B + 2 \cdot e$$

Ecuación 25. Largo total del tanque

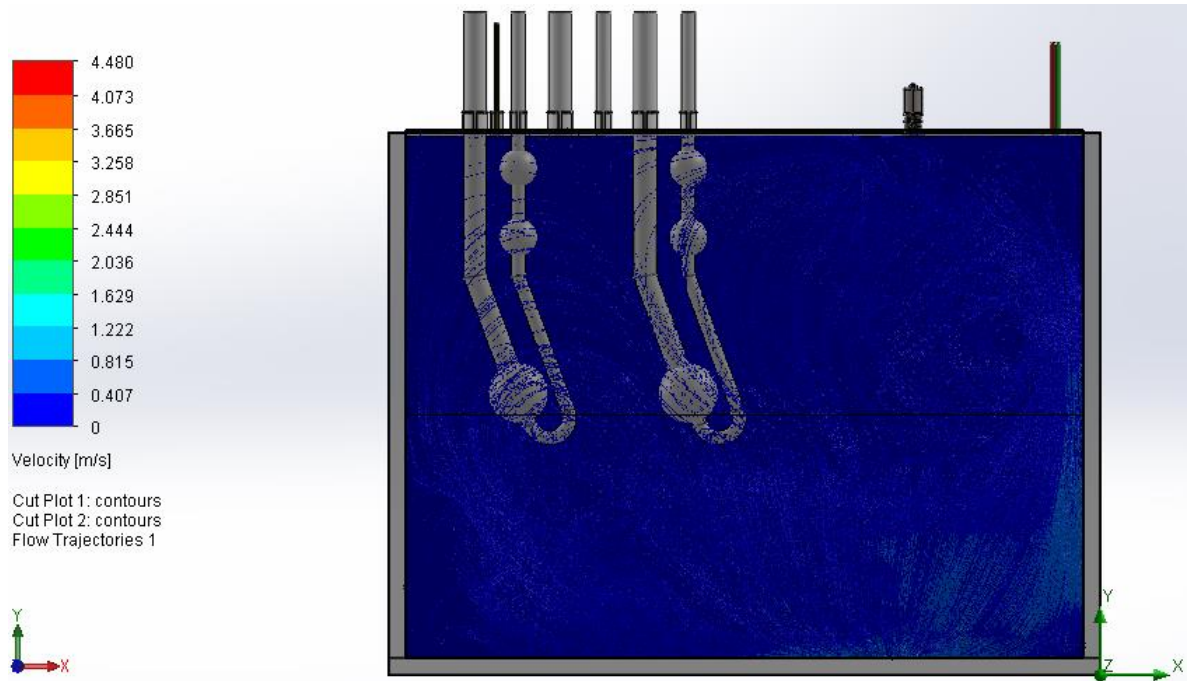
Donde:

L_{TT} : Largo total del tanque

$$L_{TT} = 0,411 \text{ m}$$

Con los últimos parámetros de diseño del tanque y accesorios obtenidos, se procede a realizar la comprobación de la velocidad de flujo que no afecte el viscosímetro (Vel) mediante sistemas CAD como el software de diseño SolidWorks que se puede visualizar en la siguiente imagen.

Figura 37. Simulación de fluido de agitación mediante SolidWorks



Fuente: Autores

8.3 TRANSFERENCIA DE CALOR EN EL SISTEMA

Luego de hallar las dimensiones del tanque, se calcula el calor generado por la transferencia de calor hacia los viscosímetros por medio de convección haciendo uso de la configuración escalonada (ver figura 20).

En este proceso de transferencia de calor ocurre un fenómeno llamado convección forzada, por lo que es necesario calcular el coeficiente de calor convectivo. Para encontrar este factor, es preciso encontrar el número de Reynolds del flujo definido en función de la velocidad máxima.

Antes de hallar la velocidad máxima, se determina si la configuración escalonada se rige por una velocidad u otra, para esto hay que tener en cuenta dos parámetros que se exponen en la figura 21, esos parámetros a tener en cuenta son A_T (Área transversal) y A_D (Área diagonal).

Se calcula primero el área transversal mediante:

$$A_T = (S_T - D)L$$

Ecuación 26. Área transversal

Por lo cual se obtiene que el área transversal es:

$$A_T = 0,020615 \text{ m}^2$$

Seguidamente se calcula el área diagonal mediante:

$$A_D = (S_D - D)L$$

Ecuación 27. Área diagonal

$$A_D = 0,008319 \text{ mm}^2$$

Teniendo los valores de esos dos parámetros y sabiendo que:

$$2A_D < A_T$$

Se puede calcular la velocidad máxima del flujo para la configuración escalonada mediante la siguiente ecuación:

$$V_{ce} = \frac{S_T}{2 \cdot (S_D - D)} \cdot V_f$$

Ecuación 28. Velocidad máxima de flujo para la configuración escalonada

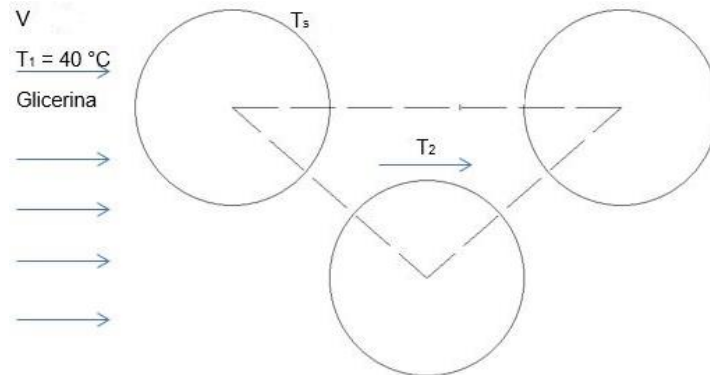
Donde:

V_{ce} : Velocidad máxima de flujo para la configuración escalonada, [m/s]

$$V_{ce} = 0,56255 \frac{m}{s}$$

Para el siguiente paso, se realiza un diagrama (figura 38) que se usa para tener en cuenta las variables a determinar.

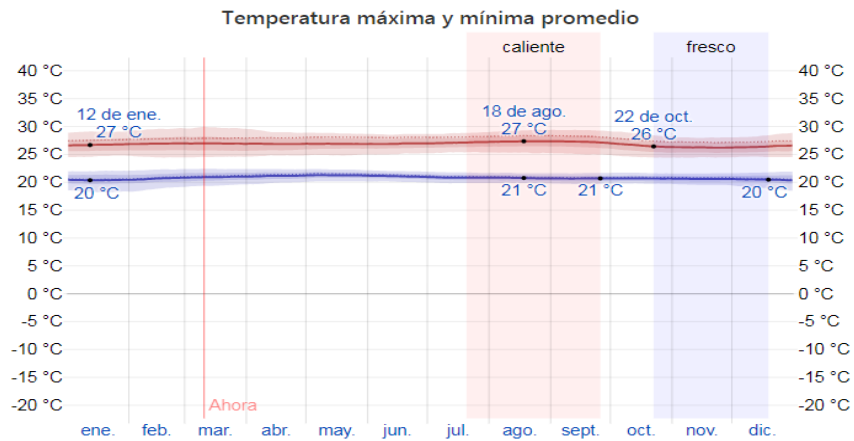
Figura 38. Diagrama del flujo a través de los viscosímetros



Fuente: Autores

El arreglo está sometido a convección externa forzada, con lo cual se requiere calcular la tasa de transferencia de calor que sufren estos viscosímetros con un flujo de aceite a la T_1 igual a 40 °C. Se establece una temperatura de superficie (T_s) tomando como referencia los datos de la temperatura de la ciudad de Bucaramanga a lo largo del año como se observa en la siguiente figura.

Figura 39. Temperatura máxima y mínima promedio de Bucaramanga



Fuente: <https://es.weatherspark.com/y/24381/Clima-promedio-en-Bucaramanga-Colombia-durante-todo-el-a%C3%B1o>

Se calcula la temperatura de superficie mediante:

$$T_s = \frac{T_h + T_l}{2}$$

Ecuación 29. Temperatura de superficie

Donde:

T_s : Temperatura de superficie, [°C]

T_h : Temperatura máxima promedio del entorno = 27 [°C]

T_l : Temperatura mínima promedio del entorno = 21 [°C]

$$T_s = 24 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Se desconoce la temperatura de salida, por consiguiente, se toma una temperatura media de la siguiente manera:

$$T_m = \frac{T_1 + T_s}{2}$$

Ecuación 30. Temperatura media

Donde:

T_m : Temperatura media, [°C]

T_1 : Temperatura del fluido = 40 [°C]

$$T_m = 32 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Teniendo la temperatura media y haciendo uso de los datos suministrados en la tabla 5, se calculan las propiedades para el aceite de motor a la temperatura media obteniendo:

ρ_{T_m} : Densidad a la temperatura media = 880,8 [kg/m³]

μ_{T_m} : Viscosidad dinámica a la temperatura media = 0,544143 [kg/m·s]

$C_{p_{T_m}}$: Calor específico a la temperatura media = 1930,767 [J/kg·K]

k_{T_m} : Conductividad térmica a la temperatura media = 0,1447 [W/m·K]

Pr_{T_m} : Número de Prandtl a la temperatura media = 7051,47

Ahora con la información obtenida, se puede calcular el número de Reynolds, mediante la siguiente ecuación:

$$Re_D = \frac{\rho_{Tm} \cdot V_{ce} \cdot D}{\mu_{Tm}}$$

Ecuación 31. Número de Reynolds

Donde:

Re_D : Número de Reynolds, [Adimensional]

$$Re_D = 46,44036$$

Calculado el número de Reynolds, se procede a identificar el régimen del flujo para seleccionar la correlación adecuada para realizar el cálculo del número de Nusselt, para esto se hace uso de la tabla 9.

Tabla 9. Correlaciones del número de Nusselt para arreglo escalonado

Configuración	Rango de Re_D	Correlación
Escalonados	0-500	$Nu_D = 1.04 Re_D^{0.4} Pr^{0.36} (Pr/Pr_s)^{0.25}$
	500-1 000	$Nu_D = 0.71 Re_D^{0.5} Pr^{0.36} (Pr/Pr_s)^{0.25}$
	1 000- 2×10^5	$Nu_D = 0.35 (S_T/S_L)^{0.2} Re_D^{0.6} Pr^{0.36} (Pr/Pr_s)^{0.25}$
	2×10^5 - 2×10^6	$Nu_D = 0.031 (S_T/S_L)^{0.2} Re_D^{0.8} Pr^{0.36} (Pr/Pr_s)^{0.25}$

Fuente: CENGEL, Yunus A. y GHAJAR, Afshin J. Transferencia de calor y masa. 4a ed. México: McGraw-Hill, 2011. 441 p.

Se puede observar en la tabla 9, que el número de Reynolds está dentro del rango de [0-500] por lo cual se toma la correlación correspondiente a ese rango.

$$Nu_D = 1,04 \cdot Re_D^{0,4} \cdot Pr_{Tm}^{0,36} \cdot \left[\frac{Pr_{Tm}}{Pr_s} \right]^{0,25}$$

Ecuación 32. Correlación de Zukauskas para el número de Nusselt

Donde:

Nu_D : Número de Nusselt, [Adimensional]

Pr_s : Número de Prandtl a la temperatura de superficie = 15786,27

$$Nu_D = 95,8677$$

Ahora, es necesario agregar un factor de corrección (F) para calcular el número de Nusselt, puesto que el sistema cuenta con un número de filas menor a dieciséis, en este caso, se selecciona el factor de corrección para una sola fila haciendo uso de la tabla 10.

Tabla 10. Factor de corrección respecto al número de tubos

N_L	1	2	3	4	5	7	10	13
Alineados	0.70	0.80	0.86	0.90	0.93	0.96	0.98	0.99
Escalonados	0.64	0.76	0.84	0.89	0.93	0.96	0.98	0.99

Fuente: CENGEL, Yunus A. y GHAJAR, Afshin J. Transferencia de calor y masa. 4a ed. México: McGraw-Hill, 2011. 441 p.

Según los datos de la tabla 10, el factor de corrección es:

$$F = 0,64$$

Conocidos el número de Nusselt calculado a partir de la ecuación 38 y el factor de corrección correspondiente a una sola fila para un arreglo escalonado, se puede calcular el coeficiente de transferencia de calor por convección mediante:

$$h = \frac{Nu_D \cdot F \cdot k_{Tm}}{D}$$

Ecuación 33. Coeficiente de transferencia de calor por convección

Donde:

h: Coeficiente de transferencia de calor por convección, [W/m²·°C]

Nu_D: Número de Nusselt = 95,8677

F: Factor de corrección = 0,64

$$h = 174,0807 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

Después de conocer el coeficiente convectivo, se procede a encontrar la temperatura de salida, para esto se debe hallar el área superficial y el flujo másico que pasa a través de los viscosímetros.

Para calcular el área superficial se tiene:

$$A_s = N \times \pi \times D \times L$$

Ecuación 34. Área superficial

Donde:

A_s : Área superficial, [m²]

N: Número de viscosímetros = 3

$$A_s = 0,086520 \text{ m}^2$$

El flujo másico se puede determinar a partir de:

$$\dot{m} = \rho_{fb} \cdot V_f \cdot N_T \cdot S_T \cdot L$$

Ecuación 35. Flujo másico en los viscosímetros

$$\dot{m} = 4,1 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Conocido el flujo másico en los viscosímetros, se puede emplear este dato para conocer la temperatura de salida de la siguiente manera:

$$T_2 = T_s - (T_s - T_1) \cdot \exp\left[\frac{-A_s \cdot h}{\dot{m} \cdot C_{pTm}}\right]$$

Ecuación 36. Temperatura de salida

Donde:

T_2 : Temperatura de salida, [°C]

$$T_2 = 39,969 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Este pequeño aumento de temperatura se genera por la turbulencia.

Para determinar la transferencia de calor, se tiene en cuenta que la diferencia de temperaturas apropiada para el flujo interno es la diferencia media logarítmica de temperaturas la cual se puede calcular mediante:

$$LMTD = \frac{(T_s - T_2) - (T_s - T_1)}{\ln \left[\frac{(T_s - T_2)}{(T_s - T_1)} \right]}$$

Ecuación 37. Diferencia media logarítmica de temperaturas

Donde:

LMTD: Diferencia media logarítmica de temperaturas, [°C]

$$\Delta T_{lm} = -15,9845 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Entonces, para calcular la tasa de transferencia de calor se tiene:

$$\dot{Q} = h \cdot A_s \cdot LMTD$$

Ecuación 38. Tasa de transferencia de calor

Donde:

Q̇: Tasa de transferencia de calor, [W]

$$\dot{Q} = -240,75 \text{ W}$$

De acuerdo con estos resultados, los viscosímetros ganan calor dentro del tanque sin necesidad que el fluido se mueva.

Ahora para calcular el tiempo que tardan en calentarse los viscosímetros, se obtiene de la razón entre el calor necesario para calentar los viscosímetros hasta 40 °C y la tasa de calor que ofrece el sistema. Para ese propósito, se procede a calcular la masa del vidrio de borosilicato sumergida en el tanque, esto se hace usando la dimensión de diámetro que exige la norma y la dimensión de longitud supuesta para la transferencia de calor

Para determinar la masa del vidrio de borosilicato sumergida en el tanque, se retira la masa que no se ve afectada y para esto se determina el volumen de dicha sección

con la nomenclatura expuesta en la figura 16, los volúmenes a calcular son los de las secciones L-13 y N-8 respectivamente.

El volumen en la sección L-13 se determina de la siguiente forma:

$$V_{L-13} = \frac{\pi}{4} [(D_{1L})^2 - (D_{2L})^2] \cdot L_S$$

Ecuación 39. Volumen en la sección L-13

Donde:

V_{L-13} : Volumen en la sección L-13 del viscosímetro, [m³]

D_{1L} : Diámetro exterior de la sección L-13 = 0,013 [m]

D_{2L} : Diámetro interior de la sección L-13 = 0,008 [m]

L_S : Longitud de la sección libre del tanque de pruebas = 0,07 [m]

$$V_{L-13} = 0,000005772676501m^3$$

El volumen en la sección N-8 se determina de la siguiente forma:

$$V_{N-8} = \frac{\pi}{4} [(D_{1N})^2 - (D_{3N})^2] \cdot L_S$$

Ecuación 40. Volumen en la sección N-8

Donde:

V_{N-8} : Volumen en la sección N-8, [m³]

D_{1N} : Diámetro exterior de la sección N-8 = 0,008 [m]

D_{2N} : Diámetro interior de la sección N-8 = 0,0025 [m]

$$V_{N-8} = 0,000003174972076m^3$$

Calculados los volúmenes en ambas secciones, se puede calcular la masa presente en ellas mediante:

$$m_{L-N} = \rho_v \cdot (V_{L-13} + V_{N-8})$$

Ecuación 41. Masa en las secciones L-13 y N-8

Donde:

m_{L-N} : Masa en las secciones libres L-13 y N-8, [kg]

$$m_{L-N} = 0,01995325 \text{ kg}$$

Ahora se puede calcular la masa de vidrio sumergida en el tanque usando la siguiente ecuación:

$$m_{vs} = m_v - m_{L-N}$$

Ecuación 42. Masa de vidrio sumergida en el tanque

Donde:

m_{vs} : Masa de vidrio sumergida, [kg]

$$m_{vs} = 0,13880325 \text{ kg}$$

Por lo tanto, el calor para el vidrio de borosilicato se obtiene mediante:

$$Q_{vb} = m_{vs} \cdot C_{p_{vb}} \cdot (T_1 - T_s)$$

Ecuación 43. Calor del vidrio de borosilicato

Donde:

Q_{vb} : Calor del vidrio de borosilicato, [J]

$C_{p_{vb}}$: Calor específico del vidrio de borosilicato = 800 [J/kg·°C]

$$Q_{vb} = 1776,692 \text{ J}$$

Para el fluido de prueba, se toman las propiedades del aceite para motor (sin usar) que se encuentran en la siguiente tabla y se calcula el calor necesario para pasarlo de 24 a 40 °C.

Tabla 11. Propiedades del aceite de motor (no usado)

Temp. $T, ^\circ\text{C}$	Densidad $\rho, \text{kg/m}^3$	Calor específico $c_p,$ $\text{J/kg} \cdot \text{K}$	Conductividad térmica $k, \text{W/m} \cdot \text{K}$	Difusividad térmica $\alpha, \text{m}^2/\text{s}$	Viscosidad dinámica $\mu, \text{kg/m} \cdot \text{s}$	Viscosidad cinemática $\nu, \text{m}^2/\text{s}$	Número de Prandtl Pr	Coef. de expansión volumétrica. $\beta, 1/\text{K}$
<i>Aceite para motor (no usado)</i>								
0	899.0	1 797	0.1469	9.097×10^{-8}	3.814	4.242×10^{-3}	46 636	0.00070
20	888.1	1 881	0.1450	8.680×10^{-8}	0.8374	9.429×10^{-4}	10 863	0.00070
40	876.0	1 964	0.1444	8.391×10^{-8}	0.2177	2.485×10^{-4}	2 962	0.00070
60	863.9	2 048	0.1404	7.934×10^{-8}	0.07399	8.565×10^{-5}	1 080	0.00070
80	852.0	2 132	0.1380	7.599×10^{-8}	0.03232	3.794×10^{-5}	499.3	0.00070
100	840.0	2 220	0.1367	7.330×10^{-8}	0.01718	2.046×10^{-5}	279.1	0.00070
120	828.9	2 308	0.1347	7.042×10^{-8}	0.01029	1.241×10^{-5}	176.3	0.00070
140	816.8	2 395	0.1330	6.798×10^{-8}	0.006558	8.029×10^{-6}	118.1	0.00070
150	810.3	2 441	0.1327	6.708×10^{-8}	0.005344	6.595×10^{-6}	98.31	0.00070

Fuente: CENGEL, Y.A., CIMBALA, J.M. Mecánica de fluidos: fundamentos y aplicaciones. México: McGraw-Hill, 2006. p. 892.

Las propiedades del fluido de prueba se toman a la temperatura de superficie:

ρ_{fp} : Densidad del fluido de prueba a temperatura ambiente = 885,68 [kg/m³]

C_{pfp} : Calor específico del fluido de prueba a la temperatura de superficie = 1897,6 [J/kg·K]

Se procede a calcular la masa del fluido de prueba mediante:

$$m_{fp} = \rho_{fp} \cdot V_{fp}$$

Ecuación 44. Masa del fluido de prueba

Donde:

m_{fp} : Masa del fluido de prueba, [kg]

V_{fp} : Volumen del fluido de prueba = 0,0000016 m³

$$m_{fp} = 0,001417 \text{ kg}$$

Con toda la información calculada para el fluido de prueba, se calcula el calor necesario para pasarlo de 24 a 40 °C mediante:

$$Q_{fp} = m_{fp} \cdot C_{p_{fp}} \cdot (T_1 - T_s)$$

Ecuación 45. Calor del fluido de prueba

Donde:

Q_{fp} : Calor del fluido de prueba, [J]

$$Q_{fp} = 43,025 J$$

Ahora con los requerimientos de calor para el vidrio de borosilicato y el fluido de prueba se obtiene la energía necesaria para que cada viscosímetro alcance la temperatura establecida del baño termostático (40 °C) a través de la siguiente ecuación:

$$Q = Q_{vb} + Q_{fp}$$

Ecuación 46. Calor del viscosímetro

Donde:

Q_v : Calor del viscosímetro, [J]

$$Q_v = 1819,717 J$$

El tiempo que se tarda el sistema en calentar los 3 viscosímetros que componen la configuración se puede determinar mediante:

$$\Delta t = \frac{3 \cdot Q_v}{\dot{Q}}$$

Ecuación 47. Tiempo necesario para calentar los viscosímetros

Donde:

Δt_2 : Tiempo necesario para calentar los viscosímetros, [s]

$$\Delta t_2 = 22,7 s$$

Este tiempo se puede tomar como despreciable, puesto que la prueba se realiza desde que el tanque está a temperatura ambiente, también se despreciaría este

tiempo, considerando que por norma se sugiere dejar calentando los viscosímetros por 30 minutos luego de que el tanque alcance la temperatura de prueba.

Para calcular el calor que necesita el líquido de baño para calentar los viscosímetros, se requiere calcular el volumen del fluido de baño dentro del tanque. Esto se puede llevar a cabo de acuerdo con la configuración escalonada ofrecida por la transferencia de calor ilustrada en la figura 21.

$$V_{tso} = H \cdot L_B \cdot D_t$$

Ecuación 48. Volumen del fluido de baño sin objetos

Donde:

V_{tso} : Volumen del fluido de baño en el tanque sin objetos, [m³]

$$V_{tso} = 0,0200583 \text{ m}^3$$

Conocido este dato, se procede a calcular el volumen de los objetos sumergidos en el baño y así determinar la cantidad de aceite mineral a usarse en el tanque.

8.3.1 Volumen del propeller. Esta magnitud se puede determinar a partir de la masa del producto y de su densidad mediante la siguiente ecuación:

$$V_p = \frac{m_p}{\rho_p}$$

Ecuación 49. Volumen del propeller

Donde:

V_p : Volumen del propeller, [m³]

m_p : Masa del propeller = 0,033 [kg]

ρ_p : Densidad del propeller = 5000 [kg/m³]

$$V_p = 0,000006 \text{ m}^3$$

8.3.2 Volumen del eje de agitación. De acuerdo con la selección de un eje de agitación y dimensiones del producto, se determina el volumen ocupado en el baño mediante:

$$V_{eje} = \frac{\pi}{4} \cdot (D_{eje})^2 \cdot (H - E + L_{rp})$$

Ecuación 50. Volumen del eje del agitador

Donde:

V_{eje} : Volumen del eje de agitación, [m³]

D_{eje} : Diámetro del eje de agitación = 0,006 [m]

E : Distancia entre el fondo del tanque y el propeller = 0,06 [m]

L_{rp} : Longitud de la rosca del propeller = 0,015 [m]

$$V_{eje} = 0,000005938 \text{ m}^3$$

8.3.3 Volumen de sensor. Este producto puede seleccionarse del tipo RTD para una mayor estabilidad física del sensor.

$$V_{ss} = \frac{\pi}{4} (0,005 \text{ m})^2 \times (0,180 \text{ m} - 0,018 \text{ m})$$

$$V_{ss} = 0,000003181 \text{ m}^3$$

V_{ss} : Volumen del sensor, [m³]

8.3.4 Volumen de la resistencia. a partir de la figura 25 se puede obtener el volumen ocupado por la resistencia en el baño mediante:

$$V_{rs} = \frac{\pi}{4} (D_{rs})^2 \cdot (L_{rs} - B)$$

Ecuación 51. Volumen de la resistencia

Donde:

V_{rs} : Volumen de la resistencia en el fluido de baño, [m³]

D_{rs} : Diámetro de la resistencia = 0.0125 [m]

L_{rs} : Longitud de la resistencia = 0,3 [m]

$$V_{rs} = 0,000033846 \text{ m}^3$$

8.3.5 Volumen del viscosímetro. Este factor comparte valor con el volumen sumergido anteriormente calculado por medio de software de diseño (figura 29).

$$V_s = 0,00003165007 \text{ m}^3$$

Teniendo todo esto, se halla el volumen del fluido de baño que quedaría en el tanque con la siguiente ecuación:

$$V_{fb} = V_{tso} - V_p - V_{eje} - V_{ss} - V_{rs} - 3 \cdot V_s$$

Ecuación 52. Volumen del fluido de baño en el tanque

Donde:

V_{fb} : Volumen del fluido de baño, [m³]

$$V_{fb} = 0,01991 \text{ m}^3$$

8.3.6 Requerimiento de calor del aceite de motor. Para calcular el calor que requiere el aceite de motor en el tanque para llegar a 40 °C se debe utilizar la siguiente ecuación:

$$Q_{fb} = \rho_{fb} \cdot V_{fb} \cdot C_{pfb} \cdot (T_1 - T_s)$$

Ecuación 53. Calor del aceite de motor

Donde:

Q_{fb} : Calor del fluido de baño, [J]

V_{fb} : Volumen del fluido de baño en el tanque = 0,01991 [m³]

ρ_{fb} : Densidad del aceite de motor a la $T_s = 885,4$ [kg/m³]

C_{pfb} : Calor específico del fluido de baño a la $T_s = 1897,37$ [J/kg·°C]

$$Q_{fb} = 535158,95 \text{ J}$$

8.3.7 Potencia del agitador al tanque. Para calcular la potencia que entrega el agitador al tanque, se requiere calcular el número de Reynolds con el motor seleccionado utilizando la siguiente ecuación:

$$Re = \frac{D_a^2 \cdot n \cdot \left(\frac{2\pi}{60}\right) \cdot \rho_{fb}}{\mu_{fb}}$$

Ecuación 54. Número de Reynolds con el motor seleccionado

Donde:

Re: Número de Reynolds con el motor seleccionado, [adimensional]

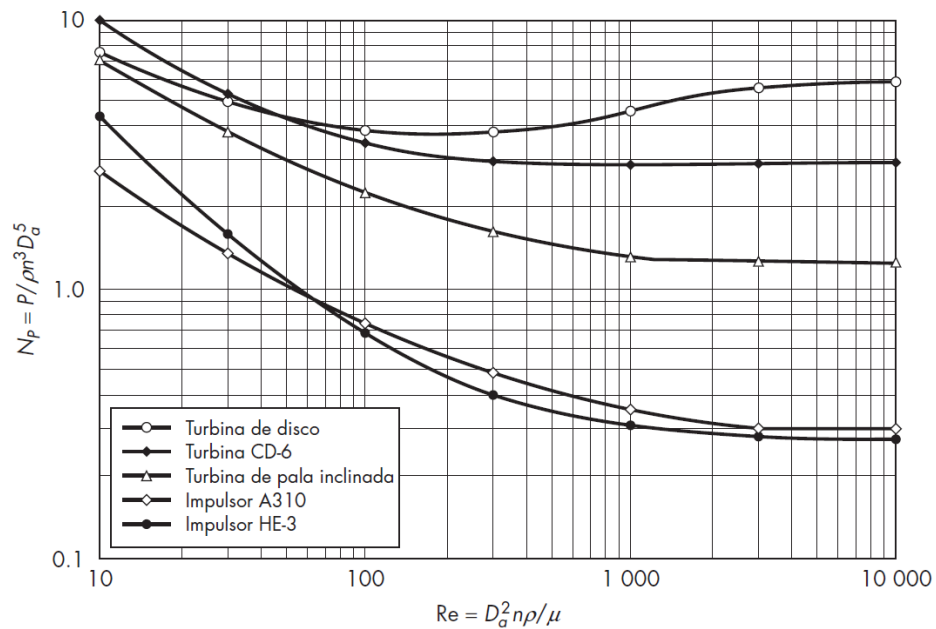
n: Número de revoluciones por minuto del motor = 1000 [rpm]

μ_{fb} : Viscosidad dinámica del fluido de baño a la $T_s = 1,2634$ [kg/m·s]

$$Re = 264,1981$$

De acuerdo con este resultado, se determina el número de potencia (N_p) para el agitador con la siguiente gráfica:

Figura 40. Número de potencia (N_p) en función del número de Reynold (Re) para turbinas e impulsores de alta eficiencia



Fuente: McCabe, W. L., Harriot, P., Piombo Herrera, A. C., & Smith, J. C. (2007). Operaciones unitarias en ingeniería química (7a. edición.). McGraw-Hill, p. 275.

Ubicando el valor del número de Reynolds en el eje de las abscisas se ubica el valor de N_p en el eje de las ordenadas sobre la curva para impulsor HE-3 (hélice de 3 aspas) se obtiene que:

$$N_p = 0.43$$

Se procede a calcular la potencia que entrega el agitador al tanque mediante la siguiente ecuación:

$$\dot{W}_a = N_p \cdot \rho_{fb} \cdot \left(n \cdot \frac{2\pi}{60}\right)^3 \cdot D_a^5$$

Ecuación 55. Potencia que entrega el agitador al tanque

Donde:

\dot{W}_a : Potencia que entrega el agitador al tanque, [W]

$$\dot{W}_a = 3,2465 \text{ W}$$

Esto se suma a la potencia entregada por la resistencia calefactora y así se puede obtener el total de tasa de energía que se entrega al tanque y saber cuánto tiempo tomará calentar mediante:

$$\Delta t = \frac{Q_{fb}}{\dot{W}_a + \dot{W}_{resis}} \cdot \frac{1}{60}$$

Ecuación 56. Tiempo requerido para calentar los viscosímetros

Donde:

Δt_1 : Tiempo requerido para calentar el fluido de baño

\dot{W}_{rs} : Potencia de la resistencia comercial = 300 [J/s]

$$\Delta t_1 = 29,42 \text{ min}$$

De acuerdo con los resultados Δt_1 y Δt_2 , se pueden realizar pruebas a los 30 minutos de haber energizado la resistencia y el sistema de agitación.

9. FABRICACIÓN DEL BANCO DE PRUEBAS

9.1 CONSTRUCCIÓN DEL BANCO DE PRUEBAS

El proceso de construcción se inicia como en la fase de diseño, construir el tanque de vidrio es primordial para el correcto montaje de los demás accesorios, los marcos de aluminio funcionan como guía, soporte y protección externa ante contaminantes que puedan afectar el adhesivo entre las placas de vidrio; teniendo en cuenta las temperaturas de alcance para las pruebas, el adhesivo SinteSolda Standard cuenta con propiedades térmicas que sobrepasan los valores establecidos por las normas como se puede observar en la siguiente tabla.

Tabla 12. Propiedades SinteSolda Standard

Parámetros	Valores
Color	Blanco-hueso
Tiempo de curado inicial a 20 °C	4 horas
Tiempo de curado total a 20 °C	24 horas
Resistencia química	Agua, hidrocarburos alifáticos, ácidos minerales diluidos y bases alcalinas.
Resistencia a la temperatura	-50°C a 150°C
Cada uno de sus componentes es soluble en	Acido acético, acetona, hidrocarburos aromáticos, acetato de butilo, acetato de etilo, cloroformo, metanol, etanol, MEK, MIBK y solventes clorados.

Fuente: ITW Colombia

De acuerdo con los tiempos de curado inicial y total, la unión entre placas debe tener en cuenta intervalos de 4-24 horas para el endurecimiento del adhesivo y así realizar procesos de inspección en caso de espacios, ranuras o imperfecciones del producto.

Figura 41. Unión de placas de vidrio



Fuente: Autores

Teniendo el tanque de vidrio ya montado, se realizan planos para la manufactura de cubiertas y soportes de los accesorios térmicos (resistencia y sensor); de acuerdo con simulaciones estáticas, estos accesorios pueden elaborarse con láminas de hasta calibre 16, soportando procesos de doblez y soldadura en puntos base para motores de agitación como se pueden observar en las siguientes figuras.

Figura 42. Cubierta N°1



Fuente: Autores

Figura 43. Cubierta N°2



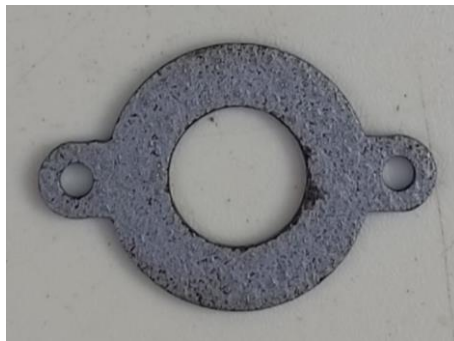
Fuente: Autores

Figura 44. Cubierta N°3



Fuente: Autores

Figura 45. Soporte para resistencia



Fuente: Autores

Figura 46. Soporte sensor



Fuente: Autores

Luego de la manufactura completa de las cubiertas y bases para los motores, se elaboran planos para los soportes de cada motor, esto con el fin de evitar errores de ajuste y alineación al momento del montaje del banco como indica la siguiente figura.

Figura 47. Soporte motor 1500 rpm



Fuente: Autores

Figura 48. Soporte motor 1000 rpm



Fuente: Autores

Las normas base del proyecto indican las dimensiones de los ejes de agitación para la prueba de viscosidad y demulsibilidad, ambos ejes entran en contacto con el

fluido de baño, por lo tanto, el material a escoger es acero inoxidable (AISI 304) y los procesos son de torno y soldadura como se puede observar en la siguiente figura.

Figura 49. Eje de agitación del tanque



Fuente: Autores

Figura 50. Paleta agitación

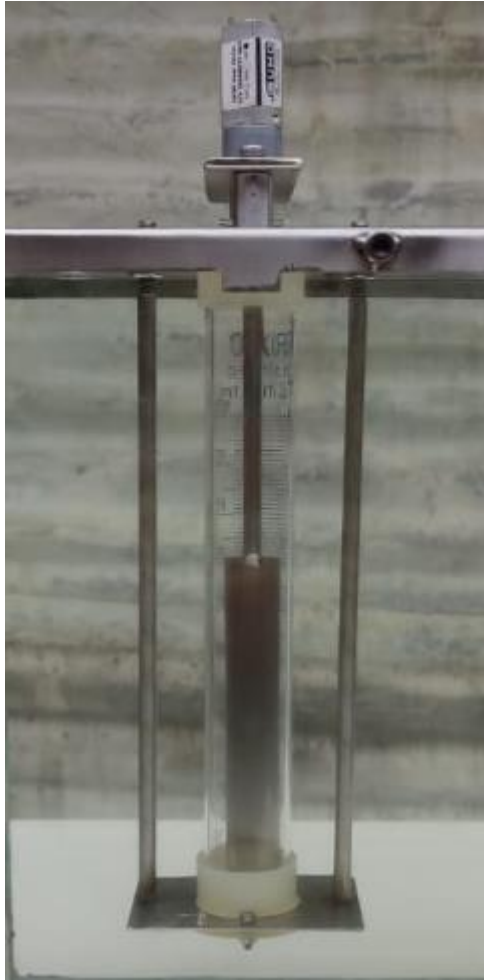


Fuente: Autores

Los viscosímetros cannon-fenske ofrecen soportes relacionados a la figura 18, pero por falta de comercialización del producto, se procede la manufactura de un soporte a base de neopreno como se observa en la siguiente figura.

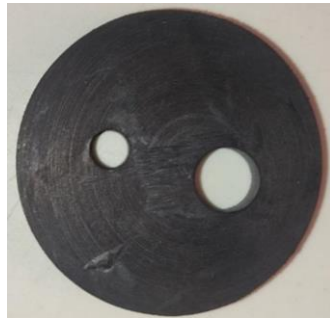
Para las pruebas de demulsibilidad, la paleta de agitación genera un flujo turbulento dentro de la probeta y esto causa inestabilidad en la ejecución de la prueba, por lo que se destina un diseño que le de soporte a esta sección del banco.

Figura 51. Soporte probeta demulsibilidad



Fuente: Autores

Figura 52. Soporte viscosímetros

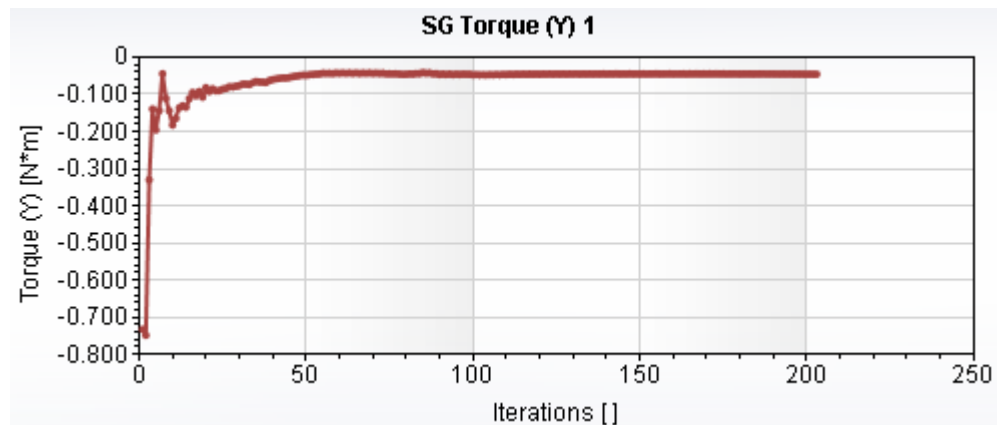


Fuente: Autores

9.2 MONTAJE DEL SISTEMA ELÉCTRICO

El sistema eléctrico forma parte importante en la construcción del banco de pruebas, ya que los motores instalados deben recibir valores de voltaje y corriente específicas debido al torque al que están expuestos. Simulaciones de flujo anteriormente realizadas en el software de diseño SolidWorks permiten sustraer parámetros de torque en el eje de agitación, indicando especificaciones para el motor de 1000 rpm como se puede observar en la siguiente figura.

Figura 53. Torque presentado en la hélice



Fuente: Autores

De acuerdo con la gráfica se seleccionan motores con torque mayor a 0,2 N·m como se revela en las siguientes figuras.

Figura 54. Motor 1000 rpm



Fuente: <https://moviltronics.com/tienda/16ga-12v-1000rpm/>

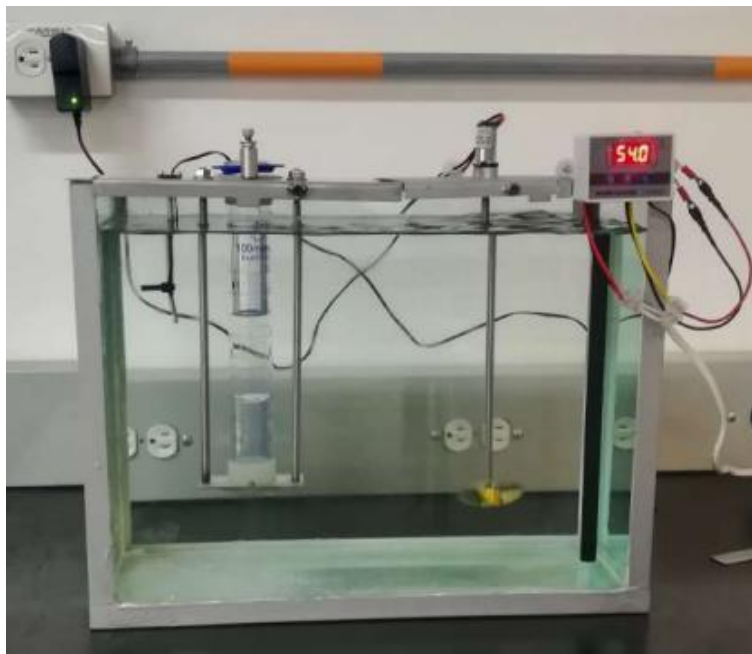
Figura 55. Motor 1500 rpm



Fuente: <https://www.unitorni.co/taladro-atornillador-dewalt-12v-dcd700-lijadora-palma-6411>

Instalando los demás accesorios eléctricos (termostato, sensor y fuente de transformación de voltaje) como se observa en la siguiente figura da por concluido la construcción y montaje del banco de pruebas.

Figura 56. Sistema eléctrico en montaje



Fuente: Autores

10. PRESUPUESTO

En la siguiente tabla se detalla el presupuesto de materiales, equipos y demás recursos para la construcción de un BANCO DE ENSAYOS PARA EL ESTUDIO DE LA VISCOSIDAD CINEMÁTICA Y LA DEMULSIBILIDAD EN ACEITES LUBRICANTES.

Tabla 13. Presupuesto del banco de pruebas

PRESUPUESTO				
MATERIALES	CARACTERÍSTICAS	CANTIDAD	COSTO UNITARIO	COSTO TOTAL
SISTEMA ESTRUCTURAL				
Lámina de vidrio	41.1x31.3[cm] de 10 mm de espesor	2	\$ 20.000	\$ 40.000
Lámina de vidrio	31.3x18[cm] de 10 mm de espesor	2	\$ 20.000	\$ 40.000
Ángulo de Aluminio	10x10[mm] de 1m de longitud	3	\$ 13.000	\$ 39.000
Silicona Truper	85 g	6	\$ 10.000	\$ 60.000
Glicerina pura	400 ml	50	\$ 10.000	\$ 500.000
Viscosímetro Cannon-Fenske	tamaño 200	3	\$ 547.000	\$ 1.641.000
Cilindro de vidrio graduado	LG-D1401-100	1	\$ 160.000	\$ 160.000
Eje de Acero inoxidable	200 mm y 5 mm	1	\$ 74.600	\$ 74.600
Eje de transmisión	4mm y 300 mm	1	\$ 118.000	\$ 118.000
Tuerca Hexagonal	½ in	1	\$ 3.900	\$ 3.900
Tornillo Allen M2	M2	10	\$ 500	\$ 5.000
Propeller	60 mm de diámetro	1	\$ 203.000	\$ 203.000
Soporte probeta demulsibilidad	soporte de polimero y acero AISI 304	1	\$ 100.000	\$ 100.000
Soporte de viscosímetro	Neopreno	3	\$ 70.000	\$ 210.000
SISTEMA ELÉCTRICO Y DE CONTROL				
Motor DC 12V	1000 rpm	1	\$ 66.000	\$ 66.000
Motor DC 12V	1500 rpm	1	\$ 64.500	\$ 64.500
Termostato	Temperatura límite 110 °C	1	\$ 30.000	\$ 30.000
GASTOS ADICIONALES				
Licencias software	Solidworks y EES	1	\$ 40.000.000	\$ 40.000.000
Mano de obra total	Autores y director	-	\$ 5.000.000	\$ 5.000.000
GASTOS GENERALES				
Papelería, transporte, alimentos, bibliografía	varios	-	\$ 1.000.000	\$ 1.000.000
TOTAL				\$ 50.355.000

Fuente: Autores

11. ENSAYO DEL BANCO DE PRUEBAS

La finalidad de este proyecto es otorgar soporte a los estudiantes de la escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander para un desarrollo de conocimiento y habilidades en el campo de pruebas y estudios de las propiedades de los aceites lubricantes. Por esto, la actual fase del proyecto brinda conceptos teóricos y prácticos que son usados para un correcto avance al momento de realizar pruebas de laboratorio.

11.1 DISEÑO EXPERIMENTAL

Esta fase busca apoyar el diseño del proyecto en base a pruebas que arrojen datos, que, al ser analizados estadísticamente, proporcionen evidencias objetivas que permitan responder las interrogantes planteadas, y de esa manera esclarecer los aspectos inciertos del proceso, resolver el problema o lograr mejoras.²⁷

Al momento de llevar a cabo las pruebas, la exactitud del análisis estadístico obtenido por los datos de las muestras de laboratorio depende de los siguientes aspectos:

- **Veracidad:** Proximidad entre la media de un número infinito de valores medidos repetidos y un valor de referencia.
- **Precisión:** Establecida bajo los siguientes parámetros de análisis de experimentación:
 - **Repetibilidad:** Es la relación de concordancia respecto a sucesivas pruebas tomadas bajo mensuraciones cuantitativamente similares y que deben cumplir con condiciones determinantes bajo la norma que se rigen las pruebas de laboratorio.
 - **Reproducibilidad:** Diferencia entre los resultados independientes llevados a cabo en diferentes laboratorios (Fabricante vs laboratorio).

²⁷ GUTIÉRREZ PULIDO, Humberto y DE LA VARA SALAZAR, Román. Análisis y diseño de experimentos. 2ª ed. México: McGRAW-HILL, 2008. 4 p. ISBN 970-10-6526-3.

11.1.1 Tratamiento estadístico

- Análisis de varianza de un factor a partir de datos obtenidos para extraer la veracidad, precisión e incertidumbre en cada nivel.

11.2 MATERIALES Y REACTIVOS

11.2.1 Materiales

11.2.1.1 Tanque de baño termostático 40 – 100 °C

11.2.1.2 Viscosímetro Cannon-Fenske tamaño 200

11.2.1.3 Termostato

11.2.1.4 Cronometro

11.2.2 Reactivos

11.2.2.1 Aceite mineral (Fluido de baño)

11.2.2.2 Aceite de motor (Fluido de prueba)

11.3 DATOS TÉCNICOS Y ESPECIFICACIONES

Esta sección detalla la información que especifica los equipos utilizados en este proyecto.

11.3.1 Tanque de baño termostático

Tabla 14. Especificaciones Tanque de baño termostático

Capacidad de fluido de baño	20 L
Capacidad de viscosímetros	3
Fluido de baño	Aceite mineral
Estabilidad de temperatura	±0.1 °C
Tiempo de Calentamiento	24 °C – 40 °C aproximadamente ½ h
Tipo de encendido/apagado	ON/OFF
Voltaje	110 – 220 Vac. / 50 – 60 Hz

Fuente: Autores

11.3.2 Viscosímetros

Tabla 15. Especificaciones viscosímetros

Tipo de viscosímetro	Cannon-Fenske
Tamaño	400
Rango de viscosidad cinemática	240 – 1200 mm ² /s
Constante aproximada	1,2 (mm ² /s)/s
Material	Vidrio de borosilicato

Fuente: Autores

11.3.3 Termostato

Tabla 16. Especificaciones termostato

Marca	HCO
Número de modelo	W3002
Sonda	NTC10K
Rango de temperatura	-50 a +120 °C ±0.1 °C
Voltaje de alimentación	110V – 220V

Fuente: Autores

11.3.4 Fluido de baño

Tabla 17. Especificaciones fluido de baño

Marca	Aceite mineral
Fecha de expiración	2023 / 12 / 16
Densidad a 20 °C	0.81 – 0.88
Viscosidad a 40 °C	16 – 22 cts
Punto de inflamación	200 °C – 215 °C
Gravedad API (60°C)	34.7
Humedad (PPM)	50 [máximo]
Estado	Líquido
Apariencia	Incoloro, inoloro
Miscibilidad en agua	Ninguna

Fuente: Autores

11.4 PROCEDIMIENTO TÉCNICO PARA LAS PRUEBAS DE VISCOSIDAD CINEMÁTICA

Antes de comenzar con el procedimiento, se recomienda leer el manual de operación (Anexos)

- Verificar la limpieza del viscosímetro.
- Ajustar el viscosímetro al soporte.
- Luego de que la temperatura en el fluido de baño se estabilice a 40 o 100 °C, introducir el volumen de la muestra y con una pera de succión sitúe el fluido a 7 mm por encima de la marca *E* del viscosímetro.
- Liberar el vacío que ejerce la pera de succión y dejar que la muestra fluya libremente bajo la influencia de la gravedad.
- Cuantifique el tiempo, en segundos (s), requerido para que la muestra se mueva de la marca *E* a la marca *F* en el viscosímetro.
- Si el tiempo de la prueba es menor a 200 s, la norma ASTM D445 indica seleccionar otro viscosímetro con diámetros menores y repetir la prueba.
- Si la muestra toma mucho tiempo de prueba, se recomienda la limpieza y verificación del rango de viscosidad cinemática del viscosímetro.
- Si las estimaciones obtenidas están dentro de los criterios de certeza de la medición, utilice el valor medio para informar los resultados de la viscosidad cinemática de la muestra.
- Retire el viscosímetro del tanque y límpielo de acuerdo con el manual del usuario.

11.5 DATOS EXPERIMENTALES PARA MEDICIÓN DE VISCOSIDAD

Tabla 18. Datos experimentales para medición de viscosidad

N°	Fecha de análisis	Temperatura [°C]	Tiempo [s]	Analista
1	14-04-2023	40	212,7	Ok
2	14-04-2023	40	213,2	Ok

Fuente: Autores

11.6 CÁLCULOS

De acuerdo con documentos de validación de la norma ASTM D445²⁸, el procedimiento de cálculos es el siguiente:

11.6.1 Constante gravitacional del laboratorio

El parámetro de gravedad afecta el análisis de los resultados, dependiendo de dónde se realicen las pruebas, por lo que se utilizan ecuaciones derivadas de un sistema de referencia geodésico. De acuerdo con Borys, Schwartz, Reichmuth y Nater (2012) “se calcula a partir de datos de latitud geográfica y altitud sobre el nivel del mar” (p.108).

$$g = 9.780327(1 + 5.3024 \times 10^{-3} \sin^2 L - 5.8 \times 10^{-6} \sin^2(2L)) - 3.085 \times 10^{-6} H \left[\frac{m}{s^2} \right]$$

Ecuación 57. Constante gravitacional del laboratorio

Donde,

L es la latitud en grados

H es la altitud sobre el nivel del mar

Tabla 19. Datos de ubicación geográfica del laboratorio

Latitud L, °	7.1408411
Altura sobre el nivel del mar H, m	959

Fuente:

<https://www.amb.gov.co/bucaramanga/#:~:text=Bucaramanga%20se%20encuentra%20en%20una,longitud%20al%20Oeste%20de%20Greenwich.>

$$g = 9,7782 \frac{m}{s^2}$$

²⁸ MENCÍAS BUSTAMANTE, Juan Francisco. Validación de la norma ASTM D445 para la matriz de jet a-1, en el centro nacional de control de calidad de hidrocarburos de la agencia de regulación y control hidrocarburífero. Trabajo de titulación, Modalidad proyecto técnico, para la obtención del título de Ingeniero Químico. Quito: Universidad Central del Ecuador, 2018. 22 p.

Debido a que la constante gravitacional con la que fue elaborado el viscosímetro difiere 0.1% a la constante del laboratorio, se realiza una corrección mediante la siguiente ecuación:

$$C_2 = \left(\frac{g_2}{g_1}\right) C_1$$

Con base en los datos de la Tabla 18 y la constante gravitacional del laboratorio, la constante de corrección es:

$$C_2 = \left(\frac{9,7782}{9,814}\right) 1,2$$

$$C_2 = 1,19562258$$

11.6.2 Viscosidad cinemática

Como señala la norma ASTM D445-19, la viscosidad cinemática se calcula empleando la siguiente ecuación:

$$v_{1,2} = C \cdot t_{1,2}$$

Donde,

C constante de calibración del viscosímetro

t es el tiempo de flujo entre las marcas del viscosímetro

$t_{1,2}$ denotan los dos tiempos de flujo registrados

$$v_1 = C \cdot t_1$$

$$v_2 = C \cdot t_2$$

$$\bar{v} = \frac{v_1 + v_2}{2}$$

De acuerdo con la tabla 16,

$$v_1 = 254,3089 \text{ mm}^2/\text{s}$$

$$v_2 = 254,9067 \text{ mm}^2/\text{s}$$

$$\bar{v} = 254,607 \text{ mm}^2/\text{s}$$

Donde el porcentaje de error es el siguiente

$$\%Error = \frac{|254,607 - 258|}{|258|} \times 100 \approx 1,32\%$$

Esto indica un margen de error aceptable dentro del valor establecido por el fabricante

11.6.3 Determinabilidad de la medición

Este dato es otorgado por la norma ASTM D445-19 para la muestra que se usará

$$Det_{muestra} = X \cdot \bar{v}$$

11.6.4 Diferencia entre valores obtenidos

Paso a los anteriores resultados, se cuantifica la diferencia entre los valores obtenidos en las dos mensuraciones individuales

$$Diferencia = |v_1 - v_2|$$

$$Diferencia = \left| 254,3089 \text{ mm}^2/\text{s} - 254,9067 \text{ mm}^2/\text{s} \right|$$

$$Diferencia = 0,5978$$

11.6.5 Criterio de aceptabilidad

El criterio de aceptabilidad para las medidas de viscosidad cinemática se basa en que el valor obtenido de la diferencia en observaciones sucesivas no debe ser mayor que el valor de determinabilidad.²⁹, por tanto:

$$|v_1 - v_2| \leq X \cdot \bar{v}$$

²⁹ MENCÍAS BUSTAMANTE, Juan Francisco. Validación de la norma ASTM D445 para la matriz de jet a-1, en el centro nacional de control de calidad de hidrocarburos de la agencia de regulación y control hidrocarburífero. Trabajo de titulación, Modalidad proyecto técnico, para la obtención del título de Ingeniero Químico. Quito: Universidad Central del Ecuador, 2018. 32 p.

La variable X se puede hallar mediante la siguiente tabla:

Tabla 20. Determinabilidad fluidos generales

DETERMINACIÓN DE FLUIDOS	
FLUIDOS GENERALES	Det _{%viscosidad ASTM D445}
Aceites base a 40 °C	0,0037 · Y
Aceites base a 100 °C	0,0036 · Y
Aceites formulados a 40 °C	0,0037 · Y
Aceites formulados a 100 °C	0,0036 · Y
Aceites formulados a 150 °C	0,015 · Y
Cera de petróleo a 100 °C	0,0080 · Y
Fuelóleos residuales a 50 °C	0,0244 · Y
Fuelóleos residuales a 100 °C	0,03 · Y
Aditivos a 100 °C	0,00106 · Y
Gasóleos a 40 °C	0,0013 · Y
Combustibles para aviones jet a -20 °C	0,0018 · Y
Keroseno, combustibles diésel, combustibles biodiésel y mezclas de combustible biodiésel a 40 °C	0,0037 · Y

Fuente: Norma ASTM D445

De acuerdo con la norma usada, el aceite de motor forma parte de los aceites formulados y respecto a la temperatura de prueba, el factor de Determinabilidad es el siguiente:

$$Det_{\text{aceite formulado a } 40^{\circ}\text{C}} = 0,0037 \cdot Y$$

Donde,

Y = viscosidad promedio $[\bar{\nu}]$

Por lo tanto, las pruebas de laboratorio se someten al criterio de Determinabilidad:

$$0,5978 \leq 0,94204$$

Con este resultado se concluye el éxito de las pruebas de viscosidad cinemática

11.7 PROCEDIMIENTO TÉCNICO PARA PRUEBAS DE DEMULSIBILIDAD

Antes de comenzar con el procedimiento, se recomienda leer el manual de operación (Anexos)

- Verificar la limpieza de la probeta graduada.
- Verificar la limpieza de la paleta de agitación.
- Calentar el fluido de baño a temperaturas de pruebas (54 °C o 84 °C).
- Introducir la probeta graduada con 40 mL de agua cuando el baño alcance temperaturas estables, no agite el agua antes de entrar en contacto con el tanque termostático.
- Verter fluido de prueba hasta alcanzar 80 mL en la probeta cuando el tanque se encuentre a la temperatura de baño.
- Tener en cuenta que al realizar pruebas a temperaturas de 82 °C habrá expansión volumétrica de 2 mL a 3 mL, de modo tal que al verter los fluidos deberá llegar a un volumen de 77 – 78 mL en la probeta graduada.
- Asegure el cilindro directamente debajo de la paleta de agitación y que se acople a la profundidad requerida.
- Poner en marcha la paleta de agitación calibrada a 1500 rpm durante 5 minutos.
- Retirar el cilindro del tanque y remover la paleta de agitación con mucho cuidado.
- Inspeccionar la muestra que se encuentra dentro del cilindro y registrar el volumen para cada fluido y la emulsión entre estos.
- Realizar limpieza de la probeta graduada.

11.8 DATOS EXPERIMENTALES PARA LA MEDICIÓN DE DEMULSIBILIDAD

Para cada prueba, el registro de resultados debe informarse de la siguiente manera:

mL de aceite – mL de agua – mL de emulsión (tiempo en minutos)

De acuerdo con la norma ASTM D1401, la tabla de registros debe contar con la siguiente información:

Tabla 21. Registro general de mediciones

Tipo de agua	Destilada
Aceite de prueba	ISO 68
Temperatura del baño	54 °C o 82 °C
Tiempo para 3 mL de emulsión	20 [min]
Tiempo para 37 mL de agua	15 [min]
Tiempo para 0 mL de emulsión	Indeterminado [min]

Fuente: Autores

11.8.1 Informe de pruebas demulsibilidad a 54 °C

Tabla 22. Registro de mediciones a 54 °C

Volumen de aceite [mL]	Volumen de agua [mL]	Volumen de emulsión [mL]	Tiempo [min]
33	7	40	5
37	31	15	10
38	37	5	15
39	38	3	20
39	38	3	25
39	38	3	30

Fuente: Autores

De acuerdo con la norma ASTM D1401, la prueba se cancela luego de 30 minutos desde que se retira la paleta de agitación y se concluye el éxito de la prueba, debido a que se llega al mismo resultado que ofrece la ficha técnica del aceite lubricante.

12. CONCLUSIONES

- En base a los datos obtenidos en laboratorio se comprueba que las mediciones de temperaturas corresponden con el tiempo calculado en la fase de diseño, no obstante, se cumple el tiempo de reposo que recomiendan las normas para llevar a cabo las pruebas.
- A raíz de todo lo expuesto, resulta evidente y satisfactorio el análisis de fluido comprobado en el laboratorio gracias a la información bibliográfica recolectada en el transcurso del proyecto, esto indica que el uso de una resistencia con diseño favorable como deflector reduce la turbulencia de agitación y al mismo tiempo genera la energía necesaria para alcanzar las temperaturas de prueba en el tanque.
- Se ha procurado seguir y estudiar los objetos de control en determinabilidad y precisión para la validación de las normas ASTM D445 y ASTM D1401 respecto al banco de pruebas. La evaluación de estos parámetros se efectúa mediante criterios de observación, seguimiento y control para adecuar los fluidos y resultados a los valores de coeficientes y constantes establecidas.
- Para finalizar, se puede afirmar que el uso de una dinámica de fluidos computacional (CFD) contribuye a la optimización de parámetros de diseño que priorizan la reducción de costos en materiales y espacio de trabajo como el del actual proyecto de grado.

13. RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

- Este proyecto deja abierto la posibilidad de automatizar el banco de pruebas para un futuro proyecto, estableciendo de manera digital la recopilación de datos y generación de graficas comparativas entre lubricantes, para ello hay que implementar componentes de medición por sensores.
- Es indispensable el cumplimiento de los protocolos de seguridad y mantenimiento del banco de pruebas, para poder realizar optimas experiencias.
- Verificar el uso de guantes y el cuidado de sello hermético del tanque para evitar contaminaciones futuras que afectarían la visualización de resultados,
- No permitir que el tiempo de pruebas se extienda mucho debido a calentamiento y desgaste en los motores de agitación, esto dará resultados a perdidas de potencia y causará mediciones erróneas que no corresponden a las esperadas en prácticas.
- Revisar que los tornillos se encuentren ajustados para cada equipo del banco de pruebas.
- El proyecto abre la posibilidad de implementar un banco que se enfoque en la limpieza de los viscosímetros a usar.

14. BIBLIOGRAFÍA

ASTM. (2019). ASTM D445-19a, Método de prueba estándar para la viscosidad cinemática de líquidos transparentes y opacos (y cálculo de la viscosidad dinámica). ASTM Internacional. [En línea] Disponible en: <http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?D445-19a>

ASTM. (2019). ASTM D1401-19a, Método de prueba estándar para la separabilidad del agua de aceites de petróleo y fluidos sintéticos 1. ASTM Internacional. [En línea] Disponible en: <https://compass.astm.org/document/?contentCode=ASTM%7CD1401-21%7Cen-US>

CENGEL, Yunus A. y CIMBALA, John M. Mecánica de Fluidos: Fundamentos y Aplicaciones. México: Mc Graw Hill Interamericana, 2006. 956 p.

CENGEL, Yunus A. y GHAJAR, Afshin J. Transferencia de Calor y Masa: Fundamentos y Aplicaciones. 4a ed. México: Mc Graw Hill Interamericana, 2011. 920 p.

GALVÁN M. del C. TRUJILLO, S. "Caracterización de un baño termostático para medir viscosidad cinemática". [En línea]. Consultado: 2 diciembre de 2021]. Disponible en: <https://www.cenam.mx/Memorias/descarga/Memorias%20Simposio/documentos/tar-or076.pdf>

GUTIÉRREZ PULIDO, Humberto y DE LA VARA SALAZAR, Román. Análisis y diseño de experimentos. 2ª ed. México: McGRAW-HILL, 2008. 4 p. ISBN 970-10-6526-3.

LEGAZ BERBEL, Ramsés. Estudio de la viscosidad y densidad de diferentes aceites para su uso como biocombustible. Trabajo de investigación (Especialidad en Química Industrial). Barcelona. Universitat Politècnica de Catalunya. Escola Universitària d'Enginyeria Tècnica Industrial d'Igualada. 2010, 93p.

MARTINEZ, Francisco. La tribología: ciencia y técnica para el mantenimiento. 1ed. México: Limusa, 1997. 214 p. ISBN 968-18-5317-2.

MENCÍAS BUSTAMANTE, Juan Francisco. Validación de la norma ASTM D445 para la matriz de jet a-1, en el centro nacional de control de calidad de hidrocarburos de la agencia de regulación y control hidrocarburífero. Trabajo de titulación, Modalidad proyecto técnico, para la obtención del título de Ingeniero Químico. Quito: Universidad Central del Ecuador, 2018. 22 – 32 p.

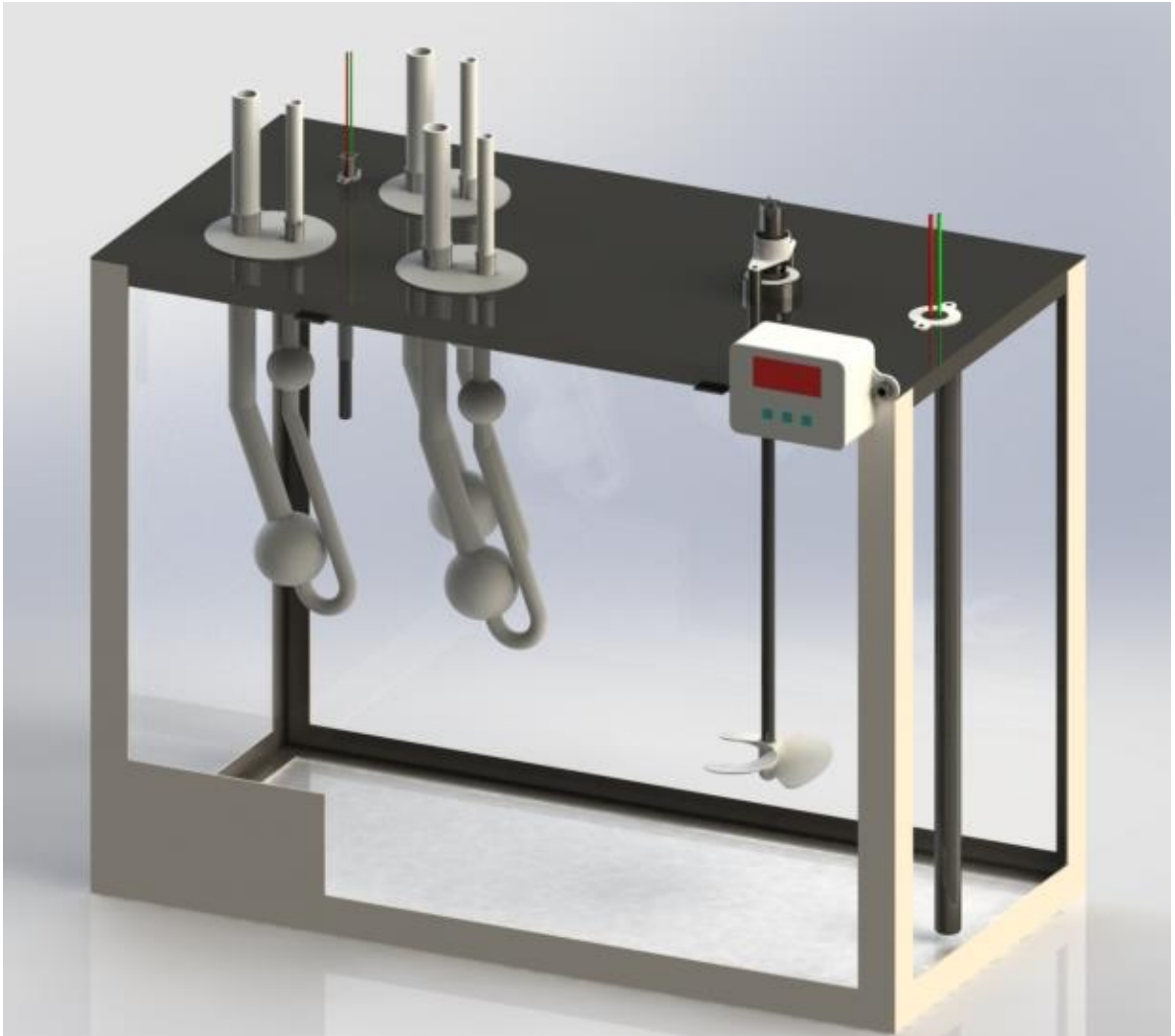
RELIABILITYWEB.COM. Lubricación de maquinaria: Los lubricantes parte 1. [En línea]. Consultado en 25 de abril de 2022. Disponible en: <https://reliabilityweb.com/sp/articles/entry/los-lubricantes>

RODRIGUEZ ACEVEDO, Maria Aileen y DIAZ BARÓN, Esmerly. Diseño y construcción de una ranuradora de tubos PVC automatizada para la industria perforadora de pozos profundos de extracción de agua subterránea. Trabajo de grado para optar título de Ingeniero Mecánico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2022. 163 p.

SÁNCHEZ ARAÚJO, Sergio Andrés. Diseño e implementación de baño termostático para la caracterización de sistemas microfluídicos. Trabajo de grado (Ingeniero electrónico). Bogotá. Universidad de los Andes. Facultad de ingeniería. Departamento de ingeniería eléctrica y electrónica. 2020, 53p.

ANEXOS

ANEXO A. MANUAL DE OPERACIÓN



TANQUE PARA PRUEBAS DE VISCOSIDAD CINEMÁTICA Y DEMULSIBILIDAD DE ACEITES LUBRICANTES.

LEER EL MANUAL COMPLETO ANTES DE REALIZAR LAS PRUEBAS CORRESPONDIENTES AL EQUIPO.

OBJETIVO

Brindar a los usuarios un soporte teórico y práctico para un correcto uso de los elementos del banco de pruebas

Requerimientos

- Llaves Bristol m3 y m5
- Destornillador de estrella m3
- Alcohol etílico o agua desionizada grado 3
- Cronómetro digital
- Guantes de vinilo o nitrilo
- Tapabocas
- Paños antiestáticos de limpieza
- Pera limpiadora o soplador eléctrico
- Cofia de protección
- Gafas transparentes de seguridad.

Medidas de seguridad

1. Revisar todas las instrucciones antes de utilizar este producto
2. No toque las superficies calientes, utilice las asas para el intercambio de cubiertas.
3. Para prevenir descargas, aleje el equipo del contacto con el agua u otro fluido.
4. Las personas mayores de 15 años solo deben usar este dispositivo si han sido supervisadas o instruidas en su uso seguro y comprenden los peligros involucrados.
5. Desenchufe el equipo del tomacorriente cuando no esté en uso y antes de limpiarlo. Espere a que el equipo se enfríe antes de retirar las piezas y antes de limpiarlo.
6. Consulte con los directores de proyecto antes de usar accesorios no mencionados en el diseño y construcción del equipo.
7. No utilice el aparato a la intemperie.
8. No extender, forzar o torcer los cables eléctricos que se han dispuesto para la conexión de los equipos.
9. El cable no debe entrar en contacto con superficies calientes. No coloque sobre o cerca de una hornilla de gas o eléctrica ni en un horno caliente.
10. Mover el equipo con extrema precaución en caso de ser necesario.
11. Algunas superficies no están diseñadas para soportar el calor prolongado generado por distintos equipos, no coloque el tanque de baño térmico sobre

una mesa de madera ni otro material que sufra daños por contacto de altas temperaturas.

12. No obstruya el funcionamiento del equipo con otros aparatos.
13. No utilice este equipo para otro fin que no sea para el que ha sido diseñado. El incorrecto uso del equipo puede causar lesiones.
14. En caso de reemplazar el fluido de baño por agua, tenga cuidado de estar cerca cuando se generen vapores, debido a que el equipo alcanza temperaturas mayores a los 100°C.
15. Este equipo está destinado solo para uso académico y científico. Mantener el equipo a 6 pulgadas (152 mm) de distancia de la pared y de todos los lados.

Procedimientos para un correcto uso

1. Verifique que las cubiertas correspondientes a las pruebas por realizar estén instaladas (cubierta N°2 para viscosidad y cubierta N°3 para demulsibilidad)
2. Verifique que los cables eléctricos estén debidamente conectados al transformador y dicho accesorio cerca de un tomacorriente.
3. Verifique que el fluido de baño se encuentre a la altura especificada por el tanque.
4. Verifique que el motor de agitación del fluido de baño se encuentre correctamente ajustado a la cubierta N°1.
5. Realice ajustes en los pernos laterales de las cubiertas en caso de vibraciones.
6. En caso de realizar pruebas de viscosidad, presione el soporte de neopreno para darle un correcto ajuste a los viscosímetros de la cubierta N°2.
7. En caso de realizar pruebas de demulsibilidad, apretar los pernos que sujetan el motor de la paleta de agitación a la cubierta N°3.
8. Verificar que el sensor de temperatura se encuentre ajustado por la abrazadera.
9. Enchufe el equipo.
10. Digite la temperatura de pruebas en el equipo de control según las determinadas por las normas ASTM D445 y ASTM D1401.
11. Ingrese la cantidad de aceite lubricante en las probetas según las normas (1.6 ml para viscosidad cinemática y 40 ml para demulsibilidad).
NOTA: La pera de succión se recomienda para situar el fluido en la probeta antes de la marca de prueba.
12. Según las normas anteriormente mencionadas, para mejores resultados, realice las pruebas luego de 15 minutos de haber alcanzado la temperatura deseada.

13. No mueva ningún accesorio o subsistema del equipo, esto podría afectar el resultado de la prueba.
14. Contaminar el fluido de baño puede causar problemas o retrasos al momento de recoger resultados de la prueba.
15. Verifique que la temperatura de prueba sea la correcta antes de tomar resultados de la prueba.
16. Usar guantes de vinilo al momento de manipular los equipos del banco de pruebas.

LIMPIEZA DEL EQUIPO

La limpieza del equipo debe ser constante para un correcto uso y preservación del banco de pruebas, esta operación está dirigida a combatir la proliferación y actividad de los microorganismos que pueden contaminar los equipos y ser causa de deterioro y el oscurecimiento del fluido de baño.

Elementos de protección personal recomendados:

- Tapabocas
- Guantes de vinilo o nitrilo
- Cofia de protección
- Gafas de protección transparentes

Procedimientos de limpieza

- Antes de realizar cualquier labor de limpieza, verifique que el equipo se encuentre desenergizado y que el personal encargado cuente con los elementos de protección personal indicados.
- Con las herramientas anteriormente mencionadas retire cuidadosamente uno por uno los accesorios del equipo.
- Proceda con vaciar el fluido de baño en un recipiente completamente limpio y que se pueda sellar temporalmente.
- Con alcohol y pañitos antiestáticos de limpieza remover todo contaminante y fluido de baño que resida en los equipos.
- Usar pera de succión para limpiar las probetas.
- Por último, secar los equipos con sopladora eléctrica o pañitos antiestáticos de limpieza.

ANEXO B. MANUAL DE MANTENIMIENTO



Manual de mantenimiento del banco de pruebas

Fecha:

Director:

Auxiliar:

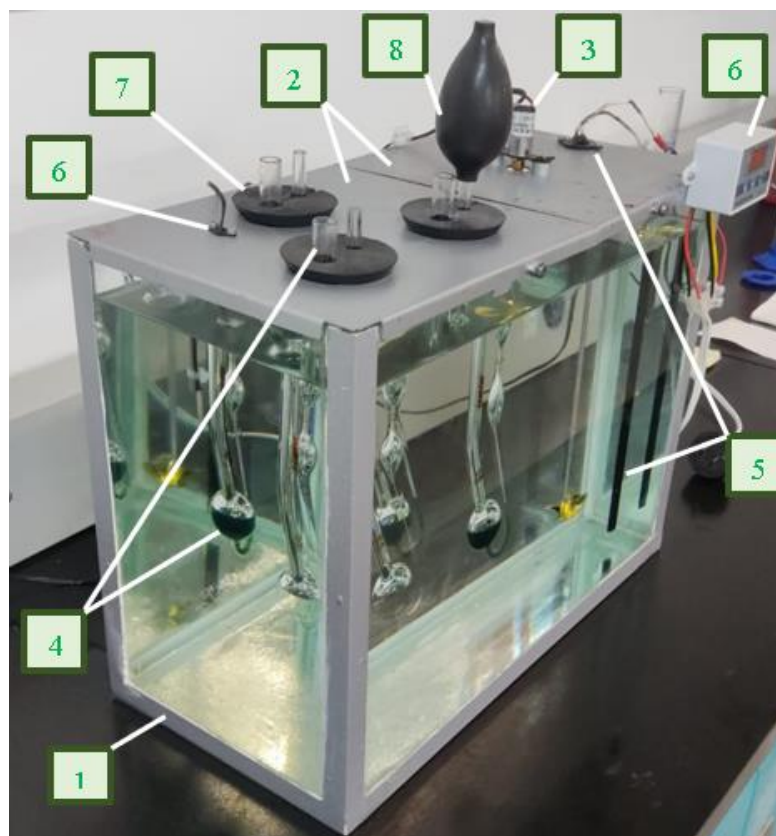
Código:

Introducción

Este manual establece una guía para la organización, programación y ejecución del mantenimiento preventivo del banco de pruebas, esto cuenta con una incidencia importante no solo en la adecuada conservación del equipo, sino en respecto a las acciones de formación profesional que la UIS ofrece, lo cual determina el nivel de calidad de ésta y del estudiante en su vida laboral.

Elementos de inspección

El banco de pruebas debe permanecer cubierto al ambiente cuando no se encuentre en uso, la contaminación de agentes externos al fluido de baño podría afectar el funcionamiento de varios accesorios y la lectura de las pruebas en los viscosímetros.



1. **Tanque:** De acuerdo con las especificaciones del diseño, el vidrio tiene un alcance de 220 °C, pero el adhesivo no soporta dicha temperatura, por lo cual, la temperatura de trabajo no debe pasar los 110°C. el almacenamiento debe darse en temperaturas menores a 30 °C, esto con el fin de prolongar el promedio de vida (1 - 2 años)
2. **Cubiertas:** Fueron diseñadas para soportar los accesorios del banco de pruebas con un factor de seguridad mayor a 3, cuando se realicen las pruebas, las cubiertas N°2 y N°3 sufrirán de contaminación (polvo u otro agente externo) al momento de alternarlas y es por esto por lo que se recomienda llevar a cabo todas las pruebas de viscosidad antes de realizar las de demulsibilidad.
3. **Motores de 1000 y 1500 rpm:** Son agitadores mecánicos los cuales deberán ser reemplazados luego de 100 horas de operación, esto de acuerdo con “Maxon DC motors” ya que a condiciones normales (40 °C) tendrían una vida útil de hasta 1000 y 3000 horas de servicio.
4. **Probetas de prueba:** Para las pruebas, el material base de estos accesorios es el vidrio de borosilicato, este material puede tener vida útil de acuerdo con su tiempo de uso, si estos equipos están en constante uso, se recomendará realizar cambios a los 24 meses de aplicación.
5. **Resistencia de inmersión:** La vida útil de este elemento se puede prolongar si se garantiza que en todo momento permanecerá sumergida (2 – 24 meses).
6. **Termostato y sonda:** Estos equipos se encargan de controlar la temperatura a partir de un sistema ON/OFF, según especificaciones del fabricante, no deben trabajar a una temperatura mayor o igual a 110 °C y cada 6 meses se compara con otros sistemas de control para su calibración o reemplazo.
7. **Soporte de neopreno:** Estos soportes conllevan una vida útil superior a los 10 años, por lo que resulta ser un accesorio útil durante las pruebas, aunque se recomienda no operar el banco a temperaturas superiores a 100 °C, ya que operaría bajo límites de desgaste.
8. **Pera de succión:** Esta herramienta es elaborada a base de caucho natural, debido a esto bajo condiciones de trabajo constante, su vida útil será de 5 años; se recomienda conservar la herramienta a temperaturas ambientes y realizar labores diarias de limpieza.

Mantenimiento preventivo

ACCIONES	FRECUENCIA			
	DIARIO	QUINCENAL	6 MESES	ANUAL
Verificar estado estructural del tanque	X			X
Asegurar el ajuste del acople con los ejes	X			
Verificar el estado de los cables eléctricos	X		X	
Ajustar las cubiertas al tanque mediante los pernos de presión	X			
Revisar estado del fluido de baño	X	X		
Verificar estado del termostato		X		
Verificar calibración del termostato			X	
Verificar estado de la probeta graduada		X		
Verificar estado del viscosímetro		X		
Inspeccionar temperatura de los motores en prueba		X		
Verificar estado de los pernos de presión para las cubiertas			X	
Verificar estado de los tornillos de ajuste en las bases de los equipos			X	
Examinar estado de las cubiertas				X
Verificar la entrada de voltaje y amperaje a los equipos			X	
Verificar estado de la sonda		X		
Verificar estado de la resistencia de inmersión			X	
Revisar velocidad de giro en los ejes			X	
Limpiar superficie externa de las cubiertas y el tanque	X			
Revisar el estado de los soportes para viscosímetros			X	
Verificar estado del soporte de la probeta graduada		X		

Algunos componentes presentarán un constante uso en el banco de pruebas y cabe la posibilidad que las condiciones de trabajo cambien y limiten su tiempo de vida útil, debido a esto surge la necesidad de reemplazarlos en un intervalo de tiempo establecido en la siguiente tabla:

ACCIÓN	FRECUENCIA
Cambio de aceite mineral	3 a 5 años, dependiendo del mantenimiento preventivo
Cambio de motor para la agitación del tanque	100 a 1000 horas, dependiendo de las condiciones de trabajo, 100 o 40 °C respectivamente
Cambio de motor para pruebas de demulsibilidad	1000 a 3000 horas, dependiendo de las condiciones de trabajo, 100 o 40 °C respectivamente.
Cambio de probeta graduada	3 a 12 meses, según su uso
Cambio de termostato y sonda	3 - 4 años, según su uso

ANEXO C. GUIAS DE LABORATORIO



Laboratorio N°1: Pruebas de viscosidad cinemática

Fecha:

Profesor:

Auxiliar:

Código:

Objetivos de la práctica

- Calcular la viscosidad cinemática del fluido de prueba
- Analizar los parámetros de determinabilidad de la muestra
- Estudiar la aceleración gravitacional en el viscosímetro

Materiales

- Baño termostático
- Cronometro
- Termostato
- Viscosímetro

Conceptos relevantes

Viscosidad: es una propiedad de los fluidos que ofrece resistencia ante el flujo de caída por gravedad interna de un capilar, esta medida es evaluada mediante el área de la herramienta capilar en un determinado tiempo estrechamente controlado.

$$v, \left[\frac{mm^2}{s} \right]$$

Baño termostático: tanque de vidrio templado fabricado para controlar y mantener un fluido a un flujo y una temperatura específica que establece una transferencia de calor uniforme

Viscosímetro: Instrumento que mide la viscosidad del fluido a través de un paso de flujo estrecho.

Constante de aceleración gravitacional: es una constante que se refiere al cambio en la velocidad de un objeto debido a la fuerza de gravedad que actúa sobre él. Esta constante varía de un lugar a otro, ya que depende de la altitud y latitud del lugar.

Constante de calibración del viscosímetro: es una constante de viscosidad cinemática calibrada con agua para el viscosímetro en los laboratorios del fabricante

$$C_{\text{corrección}} = \left[\frac{g_{\text{laboratorio de prueba}}}{g_{\text{laboratorio de estandarización}}} \right] \cdot C_{\text{marca del viscosímetro}}$$

Nota: En caso de llevarse pruebas fuera de la ciudad de Bucaramanga, se recomienda calcular la constante de aceleración gravitacional a partir de la ecuación 62 del proyecto procedente de la actual Guía.

Procedimiento

- Verificar la limpieza del viscosímetro.
- Ajustar el viscosímetro al soporte.
- Luego de que la temperatura en el fluido de baño se estabilice a 40 o 100 °C, introducir el volumen de la muestra y con una pera de succión sitúe el fluido a 7 mm por encima de la marca *E* del viscosímetro.
- Liberar el vacío que ejerce la pera de succión y permitir que la muestra fluya libremente por acción de la gravedad.
- Medir el tiempo, en segundos (s), que le toma a la muestra llegar de la marca *E* hasta la marca *F* del viscosímetro.
- Si el tiempo de la prueba es menor a 200 s, la norma ASTM D445 indica seleccionar otro viscosímetro con diámetros menores y repetir la prueba.
- Si la muestra toma mucho tiempo de prueba, se recomienda la limpieza y verificación del rango de viscosidad cinemática del viscosímetro.
- Registrar los tiempos de prueba en la siguiente tabla:

Mediciones de viscosidad cinemática

N°	Fecha de análisis	Temperatura [°C]	Tiempo [s]	Analista
1				
2				
3				
4				

- Constante de corrección:

$$C_{\text{corrección}} = 0,0996 \frac{\text{mm}^2}{\text{s}}$$

- Viscosidad cinemática:

$$v_{1,2} = C_{\text{corrección}} \cdot t_{1,2}$$

- Promedio

$$\bar{v} = \frac{v_1 + v_2}{2}$$

- Criterio de aceptabilidad

$$|v_1 - v_2| \leq \text{Det}_{\% \text{viscosidad ASTM D445}}$$

DETERMINACIÓN DE FLUIDOS	
FLUIDOS GENERALES	Det%viscosidad ASTM D445
Aceites base a 40 °C	0,0037 • Y
Aceites base a 100 °C	0,0036 • Y
Aceites formulados a 40 °C	0,0037 • Y
Aceites formulados a 100 °C	0,0036 • Y
Aceites formulados a 150 °C	0,015 • Y
Cera de petróleo a 100 °C	0,0080 • Y
Fuelóleos residuales a 50 °C	0,0244 • Y
Fuelóleos residuales a 100 °C	0,03 • Y
Aditivos a 100 °C	0,00106 • Y
Gasóleos a 40 °C	0,0013 • Y
Combustibles para aviones jet a -20 °C	0,0018 • Y
Keroseno, combustibles diésel, combustibles biodiésel y mezclas de combustible biodiésel a 40 °C	0,0037 • Y

Donde,

Y es el promedio de la viscosidad antes calculada ($\bar{\nu}$), $\left[\frac{mm^2}{s}\right]$

- Si los valores obtenidos están dentro del criterio de determinabilidad de medición, usar el valor promedio para reportar el resultado de viscosidad cinemática de la muestra.

Nota: para las pruebas de laboratorio, recomendable usar aceites relacionados a la tabla anteriormente proporcionada

CONCLUSIONES



Laboratorio N°1: Pruebas de demulsibilidad

Fecha:

Profesor:

Auxiliar:

Código:

Objetivos de la práctica

- **Estudiar la propiedad que tiene el aceite para separarse del agua**
- **Analizar los tiempos de emulsión**
- **Compilar la variación de volúmenes respecto al tiempo en la probeta**

Materiales

- **Baño termostático**
- **Cronometro**
- **Termostato**
- **Probeta graduada de 100 ml**

Conceptos relevantes

Demulsibilidad: Es la capacidad de un fluido para separarse rápidamente del agua. Característica importante al momento de proteger un equipo del desgaste por contaminación de agua.

Baño termostático: Tanque de vidrio templado fabricado para controlar y mantener un fluido a un flujo y una temperatura específica que establece una transferencia de calor uniforme

Probeta graduada: Instrumento volumétrico que lleva grabada una escala por la parte exterior que permite medir un determinado volumen.

Emulsión: Es una mezcla estable y homogénea de dos líquidos que normalmente no pueden mezclarse (son inmiscibles entre ellos).

Procedimiento

- Verificar la limpieza de la probeta graduada.
- Verificar la limpieza de la paleta de agitación.
- Calentar el fluido de baño a temperaturas de pruebas (54 °C o 84 °C).
- Introducir la probeta graduada con 40 mL de agua cuando el baño alcance temperaturas estables, no agite el agua antes de entrar en contacto con el tanque termostático.
- Verter fluido de prueba hasta alcanzar 80 mL en la probeta cuando el tanque se encuentre a la temperatura de baño.

- Tener en cuenta que al realizar pruebas a temperaturas de 82 °C habrá expansión volumétrica de 2 mL a 3 mL, de modo tal que al verter los fluidos deberá llegar a un volumen de 77 – 78 mL en la probeta graduada.
- Asegure el cilindro directamente debajo de la paleta de agitación y que se acople a la profundidad requerida.
- Poner en marcha la paleta de agitación calibrada a 1500 rpm durante 5 minutos.
- Retirar el cilindro del tanque y remover la paleta de agitación con mucho cuidado.
- Inspeccionar la muestra que se encuentra dentro del cilindro y registrar el volumen para cada fluido y la emulsión entre estos.
- Para pruebas de ambas temperaturas (54 °C y 82 °C) se debe registrar una tabla de datos:

REGISTRO GENERAL DE PRUEBAS	
Tipo de agua	
Aceite de prueba	
Temperatura del baño [°C]	
Tiempo para 3 mL de emulsión [min]	
Tiempo para 37 mL de agua [min]	
Tiempo para 0 mL de emulsión [min]	

- Registrar los 3 volúmenes de prueba en la siguiente tabla:

PRUEBAS DE DEMULSIBILIDAD A 54 °C			
Volumen de aceite [mL]	Volumen de agua [mL]	Volumen de emulsión [mL]	Tiempo [min]
			5
			10
			15
			20
			25
			30

- La prueba se cancela luego de 30 minutos desde que se retira la paleta de agitación.

PRUEBAS DE DEMULSIBILIDAD A 82 °C			
Volumen de aceite [mL]	Volumen de agua [mL]	Volumen de emulsión [mL]	Tiempo [min]
			5
			10
			15
			20
			25
			30
			35
			40
			45
			50
			55
			60

- La anterior prueba se cancela luego de 60 minutos desde que se retira la paleta de agitación.
- Realizar limpieza de los equipos utilizados.

CONCLUSIONES

ANEXO D. FICHA TÉCNICA SOPORTE PROBETA DEMULSIBILIDAD