

# Separador de basura (Robot Esférico)

Juan Manuel Navarrete Diaz  
Diego Hildebrando Ramires Aguilera  
Alejandro Almaraz Quintero  
Jonathan Alejandro Alferez Torres

12 de noviembre de 2019



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA  
DE LA ZONA METROPOLITANA DE GUADALAJARA**

Mtro. Carlos Enrique Moran Garabito  
Academia de Ingeniería Mecatrónica  
Grupo 7° A  
Cinemática de robots

# 1. Introducción

En la actualidad, la contaminación es uno de los problemas mas grandes a escala global, es una de las causas de muchas perdidas en los ecosistemas. El calentamiento global es una de las muchas consecuencias que derivan de la contaminación, según diversos medios y artículos, apuntan que la contaminación se origina principalmente por las industrias. Y es que, recordemos que la contaminación se origina en el aire, agua y tierra, teniendo a la industria como principales contaminadores de el aire y agua. Sin embargo, la población en general, también se une en la lista de contaminadores.

Fuentes oficiales, aseguran que en México se produce mas cantidad de desechos que China y Rusia; y es que en promedio cada mexicano genera 1.24 Kg de basura al día, es decir, 440 kg por año. En la ciudad de México, existe una población aproximada de 23 Millones de personas por lo que se genera cerca de 28.5 mil toneladas de basura al día aproximadamente.

Los principales desechos generados son desechos de alimentos, componentes electrónicos, papel, plásticos, entre otros. Algunas estimaciones aseguran que el 90 por ciento de lo que tiramos puede reciclarse, siendo el plástico, cartón, vidrio y chatarra lo que mas se recicla. Es por eso que para reducir los altos indices de contaminación en el mundo es necesario recurrir al reciclaje, sin embargo, la triste realidad es que en México solo se recicla el 2 por ciento de lo que se genera al día.

Para lograr que el 90 por ciento de la basura generada se pueda reciclar es necesario que las personas recurran a la separación de desechos para que sea mas eficiente el reciclaje, pero para lograrlo, se tendría que recurrir a las autoridades correspondientes para que se apliquen reglas y normas para lograrlo pero esto podría tardar muchos años y tal vez sea demasiado tarde.

Los avances tecnológicos avanzan considerablemente para facilitar la vida de muchas personas, pero también podrían ayudar a resolver muchos de los problemas como lo son la inseguridad, la salud e incluso la contaminación ambiental. Es por eso que para lograr terminar con la problemática ambiental y lograr aumentar el reciclaje de los desechos, se podría implementar un sistema de separación de desechos para facilitar las labores de reciclaje, es por eso que este proyecto esta enfocado a buscar una solución a la problemática de la contaminación que tanto afecta a los ecosistemas como a la población en general que sufre las consecuencias que este problema genera.

## 2. Marco Teórico

Un brazo Robotico esta conformado por elementos como estructura mecánica, transmisiones, actuadores, sensores, elementos terminales y un controlador. La mayor parte de los robots industriales tienen cierta similitud a la anatomía de las extremidades del cuerpo humano, haciendo referencia a términos como cintura, brazo, codo, muñeca, mano, etc.

### 2.1. Tipos de Robots

Una vez visto qué es esta herramienta, procedemos a hablar de los tipos de brazos robóticos que puedes encontrar en las industrias y fábricas. Estos facilitan el trabajo de los empleados de las industrias y aumentan el rendimiento de las mismas. Así, permiten realizar tareas complejas de levantamiento o traslados de pesos que resultan costosos o peligrosos para los humanos.

#### Robot cartesiano

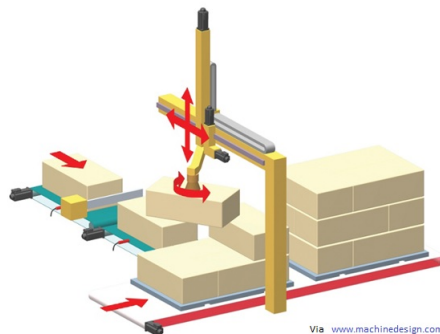


Figura 1: Robot cartesiano

Este robot se caracteriza por sus ejes, que coinciden con los tres ejes cartesianos. Se emplea en funciones de soldadura, en operaciones de ensamblado, manipulación de objetos e incluso aplicación de impermeables.

#### Robot esférico polar

Los ejes de este robot forman un sistema polar de coordenadas. Es decir en un círculo un eje que va de arriba a abajo y otro de derecha a izquierda (como norte-sur este-oeste). Su origen se encuentra en el primer robot Unimate instalado en una fábrica coches, la General Motors. Este realizaba trabajos de soldadura, fundición y manipulación de máquinas y herramientas.

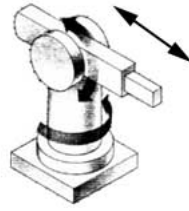


Figura 2: Ejemplo de robot esférico

Este robot permitió que en la fábrica hubiesen menos accidentes al hacerse cargo de trabajos que tienen un alto nivel de peligro. Tareas como la fundición (altas temperaturas) las realizaba este robot. Esto permitía que los trabajadores pudiesen realizar otras funciones y acabar el trabajo con mayor rapidez y eficacia.

### Robot articulado



Figura 3: Ejemplo de un robot articulado

El robot articulado tiene, como mínimo, tres articulaciones que giran sobre sí mismas, lo que le permite llevar a cabo tareas más complejas. La mayor rotación permite que pueda realizar desde soldaduras hasta pintar con spray. Se emplea, con frecuencia, en la industria automovilística. Y sus funciones, como hemos mencionado, pueden variar aunque se suelen destinar a las de mayor precisión dada su capacidad de giro.

### Robot cilíndrico

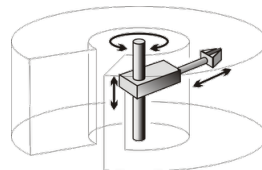


Figura 4: Ejemplo de un robot cilíndrico

Sus ejes forman un sistema de coordenadas de círculos concéntricos que le permiten efectuar tareas como la manipulación de máquinas. Pero además, puede realizar funciones de soldadura de punto. También manejan maquinaria de fundición a presión y operaciones de ensamblaje.

## Robot SCARA

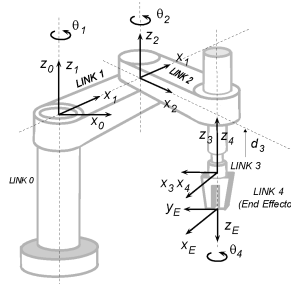


Figura 5: Ejemplo de un robot SCARA

Es un robot con dos articulaciones rotatorias paralelas, que permiten que pueda hacer trabajos de pick and place, que significa coger y dejar. Es decir, las principales funciones de este tipo de brazo son las de recoger objetos y dejarlos en otros lugares. En este caso tienes que fijarte en la fuerza que pueden tener estas máquinas. Pueden recoger metales pesados o estructuras imposibles de mover por una sola persona y moverlas.

## 3. Planeación y desarrollo

### 3.1. Objetivos

- \* Realizar un robot de tipo esférico que tenga una aplicación aplicable en la vida cotidiana
- \* Cumplir con las especificaciones solicitadas por el docente de la asignatura
- \* Desarrollar las especificaciones requeridas para emplear el prototipo en proyecto ecológico
- \* Capacidad para levantar 500g (0.5Kg).

### **3.2. Justificación**

El presente proyecto tiene como finalidad realizar la construcción de un robot tipo esférico y emplearlo a un propósito ambiental teniendo en cuenta mediante datos obtenidos en algunas fuentes, la importancia de utilizar la tecnología como un gran aliado para intentar detener las consecuencias resultantes de la contaminación que este genera, teniendo como objetivo principal desarrollar un sistema capaz de identificar y separar desechos que puedan ser reciclados, ya que los datos obtenidos en Internet consideran que el 90 por ciento de la basura generada al día puede ser reciclada, sin embargo la separación de basura es un proceso lento y que muy pocas personas quieren realizar y la idea es que este robot cumpla y realice las labores de separación de desechos que muchas personas no quieren hacer y en un lapso de tiempo menor.

### **3.3. Delimitación**

Al utilizar el robot, se creará una sociedad que haga conciencia sobre como poder ayudar al medio ambiente separando la basura para obtener un mejor manejo de los residuos y del reciclaje ya que esta idea es muy innovadora y podría impulsar a más persona a invertir en esta rama y tener un proceso establecido de la separación de residuos.

### **3.4. Robot esférico**

Este tipo de configuración está compuesta por dos ejes rotacionales perpendiculares y uno lineal. Se denominan esféricos o polares porque sus ejes forman un sistema de coordenadas polar. Por medio de estas diversas articulaciones proporcionan al robot la capacidad para desplazar su brazo dentro de un espacio esférico. Esta rota en su base, se inclina en su hombro, y cuenta con extensión y retracción en su brazo y su área de funcionamiento es una porción de esfera. Presenta algunos inconvenientes en el momento de realizar un simple movimiento de traslación o pérdida de precisión cuando este trabajar con cargas pesadas y con el brazo muy extendido Este tipo de configuración se componen de 3 articulaciones o ejes: Dos ejes rotacionales que generan un movimiento rotativo. Un eje prismático que se encarga de realizar un movimiento lineal o deslizante. Las articulaciones rotativas son perpendiculares entre el primer y segundo segmento.

Generalmente se describe la posición del robot dando una descripción del marco de la herramienta, la cual está unida al órgano terminal, relativo al marco de la base, el cual está a su vez unido a la base fija del robot. El modelo cinemático directo es el problema geométrico que calcular la posición y orientación del efector final del robot. Dados una serie de ángulos entre las articulaciones, el problema

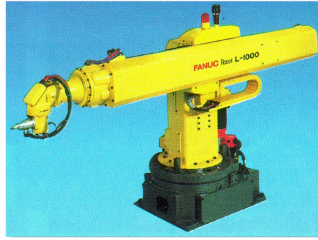


Figura 6: Robot esférico industrial

cinemático directo calcula la posición y orientación del marco de referencia del efector final con respecto al marco de la base.



3.5. Cronograma

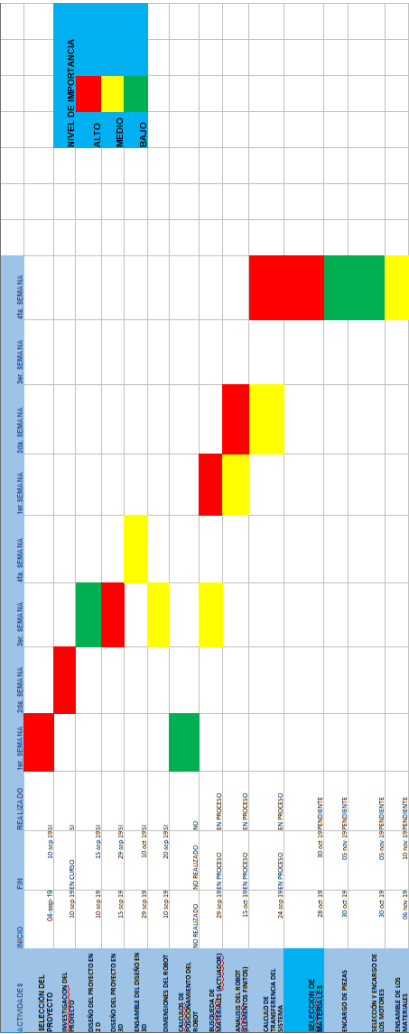


Figura 7: Cronograma de actividades por realizar

### 3.6. Costos

Material	Costos en pesos
Actuador lineal	650
Motores	1200
Perfil Tubular Cuadrado	350
Base Madera	250
Pintura	120

## 4. Diseño mecánico

Toda estructura antes de ser construida, primero deberá ser analizada con mucho detalle con el único fin de detectar posibles problemas y las soluciones que pueda llegar a presentarse, esto quiere decir, que antes de llevar a cabo algún desarrollo inmobiliario, industrial o tecnológico, deberá de llevarse un proceso de investigación de las necesidades y especificaciones que el cliente o el producto deberá de cumplir de acuerdo a las normas y lineamientos establecidas para el correcto desarrollo, es por eso que antes de desarrollar un proyecto tecnológico, se deberá de establecer un diseño previo, tomando en cuenta todas las características y medidas preestablecidas, de modo que si se detecta una irregularidad en el diseño, sea mas sencillo corregir los defectos para después proceder con el análisis de el sistema mecánico.

### 4.1. Estructura Mecánica

Actualmente, existen diversas herramientas que facilitan el desarrollo de elementos mecánicos, de una manera sencilla, y accesible, las cuales simplifican el proceso de elaboración de planos y bocetos que nos permitan tener una idea mas acertada al resultado al que se desea llegar. En la ingeniería existen diversos software que nos permite realizar los planos y bocetos de una manera exacta y confiable, puesto que el software trabaja bajo altos estándares, con lo cual permiten al usuario diseñar en planos 2D y 3D la o las piezas que el usuario necesita.

Algunos de estos software's mas comunes son Autodesk Autocad e Inventor, Solid Works, Catia, entre algunos otros, sin embargo en este caso se utilizara los software Autodesk Autocad e Inventor. Principalmente, el reto mas complicado y tardado es elegir las dimensiones correspondientes para el desarrollo del proyecto, por lo que mediante una lluvia de ideas, y algunas especificaciones que el maestro solicito, así como un análisis de cada movimiento y proceso que realizara el robot, se opto por el diseño que a continuación se mostrara. A pesar de que no es una tarea sencilla, la buena plantación y realización de los pasos para conseguir el diseño del robot, así como sus características, se logro elaborar con éxito y sin

ningún contratiempo el objetivo planteado. Por lo que a continuación, mediante algunas capturas, se explicara brevemente el diseño de este proyecto.

Para diseñar el robot, se tomaron en cuenta diversos factores, entre ellos, medidas, funciones que realizara, así como las características y especificaciones que se requieren para el buen funcionamiento del mismo. Principalmente se desea que el Robot, como requerimiento mínimo, tenga la capacidad de levantar medio kilo (500g sin considerar el peso total del robot), por lo que de ser así, tendría la suficiente capacidad de levantar algunos objetos como papel, cartón, latas e incluso pet, que son los principales materiales que el sistema separara. Otro de los requerimientos es que el brazo tenga dos movimientos rotacionales y uno lineal por lo que este sistema sera un robot de tipo esférico.

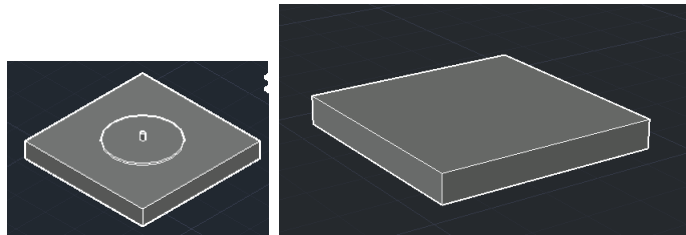


Figura 8: Diseño de la base

La base del robot sera una placa de 40x40x5(cm), tiene en el centro una ranura donde va incrustado un plato fijo, el cual soportara el plato móvil. Para lograr un buen soporte y tener un buen rodamiento, entre el plato fijo y el móvil, llevara como soporte un balero o rodamiento Axial, esto también con el fin de mantener bien equilibrado el resto del robot, ya que de lo contrario, cundo este en funcionamiento y se le aplique un peso, este podría tener alguna inclinación o incluso se podría vencer por lo que también se esta considerando un contrapeso en el 2 eslabón.

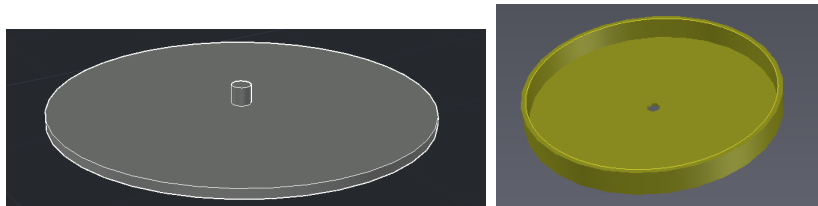


Figura 9: Base del Robot

El primer eslabón estará fijo sobre el plato móvil, el diseño se asemeja a una Y

llevara un motor fijo el cual mediante una flecha (la cual aun se sigue diseñando por falta de datos reales del cilindro) se encargara de mover el segundo eslabón.

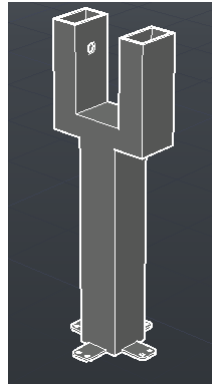


Figura 10: Soporte del Robot

Por ultimo el cilindro sera el segundo eslabón, este se encargara de el movimiento lineal, estará fijo en la flecha, este sera un actuador lineal. Al final de este eslabón, llevara un gripper, que sera el encargado de levantar los objetos. Para agilizar el proceso de construcción, el gripper y el cilindro que sera el actuador lineal serán adquisición comercial.

## 5. Análisis de elementos finitos

La simulación computacional se utiliza ampliamente en las empresas para hacer análisis y mejorar la calidad de los productos y proyectos. la mayoría de estos análisis se llevan a cabo mediante uso de software que utilizan el método de elementos finitos, lo cual permite obtener respuestas para numerosos problemas de ingeniería.

Los software de simulación computacional están evolucionando y mejorando los análisis con base en el método, promoviendo la mejora de selección de tipos y generación de malla de elementos, las técnicas de modelado, criterios de aceptación, los errores y la presentación de los resultados, permitiendo la utilización más fácil de las herramientas. Por lo tanto, el conocimiento de los fundamentos del método es necesario para que juntamente con el dominio del software se

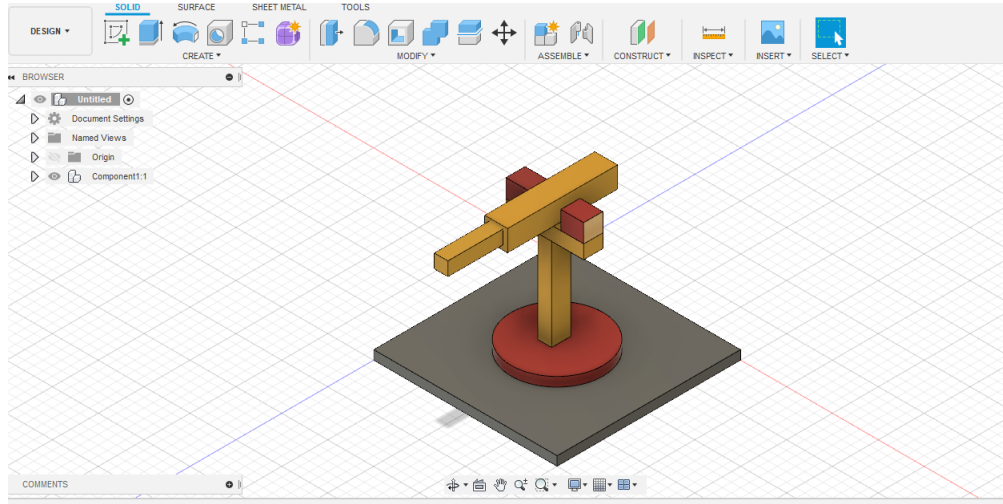


Figura 11: Robot completo

desarrollen las mejores prácticas para la aplicación de éste poderoso recurso en el desarrollo y evaluación de productos y proyectos.

## 5.1. Definición

El análisis de elementos finitos FEA (finite elements analysis) por sus siglas en ingles, consiste en el modelado de productos y sistemas en un entorno virtual, con el objetivo de encontrar y resolver posibles problemas estructurales o de rendimiento (o problemas ya existentes).

### 5.1.1. ¿Cómo funciona?

La geometría de la pieza sometida a cargas y restricciones, se subdivide en partes más pequeñas, conocidas como "elementos", que representan el dominio continuo del problema. La división de la geometría en pequeños elementos resuelve un problema complejo, al subdividirlo en problemas más simples, lo que permite a la computadora hacer las tareas con eficiencia.

El método propone que un número infinito de variables desconocidas, sean sustituidas por un número limitado de elementos de comportamiento bien definido. Esas divisiones pueden tener diferentes formas, tales como triangular, cuadrangular, entre otros, dependiendo del tipo y tamaño del problema. Como el número de elementos es limitado, son llamados de "elementos finitos" palabra que da nombre al método.

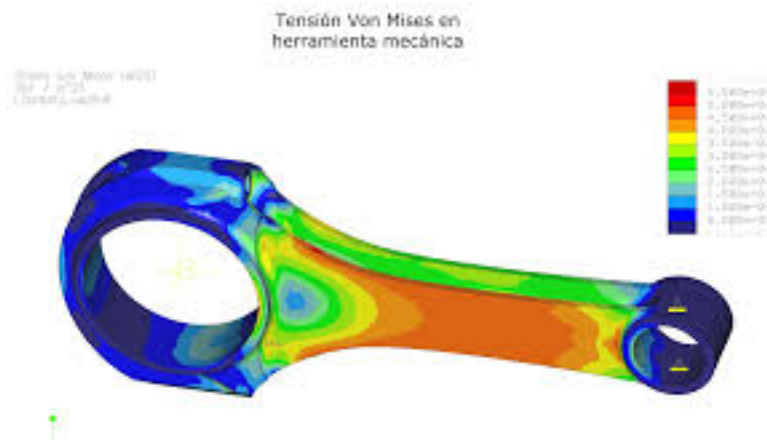


Figura 12: Ejemplo de un análisis de una pieza

## 5.2. Procedimiento

Antes del análisis, se procede a realizar el ensamble de los elementos mecánicos del robot, mediante el software de aplicación Autodesk Inventor 2016. En dicha aplicación se abren los archivos CAD y se realizara el ensamble de cada una de las piezas desarrolladas para posteriormente, mediante el mismo software, realizar el análisis de elementos finitos.

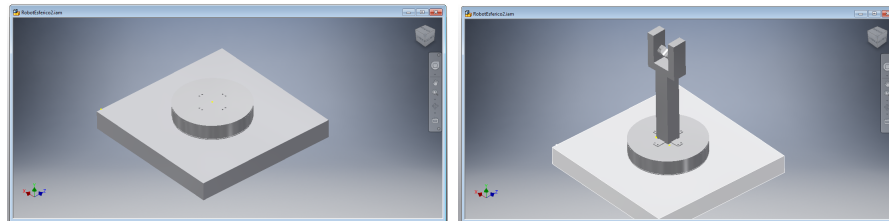


Figura 13: Ensamble de los CAD de la base y soporte

En la figura 13 se puede observar, que la base del robot esta conformado por una placa de 40x40cm, esta base ademas de ser el soporte del robot, también jugara un papel muy importante para ayudar a darle estabilidad y equilibrio en el momento de estirar el cilindro en su máxima longitud, principalmente cuando sostenga un objeto de un peso considerable, pues recordemos que el peso mínimo que deberá levantar sera de 500g. Al centro de la base contara con un plato fijo, su única función sera de soporte ya que no tendrá ningún movimiento, se encargara con ayuda de un rodamiento axial a brindarle soporte y movimiento al plato móvil, cabe mencionar que al centro del plato fijo tiene un pivote donde ira ensamblado el plato móvil que ayudara a la rotación.

El Soporte o eslabón 1 estará centrado y fijo al plato móvil (Figura 13), aunque solo sera de soporte, se debe tener en cuenta que sera una pieza fundamental que soportara gran parte del peso de todo el sistema, por lo que sera de vital importancia utilizar un material resistente con la suficiente capacidad de soportar el peso y a la vez sea ligero para no forzar los motores con los que se contara para el sistema robotico. Al otro extremo del soporte, el cual se asemeja a una Y, estará una flecha entre las dos columnas que al igual que la base tendrá un movimiento rotacional. La flecha tiene una ranura redondeado donde se asentara el cilindro o actuador lineal.

Ahora que el sistema esta ensamblado 14, utilizando el software Autodesk Inventor (El mismo software donde se realizo en ensamble de los CAD) se realizara el análisis correspondiente para determinar que material es el mas adecuado para el desarrollo del brazo robotico, de modo que el sistema sea lo suficientemente resistente a los diferentes esfuerzos a los que se someterá y ligero para que el sistema sea eficiente al momento de realizar su función. En el siguiente apartado se mostrara los pasos e instrucciones del desarrollo del análisis de elementos finitos.

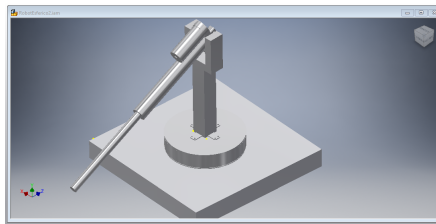


Figura 14: Elementos CAD ensamblados

### 5.3. Análisis del robot

Con ayuda del software () se procederá a realizar el análisis de elementos finitos con el único fin de seleccionar un buen material conforme a las especificaciones requeridas así como ligeras para un mejor desempeño del sistema. A continuación se mostraran paso a paso los resultados obtenidos tras finalizar el análisis del sistema mecánico, así como una explicación detallada de cada una de las gráficas obtenidas.

Uno de los principales problemas mas frecuentes en en desarrollo de diseños, es el hecho de seleccionar un material que cumpla con los requisitos necesarios para el desarrollo del proyecto, por lo que una herramienta muy eficaz para ayudar a resolver este problema es la utilización de software especializado en análisis de materiales que ayudara a seleccionar el material mas viable para la construcción

de un prototipo. En este caso se desarrollara el prototipo de un brazo robotico, que se someterá a un análisis de elementos finitos para determinar posibles problemas que pueda desarrollarse en un futuro.

El brazo embotico en desarrollo se analizara si utilizar aluminio es una buena opción, por lo que, después de ensamblar los CAD mediante el software Autodesk Inventor, se procederá a realizar el análisis correspondiente del prototipo. En la la pestaña *Entornos* de inventor se selecciona la opción *Análisis de tensión* (Figura 15), para después seleccionar *Crear Simulación*.

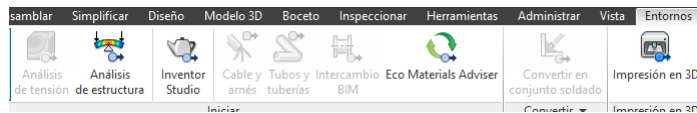


Figura 15: Selección de análisis

Cuando se cea la simulación, lo primero que se debe realizar es ponerle una restricción al sistema mecánico, ya que de no hacerlo provocaría un error en los resultados. Esta restricción en este caso, sera la base del robot, ya que esta sera fija, por lo que en el apartado de *Análisis de tensión* se da clic en *fixos* y selecciona la cara de la base que estará fija.

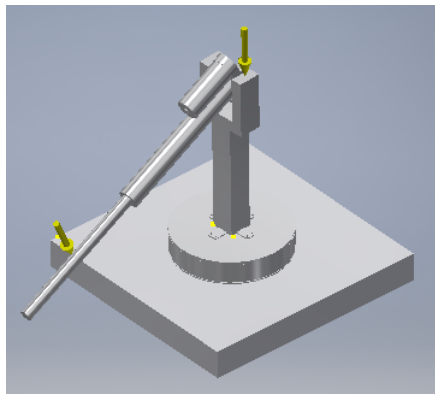


Figura 16: Aplicación de fuerzas al sistema mecánico

El siguiente paso es aplicar las fuerzas y esfuerzos a los que se expondrá. Al sistema se le aplicara una fuerza de gravedad y una fuerza al extremo de actuador lineal o eslabón 2, como se muestra en la figura 16, ambas están representados por unas flechas amarillas, la flecha sobre el soporte o eslabón 1 es la fuerza de gravedad, mientras que la flecha aplicada al actuador lineal representa una carga de 4.903 N que equivalen 500g que el brazo deberá soportar.



Por ultimo, después de seleccionar las fuerzas que se le aplicaran, en la parte superior del programa se encuentran las opciones *Material* y *Aspecto* (figura 17) donde se seleccionara el material *Aluminio 6061-AHC* y se agregara el material dando clic en el diseño. En la misma pestaña de *Análisis de tensión* solamente queda dar clic en la opción *Simular*, después se abrirá una ventana donde se dará clic en *Empezar* y el Software se encargara de realizar el análisis correspondiente y nos entregara los resultados que se revisara cuidadosamente.



Figura 17: Selector de Material

## 5.4. Resultados

Los resultados que se obtuvieron enseguida, corresponden al sistema mecánico del brazo robotico en desarrollo, por lo que se explicara brevemente que corresponde a cada gráfica y lo que significa con respecto al proyecto. Cabe resaltar que los materiales que se escogieron y las dimensiones del proyecto permiten que el desarrollo sea fiable. A continuación se mostrara cada una de las gráficas resultantes del análisis de elementos Finitos que corresponden que le corresponden.

Para un buen desempeño del sistema mecánico y utilizando Aluminio como posible material para el desarrollo del brazo, se realizo el análisis correspondiente de las diferentes tensiones que posiblemente se aplicaran al prototipo. El primer resultado obtenido, muestra nuestro sistema mecánico de un tono azul, ademas muestra lo que parece ser una deformación en el prototipo (Figura 18), esto debido a las cargas que se le aplicaron, sin embargo, no significa que el prototipo tenga un mal diseño o el material no tenga la suficiente resistencia a la fuerza aplicada. Esta deformación solo muestra como actúan las fuerzas aplicadas en el prototipo como se muestra en la figura 19, el color azul indica que el punto critico se encuentra bajo en el indicador de desgaste por tension, ya que el punto critico máximo se encuentra indicado por el color rojo.

El siguiente resultado que se analizara es el indicador de desplazamiento, en el cual se puede ver el desplazamiento que tendría el prototipo por la tension aplicada, teniendo así, el extremo del eslabón 2 como punto critico en color rojo. Este indicador se muestra así ya que ese punto es el que recibe gran parte de la tension de la carga para el que esta diseñado, el indicador se encuentra en un punto mientras que el resto del cilindro se encuentra en un tono color verde ya que es el punto donde menos recibe la carga al estar cerca eslabón 1, por lo que

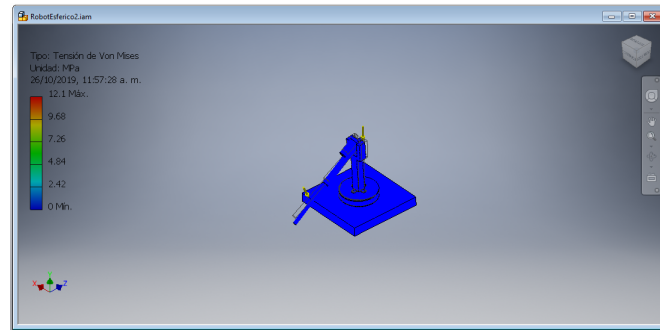


Figura 18: Tensión de Von Mises

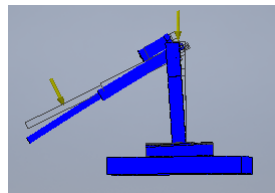


Figura 19: Tensión aplicada al prototipo

es menos propenso a tener un desplazamiento con respecto a su base. En la figura 20 se puede ver con detalle el resultado del desplazamiento que podría tener al aplicarse una fuerza.

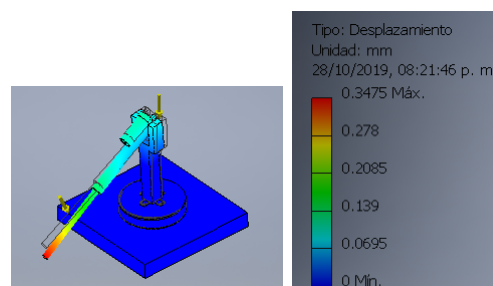


Figura 20: Resultado del desplazamiento del prototipo

Por ultimo, el coeficiente de seguridad indica que tan seguro es la utilización del material, en este caso se encuentra en un color azul, en la figura 21 se puede mostrar que el coeficiente de seguridad se encuentra en 15, por lo que el material que se usara y el prototipo aprobaron las pruebas realizadas.

Los resultados del análisis son favorables para la construcción del prototipo utilizando el aluminio como material principal, después del análisis, lo único que queda es comenzar a desarrollar cada uno de los elementos necesarios para iniciar con el desarrollo del prototipo.

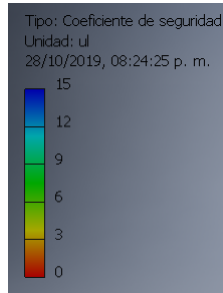


Figura 21: Coefeciente de seguridad

## 6. Cinemática de robots

La cinemática del robot estudia el movimiento del mismo con respecto a un sistema de referencia. Los robots clásicos presentan una arquitectura antropomórfica serial, semejante al brazo humano. Consisten de una serie de barras rígidas unidas entre sí a través de articulaciones de un grado de libertad del tipo rotacional o prismática. En general cada articulación logra su movimiento a través de un accionamiento de potencia e incluye otros dispositivos como reductores de velocidad, frenos y sensores de posición o velocidad. Existen 2 problemas fundamentalmente a resolver en la cinemática del robot; el primero de ellos se conoce como el problema cinemático directo y el segundo como el problema cinemático inverso [Antonio Barriga, Fundamentos de robótica - 2011].

### 6.1. Problemática de cinemática directa

Consiste en determinar cuál es la posición y orientación del extremo final del robot, con respecto a un sistema de coordenadas que se toma como referencia; conocidos los valores de las articulaciones y los parámetros geométricos de los elementos del robot.

### 6.2. Cinemática inversa

Resuelve la configuración del robot que debe adoptar el robot para una posición y orientación del extremo conocidas.

### 6.3. Problema cinemático directo

El problema cinemático directo se plantea en términos de encontrar una matriz de transformación que relaciona el sistema de coordenadas ligado al cuerpo en movimiento respecto a un sistema de coordenadas que se toma como referencia.

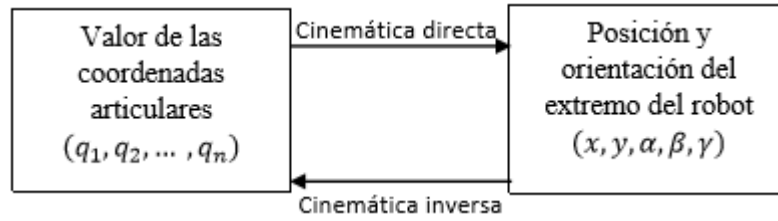


Figura 22: Cinemática del robot

Para lograr esta representación se usan las matrices de transformación homogénea  $4 \times 4$ , la cual incluye las operaciones de traslación y la orientación. La matriz de transformación homogénea es una matriz de  $4 \times 4$  que transforma un vector expresado en coordenadas homogéneas desde un sistema de coordenadas hasta otro sistema de coordenadas. La matriz de transformación homogénea tiene la siguiente estructura:

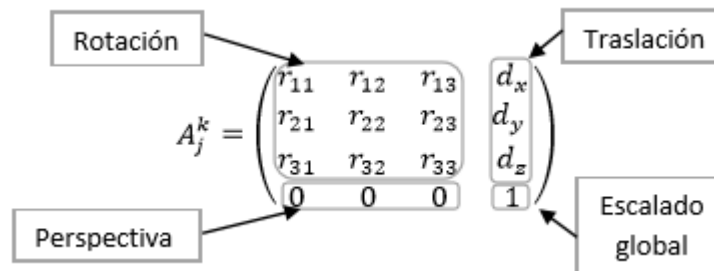


Figura 23: Estructura de una matriz homogénea

## 6.4. Denavit-Hartenberg

### Asignación de ejes

1.-Enumerar los  $n + 1$  eslabones de 0 a  $n$ , comenzando desde la base (eslabón fijo) y terminando en el efector final.

2.-Identificar los ejes de cada articulación. Si es rotacional será el eje de giro, y si es prismática será el eje a lo largo del cual se produce el desplazamiento.

3.-Enumerar los ejes de 1 a  $n$  comenzando desde el que une a eslabón base con el eslabón 1

- 4.-Para  $i$  de 0 a  $n - 1$ : situar el eje  $Z_i$  en el eje de la articulación  $i + 1$ .
- 5.-El eje  $Z_n$  se colocara en el extremo del ultimo eslabón, en la misma dirección que el  $Z_n - 1$ .
- 6.-Situat el origen del sistema de la base  $S_0$  en cualquier punto de la base  $Z_0$ .
- 7.-Para  $i$  de 1 a  $n$ : situar el sistema  $S_i$  en la intersección entre el eje  $Z_i$ , y la recta que es perpendicular simultáneamente al eje  $Z_i$  y al eje  $Z_i - 1$ . Si los ejes  $Z_i$  y  $Z_i - 1$  se cortan el sistema  $S_i$  se coloca en el punto de intersección.
- 8.-Para  $i$  de 1 a  $n$ : situar el eje  $X_i$  a partir del punto donde se definio el  $S_i$  sobre la recta que es perpendicular simultaneamente al eje  $Z_i$  y al eje  $Z_i - 1$ . Si los ejes  $Z_i$  y  $Z_i - 1$  se cortan el eje  $X_i$  debe ser perpendicular a ambos. El sentido es indiferente.
- 9.-El  $x_0$  se puede colocar libremente. Puede ser util que este alineado con el  $X_1$ .
- 10.- Para  $i$  de 0 a  $n$ : colocar el eje  $Y_i$  de modo que forme un sistema dextrógiro con los ejes  $X_i$  y  $Z_i$ .

### **Determinación de parámetros**

- 1.-  $\theta_i$ : Angulo alrededor del eje  $Z_i - 1$ , desde el eje  $X_i - 1$ , hasta el eje  $X_i$ .
- 2.-  $d_i$ : Distancia a lo largo del eje  $Z_i - 1$ , desde el origen del sistema  $i - 1$  hasta el eje  $X_i$ .
- 3.-  $a_i$ : Distancia a lo largo del eje  $X_i$ , desde el eje  $Z_i - 1$ , hasta el eje  $Z_i$ .
- 4.-  $\alpha_i$ : Angulo alrededor del eje  $X_i$ , desde el eje  $Z_i - 1$ , hasta el eje  $Z_i$ .

## 7. Conclusión

### 7.1. Análisis

El análisis de elementos finitos es una herramienta muy útil, en cuanto a elegir un material se refiere. Por eso es muy necesario tener en cuenta cuales son los objetivos que se desean alcanzar y hasta donde la creatividad y el empeño pueden llegar, para diseñar el prototipo de manera que sea sencillo de desarrollar y de la manera mas simple para que el sistema mecánico como el análisis no sea muy extenso y complejo. Este prototipo a pesar que tiene un diseño sencillo, son muchas las variables que se deben de tener en cuenta para que el desarrollo del robot sea la mas adecuada así como el funcionamiento, es por eso que este análisis a pesar de ser breve, nos indica lo necesario que se debe de considerar para que el sistema mecánico no tenga fallas y de no ser así, corregir esos detalles, ahora que aun hay tiempo para volver a desarrollar el análisis, para evitar iniciar la construcción del prototipo y que tenga una falla al momento de realizar las pruebas correspondientes. Este análisis puede darse por concluido al realizar las pruebas correspondientes con éxito, aunque la exportación de archivos CAD y el ensamble en Autodesk Inventor se haya complicado debido a la compatibilidad de formato de los archivos.