



**DISEÑO DE UNA HERRAMIENTA PARA LA CALIBRACION DE  
VALVULAS LIMITADORAS DE PRESION PRIMARIAS EN PALAS  
HIDRAULICAS KOMATSU EN LA EMPRESA EL CERREJON EN LA  
GUAJIRA**

***CARLOS ANDRÉS FUENTES SOLANO***

***Código 21131624990***

**Universidad Antonio Nariño**

Programa Ingeniería Mecánica

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Valledupar, Colombia

2022

**DISEÑO DE UNA HERRAMIENTA PARA LA CALIBRACION DE  
VALVULAS LIMITADORAS DE PRESION PRIMARIAS EN PALAS  
HIDRAULICAS KOMATSU EN LA EMPRESA EL CERREJON EN LA  
GUAJIRA**

***CARLOS ANDRÉS FUENTES SOLANO***

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:  
**INGENIERO ELECTROMECHANICO**

Director (a):

*Ingeniera Elcy Patricia Prado fajardo,*

Línea de Investigación:

*Diseño electromecánico*

**Universidad Antonio Nariño**

Programa Ingeniería Mecánica

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Valledupar, Colombia

2022

## NOTA DE ACEPTACIÓN

El trabajo de grado titulado **Diseño de una herramienta para la calibración de válvulas limitadoras de presión primarias en palas hidráulicas Komatsu en la empresa el Cerrejón en La Guajira**, Cumple con los requisitos para optar  
Al título de **Ingeniero Electromecánico**

---

Firma del Tutor

---

Firma Jurado

---

Firma Jurado

Valledupar, 21 de noviembre 2022.

### *Dedicatoria y Agradecimientos*

Agradezco primero que todo a Dios por permitirme culminar mi carrera profesional, infinitas gracias por concederme la dicha de cumplir mi sueño de ser un profesional y poder aportar a esta sociedad el conocimiento adquirido en la universidad. A mis padres Imera Solano, Carlos Augusto Fuentes por inculcarme desde pequeño los valores necesarios para ser una persona de bien, por impulsarme a obtener este logro apoyándome en cada momento.

A mi esposa Solangel Mendieta mi compañera de vida, quien me acompañó durante este proceso siempre con esa dedicación y perseverancia que me impulso a seguir siempre adelante, que en los momentos difíciles me brindo el apoyo para no desistir, y por brindarme esas palabras de aliento que me ayudaron a levantarme y lograr este objetivo.

A mis Hijos Sharon J, María C, Iván D, Martin A. por permitir que parte del descanso en familia se dedicara a los compromisos con la universidad, hoy con el ejemplo les enseñaré que nunca es tarde para cumplir sus sueños que el conocimiento es el mejor regalo que la vida nos puede conceder y provecharlo es la mejor opción.

A mis hermanas Luisa M y Rosa M quienes siempre confiaron en mis capacidades y fueron mi ejemplo de superación.

A mi directora de Tesis a la Ing, Elcy Patricia Prado fajardo por su apoyo y guía para este proyecto.

A la ingeniera Sandra Obando por su apoyo y colaboración a este proyecto

A mis compañeros de trabajo, y colegas Manuel Medina, Edilberto Redondo, Cesar Barrios por siempre tener la disposición de escuchar mis inquietudes y aportar su granito de arena para que este proyecto se diseñara con éxito.

A Komatsu Colombia por brindarme la confianza de liderar a todo un equipo de trabajo, por apoyarme en todos los proyectos ejecutados a lo largo de todos estos años ejecutados en esta compañía, por tener en cuenta mis habilidades y permitirme aportar el conocimiento adquirido para mi crecimiento profesional, por hacerme participe de la mejora continua en los procesos que se ejecutan en la compañía.

¡A todos de Corazón muchas Gracias ¡

## Contenido

	Pág
RESUMEN.....	14
ABSTRACT.....	15
1. INTRODUCCIÓN.....	17
2. ANTECEDENTES.....	19
3. OBJETIVOS.....	21
3.1 Objetivo General.....	21
3.2 Objetivos Especificos.....	21
4. JUSTIFICACION.....	22
5. MARCO TEORICO.....	23
5.1 Pala Hidraulica.....	23
5.1.1 Pala Hidraulica PC 4000 KOMAT'SU.....	24
5.1.2 Sistema Hidraulico.....	26
5.1.3 Lubricacion automatica centralizada.....	27
5.2. Servomotores.....	27
5.2.1 Funcionamiento del servomotor.....	29
5.2.2 Componentes del Servomotor.....	31
5.2.3 Tipos de Servomotores.....	33
5.2.3.1 Servo de rotacion posicional.....	33
5.2.3.2 Servo rotacion Continua.....	33
5.2.3.3 Servo Lineal.....	34

5.4. Ventajas y Desventajas de los Servomotores.....	34
5.4.1 Ventajas.....	34
5.4.2 Desventajas.....	35
5.5. Analizador de vibraciones.....	35
6. DISEÑO METODOLOGICO.....	36
6.1. Etapa de Analisis.....	38
6.2 Planeacion - Calculos Matematicos del Regulador de Valvulas.....	38
6.2.1 Analisis del elemento finito (fea) Serv-adaptador-llave reguladora.....	38
6.2.2 Analisis de reacciones.....	39
6.2.3 Analisis de esfuerzo.....	41
6.2.4 Analisis de momento flector.....	41
6.2.5 Analisis de esfuerzo por cizallamiento.....	42
6.2.6 Analisis de esfuerzo por torsión.....	42
6.2.7 Analisis de deformaciones.....	43
6.2.8 Analisis estructural base del servo-motor.....	44
6.2.8.1 Analisis de esfuerzo- soporte de Servo-motor.....	45
6.2.8.2 Analisis de deformaciones-Soporte Servo-motor.....	45
6.2.8.3 Factor de seguridad- Soporte del servo-motor.....	46
6.2.9 Analisis de esfuerzo Rotula superior.....	47
6.2.9.1 Factor de Seguridad-Rotula superior.....	48
6.2.9.2 Analisis de esfuerzos escualizable.....	48
6.2.9.3 Analisis de deformaciones escualizable superior.....	49
6.2.9.4 Factor de seguridad Escualizable Superior.....	50



6.2.10 Analisis de esfuerzos escualizable inferior.....	51
6.2.10.1 Analisis de deformaciones rotula inferior.....	52
6.2.10.2 Factor de seguridad rotula inferior.....	53
6.2.10.3 Reacciones de la rotula inferior de la base magnetica.....	53
6.2.11 Analisis de esfuerzo de la base magnetica.....	.54
6.2.11.1 Factor de seguridad de la base magnetica.....	.55
6.2.11.2 Desplazamiento en la base magnetica.....	56
6.3. EJECUCION DE LA HERRAMIENTA -DISEÑO.....	57
6.3.1 Pruebas de calibracion de torquimetro.....	57
6.4. DISEÑO DE LAS PARTES DE LA HERRAMIENTA.....	61
6.4.1 Especificaciones tecnicas y caracteristicas del calibrador remoto de valvulas para sistemas hidraulicos.....	67
6.5 ENSAMBLE DE LAS PARTES.....	72
6.5.1 Ecualizacion Inferior.....	72
6.5.2 Ecualizacion Superior.....	72
6.5.3 Ensamble con el servo-motor y montaje de la herramienta de calibracion de valvulas limitadoras de presión en palas PC 4000 Komatsu.....	73
6.6 DISEÑO DE LOS CIRCUITOS-CONTROLADOR DEL SERVO-MOTOR Y CONTROLADOR INALAMBRICO.....	74
6.7 EVALUACION- ANALISIS DE RESULTADOS DE LA HERRAMIENTA..	77
7. CONCLUSIONES.....	79
8. RECOMAENDACIONES.....	81
9. BIBLIOGRAFIA.....	82

## LISTA DE FIGURA

	Pág
RESUMEN.....	13
INTRODUCCIÓN.....	16
<b>5.2 SERVOMOTOR.....</b>	<b>26</b>
<b>5.2.1 FUNCIONAMIENTO DEL SERVOMOTOR .....</b>	<b>28</b>
<b>5.2.2 COMPONENTES DE UN SERVOMOTOR .....</b>	<b>30</b>
<b>5.2.3 TIPOS DE SERVOMOTORES.....</b>	<b>32</b>
<b>5.4 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS SERVOMOTORES.....</b>	<b>33</b>
<b>5.4.2 Desventajas .....</b>	<b>34</b>
[4] Introducing the Adafruit Bluefruit LE UART Friend [Online] available <a href="https://learn.adafruit.com/introducing-the-adafruit-bluefruit-le-uart-friend/introduction">https://learn.adafruit.com/introducing-the-adafruit-bluefruit-le-uart- friend/introduction</a> .....	81

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Calculos del torque Maximo del servo-Motor .....	39
Tabla 2 Prueba de Calibración del Torquimetro en el Bloque Principal .....	57
Tabla 3 Especificaciones Tecnicas y Caracteristicas del calibrador Remoto de Valvula .....	67

## **RESUMEN**

El presente proyecto está enfocado en el mantenimiento remoto de las palas hidráulicas PC4000 de la empresa Komatsu, basado en la seguridad del operador o técnico que realiza los mantenimientos de las palas, por lo cual se ha planteado realizar un diseño que cumpla con este requerimiento para que se logre este objetivo, además esta herramienta ayudará a que los técnicos encargados de realizar la calibración de las válvulas no estén sometidos directamente a tomar riesgos en su integridad por altas presiones que se manejan, exponiendo además su salud y su vida, ya que las presiones que se manejan son extremadamente altas y un error en los cálculos puede ser fatal. La contribución está basada en el mejoramiento de la seguridad del operario, así como en el incremento de la efectividad de los procesos logrando una reducción en tiempo de mantenimiento muy representativa (50%). la metodología implementada está enfocada en cuatro etapas, la primera es la etapa de análisis donde se realiza una recopilación del material a utilizar, la segunda etapa es la planeación, en esta se selecciona el material para trabajar, así como sus componentes, se estable los parámetros para el diseño y escogencia del programa a utilizar para este. En la etapa de ejecución como su nombre lo indica se ejecuta el diseño en el programa escogido y la última etapa es llamada evaluación, donde se realizan las pruebas con el diseño.

**PALABRAS CLAVE:** Calibración, Komatsu, Palas hidráulicas PC 4000, seguridad, Válvulas limitadoras de presión.

## **ABSTRACT**

The present project is focused on the remote maintenance of the PC4000 hydraulic shovels of the Komatsu company, based on the safety of the operator or technician who performs the maintenance of the shovels, for which it has been proposed to carry out a design that complies with this requirement for this objective to be achieved, also this tool will help the technicians for performing the calibration of the valves not to be directly subjected to taking risks in their apparatus due to high pressures that are handled, also exposing their health and life, since that the pressures that are handled are extremely high and an error in the calculations can be fatal. The contribution is based on the improvement of the operator's safety, as well as on the increase in the effectiveness of the processes, achieving a very representative reduction in maintenance time (50%). The implemented methodology is focused on four stages, the first is the analysis stage where a compilation of the material to be used is carried out, the second stage is planning, in which the material to work on is selected, as well as its components, the parameters for the design and choice of the program to use for it. In the execution stage, as its name indicates, the design is executed in the chosen program and the last stage is called evaluation, where the tests are carried out with the design. This project will be carried out in the department of La Guajira in the Cerrejón mine, where the Komatsu company currently has a qualified team to carry out the maintenance of the PC4000 blades.

**KEY WORDS:** Calibration, Komatsu, PC 4000 hydraulic shovels, Pressure, safety,

Valves, Pressure relief valves.

## INTRODUCCIÓN

Las palas hidráulicas se han convertido en un elemento indispensable en la minería, gracias a su alto desempeño en las labores de excavación, descarga y extracción del carbón y de otros minerales, con los cuales se obtiene una excelente producción en tiempos cortos. Son máquinas pesadas de distintos tamaños que se caracterizan por tener un brazo hidráulico que posee una pala en la punta y su desplazamiento es sobre cadenas o ruedas que le permiten andar con mayor facilidad en terrenos de difícil acceso, además pueden girar 360° sobre su eje para facilitar el trabajo a realizar. Las palas hidráulicas se han convertido en una herramienta indispensable en la minería, que ayuda a agilizar los trabajos de una manera eficiente. La empresa Komatsu Limited “es una compañía japonesa que fabrica principalmente maquinaria para la industria de la construcción y de la minería, pero también para el uso militar, industrial, para la prensa, tecnologías láser y módulos termoeléctricos”<sup>1</sup>. Las Palas PC4000 y PC8000, son fabricas por esta empresa y vendidas a sus clientes en las minas de carbón en Colombia, ofreciéndoles además de la venta de la maquina el mantenimiento de estas dándole al cliente la disponibilidad y confianza en el funcionamiento de estas.

Teniendo en cuenta las políticas de la empresa basadas en la seguridad de su personal en el área de mantenimiento de las palas PC 4000 se ha visto la necesidad de Diseñar una herramienta para una tarea específica como lo es calibrar las válvulas limitadoras de presión de manera remota. El objetivo principal es garantizar la seguridad del

personal técnico especializado en estas máquinas para realizar las labores de mantenimiento de estas.

ventana abierta al riesgo de las líneas hidráulicas presurizadas a 350 Bares, este riesgo es eminente a largo tiempo, por la experiencia que han vivido el personal técnico encargado de estos mantenimientos. se ha observado cómo estas líneas hidráulicas han presentado fugas en la pérdida de aceites hidráulicos a presión, afortunadamente no se ha habido personal técnico presente cuando ha sucedido este tipo de eventos presentado, lo cual ha dado la alerta que ha impulsado a la creación de este proyecto para garantizar la seguridad del trabajador. El fabricante de las palas PC 4000 dice en su manual de instrucciones que estas deben calibrarse cuando cumplan tres mil horas (3.000) de funcionamiento, pero por motivos de desgaste interno de los componentes y la vida útil del equipo lo cual hace que la operación de calibración se realice mucho antes de lo especificado, en este caso cuando la maquina ha cumplido MIL (1.000) horas de funcionamiento, esto es una alerta en el funcionamiento de la maquina por lo cual se toman medidas tempranas para realizar maniobras de forma segura y por lo cual se crea el Diseño de una herramienta que a futuro se pueda implementar por parte de la empresa y de cualquier estudiante de la Universidad Antonio Nariño que desee continuar con esta investigación y puesta en marcha implementándola.



## 2. ANTECEDENTES

Las empresas mineras se están viendo obligadas a esforzarse con el fin de ser eficientes en sus procesos de extracción, tratamiento de los minerales en planta, transporte y exportación. En el proceso de extracción se utilizan equipos enfocados en el movimiento de la tierra<sup>1</sup> como lo son las palas PC 4000 de Komatsu, estos son los primeros equipos en la realización de las tareas dentro del desarrollo productivo en la minería del carbón, por lo tanto, se necesita que estas máquinas trabajen de acuerdo con la programación establecida en la mina para lograr alcanzar las metas propuestas en el año en curso.

El mantenimiento de las Palas PC4000 son realizados por técnicos especializados en este tipo de máquinas los cuales están expuestos a las altas temperaturas, altas presiones, al desgrafados de las mangueras de presurización entre otros, los cuales colocan en riesgo la seguridad del trabajador. Cabe resaltar que el objetivo principal de la empresa es garantizar la seguridad de su personal por lo que constante mente realiza controles para verificar la implementación adecuada que debe llevar el técnico encargado para realizar el mantenimiento de las palas, no obstante y a pesar que estos lleven la implementación requerida no los protege un cien por ciento de un accidente o incidente en el área ya que en esta zona se manejan temperaturas demasiado altas que oscilan a más de 60 grados y agregado a eso se manejan las líneas hidráulicas presurizadas a 350 Bares siendo estas un riesgo potencial a la hora de realizar un mantenimiento y que por accidente se desgrafe una de estas líneas.

Actualmente solo han ocurrido incidentes que no han dejado a ningún trabajador lesionado, pero si se ha tenido en cuenta buscar una solución que ayude a que el trabajador no se exponga directamente a realizar el mantenimiento en esta área, por tanto, se busca la posibilidad de hacerlo de manera remota. Ahí surge la necesidad de Diseñar una herramienta para la calibración de las válvulas de manera remota y así evitar el contacto del operador de forma directa en la zona de trabajo.

### 3. OBJETIVOS

#### 3.1. OBJETIVO GENERAL

Diseñar una herramienta para la calibración de válvulas limitadoras de presión primaria en las palas hidráulicas PC4000 de Komatsu, en la empresa el Cerrejón en La Guajira,

#### 3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Calcular la capacidad del servo motor con un torquímetro digital y las vibraciones del sector con la herramienta de diagnóstico para identificar el torque máximo a aplicar con la herramienta donde se instalará el imán.
- Calcular las medidas y dimensiones del brazo electromagnético para calibrar las válvulas con la herramienta de medición en el sector donde se instalará la herramienta.
- Realizar la simulación de calibración en las válvulas limitadoras de presión en las palas PC4000 para ilustrar la funcionalidad de la herramienta mediante el software AutoCAD

#### 4. JUSTIFICACIÓN

Este proyecto se realizará debido a los incidentes como el desgrafado de mangueras, altas temperaturas, altas presiones presentados en el área de trabajo por parte de los operarios (técnicos) de las palas PC4000 y el tiempo requerido para esta labor de forma mecánica que es mayor al esperado por altas temperaturas que se manejan en la zona de trabajo. El enfoque del proyecto está basado en brindar seguridad a los operadores y técnicos encargados ejecutar la calibración de las palas PC4000. Con el fin de resolver los inconvenientes que se han presentados al momento de calibrar las válvulas de manera mecánica, en donde el operador está expuesto al cien por ciento a cualquier accidente que se presente en el área, por tal motivo se realizara un diseño que resuelva la problemática por medio de del programa AUTOCAD y AUTODESK en donde se tendrán en cuenta los niveles de presión de las mangueras y el tiempo de ejecución de la labor. Por lo tanto, se propone realizar un diseño de la herramienta de calibración de válvulas limitadoras de forma remota para ayudar a minimizar el riesgo de accidentalidad al momento de su calibración y así evitar accidentes futuros en donde la vida del operario sea expuesta

## 5. MARCO TEORICO

En este capítulo se dará a conocer en detalle todo lo relacionado con la parte teórica del proyecto que se enfoca en la calibración de válvulas hidráulicas.

### 5.1 PALA HIDRAULICA (<https://spiegato.com/es/que-es-una-pala-hidraulica>)

Una **pala hidráulica** es una herramienta fundamental en la maquinaria de equipo pesado que se impulsada por neumáticos o por orugas, las más utilizada es la impulsada por orugas que se utilizan en la minería para extraer el carbón, aunque también se utiliza en otras minas para la extracción de otros minerales del suelo y cargarlos en enormes camiones para llevarlos a un molino.

La pala hidráulica o también conocida como la azada de oruga o cucharón, apunta hacia adelante en la pluma y excava en el barrido ascendente de la pluma. Esta tiene una pala mirando hacia atrás y excava cuando la pala se arrastra hacia atrás y hacia abajo. Esta se impulsa por uno o más motores diésel ya que utiliza energía hidráulica para cada uno del movimiento que realiza. Estos motores son los que impulsan grandes bombas hidráulicas que empujan el fluido hidráulico hacia los cilindros hidráulicos previstos.

Estas palas son manejadas por un solo operador capacitado en su funcionamiento. Las orugas que la máquina posee están diseñadas solo como un medio para mover la máquina en el sitio de trabajo, de resto la maquina debe ser transportada en un remolque de plataforma con la ayuda de un semirremolque que va tirando de ella, las azadas de

oruga se utilizan para cavar hoyos y las palas hidráulicas son las mejores para extraer minerales y rocas de la ladera de una colina.

Las palas hidráulicas son más utilizadas en la industria de la minería del carbón a cielo abierto la cual se adapta a los métodos operativos de la pala hidráulica. Al extraer el carbón de arriba hacia abajo, se eliminan muchas de las restricciones de tamaño de los equipos. Al permitir el uso de equipos más grandes, se pueden lograr mayores capacidades de trabajo en las mismas horas de trabajo lo cual aumenta la eficiencia y la productiva.

### **5.1.1 PALAS HIDRAULICA PC4000 DE KOMAT'SU**

Estas palas como lo muestra la figura 1 se desplazan por medio de orugas que son indispensables por el terreno en el cual se movilizan dentro de una mina de cielo abierto. Estas máquinas tienen una larga vida útil siempre y cuando se les realice el mantenimiento adecuado en el tiempo preciso, además que los costos de operación son relativamente bajo gracias a su diseño desarrollado en base a la experiencia práctica y análisis de los elementos finitos.

Esta máquina posee un carro inferior el cual posee<sup>2</sup>:

- Rodillos, ruedas tensoras Carro inferior •

- Gran área superficial y un endurecido de precisión de todos los componentes que engranan, reducen el desgaste

**Figura 1** Palas Hidráulicas PC 4000 de Komatsu



Fuente: Tomada de la página oficial [www.komatsulatinamerica.com](http://www.komatsulatinamerica.com)

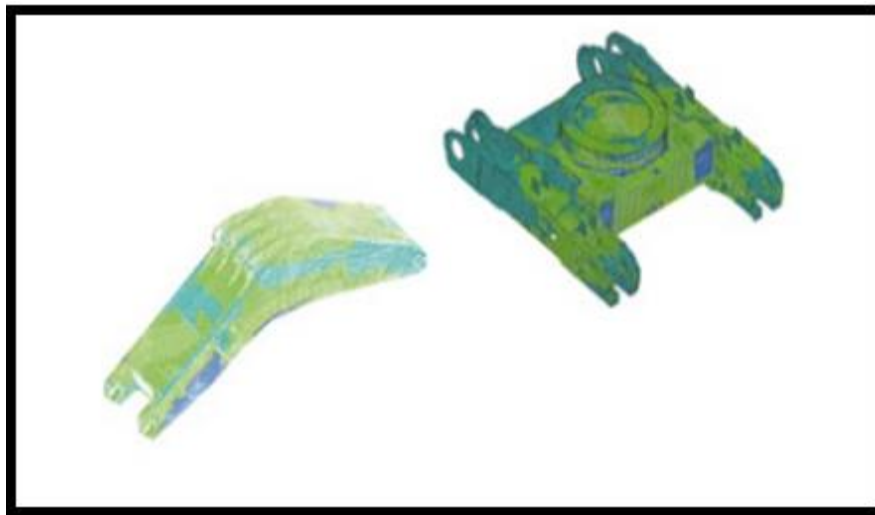
- Orificios de pasadores de zapatas tratados térmicamente y ruedas motrices de gran tamaño

El motor de este tipo de pala posee las siguientes características:

- Versión 1 – Komatsu SDA16V160, categoría de emisiones Tier 1
- Versión 2 – Komatsu SDA16V160E-2, categoría de emisiones Tier 2
- Potencia 1400 kW (1875 HP) a 1800 rpm
- Control electrónico

- Los bajos niveles de emisión de motores cumplen con las normas EPA
- • Sistema de control de aceite; Centinel, suministro de aceite de reserva y sistema de filtros Eliminator

**Figura 2** Orificios de pasadores



Fuente: Tomada de la página oficial [www.komatsulatinamerica.com](http://www.komatsulatinamerica.com)

**5.1.2 SISTEMA HIDRÁULICO<sup>2</sup>** El tren de potencia consiste en un motor principal. Una caja de transmisión, la cual acciona cuatro bombas iguales que succionan aceite hidráulico de un estanque no presurizado. El circuito hidráulico abierto proporciona máxima eficiencia de refrigeración y filtrado. Flujo nominal (salida total) . . . . .  
 . . . . . 1.140 l/min Ajuste de válvula de alivio . . . . .  
 . . . . . 310 bar Tasa de flujo de giro . . . . .  
 . . . . . 1.590 l/min Filtros en línea de alta presión . . . . .



..... 200 micras uno por bomba, ubicados junto a los bloques de válvulas Filtros de flujo completo en línea de retorno (5 elementos) 10 micras en la parte superior del estanque hidráulico.

Filtros de aceite en línea de drenaje ..... 3 micras

El sistema de cuatro circuitos consta de un regulador limitador de carga con suministro total de aceite para los circuitos de trabajo e incorpora un control de corte de presión. El piloto hidráulico prioriza el flujo hidráulico dando una respuesta hidráulica suave, un sistema hidráulico simple y un reducido número de componentes. Es sistema hidráulico incluye enfriadores aire-aceite verticales, abatibles de gran tamaño con ventiladores accionados hidráulicamente para la regulación de temperatura.

**5.1.3 LUBRICACIÓN AUTOMÁTICA CENTRALIZADA<sup>2</sup>** Dos sistemas automáticos de lubricación Lincoln de una sola línea y accionados hidráulicamente son proporcionados como estándar, complementados con control de tiempo y volumen variable. El sistema central de lubricación de grasa es suministrado por un barril rellenable de 200 litros. Un segundo sistema idéntico al anterior suministra lubricante para los dientes de la corona de giro a través del piñón de lubricación. Los contenedores se rellenan a través de los conectores de Wiggins del brazo de mantenimiento.

## **5.2 SERVOMOTOR**

Un servomotor es un actuador rotativo o motor que permite un control preciso en términos de posición angular, aceleración y velocidad, capacidades que un motor

normal no tiene. El servomotor utiliza un motor normal y lo combina con un sensor para la retroalimentación de posición.

Los servomotores son una combinación de piezas específicas, que incluyen un motor de corriente continua o alterna, y son adecuados para su uso en un sistema de control de bucle cerrado.

Por lo que una definición más exacta de un servomotor sería la de un servomecanismo de bucle cerrado que utiliza la retroalimentación de posición para controlar su posición y su velocidad de rotación. La señal de control es la entrada, ya sea analógica o digital, que representa el comando de posición final para el eje.

Por otro lado, el codificador o encoder sirve como sensor, proporcionando retroalimentación de velocidad y posición. En la mayoría de los casos, sólo se basa en la posición. La posición final se avisa al controlador y se compara con la entrada de posición inicial, y luego, si hay alguna anomalía, se mueve el motor para llegar a la posición correcta.

Hay varios tipos de servomotores como los que utilizan motores de corriente continua y detección de posiciones a través de un potenciómetro y también utilizan un control de gran potencia, lo que significa que el motor se mueve a la velocidad máxima hasta que se detiene en la posición designada.

En cambio, los servos para uso industrial disponen de sensores de posición y velocidad, así como de algoritmos de control proporcional-integral-derivativo, lo que permite llevar el motor a su posición de forma rápida.

Este tipo de dispositivos están disponibles en una gran variedad, formas y tamaños. El término servo fue utilizado por primera vez en 1859 por Joseph Facort, que implementó un mecanismo de retroalimentación para ayudar a controlar los timones de un barco con vapor.

### **5.2.1 FUNCIONAMIENTO DEL SERVOMOTOR**

Los servomotores se controlan enviando un pulso eléctrico de ancho variable, o modulación de ancho de pulso (PWM), a través del cable de control. Hay un pulso mínimo, un pulso máximo y una frecuencia de repetición.

Por lo general, un servomotor sólo puede girar  $90^\circ$  en cualquier dirección para un movimiento total de  $180^\circ$ . La posición neutra del motor se define como la posición en la que el servo tiene la misma cantidad de rotación potencial tanto en el sentido de las agujas del reloj como en el sentido contrario.

El PWM enviado al motor determina la posición del eje, y se basa en la duración del pulso enviado a través del cable de control; el rotor girará a la posición deseada.

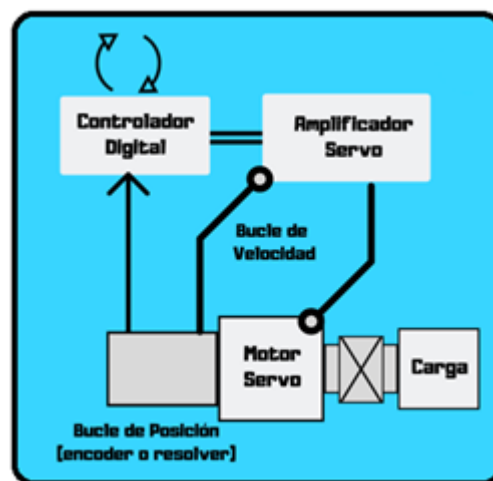
El servomotor espera ver un pulso cada 20 milisegundos (ms) y la longitud del pulso determinará hasta dónde gira el motor. Por ejemplo, un pulso de 1.5ms hará que el motor gire a la posición de  $90^\circ$ .

Si el tiempo es inferior a 1,5 ms, se mueve en sentido contrario a las agujas del reloj hacia la posición de 0°, y si el tiempo es superior a 1,5 ms, el servo girará en sentido de las agujas del reloj hacia la posición de 180°.

Cuando se les ordena a los servos que se muevan, estos se moverán a la posición y mantendrán esa posición. Si una fuerza externa empuja contra el servo mientras el servo mantiene una posición, el servo se resistirá a salir de esa posición.

La cantidad máxima de fuerza que puede ejercer el servo se denomina par de torsión del servo. Sin embargo, los servos no mantendrán su posición para siempre; el pulso de posición debe repetirse para indicar al servo que se mantenga en posición.

**Figura 3** Diagrama Básico del funcionamiento de un Servomotor



Fuente: (<https://www.cursosaula21.com/que-es-un-servomotor/>)

### 5.2.2 COMPONENTES DE UN SERVOMOTOR

Los servos incluyen tres componentes principales: un motor, un variador o amplificador y un mecanismo de retroalimentación. También se incluye una fuente de alimentación y un servo controlador capaz de controlar un solo eje o coordinar el movimiento de varios ejes, dependiendo el caso para lo que se requiera.

Los servomotores pueden ser de dos tipos:

- De Corriente Alterna (CA)
- De corriente Continua (CC)

Siendo los servomotores CA los más adecuados para los proyectos de velocidad constante y los servomotores CC para los de velocidad variable.

La retroalimentación es proporcionada normalmente por un codificador o encoder -ya sea interno o externo al motor- dependiendo para lo que se necesiten. En aplicaciones que requieren un posicionamiento muy preciso, se pueden utilizar dos dispositivos de retroalimentación: uno en el motor para verificar el rendimiento del motor y otro en la carga para verificar la posición real de la carga.

Un servo accionamiento amplifica la señal de un controlador maestro proporcionando la suficiente corriente (potencia) al motor para generar velocidad y

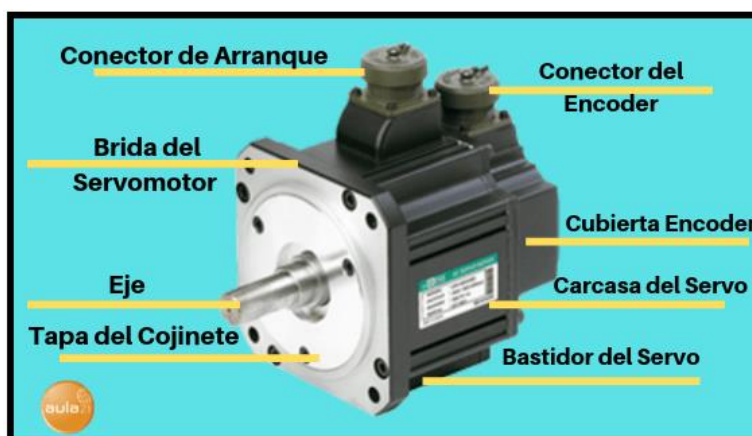
producir par. En un motor rotativo, la corriente es proporcional al par, por lo que el servomotor controla directamente el par producido por el motor.

Del mismo modo, en un motor lineal, la corriente es proporcional a la fuerza, por lo que el accionamiento controla la fuerza producida por el motor.

El **servo controlador** (también conocido como controlador de movimiento) puede ser considerado como el cerebro del sistema del servomotor. Aquí es donde reside el perfil de movimiento, incluyendo la aceleración, velocidad y deceleración deseadas.

El controlador envía señales al convertidor, lo que hace que el motor ejecute el movimiento deseado. También tiene la importante tarea de cerrar el bucle en el sistema leyendo la retroalimentación del encoder y modificando la señal al motor (a través del convertidor) para corregir cualquier error en la posición real frente a la deseada, velocidad o par.

**Figura 4** Partes de un Servomotor



Fuente: <https://ssdielect.com/robotica/3176-spt5435lv-35kg-360-1.html>

### 5.2.3 TIPOS DE SERVOMOTORES

Los servos vienen en muchos tamaños y en tres tipos básicos:

- Rotación posicional.
- Rotación continua
- Rotación lineal.

**5.2.3.1 Servo de rotación posicional:** Este es el tipo más común de servomotor.

El eje de salida gira aproximadamente la mitad de un círculo, o 180 grados. Tiene topes físicos colocados en el mecanismo de engranaje para evitar que se gire más allá de estos límites para proteger el sensor de rotación.

Estos servos comunes se encuentran en coches y aviones con control remoto de agua, juguetes, robots y muchas otras aplicaciones.

**5.2.3.2 Servo de rotación continua:** Este tipo es muy similar al servomotor de rotación posicional común, excepto que puede girar en cualquier dirección indefinidamente. La señal de control, en lugar de ajustar la posición estática del servo, se interpreta como la dirección y la velocidad de rotación.

El rango de posibles comandos hace que el servo gire en el sentido de las agujas del reloj o en sentido contrario a las agujas del reloj según se desee, a una velocidad

variable, dependiendo de la señal de comando. Este tipo de servo se puede utilizar en un plato de radar si se monta en un robot. O se puede utilizar como motor de accionamiento en un robot móvil. Este tipo de servomotor es el que se utilizara en este proyecto por sus especificaciones las cuales se ajustan a los parámetros del diseño.

**5.2.3.3 Servo Lineal:** Es similar al servomotor de rotación posicional descrito anteriormente, pero con engranajes adicionales (normalmente un mecanismo de cremallera y piñón) para cambiar la salida de circular a vaivén. Estos servos no son fáciles de encontrar, pero a veces se pueden encontrar en tiendas de modelismo donde se utilizan como actuadores en aviones de modelos más grandes.

## **5.4 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS SERVOMOTORES.**

Los servomotores ofrecen bastantes ventajas, pero como todas las cosas, también plantean algunos problemas y dificultades a las empresas que utilizan este dispositivo.

### **5.4.1 Ventajas**

Si se coloca una carga pesada en el motor, el conductor aumentará la corriente en la bobina del motor mientras intenta girar el motor. Básicamente, no hay ninguna condición fuera de los pasos.

- El funcionamiento a alta velocidad es posible.



- Son siempre constantes y trabajan al mismo ritmo.

#### **5.4.2 Desventajas**

- Dado que el servomotor trata de girar de acuerdo con los pulsos de mando, no es adecuado para el control de precisión de la rotación.
- Suelen tener un coste elevado en cuanto a mantenimiento y funcionamiento.
- Cuando está parado, el rotor del motor continúa moviéndose hacia adelante y hacia atrás con un pulso, por lo que no es adecuado si necesita evitar la vibración.

### **5.5 ANALIZADOR DE VIBRACIONES**

El analizador de vibraciones Machinery Health Analyzer AMS 2140, es el dispositivo electrónico utilizado para medir las vibraciones de las válvulas limitadoras de presión y determinar qué tan altas o bajas están estas vibraciones y lograr un equilibrio en la operación de la máquina. Este dispositivo está encargado de llevar los datos de las vibraciones que se dan en la máquina y las mediciones de análisis para tener un mejor funcionamiento. Además, cuenta con la recolección simultánea de datos en sus cuatro canales, detección de picos los cuales ayudan a evitar la degradación de los y la caja de engranajes. también ofrece una recolección de datos rápida y precisa en un menor tiempo en el campo, el AMS 2140 está diseñado ergonómicamente para una operación cómoda con una sola mano durante todo el día.

## 6. DISEÑO METODOLOGICO

Este proyecto de ingeniería está basado en la investigación Aplicada y está enfocado a la seguridad del trabajador en el área de trabajo. La metodología está estructurada por etapas; la etapa de análisis, planeación, ejecución y evaluación del proyecto, con las cuales se realizó de una manera sencilla y adecuada la ejecución y evaluación cumpliendo con los objetivos propuestos.

### **Etapas 1: Análisis y recolección de la información.**

- Esta etapa se realizó la búsqueda detallada de la información de todo lo que se necesita para la planeación y ejecución del proyecto, se consultó sobre las palas PC4000, su utilización y los casos existentes para la realización de este tipo de herramientas y su impacto en las diferentes empresas donde se hayan implementado.

### **Etapas 2: Planeación- componentes a utilizar y cálculos matemáticos de estos.**

- En esta etapa se seleccionaron los componentes a utilizar como referencia para el diseño y toma de medidas de estos.
- Se realizaron los cálculos del sistema hidráulico y del servomotor para su acople en la herramienta.
- Se realizó el diseño de las partes de la herramienta, teniendo en cuenta las medidas reales de cada componente con el fin de que a futuro se implemente y se haga más fácil su montaje.
- Se escogió el programa de simulación de un software de proyección 3D

AutoCAD DWG Launcher, para la herramienta en tiempo real. Las especificaciones técnicas de los programas utilizados son:

- **Nombre Comercial:** 2018
  - **Versión:** 22.0. Educativa.
  - **Formato:** DWG.
  - **Empresa:** Autodesk-España.
  - **Programa:** AutoCAD DWG Launcher.
  - **Espacio de dibujo:** Modelo.
- 
- **Nombre Comercial:** 2022
  - **Versión:** Profesional.
  - **Formato:** DWG.
  - **Empresa:** Autodesk
  - **Programa:** Autodesk.
  - **Espacio de dibujo:** Modelo.

### **Etapas 3: Ejecución de la calibración de las válvulas limitadoras de presión primarias**

- Se diseñó la estructura de la herramienta
- Se realizó la simulación con el programa de simulación de software 3D AutoCAD DWG Launcher, en el cual se muestra un gráfico detallado que simula el funcionamiento de la herramienta de calibración de válvulas y como esta realiza el proceso de calibración en la simulación, además el software

permitió ver falencias que no se habían tenido en cuenta y se lograron corregir gracias a la simulación y estabilizar la herramienta con cálculos más precisos, con el fin de que a futuro sea implementada y sea más fácil su montaje y su funcionamiento y operación por medio del técnico o los técnicos encargados.

#### **Etapa 4: Evaluación de la calibración de las válvulas limitadoras de presión primarias**

- Pruebas de la simulación de la herramienta en funcionamiento, en tiempo real

En esta etapa se ejecutaron las pruebas con el montaje de la herramienta en el software de proyección 3D, en donde se ve estructurada la herramienta de calibración de las válvulas primarias con todas sus partes simulando el funcionamiento y operación de esta.

#### **6.1. ETAPA DE ANALISIS**

En esta etapa de recopilación de la información y análisis del material obtenido se ha realizado una descripción detallada de cada uno de los componentes a utilizar para el diseño de la herramienta. Esta etapa se discrimina en el Marco Teórico en el cual se explica cada uno de los elementos a utilizar en este proyecto.

#### **6.2. PLANEACION- CALCULOS MATEMATICOS DEL REGULADOR DE VALVULAS**

##### **6.2.1. Análisis de elemento finito (fea): servo-adaptador-llave reguladora**

El análisis previsto pretende diagnosticar el comportamiento estructural de la llave

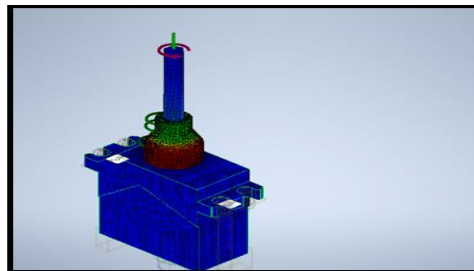
reguladora de la válvula primaria al momento de accionar el servo. Según las especificaciones del fabricante se conoce que el servo brinda un torque máximo de 27.775 lb\*in, así mismo se realizaron las mediciones a la válvula donde el torque mínimo de accionamiento es de 5 lb\*in, por tanto, estos momentos estarán actuando al inicio y final del sistema. por otra parte, se tiene en cuenta el peso propio de la llave el cual se toma acorde al modelado realizado en el software. El análisis se presenta a continuación:

**Tabla 1** Cálculos del Torque máximo del Servomotor

$T_{servo} := 27.775 \text{ lbf} \cdot \text{in} = 3138.154 \text{ N} \cdot \text{mm}$	Torque máximo del Servo-motor
$T_{valve} := 5 \text{ lbf} \cdot \text{in} = 564.924 \text{ N} \cdot \text{mm}$	Torque mínimo de apriete de la válvula
$m_{llave} := 0.007 \text{ kg}$	Masa de la llave Allen #6
$w_{llave} := m_{llave} \cdot g = 0.069 \text{ N}$	Peso de la llave Allen #6
$L_{llave} := 100 \text{ mm}$	Longitud mínima de la llave

## 6.2.2 Analisis de Reacciones:

**Figura 5** Análisis de reacciones

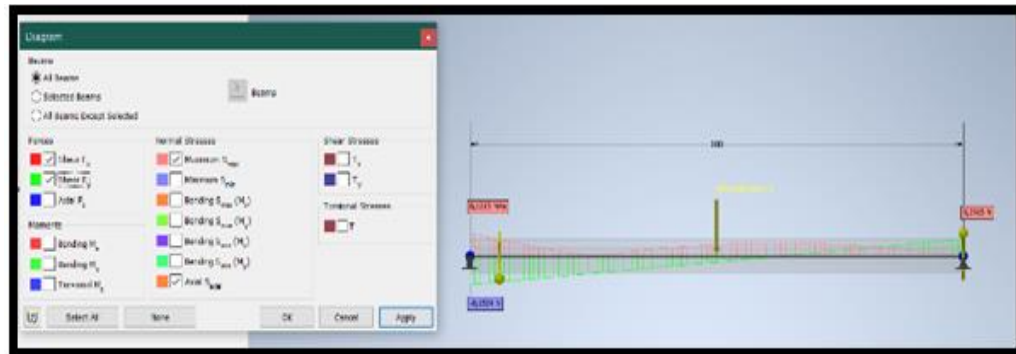


Fuente: Modelo realizado en el software AUTODESK

Las Reacciones generadas por condiciones de Articulación se concentran en la base del

adaptador-llave y la conexión válvula-llave con valores mostrados a continuación:

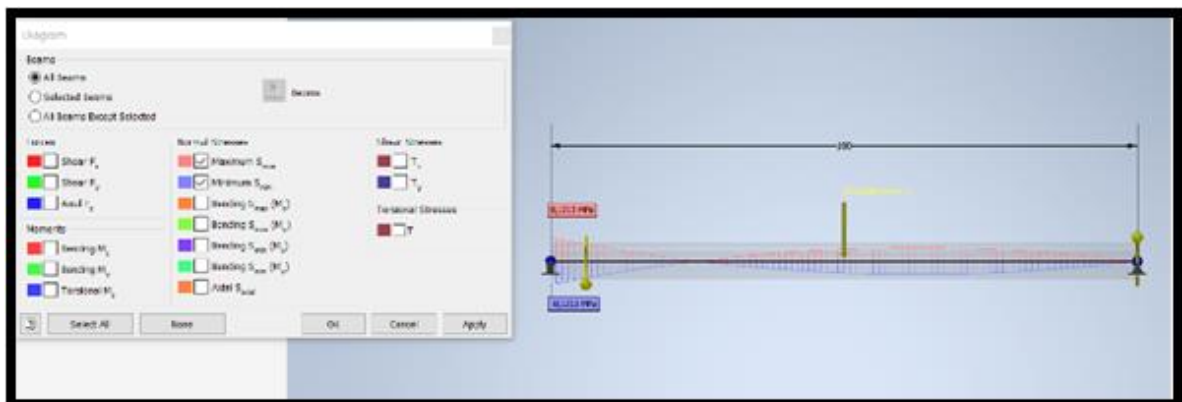
**Figura 6** Valores de Análisis de Reacciones



Fuente: Modelo realizado en el software AUTODESK

**6.2.3 Análisis de esfuerzos:** Los esfuerzos máximos se concentran en la zona de conexión entre el adaptador y la llave debido a las presiones de contacto entre ambas piezas cuando se genera la reacción de par de apriete de la válvula primaria con la llave Allen hexagonal #6. El siguiente diagrama muestra los valores correspondientes:

**Figura 7** Análisis de esfuerzos



Fuente: Modelo realizado en el software AUTODESK

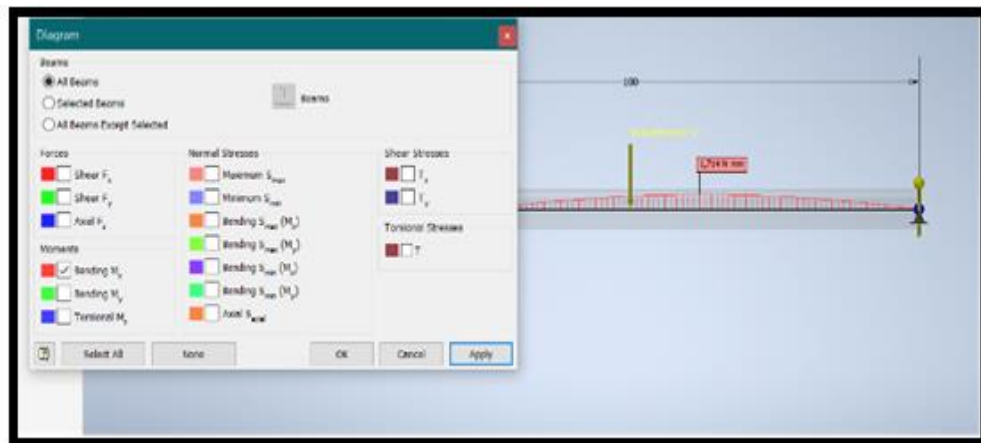
**6.2.4. Analisis de momento flector:** Por su parte el momento máximo de la pieza calcula mediante la siguiente expresión:

$$M_{max} := \frac{w_{llave} \cdot L_{llave}}{4} = 1.716 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

Momento Máximo de la llave

El cual puede verse reflejado en el cálculo a través de elementos finitos, con un error del valor simulado de 0.116% con respecto al valor calculado mediante la formulación matemática:

**Figura 8** Análisis momento flector

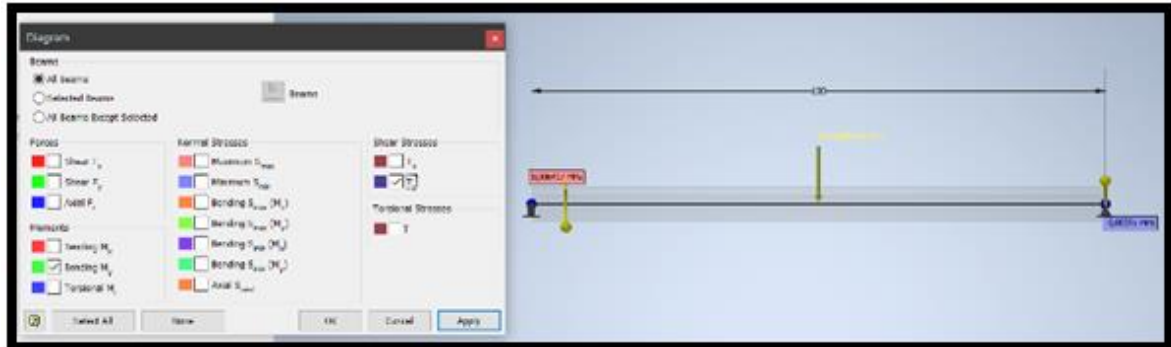


Fuente: Modelo realizado en el software AUTODESK

### 6.2.5. Analisis esfuerzos por cizallamiento

Los esfuerzos por cizallamiento en la dirección de aplicación del torque se muestran a continuación:

**Figura 9** Análisis de esfuerzo por cizallamiento



Fuente: Modelo realizado en el software AUTODESK

### 6.2.6. Analisis esfuerzos por torsión

El esfuerzo torsional máximo generalmente se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\tau_{max} = \frac{T \cdot r}{I_p}$$

Ecuación de esfuerzos por torsión

$$r := 3 \text{ mm}$$

Radio equivalente de la llave

$$T_i := 2573 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

Momento de torsión en la base de la llave

$$T_v := 565 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

Momento de torsión articulación llave-válvula

$$I_p := 159.623 \text{ mm}^4$$

Momento polar de inercia

$$\tau_{max} := \frac{T_i \cdot r}{I_p} = 48.358 \text{ MPa}$$

Esfuerzo máximo de torsión base de la llave

$$\tau_{max} := \frac{T_v \cdot r}{I_p} = 10.619 \text{ MPa}$$

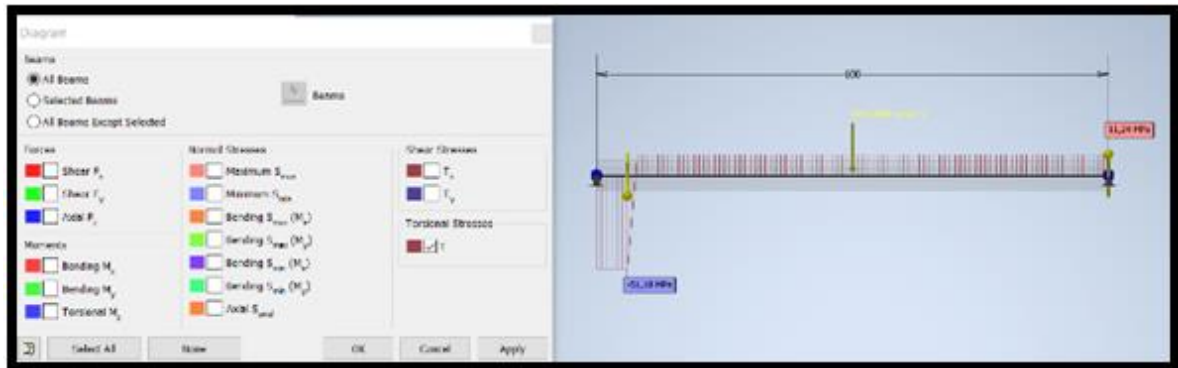
Esfuerzo máximo de torsión articulación llave-válvula

Dichos valores calculados pueden validarse a través de la simulación, los cuales se



muestran a continuación:

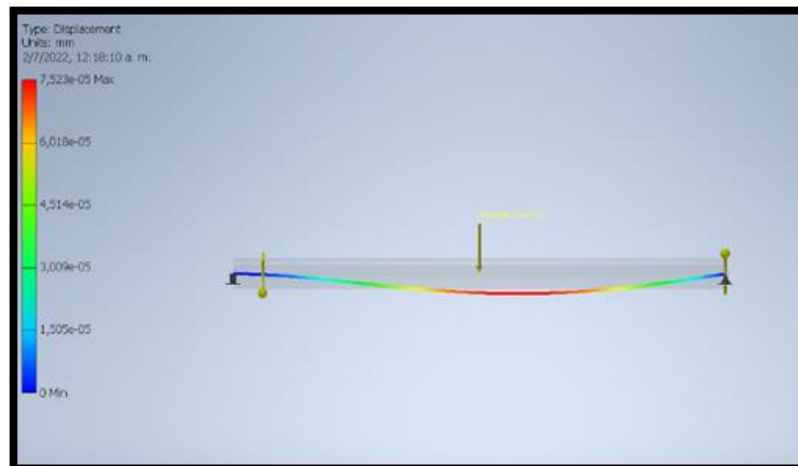
**Figura 10** análisis de esfuerzo por torsión



Fuente: Modelo realizado en el software AUTODESK

**6.2.7 Análisis de deformaciones:** las deformaciones presentadas en la aplicación del torque se muestran a continuación:

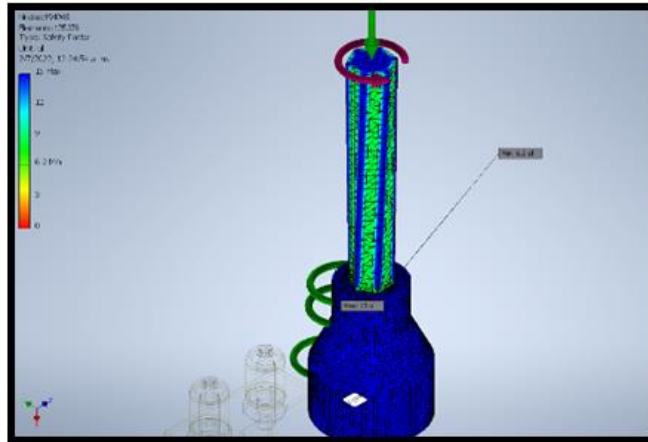
**Figura 11** Análisis de deformaciones en la aplicación del Torque



Fuente: Modelo realizado en el software AUTODESK

El factor de seguridad mínimo de la pieza a la aplicación de las cargas asociadas es de aproximadamente 6.2 ul, lo cual cumple con los criterios de análisis. los resultados se muestran a continuación:

Figura 12 análisis de esfuerzo por torsión



**6.2.8. Análisis estructural base del servomotor:** el análisis se realizó a través de elemento finito teniendo en cuenta las reacciones asociadas a la llave y adaptador, así

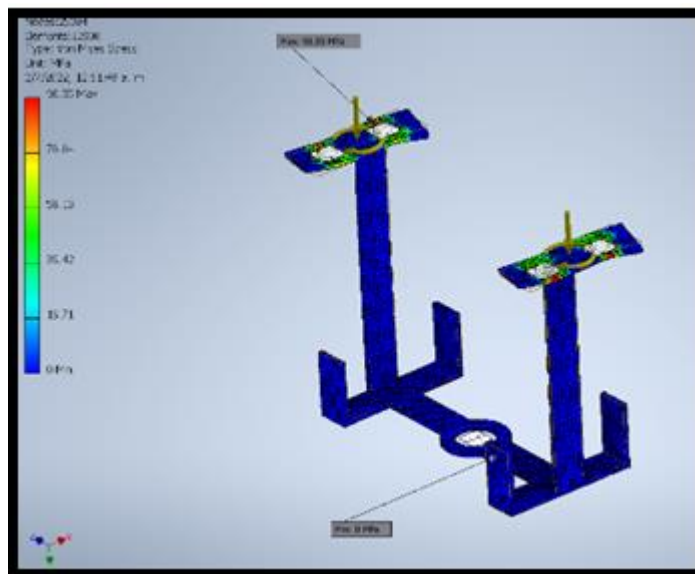
Fuente: Modelo realizado en el software AUTODESK

como también las condiciones de peso propio de cada elemento:

$M_{servo} := 58 \text{ gm}$	Masa del servomotor según fabricante
$M_{adaptador} := 0.021 \text{ kg}$	Masa del adaptador
$m_{llave} = 0.007 \text{ kg}$	Masa de la llave de Allen #6
$m_{soporte} := 0.006 \text{ kg}$	Masa del soporte galvanizado cal. 22
$w_{servo} := M_{servo} \cdot g = 0.569 \text{ N}$	Peso del servo
$w_{adaptador} := M_{adaptador} \cdot g = 0.206 \text{ N}$	Peso del adaptador
$w_{llave} = 0.069 \text{ N}$	Peso de la llave Allen #6
$w_{soporte} := m_{soporte} \cdot g = 0.059 \text{ N}$	Peso del soporte galv. calibre 22
$R_{servo} := 0.152 \text{ N}$	Reacciones en la unión Servo-adaptador
$M_{servo} := T_i = 2573 \text{ N} \cdot \text{mm}$	Momento actuante en el plano de la base
$Q_{total} := w_{servo} + w_{adaptador} + w_{llave} + R_{servo} = 0.995 \text{ N}$	Fuerza total actuante

**6.2.8.1 Análisis de esfuerzos soporte servomotor:** el análisis de esfuerzos tomo en cuenta las características del soporte del servomotor de material galvanizado cal.22 (espesor 0.70mm), para el cual al aplicar las cargas correspondientes se generan un esfuerzo máximo de 98.55MPa. La concentración de esfuerzos se genera en la zona cercana a los barrenos para la conexión de los tornillos de acople servo-soporte:

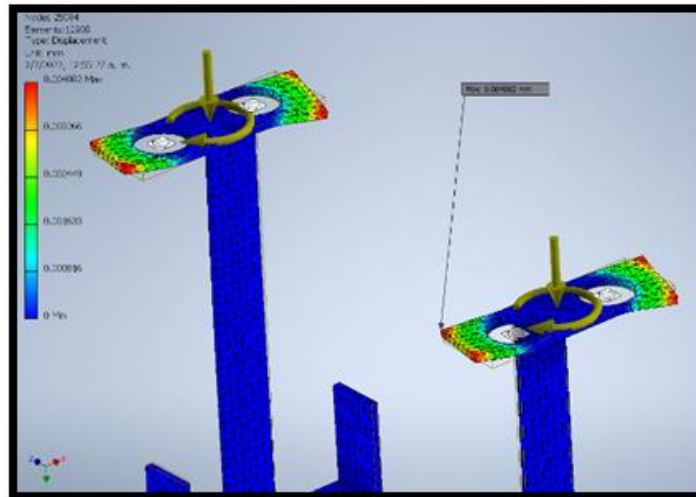
**Figura 13** Análisis de esfuerzo de motor



Fuente: Modelo realizado en el software AUTODESK

**6.2.8.2 Análisis de deformaciones soporte servomotor:** las deformaciones máximas se generan en los bordes del asentamiento del servo con un valor de 0.00408mm

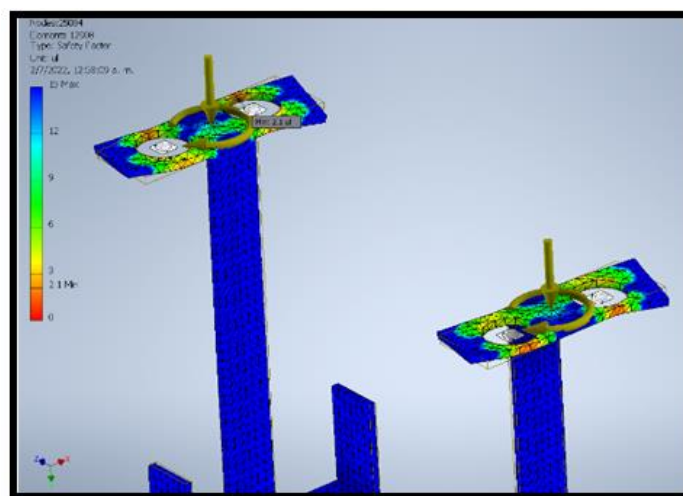
**Figura 14** Análisis de deformaciones Soporte Servomotor



Fuente: Modelo realizado en el software AUTODESK

**6.2.8.3. Factor de seguridad soporte servomotor:** El factor de seguridad de la base del servo según los resultados de la simulación por elemento finito es de 2.1 ul

**Figura 15** Factor de Seguridad –Soporte del servomotor



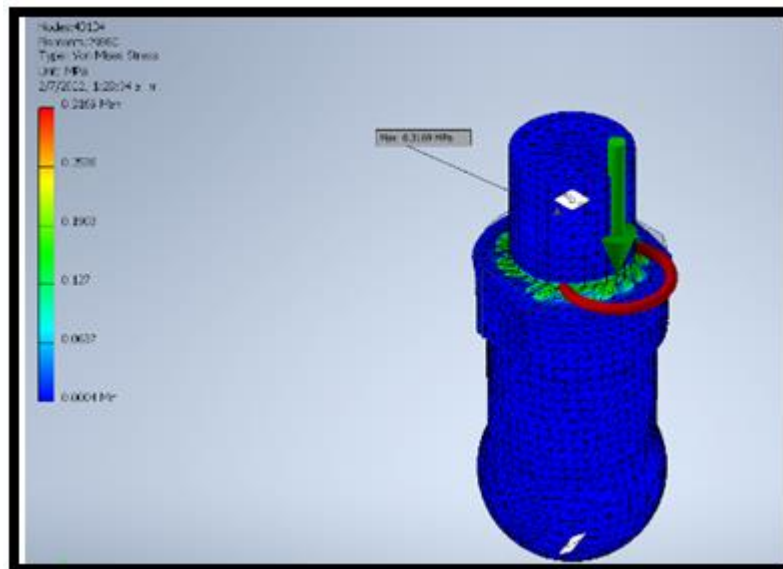
Fuente: Modelo realizado en el software AUTODESK

### 6.2.9. Análisis de esfuerzos rotula superior

$$\begin{aligned}
 m_{r.superior} &:= 0.008 \text{ kg} && \text{Masa rotula superior} \\
 w_{r.superior} &:= m_{r.superior} \cdot g = 0.078 \text{ N} && \text{Peso rotula superior} \\
 M_{r.superior} &:= 4.043 \text{ N} \cdot \text{mm} && \text{Momento actuante Rotula-base} \\
 w_{total} &:= w_{servo} + w_{adaptador} + w_{llave} + R_{servo} + w_{soporte} = 1.054 \text{ N} && \text{Fuerza total actuante}
 \end{aligned}$$

Los esfuerzos máximos en la rótula se concentran en la reducción de la base precisamente donde se ajusta el roscado de la rótula con el barreno de la base con un valor de 0.3169 MPa

**Figura 16** Análisis de esfuerzo rotula Superior

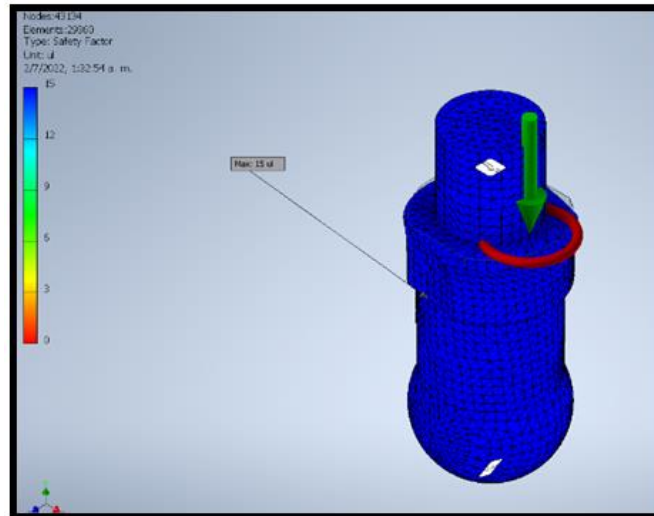


Fuente: Modelo realizado en el software AUTODESK

las deformaciones máximas se generan en el borde perimetral de la rótula con un valor de  $1.58 \times 10^{-6}$  mm

**6.2.9.1 Factor de seguridad rotula superior:** el factor de seguridad de la rotula superior es de 15ul

**Figura 17** Factor de seguridad Rotula superior



Fuente: Modelo realizado en el software AUTODESK

### 6.2.9.2 Análisis de esfuerzos escualizable superior

$$m_{e.superior} := 0.066 \text{ kg}$$

Masa escualizable superior

$$w_{e.superior} := m_{e.superior} \cdot g = 0.647 \text{ N}$$

Peso escualizable superior

$$R_{e.superior} := 0.2358 \text{ N}$$

Reacción base escualizable superior

$$M_{e.superior} := 0.6444 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

Momento actuante escualizable superior

$$w_{total} := w_{servo} + w_{adaptador} + w_{llave} + R_{servo} + w_{soporte} + R_{e.superior} + w_{r.superior}$$

$$w_{total} = 1.368 \text{ N}$$

Fuerza total actuante en la base del escualizable

$$R_x := 0.0004058 \text{ N}$$

Reacción base escualizable superior dirección x

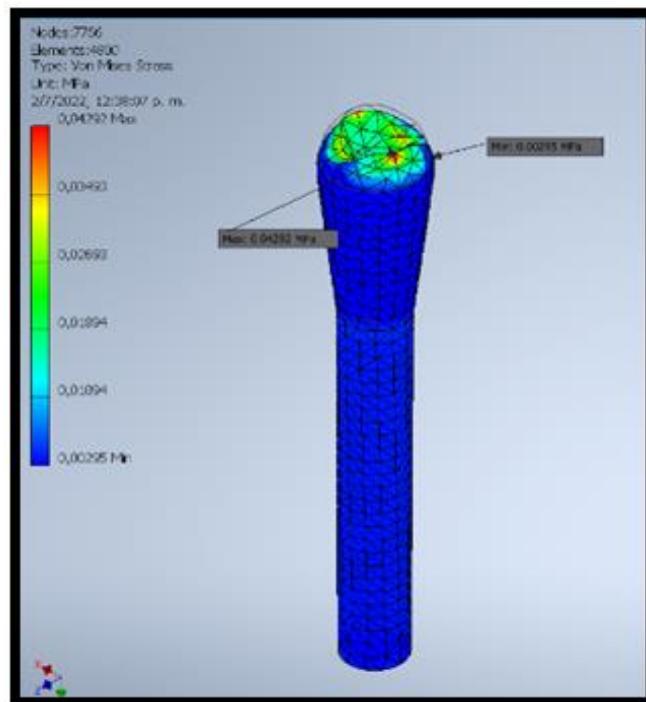
$$R_z := -0.0005616 \text{ N}$$

Reacción base escualizable superior dirección z

Los esfuerzos máximos en el escualizable superior se concentran en el cambio de la

sección en conexión con la rótula con un valor mínimo de 0.00295MPa y un valor máximo de 0.04292 MPa

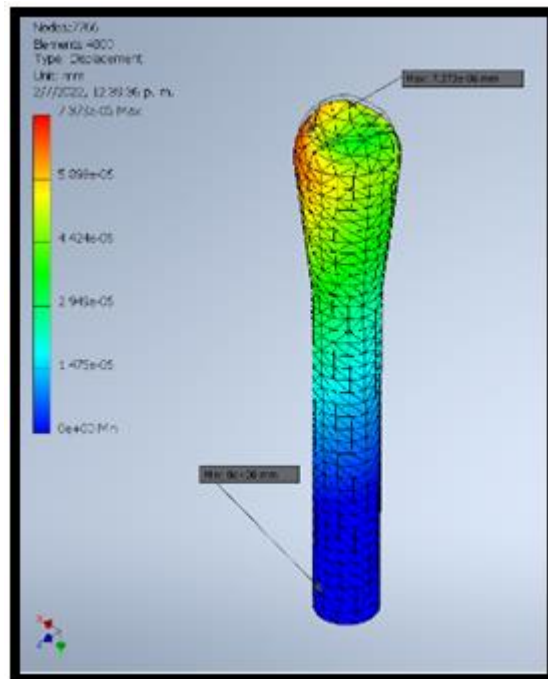
**Figura 18** *Análisis de esfuerzos escualizable superior*



Fuente: Modelo realizado en el software AUTODESK

**6.2.9.3 Análisis de deformaciones escualizable superior:** las deformaciones máximas se generan en el extremo articulado con la rótula superior con valor máximo de  $7.37 \times 10^{-6}$  mm

**Figura 19** *Análisis de deformaciones escualizable superior*

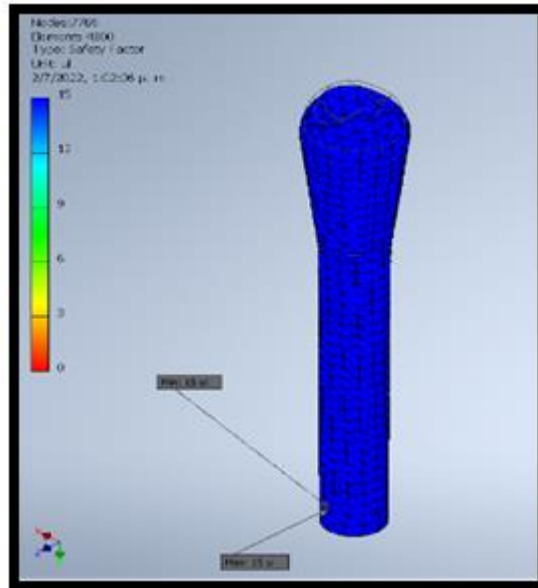


Fuente: Modelo realizado en el software AUTODESK

**6.2.9.4 Factor de seguridad escualizable superior:** el factor de seguridad del escualizable superior es de 15ul



**Figura 20** Factor de seguridad escualizable superior



Fuente: Modelo realizado en el software AUTODESK

### 6.2.10 Análisis de esfuerzos escualizable inferior

$$m_{e.inferior} := 0.257 \text{ kg}$$

Masa escualizable inferior

$$w_{e.inferior} := m_{e.inferior} \cdot g = 2.52 \text{ N}$$

Peso escualizable inferior

$$R_{e.inferior} := 0.823 \text{ N}$$

Reacción base escualizable inferior

$$M_{e.inferior} := 0.6433 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

Momento actuante escualizable inferior

$$w_{total} := w_{servo} + w_{adaptador} + w_{llave} + R_{servo} + w_{soporte} + R_{e.inferior} + w_{e.superior}$$

$$w_{total} = 2.524 \text{ N}$$

Fuerza total actuante en la base del escualizable

$$R_x := 0 \text{ N}$$

Reacción base escualizable inferior dirección x

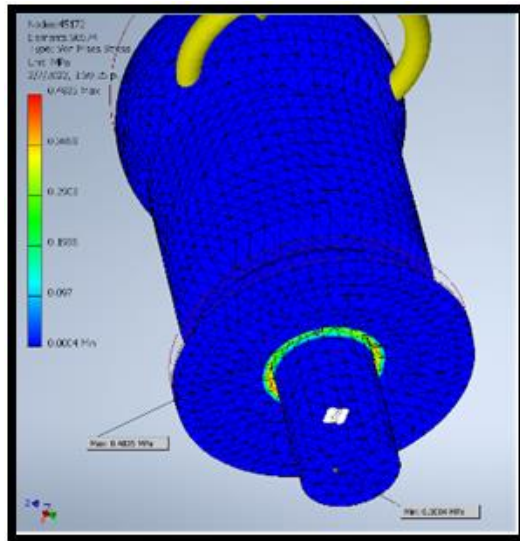
$$R_z := 0.0005559 \text{ N}$$

Reacción base escualizable inferior dirección z

Los esfuerzos máximos en el escualizable superior se concentran en el cambio de la

sección en conexión con la rótula con un valor mínimo de 0.0007MPa y un valor máximo de 0.02609 MPa

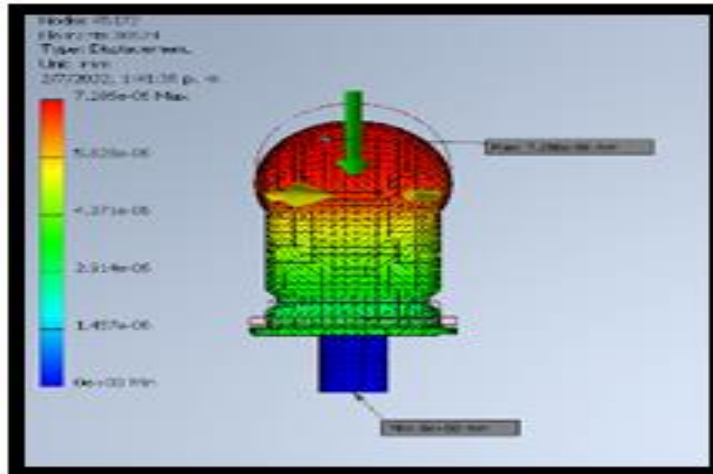
**Figura 21** Análisis de esfuerzos escualizable inferior



Fuente: Modelo realizado en el software AUTODESK

**6.2.10.1 Análisis de deformaciones rotula inferior:** las deformaciones máximas se generan en el extremo articulado entre la rótula y el escualizable inferior con valor máximo de  $7.286 \times 10^{-6}$  mm

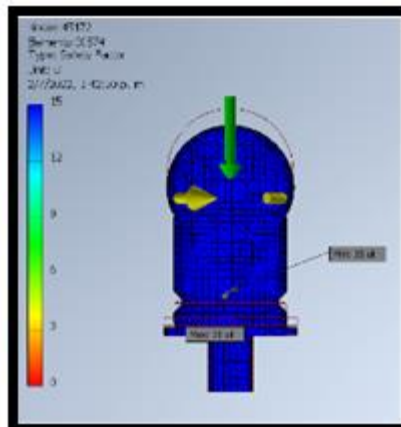
**Figura 22** Análisis de deformaciones rotula inferior



Fuente: Modelo realizado en el software AUTODESK

**6.2.10.2 Factor de seguridad rotula inferior:** El factor de seguridad de la rótula es de 15ul

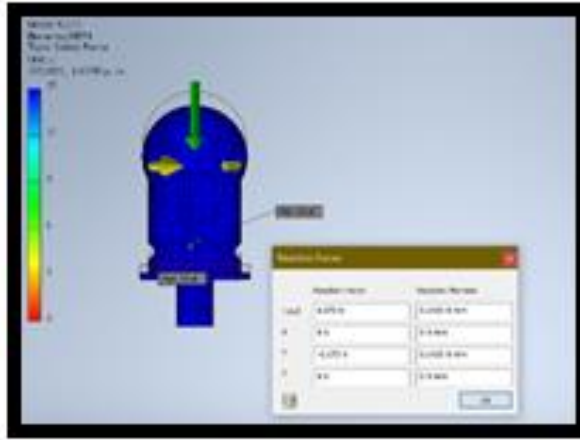
**Figura 23** Factor de seguridad rotula inferior



Fuente: Modelo realizado en el software AUTODESK

**6.2.10.3 Reacciones de la rótula inferior en la base magnética:** las reacciones transmitidas de la estructura a la base magnética se presentan a continuación:

**Figura 24** Reacciones de la rótula inferior en la base magnética



Fuente: Modelo realizado en el software AUTODESK

### 6.2.11 Análisis de esfuerzos base magnética

$$m_{r.inferior} := 0.042 \text{ kg}$$

Masa rotula inferior

$$w_{r.inferior} := m_{r.inferior} \cdot g = 0.412 \text{ N}$$

Peso rotula inferior

$$R_{base\_magnetica} := -6.672 \text{ N}$$

Reacción base rotula

$$M_{base\_magnetica} := 0.06433 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

Momento actúante transmitida de rotula

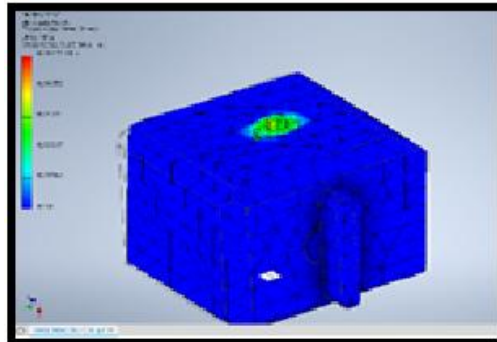
$$w_{total} := w_{servo} + w_{adaptador} + w_{llave} + w_{soporte} + R_{r.inferior} + w_{e.superior} + w_{e.inferior} + w_{r.superior} + w_{r.inferior}$$

$$w_{total} = 7.084 \text{ N}$$

Fuerza total actuante en la base del rotula

Los esfuerzos máximos en la base magnética se concentran en la conexión roscada de la rótula con la base magnética en el orden numérico de 0.08316 MPA (esfuerzos de Von Mises)

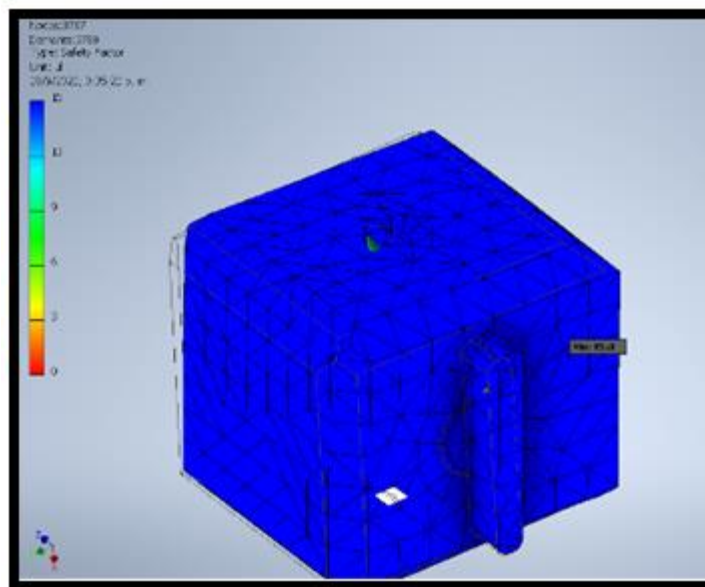
**Figura 25** Análisis de esfuerzos base magnética



Fuente: Modelo realizado en el software AUTODESK

### 6.2.11.1 Factor de seguridad base magnética: El factor de seguridad de la rótula es de 15ul

**Figura 26** Factor de seguridad base magnética

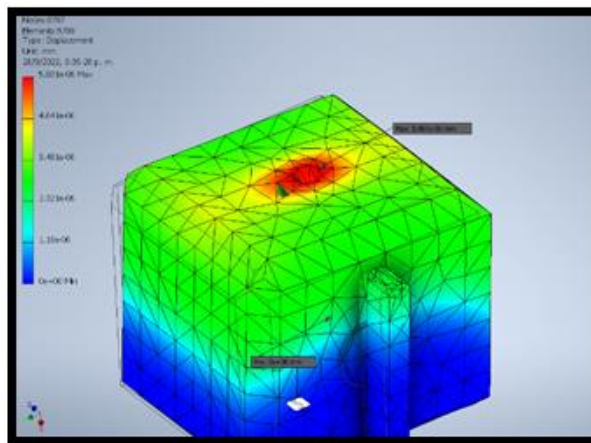


Fuente: Modelo realizado en el software AUTODESK

### 6.2.11.2. desplazamiento en base magnética:

Los desplazamientos máximos se generan en la parte superior de la conexión roscada de la base magnética en el orden de  $5.80 \cdot 10^{-6}$  mm. permitiendo una conexión segura en la parte baja de la base magnética.

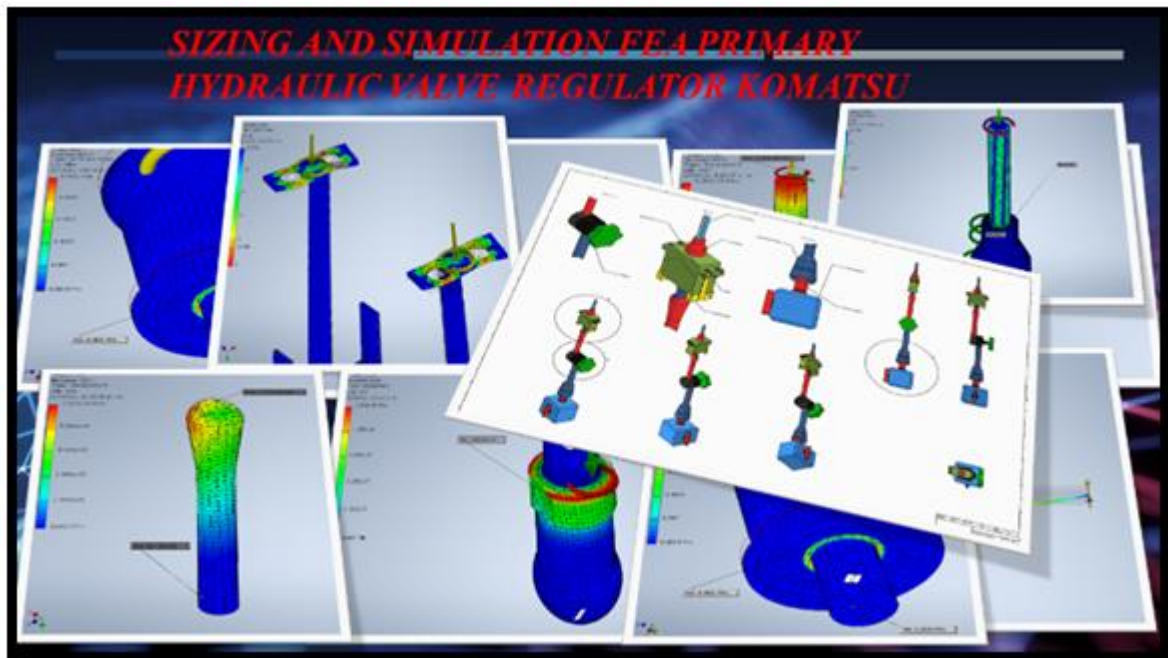
**Figura 27** Desplazamiento en base magnética



Fuente: Modelo realizado en el software AUTODESK

### 6.3. EJECUCIÓN DE LA HERRAMIENTA –DISEÑO

**Figura 28** Simulación de las partes de la herramienta de Calibración - *Explicadas en la Planeación*






Fuente: Modelo realizado en el software AUTODESK




#### 6.3.1. PRUEBAS DE CALIBRACION DE TORQUIMETRO

**Tabla 2** Pruebas de calibración de torqui metro en el bloque principal

Nombre	Imagen tomada en el punto	Observación
Calibración		Incertidumbre 3,3 Lib al momento de la calibración

<p>Máximo torque aplicado</p>		<p>0,5 máximo torque aplicado al momento de realizar el ajuste.</p>
<p><b>Aplicación del Torque</b></p>		<p>Punto de aplicación</p>
<p><b>Pruebas de vibraciones en bloque principal</b></p>		<p>Montaje en el bloque principal para pruebas</p>



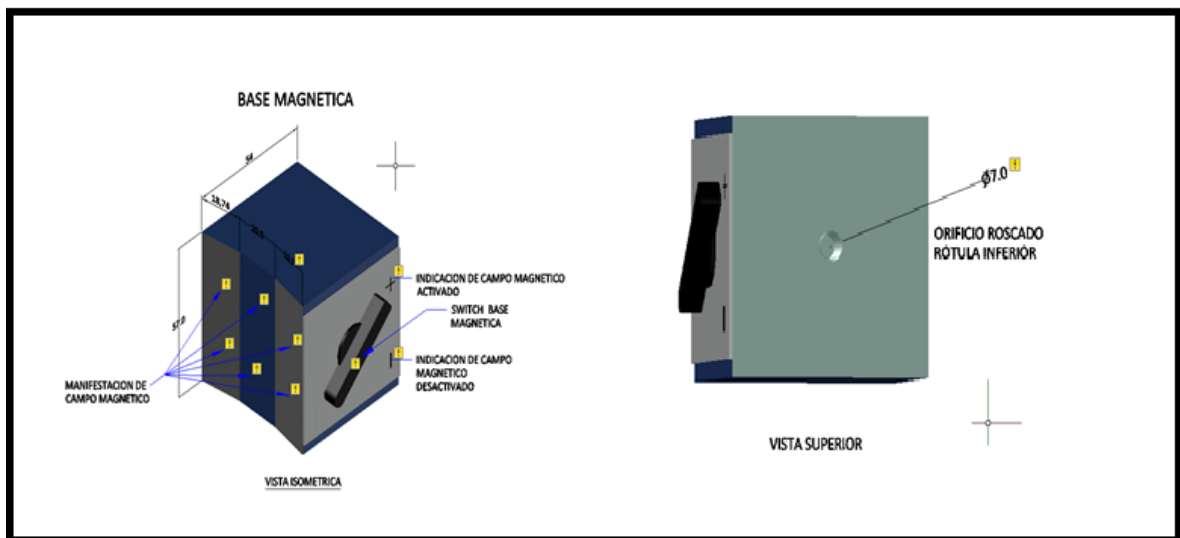
<p><b>Bloque 1</b></p>	 <p>The screenshot shows the 'Route Data Collection' screen for 'AMS 2140'. The main display area shows 'CAJA DE BOMBAS' and 'Eje Bomba # 7 Ind.Der Actual' with a peak velocity of '5.2579 mm/sec Peak'. The status is 'OK'. The screen includes various function keys like 'Prep Point', 'Prep Equip', 'Equip List', 'Notes', 'Plot Data', 'Clear Data', 'Next Point', 'Next Equip', 'Link to Live Data', 'Field Alert', 'View Params', and 'Run Analyze'.</p>	<p>5.2579 mm/sec</p>
<p><b>Bloque 2</b></p>	 <p>The screenshot shows the 'Route Data Collection' screen for 'AMS 2140'. The main display area shows 'CAJA DE BOMBAS' and 'Eje Bomba # 7 Ind.Der Actual' with a peak velocity of '5.1519 mm/sec Peak'. The status is 'OK'. The screen includes various function keys like 'Prep Point', 'Prep Equip', 'Equip List', 'Notes', 'Plot Data', 'Clear Data', 'Next Point', 'Next Equip', 'Link to Live Data', 'Field Alert', 'View Params', and 'Run Analyze'.</p>	<p>5.1519 mm/sec</p>
<p><b>Bloque 3</b></p>	 <p>The screenshot shows the 'Route Data Collection' screen for 'AMS 2140'. The main display area shows 'CAJA DE BOMBAS' and 'Eje Bomba # 5 Ind.Der Actual' with a peak velocity of '3.3779 mm/sec Peak'. The status is 'OK'. The screen includes various function keys like 'Prep Point', 'Prep Equip', 'Equip List', 'Notes', 'Plot Data', 'Clear Data', 'Next Point', 'Next Equip', 'Link to Live Data', 'Field Alert', 'View Params', and 'Run Analyze'.</p>	<p>3.3779 mm/sec</p>

<p><b>Bloque 4</b></p>		<p>4.9819 mm/sec</p>
------------------------	--	--------------------------

## 6.4 DISEÑO DE LAS PARTES DE LA HERRAMIENTA

A continuación, se muestran el diseño de cada uno de los componentes en 3D con sus especificaciones técnicas, y tabla con sus medidas reales de cada uno de ellos.

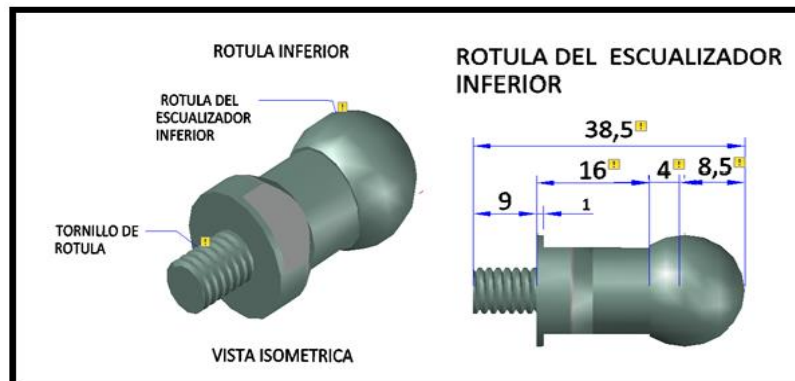
**Figura 29** Base Magnética



Fuente: Modelo realizado en el software AUTODESK

### Especificaciones y características de la rótula inferior (EI)

**Figura 30** Rotula Inferior

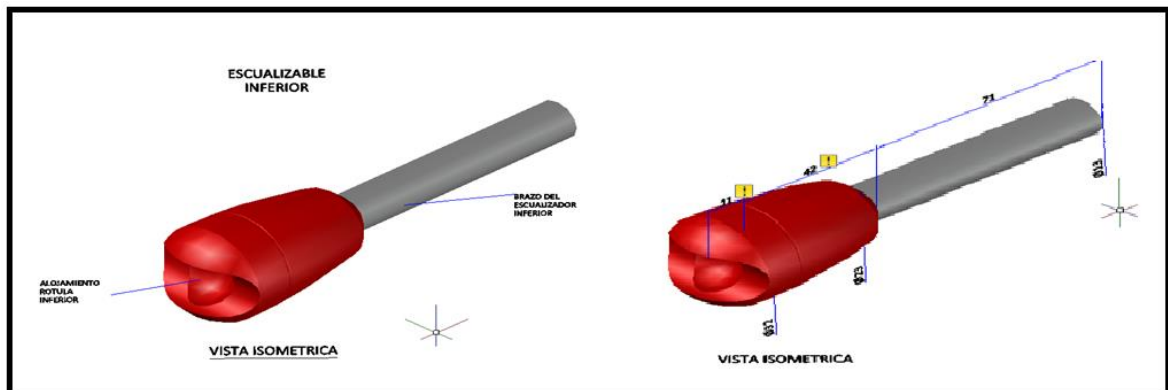


Fuente: Modelo realizado en el software AUTODESK

- **Ecuador inferior**

A continuación, se puede apreciar las vistas del ecuador en 3d.

**Figura 31** Ecuador inferior

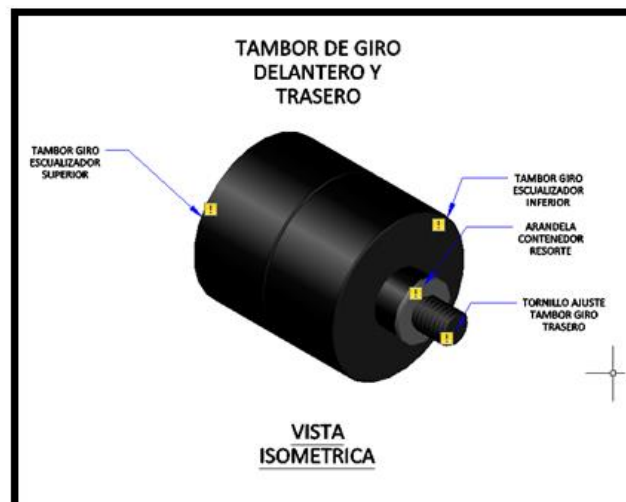


Fuente: Modelo realizado en el software AUTODESK

- **Tambor de giro delantero y trasero (TG)**

A continuación, se puede apreciar las vistas del Tambor de giro delantero y trasero en 3d

**Figura 32** Tambor de giro delantero y trasero

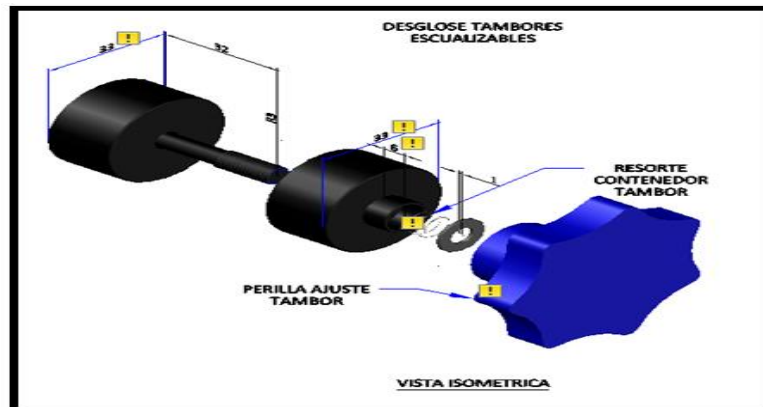


Fuente: Modelo realizado en el software AUTODESK

- **Desglose de tambores ecualizables**

A continuación, se puede apreciar las vistas del desglose tambores ecualizables

**Figura 33** Desglose de tambores ecualizables

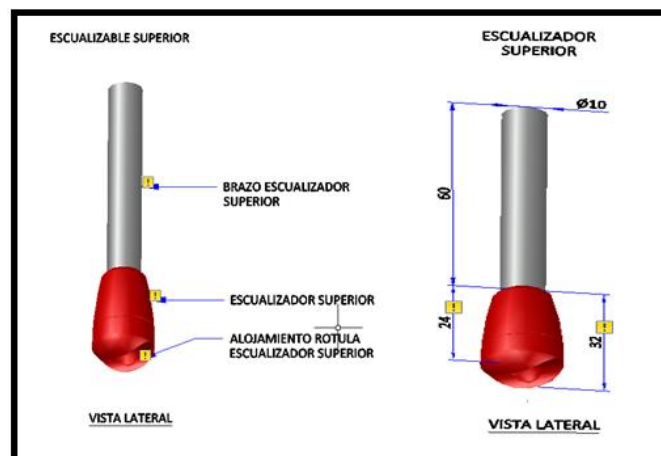


Fuente: Modelo realizado en el software AUTODESK

- **Ecualizador superior**

A continuación, se puede apreciar las vistas del Ecualizador superior en 3d por medio del software AUTODESK

**Figura 34** Ecualizador superior

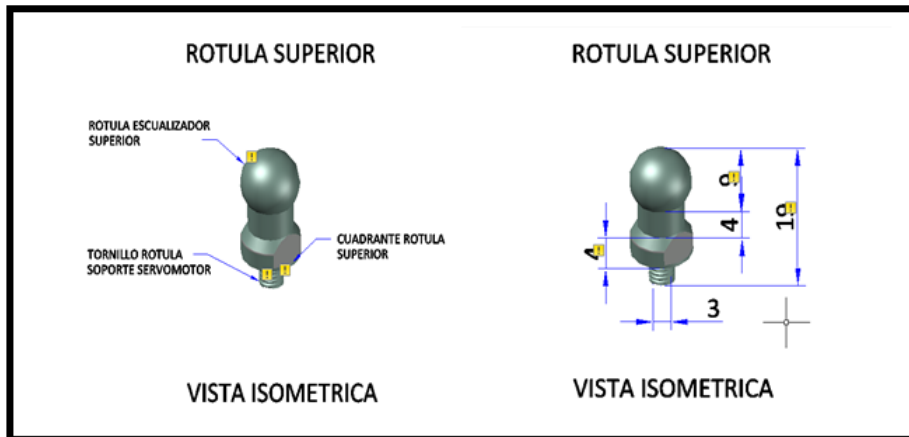


Fuente: Modelo realizado en el software AUTODESK

- **Rotula superior**

A continuación, se puede apreciar las vistas del Ecuilizador superior en 3d.

**Figura 35** Rotula superior

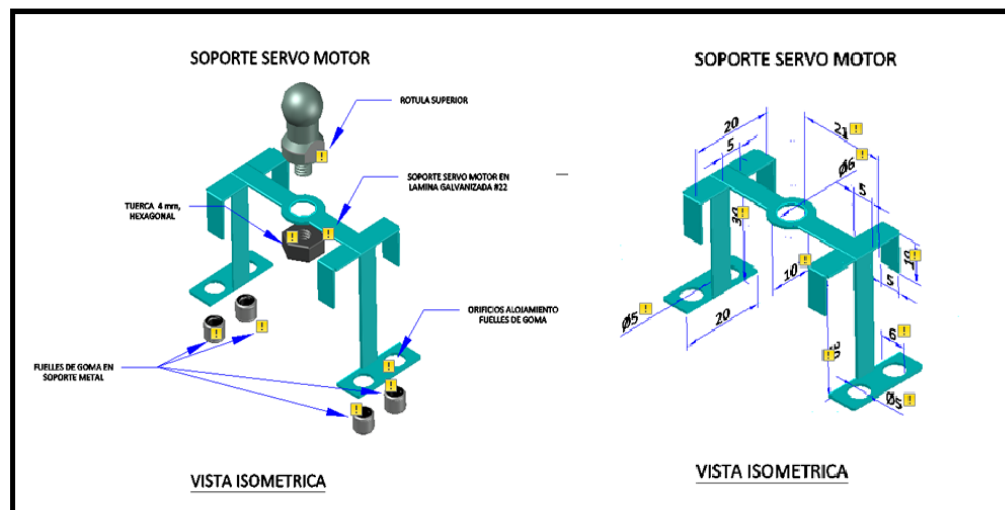


- **Soporte del Servomotor**

Fuente: Modelo realizado en el software AUTODESK

**Figura 36** Soporte del servomotor

A continuación, se puede apreciar las vistas del Ecuilizador superior en 3d

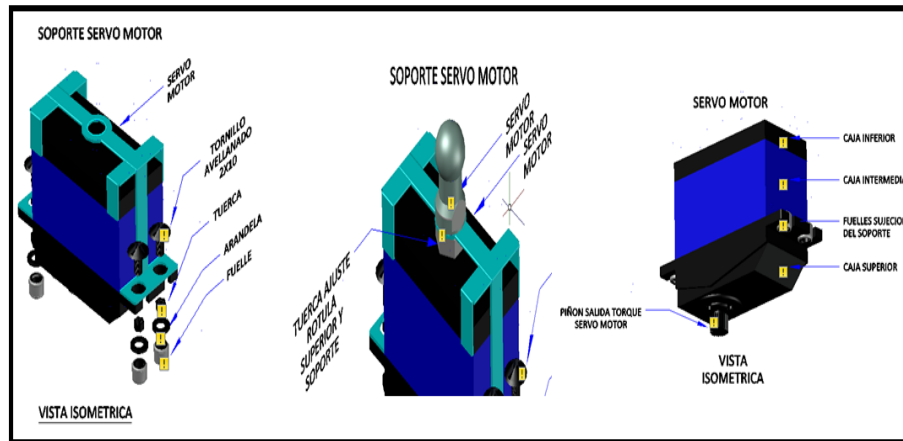


Fuente: Modelo realizado en el software AUTODESK

- **Soporte del Servo Motor**

A continuación, se puede apreciar las vistas del Ecuador superior en

**Figura 37** Montaje del Servomotor en el soporte de la Base

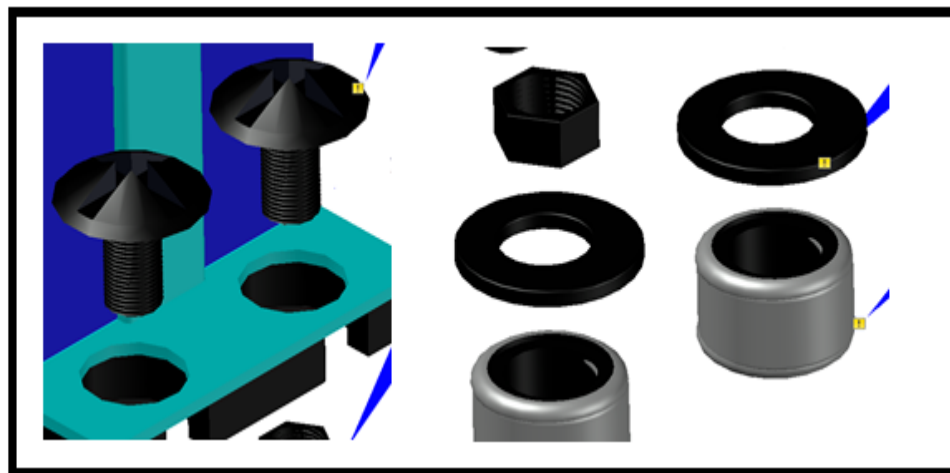


Fuente: Modelo realizado en el software AUTODESK

- **Tornillos y tuercas para la base del servo motor**

A continuación, se puede apreciar las vistas del Ecuador superior en 3d.

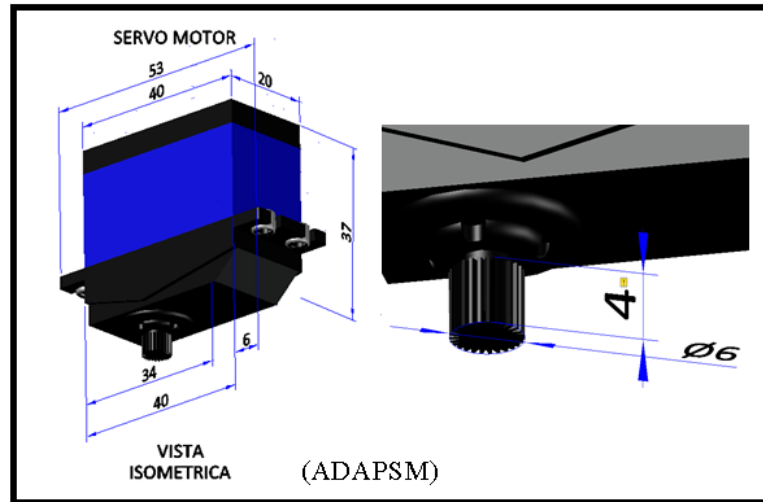
**Figura 38** Tornillos y tuercas de la base del Servomotor



Fuente: Modelo realizado en el software AUTODESK

- Servo Motor

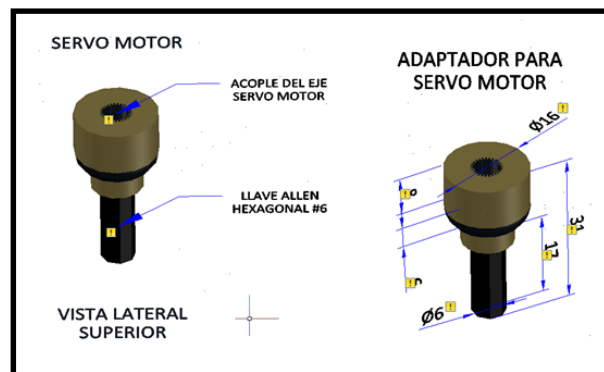
**Figura 39** Servomotor



Fuente: Modelo realizado en el software AUTODESK

- Adaptador del Servomotor

**Figura 40** Adaptador del Servomotor



Fuente: Modelo realizado en el software AUTODESK

**Tabla 3** Especificaciones técnicas y características del calibrador remoto de válvula



COMPONENTE	DESPIEZE PARTES	ESPECIFICACIONES	FUNCIONALIDAD	PROPIEDAD MATERIAL	WV
Soporte Magnético	Base	57mmx57mmx54mm (LxAxh) Cerramiento laminar en hierro	Soporte principal y anclaje magnético del dispositivo	Aleación hierro fundido, Acero al carbono. Al: Acero inoxidable	<a href="#">BASE</a>
	Switch o perilla	Plástico en FENOL. Alta rigidez, poca tendencia a resquebrajamiento.	Seleccionar: +=campo activo. - =campo inactivo	Fijación de la base al área o superficie de trabajo	
	Lamina indicación	53mmx53mmx50mm (LxAxh)	Identificación símbolos y ubicación Switch	Aluminio aleación cromo bajo	
	Núcleo	Datos técnicos de fabrica	Generación móvil mecánica del campo magnético	% Ferrita, hierros cristalinos	
	Estator	Datos técnicos de fabrica	Generación fija mecánica del campo magnético	% Ferrita, hierros cristalinos	
Brazo Escualizable Inferior	Rotula inferior	38mm de largo. Cuadrante de ajuste de 12mm	Pernada en la parte superior del soporte magnético	Aleación hierro fundido, Acero al carbono. Al: Acero inoxidable	<a href="#">ESCUALIZABLE INFERIOR</a>
	Alojamiento de rotula inferior	53mmx32mm largo	Desplazamiento circular a 180 de giro	-----	
	Brazo del escualizador	71mmx13mm (LxA)	Extensión del desplazamiento,	-----	

			ampliando radio de giro		
Tambor de Giro	Tambor delantero	Cilindro de 33mm de diámetro x 14mm de altura	Posicionamiento del brazo superior y fijación giro de inclinación	Hierro, Acero al 12%, Cr.	<a href="#">TAMBOR DE GIRO</a>
	Resorte	4 espirales x 10mm altura	Suavidad del ajuste de la perilla	Acero inoxidable, SAE 1070 Cromo silicio.	
	Arandela ajuste	Arandela plana de 6mm, espesor de 1mm.	Reten en alojamiento del resorte	Hierro, Cr.	
	Perilla	50 diámetro x 18h	Maniobrabilidad para el ajuste del tambor	Platico rígido PVC	
	Tambor trasero	Cilindro de 33mm de diámetro x 14mm de altura	Aseguramiento del tambor delantero con el eje roscado en la perilla	Hierro, Acero al 12%, Cr.	
	Eje de ajuste tambores	32mm de largo. Filetes: 15. Cresta: 0.03. Paso: 1mm. Flanco: 0.01mm	Anclado al tambor trasero	Hierro forjado de fundición de color negro.	
Brazo Escualizable Superior	Brazo del escualizador	60mm x 10 de diámetro	Extensión del desplazamiento, ampliando radio de giro	-----	<a href="#">ESCUALIZABLE SUPERIOR</a>
	Alojamiento de rotula inferior	10mm x 32mm largo	Desplazamiento circular a 180° de giro	-----	

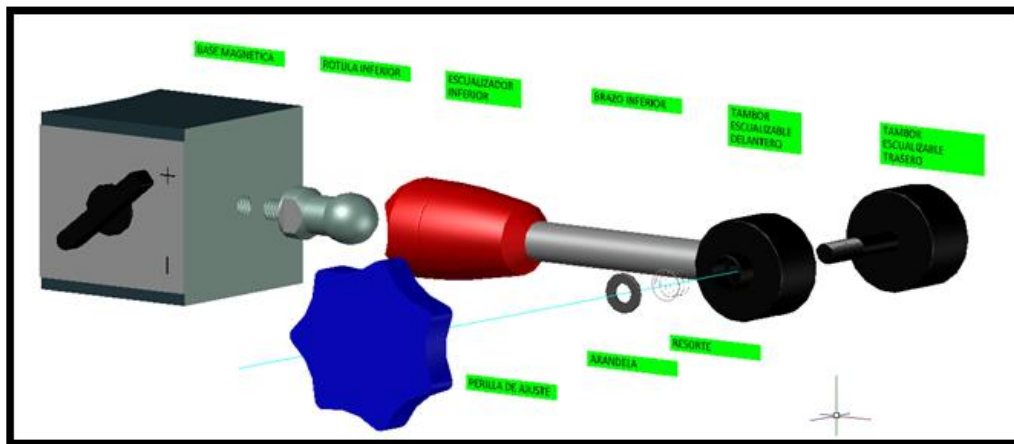
	Rotula superior	19mm largo. Cuadrante de ajuste de 8mm.	Pernada en la parte superior del soporte magnético	Aleación hierro fundido, Acero al carbono. Al: Acero inoxidable	
Soporte del Body del Servo Motor	Soporte canasta	42mmx20mmx30(LxAxh)	Contención y proyección del Body servo motor.	Lámina galvanizada #22	
	Tornillos	2mm diámetro x 8 de largo	Fijar en unión el soporte con el Servo motor	Hierro, acero al carbono	<a href="#">SOPORTE SERVOMOTOR</a>
	Arandela	Arandela plana comercial	Distribución de la fuerza de ajuste uniformemente	Hierro, acero al carbono	
	Tuerca	Hexagonal comercial	Fijar en unión el soporte con el Servo motor	Hierro, acero al carbono	
Servo Motor	Body o carcaza	53mmx20mmx37 (LxAxh)	Alojamiento contenedor de componentes.	Plástico rígido, PVC.	<a href="#">SERVOMOTOR</a>
	Fuelles		Amortiguadores, absorbedores de vibración	Caucho de goma redondo	
	Eje del Servo Motor	6mm diámetrox4mm largo	Eje solidario al Adaptador para el movimiento rotacional	Acero medio al carbono.	<a href="#">EJE MOTOR</a>
	Cable de alimentación al Servo Motor	Longitud: 3 m. Cable: 3x22, multifilar.	Conexión cableada para alimentación eléctrica del Servo motor	PVC: Policloruro de vinilo Conductor en	

				material de cobre	
Adaptador del Servo Motor	Adaptador	31mm de largo x diámetro superior de 16mm.	Adaptador hembra, convertidor del eje piñón del Servo motor al hexagonal Allen #6; permitiendo el ajuste de las válvulas, en su mismo sentido y eje rotacional.	Hf: Hierro de fundición, acero al carbono, Cr: cromo	<a href="#">ADAPTADOR SERVOMOTOR</a>
	Llave Allen del adaptador	16mm de largo x hexagonal #6	Punta hexagonal en el adaptador, para el giro y ajuste proporcional necesario.	Fe: hierro. Acero al carbono	
	Orificio del adaptador	Diámetro de 4mm. Pf: 5mm.	Orificio parte superior del adaptador, para el acople del eje del Servo motor	-----	

## 6.5 ENSAMBLE DE PARTES.

### 6.5.1 Ecuación Inferior. Montaje final de la ecuación inferior en 3D

**Figura 41** Montaje de la Ecuación Inferior

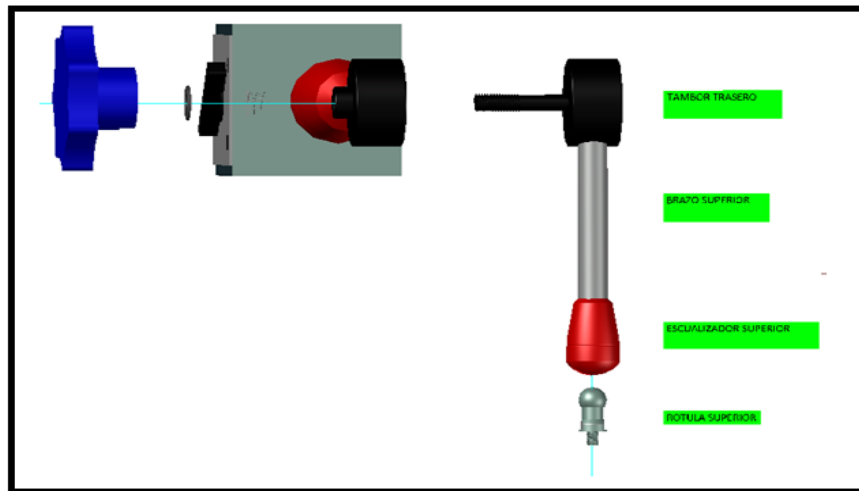


Fuente: Modelo realizado en el software AUTODESK

### 6.5.2 Ecuación Superior.

Montaje 3final de la Ecuación Superior en 3D

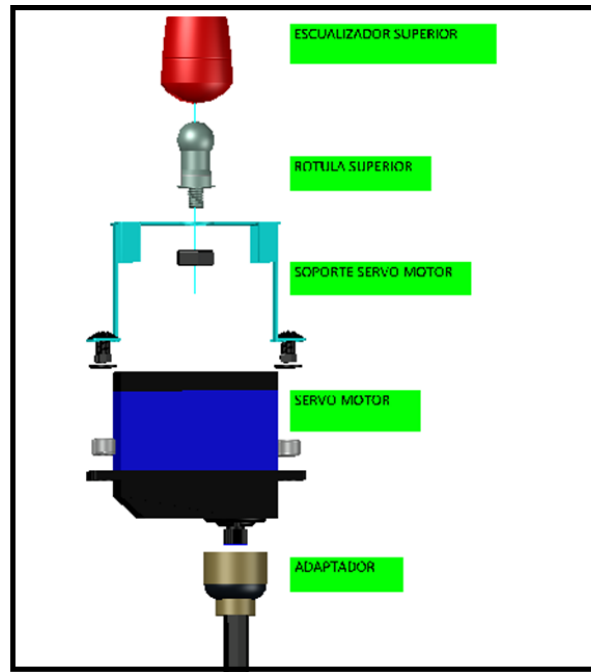
**Figura 42** Montaje de la Ecuación Superior



### 6.5.3 Ensamble con el Servo Motor y Montaje final de la Herramienta de calibración de Válvulas limitadoras de Presión en palas PC 4000 de Komatsu.

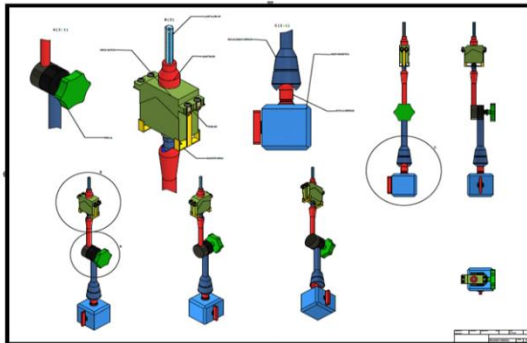
Ensamble final de la herramienta de calibración en 3D- Software AutoDesk

**Figura 43** Ensamble final de la herramienta de Calibración



Fuente: Modelo realizado en el software AUTODESK

**Figura 44** Simulación 3D de la Herramienta de Calibración de las



Fuente: Modelo realizado en el software AUTODESK

## **6.6. DISEÑO DE LOS CIRCUITO CONTROLADOR DEL SERVO MOTOR Y CONTROLADOR INALAMBRICO**

Los siguientes dos circuitos son diagramas de bloque simple de circuito alámbrico e inalámbrico, los cuales a simple vista son iguales, pero se diferencian en una pantalla que posee el circuito inalámbrico donde muestra el encendido y apagado del servomotor.

El Circuito alámbrico controlador del servo-motor de la figura 45, es un circuito que tiene una tarjeta arduino principal que viene con su propia fuente de alimentación y esta va directamente a la tarjeta, también se puede ver en el circuito M1 (servo motor) tiene tres líneas distribuidas de la siguiente manera: Tierra, voltaje de 5v y la señal, también contiene una tarjeta P1 que es la que realiza la comunicación BLuetooth, El sw1 rotatorio que es como un potenciómetro que indica la señal al servo de subir o bajar la presión, el U2 es una batería de 9v, este circuito viene con un diodo que tiene el puerto vin que manta 9v para que se alimente la tarjeta principal, también se encuentra un regulador de voltaje de 5v para regular de 9v a 5v el servo motor por las especificaciones técnicas que este posee, todos los puntos del circuito GND se comunican entre sí ya que es la tierra de este.

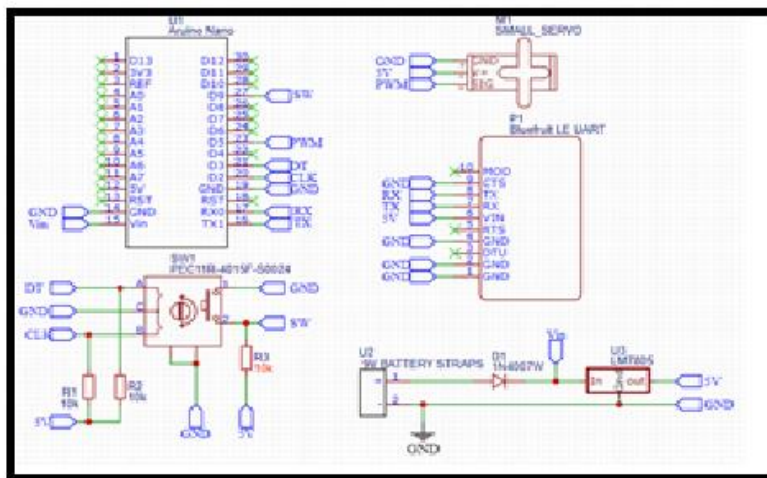
El circuito de la figura 46 se diferencia del anterior por los sw que mediante la programación nos indican a través de los leds que se encuentran en el circuito y el monitor con la pantalla es visualizar al momento que el servomotor este trabajando,



que cuando se envía la señal del servomotor se activen los leds e indiquen el funcionamiento del servomotor,

También se tiene un sw que se encarga de dar posición para indicar si el circuito se utiliza de manera inalámbrica o alámbrica, dependiendo como se configure.

**Figura 45** Circuito Controlador del servomotor

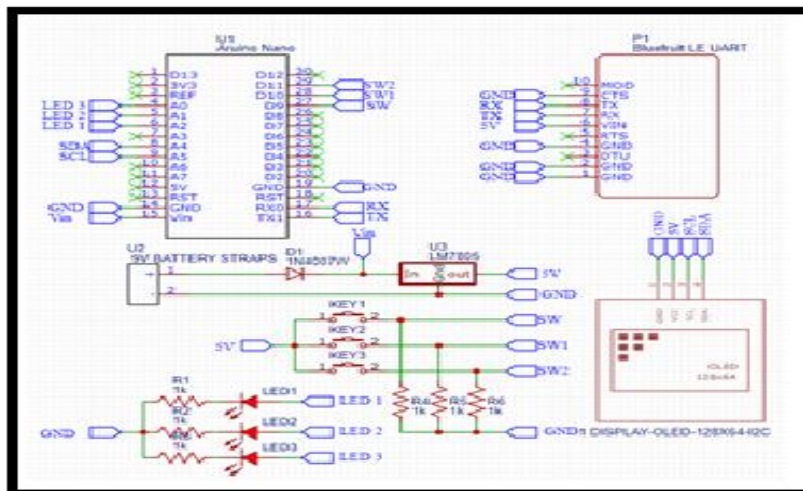


Fuente: Modelo realizado en el software Orcad

- Documentación de componentes especiales
  - a. Arduino Nano
    - i. <https://www.hwlibre.com/arduino-nano/>
  - b. Adafruit Bluefruit LE UART
    - i. <https://learn.adafruit.com/introducing-the-adafruit-bluefruit-le-uart-friend/introduction>
  - c. Encoder
    - i. <http://msrobotics.net/index.php/laboratorio-ard/245-uso-de-encoder-con-arduino>
- Componentes generales
  - d. Resistencias
  - e. Diodos
  - f. Regulador de voltaje LM7505

- g. Encoder
- h. Arduino nano
- i. Adafruit Bluefruit LE UART
- j. Conectores
- k. Display 128x64

**Figura 46** Circuito Controlador Inalámbrico



Fuente: Modelo realizado en el software Orcad

### **6.7 EVALUACIÓN: ANALISIS DE RESULTADOS DE LA HERRAMIENTA**

Para este diseño se realizó una simulación del brazo articulado en donde se diseñó una herramienta versátil y dinámica que permite ejecutar la tarea de manera segura, también en los cálculos realizados para el anclaje de esta herramienta el factor de seguridad en el tema de anclaje es bastante alto con relación a las vibraciones en el sector, donde se garantiza la fijación la herramienta para la calibración de válvulas primarias y la efectividad de la misma, así mismo se utiliza un servo motor que dentro de su capacidad alto torque garantiza un ajuste ideal en las válvulas primarias.

Se logra por medio del diseño de la herramienta un ajuste de manera remota, sin ningún tipo de interacción con las líneas hidráulica presurizadas y con altas temperaturas y presiones, en donde el técnico ya no necesita interactuar directamente con la Pala PC4000, lo cual con este diseño ya implementado realizara el mantenimiento de forma remota, en donde se acotan todas las restricciones presentadas y se escoge el servomotor ideal para el diseño del brazo articulado, que permitiera ajustarse a cualquier tipo de situación al momento de realizar el ajuste. De igual manera, que la capacidad del imán, al momento de instalarlo, y el esfuerzo de torsión que le genera el servomotor, no permita que la herramienta se desplace y cumpla la función con la cual fue diseñada, A futuro se espera que la herramienta de calibración de válvulas primarias en las palas Komatsu sea ejecutada, ya que su implementación tiene una ventaja a nivel de seguridad en los proyectos donde se aplique la herramienta.

## 7. CONCLUSIONES

Este proyecto se basó en el diseño de una herramienta para la calibración de válvulas limitadoras de presión por medio de un componente fundamental como lo es el SERVOMOTOR, y gracias a las pruebas que se realizaron se puede concluir que:

- El torque máximo aplicado se obtuvo mediante la simulación de la función del servomotor (ajuste de la válvula por medio de incremento o disminución de la presión), se utilizó un torque análogo aplicando torsión en la válvula limitadora con el equipo en modo ajuste de válvula (alta presión) obteniendo un valor real del par de torsión que se desea aplicar a las válvulas al momento de realizar el ajuste.
- Las pruebas de vibraciones realizadas con la herramienta de diagnóstico en los bloques principales lograron determinar los grados de las vibraciones y a su vez conocer la capacidad del imán que se debe fijar en la herramienta.
- Por medio de la simulación en el software AUTODESK se logró establecer que los desplazamientos máximos son generados en la parte superior de la conexión roscada de la base magnética, en el orden de  $5.80 \cdot 10^{-6}$  mm, permitiendo una conexión segura en la parte baja de la base magnética.
- En el bloque principal se logró precisar mediante el cálculo y la dimensión de la herramienta las medidas que son requeridas para el brazo electromecánico, obteniendo las medidas ideales para garantizar el accionamiento de las válvulas sin ninguna restricción, lo cual se puede observar en la tabla 2.

- Se realizó la simulación del diseño de la herramienta mediante el Software AUTODESK ilustrando el armado y funcionalidad de la herramienta, con lo cual se logró cumplir con el objetivo principal de Diseño de la herramienta para la calibración de Válvulas limitadoras de presión primarias en las palas PC4000 de Komatsu; estas especificaciones técnicas y características del calibrador remoto de válvulas para sistemas hidráulicos, se observan en la tabla 2, en donde se describen las especificaciones técnicas, funcionalidad y material compuesto de cada componente que se utilizó en el proyecto.
- Este proyecto da la posibilidad de continuar con la investigación e implementación de la herramienta en cualquier parte donde se utilicen las palas PC4000 de Komatsu.

## **8. RECOMENDACIONES**

- Se recomienda para el estudiante que continua con la implementación de esta investigación ampliar la cobertura de uso a valvular similares que se encuentran ubicadas en los equipos Komatsu, con el fin de ampliar el uso de esta herramienta.
- Se recomienda implementar el ajuste de la presión, automatizando la lectura del traductor de presión de la máquina con la herramienta diseñada.

## 9. BIBLIOGRAFIA

- [1] Komat'su Limited. [Online] available  
<http://es.wikipedia.org/wiki/KomatsuLimited>
- [2] Manual de las Palas Hidraulicas PC4000 dhe Komat'su [Online] available  
<http://Komatsulatinoamerica.com/peru/wpcocontent/uploads/sites/24/2016/09/PC4000-6->
- [3] Machinery Health Analyzer AMS 2140 [Online] available  
<https://www.emerson.com/es-es/catalog/ams-a2140-es-es>
- [4] Introducing the Adafruit Bluefruit LE UART Friend [Online] available  
<https://learn.adafruit.com/introducing-the-adafruit-bluefruit-le-uart-friend/introduction>
- [5] Encoder rotativo [Online] available <http://msrobotics.net/index.php/laboratorio-ard/245-uso-de-encoder-con-arduino>
- [6] Servo motor rotation continua 360° piñones metalicos [Online]  
<https://ssdielect.com/robotica/3176-spt54351v-35kg-360-1.html>
- [7] Torquimetro analogo para medir la maxima torsion de la valvula. [Online]  
<https://www.msdirect.com/product/details/00888438?mscNew=true&fa=true>
- [8] Software Autodesk [Online] <https://manage.autodesk.com/cep/#products-services/all>
- [9] Software Orcad [Online] <https://www.orcad.com/resources/orcad-downloads>
- [10] Servomotor-Clases de servomotores [Online]  
<https://www.cursosaula21.com/que-es-un-servomotor/>