



---

---

**INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR  
DE ATLIXCO**

*Organismo Público Descentralizado del Gobierno del Estado de Puebla*

**NOMBRE DEL TRABAJO**  
**DISEÑO MECÁNICO DE UN ROBOT COLABORATIVO  
MÓVIL USANDO UN SISTEMA DE ENGRANAJES  
PLANETARIOS**

**OPCIÓN**

**TESIS**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**Ingeniero Mecatrónico**

PRESENTA:

**Ángel De la Cruz Martínez**

**ASESOR: Dra. Mariana Natalia Ibarra Bonilla**

ATLIXCO, PUE. SEPTIEMBRE DE 2022

## RESUMEN

El presente informe de tesis tiene como objetivo presentar el proceso de diseño de la estructura mecánica de un robot móvil colaborativo (Cobot). Los Cobots están diseñados especialmente para interactuar con humanos en un espacio de trabajo compartido sin necesidad de instalar vallas de seguridad. Las aplicaciones de los robots colaborativos son extensas, algunos de los ejemplos son clasificación de piezas, seguimiento y trazado de rutas, actividades como dispersarse, reunirse, realización de búsquedas y en ambientes industriales estos robots también permiten obtener una respuesta rápida ante la detección de riesgos que garantiza la seguridad física del personal y equipos.

Entonces, este proyecto es una propuesta para diseñar la estructura mecánica de un robot móvil el cual monte un brazo robot colaborativo en software de diseño asistido por computadora (CAD). El brazo robot es de seis ejes y cada eje cuenta con un sistema de engranaje planetarios.

Este proyecto representa la primera etapa de desarrollo de proyecto de investigación financiado por el Tecnológico Nacional de México (TecNM) 2022, el cual consiste en desarrollar aplicaciones de Cobots móviles, haciendo uso de tecnologías actuales como microcontroladores ARM, sistemas de comunicación utilizados en IoT y la industria 4.0.

## **ABSTRACT**

This thesis report aims to present the design process of the mechanical structure of a collaborative mobile robot (Cobot). Cobots are specially designed to interact with humans in a shared workspace without the need to install security fences. The applications of collaborative robots are extensive, some of the examples are classification of parts, tracking and tracing of routes, activities such as dispersing, meeting, conducting searches and in industrial environments these robots also allow a rapid response to the detection of risks that guarantees the physical safety of personnel and equipment.

So, this project is a proposal to design the mechanical structure of a mobile robot which mounts a collaborative robot arm in computer-aided design (CAD) software. The robot arm has six axes and each axis has a planetary gear system.

This project represents the first stage of development of a research project funded by the National Technological Institute of Mexico (TecNM) 2022, which consists of developing mobile Cobot applications, making use of current technologies such as ARM microcontrollers, communication systems used in IoT and industry 4.0.

## **AGRADECIMIENTOS O DEDICATORIA**

Gracias a Dios por haberme permitido llegar hasta donde estoy el día de hoy. Doy un gran paso en mi vida, recibo la mejor herencia que mis padres me han dado, agradezco a mi padre Elías Mauricio De la cruz Aguirre que en paz descansa, por haberme enseñado a nunca rendirme, a los esfuerzos y sacrificios que siempre hizo porque yo saliera adelante, a enseñarme a ser trabajador, honrado, honesto y sencillo , a enfrentarme a los problemas por lo más difíciles que fueran, a enseñarme que se puede ser feliz sin cosas materiales, a mi madre Valvina Martínez Gonzales por siempre estar pendiente de mis desvelos, por darme los mejores consejos, por darme palabras de aliento cuando sentía que ya no podía ,por demostrarme su amor en cada momento, su apoyo incondicional y sus bendiciones en cada paso que eh dado, a mis hermanos Yessica De la cruz Martínez y José Elías De la cruz Martínez por ser los mejores amigos y compañeros de toda la vida, por darme ánimos y apoyo para seguir adelante, por dejarme compartir los mejores momentos con ellos y por darme su amor y cariño en todo momento. A ustedes les agradezco por ser el motivo que impulsa mis sueños, metas y ganas de salir adelante.

También agradezco a mis asesores de tesis, por su apoyo y tiempo dedicado, ya que sin sus conocimientos no hubiera podido resolver los problemas y dudas que se me presentaron a lo largo de este trabajo. Gracias Dra. Mariana Natalia Ibarra Bonilla por demostrarme que su trabajo como docente no solo fue prepararme durante mi formación académica, fue compartir sus conocimientos, su paciencia, su amistad, sus consejos y su confianza depositada en mí para desarrollar proyectos con usted, y más aún por esos regaños para poder superarme académicamente y hacerme demostrar a mí mismo que la capacidad de realizar las cosas depende mucho de la constancia y perseverancia.

Al Instituto Tecnológico Superior de Atlixco y sus docentes por brindarme la oportunidad de prepararme profesionalmente compartiendo sus conocimientos y experiencia profesional.

# ÍNDICE GENERAL

## Tabla de contenido

Resumen.....	i
ABSTRACT .....	ii
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I. PROTOCOLO DE INVESTIGACIÓN .....	3
<b>1.1. Planteamiento del problema.....</b>	<b>3</b>
<b>1.2. Justificación .....</b>	<b>4</b>
<b>1.3. Objetivo General.....</b>	<b>4</b>
<b>1.4. Objetivos específicos.....</b>	<b>4</b>
<b>1.5. Alcances del proyecto .....</b>	<b>5</b>
<b>1.6. Limitación del proyecto .....</b>	<b>5</b>
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO .....	6
<b>2.1 Robots Colaborativos .....</b>	<b>6</b>
<b>2.2 MyCobot-Pi by Elephant Robotic .....</b>	<b>7</b>
<b>2.3 Sistemas en engranajes planetarios.....</b>	<b>8</b>
<b>2.3.1 Relación entre los engranajes en un sistema de engranajes planetarios</b> .....	<b>10</b>
<b>2.4 El método de elementos finitos (MEF o FEM) .....</b>	<b>12</b>
<b>2.4.1 Aplicación del método .....</b>	<b>13</b>

<b>2.4.2 Funciones de interpolación</b> .....	15
<b>2.5 Diseño asistido por computadora</b> .....	18
<b>2.4.1 Introducción al CAD/CAM.</b> .....	19
<b>CAPÍTULO III. DESARROLLO</b> .....	21
<b>3.1 Cálculos de la relación de transmisión de engranajes planetarios</b> .....	21
<b>3.2 Características Generales del sistema</b> .....	22
<b>3.3 Diseño del sistema de engranajes planetarios</b> .....	23
<b>3.4 Desarrollo del modelo de engranajes</b> .....	25
<b>3.4.1 Sketch (Croquis)</b> .....	26
<b>CAPÍTULO IV. RESULTADOS</b> .....	34
<b>CONCLUSIONES</b> .....	35
<b>REFERENCIAS</b> .....	36

## INTRODUCCIÓN

Los robots colaborativos (CoBots) son robots que pueden trabajar de forma segura junto con trabajadores humanos. Los CoBots representan una forma de tecnología de automatización avanzada en la fabricación y se espera que se conviertan en estándar en los sistemas de producción. Tienen el potencial de transformar los procesos de fabricación y ensamblaje.

Hasta hace poco, los Cobots no estaban contemplados en la educación de ingeniería, sin embargo a medida de que el uso de estos aumenta en la industrial se ha presentado la necesidad de incluir en los programas educativos aplicaciones con Cobots. Por esto, es importante acercar a los estudiantes a las tecnologías que se manejan para aplicaciones con Cobots e interesarlos en la investigación tecnológica, de tal manera que no solo sean operadores, sino que cumplan con las características de un diseñador tecnológico.

El objetivo del presente trabajo es presentar el diseño en CAD la estructura mecánica de un robot colaborativo (Cobot) usando un sistema de engranajes planetarios para las articulaciones basado en el diseño del MyCobot-Robot de la empresa Elephant Robotic y para su montaje sobre una plataforma móvil. Se describe el proceso de las piezas del diseño mecánico y para validar se presenta un análisis de esfuerzos basado en el método de elementos finitos realizado en el software de diseño asistido por computadora SolidWorks.

Este trabajo corresponde a la primera etapa de desarrollo de un proyecto en el cual se pretende implementar aplicaciones de los robots colaborativos en robots móviles, haciendo uso de tecnologías actuales, como microcontroladores ARM y sistemas de comunicación utilizados en el Internet de las Cosas (IoT) y la industria 4.0.

La organización del documento es siguiente el capítulo 1 describe el protocolo de investigación que contiene el planteamiento del problema, justificación, objetivos, alcances y limitaciones que conforman el trabajo de tesis. En el capítulo 2 se presentará el marco teórico, en donde se muestra una descripción los conceptos básicos que se requieren para la comprensión del desarrollo del proyecto.

En el capítulo 3 se detallará el procedimiento y descripción de las actividades realizadas para la implementación de este proyecto. Se explicará el proceso de diseño y el mecanismo de engranajes planetarios en SolidWorks. El capítulo 4 describirá las pruebas de desempeño del sistema y los resultados obtenidos en las simulaciones en SolidWorks. Finalmente, se presentarán las conclusiones y las referencias.

# CAPÍTULO I. PROTOCOLO DE INVESTIGACIÓN

En este primer capítulo se presenta el protocolo de investigación que incluye el planteamiento del problema, justificación, objetivos, alcances y la limitación que conforman el trabajo de tesis desarrollado.

## 1.1. Planteamiento del problema

Este proyecto se origina a partir de un proyecto de investigación, financiado por el TecNM, el cual tiene como objetivo desarrollar un ecosistema de robots móviles colaborativos educativos para la aplicación de algoritmos de sistemas inteligentes. Los robots colaborativos o Cobots son robots que pueden trabajar de forma segura junto con trabajadores humanos por lo que su diseño debe ser ligero, flexible y de reducido tamaño. Estos robots generalmente son fabricados en forma de brazos robóticos que se incluyen dentro de las cadenas de manufactura de las industrias, pero con la diferencia de estos robots no emplean barreras de protección lo que permite una interacción más directa con el operador humano ampliando de esta manera las posibilidades de ejecutar una tarea con múltiples estrategias.

Por ello, se requiere que la estructura general del cuerpo del Cobot sea compacta y con un diseño modular, de tal manera que el montaje sea sencillo y de fácil mantenimiento. De acuerdo con la búsqueda de antecedentes se propone como referencia el Mycobot-Robot colaborador de la empresa Elephant Robotic [1], el cual cuenta con 6 ejes, 350 mm de altura y un rango de funcionamiento de 280 mm. Dado que el Cobot persigue aplicaciones educativas, el tamaño es reducido, por ello se propone incorporar un sistema de engranaje planetarios para cada articulación para mantener el torque.

## **1.2. Justificación**

Hasta hace poco, los Cobots no estaban contemplados en la educación de ingeniería, sin embargo a medida de que el uso de estos aumenta en la industrial se ha presentado la necesidad de incluir en los programas educativos aplicaciones con Cobots. Por esto, es importante acercar a los estudiantes a las tecnologías que se manejan para aplicaciones con Cobots e interesarlos en la investigación tecnológica, de tal manera que no solo sean operadores, sino que cumplan con las características de un diseñador tecnológico.

Este trabajo corresponde a la primera etapa de desarrollo de un proyecto en el cual se pretende implementar aplicaciones de los robots colaborativos en robots móviles, haciendo uso de tecnologías actuales, como microcontroladores ARM y sistemas de comunicación utilizados en el Internet de las Cosas (IoT) y la industria 4.0.

## **1.3. Objetivo General**

Diseñar en CAD la estructura mecánica de un robot colaborativo (Cobot) usando un sistema de engranajes planetarios para las articulaciones basado en el diseño del MyCobot-Robot de la empresa Elephant Robotic y para su montaje sobre una plataforma móvil.

## **1.4. Objetivos específicos**

- I. Diseñar en el software SolidWorks la estructura mecánica del Cobot, la cual corresponde a un brazo robótico de 6 GDL, usando el sistema de engranaje planetario para cada articulación.
- II. Diseñar en el software SolidWorks la estructura mecánica de la plataforma móvil sobre la cual se montará el Cobot.

- III. Realizar las pruebas de ensamble y de movimiento virtual simulando los mecanismos en SolidWorks para validar el funcionamiento del mecanismo.
- IV. Realizar el análisis de elementos mecánicos de las piezas que conforman el Cobot y la estructura móvil que lo soportará.

#### **1.5. Alcances del proyecto**

- El diseño realizado es la base para la fabricación de los Cobot para el proyecto de investigación al que corresponde este trabajo, en la que los estudiantes podrán incorporarlo a las prácticas y se involucren en las aplicaciones de robots colaborativos.
- El impacto de este proyecto se encuentra en “El acceso universal al conocimiento que articulen desde su capacidad científica y técnica proyectos para instancias del país en el sector públicos” que contempla el Plan Nacional de Desarrollo 2021-2024.

#### **1.6. Limitación del proyecto**

- El presente trabajo no abarca la fabricación y ensamble del Cobot, por lo que los resultados presentados serán validados a través del software de diseño por computadora SolidWorks.

## CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

En este segundo capítulo se presenta la recopilación de los temas principales relacionados con el desarrollo de este proyecto de tesis.

### 2.1 Robots Colaborativos

A partir de la Cuarta Revolución Industrial o Industria 4.0 los robots colaborativos o Cobots se han introducido de forma masiva dentro de los procesos industriales. Los Cobots son sistemas diseñados para desempeñar funciones complementarias a las que realiza un operador humano dentro de un ambiente industrial o de trabajo. Las tareas de estos robots deben realizarse de manera segura para los humanos, es por ello que integran sensores y sistemas de seguridad avanzados que eviten posibles colisiones que puedan dañar al obrero. Estos robots generalmente son fabricados en forma de brazos robóticos que se incluyen dentro de las cadenas de manufactura de las industrias, pero con la diferencia de estos robots no emplean barreras de protección lo que permite una interacción más directa con el operador humano ampliando de esta manera las posibilidades de ejecutar una tarea con múltiples estrategias. Por ello, una de las razones de su éxito es la combinación de fuerza y resistencia del robot con la destreza y flexibilidad del humano [2, 3].

Los robots colaborativos entran dentro del grupo de robots de servicio. El objetivo de estos robots es ayudar y facilitar el trabajo del usuario, de manera que puede realizar los trabajos monótonos sin ningún tipo de fatiga. Dentro de los robots de servicio se dividen dos subcategorías, robots de servicio profesional y robots de servicio de uso personal. Los robots de servicio profesionales son los que interactúan junto a los trabajadores

(usuarios). Los robots de servicio de uso personal son aquellos que poseen un nivel de autonomía complejo, rico y próximo al HRI (Human-Robot Interaction). Las principales características de un Cobot son la colaboración, la automatización y la versatilidad [4, 5].

- **Colaboración.** Los Cobots fueron creados para ayudar a las personas, por lo tanto, la interacción con los operarios es fundamental.
- **Automatización.** Un Cobot es capaz de realizar tareas de automatización, logrando disminuir el tiempo que se necesita para efectuar el trabajo a realizar.
- **Versatilidad.** Los Cobots pueden ser integrados en cualquier tipo de empresa llevando a cabo distintos procesos industriales.

## 2.2 MyCobot-Pi by Elephant Robotic

El robot colaborativo de seis ejes MyCobot-Pi, presentado en la Figura 2.1, es un brazo robótico inteligente multifuncional y ligero diseñado y desarrollado por Elephant robotic. Pertenece al "MyCobot serie" Productos y adopta un microprocesador Raspberry Pi. Es uno de los robots principales de Elephant robotics y se utiliza para la educación de la inteligencia artificial y la investigación robótica, así como la ecología eléctrica de pequeños negocios.

El peso neto de Mycobot-Pi es de 850g, la carga útil es de 250g y el rango de funcionamiento es de 280 mm. Se trata de un robot colaborativo compacto pero potente. La estructura general del cuerpo es compacta y el peso neto es de solo 850g, lo que es muy conveniente de llevar. El diseño es modular, con pocas piezas de repuesto y bajo costo de mantenimiento.

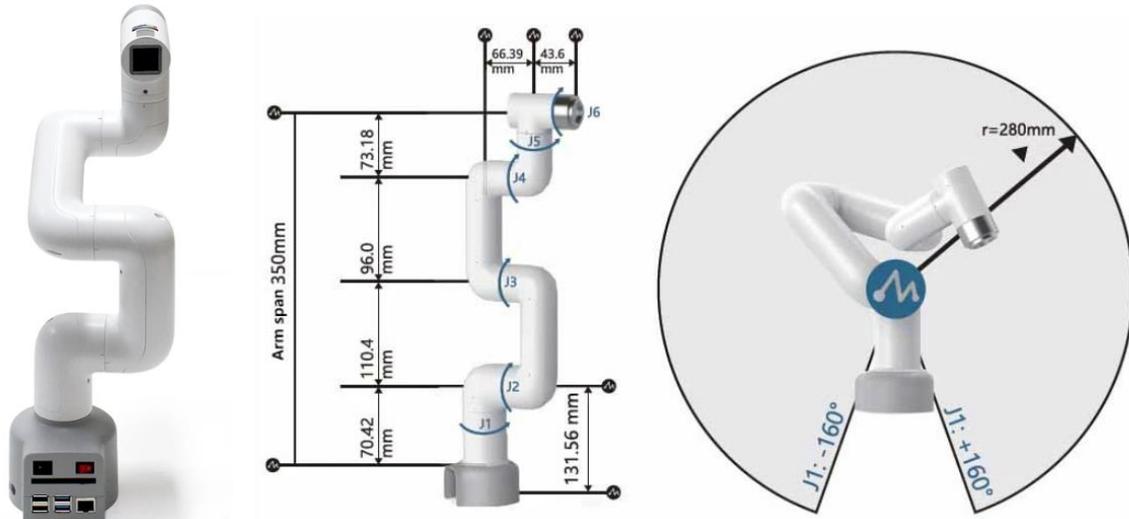


Figura 2.1. Robot Colaborativo MyCobot-Py [1].

### 2.3 Sistemas en engranajes planetarios

Los engranajes planetarios es un conjunto de engranajes con el eje de entrada y el eje de salida alineados. Se utiliza una caja de engranajes planetarios para transferir el mayor par en la forma más compacta (conocida como densidad de par) [6].

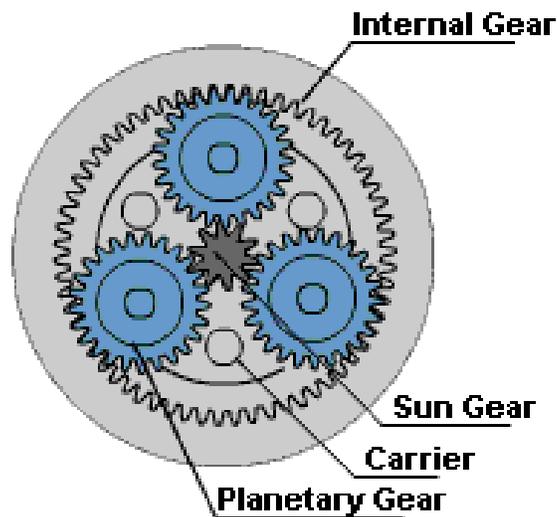


Figura 2.2. Sistema de engranaje planetarios [3].

Los engranajes planetarios a menudo se usan cuando el espacio y el peso son un problema, pero se necesita una gran cantidad de reducción de velocidad y torque. Los sistemas de engranajes planetarios pueden producir una gran cantidad de torque porque la carga se comparte entre múltiples engranajes planetarios. Esta disposición también crea más superficies de contacto y un área de contacto más grande entre los engranajes que un sistema de engranaje de eje paralelo tradicional. Debido a esto, en la carga se distribuye de manera más uniforme y, por lo tanto, los engranajes son más resistentes al daño.

La forma más básica de engranaje planetario implica tres conjuntos de engranajes con diferentes grados de libertad. Los engranajes planetarios giran alrededor de los ejes que giran alrededor de un engranaje solar, que gira en su lugar. Una corona dentada une los planetas en el exterior y está completamente fija. La concetricidad del planeta que se agrupa con el sol y los engranajes anulares significa que el par se realiza a través de una línea recta. Muchos trenes de potencia son «cómodos» alineados en línea recta, y la ausencia de ejes compensados no solo disminuye el espacio, sino que elimina la necesidad de redirigir la potencia o reubicar otros componentes.

En una configuración planetaria simple, la potencia de entrada gira el engranaje solar a alta velocidad. Los planetas, espaciados alrededor del eje central de rotación, se engranan con el sol y con la corona dentada fija, por lo que se ven obligados a orbitar a medida que ruedan. Todos los planetas están montados en un solo miembro giratorio, llamado jaula, brazo o portador. A medida que el porta planetas gira, ofrece una salida de baja velocidad y alto par.

### 2.3.1 Relación entre los engranajes en un sistema de engranajes planetarios

Para determinar la relación entre el número de dientes del engranaje solar ( $Z_a$ ), los engranajes planetarios B ( $Z_b$ ) y el engranaje interno C ( $Z_c$ ) y el número de engranajes planetarios  $N$  en el sistema, estos parámetros deben satisfacer las siguientes tres condiciones:

#### Condición No.1

$$Z_c = Z_a + 2Z_b \quad (2.1)$$

Esta es la condición necesaria para que las distancias centrales de los engranajes coincidan. Dado que la ecuación es verdadera solo para el sistema de engranajes estándar, es posible variar el número de dientes usando diseños de engranajes desplazados de perfil.

Para usar engranajes desplazados de perfil, es necesario hacer coincidir la distancia central entre el sol A y los engranajes del planeta B,  $a_1$ , y la distancia central entre el planeta B y los engranajes internos C,  $a_2$ . Tal como se observa en la Figura 2.3.

$$a_1 = a_2 \quad (2.2)$$

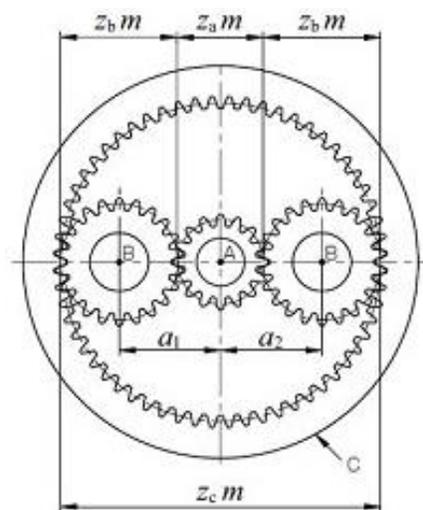


Figura 2.3. Condición No. 1 del sistema de engranaje planetarios [6].

### Condición No.2

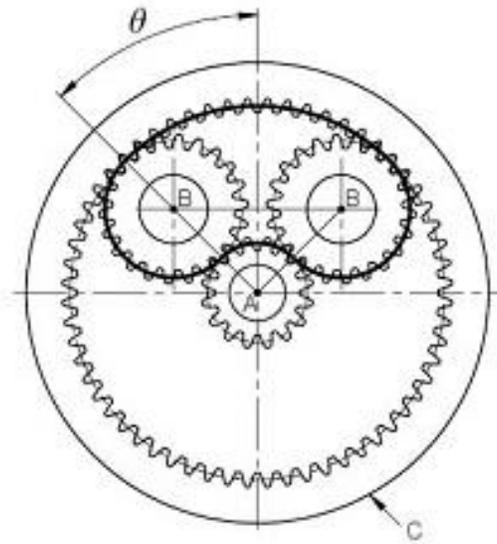
Esta es la condición necesaria para colocar engranajes planetarios espaciados uniformemente alrededor del engranaje solar.

$$\frac{Z_a + Z_c}{N} = \text{Integer} \quad (2.3)$$

Si se desea una colocación desigual de engranajes planetarios, entonces se debe satisfacer la ecuación (2.4):

$$\frac{(Z_a + Z_c) \theta}{180} = \text{Integer} \quad (2.4)$$

donde  $\theta$  es la mitad del ángulo entre engranajes planetarios adyacentes en grados.



**Figura 2.4.** Condición No. 2 del sistema de engranaje planetarios [6].

### Condición No.3

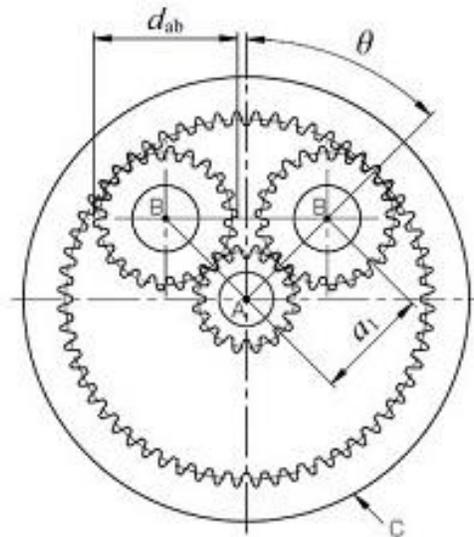
$$Z_b + 2 < (Z_a + Z_b) \sin \frac{180^\circ}{N} \quad (2.5)$$

Satisfacer esta condición asegura que los engranajes planetarios adyacentes puedan operar sin interferir entre sí. Esta es la condición que debe cumplirse para un diseño de engranaje estándar con la misma colocación de engranajes planetarios. Para otras condiciones, el sistema debe satisfacer la relación:

$$d_{ab} < 2a_1 \sin \theta \quad (2.6)$$

Donde:

- $d_{ab}$  es el diámetro de la punta de los engranajes planetarios.
- $a_1$  es la distancia central entre el sol y los engranajes planetarios.



**Figura 2.5.** Condición No. 3 del sistema de engranaje planetarios [6].

## 2.4 El método de elementos finitos (MEF o FEM)

El método de los elementos finitos es un método de aproximación de problemas continuos, de tal forma que [7]:

- El continuo se divide en un número finito de partes, “**elementos**”, cuyo comportamiento se especifica mediante un número finito de parámetros asociados

a ciertos puntos característicos denominados “**nodos**”. Estos nodos son los puntos de unión de cada elemento con sus adyacentes.

- La solución del sistema completo sigue las reglas de los problemas discretos. El sistema completo se forma por ensamblaje de los elementos.
- Las incógnitas del problema dejan de ser funciones matemáticas y pasan a ser el valor de estas funciones en los nodos.
- El comportamiento en el interior de cada elemento queda definido a partir del comportamiento de los nodos mediante las adecuadas **funciones de interpolación o funciones de forma**.

El MEF, por tanto, se basa en transformar un cuerpo de naturaleza continua en un modelo discreto aproximado, esta transformación se denomina discretización del modelo. El conocimiento de lo que sucede en el interior de este modelo del cuerpo aproximado, se obtiene mediante la interpolación de los valores conocidos en los nodos. Es por tanto una aproximación de los valores de una función a partir del conocimiento de un número determinado y finito de puntos [8].

#### **2.4.1 Aplicación del método**

La forma más intuitiva de comprender el método, al tiempo que la más extendida, es la aplicación a una placa sometida a tensión plana. El MEF se puede entender, desde un punto de vista estructural, como una generalización del cálculo matricial de estructuras al análisis de sistemas continuos. De hecho el método nació por evolución de aplicaciones a sistemas estructurales.

Un elemento finito viene definido por sus nodos  $(i, j, m)$  y por su contorno formado por

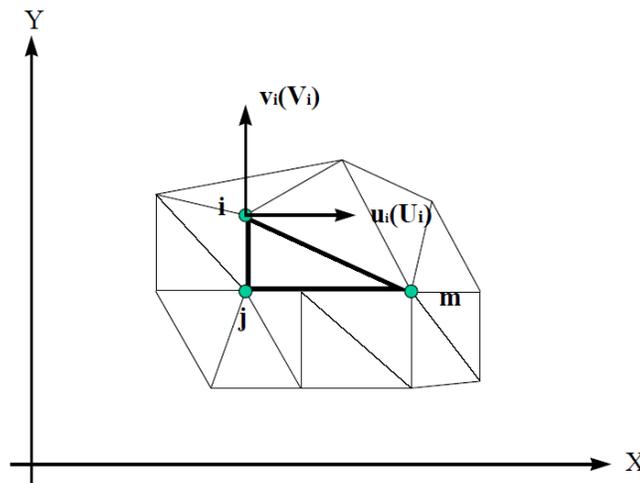
líneas que los unen. Los desplazamientos  $\mathbf{u}$  de cualquier punto del elemento se aproximan por un vector columna  $\vec{u}$ .

$$\vec{u} = \sum N_i \mathbf{a}_i^e = [N_i \ N_j \ \dots] \begin{pmatrix} \vec{a}_i \\ \vec{a}_j \\ \dots \end{pmatrix} = N \mathbf{a}^e \quad (2.7)$$

$N$  son funciones de posición dadas (funciones de forma) y  $\mathbf{a}^e$  es un vector formado por los desplazamientos nodales de los elementos considerados. Para el caso de tensión plana:

$$\mathbf{u} = \begin{Bmatrix} u(x, y) \\ v(x, y) \end{Bmatrix}, \quad \mathbf{a}_i = \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \end{Bmatrix} \quad (2.8)$$

- $u$ : son los movimientos horizontal y vertical en un punto cualquiera del elemento.
- $\mathbf{a}_i$ : Son los desplazamientos del nodo  $i$ .



**Figura 2.6.** Coordenadas nodales ( $i, j, k$ ) y desplazamientos de los nodos [4].

Las funciones  $N_i, N_j, N_m$ , han de escogerse de tal forma que al sustituir en (2.7) las coordenadas nodales, se obtengan los desplazamientos nodales.

Conocidos los desplazamientos de todos los puntos del elemento, se pueden determinar las deformaciones ( $\epsilon$ ) en cualquier punto. Que vendrán dadas por una

relación del tipo siguiente:

$$\varepsilon = Su \quad (2.9)$$

Siendo  $S$  un operador lineal adecuado. Sustituyendo, la expresión (2.7) en (2.9) se obtiene las expresiones siguientes:

$$\varepsilon = Ba \quad (2.10)$$

$$B = SN \quad (2.11)$$

Suponiendo que el cuerpo está sometido a unas deformaciones iniciales  $\varepsilon_0$  debidas a cambios térmicos, cristalizaciones, etc. y que tiene tensiones internas residuales  $\sigma_0$  la relación entre tensiones y deformaciones en el cuerpo viene dada por:

$$\sigma = D(\varepsilon - \varepsilon_0) + \sigma_0 \quad (2.12)$$

Siendo  $D$  una matriz de elasticidad que contiene las propiedades del material o materiales.

#### 2.4.2 Funciones de interpolación

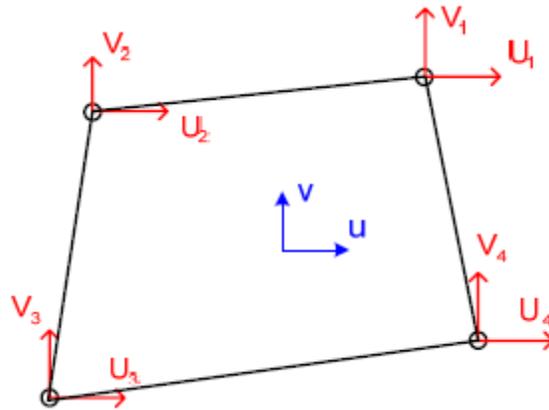
Consideremos un elemento finito cualquiera, definido por un número de nudos  $n$ . Para facilitar la exposición se supondrá un problema de elasticidad plana. Un punto cualquiera del elemento tiene un desplazamiento definido por un vector  $u$ , que en este caso tiene dos componentes:

$$u = \begin{Bmatrix} u(x, y) \\ v(x, y) \end{Bmatrix} \quad (2.13)$$

Los nudos del elemento tienen una serie de grados de libertad, que corresponden a los valores que adopta en ellos el campo de desplazamientos, y que forman el vector denominado  $\delta_e$ . Para el caso plano este vector es:

$$\delta^e = [U_1 \quad V_1 \quad U_2 \quad V_2 \quad \cdots \quad U_n \quad V_n]^T \quad (2.14)$$

En este ejemplo se supone que como deformaciones de los nudos se emplean sólo los desplazamientos, pero no los giros, lo cual es suficiente para elasticidad plana, como se verá más adelante. En otros elementos (p.e. vigas o cáscaras) se emplean además los giros.



**Figura 2.7.** Deformaciones en un elemento finito [9].

El campo de deformaciones en el interior del elemento se aproxima haciendo uso de la hipótesis de interpolación de deformaciones:

$$u = \sum N_i U_i \quad v = \sum N_i V_i \quad (2.15)$$

donde \$N\_i\$ son las funciones de interpolación del elemento, que son en general funciones de las coordenadas \$x, y\$. Nótese que se emplean las mismas funciones para interpolar los desplazamientos \$u\$ y \$v\$, y que ambos desplazamientos se interpolan por separado, el campo \$u\$ mediante las \$U\_i\$ y el campo \$v\$ mediante las \$V\_i\$. Es decir que la misma \$N\_i\$ define la influencia del desplazamiento del nudo \$i\$ en el desplazamiento total del punto \$P\$, para las dos direcciones \$x\$ e \$y\$. La interpolación de deformaciones (2.15) puede ponerse en la forma matricial general:

$$\mathbf{u} = \mathbf{N}\delta^e \quad (2.16)$$

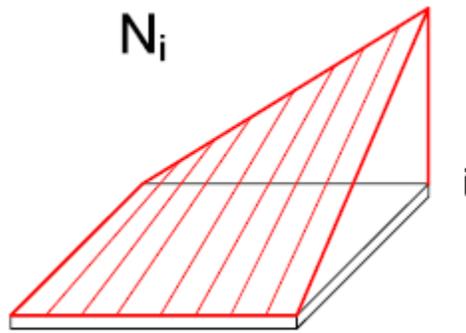
La matriz de funciones de interpolación  $\mathbf{N}$  tiene tantas filas como desplazamientos tenga el punto  $P$  y tantas columnas como grados de libertad haya entre todos los nudos del elemento.

Las funciones de interpolación son habitualmente polinomios, que deben poderse definir empleando las deformaciones nodales del elemento. Por lo tanto se podrán usar polinomios con tantos términos como grados de libertad tenga el elemento. Para problemas de elasticidad la estructura de esta matriz es normalmente del tipo:

$$\mathbf{N} = \left[ \begin{array}{cc|cc|ccc|cc} N_1 & 0 & N_2 & 0 & \dots & 0 & N_n & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & N_2 & 0 & \dots & 0 & N_n \end{array} \right]$$

Sin embargo, el aspecto de esta matriz puede ser distinto para otros elementos, como las vigas o las placas a flexión.

Las funciones de interpolación están definidas únicamente para el elemento, y son nulas en el exterior de dicho elemento. Estas funciones tienen que cumplir determinadas condiciones y aunque éstas se verán en detalle más adelante, con la expresión anterior se puede deducir que la función de interpolación  $N_i$  debe valer 1 en el nudo  $i$  y 0 en los restantes nudos. Esta condición resulta evidente si se tiene en cuenta que los términos del vector  $\delta_e$  son grados de libertad y por lo tanto son independientes, y deben poder adoptar cualquier valor.



**Figura 2.8.** Función de interpolación [9].

## 2.5 Diseño asistido por computadora

El término diseño procede del vocablo italiano 'disegno'. En nuestro contexto se utiliza para caracterizar 'la representación gráfica, de acuerdo con una idea creativa previa, de un objeto artístico o funcional, de un dispositivo mecánico, o de la estructura o funcionamiento de un sistema o proceso'.

El diseño es una actividad que se proyecta hacia la solución de problemas planteados por el ser humano en su adaptación al medio que lo rodea, para la satisfacción de sus necesidades, para lo cual utiliza recursos como la tecnología CAD/CAE/CAM. Estas tecnologías se vienen aplicando a través de los métodos de la ingeniería concurrente.

La técnica más desarrollada en la ingeniería asistida por computador (CAE), es la aplicación de los análisis por elementos finitos (FEA), que con la mejora de los equipos de cómputo se ha convertido en técnicas accesibles para todos los usuarios. Estas técnicas son usadas industrialmente desde el diseño hasta la fabricación consiguiendo optimizar costos, calidad, tiempo, seguridad, etc.

El dibujo y el diseño asistidos por computadora son, hoy en día, una herramienta imprescindible para lograr un diseño competitivo ya que hasta hace unos pocos años,

dichas técnicas eran reservadas a las grandes empresas, o aquellas que tenían un elevado potencial económico y humano.

El conjunto de técnicas asistidas por computadora (CAD/CAM) han experimentado una gran evolución en los últimos años, y pueden ser suficientemente maduras como para aplicarse de forma rentable en prácticamente en todo el proceso de diseño y fabricación de un producto. [4]

#### **2.4.1 Introducción al CAD/CAM.**

CAD/CAM, proceso en el cual se utilizan los ordenadores o computadoras para mejorar la fabricación, desarrollo y diseño de los productos. Éstos pueden fabricarse más rápido, con mayor precisión o a menor precio, con la aplicación adecuada de tecnología informática.

Los sistemas de Diseño Asistido por Ordenador (CAD, acrónimo de Computer Aided Design) pueden utilizarse para generar modelos con muchas, si no todas, de las características de un determinado producto. Estas características podrían ser el tamaño, el contorno y la forma de cada componente, almacenada como dibujos bi y tridimensional. Una vez que estos datos dimensionales han sido introducidos y almacenados en el sistema informático, el diseñador puede manipularlos o modificar las ideas del diseño con mayor facilidad para avanzar en el desarrollo del producto. Además, pueden compartirse e integrarse las ideas combinadas de varios diseñadores, ya que es posible mover los datos dentro de redes informáticas, con lo que los diseñadores e ingenieros situados en lugares distantes entre sí pueden trabajar como un equipo.

Los sistemas CAD también permiten simular el funcionamiento de un producto. Hacen posible verificar si un circuito electrónico propuesto funcionará tal y como está previsto,

por ejemplo: si un puente será capaz de soportar las cargas pronosticadas sin peligro o incluso si una salsa de tomate fluirá adecuadamente desde un envase de nuevo diseño. Cuando los sistemas CAD se conectan a equipos de fabricación también controlados por ordenador conforman un sistema integrado CAD/CAM (CAM, acrónimo de Computer Aided Manufacturing).

La Fabricación Asistida por Ordenador ofrece significativas ventajas con respecto a los métodos más tradicionales de controlar equipos de fabricación con ordenadores en lugar de hacerlo con operadores humanos. Por lo general, los equipos CAM conllevan la eliminación de los errores del operador y la reducción de los costes de mano de obra. Sin embargo, la precisión constante y el uso óptimo previsto del equipo representan ventajas aún mayores. Por ejemplo, las cuchillas y herramientas de corte se desgastarán más lentamente y se estropearían con menos frecuencia, lo que reduciría todavía más los costes de fabricación. Frente a este ahorro pueden aducirse los mayores costes de bienes de capital o las posibles implicaciones sociales de mantener la productividad con una reducción de la fuerza de trabajo. Los equipos CAM se basan en una serie de códigos numéricos, almacenados en archivos informáticos, para controlar las tareas de fabricación.

## CAPÍTULO III. DESARROLLO

En este tercer capítulo se presenta el mecanismo de un sistema planetario mediante el método de elementos finitos.

### 3.1 Cálculos de la relación de transmisión de engranajes planetarios

Por conveniencia, vamos a llamar R, S y P al número de dientes de los engranajes.

R      Número de dientes en la corona.

S      Número de dientes en el planeta (engranaje central).

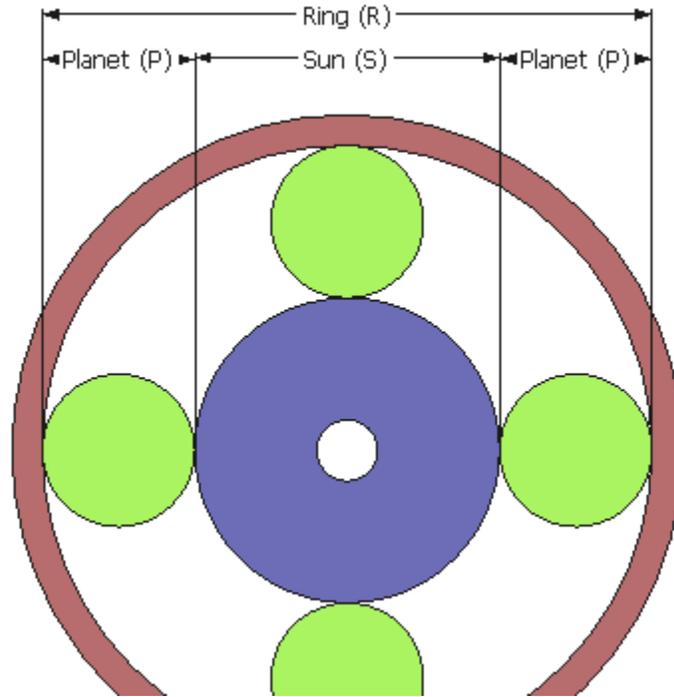
P      Número de dientes en los engranajes satélite.

La primera condición para que un engranaje planetario funcione es que todos los dientes tengan el mismo módulo, o el mismo paso circular. Esto asegura que los dientes encajan.

La segunda condición es:

$$R = 2 \times P + S$$

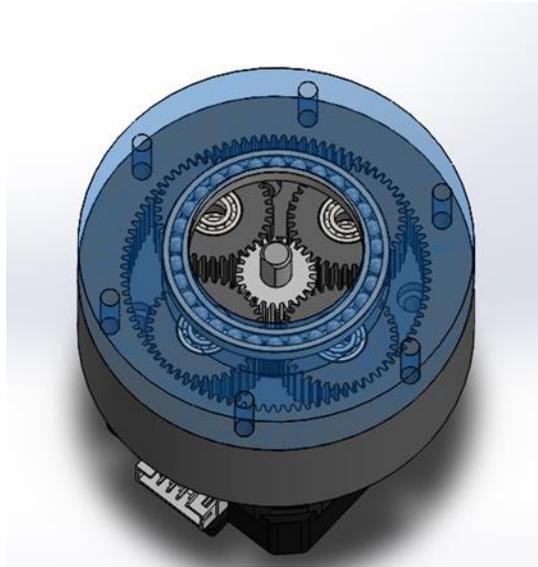
Es decir, el número de dientes de la corona es igual al número de dientes en el engranaje central más dos veces el número de dientes en los engranajes satélites.



**Figura 3.1.** Suma de los diámetros del engranaje

### 3.2 Características Generales del sistema

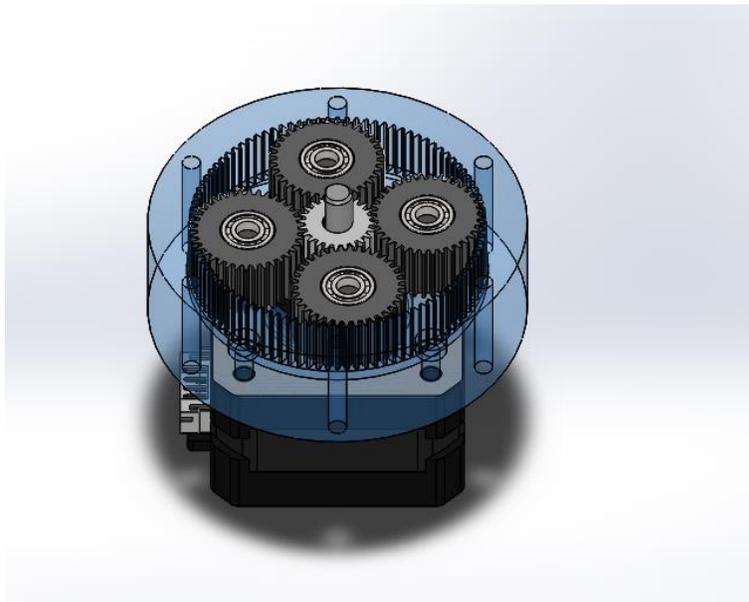
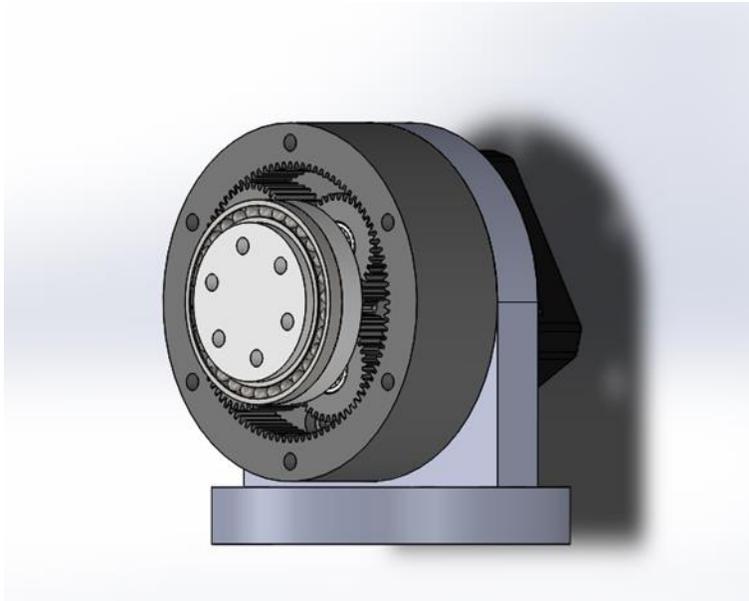
El sistema desarrollado lleva por nombre diseño mecánico de un robot colaborativo móvil usando un sistema de engranajes planetarios, el cual consiste en un reductor de caja de engranajes planetarios compatible con el motor NEMA 17. Tiene una relación de reducción de 1:3.333; compuesto de 63 Dientes anulares, 27 Dientes solares y 18 Dientes planetarios; Además de las limas incluidas, acoplados con un perno M8, una tuerca M8 y un rodamiento de 22 mm de diámetro exterior, 8 mm de diámetro interior, 7 mm de diámetro exterior, junto con un eje de motor NEMA17. La lubricación es esencial: no se debe hacer funcionar los engranajes en seco o los planetas se unirán al portador. Aplicar mucha grasa lubricante. La fuerza que es generada por el sol acoplado al eje del motor es transmitida hacia los engranes planetarios, el cual permitirá a las articulaciones del brazo robot una mejor precisión de movimientos.



**Figura 3.2.** Sistema de engranajes planetarios

### **3.3 Diseño del sistema de engranajes planetarios**

El engranaje epicicloidial se diseñó ya que la ventaja fundamental de los engranajes planetarios frente a los engranajes utilizados por las cajas de cambio manuales es que su forma es más compacta y permiten un reparto de par en distintos puntos a través de los satélites, pudiendo transmitir pares más elevados.



### **3.4 Desarrollo del modelo de engranajes**

El diseño mecánico se realizó en el software SolidWorks. Se decidió utilizar este software, pues a diferencia de otros softwares de diseño CAD/CAM como Catia V5, NX de Siemens, permite digitalizar el proceso productivo, desde el diseño de componentes, hacer montajes virtuales hasta la generación de instrucciones para la fabricación, permite crear y simular posibles fallas y deformaciones del sistema tanto mecánicas, estáticas, etc.

Una vez diseñado el modelo mecánico se procede a realizar el ensamblaje de las piezas realizadas. Para cada función se describirá el proceso de diseño y se explicará la función del análisis de elementos finitos.

Al iniciar SolidWorks se crea un nuevo proyecto, este proceso despliega una ventana en donde tendremos las opciones de crear pieza, ensamblaje o dibujo, en este caso se utilizaron las dos primeras funciones, una vez dentro de la zona de trabajo se procede a realizar un sketch en donde podremos dibujar y dimensionar nuestra pieza a extruir, para realizar el sólido de la pieza.

A continuación, se presenta el desarrollo de la pieza en SolidWorks, figura 2.7.

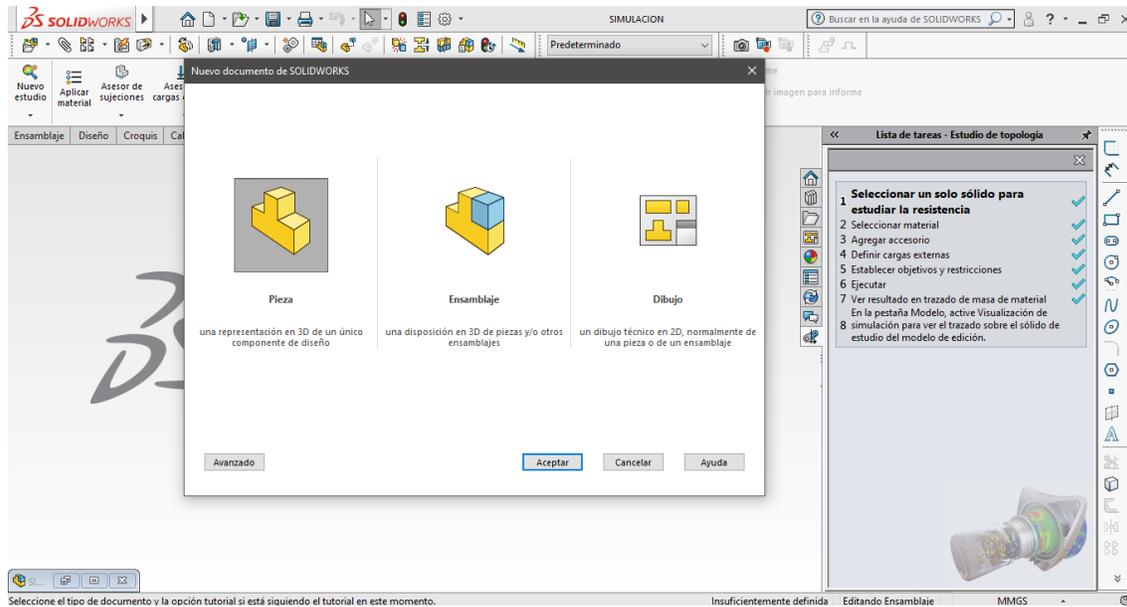


Figura 3.3. Vista para el desarrollo de pieza en SolidWorks

### 3.4.1 Sketch (Croquis)

En esta parte se puede crear un croquis 3D con referencia a planos, ejes o superficies XY, YZ y ZX. Esta herramienta se encarga de identificar y, cuando es posible, reparar los croquis con errores. Esta herramienta puede reparar de forma automática: Entidades de croquis pequeñas cuya longitud de cadena es inferior que dos veces el valor de separación máximo permitido.

#### 3.4.1.1 Operaciones Extruir saliente/base corte

Estas operaciones nos ayudan a realizar las piezas que conforman el sistema planetario que necesitamos para al final realizar el ensamble de piezas.

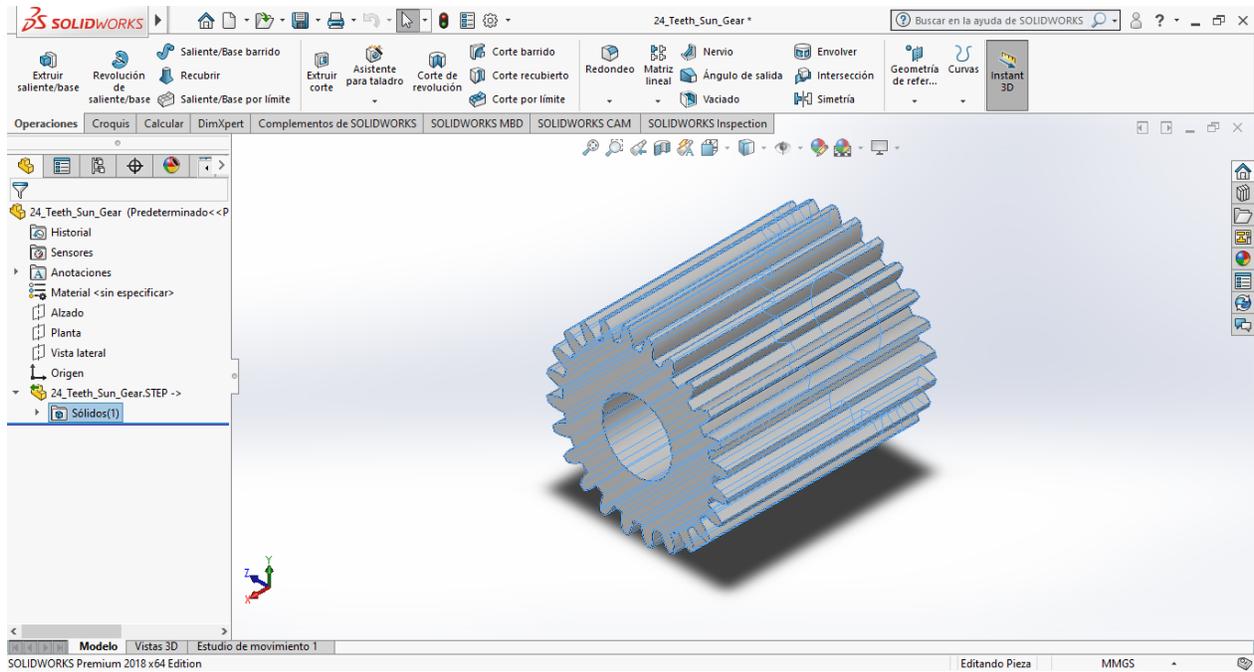
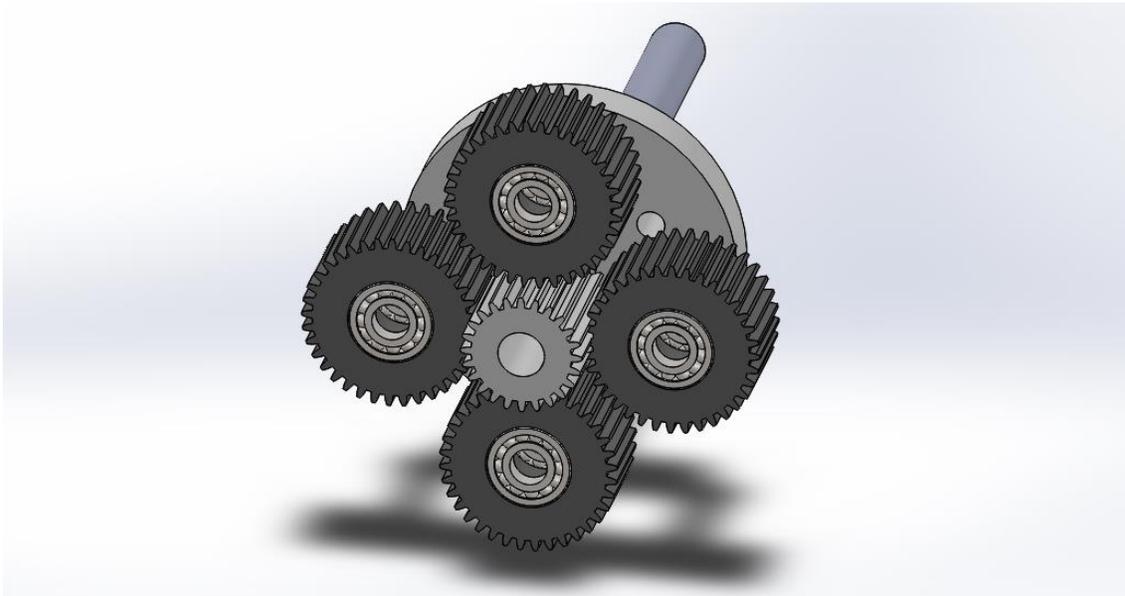


Figura 3.4. Vista de la pieza generada a partir de las operaciones

### 3.4.1.2 Propiedades de masa de SIMULACION

En esta parte se calcularon las propiedades físicas del sistema de engranajes planetarios seleccionados incluidos en un estudio de Simulación.



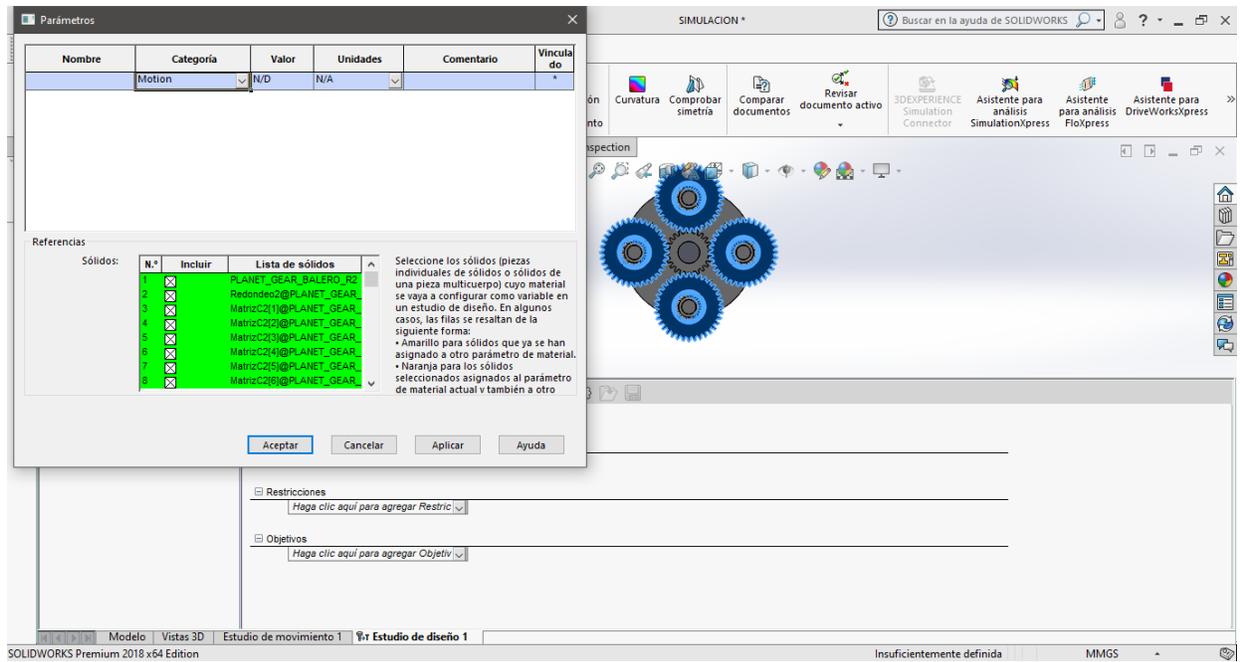


Figura 3.5. Análisis de masa

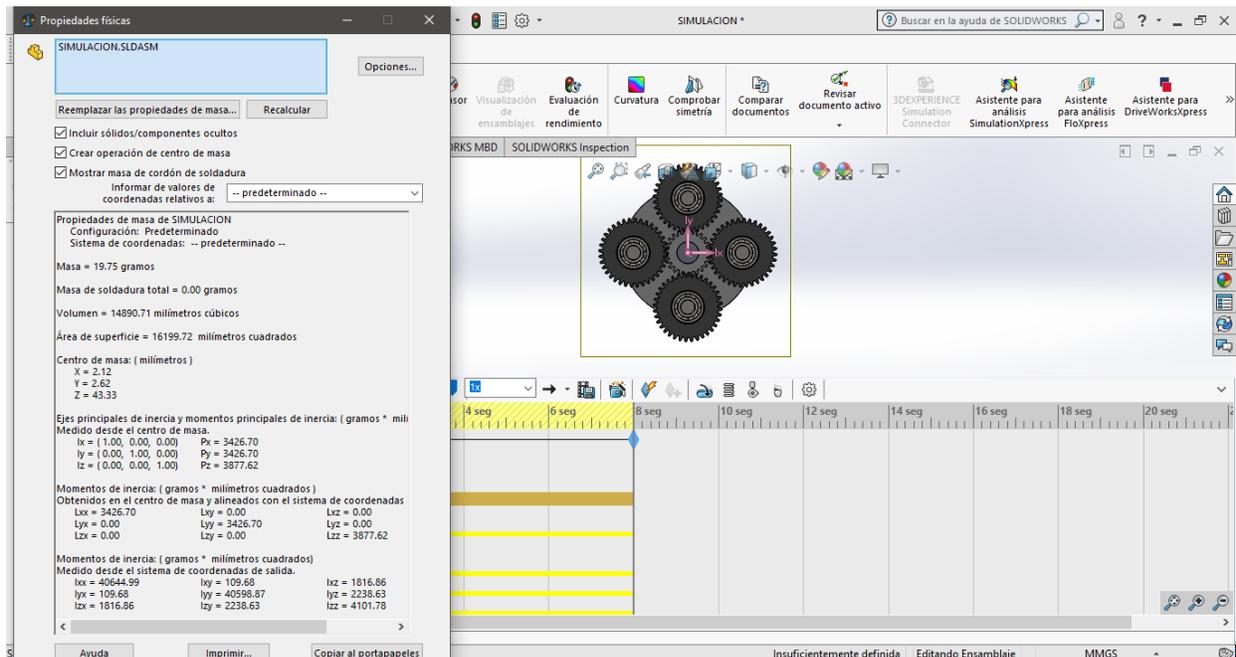
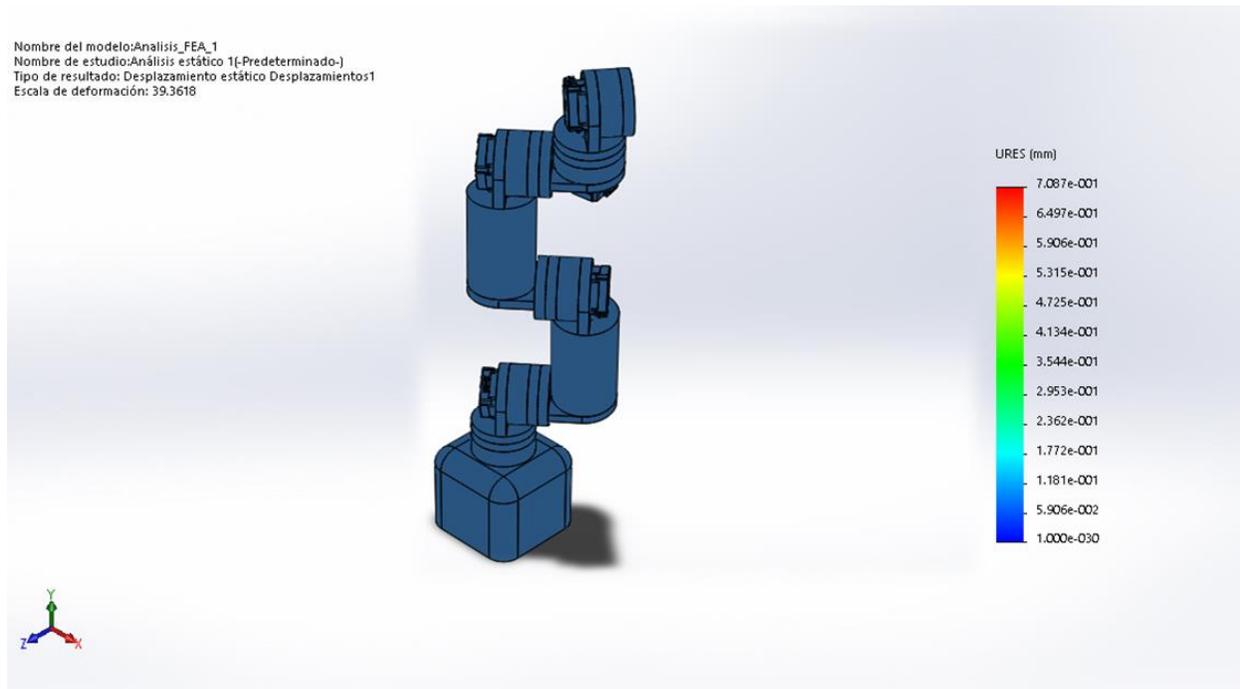


Figura 3.6. Resultados del análisis de masa

### 3.4.1.3 Análisis de Elementos Mecánicos a brazo robótico

Como podemos observar en el análisis de elementos mecánicos La figura 3.7 muestra la distribución de tensiones de von Mises en el ensamble general del brazo para la posición de contacto desde la base, obtenida a partir del análisis de elementos finitos propuestos.

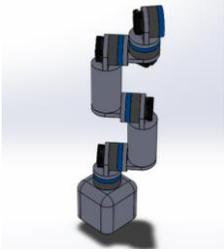


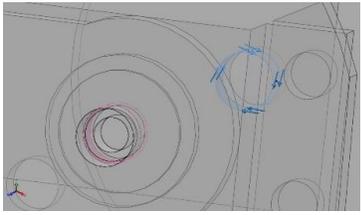
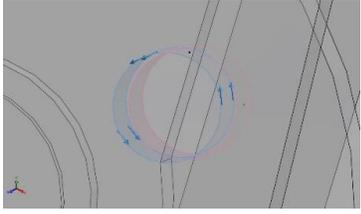
**Figura 3.7.** Distribución de tensiones de von Mises en la geometría de todas las articulaciones

Se puede apreciar en la figura figura 3.7 que el modelo FEM predice una distribución de tensiones de von Mises correspondiente a una distribución uniforme de la carga a lo largo de todas las articulaciones, no repercutiendo en zonas elevadas de tensión en su zona anterior.

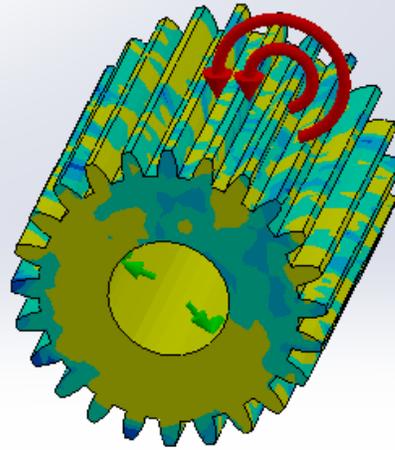
Los niveles máximos de tensión de flexión en la base del brazo robótico alcanzados con el modelo FEM son inferiores, debido a que en este caso no se tienen en cuenta los incrementos de tensión provocados por la torsión de los engranajes.

En las siguientes tablas se puede apreciar con detalles las cargas más significativas de la base del brazo.

Nombre de sujeción	Imagen de sujeción	Detalles de sujeción		
Fijo-2		Entidades: 1 cara(s) Tipo: Geometría fija		
Fuerzas resultantes				
Componentes	X	Y	Z	Resultante
Fuerza de reacción(N)	7.07644	16.9174	-15.7779	24.1913
Momento de reacción(N.m)	0	0	0	0

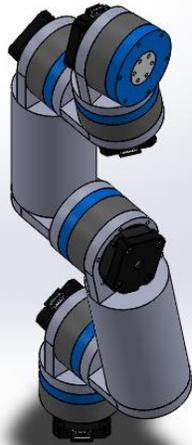
Nombre de carga	Cargar imagen	Detalles de carga
Torsión-1		<p><b>Entidades:</b> 1 cara(s)</p> <p><b>Referencia:</b> Cara&lt; 1 &gt;</p> <p><b>Tipo:</b> Aplicar momento torsor</p> <p><b>Valor:</b> 15 kgf.cm</p>
Torsión-2		<p><b>Entidades:</b> 1 cara(s)</p> <p><b>Referencia:</b> Cara&lt; 1 &gt;</p> <p><b>Tipo:</b> Aplicar momento torsor</p> <p><b>Valor:</b> -15 kgf.cm</p>

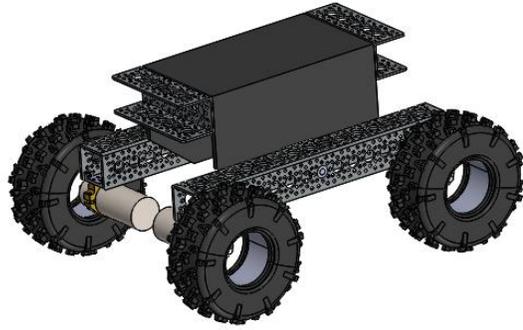
Nombre del modelo:SIMULACION  
Nombre de estudio:Estudio de topología 1(-Predeterminado-)  
Tipo de resultado: Masa del material  
Masa calculada del elemento: 0.00963Kg



Masa del material

Yellow	Mantener
Cyan	
Blue	
Purple	Aceptar para eliminar





## **CAPÍTULO IV. RESULTADOS**

Para validar el desempeño de nuestro sistema se realizó un análisis de esfuerzos mecánicos y de velocidad de transmisión para el engranaje planetario. Este sistema implementado en cada una de las articulaciones nos entregó un resultado favorable, la simulación virtual o análisis mecánico nos permite probar la resistencia de los productos en fases previas de diseño para evitar fallos posteriores a su fabricación.

## CONCLUSIONES

Se presentó un Diseño mecánico de un robot colaborativo móvil usando un sistema de engranajes planetarios. El sistema permite que el brazo realice los movimientos necesarios sin la pérdida de par-velocidad, ya que es eficiente ya que la ventaja fundamental de los engranajes planetarios frente a los engranajes utilizados por las cajas de cambio manuales es que su forma es más compacta y permiten un reparto de par en distintos puntos a través de los satélites, pudiendo transmitir pares más elevados.

Consideramos que el proyecto tiene gran potencial para su implementación y fabricación, por ello, esta propuesta corresponde a una de las etapas del proyecto de robots colaborativos. Como trabajo futuro se propone el desarrollo físico y prototipo real del diseño.

En el análisis mecánico este diseño de engranajes planetarios no se limita a considerar las geometrías solo de los engranajes, sino que también tiene en cuenta a los ejes que los soportan. Esto permite tener en cuenta el comportamiento de dichos ejes en los estudios de la transmisión, pues los efectos derivados de sus deformaciones pueden tener un impacto importante sobre el estado tensional de los engranajes

## REFERENCIAS

- [1]. “MyCobot280” [En línea]. Disponible en: <https://www.elephantrobotics.com/en/mycobot-en/> [Accedido: 05- julio- 2022].
- [2]. Escobar Gómez, D. A., Ibarra Jácome, O.A., “Diseño e implementación de una celda colaborativa robotizada mediante robots móviles y humanoides para clasificación de objetos”. Tesis Licenciatura, Universidad de las Fuerzas Armadas, Ecuador, 2020.
- [3]. Colgate, J. Edward, et al. Cobots: Robots for collaboration with human operators. 1996.
- [4]. Pape, Jacob Pascual. Los robots colaborativos: una nueva era en la automatización industrial. Tecnoalimen: tecnología alimentaria y packaging, 2015, vol. 12, p. 50-51.
- [5]. Regidor Pérez, Guillermo. Estudio de la interacción entre humanos y robots colaborativos. 2018. Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de Valencia.
- [6]. “¿Qué son los engranajes planetarios y cómo funcionan?” Disponible en: <https://www.ingenieriaymecanicaautomotriz.com/que-son-los-engranajes-planetarios-y-como-funcionan/> [Accedido: 05- julio- 2022].
- [7]. Fornons, José María. *El Método de los Elementos Finitos*. Marcombo, 1982.
- [8]. Zienkiewicz, Olgierd Cecil. *El método de los elementos finitos*. Reverté, 2010.
- [9]. Celigüeta-Lizarza, Juan Tomás. Método de los elementos finitos para análisis estructural. 2011.
- [10]. LAZO, Oswaldo Rojas; ROJAS, Luis Rojas. Diseño asistido por computador. *Industrial Data*, 2006, vol. 9, no 1, p. 7-15.
- [11]. DIAB, Jacinto. Introducción a SolidWorks® en 10 lecciones. 2016.
- [12]. “Introducción a Solidworks”. Disponible en: [https://my.solidworks.com/solidworks/guide/SOLIDWORKS\\_Introduction\\_ES.pdf](https://my.solidworks.com/solidworks/guide/SOLIDWORKS_Introduction_ES.pdf) [Accedido: 05- julio- 2022].