

Diseño y Construcción de un Dispositivo para la Limpieza de Viscosímetros Capilares.

Diego Camilo Romero Morales y Edgar Mauricio Jerez Vanegas

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Mecánico

Director

MsC. Francisco José Saldivia Saldivia

Magister en Ingeniería Mecánica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Ingeniería Mecánica

Bucaramanga

2025

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mis padres que siempre estuvieron ahí para apoyarme, a pesar de las circunstancias o la distancia, a mis hermanos que no me dejaron solo y se preocuparon por mí en cada paso que di y; por último, a mi novia que me acompañó casi desde el inicio y hasta el final sin dudar ni una sola vez de mi capacidad.

Diego Camilo Romero Morales

Dedicatoria

Dedico este trabajo a Dios por brindarme vida, salud y principalmente sabiduría para culminar esta etapa de mi vida, a mis padres Edgar Jerez Tami y Gilma Esmith Vanegas Angarita por todo el apoyo, esfuerzo y sacrificio incondicional durante toda etapa de mi vida, a mis hermanos Angie Geraldine Navas Vanegas y David Andrés Jerez Vanegas, por brindarme su ayuda y compañía cada día, a mi abuela Elma Jerez de Tami (†) quien fue como una segunda madre y motor para seguir en los momentos más complejos, a mis compañeros de estudio y de vida por brindarme su más sincera amistad y conocimiento en los momentos oportunos, finalmente a mis docentes por compartir su tiempo y sabiduría para formarme como un profesional integro.

Edgar Mauricio Jerez Vanegas

Agradecimientos

Agradecemos en primer lugar a nuestras familias, por su amor incondicional, su paciencia y su apoyo constante en los momentos más desafiantes.

Expresamos nuestro más sincero reconocimiento a nuestro tutor, Francisco Saldivia, por su orientación, consejos y acompañamiento durante todo el proceso de investigación.

También agradecemos a nuestros profesores y compañeros, quienes con sus aportes nos ayudaron a obtener el conocimiento con el que desarrollamos este trabajo.

Finalmente, a la Universidad Industrial de Santander, por facilitarnos los recursos y espacios necesarios para el desarrollo de nuestro trabajo.

A todos, gracias por ser parte de este logro.

Tabla de Contenido

	Pág.
1 Planteamiento del problema.....	15
2 Justificación	16
3 Objetivos.....	17
3.1 Objetivo General.....	17
3.2 Objetivos Específicos.....	17
4 Marco Contextual.....	17
5 Marco Referencial.....	18
5.1 Revisión de literatura	18
5.1.1 Hallazgos de la revisión de literatura.....	18
6 Marco Teórico	19
6.1 Tribología.....	19
6.2 Propiedades de los fluidos.	19
6.3 Viscosímetros capilares.....	20
6.4 Normas.....	21
6.5 Procesos de limpieza de instrumentos de laboratorio.....	22
6.6 Impacto ambiental.....	22
6.7 Diseño de dispositivos de laboratorio	23
7 Metodología	24
7.1 Revisión bibliográfica y contextualización.....	25
7.2 Diseño conceptual.....	25
7.3 Diseño al detalle y simulación	25

7.4	Construcción del prototipo.....	26
7.5	Pruebas experimentales.....	26
7.6	Análisis de resultados	26
7.7	Conclusiones y recomendaciones	26
8	Diseño conceptual.....	26
8.1	Requerimientos Técnicos de diseño.....	27
8.2	Evaluación de alternativas	27
8.2.1	Estructura	27
8.2.2	Sistema de aspersión.....	28
8.2.3	Sistema de transporte	29
8.2.4	Sistema de almacenamiento.....	31
8.2.5	Sistema de control.....	32
9	Diseño del dispositivo para la limpieza de viscosímetros capilares	33
9.1	Diseño inicial	33
9.1.1	Diseño de la estructura.....	33
9.1.2	Diseño del sistema de aspersión	36
9.1.3	Selección del aspersor.....	39
9.1.4	Diseño del sistema de transporte.....	40
9.1.5	Selección de elementos para el subsistema de transporte de aire	41
9.1.6	Diseño del sistema de almacenamiento	44
9.1.7	Diseño del sistema de control	47
9.2	Diseño final.....	49
9.2.1	Subsistema de estructura.....	50
9.2.2	Subsistema de almacenamiento	51
9.2.3	Subsistema de transporte.....	51

9.2.4	Subsistema de control	56
10	Pruebas	60
10.1	Pruebas de presión	61
10.2	Pruebas de limpieza en los viscosímetros capilares.....	62
10.3	Aceite de motor usado muy sucio.....	62
10.4	Aceite Lubrigras hidráulico TP-46	64
10.5	Aceite lubricante con poco uso	67
11	Costos.....	69
11.1	Costo de la materia prima	69
11.2	Costo de la mano de obra.....	71
11.3	Costo del desarrollo intelectual.....	71
11.4	Costo de las licencias de software	72
11.5	Costo total del proyecto de grado	72
12	Conclusiones	73
13	Recomendaciones	73
	Referencias Bibliográficas	75

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 Matriz QFD de alternativas para la estructura del dispositivo	28
Tabla 2 Matriz QFD de alternativas para el subsistema de aspersion del dispositivo	29
Tabla 3 Matriz QFD de alternativas para el subsistema de transporte del solvente del dispositivo	30
Tabla 4 Matriz QFD de alternativas para el subsistema de transporte de aire del dispositivo....	31
Tabla 5 Matriz QFD de alternativas para el sistema de almacenamiento del dispositivo.....	31
Tabla 6 Matriz QFD de alternativas para el sistema de control del dispositivo.....	32
Tabla 7 Detalle del presupuesto requerido para la fabricación y pruebas del proyecto de grado	70
Tabla 8 Costo de la mano de obra	71
Tabla 9 Costo del desarrollo intelectual.....	71
Tabla 10 Costos de las licencias de software	72
Tabla 11 Costo total del proyecto de grado	72

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 Estructura del dispositivo	34
Figura 2 Cámara de presión	37
Figura 3 Análisis de esfuerzos por Von Mises en la cámara de presión	38
Figura 4 Análisis de las deformaciones unitarias en la cámara de presión	39
Figura 5 Aspersor	40
Figura 6 Configuración de los accesorios de tubería	41
Figura 7 Válvula reguladora de presión	42
Figura 8 Manguera para el aire de 12 mm	43
Figura 9 Conector Prestolock Macho	44
Figura 10 Tanque del solvente	45
Figura 11 Análisis de esfuerzos por Von Mises en el tanque del solvente	46
Figura 12 Análisis de las deformaciones unitarias en el tanque del solvente	46
Figura 13 Válvula de bola mini H-H	47
Figura 14 Llave de paso	48
Figura 15 Manómetro WINTERS de hasta 150 PSI	48
Figura 16 Compresor HSU 750 marca POWER	49
Figura 17 Caja frontal y bandeja de recolección	50
Figura 18 Soporte de la tubería del dispositivo	51
Figura 19 División de los fluidos al subsistema de aspersion	52

Figura 20 T de 1/4" de acero inoxidable.....	53
Figura 21 Codo de 1/4" de acero inoxidable	53
Figura 22 Tuercas universales de 1/4" de acero inoxidable.....	54
Figura 23 Niple de 1/4" de acero inoxidable de 5 cm de longitud	54
Figura 24 Niple de 1/4" de acero inoxidable de 3 cm de longitud	55
Figura 25 Punto de adición del solvente al flujo del aire comprimido	55
Figura 26 Válvula reguladora de presión con manómetro.....	56
Figura 27 Válvula de bola pequeña	57
Figura 28 Válvula de seguridad a 100 PSI.....	58
Figura 29 Válvula check de 1/2".....	58
Figura 30 Gancho.....	59
Figura 31 Subsistema de control.....	59
Figura 32 Dispositivo para limpiar viscosímetros capilares	60
Figura 33 Presión de funcionamiento del dispositivo.....	61
Figura 34 Viscosímetro capilar con aceite de motor muy sucio	63
Figura 35 Viscosímetro capilar con aceite de motor muy sucio después de la limpieza	64
Figura 36 Viscosímetro capilar con Lubrigras hidráulico TP-46.....	65
Figura 37 Viscosímetro capilar con residuos del lubricante TP-46 después de un ciclo de limpieza	66
Figura 38 Viscosímetro capilar con residuos del lubricante TP-46 después del segundo ciclo de limpieza.....	67
Figura 39 Viscosímetro capilar con aceite lubricante de poco uso	68

Figura 40 Viscosímetro capilar con aceite lubricante de poco uso después de un ciclo de lavado

..... 69

Tabla de Apéndices

Ver apéndices adjuntos y pueden ser consultados en la base de datos de la Biblioteca UIS.

Apéndice A. Ficha técnica de la manguera neumática.

Apéndice B. Ficha técnica de la reguladora de presión.

Resumen

Título: Diseño y Construcción de un Dispositivo para la Limpieza de Viscosímetros Capilares*

Autores: Diego Camilo Romero Morales, Edgar Mauricio Jerez Vanegas**

Palabras clave: Viscosímetro, Solvente, Limpieza.

Descripción: Este trabajo de grado presenta el desarrollo de un dispositivo para la limpieza de viscosímetros capilares. Impulsados por la necesidad de garantizar mediciones precisas en estudios tribológicos, diseñando y construyendo así una solución basada en la teoría de Venturi. El dispositivo se diseñó para cumplir las normativas ASTM D445 y D446, incorpora un sistema que regula el flujo de aire y solvente, permitiendo limpiar varios viscosímetros simultáneamente. Las pruebas de validación confirmaron su eficiencia: Se logró reducir notablemente los tiempos de limpieza y alcanzar una uniformidad superior a los métodos manuales tradicionales. Esta contribución tecnológica no solo optimiza procesos en laboratorios de investigación, sino que también abre camino para futuras mejoras en el campo.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Francisco José Saldivia Saldivia. M.Sc.

Abstract

Title: Design and Construction of a Device for Cleaning Capillary Viscometers*

Authors: Diego Camilo Romero Morales, Edgar Mauricio Jerez Vanegas**

Keywords: Viscometer, Solvent, Cleaning.

Description: This thesis presents the development of a device for cleaning capillary viscometers. Driven by the need to ensure accurate measurements in tribological studies, we built a solution based on Venturi theory. Our device, designed to comply with ASTM D445 and D446 standards, incorporates a system that regulates air and solvent flow, allowing several viscometers to be cleaned simultaneously. Validation tests confirmed its efficiency: we managed to significantly reduce cleaning times and achieve uniformity superior to traditional manual methods. This technological contribution not only optimizes processes in research laboratories but also paves the way for future improvements in the field.

* Degree Work

** Faculty of Physicomechanical Engineering. School of Mechanical Engineering. Advisor: Francisco José Saldivia Saldivia, M.Sc.

1 Planteamiento del problema

En el marco de la clase de pregrado Tópicos especiales: Tribología y las clases de posgrado Tribología y análisis de lubricantes en la Universidad Industrial de Santander se utilizan frecuentemente elementos de medición de precisión para llevar a cabo diversas pruebas tales como lo son el análisis de la viscosidad, viscosidad por comparación, pruebas de inspección a través de los sentidos y la dureza al rayado a alta temperatura. Algunos elementos, como instrumentos de medición, son viscosímetros y probetas que son fundamentales para obtener resultados confiables y precisos en los estudios realizados en la escuela en el campo de la tribología. “El viscosímetro capilar es quizá el instrumento para la determinación de viscosidad más empleado, y también el más antiguo. En este tipo de viscosímetros un fluido es obligado a pasar a través de un tubo observándose una distribución de velocidades en el tubo de tipo parabólico” (García Q, 2008)

Un factor relevante del viscosímetro es la calidad de la limpieza del tubo entre pruebas o mediciones. Dicha actividad se realiza en diferentes etapas que son la limpieza, enjuague y secado en las cuales se utilizan solventes libres de residuos. En los laboratorios donde se realizan pruebas constantemente es crucial disponer de un sistema de limpieza integrado que garantice la eficiencia de la limpieza (Noria Latín América, 2022).

Las limitaciones que se presentan se deben a la falta de instrumentos de limpieza especializados que se adapten de manera óptima a las características particulares de dichos elementos. Los métodos convencionales, como lo son la limpieza con esponjas, cepillos y jabón o la limpieza manual con solventes utilizados en otros ámbitos no son suficientes para eliminar de forma eficiente los residuos, partículas y contaminantes que se adhieren a estos elementos tras su uso. (Noria Latín América, 2022).

El desarrollo de dicho sistema de limpieza mejorará la eficiencia de los procesos de limpieza y contribuirá a obtener resultados más precisos y confiables en las investigaciones realizadas en el campo de la tribología. Asimismo, se espera que esta solución pueda ser escalable y adaptable a laboratorios y entornos donde se requiera una limpieza precisa de elementos de medición. (Noria Latín América, 2022).

2 Justificación

La Universidad Industrial de Santander se ha caracterizado por ser un centro de investigación y solución de problemas de la comunidad Santandereana principalmente en su labor de extensión. Pero hay una rama que se ha quedado corta a lo largo de los años, esta es la de tribología que no ha sido tan solicitada en años anteriores, pero esto ha cambiado al inicio de esta década.

Debido a que la institución está dando un impulso al estudio de la tribología se han encontrado algunos inconvenientes que se tienen que solucionar de manera oportuna, por esta razón se empezaron a realizar diferentes proyectos, entre los cuales se encuentra el presente que se ve impulsado por la necesidad de tomar medidas de precisión principalmente en el tema de viscosidad de aceites lubricantes.

El proyecto actual, impulsado por la necesidad de medir con precisión la viscosidad de los aceites lubricantes, es un ejemplo de cómo la universidad está trabajando activamente para superar estos desafíos y contribuir al avance de la tribología en la región. Con estos esfuerzos, la entidad continúa siendo un referente en la investigación y la solución de problemas en beneficio de la comunidad santandereana.

3 Objetivos

3.1 Objetivo General

Diseñar y construir un dispositivo que optimice el proceso de limpieza de los viscosímetros capilares, garantizando la calidad y precisión en los análisis tribológicos realizados por la clase de pregrado Tópicos especiales: Tribología y las clases de posgrado de Tribología análisis de lubricantes de la escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander.

3.2 Objetivos Específicos

- Desarrollar un diseño que permita la limpieza de tres viscosímetros capilares al tiempo asegurando la limpieza completa y uniforme en el interior del instrumento. Seleccionando los materiales y tecnologías adecuadas para el dispositivo asegurando la resistencia y durabilidad frente a los solventes químicos usados en el proceso de limpieza de los viscosímetros.
- Implementar un sistema intuitivo y eficiente que permita ajustar parámetros como intensidad de flujo y tipo de solvente, facilitando su operación en diversas condiciones de uso.
- Realizar pruebas de funcionamiento y validación para garantizar que el dispositivo elimine completamente los residuos, manteniendo la precisión de las medidas de los viscosímetros y cumpliendo los estándares de calidad del laboratorio.

4 Marco Contextual

El trabajo se realizará para la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander, ubicado en la ciudad de Bucaramanga, Santander.

5 Marco Referencial

5.1 Revisión de literatura

5.1.1 *Hallazgos de la revisión de literatura*

El diseño de dispositivos de limpieza de viscosímetros capilares ha sido un desafío para la industria, ya que busca desarrollar sistemas que eliminen por completo los contaminantes en el material de vidrio, protegiendo tanto al personal como al medio ambiente. Roche Colorado Corporation (RCC), proveedora de implementos y productos químicos para la industria, se esfuerza por equilibrar el desarrollo tecnológico con la protección ambiental. Para minimizar riesgos, RCC investiga y desarrolla prototipos de limpieza que cumplen con estándares de seguridad.

En la limpieza de viscosímetros, se emplean diversos disolventes, pero su concentración en el aire puede generar exposiciones ocupacionales y riesgos físicos. RCC se enfoca en implementar un sistema de limpieza que cumpla con estándares, utilizando la acetona como el disolvente menos peligroso. Se establecen estrictas normas de seguridad, desde la protección personal hasta la manipulación de insumos.

Durante la investigación, se identifican riesgos asociados con la falta de ventilación adecuada, dependencia de la ventilación por dilución, deficiente drenaje, uso excesivo de acetona y elevación de la temperatura del agua. RCC desarrolla dos prototipos: una campana ranurada y un sistema de Tiro Descendente. El segundo, a pesar de costos adicionales, es seleccionado por su diseño y eficacia. Se utiliza Resina Epoxi para la construcción, considerando la exposición a ácidos y químicos.

La implementación del sistema demuestra que la concentración de acetona en el aire se mantiene dentro de los límites permitidos. La empresa procede a patentar el equipo. La conclusión resalta la importancia de considerar aspectos como el diseño del laboratorio, el tamaño de las ranuras, la profundidad del fregadero y la ubicación del drenaje. Además, se destaca la relevancia de una adecuada ventilación para proteger al personal y reducir la exposición al medio ambiente. (Schmerber, 2005)

Por otra parte, la tecnología de limpieza sin solventes PYRO-CLEAN ofrece una alternativa mediante limpieza térmica, reduciendo significativamente los costos y riesgos asociados al uso de productos químicos peligrosos. Además de mejorar la seguridad, esta técnica libera tiempo para que los profesionales se concentren en actividades de mayor productividad. (Schwing Technologies, n.d.)

6 Marco Teórico

6.1 Tribología

Según Stachowiak (2013) la tribología es la ciencia que estudia la fricción, el desgaste y la lubricación, su estudio depende en gran medida de la correcta determinación de la viscosidad, ya que esta propiedad define la capacidad un fluido de formar una película protectora entre superficies en movimiento, reduciendo la fricción y evitando el contacto directo entre dichas superficies. En ingeniería mecánica el conocimiento y control de estos fenómenos es crucial para garantizar eficiencia y vida útil de los componentes de máquinas como motores, rodamientos, engranajes, sistemas hidráulicos, entre otros.

6.2 Propiedades de los fluidos.

La viscosidad se clasifica principalmente en dinámica y cinemática, cada una con aplicaciones específicas en la ingeniería. La viscosidad dinámica (μ) se refiere a la resistencia interna de un fluido al movimiento bajo una fuerza aplicada, mientras que la viscosidad cinemática (ν) considera adicionalmente la densidad del fluido, permitiendo relacionar el comportamiento del flujo en condiciones reales de operación (Cengel, 2018). Estas propiedades no son constantes, se ven principalmente afectadas con la variación de la temperatura, y en menor medida de la presión, lo que convierte su medición en una tarea importante en áreas industriales y centros de investigación. (Fox, 2004). Se utilizan para clasificar principalmente lubricantes y combustibles, esto en cuanto a fluidos newtonianos, ya que los no newtonianos se ven afectados adicionalmente por el esfuerzo cortante.

6.3 Viscosímetros capilares

El viscosímetro capilar de vidrio es el instrumento estándar para medir la viscosidad cinemática de fluidos en laboratorios de investigación y control de calidad, especialmente en productos derivados de petróleo.

Su funcionamiento se basa en la Ley de Poiseuille, el cual consiste en medir el tiempo que tarda un volumen conocido de fluido en recorrer una distancia conocida por gravedad entre dos marcas de un tubo capilar, esto bajo condiciones de presión y temperatura controladas (Wazer, 1964)

Existen diferentes tipos de viscosímetros capilares, los más comunes y usados son:

- Viscosímetro Ubbelohde (nivel suspendido): Utilizado para líquidos transparentes. Mide la viscosidad sin depender de la cantidad de muestra cargada, lo que elimina errores por drenaje.

- Viscosímetro Cannon-Fenske (tubo en U): Existen versiones para líquidos transparentes y de flujo reverso para líquidos opacos.

En ingeniería mecánica y tribología se utilizan para evaluar aceites lubricantes, combustibles y fluidos industriales, estos análisis pueden indicar degradación o contaminación, con lo cual se puede predecir el desgaste de maquinaria (Mezger, 2014)

6.4 Normas

La normatividad técnica que asegura la validez y repetibilidad de las mediciones están aseguradas por las normas internacionales:

- ASTM D445 / ISO 3104: Establecen el método de ensayo estándar para la determinación de la viscosidad cinemática de líquidos.
- ASTM D446 / ISO 3105: Especifican las dimensiones, calibración y uso de los viscosímetros capilares de vidrio, asegurando la uniformidad del instrumento.

En cuanto al riesgos ambientales y de seguridad industrial las normas a aplicar se establecen por los siguientes entes:

- OSHA (Occupational Safety and Health Administration): Exige programas de comunicación de peligros (HCS) para informar acerca de las sustancias químicas mediante etiquetas y hojas de datos de seguridad (SDS).
- NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health): Proporciona límites de exposición recomendados (REL) y orientaciones sobre el uso adecuado de equipos de protección personal (EPP).
- GHS (Sistema Globalmente Armonizado): Estandariza la clasificación de peligros y el etiquetado global, facilitando la comprensión de los riesgos químicos.

6.5 Procesos de limpieza de instrumentos de laboratorio

La limpieza de los instrumentos de vidrio en los laboratorios es un factor crítico para la confiabilidad de las mediciones. En el caso de los viscosímetros capilares, residuos de aceites o solventes pueden alterar los resultados significativamente. (Noria Latín América, 2022).

Los métodos de limpieza tradicionales incluyen el uso de solventes orgánicos (como la acetona, hexano, tolueno) y mezclas oxidantes como la solución crómica. Este se realiza introduciendo la sustancia al viscosímetro y restregando con cepillos especializados por dentro.

En las últimas décadas se han desarrollado técnicas modernas como la limpieza térmica sin solventes que mediante la pirolisis eliminan cualquier residuo de fuente orgánica o polimérica, la limpieza ultrasónica en el cual se sumergen los viscosímetros en algún solvente y mediante ondas ultrasónicas se remueven los residuos, y los sistemas cerrados con control de solvente que permiten el uso y recuperación eficiente de solventes. Estas técnicas buscan reducir la exposición ocupacional y el impacto ambiental. (Schmerber, 2005).

6.6 Impacto ambiental

El manejo de solventes y reactivos utilizados en la limpieza de material de vidrio tienen un alto riesgo del tipo químico y ocupacional. La exposición a los vapores que liberan estos solventes puede provocar efectos agudos como irritación respiratoria y crónica como alteraciones hepáticas o neurológicas (The National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH), 2007). Adicional a esto, la disposición inadecuada de solventes contaminados representa un riesgo ambiental por su alto potencial de contaminar suelos y cuerpos de agua (U.S. Department of Labor, 2012)

Por estas razones, las guías internacionales promueven la correcta disposición o en el mejor de los casos la sustitución de estas sustancias peligrosas por alternativas más seguras, adicionalmente a sistemas de ventilación y equipos de protección personal durante su manejo. (UNITED NATIONS, 2011)

6.7 Diseño de dispositivos de laboratorio

El diseño del dispositivo involucra la integración de diversas disciplinas de la ingeniería con el objetivo de crear un dispositivo eficiente y funcional. En este sentido la ingeniería de diseño es crucial, ya que permite optimizar la eficiencia, seguridad y durabilidad de los dispositivos teniendo en cuenta factores como la ergonomía, la facilidad de uso, el impacto ambiental, costos de fabricación, entre otros.

Un dispositivo de limpieza puede incluir mecanismos de aspersión o centrifugado, así como componentes estructurales que deben resistir esfuerzos mecánicos, como los tornillos que mantienen unidas las partes del dispositivo. En este contexto se debe aplicar principios de cálculo de esfuerzos, selección de materiales y métodos de diseño como el QFD (Quality Function Deployment).

Para el cálculo de esfuerzos se debe tener en cuenta los esfuerzos mecánicos a los que estarán sometidos los tornillos, especialmente los esfuerzos de aplastamiento y cortantes. Cuando un tornillo se aprieta, se genera una fuerza normal entre las superficies de contacto del tornillo y las piezas que conecta. El esfuerzo de aplastamiento debe ser menor a la resistencia al aplastamiento del material para evitar deformaciones plásticas o fallas. Por otra parte, los esfuerzos cortantes se producen cuando una fuerza actúa de manera tangencial a la superficie del tornillo, generando una deformación en la forma de corte. El diseño adecuado de un tornillo debe garantizar

que tanto los esfuerzos de aplastamiento como los cortantes no superen los límites de resistencia del material así evitando fallas estructurales en el dispositivo.

Para asegurar que un producto cumpla con los requisitos funcionales establecidos y los estándares de calidad se optó por el método de diseño QFD, el cual traduce las necesidades y expectativas del cliente en parámetros técnicos y operativos de diseño. Mediante este enfoque se permite realizar una alineación entre lo que el cliente necesita y lo que el producto será capaz de ofrecer, garantizando un producto de alta calidad que satisfaga las necesidades iniciales. (Yacuzzi, 2003)

Teniendo en cuenta todo lo anterior también es necesaria una buena selección de materiales, se deben cumplir varios requisitos como una buena resistencia mecánica, durabilidad, resistencia a la corrosión, facilidad de mantenimiento y bajo costos. Para dispositivos que involucran fuerzas de compresión o torsión, la selección de materiales debe tener en cuenta que el material debe ser capaz de soportar ciclos repetidos de carga sin fallar, adicionalmente debido a que el dispositivo tendrá contacto con productos químicos, es crucial elegir materiales que no se degraden tan fácilmente. Se debe buscar un material que ofrezca buena relación entre rigidez, peso y coste, como lo es el acero inoxidable debido a su alta resistencia a la corrosión y a esfuerzos mecánicos.

7 Metodología

El presente trabajo corresponde a un estudio de carácter aplicado y experimental, cuyo propósito es de diseñar, construir y validar un dispositivo de limpieza de viscosímetros capilares, garantizando la confiabilidad de las mediciones tribológicas realizadas en la Universidad Industrial de Santander.

La metodología se desarrolló de acuerdo con las siguientes etapas:

7.1 Revisión bibliográfica y contextualización

- Se realizó una búsqueda de antecedentes relacionados de los métodos de limpieza de viscosímetros capilares y las alternativas tecnológicas disponibles. Aunque la literatura específica sobre dispositivos de limpieza para este tipo de instrumentos es escasa, se identificaron estudios relevantes que abordan principios de limpieza térmica y uso de solventes.
- Se consultaron normas técnicas como ASTM D445 y ASTM D446, las cuales establecen los procedimientos de calibración, uso y limpieza de los viscosímetros capilares.

7.2 Diseño conceptual

- Se definieron las especificaciones de funcionamiento del dispositivo de acuerdo con la necesidad del laboratorio.
- Se plantearon alternativas de diseño para cada subsistema (estructura, sistema de aspersión, transporte de solvente y aire, almacenamiento y control).
- Cada alternativa se evaluó mediante una matriz QFD considerando como criterios el costo, eficiencia, durabilidad y facilidad de operación.

7.3 Diseño al detalle y simulación

- Se diseñaron elementos que cumplieran con los requerimientos de diseño, así mismo se seleccionaron accesorios de tubería que se ajustaran a dichos elementos y a los parámetros de diseño.
- Se realizaron simulaciones de esfuerzos mecánicos (Von Mises) para validar la resistencia estructural de la cámara de presión y el tanque del solvente.

7.4 Construcción del prototipo

- Se construyó el dispositivo con materiales resistentes a agentes corrosivos (principalmente acero inoxidable SAE 304 y láminas galvanizadas)
- Se ensamblaron los subsistemas de transporte, almacenamiento y control siguiendo el diseño seleccionado.

7.5 Pruebas experimentales

- Se realizaron ensayos de funcionamiento con diferentes configuraciones de funcionamiento de los aspersores (1, 2 y 3 aspersores en operación al mismo tiempo)
- Se midieron parámetros de presión y desempeño en la limpieza de los viscosímetros con residuos.
- La validación de la limpieza se llevó a cabo mediante inspección visual, verificando la ausencia de residuos o partículas que puedan afectar el resultado de la medición.

7.6 Análisis de resultados

- Se compararon los resultados obtenidos con los criterios de las normas ASTM y con los métodos de limpieza tradicionales.
- Se evaluó la eficiencia en términos de tiempo y uso de solvente.

7.7 Conclusiones y recomendaciones

- A partir de los resultados obtenidos, se establecieron recomendaciones orientadas a futuras líneas de investigación y conclusiones en base a los objetivos del trabajo.

8 Diseño conceptual

8.1 Requerimientos Técnicos de diseño

Se basará principalmente en la norma Oil Industry — Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids (and Calculation of Dynamic Viscosity). (ASTM D 445:2006) y similares (ASTM: D446, D2162, D6074. ISO: 3104, 3105, 5725).

Para el dispositivo se debe tener en cuenta los siguientes requerimientos:

- Almacenamiento: El solvente requiere un tanque con una capacidad mínima de 1 litro.
- Presión: El compresor de aire debe tener una presión máxima de 150 PSI.
- Capacidad: Que sea capaz de limpiar de 1 a 3 viscosímetros a la vez.
- Ergonomía: El uso del dispositivo debe ser amigable con el usuario para evitar fallas en su uso y evitar posibles riesgos químicos.
- Sistema de regulación para mantener constante la presión del aire.
- Dimensiones compactas para facilitar su manipulación y almacenamiento, adicionalmente se debe tener en cuenta el espacio en el banco del laboratorio de mantenimiento.

8.2 Evaluación de alternativas

Mediante el uso de matrices QFD se evaluarán distintas configuraciones revisando y priorizando criterios tales como; el costo de fabricación, durabilidad, facilidad de montaje, operación y mantenimiento por subsistema.

8.2.1 Estructura

Para la estructura se consideraron dos alternativas.

La Alternativa 1 consta de un cubo sin tapa, con una bandeja deslizable.

La Alternativa 2 consta de un cubo sin tapa, con una base removible la cual tendrá la función de bandeja para recibir posibles residuos y facilitar su respectivo desecho.

Tabla 1

Matriz QFD de alternativas para la estructura del dispositivo

ESTRUCTURA	Prioridad	Alternativa		Alternativa	
		1		2	
Costo de fabricación	3	1	3	3	9
Durabilidad	4	1	4	1	4
Fácil montaje	5	3	15	9	45
Fácil operación	2	0	0	0	0
Fácil mantenimiento	1	1	1	1	1
Total			23		59

Nota. Se establecieron los criterios según las necesidades del laboratorio.

De acuerdo con la matriz QFD, la alternativa 2 es aquella con mayor puntuación (59 contra 23 de la alternativa 1). Dicha diferencia se debe a su “facilidad de montaje” siendo este el criterio más importante debido a que se busca la forma más sencilla de acoplar los subsistemas en la estructura, de tal forma que el dispositivo se pueda montar y desmontar lo más fácil y rápido en dado caso que se requiera movilizarlo de su sitio de trabajo, por tal motivo se seleccionó la alternativa 2.

8.2.2 Sistema de aspersión

Para el sistema de aspersión se presentaron dos posibles alternativas:

La Alternativa 1 consta de una pieza con cinco acoples machos de ¼” y dos laminas laterales soldadas a un tubo de 1”.

La Alternativa 2 consta de una pieza con seis niples machos de ¼” y dos laminas soldadas a un tubo de 1”.

Tabla 2

Matriz QFD de alternativas para el subsistema de aspersion del dispositivo

Sistema aspersion	Prioridad	Alternativa 1		Alternativa 2	
Costo de fabricación	3	3	9	3	9
Durabilidad	4	9	36	9	36
Fácil montaje	5	3	15	3	15
Fácil operación	2	0	0	0	0
Fácil mantenimiento	1	3	3	1	1
Eficiencia	6	3	18	9	54
Total			81		115

Nota. La eficiencia general del dispositivo depende de este subsistema.

Según los datos obtenidos en la matriz QFD la alternativa 2 obtuvo mayor puntuación frente a la alternativa 1 (115 puntos frente a 81 puntos). La diferencia se debe al criterio de la “eficiencia”, debido a que no solo se busca aumentar la disponibilidad de los viscosímetros capilares, sino también se busca reducir la cantidad de solvente, manteniendo una relación razonable entre disponibilidad y costo de limpieza. Se eligió la alternativa 2 debido a que es la más eficiente al momento de transportar el solvente a los aspersores.

8.2.3 Sistema de transporte

El sistema de transporte consta de dos subsistemas, un subsistema de transporte para el aire y el subsistema para el transporte del solvente:

8.2.3.1 Subsistema de transporte del solvente. Para el transporte del fluido se consideraron dos alternativas:

La Alternativa 1 consta de dos niples macho-macho de $\frac{1}{4}$ " de 5 cm, un niple macho-macho de 10 cm, un niple macho-macho de 15 cm, tres bujes reductores de $\frac{1}{2}$ " a $\frac{1}{4}$ ", una tee hembra de $\frac{1}{2}$ ", una válvula antirretorno de $\frac{1}{2}$ " y un acople para la entrada de aire de $\frac{1}{4}$ ".

La Alternativa 2 consta de dos niples macho-macho de ¼” de 5 cm, un niple macho-macho de 10 cm, un niple macho-macho de 15 cm, un codo hembra-hembra de ¼”, tres bujes reductores de ½” a ¼”, una tee hembra de ½”, una válvula antirretorno de ½” y un acople para la entrada de aire de ¼”.

Tabla 3

Matriz QFD de alternativas para el subsistema de transporte del solvente del dispositivo

Sistema de transporte del fluido	Prioridad	Alternativa 1		Alternativa 2	
Costo de fabricación	2	1	2	1	2
Espacio requerido	4	3	12	9	36
Fácil montaje	3	1	3	1	3
Fácil mantenimiento	1	1	1	1	1
Total			18		42

Nota. Se tuvo en cuenta el espacio reducido en el banco de laboratorio para la distribución de los accesorios.

Teniendo en cuenta la matriz QFD la alternativa 2 obtuvo la mayor puntuación (42 frente a 18 de la alternativa 1). Esta diferencia se debe principalmente al criterio “espacio requerido”, que resulta primordial en el laboratorio donde se instalara el dispositivo. Por lo tanto, se seleccionó la alternativa 2 por su mayor eficiencia en el uso del espacio y su facilidad de integración con los demás subsistemas.

8.2.3.2 Subsistema de transporte de aire. Para el transporte de aire se consideraron dos alternativas:

La Alternativa 1 consta de una manguera que va del compresor al acople del subsistema de transporte del fluido.

La Alternativa 2 consta de una manguera y una válvula de control de presión.

Tabla 4

Matriz QFD de alternativas para el subsistema de transporte de aire del dispositivo

Sistema de transporte de aire	Prioridad	Alternativa 1		Alternativa 2	
Costo de fabricación	1	9	9	1	1
Flujo constante	2	1	2	9	18
Total		11		19	

Nota. El flujo de aire constante es prioritario para garantizar el funcionamiento correcto del dispositivo.

Con base a la matriz QFD la alternativa 2 es aquella con mayor puntaje (19 frente a 11 de la alternativa 1). Esto se debe al criterio de “Flujo constante”, el cual es crítico para el correcto funcionamiento del dispositivo, por tal motivo se optó por la alternativa 2 con la cual se garantiza de mejor forma el flujo contante.

8.2.4 Sistema de almacenamiento

Para el sistema de almacenamiento se consideraron dos alternativas:

La Alternativa 1 no tiene tanque, teniendo la posibilidad mediante acoples de unir la botella del solvente necesario.

La Alternativa 2 es un tanque de un 1 L de fácil acceso.

Tabla 5

Matriz QFD de alternativas para el sistema de almacenamiento del dispositivo

Sistema de almacenamiento	Prioridad	Alternativa 1		Alternativa 2	
Costo de fabricación	2	1	2	9	18
Durabilidad	3	1	3	1	3

Seguridad del operario	5	1	5	3	15
Fácil operación	1	1	1	3	3
Fácil mantenimiento	4	3	12	1	4
Total			23		43

Nota. La seguridad del operario siempre se debe priorizar en cualquier proceso de diseño.

De acuerdo con la matriz QFD, la alternativa 2 es aquella con mayor puntaje (43 frente a los 23 de la alternativa). Dicha diferencia se debe al criterio de “Seguridad del operario”, el cual resulta ser el más relevante al momento de diseñar. Por tal motivo se seleccionó la alternativa 2 debido a que es aquella con la cual el operario tendrá mayor seguridad al momento de manipular el dispositivo.

8.2.5 Sistema de control

Para el control se consideraron dos alternativas:

La Alternativa 1 es un sistema de control automático mediante válvulas electromecánicas, temporizadores, Arduino, etc.

La Alternativa 2 es un sistema de control manual usando válvulas de bola y un manómetro para medir la presión.

Tabla 6

Matriz QFD de alternativas para el sistema de control del dispositivo

Sistema de control	Prioridad	Alternativa 1		Alternativa 2	
Costo de fabricación	3	1	3	9	27
Durabilidad	4	1	4	1	4
Fácil montaje	5	1	5	1	5
Fácil operación	2	9	18	3	6
Fácil mantenimiento	1	3	3	9	9
Total			33		51

Nota. La diferencia de costos de fabricación es significativa debido a que se busca el mayor ahorro sin perder la efectividad del dispositivo.

Mediante el uso de una matriz QFD se obtuvo que la alternativa 2 alcanzó mayor puntuación (51 frente a 33 de la alternativa 1). Esto se debe al factor “costo de fabricación”, el cual resulta ser de importancia debido a que el presupuesto se encuentra limitado. Por lo tanto, se eligió la alternativa 2 por reducir significativamente los costos de fabricación manteniendo intacto el buen funcionamiento y la eficiencia de lavado esperado en el dispositivo.

9 Diseño del dispositivo para la limpieza de viscosímetros capilares

9.1 Diseño inicial

El dispositivo para la limpieza de viscosímetros capilares es fundamental para garantizar los estándares de calidad en los análisis de aceites, por tal motivo se diseña teniendo en cuenta factores como la capacidad de limpieza, las dimensiones y una interfaz ergonómica.

La alternativa seleccionada incorpora un compresor de aire de 150 PSI, encargado de suministrar aire seco para el proceso de secado y de impulsar el solvente desde el tanque hacia los aspersores durante la limpieza. El control del sistema se realiza manualmente mediante válvulas de bola ubicadas estratégicamente después del tanque y antes de cada aspersor. Todos los componentes se integran en una estructura de soporte diseñada para garantizar estabilidad y facilidad de uso.

9.1.1 Diseño de la estructura

La estructura es la encargada de soportar el sistema de aspersión, así como recibir los posibles residuos de los viscosímetros capilares, por tal motivo se debe tener en cuenta su fácil limpieza por lo cual se divide en 2 partes de acero galvanizado, un cubo compacto encargado de soportar el sistema de aspersión y una bandeja encargada de soportar el cubo y de recibir posibles residuos, tal y como se observa en la Figura 1.

Figura 1*Estructura del dispositivo*

Nota. Se muestra como la estructura se acopla con el resto de los subsistemas.

Para soportar el sistema de transporte se usaron láminas de acero galvanizado de calibre 18, por tal motivo el cálculo de los esfuerzos se centra en esta parte del dispositivo así:

9.1.1.1 Cálculos para el esfuerzo por aplastamiento (tornillo). En esta sección se calcula el esfuerzo por aplastamiento en los puntos de unión de los tornillos con la lámina. Este esfuerzo se produce cuando la fuerza ejercida por el tornillo se carga sobre la superficie de contacto de la lámina.

El esfuerzo de aplastamiento se determina por la expresión:

$$\sigma_b = \frac{F}{d_h * t}$$

Donde:

- F es la fuerza transmitida por el tornillo en [N]
- d_h es el diámetro nominal del tornillo en [mm]

- t es el espesor de la placa en [mm]

$$P = m * g = 3 [kg] * 9.81 = 29.43 [N]$$

Para el peso se tomó un valor de masa igual a 3 [kg] que corresponde a la masa de la cámara de presión teniendo en cuenta los viscosímetros.

$$F_{\text{tornillo}} = \frac{P}{2} = \frac{29.43}{2} = 14.71 [N]$$

$$\sigma_b = \frac{F_{\text{tornillo}}}{d_h * t} = \frac{14.71 [N]}{0.004 * 0.0001214 [m]} = 3.03 [MPa]$$

$$FS = \frac{\sigma_u}{\sigma_b} = \frac{380 [MPa]}{3.03 [MPa]} = 125$$

Con los valores de carga y las dimensiones de los tornillos seleccionados, se obtiene un esfuerzo de aplastamiento mínimo comparado con la resistencia admisible del acero galvanizado (380 [MPa]). El resultado muestra un factor de seguridad de 125, lo cual demuestra que el esfuerzo calculado se encuentra muy por debajo del admisible.

9.1.1.2 Cálculos para el esfuerzo cortante. El esfuerzo cortante se genera por la fuerza aplicada al tornillo con respecto a la lámina. Para el caso analizado, los tornillos deben resistir las fuerzas derivadas del peso del sistema.

El esfuerzo cortante se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\tau = \frac{F}{A_v}$$

Donde:

- F es la fuerza hacia el tornillo en [N]
- A_t es el área de la sección transversal del vástago del tornillo en [m²]

$$A_t = 2 * L_c * t = 2 * 0.053 [m] * 0.001214 [m] = 1.286 * 10^{-4} [m^2]$$

$$\tau = \frac{F_{\text{tornillo}}}{A_t} = \frac{14.715 [N]}{1.286 * 10^{-4} [m^2]} = 0.114 [MPa]$$

$$FS = \frac{0.4 * \sigma_y}{\tau} = \frac{0.4 * 250 [MPa]}{0.114 [MPa]} = 877$$

Al realizar el cálculo con los tornillos seleccionados (se asume un valor de 250 [MPa] al desconocer el grado del material) y la carga que soportará, el esfuerzo es realmente bajo comparado con el admisible, resultando así en un factor de seguridad de 877.

9.1.2 Diseño del sistema de aspersión

El sistema de aspersión es el encargado de pulverizar el solvente, este cuenta con dos elementos importantes, la cámara de presión y los aspersores.

9.1.2.1 Diseño de la cámara de presión. La cámara de presión consta de un tubo inoxidable de 30cm de ½” soldado con seis niples de 4cm de ¼” y dos láminas de 5 cm x 10 cm, adicionalmente lleva los siguientes accesorios de tubería, una tee de ¼”, dos codos hembra-macho de ¼”, un niple de 5 cm de ¼”, un acople para tubería de ¼”, tal y como se observa en la Figura 2.

En la cámara de presión llega desde la parte posterior el solvente arrastrado mediante aire a una presión de 100 PSI de tal forma se garantiza que el solvente transcurra toda la pieza llegando hasta las boquillas de los aspersores los cuales se encuentran conectados mediante válvulas de bola a los acoples de ¼” soldados a la parte superior de la cámara.

Para llevar el control de la presión se suelda un acople en la parte frontal de la cámara donde se conecta un manómetro con una capacidad de lectura máxima de 150 PSI garantizando así una medición adecuada teniendo en cuenta que el rango de presión operativo va de los 40 PSI a los 100 PSI.

Figura 2

Cámara de presión



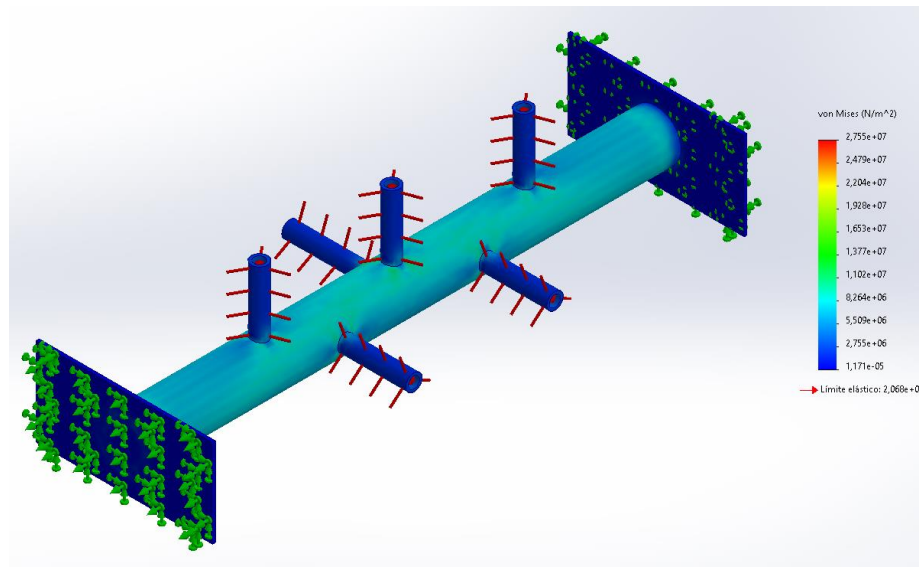
Nota. Se muestra la distribución de los accesorios soldados al tubo de $\frac{1}{2}$ " para dar forma a la cámara de presión.

Esta pieza fue fabricada mediante la soldadura de los accesorios ya mencionados, con dos trozos de lámina en los laterales para sellar la cámara y proporcionar soporte hacia la estructura del dispositivo, un tubo central que vendría siendo la cámara de presión y cuatro niples, tres de los cuales serán usados para conectar los aspersores, y el cuarto será utilizado para realizar la medición dentro de esta.

9.1.2.2 Simulación de los esfuerzos de la cámara de presión. Para el cálculo de los esfuerzos se realizó una simulación en el software SolidWorks Simulation dando los resultados presentados en la Figura 3 y 4.

Figura 3

Análisis de esfuerzos por Von Mises en la cámara de presión

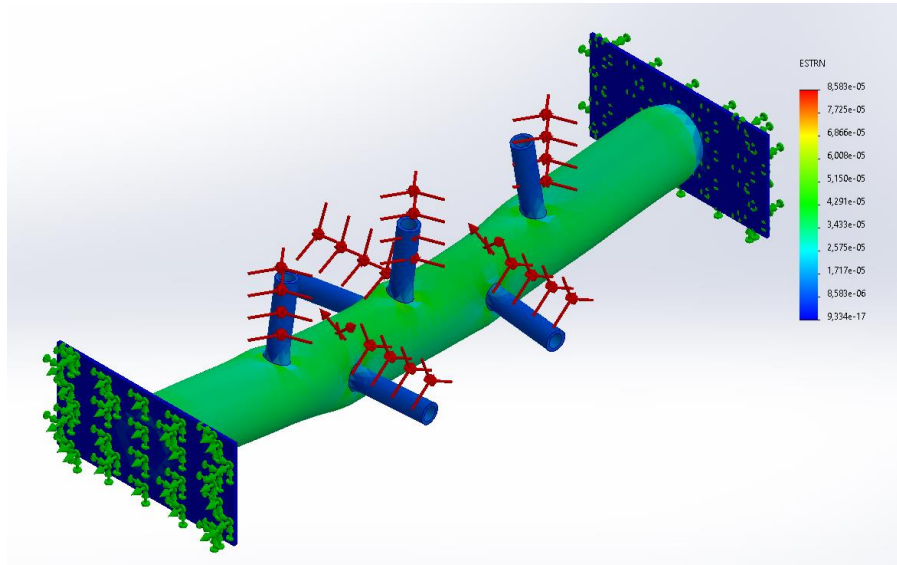


Nota. El esfuerzo más alto presentado es de 2.755×10^7 el cual es un valor bajo comparado con las propiedades del material

Como se puede observar en la Figura 3 el esfuerzo más alto presentado en la cámara es de 27.55 MPa y el límite elástico del material es de 200 MPa dando así un factor de seguridad de 7.26.

Figura 4

Análisis de las deformaciones unitarias en la cámara de presión



Nota. La deformación más alta presentada toma un valor de 8.583×10^{-5} el cual es un valor bastante bajo dadas las propiedades del material

Los resultados de la simulación, obtenidos por el método de elementos finitos realizados en el software CAD SolidWorks muestran un esfuerzo máximo de 27.55 MPa, concentrado en la unión de los nipples con el tubo principal de la cámara de presión. Este valor es aproximadamente 200 MPa, lo que resulta en un factor de seguridad cercano a 7.26. Adicional se obtiene que las deformaciones son insignificantes para las cargas previstas.

9.1.3 Selección del aspersor

Se seleccionó una boquilla para hidro lavadora acero inoxidable con entrada roscada de $\frac{1}{4}$ " y salida plana de 4 mm. Sin embargo, debido a las dimensiones de los viscosímetros capilares los cuales cuentan con un diámetro de entrada de 10 mm y un alto de 14 mm, se adaptaron las boquillas comerciales. Mediante soldadura con un tubo de acero inoxidable con 9 mm de diámetro y una

altura de 12 mm se alargaron las boquillas, tal como se observa en la Figura 5. Con esta configuración se logra que la boquilla se pueda introducir en el tubo capilar reduciendo la presión necesaria para que el solvente viaje la totalidad del instrumento al momento de la lavada.

Figura 5

Aspersor



Nota. El aspersor se fabricó soldando la boquilla de hidro lavadora con el tubo de acero inoxidable.

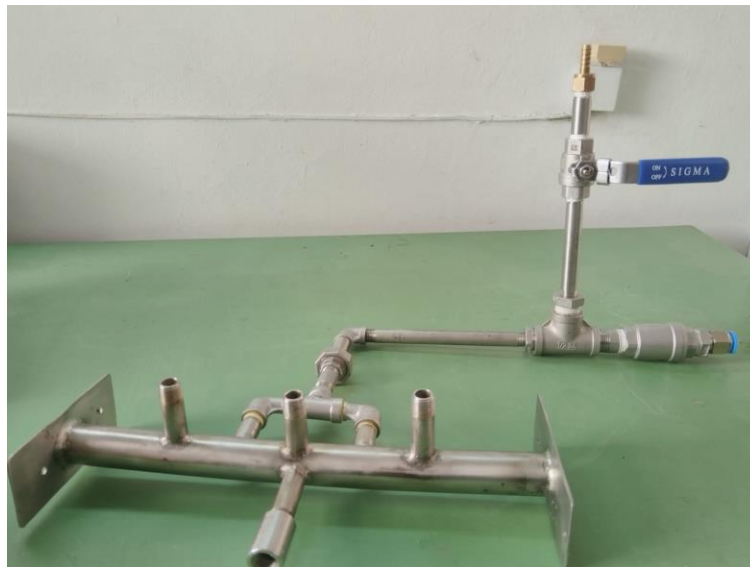
9.1.4 Diseño del sistema de transporte

El sistema de transporte es el encargado de mover el aire y solvente hasta el aspersor, se divide en dos subsistemas, el subsistema de transporte del solvente y el subsistema de transporte de aire.

9.1.4.1 Selección de elementos para el subsistema de transporte del solvente. El subsistema de transporte del solvente es el encargado de movilizar el solvente arrastrado mediante aire comprimido desde el tanque hasta el aspersor, teniendo en cuenta las limitaciones de espacio para ubicar el dispositivo de limpieza para viscosímetros capilares y debido a que el solvente es altamente corrosivo se seleccionaron los siguientes accesorios en acero inoxidable SAE 304: un codo H-H de ¼”, una tee de ½”, tres niples de 5cm de ¼”, dos niples de 15cm de ¼”, dos bujes reductores de ½” a ¼”, una tuerca de unión de ¼” y una válvula de bola de ¼”. Adicionalmente es necesario asegurar que el solvente no entre en el compresor, por tal motivo se agregó una válvula antirretorno de ½”. Formando la configuración mostrada en la Figura 6.

Figura 6

Configuración de los accesorios de tubería



Nota. Se muestra la interacción del sistema de transporte del solvente con la cámara de presión.

9.1.5 Selección de elementos para el subsistema de transporte de aire

El subsistema de transporte de aire es el encargado tanto de mover el aire seco del compresor al aspersor como de empujar el solvente desde el tanque hasta el aspersor cuando la válvula del tanque se encuentre abierta, por tal motivo es necesario asegurar una presión óptima y continua.

9.1.5.1 Válvula reguladora de presión. Se seleccionó una válvula reguladora de 100 PSI, ilustrada en la Figura 7. Con esta válvula se asegura una presión constante en todo momento, manteniendo continuo el flujo de aire necesario para transportar el solvente hasta el aspersor.

Figura 7

Válvula reguladora de presión



9.1.5.2 Maguera de aire a presión. Se seleccionó una manguera Flexco TU12080PU de 12 mm de diámetro externo para presión de aire mostrada en la Figura 8, la cual está diseñada para una presión de trabajo de 100 PSI (Ver apéndice A). Esta manguera cumple con los requerimientos de diseño moviendo el aire del compresor a la válvula antirretorno, pasando por la válvula reguladora de presión.

Figura 8

Manguera para el aire de 12 mm



9.1.5.3 Machos Prestolock. Se seleccionaron dos machos Prestolock con rosca de ¼” y entrada para manguera de 12 mm como se muestra en la Figura 9. Este elemento asegura que la manguera de aire a presión no se suelte evitando usar acoples adicionales.

Figura 9

Conector Prestolock Macho



Nota. Se conectan a la salida del compresor y a la entrada del dispositivo.

El sistema de transporte es el eje articulador del dispositivo, ya que asegura la funcionalidad del dispositivo. A través de las mangueras y las conexiones, el aire comprimido proveniente del compresor se dirige hacia la cámara de presión, donde después de interactuar con el sistema de almacenamiento para arrastrar el solvente, transporta ambos fluidos hacia los aspersores. Este es regulado por el sistema de control, que permite ajustar dicho flujo de acuerdo con las necesidades de operación. De esta manera se enlaza con los otros subsistemas, permitiendo que el proceso de limpieza de los viscosímetros capilares se lleve a cabo de una forma eficiente, segura y controlada.

9.1.6 Diseño del sistema de almacenamiento

Se fabricó un tanque con capacidad de 1 L el cual consta de cuatro elementos de acero inoxidable SAE 304, un tubo de 2” soldado con un niple de 3 cm de ¼”, el cual realizara la función

de salida y un niple de 1.5 cm de 1", con su respectiva tapa por el cual ingresara el solvente, según se muestra en la Figura 10.

Figura 10

Tanque del solvente



Nota. El tanque se fabricó con la opción de conectarle una tapa o un accesorio en ambos costados.

9.1.6.1 Simulación de los esfuerzos en el tanque del solvente. Para el cálculo de los esfuerzos se realizó una simulación en el software SolidWorks Simulation dando como resultado los esfuerzos ilustrados en la Figura 11 y 12.

Figura 11

Análisis de esfuerzos por Von Mises en el tanque del solvente



Nota. El esfuerzo más alto que dio la simulación fue de 21.12 MPa que comparado con el límite elástico del material es bajo, dando así un factor de seguridad de 9.4.

Figura 12

Análisis de las deformaciones unitarias en el tanque del solvente



Nota. La deformación más alta presentada toma un valor de 8.039×10^{-5} el cual es un valor bastante bajo dadas las propiedades del material

De la simulación realizada al tanque del solvente se obtiene que por el método de elementos finitos realizados en el software CAD SolidWorks el esfuerzo máximo es de 21.12 MPa (Figura 11), presentado en la cara con mayor área dentro del mismo. Comparado con el límite de fluencia cuyo valor es aproximadamente 200 MPa, lo que resulta en un factor de seguridad cercano a 9.4 que garantiza resistencia estructural respecto a las cargas previstas. Adicional se obtiene que las deformaciones son insignificantes comparadas con las propiedades del material.

9.1.7 *Diseño del sistema de control*

Debido a que el sistema de control es manual, se seleccionaron dos tipos de válvulas, válvula de bola mini H-H de 1/4" para controlar la salida del solvente de la cámara de presión al aspersor y una llave de paso de 1/4" para controlar la entrada del solvente del tanque al subsistema de transporte del solvente. Para controlar la presión del sistema se cuenta con un manómetro que marca la presión desde los 0 PSI a los 150 PSI, tal y como se ilustra en la Figura 15.

Figura 13

Válvula de bola mini H-H



Se selecciona esta válvula porque no interfiere con la manipulación de los viscosímetros capilares debido al tamaño reducido de su palanca adicionalmente cuenta con una manera rápida

y sencilla de cierre y apertura, finalmente las válvulas de bola poseen un bajo coeficiente de pérdidas de carga.

Figura 14

Llave de paso



Se selecciona la llave paso ilustrada en la Figura 14 para la entrada del solvente debido a que esta válvula tiene un seguro incorporado evitando así que se abra la entrada del solvente accidentalmente durante el proceso de limpieza.

Figura 15

Manómetro WINTERS de hasta 150 PSI



9.1.7.1 Selección del compresor. Se seleccionó un compresor de 1 hp con un flujo de aire de 115 Lpm referencia HSU 750 marca POWER tal y como se ilustra en la Figura 16. Debido a que cumple con los requerimientos de presión mínima de 25 PSI para el correcto funcionamiento de la máquina.

Figura 16

Compresor HSU 750 marca POWER



Nota. Se le incorporó una base de madera al compresor para que ayude a absorber vibraciones y sostener el capacitor.

9.2 Diseño final

Al momento de realizar las pruebas de funcionamiento del dispositivo se encontró que la cámara de presión acumulaba solvente en los extremos y este se liberaba en forma de chorro sin aspersión al bloquear o detener el flujo del aire dentro de la cámara, adicionalmente se consumía todo el solvente almacenado en el tanque. Por tal motivo se realizó un cambio en los en los subsistemas de estructura, almacenamiento, transporte y control del dispositivo.

9.2.1 *Subsistema de estructura*

Debido a que las dimensiones de los componentes cambiaron se tuvo que realizar un ajuste en los componentes que soportan el dispositivo.

9.2.1.1 Caja frontal y bandeja de recolección. Estos elementos mostrados en la Figura 17 tienen como funcionalidad evitar que los residuos generados por la limpieza escapen o salpiquen en lugares no controlados, es requerido dada la reactividad de algunos solventes.

Figura 17

Caja frontal y bandeja de recolección

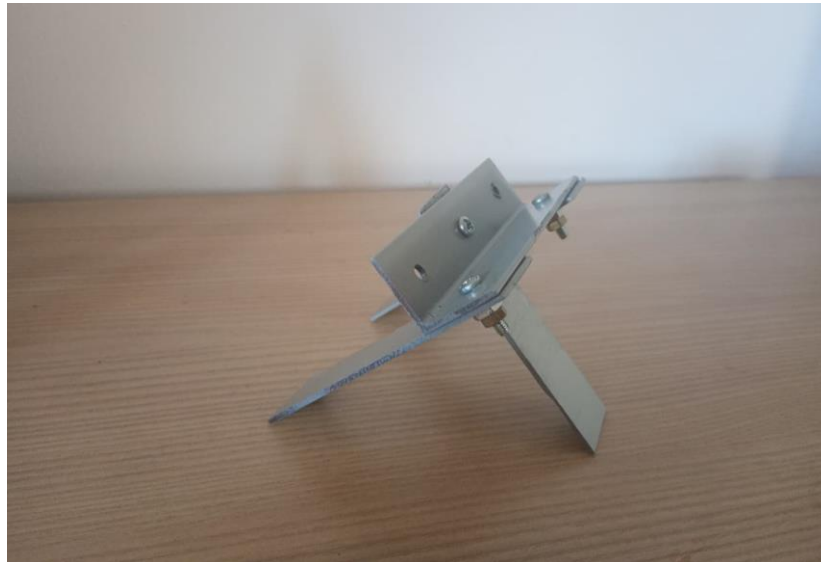


Nota. Se pintaron los perfiles en ángulo para prevenir corrosión por salpicaduras de solvente. La bandeja se encuentra debajo de la caja.

9.2.1.2 Soporte de la tubería del dispositivo. Para sostener el dispositivo basta con el elemento mostrado en la Figura 18, que posicionado en el lugar correcto da un soporte completo, aún en funcionamiento.

Figura 18

Soporte de la tubería del dispositivo



9.2.2 Subsistema de almacenamiento

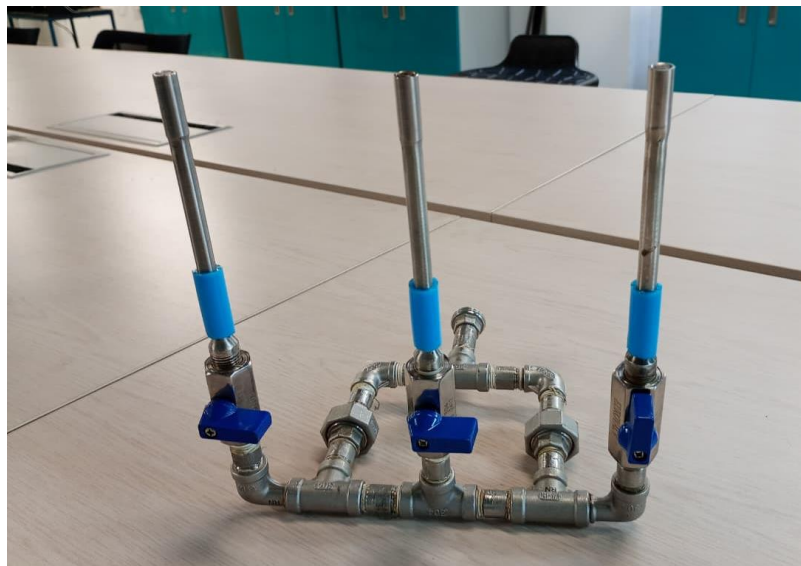
Se decidió eliminar el tanque del fluido, debido a que al momento de realizar un ciclo de lavado no se contaba con la regulación adecuada para darle paso al solvente. Adicionalmente se decidió que por ciclo de lavado era necesario usar una cantidad mínima de 15 ml de solvente y una cantidad máxima de 30 ml de solvente, por tal motivo se decidió eliminar el tanque dejándolo libre para almacenar el aire del compresor.

9.2.3 Subsistema de transporte

Para esta parte se optó por cambiar la cámara de presión por accesorios de tubería, esto con el fin de asegurar que el solvente salga por los aspersores sin oportunidad de quedarse estancado en alguna parte, sin aumentar el costo de construcción del dispositivo. El resultado del subsistema de transporte se divide en 2 partes como se muestra a continuación.

Figura 19

División de los fluidos al subsistema de aspersion



Nota. Se garantiza la posibilidad del completo desarme de esta pieza para reemplazos por fallas.

Para ensamblar este componente se utilizaron los siguientes accesorios de tubería con el fin de garantizar la correcta división de los fluidos hacía los aspersores.

Figura 20

T de 1/4" de acero inoxidable



Esta pieza es utilizada para asegurar la conexión con las tuercas universales mostradas en la Figura 22, que se encuentran en la parte posterior a los aspersores, las cuales permiten desarmar el dispositivo en caso de ser necesario. También para unir el aspersor del centro con los dos laterales, como se observa en la Figura 19. Para los otros dos aspersores se usaron codos como se muestra en la Figura 21.

Figura 21

Codo de 1/4" de acero inoxidable



Figura 22

Tuercas universales de 1/4" de acero inoxidable



Este tipo de tuerca también se encuentra al fondo de la estructura, que es el punto en el que entran los dos fluidos, esto con el fin de facilitar el traslado del dispositivo en caso de ser requerido por los usuarios.

Para unir todos estos elementos se utilizaron los niples mostrados en las Figuras 23 y 24 los cuales fueron sellados con teflón para evitar fugas.

Figura 23

Niple de 1/4" de acero inoxidable de 5 cm de longitud



Figura 24

Niple de 1/4" de acero inoxidable de 3 cm de longitud



La siguiente conexión de accesorios de tubería es utilizada para ingresar el solvente dentro del circuito, no se usará tanque como estaba previsto anteriormente ya que no cumple con la función para la cual fue ideada, este será utilizado como un pulmón cuando se requiera acumular aire en los casos que se requiera un impulso adicional a la apertura de las válvulas (casos en los que la suciedad del viscosímetro esté muy adherida al mismo).

Figura 25

Punto de adición del solvente al flujo del aire comprimido



Nota. Se compone de diferentes accesorios de tubería en acero inoxidable SAE 304.

El fluido se ingresa por la sección vertical (llave de paso Figura 14, la cual debe estar cerrada en el momento de funcionamiento del dispositivo) y el aire ingresa por la otra sección (válvula check Figura 29). Los fluidos serán dirigidos a partir de este punto al subsistema de aspersión.

9.2.4 Subsistema de control

Para el subsistema de control se realizaron los siguientes cambios, con el fin de garantizar un mejor funcionamiento. Empezando por el reemplazo de la válvula reguladora de presión mostrada en la Figura 26.

Figura 26

Válvula reguladora de presión con manómetro



Nota. Se ajusta mediante la perilla superior, en un amplio rango de presiones.

Con esta válvula reguladora de presión se garantiza un control seguro del sistema, esto se debe a que la reguladora cuenta con la capacidad de regular entre los 8 PSI y los 123 PSI (ver

apéndice B) lo cual entra en el rango optimo de funcionamiento del dispositivo (entre 15 y 25 PSI) evitando sobrepresiones que puedan llegar a ocasionar daños en los viscosímetros.

Figura 27

Válvula de bola pequeña

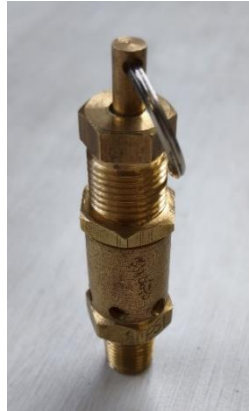


La válvula de la Figura 27 será utilizada para permitir o denegar el flujo de aire al sistema, logrando así redundancias para evitar problemas de seguridad al momento de rellenar el dispositivo con el solvente o cuando se requiera realizar una detención de emergencia.

Para asegurar que la presión del aire no se salga de control se utilizará una válvula de seguridad mostrada en la Figura 28 tarada a 100 psi, aumentando así la redundancia en las medidas de seguridad que tendrá el dispositivo.

Figura 28

Válvula de seguridad a 100 PSI



Para asegurarnos de que el solvente no llegue a devolverse por cualquiera que sea el caso a la válvula reguladora de presión (que no es de acero inoxidable) y evitar daños a futuro se utilizó una válvula check mostrada en la Figura 29 a continuación.

Figura 29

Válvula check de 1/2"



Adicional a esto por prevención se colocará al momento de uso del dispositivo un gancho mostrado en la Figura 30 que sostendrá el viscosímetro capilar de la parte superior. Esto porque al enviar más de 30 PSI a la salida del aspersor puede llegar saltar y dañarse el mismo.

Figura 30

Gancho



Nota. Se presenta el gancho de seguridad que se inserta en la base de la cámara de presión y se conecta con el tubo capilar.

Todas estas medidas dan como resultado unas medidas de control y prevención redundantes que garantizan el correcto funcionamiento y la protección al usuario suficiente para evitar accidentes. Siendo el armado de estos elementos tal como se muestra en la Figura 31.

Figura 31

Subsistema de control



Nota. Este subsistema integra componentes para la regulación de presión, incluyendo un manómetro y válvulas de control.

Cómo resultado de todos los ajustes que fueron necesarios para garantizar un correcto funcionamiento del dispositivo se obtiene el dispositivo mostrado en la Figura 32 a continuación.

Figura 32

Dispositivo para limpiar viscosímetros capilares



Nota. Se presenta el dispositivo montado en su respectivo espacio en el banco de laboratorio.

10 Pruebas

Una vez completado el diseño inicial se procedió a realizar pruebas de funcionamiento, dando como resultado un funcionamiento poco efectivo, acumulándose el solvente en la cámara

de presión y saliendo sin aspersion solo cuando se cortaba el flujo de aire a presión. Esta situación nos llevó a completar los ajustes ya mencionados anteriormente.

A continuación, se describirán las pruebas realizadas al diseño final, las cuales aportaron los datos para optimizar las condiciones de funcionamiento del dispositivo garantizando la limpieza y la seguridad del usuario.

10.1 Pruebas de presión

Una vez calibrada la válvula reguladora de presión (Figura 26), se realizaron pruebas de funcionamiento del dispositivo en diferentes niveles de presión. Los resultados mostraron que el rango óptimo de operación se encuentra entre los 15 y 25 PSI (Figura 33). A presiones superiores a 25 PSI, el chorro de solvente pierde uniformidad, dejando de cubrir la totalidad de las paredes internas del viscosímetro, provocando un flujo inestable.

Figura 33

Presión de funcionamiento del dispositivo



Nota. Se evidencia la presión del manómetro entre el rango de funcionamiento (entre 15 y 20 PSI).

10.2 Pruebas de limpieza en los viscosímetros capilares

El método de limpieza usado en el laboratorio antes de la implementación del dispositivo consistía en verter un aproximado de 60 ml a 70 ml de solvente dentro del viscosímetro capilar, el solvente se dejaba en reposo por al menos treinta minutos, pasado el tiempo se procede a agitar y desechar el sobrante con los residuos, luego para asegurar la totalidad de la limpieza se realizaba otra carga con cerca de 30 ml de solvente sin dejar reposar, luego se agitaba rápidamente y se desechaba el solvente. Finalmente se dejaba airear para lograr un secado total.

Con el dispositivo la limpieza se optimiza el tiempo y la cantidad de solvente a gastar, usando ciclos de limpieza, los cuales constan de verter 25 ml de solvente, cada ciclo de lavado dura un aproximado de 5 minutos (tomando el tiempo desde el momento que se prende el compresor hasta el momento que termina de fluir el solvente por el tubo capilar).

Es importante aclarar que las pruebas iniciales no se ejecutaron estrictamente los tiempos que establece la norma ASTM D445, debido a las restricciones regulatorias de compra de la acetona en Colombia, solvente utilizado para estas pruebas. Por tal motivo, es probable que al usar el dispositivo de acuerdo con la norma mencionada genere resultados aún más favorables en cuanto a la eficiencia y calidad de la limpieza.

La inspección de la efectividad de la limpieza en los viscosímetros capilares es visual, de manera que el resultado se obtiene y analiza limpiando diferentes viscosímetros sucios como se muestra a continuación.

10.3 Aceite de motor usado muy sucio

Para esta prueba inicial se utiliza el aceite más sucio y contaminado que se encontraba en el laboratorio mostrado en la Figura 34, realizando así una prueba ácida para verificar la eficacia de la limpieza del dispositivo.

Figura 34

Viscosímetro capilar con aceite de motor muy sucio



Nota. Se evidencia que el aceite toco todos los tramos del viscosímetro capilar.

Se procede a realizar un ciclo de lavado utilizando 25 ml de acetona como solvente, esto con el fin de ver el comportamiento de la limpieza en condiciones de suciedad extrema. El resultado de la limpieza del viscosímetro capilar para el aceite de motor usado muy sucio se evidencia a continuación en la Figura 35.

Figura 35

Viscosímetro capilar con aceite de motor muy sucio después de la limpieza



Nota. Se evidencia el viscosímetro capilar con bastantes residuos de aceite en toda la extensión del instrumento.

Después de un ciclo de lavado se evidencia que el instrumento termina totalmente contaminado (Figura 35) con bastantes residuos sólidos, por tal motivo se recomienda realizar una limpieza previa con thinner, así facilitando el proceso de lavado y disminuyendo la cantidad de ciclos de lavado al momento de realizar la limpieza.

10.4 Aceite Lubrigras hidráulico TP-46

Para esta prueba se utilizó el lubricante hidráulico TP-46, el cual no contiene residuos sólidos tal como si los presentaba el aceite de motor muy sucio utilizado en la prueba anterior tal como se muestra en la Figura 38. Esto para corroborar el funcionamiento de la limpieza con aceites limpios, obteniendo datos como números de ciclos totales necesarios para la limpieza completa y averiguar en qué casos es recomendable realizar una lavada previa con thinner.

Figura 36

Viscosímetro capilar con Lubrigras hidráulico TP-46



Nota. Se muestra como el aceite “Lubrigras hidráulico TP-46” hizo contacto con todas las superficies del viscosímetro capilar.

Se realizo un ciclo de lavado con 25 ml de acetona como solvente gastando un tiempo aproximado de 5 minutos obteniendo así el resultado ilustrado en la Figura 37. Se usaron 25 ml de solvente debido a que se busca gastar menos de 60 ml de acetona para la limpieza total de los tubos capilares.

Figura 37

Viscosímetro capilar con residuos del lubricante TP-46 después de un ciclo de limpieza



Nota. Después del ciclo de lavado se evidencia como el balón aforado aún tiene un poco de residuos del aceite.

Debido a que aún se evidencian residuos del lubricante principalmente en las paredes internas de los balones (Figura 37) se procede a realizar un segundo ciclo de lavado con otros 25ml de acetona adicionales, consiguiendo así erradicar completamente los residuos presentes del aceite lubricante TP-46 (figura 38). Gastando una totalidad de 50 ml de solvente y 10 minutos en dos ciclos de lavado para erradicar completamente los residuos de aceite de las paredes del instrumento.

Figura 38

Viscosímetro capilar con residuos del lubricante TP-46 después del segundo ciclo de limpieza



Nota. Después del segundo ciclo de limpieza se elimina completamente los residuos observados en la Figura 37.

10.5 Aceite lubricante con poco uso

Para esta prueba se utilizó un aceite lubricante usado, sin partículas notables de residuos sólidos tal como se muestra en la Figura 41. Esto con el fin de ver el funcionamiento del dispositivo al momento de limpiar residuos de aceites de menor densidad.

Figura 39

Viscosímetro capilar con aceite lubricante de poco uso



Nota. Se observa que el aceite se encuentra usado (por su tono oscurecido) y así mismo que hizo contacto con la mayoría de la superficie del instrumento.

Tras un ciclo completo de lavado completo haciendo un uso total de 25 ml de acetona, se observó la eliminación total de los residuos de aceite adheridos al interior de las paredes del viscosímetro capilar (Figura 40). Este resultado confirma que el sistema de limpieza desarrollado cumple con las condiciones necesarias para garantizar instrumentos libres de contaminantes, evitando así interferencias en análisis posteriores.

Figura 40

Viscosímetro capilar con aceite lubricante de poco uso después de un ciclo de lavado



Nota. Se evidencia que tanto el balón como el tubo interno se encuentran completamente limpios.

11 Costos

Para el desarrollo del proyecto es necesario tener en cuenta los gastos presentes, entre ellos se encuentra los costos de materia prima, mano de obra, el desarrollo intelectual y las licencias de software; al realizar la sumatoria de dichos factores se obtiene el valor de la inversión total.

11.1 Costo de la materia prima

Para la fabricación del dispositivo es necesario contar con una inversión inicial para la compra de los elementos requeridos, esto con el fin de contar con una óptima y rápida fabricación. Los materiales para tener en cuenta son los nombrados en la Tabla 8.

Tabla 77*Detalle del presupuesto requerido para la fabricación y pruebas del proyecto de grado*

Descripción	Cantidad	Costo	Total
Ángulo 1/2"	1	\$ 14.280	\$ 14.280
Boquilla Aspersoras INOX	3	\$ 199.017	\$ 597.052
Buje INOX 1/2" a 1/4"	2	\$ 7.300	\$ 14.600
Cable dúplex 2x12	3	\$ 6.300	\$ 18.900
Cheque INOX Vertical 1/2"	1	\$ 52.999	\$ 52.999
Clavija de corriente	1	\$ 5.000	\$ 5.000
Codo INOX 1/4" H-H	1	\$ 10.900	\$ 10.900
Codo INOX 1/4" H-M	2	\$ 6.600	\$ 13.199
Compresor	1	\$ 460.000	\$ 460.000
Lámina Galvanizado C	1	\$ 130.900	\$ 130.900
Macho Prestolock	2	\$ 9.300	\$ 18.600
Manguera AIRE de 12 mm [m]	1	\$ 8.400	\$ 8.400
Niple INOX 1/4" x 15 cm	2	\$ 7.140	\$ 14.280
Niples INOX 1/4" 5 cm	3	\$ 4.760	\$ 14.280
Push-Boton 15 A	1	\$ 13.000	\$ 13.000
Sellante para conexiones 36 ml	1	\$ 16.000	\$ 16.000
TEE INOX Rosca 1/2"	1	\$ 11.000	\$ 11.000
TEE Galvanizada Rosca 1/2"	1	\$ 5.000	\$ 5.000
TEE INOX Rosca 1/4"	4	\$ 6.600	\$ 26.399
Teflón	1	\$ 4.000	\$ 4.000
Tornillos CC Cilin CR PHI JIS 4-0,70 x10	20	\$ 100	\$ 2.000
Tuerca Clase 6 Paso 0,7 4 mm	20	\$ 70	\$ 1.400
Tuerca Universal 1/4" INOX	4	\$ 12.000	\$ 48.000
Válvula bola INOX 2P Fluido 1/4"	1	\$ 31.500	\$ 31.500
Válvula Bola Mini INOX HH 1/4"	3	\$ 61.580	\$ 184.740
Válvula Bola Mini INOX HM 1/4"	1	\$ 55.000	\$ 55.000
Válvula reguladora neumática NSF12	1	\$ 50.000	\$ 50.000
Válvula de alivio	1	\$ 56.700	\$ 56.700
Niple INOX 1/4" x 3 cm	9	\$ 3.800	\$ 34.200
Gancho de seguridad	3	\$ 3.300	\$ 9.900
Arandela	20	\$ 50	\$ 1.000
Tanque de 1l	1	\$ 80.000	\$ 80.000
Cámara de presión	1	\$ 120.000	\$ 120.000
Acetona x 250 ml	4	\$ 42.000	\$ 168.000
Total			\$ 2.291.229

Nota. Se tuvo en cuenta el costo de las piezas remplazadas.

11.2 Costo de la mano de obra

Para la fabricación del dispositivo es necesario realizar trabajos de taller con el fin de garantizar una correcta manufactura. Los procesos a tener en cuenta son los nombrados en la Tabla 8.

Tabla 8

Costo de la mano de obra

Descripción	Horas	Valor unitario	Valor total
Corte laser	0,2	\$ 50.000	\$ 10.000
Taladrado	0,2	\$ 25.000	\$ 5.000
Soldadura	2,0	\$ 10.000	\$ 20.000
Transporte	0,5	\$ 20.000	\$ 10.000
Corte de lámina	0,2	\$ 75.000	\$ 15.000
Corte con pulidora	0,4	\$ 25.000	\$ 10.000
Total			\$ 70.000

Nota. Solo se tuvo en cuenta los costos de mano de obra fuera del taller de la universidad.

11.3 Costo del desarrollo intelectual

Para el diseño y la fabricación del dispositivo es necesario contar con conocimientos técnicos en el área del diseño y Tribología. Los honorarios a tener en cuenta son los nombrados en la Tabla 9.

Tabla 9

Costo del desarrollo intelectual

Descripción	Cantidad	Valor unitario	Valor total
Honorarios del director de proyecto	1	\$ 5.400.000	\$ 5.400.000
Honorarios estudiantes	2	\$ 3.200.000	\$ 6.400.000
Total			\$ 11.800.000

Nota. Los costos asociados a los honorarios son costos por cumplimiento de proyecto, no por hora laborada.

11.4 Costo de las licencias de software

Para el diseño del dispositivo y la escritura del libro es necesario usar programas CAD como lo es el software SolidWorks y programas de la rama Office como lo es Word y Excel. Los costos de las licencias asociadas a estos softwares se evidencian en la Tabla 10.

Tabla 10

Costos de las licencias de software

Descripción	Cantidad	Valor	Valor total
Licencia Office 365	1	\$ 459.999	\$ 459.999
Licencia SolidWorks	1	\$ 15.966.240	\$ 15.966.240
Total			\$ 16.426.239

Nota. La licencia de SolidWorks fue asumida por la universidad.

11.5 Costo total del proyecto de grado

Para el diseño y fabricación del dispositivo de limpieza es necesario tener un presupuesto para comprar elementos, suministros, manufactura, licencias de software. Los costos asociados a todos los factores nombrados se presentan en la Tabla 11.

Tabla 11

Costo total del proyecto de grado

Descripción	Valor total
Costo de elementos de fabricación y pruebas	\$ 2.291.229
Costo de la mano de obra	\$ 70.000
Costo del desarrollo intelectual	\$ 11.800.000
Costo del software	\$ 16.426.239
Total	\$ 30.587.468

Nota. Para esta tabla se tienen en cuenta los valores totales de la tabla 7 “Detalle del presupuesto requerido para la fabricación y pruebas del proyecto de grado”, tabla 8 “Costo de la mano de obra”, tabla 9 “Costo del desarrollo intelectual” y la tabla 10 “Costos de las licencias de software”.

12 Conclusiones

- Las pruebas realizadas con solventes alternativos evidenciaron que aquellos con baja capacidad de diluir sustancias oleosas presentan una eficacia limitada en la remoción de residuos. Por tal motivo, se concluye que los solventes a utilizar deben ser los citados en la norma ASTM D445 Y D446 (como el heptano, octano, nafta ligera y acetona) garantizando así la limpieza de los viscosímetros capilares.
- El uso de solventes no corrosivos reduce los costos de manufactura del dispositivo al ampliar la posibilidad de selección de materiales, evitando la dependencia de materiales químicamente resistentes y permitiendo así alternativas más asequibles.
- El diseño inicial no fue lo suficientemente eficiente dado que se acumulaba solvente en los extremos de la cámara de presión, y al dejar de ingresar aire en el sistema este salía en forma de chorro de las boquillas, por tal motivo, no es recomendable el uso de un diseño como ese.

13 Recomendaciones

Se recomienda que, en caso de que futuros investigadores estén interesados en continuar la línea de desarrollo del dispositivo, se centren en la optimización del diseño de las boquillas específicas para viscosímetros capilares. Esta línea permitiría estudiar parámetros como el ángulo de aspersión, el diámetro de salida y la distribución del flujo, con el fin de mejorar el alcance del solvente a todas las paredes internas del viscosímetro capilar.

Se sugiere evaluar la implementación de un sistema de control automatizado para garantizar el cumplimiento de las normas aquí citadas.

De igual manera se recomienda realizar pruebas con diferentes tipos de solventes, midiendo tiempos y cantidades que permitan una limpieza efectiva y así reducir el costo de uso.

Referencias Bibliográficas

- Cengel, Y. A. (2018). *Fluid Mechanics. Fundamemtals and Applications. Fourth Edition*. Mc Graw Hill.
- Fox, R. W. (2004). *Introduction to Fluid Mechanics. Sixth Edition*. Bogotá: John Wiley & Sons, Inc.
- García Q, J. C. (2008). *RUA Repositorio Universidad de Alicante*. doi:<https://rua.ua.es/dspace/handle/10045/3626>
- Mezger, T. G. (2014). *The Rheology Handbook, 4th Edition*. Hannover, Alemania: Vincentz Network GmbH & Co. Obtenido de <https://dokumen.pub/the-rheology-handbook-for-users-of-rotational-and-oscillatory-rheometers-4th-edition-9783866306509-3866306504.html>
- Noria Latin América. (6 de Jun de 2022). *NORIA MX*. Obtenido de <https://noria.mx/lube-learn/analisis-de-aceite/viscosímetros-una-guia-practica/>
- Popel, A. S. (Jan de 2005). Microcirculation and Hemorheology. *National Library of Medicine. National Center for Biotechnology Information*, 43-69. doi:10.1146/annurev.fluid.37.042604.133933
- Sansone E, B. S. (1980). *Degradation of chemical*. New York. Obtenido de https://catalog.nlm.nih.gov/discovery/fulldisplay/alma995243363406676/01NLM_INST:01NLM_INST
- Schmerber, K. B. (May-June de 2005). ScienceDirect. *Chemical Health and Safety*, 12(3), 30-35. doi:<https://doi.org/10.1016/j.chs.2004.11.014>

Schwing Technologies. (s.f.). <https://www.schwing-technologies.com/es/>. Obtenido de <https://www.schwing-technologies.com/es/limpieza-termica/metodos-de-limpieza>

Stachowiak, G. W. (2013). *Engineering Tribology. Fourth Edition*. United States: Elsevier Inc. doi:chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://api.pageplace.de/preview/DT0400.9780123977762_A23537643/preview-9780123977762_A23537643.pdf

The National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). (September de 2007). *CDC Stacs*. (M. E. Barsan, Productor, & DEPARTMENT OF HEALTH AND HUMAN SERVICES) Obtenido de NIOSH: <https://www.cdc.gov/niosh/npg/default.html>

U.S. Department of Labor. (2012). www.osha.gov. Obtenido de OSHA: <https://www.osha.gov/laws-regs/regulations/standardnumber/1910/1910SubpartG>

UNITED NATIONS. (2011). *Globally Harmonized System of Classification and Labelling of Chemicals (GHS) Fourth revised edition*. New York: United Nations. Obtenido de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://unece.org/DAM/trans/danger/publi/ghs/ghs_rev04/English/ST-SG-AC10-30-Rev4e.pdf

Wazer, J. R. (1964). Viscosity and flow measurement. A laboratory handbook of rheology. *Starch-Biosynthesis Nutrition Biomedical*. doi:<https://doi.org/10.1002/star.19640161109>

Yacuzzi, E. M. (2003). QFD: CONCEPTOS, APLICACIONES Y NUEVOS DESARROLLOS. En N. 2. Serie Documentos de Trabajo. Buenos Aires, Argentina: Universidad del Centro de Estudios Macroeconómicos (UCEMA). Obtenido de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://ucema.edu.ar/publicaciones/downl

oad/documentos/234.pdf#:~:text=El%20despliegue%20de%20la%20funci%C3%B3n%20de%20calidad,sucesivos%2C%20a%20caracter%C3%ADsticas%20t%C3%A9cnicas%20y%20operativas%20s