

Diseño y análisis numérico de una plataforma de 4 bolas para pruebas de lubricación

Design and numerical analysis of a 4-ball platform for lubrication tests

D. I. Cuautle-Lezama ^{a,*}, A. I. Martínez-Pérez ^a, E. E. Vera-Cárdenas ^a, M. Moreno-Ríos ^a
J. C. Mendoza-Mendoza ^a

^a Tecnológico Nacional de México/IT de Pachuca, 42080, Pachuca, Hidalgo México.

Resumen

Una de las principales causas de un desempeño mecánico deficiente en máquinas industriales, es la mala selección y calidad de los lubricantes, esto se deriva a la falta de comprensión de sus propiedades tribológicas. Por esta razón es importante complementar la información fisicoquímica de los lubricantes con los resultados de los ensayos tribológicos impactando directamente a la productividad y la eficiencia de los procesos industriales. Para determinar las propiedades tribológicas de lubricantes, en este trabajo se presenta el diseño conceptual de una plataforma de 4 bolas bajo las especificaciones de la norma ASTM D2266. Se aplicó la metodología de diseño de Nigel Cross, la cual aporta resultados para satisfacer las subfunciones requeridas y objetivos establecidos. El diseño conceptual se validó numéricamente con el software ANSYS, a partir del análisis de esfuerzos y deformaciones del bastidor, la sujeción de la bola y de la celda, manifestando la importancia del material aplicado al sistema para evitar fallas durante la operación.

Palabras Clave:

Metodología de Diseño, QFD, tribómetro, desgaste, lubricantes.

Abstract

One of the main causes of poor mechanical performance in industrial machines is the poor selection and quality of lubricants, this is derived from the lack of understanding of their tribological properties. For this reason, it is important to complement the physicochemical information on lubricants with the results of tribological tests, directly impacting the productivity and efficiency of industrial processes. To determine the tribological properties of lubricants, this paper presents the conceptual design of a 4-ball platform under the specifications of the ASTM D2266 standard. The Nigel Cross design methodology was applied, which provides results to satisfy the required sub-functions and established objectives. The conceptual design was numerically validated with the ANSYS software, based on the analysis of stresses and deformations of the frame, the fastening of the ball and the cell, stating the importance of the material applied to the system to avoid failures during the operation.

Keywords:

Design Methodology, QFD, tribometer, wear, lubricants.

1. Introducción

La Tribología es la ciencia que estudia la lubricación, fricción y desgaste generado entre dos superficies en movimiento relativo (Castillo et al., 2019), los cuales son términos de estudio fundamentales considerados para aumentar significativamente la vida útil de los elementos de máquinas (Patilla et al., 2019) y a su vez, actúan como fuente potencial para economizar recursos. La reducción de la fricción es un reto complicado para los ingenieros, no obstante, cuya solución se puede lograr por medio del estudio de la Tribología (Granizo, 2010), la ciencia que genera nuevas alternativas para lograr un mantenimiento riguroso en elementos mecánicos y máquinas industriales (Hernández et al., 2018).

Sin embargo, en México, la industria automotriz considera la norma NOM-116-SCFI-2018, la cual se enfoca en las propiedades fisicoquímicas de los lubricantes y no incluye pruebas tribológicas

que evalúen sus propiedades mecánicas. (Aguilera et al., 2020), (Castelló et al., 2021). Esta situación ha generado que el 30% de la energía consumida en el mundo, es debido al fenómeno de la fricción de los sistemas mecánicos. En base a este porcentaje, se deriva el 50% del consumo de energía en consecuencia del desgaste en rodamientos debido a una lubricación deficiente (Aguilar et al., 2015). Una alternativa de solución potencial es el tribómetro de cuatro bolas, los cuales, son sistemas que generan información sobre la capacidad de lubricantes o grasas para evaluar su comportamiento en diferentes materiales a través del resultado generado en ensayos sobre la interacción entre las superficies de las esferas ejerciendo una carga. La configuración geométrica de dicha prueba consiste, en una bola de acero normalizada a 12.7 mm ($\frac{1}{2}$ ") de diámetro que gira con carga normal contra otras 3 bolas estacionarias cubiertas con el lubricante a ser examinado.

*Autor para la correspondencia: garcial@uaeh.edu.mx

Correo electrónico: diana_cuautle26@outlook.com (Diana Cuautle-Lezama), armando.mp@pachuca.tecnm.mx (Armando Irvin Martínez-Pérez), edgar.vc@pachuca.tecnm.mx (Edgar Ernesto Vera-Cárdenas), marisa.mr@pachuca.tecnm.mx (Marisa Moreno-Ríos), d9201014@pachuca.tecnm.mx (Jesús Cornelio Mendoza-Mendoza)

Para ello, es necesario la selección de diferentes parámetros operativos o entradas del sistema que contribuyan al tipo de movimiento, geometría de contacto, carga, velocidad, temperatura y duración de la prueba (ASTM internacional, 2015). Los datos de la experimentación obtenidos de las pruebas en el sistema, tales como: la fuerza de fricción, coeficiente de fricción, ruido, vibraciones, diferencia de temperatura y desgaste, son resultados fundamentales para la caracterización de lubricantes y aditivos con nuevas propiedades mecánicas de manera innovadora para ampliar su tiempo de vida útil y resistencia ante diferentes condiciones de operación (Santillán *et al.*, 2019). Según los autores (Figuroa *et al.*, 2009). Las pruebas se dividen en dos clases: No extrema presión (NEP), donde las 4 bolas son sometidas a baja carga durante un periodo largo de tiempo, generando las marcas en los puntos de contacto con lo cual se busca caracterizar al lubricante sometido a la prueba y extrema presión (EP), donde las 4 bolas son sometidas durante periodos cortos de tiempo a elevadas cargas normales incrementando secuencialmente estas últimas hasta alcanzar la ruptura de la película lubricante y originando la soldadura de las 4 bolas. Ambas son regidas por los requerimientos normativos regularizados por la ASTM (American Society for testing Materials) y DIN (Deutsche Industrie Normen) para obtener resultados dentro de un régimen permisible que contribuyan positivamente a la calidad del producto. En la actualidad, se han desarrollado diferentes tipos de las conocidas como máquinas de cuatro bolas con características y capacidades mejoradas. Sin embargo, la más utilizada y ampliamente estandarizada en la industria es la máquina de cuatro bolas de carga fija, que consiste en cuatro bolas que son cargadas con una presión y velocidad específicas en una muestra de lubricante. Después de un período de rotación, se mide el diámetro de desgaste en las bolas, lo que proporciona información sobre la capacidad de carga y el desgaste del lubricante (Antonio Martos, 2020). Se ha utilizado este sistema para evaluar diferentes tipos de lubricantes, incluidos aceites minerales, sintéticos y biodegradables en diferentes condiciones operativas que generan datos valiosos sobre la resistencia al desgaste, así como el coeficiente de lubricación en la mezcla (Albarracín, 2018).

Otro tipo de sistema es la máquina de cuatro bolas de carga variable, la cual es una variante de la máquina de carga fija en la que se puede modificar la magnitud de carga ejercida en las bolas durante la prueba, con la finalidad de obtener información sobre la capacidad y comportamiento del lubricante evaluado. Esto permite simular condiciones más realistas en aplicaciones industriales, donde las cargas aplicadas pueden variar significativamente durante el proceso, así como la velocidad o la temperatura (Figuroa *et al.*, 2009), lo que puede provocar cambios en las propiedades de los lubricantes que afectan el correcto funcionamiento de los equipos mecánicos.

Como ejemplo, la máquina de cuatro bolas MMW-1A es similar a la máquina de prueba multiespecimen FALEX, la cual es ampliamente utilizada como máquina de prueba de inspección de imitación en diseño y desarrollo de aceite hidráulico, aceite de motor de combustión, aceite de engranajes, etc (C. Fennell, 2020).

Por otro lado, la máquina de cuatro bolas Timken, por su parte, es conocida por su capacidad para medir la resistencia al desgaste en diferentes condiciones de carga y temperatura, por sus características se utiliza principalmente para evaluar la capacidad de lubricación de diferentes grasas a altas temperaturas (The Timken Cel disompany, 2015).

Con base a lo anterior, en este trabajo se presenta el diseño aplicando la metodología estructurada de Diseño de Productos de Nigel Cross y análisis numérico de una máquina de cuatro bolas a partir de los requerimientos establecidos en las normas ASTM D2266, ASTM D2596 y ASTM D2783. Con el objetivo de

estudiar el fenómeno de rozamiento y desgaste en nuevos o ya comerciales lubricantes y grasas.

Para validar los elementos que soportarán las cargas requeridas, se realizan los análisis numéricos a través del software especializado ANSYS STUDENT 2023®. Principalmente, se ejecuta el análisis estructural para calcular el factor de diseño, así como los esfuerzos y deformaciones con respecto a los parámetros establecidos en las normas del ensayo correspondiente.

2. Metodología

2.1 Metodología de diseño

El diseño de la máquina de cuatro bolas en este trabajo se ejecutó implementando la metodología de Nigel Cross y se desarrolla en seis etapas: clarificación de objetivos, establecimiento de funciones, fijación de requerimientos, determinación de características, generación de alternativas y evaluación de alternativas. La aplicación de esta metodología incluye el uso de nuevos métodos, técnicas y procedimientos, reflexión sobre la naturaleza y extensión del conocimiento del diseño y su respectiva aplicación a problemas de diseño (Sanmarco, 2020).

2.1.1 Clarificación de objetivos

Debido a que las primeras ideas de diseño son relativamente vagas o mal definidas, en esta primera etapa de la metodología, es necesario clarificar el conjunto de los objetivos de diseño que el sistema debe cumplir, a través del método del diagrama de árbol para interpretar técnicamente los requerimientos del cliente.

En la Figura 1, se muestra la relación de los objetivos de diseño con los objetivos secundarios de diseño.

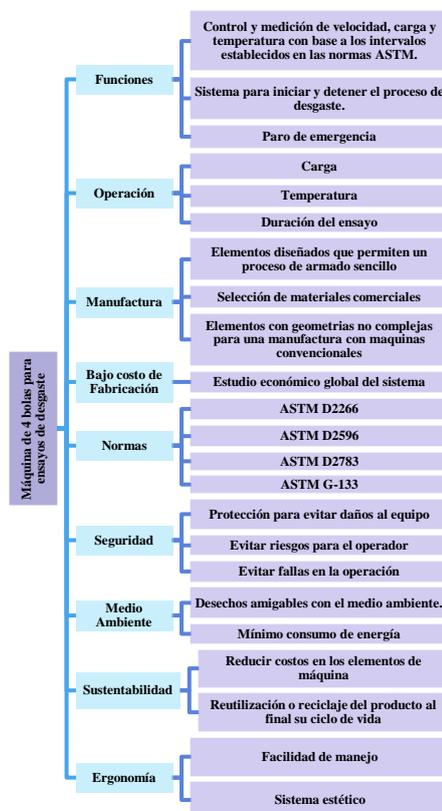


Figura 1: Árbol de objetivos.

2.1.2 Establecimiento de funciones

En esta sección, se utiliza el método de la caja negra la cuál expresa la función general del sistema en términos de la conversión de entradas en salidas como lo muestra la Figura 2.

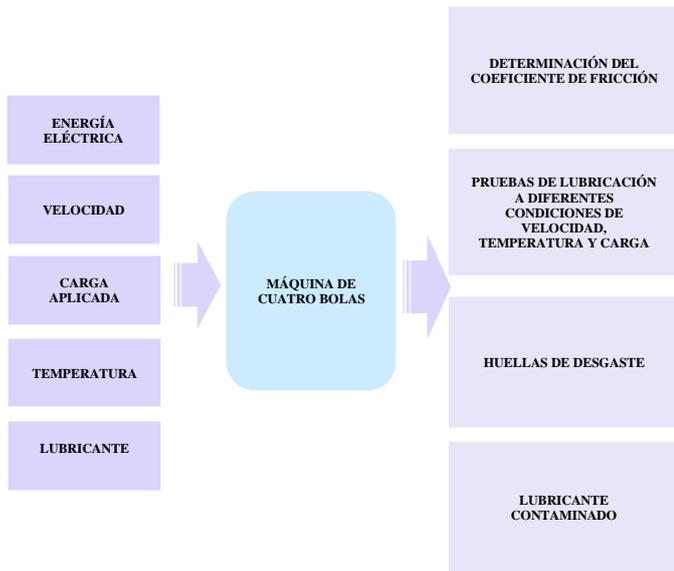


Figura 2. Caja negra.

Por otro lado, se utiliza el método de la caja transparente representada en la Figura 3, la cual se compone de un diagrama de bloques de todas las funciones secundarias agrupándolas en cuadros creando relación entre sus entradas y salidas.

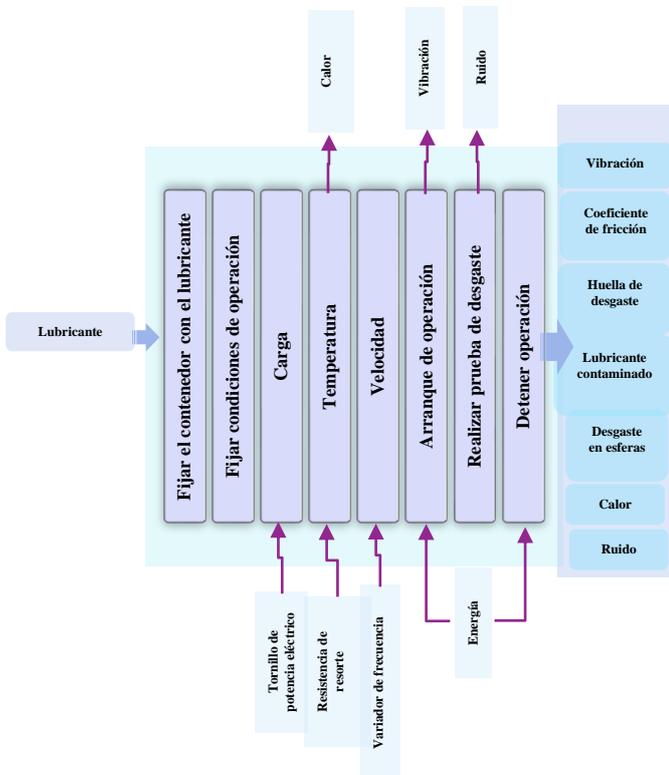


Figura 3. Caja transparente.

2.1.3 Fijación de requerimientos

Siguiendo el proceso de diseño, se establecen las especificaciones y atributos del sistema, indicados en la primera columna de la Tabla 1, los cuáles se clasifican en especificación requerida y especificación deseada, con la finalidad de cumplir los objetivos esperados.

Tabla 1. Fijación de requerimientos

Requerimientos	Especificación requerida	Especificación deseada
Requerimientos de operación		
Velocidad variable de 0-1200 RPM	x	
Carga aplicada 0-400 kg (0-3924 N)	x	
Temperatura de calentamiento desde 25° C a 200° C	x	
Realización de pruebas de lubricación	x	
Requerimientos de manufactura		
Componentes sencillos de manufacturar		X
Selección de materiales comerciales	x	
El diseño integra elementos comerciales		X
Requerimientos normativos		
Calibración de velocidad y carga aplicada	x	
Aplicación de carga de la 4ta bola	x	
Formación del tetraedro por las 4 bolas	x	
Requerimientos eléctricos		
Voltaje de alimentación del sistema a 220 v	x	
Paro de emergencia		X
Requerimientos económicos		
Costo máximo del sistema		X

2.1.4 Determinación de características

En esta etapa, se utiliza el método de despliegue de función de la calidad (QFD), se realiza el análisis de los requerimientos que están escritos en la sección izquierda de la casa de la calidad, y su respectiva relación frente a características de ingeniería de la parte superior, la simbología colocada en la matriz central muestra el grado de relación fuerte, mediana o baja como se ilustra en la Figura 4.

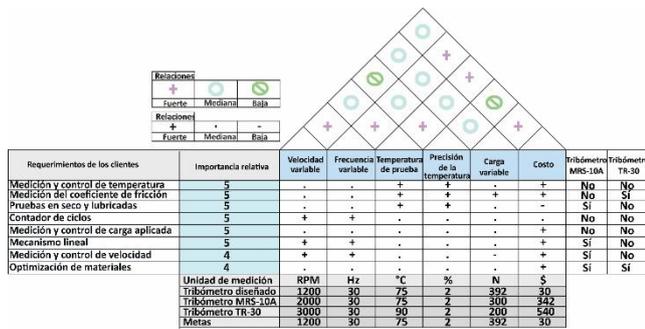


Figura 4. Casa de la Calidad QFD.

2.1.5 Generación de alternativas

En esta sección, la Tabla 2, representa un diagrama morfológico en el cual se consideran las posibles alternativas de solución para las funciones secundarias que se esperan del diseño.

Tabla 2. Generación de alternativas.

Sub- funciones	Opción 1	Opción 2	Opción 3
Fijación esfera	Con tornillo	Con rosca	Tensor
Carga normal variable	Tornillo de potencia eléctrico	Contrapesos	
Temperatura	Resistencias de cartucho	Resistencia de resorte	
Morfología del bastidor	Perfil de aluminio	PTR	
Control de velocidad	Variador de frecuencia		
Contenedor	Cilíndrica	Rectangular sin concavidad	Rectangular con concavidad
Motor eléctrico	CD	CA	

2.1.6 Evaluación de alternativas

Evaluar las alternativas generadas, amplía el criterio mecánico para la selección correcta de elementos en función del peso de los objetivos. La Tabla 3, contiene los resultados obtenidos de la evaluación de alternativas y destaca el mayor porcentaje en las diferentes opciones.

Tabla 3. Evaluación de alternativas.

Fijación de la probeta	Opción 1		Opción 2		Opción 3		
	Peso relativo	Calificación	Valor	Calificación	Valor	Calificación	Valor
Fácil de ensamblar	4	3	12	3	12	5	20
Diseño adaptable	5	4	20	3	15	4	20
Resistencia mecánica	4	3	12	2	8	4	16
Calificación de importancia			44		35		56
Carga normal variable	Peso relativo	Calificación	Valor	Calificación	Valor	Calificación	Valor
Fácil de ensamblar	5	5	25	4	20		
Diseño adaptable	4	5	20	4	16		
Resistencia mecánica	4	5	20	4	16		
Calificación de importancia			65		52		
Morfología del bastidor	Peso relativo	Calificación	Valor	Calificación	Valor	Calificación	Valor

Fácil de ensamblar	4	5	20	5	20		
Diseño adaptable	5	5	25	4	20		
Resistencia mecánica	4	5	20	5	20		
Calificación de importancia			65		60		
Contenedor de aceite	Peso relativo	Calificación	Valor	Calificación	Valor	Calificación	Valor
Fácil de ensamblar	5	2	10	4	20	5	25
Diseño adaptable	5	4	10	3	15	5	25
Resistencia mecánica	5	4	20	4	20	5	25
Calificación de importancia			40		55		75

2.1.7 Validación del diseño conceptual propuesto mediante el análisis del elemento finito

Después de obtener el diseño de la morfología del bastidor, se realiza la validación de elementos que ejercen esfuerzos mediante un análisis numérico considerando los parámetros de carga correspondientes a la norma ASTM D2266 que se muestran en la Tabla 4 y la carga permisible del tornillo de potencia eléctrico, en este caso, es de una tonelada para realizar el análisis de la estructura que incluye el peso de los mecanismos como se muestra en la Figura 5.

A través del módulo “Estático estructural”, se ejecuta el análisis para determinar las fuerzas y deformaciones, así como el factor de seguridad de los elementos de fijación de la probeta y la morfología del bastidor.

Para definir las condiciones de operación en el análisis, se introdujeron los parámetros a aplicar de mayor relevancia, aplicando una carga de 392 N durante 60 segundos a una velocidad de 1200 rpm.

La carga aplicada considera un valor aproximado al peso mismo de la estructura y los elementos que están alojados en ella anexo al valor requerido en la norma ASTM D2266, siendo así el total de 9800N.

3. Resultados

De acuerdo con la Metodología de Nigel Cross, se seleccionan los elementos más convenientes que existen en cada subfunción para tomar una decisión con base a criterios de diseño pertinentes. A partir de las opciones elegidas en la generación de alternativas, se concluye mediante el resumen en la Tabla 4, la cual expresa el conjunto de subfunciones que obtuvieron la calificación más alta y por supuesto, se adaptan a los objetivos establecidos. En base a esto, se propone un diseño conceptual para dar continuidad al diseño a detalle.

Tabla 4. Opciones seleccionadas.

Fijación de la probeta	Alternativas elegidas
Fijación de esferas	Tensor
Carga normal variable	Tornillo de potencia eléctrico
Morfología del bastidor	Perfil de Aluminio 40x80
Contenedor de Lubricante	Cilíndrico con concavidad

3.1 Diseño conceptual

Los resultados preliminares mostrados en la Tabla 4, son representados en la Figura 5, la cual ilustra el diseño conceptual de la máquina de cuatro bolas de manera general, de tal forma que

coincida con todos los requerimientos del cliente. A continuación, se procede a desarrollar el diseño a detalle.



Figura 5. Diseño conceptual de la Máquina de cuatro bolas.

En el diseño conceptual de la Máquina de cuatro bolas se adaptan los mecanismos requeridos que ejecutarán las funciones y especificaciones de las normas ASTM D2266, mencionadas en la Tabla 4, así como las condiciones de operación basadas en la Tabla 5.

Tabla 5: Condiciones de Operación requeridas según la Norma ASTM D2266.

Función	Medida
Temperatura	75 +- 2
Velocidad	1200 rpm
Carga aplicada	392 N (4000 kgf)

3.2 Diseño de elementos principales

3.2.1 Fijación de la cuarta esfera

Para la subfunción correspondiente a la fijación de la probeta, se determina el sistema “tensor” para la fijación y el giro de la cuarta esfera. En este caso se emplea un balero axial y una chumacera que soporta la carga axial aplicada por el tornillo de potencia eléctrico. En la Figura 6, se muestra solo el mecanismo de sujeción de la cuarta bola a través de una rosca que actúa como tensor y permitirá la incrustación fija en la zona cóncava. De esta manera, se asegura que el mecanismo de transmisión rotatoria permita el giro sin tener algún desplazamiento de la esfera que desestabilice el sistema.

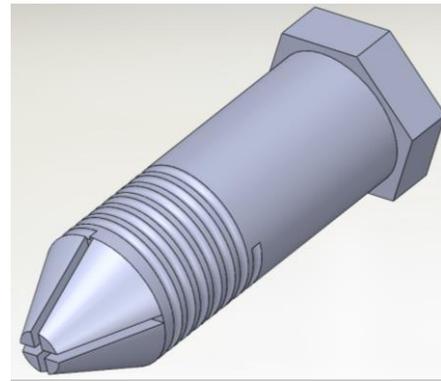


Figura 6. Fijación de la esfera.

3.2.2 Contenedor de Lubricante

Otras especificaciones establecidas en la norma ASTM D2266 con respecto al arreglo tetraédrico de las cuatro bolas se establece que:

- Las 3 bolas deben medir ½ pulgada de diámetro.
- Las 3 bolas inferiores se encuentran en contacto relativo y cubiertas de lubricante.
- Las 3 bolas deben ser sujetadas uniformemente para evitar el desplazamiento.
- La cuarta bola será colocada libremente en la intersección de las otras 3 bolas, libre para girar sobre su propio eje y formando un arreglo tetraédrico.

Por esta razón, es importante fijar con seguridad la geometría tetraédrica de las esferas inferiores. Es necesario que las fuerzas resultantes de las cargas aplicadas tengan dirección hacia el centro para evitar el deslizamiento de las esferas.

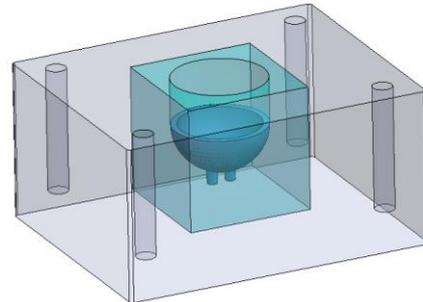


Figura 7. Contenedor de Lubricante cilíndrico con concavidad.

3.2.3 Carga normal variable

Con base a la metodología de diseño, se determinó aplicar la carga normal mediante un mecanismo de tijera, el cual se dibujó en el software SolidWorks como se muestra la Figura 8, debido a su mayor precisión y resistencia ante las cargas establecidas por las normas ASTM D2266 expresadas en la Tabla 5.

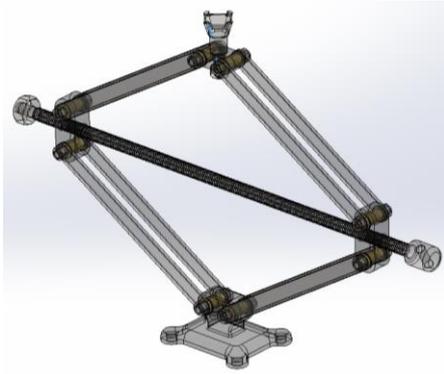


Figura 8. Tornillo de potencia eléctrico.

3.2.4 Morfología del bastidor

El conjunto de mecanismos descritos anteriormente requiere una estructura que soporte los pesos ejercidos de cada elemento integrado en el sistema y las cargas ejercidas por el tornillo de potencia eléctrico. Por esta razón, se elige una estructura considerando el Perfil de Aluminio 40x80 representada en la Figura 9.

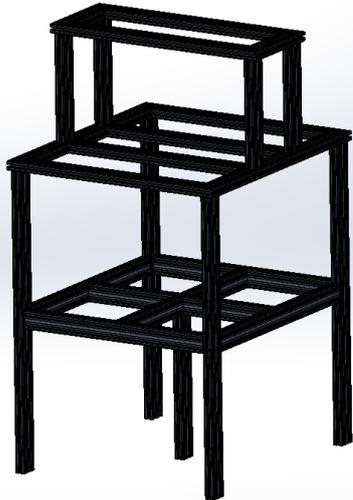


Figura 9. Estructura de Perfil de Aluminio 40x80.

3.3 Análisis numérico para la determinación de esfuerzos y deformaciones en el sistema

3.3.1 Estructura

Tomando en cuenta la carga total aproximada de los elementos que cumplen con las subfunciones requeridas y la carga establecida en la norma ASTM D2266 (Tabla 5) mediante el tornillo de potencia eléctrico se presentan los siguientes resultados del análisis numérico en el software ANSYS STUDENT 2023@.

En la Figura 10, se puede observar que no se presentó ninguna región que excediera los límites del material, en este caso se utiliza el perfil de aluminio 40x80 que corresponde al material de Aluminio EN AW-6063 T66. Según el análisis estático, la deformación máxima que puede sufrir el sistema es de 1.6783mm, en base a esto, se deduce que la estructura soporta sin problema las cargas experimentales que se puedan aplicar durante los ensayos.

A: Static Structural
 Total Deformation
 Type: Total Deformation
 Unit: mm
 Time: 1 s
 23/07/2023 04:18 p. m.

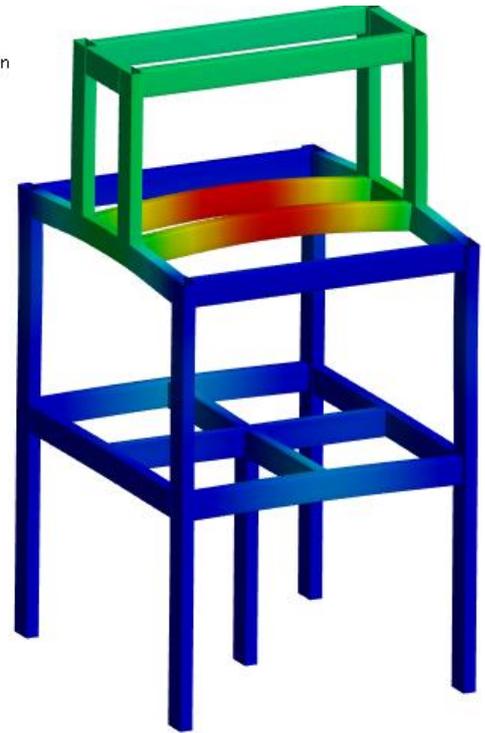
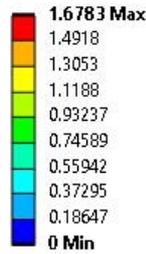


Figura 10. Deformación en la estructura.

Al ejercer la carga de una tonelada equivalente a 9800N incluida la carga aplicada durante la prueba de 392 N (Tabla 5), el análisis de deformación en el sistema obtiene un esfuerzo máximo de 92.498 Mpa (Figura 11) y un factor de seguridad mínimo de 2.8 (Figura 12), los cuales están por debajo del límite de esfuerzo del material que corresponde a 175Mpa, manifestando una buena resistencia mecánica.

A: Static Structural
 Equivalent Stress
 Type: Equivalent (von-Mises) Stress
 Unit: MPa
 Time: 1 s
 23/07/2023 04:09 p. m.

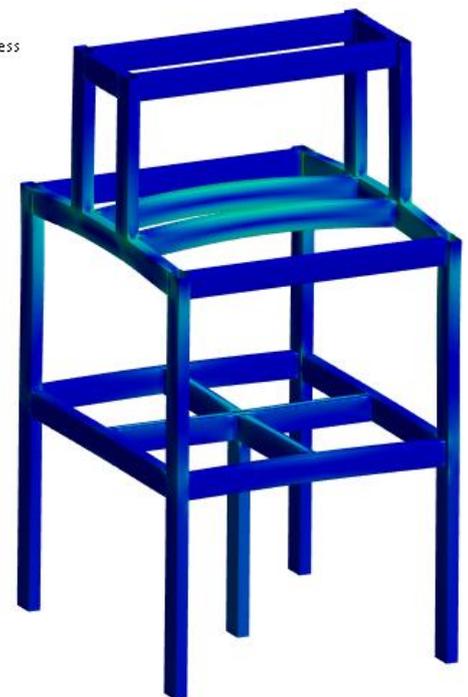
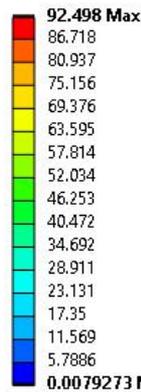


Figura 11. Esfuerzos en la estructura.

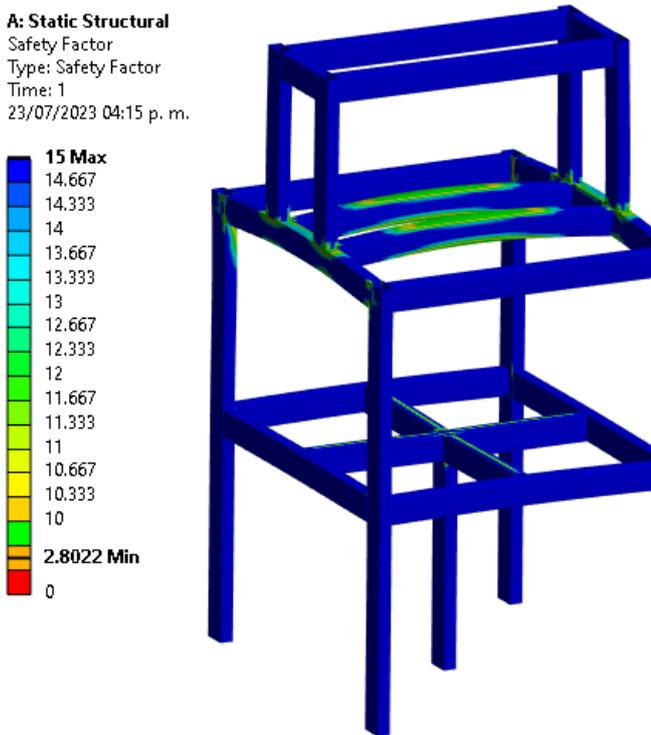


Figura 12. Factor de seguridad de la estructura.

3.3.2 Sujeción de la cuarta esfera

En el análisis de esfuerzos y deformaciones realizado al tensor, que forma parte del conjunto de elementos que conforman la sujeción de la cuarta esfera, se utiliza el material acero AISI 1020.

Se observa en la Figura 13 que la magnitud máxima que se genera bajo las mismas condiciones de carga que los análisis anteriores, presenta una deformación máxima de 2.2275×10^{-5} m y la Figura 14 interpreta un esfuerzo máximo de 8.4706×10^7 Pa. Se fomenta mediante estos resultados del análisis estático que la resistencia ante la fatiga del material utilizado fue de una carga total de una tonelada (9800N). La Figura 15 se obtuvo el factor de seguridad correspondiente a 2.9514, por lo que se asegura que no es probable una falla en este elemento.

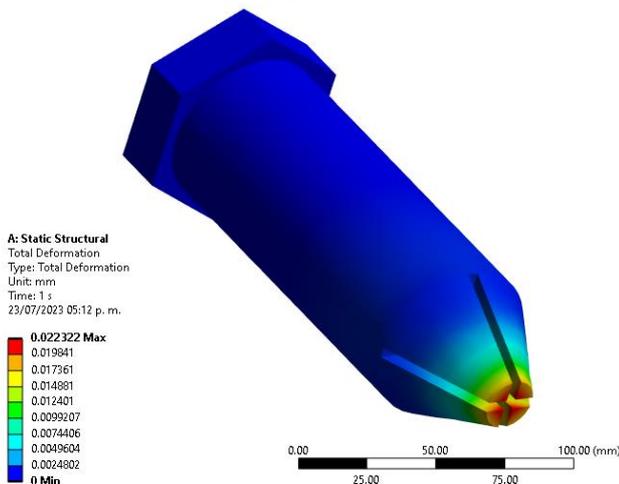


Figura 13. Deformación del fijador de la cuarta esfera.

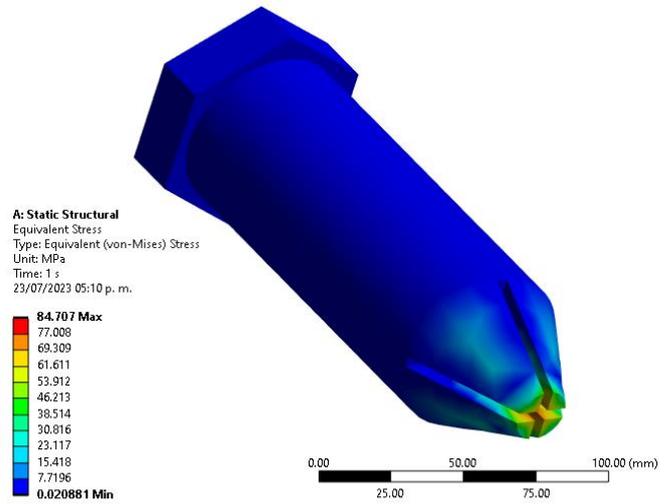


Figura 14. Análisis de esfuerzos del fijador de la cuarta esfera.

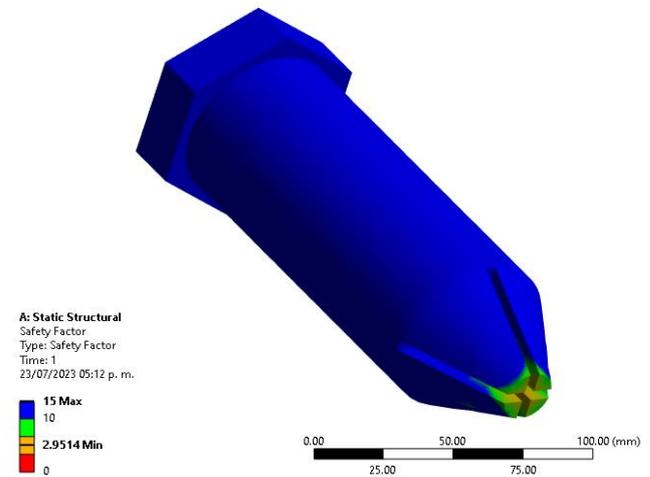


Figura 15. Factor de seguridad del fijador de la cuarta esfera.

4. Conclusiones

La aplicación de la metodología de Nigel Cross genera resultados potenciales para el desarrollo conceptual del sistema en la etapa de diseño. En base a esto, se interpreta de manera clara y ordenada las ideas del cliente ilustradas anteriormente en la Tabla 1. De igual forma, permite la selección de las mejores alternativas que desempeñan de manera óptima las especificaciones requeridas. Los análisis numéricos realizados con el software ANSYS STUDENT 2023®, validan que los requerimientos ingenieriles obtenidos a partir del método QFD, se ven cubiertos en los elementos seleccionados por la caja morfológica y que soportan las condiciones de operación de la máquina cuando se realicen pruebas en los lubricantes.

A partir de los resultados generados de la metodología de diseño, se obtuvo el diseño conceptual con todas las características propias de cada subfunción requeridas por el cliente y por las normas ASTM D2266, D2596 y D2783, así como los análisis numéricos ejercidos mediante el software ANSYS STUDENT 2023®, los resultados obtenidos demuestran una validación satisfactoria del sistema.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado gracias al apoyo del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología, por el recurso otorgado para realizar los estudios de posgrado en el Tecnológico Nacional de México, Campus Pachuca.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

Referencias

- Aguilar, J., Reynoso García, C. A., Nieves Carrillo, J., Chávez, E., Lozano, C., Ramírez, J., . . . Castañeda, E. (2015). Diseño de una máquina tribológica para caracterizar desgaste adhesivo. Vol. 2 No. 3, 114-124. <https://xdoc.mx/documents/diseo-de-una-maquina-tribologica-para-caracterizar-desgaste-5e45af9122f0e>
- Aguilera, D., Santos García, & Moreno, K. (2020). Tribología verde: efecto de los biolubricantes y su impacto ecológico. *Elementos* 117, 9-14. [chromeExtension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://elementos.buap.mx/directus/storage/uploads/00000004200.pdf](https://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://elementos.buap.mx/directus/storage/uploads/00000004200.pdf)
- Albarracín, P. (Septiembre de 2018). tribología y lubricación Dictado a: Servicio Nacional de Aprendizaje-SENA. Obtenido de https://www.academia.edu/37802151/tribolog%C3%8da_y_lubricaci%C3%93N_Dictado_a_Servicio_Nacional_de_Aprendizaje_SENA
- Antonio Martos, J. (2020). Lubricación de equipos y procesos en la industria metalúrgica. <chromeExtension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/http://metalspain.com/LUBRICACION.pdf>
- ASTM D2266. (2015). Standar Test Method for Wear Preventive Characteristics of Lubricating Grease (Four-Ball Method). DOI: 10.1520/D2266-01R15
- C. Fennel, G. (2020). Probador de lubricantes Falex: los cómo, porque y lo que realmente demuestra. Sta. Fe-Argentina.:Dino Pezzetta S. A.
- Castelló Villanueva, J., Tormos Martínez, B., & García Baberá, A. (2021). Evaluación de tres formulaciones diferentes de aceites lubricantes y su impacto en el mantenimiento de una flota de autobuses. Valencia.: Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño. <https://m.riunet.upv.es/handle/10251/166356?show=full>
- Castillo Herrera, W. P., & Toapanta Cunalata, O. G. (2019). Principios de tribología aplicados en la ingeniería mecánica. Chimborazo: Área de Innovación y Desarrollo, S. L. DOI: <http://doi.org/10.17993/IngyTec.2019.57>
- Felipe Hernández, A., & Fernández Castañeda, F. (2018). Diseño de máquina recíproca para ensayos de desgaste por deslizamiento sobre superficie plana. Santa Clara: Facultad de Ingeniería Mecánica e Industrial. <https://library.co/document/q2nkr2jq-diseo-maquina-reciprocante-ensayos-desgaste-deslizamiento-superficie-plana.html>
- Figueroa Guadarrama, M. A., & Vite Torres, M. (2009). Diseño mecánico integral y manufactura de los componentes mecánicos de máquina tribológica de cuatro bolas para ensayos lubricados. D. F.: Escuela Superior de Ingeniería mecánica y eléctrica, Unidad Azcapotzalco. <http://tesis.ipn.mx/handle/123456789/7902>
- Granizo, J. (2010). La Tribología y sus aplicaciones en la industria. *Revista Ciencia Unemi*, vol. 3, núm. 4., 64-71. DOI: <https://doi.org/10.29076/issn.2528-7737vol3iss4.2010pp64-71p>
- Patilla García, M. Á., & Montalván Lozano, R. G. (2019). Influencia del análisis tribológico en el funcionamiento normal del sistema hidráulico del Cowdin180 y Komatsu WA470: Unidad Minera Emproyec-Nazca. Huancayo: Universidad Nacional del centro del Perú, Facultad de ingeniería mecánica. <http://hdl.handle.net/20.500.12894/6676>
- Sanmarco, E. D. (2020). Herramientas tribológicas aplicadas en la prevención del desgaste en equipos industriales. Buenos Aires, Argentina. : Centro de Ingenieros Provincia de Buenos Aires, Argentina. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/109924>
- Santillán Mariño, C. J., Orozco Ramos, J. M., Santillán Mariño, E. R., & García Cabezas, E. F. (2019). Evaluación del coeficiente de fricción y carga de gripado. *3C Tecnología. Glosas de innovación aplicadas a la pyme* 8 (3), 68-83. Doi: <http://dx.doi.org/10.17993/3ctecno/2019.v8n3e31.68-83>
- The Timken Company. (2015). Análisis de daños en los rodamientos Timken y guía de referencia sobre lubricación. <chromeExtension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.timken.com/resources/5892sp-analisis-de-dan%CC%83os-en-rodamientos-timken-y-guia-de-referencia-sobre-lubricacion/>