

Proyecto Fin de Grado  
Grado en Ingeniería Aeroespacial

Diseño y estudio de la cinemática del robot  
Scorbot-ER VII mediante Catia V5

Autor: Jerónimo Toscano Benjumea

Tutor: Domingo Morales Palma

**Dpto. Ingeniería Mecánica y Fabricación**  
**Escuela Técnica Superior de Ingeniería**  
**Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2018





Proyecto Fin de Grado  
Grado en Ingeniería Aeroespacial

# **Diseño y estudio de la cinemática del robot Scorbot-ER VII mediante Catia V5**

Autor:

Jerónimo Toscano Benjumea

Tutor:

Domingo Morales Palma

Profesor Contratado Doctor

Dpto. de Ingeniería Mecánica y Fabricación

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2018



*A mi familia, en especial a mi madre, sin la cual no hubiera podido permitirme estudiar una carrera*

*A mi tutor, Domingo Morales, por toda la paciencia que ha tenido conmigo durante la realización de este Proyecto*

*Al profesor Federico París, que, sin él saberlo, ha sido mi ejemplo a seguir desde que me impartió su primera clase*

*A mi tutor de prácticas, Francisco Simón, por el trato que tuvo conmigo todos esos meses y todo lo que me enseñó*



# Índice

1.	Introducción .....	1
1.1.	Motivación .....	1
1.2.	Objetivos .....	2
1.3.	Estructura de la memoria .....	3
2.	Robots industriales.....	4
2.1.	Definición .....	4
2.2.	Aplicaciones de los robots.....	6
2.2.1.	Trabajos en fundición.....	6
2.2.2.	Soldadura .....	7
2.2.3.	Aplicación de materiales .....	8
2.2.4.	Aplicación de sellantes y adhesivos .....	9
2.2.5.	Alimentación de máquinas.....	9
2.2.6.	Procesado .....	10
2.2.7.	Corte.....	11
2.2.8.	Montaje .....	12
2.2.9.	Paletización .....	13
2.2.10.	Control de calidad .....	15
2.2.11.	Manipulación en salas blancas.....	15
2.2.12.	Nuevos sectores de aplicación .....	16
2.3.	Estructura de los robots industriales .....	18
2.4.	Configuraciones morfológicas y parámetros característicos de los robots industriales..	24
2.5.	Sistemas de control .....	28
2.5.1.	Secuencial.....	28
2.5.2.	Controlado por trayectoria .....	28
2.5.3.	Control adaptativo .....	28
2.5.4.	Teleoperado .....	29
2.6.	Tipos de programación.....	30
2.6.1.	Programación guiada o directa .....	30
2.6.2.	Programación textual o indirecta.....	30
2.7.	El Scrobot-ER VII .....	31
2.7.1.	Descripción del robot .....	31
2.7.2.	Accesorios .....	32
3.	Modelado y simulación del Scrobot-ER VII .....	33

3.1.	Modelado con Catia Part Design .....	33
3.2.	Simulación de la cinemática con Catia DMU .....	40
3.2.1.	Grados de libertad .....	40
3.2.2.	Límites de movimiento .....	42
3.2.3.	Colisiones entre componentes .....	45
3.2.4.	Tipos de simulación .....	48
3.2.5.	Secuencias de movimientos .....	50
3.2.6.	Análisis de velocidades y aceleraciones .....	51
3.2.7.	Análisis de trayectorias y volúmenes de trabajo .....	53
3.2.8.	Aplicación práctica: desplazamiento de una pieza .....	54
4.	Conclusiones y trabajos futuros .....	61
4.1.	Conclusiones .....	61
4.2.	Trabajos futuros .....	61



# Índice de figuras

Figura 1. Robots en trabajos en fundición.....	7
Figura 2. Robots en trabajos de soldadura .....	8
Figura 3. Robot aplicando pintura.....	9
Figura 4. Robots alimentando otras máquinas .....	10
Figura 5. Robots procesando piezas .....	11
Figura 6. Robots dedicados al corte de piezas.....	12
Figura 7. Robots en una cadena de montaje.....	13
Figura 8. Robots colocando cajas en palets.....	14
Figura 9. Robots típicos de salas blancas.....	16
Figura 10. Estructura básica de un robot.....	18
Figura 11. Articulación tipo L.....	18
Figura 12. Articulación tipo O .....	18
Figura 13. Articulación tipo R.....	19
Figura 14. Articulación tipo T.....	19
Figura 15. Articulación tipo V .....	19
Figura 16. Punto terminal.....	20
Figura 17. Distintos tipos de pinzas .....	20
Figura 18. Herramienta usada por el robot para pintar.....	21
Figura 19. Analogía brazo-robot .....	21
Figura 20. Grados de libertad de un robot.....	22
Figura 21. Componentes de un robot .....	22
Figura 22. Controlador, teach pendant y motores .....	23
Figura 23. Robot cartesiano .....	24
Figura 24. Robot cilíndrico .....	24
Figura 25. Robot polar .....	25
Figura 26. Robot esférico .....	25
Figura 27. Robot mixto (SCARA) .....	25
Figura 28. Robot paralelo.....	26
Figura 29. Scorbot-ER VII.....	31
Figura 30. Mesa Scorbot .....	34
Figura 31. Plataforma Scorbot .....	35
Figura 32. Base Scorbot .....	35
Figura 33. Cuerpo Scorbot .....	36
Figura 34. Brazo grande Scorbot.....	36
Figura 35. Brazo pequeño Scorbot.....	37
Figura 36. Muñeca-pinzas Scorbot.....	37
Figura 37. Scorbot ensamblado (1) .....	38
Figura 38. Scorbot ensamblado (2) .....	39
Figura 39. Articulaciones del Scorbot modeladas en DMU.....	41
Figura 40. Rango de movimiento entre Cuerpo y Brazo grande.....	42
Figura 41. Rango movimiento Mesa-Plataforma .....	43
Figura 42. Rango movimiento Base-Cuerpo.....	43
Figura 43. Rango movimiento Cuerpo-Brazo grande .....	43
Figura 44. Rango movimiento Brazo grande-Brazo pequeño .....	44
Figura 45. Rango movimiento Brazo pequeño-Muñeca .....	44
Figura 46. Rango movimiento Muñeca-Pinzas .....	44
Figura 47. Rangos de movimiento de las articulaciones del Scorbot.....	45

Figura 48. Interferencias entre distintos componentes del Scorbot.....	46
Figura 49. Detectar interferencias entre componentes .....	46
Figura 50. Opciones de detección de interferencias.....	47
Figura 51. Detección de colisiones. En naranja componentes colisionando. La simulación continúa.....	47
Figura 52. Detección de colisiones. En naranja componentes colisionando. La simulación se detiene .....	48
Figura 53. Simulación por parámetros .....	48
Figura 54. Creando ley de movimiento.....	49
Figura 55. Árbol de Catia. Dos mecanismos con sus leyes de movimiento.....	50
Figura 56. Velocidades y aceleraciones a calcular.....	51
Figura 57. Velocidades lineales del extremo de las pinzas .....	52
Figura 58. Aceleraciones lineales del extremo de las pinzas .....	52
Figura 59. Traza del movimiento del extremo de las pinzas.....	53
Figura 60. Volumen ocupado por las pinzas durante su movimiento .....	54
Figura 61. Movimiento típico de robot manipulador .....	55
Figura 62. Velocidades lineales del extremo de las pinzas durante el movimiento .....	56
Figura 63. Aceleraciones lineales del extremo de las pinzas durante el movimiento .....	56
Figura 64. Traza del extremo de las pinzas durante el movimiento.....	57
Figura 65. Volumen ocupado por el Scorbot durante el movimiento (1).....	58
Figura 66. Volumen ocupado por el Scorbot durante el movimiento (2).....	58
Figura 67. Volumen ocupado por el Scorbot durante el movimiento (3).....	59
Figura 68. Volumen ocupado por el Scorbot durante el movimiento (4).....	59



# 1. Introducción

## 1.1. Motivación

Estamos presenciando avances significativos en tecnología industrial, que claramente están encaminados hacia la automatización y la robótica en plantas de producción, y que han generado posiciones diversas sobre lo que sucederá con el futuro de la industria.

De manera reveladora, la automatización y la robótica han suscitado un interés especial en el público debido al impacto que éstas puedan tener en la vida cotidiana y en los puestos de trabajo; algunos expertos se centran en las grandes ventajas que este tipo de tecnologías pueden aportar a la industria como la competitividad, la productividad y la capacitación, mientras que otros se enfocan únicamente en los aspectos negativos como la pérdida de empleos.

Aprovechando este interés creciente en lo que a robots industriales se refiere y del profundo interés personal en las tecnologías de diseño y fabricación asistidas por ordenador, nace la idea de realizar este Trabajo de Fin de Grado, cuyo propósito más general es estudiar la capacidad del programa de diseño CATIA (computer-aided three dimensional interactive application) tan ampliamente usado en sectores aeronáuticos, automovilísticos... para llevar a cabo el diseño y la simulación de la cinemática de un robot.

Este proyecto se llevará a cabo junto con el departamento de Ingeniería Mecánica y Fabricación de la Universidad de Sevilla que desde hace varios años viene desarrollando una línea de trabajos sobre “Fabricación Digital” y “Virtualización de Procesos de Fabricación”.

El robot a modelar y simular será el Scrobot-ER VII, que se encuentra en los laboratorios de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Sevilla, con lo que se pretende continuar con la línea de investigación y desarrollo emprendida por el departamento y posibilitar el uso del robot en futuras aplicaciones de fabricación flexible.

## 1.2. Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es la virtualización del robot Scorbot-ER VII en CATIA V5 para su aplicación futura en trabajos sobre sistemas de fabricación flexible.

Para lograr este objetivo, se ha establecido una lista de tareas concretas a realizar:

- Modelar los componentes mecánicos del robot Scorbot y su ensamblaje, para lo que habrá que llevar a cabo una rigurosa toma de medidas en los laboratorios de todas las partes de este.
- Estudiar las capacidades y limitaciones de los módulos Digital Mock-Up (DMU) de CATIA V5 para el modelado y simulación de la cinemática de un robot.
- Modelar la cinemática directa del robot Scorbot.
- Estudiar la viabilidad de modelar la cinemática inversa del robot Scorbot.
- Simular los movimientos del robot Scorbot en una serie de aplicaciones típicas de uso.

### **1.3. Estructura de la memoria**

Tras esta introducción la memoria se estructurará de la siguiente manera:

En el siguiente capítulo se hablará acerca de los robots industriales, sus aplicaciones actuales así como su estructura y los sistemas de control y programación que se usan para trabajar con estos. Esta parte finalizará con una descripción exhaustiva del robot en consideración en este TFG, el Scrobot-ER VII.

Posteriormente tendrá lugar la descripción del programa de diseño elegido, CATIA, y se detallarán todas las operaciones de diseño y se narrará el avance en el estudio de la cinemática del robot, todas las posibilidades del programa y sus limitaciones.

Por último y a modo de conclusión, se valorarán los resultados obtenidos y su posible aplicabilidad para futuras necesidades. También se analizará la posibilidad de que este TFG de pie a un posible TFG de ampliación.

## 2. Robots industriales

### 2.1. Definición

Entre los robots considerados de más utilidad en la actualidad se encuentran los robots industriales o manipuladores. Existen ciertas dificultades a la hora de establecer una definición formal de lo que es un robot industrial. La primera de ellas surge de la diferencia conceptual entre el mercado japonés y el euro-americano de lo que es un robot y lo que es un manipulador. Así, mientras que para los japoneses un robot industrial es cualquier dispositivo mecánico dotado de articulaciones móviles destinado a la manipulación, el mercado occidental es más restrictivo, exigiendo una mayor complejidad, sobre todo en lo relativo al control. En segundo lugar, y centrándose ya en el concepto occidental, aunque existe una idea común acerca de lo que es un robot industrial, no es fácil ponerse de acuerdo a la hora de determinar una definición formal. Además, la evolución de la robótica ha ido obligando a diferentes actualizaciones de su definición.

La definición más comúnmente aceptada posiblemente sea la de la Asociación de Industrias de Robótica (RIA, Robotic Industry Association), según la cual:

*"Un robot industrial es un manipulador multifuncional reprogramable, capaz de mover materias, piezas, herramientas, o dispositivos especiales, según trayectorias variables, programadas para realizar tareas diversas"*

Esta definición, ligeramente modificada, ha sido adoptada por la Organización Internacional de Estándares (ISO) que define al robot industrial como:

*"Manipulador multifuncional reprogramable con varios grados de libertad, capaz de manipular materias, piezas, herramientas o dispositivos especiales según trayectorias variables programadas para realizar tareas diversas"*

Se incluye en esta definición la necesidad de que el robot tenga varios grados de libertad. Una definición más completa es la establecida por la Asociación Francesa de Normalización (AFNOR), que define primero el manipulador y, basándose en dicha definición, el robot:

**Manipulador:** mecanismo formado generalmente por elementos en serie, articulados entre sí, destinado al agarre y desplazamiento de objetos. Es multifuncional y puede ser gobernado directamente por un operador humano o mediante dispositivo lógico.

**Robot:** manipulador automático servo-controlado, reprogramable, polivalente, capaz de posicionar y orientar piezas, útiles o dispositivos especiales, siguiendo trayectoria variables reprogramables, para la ejecución de tareas variadas. Normalmente tiene la forma de uno o varios brazos terminados en una muñeca. Su unidad de control incluye un dispositivo de memoria y ocasionalmente de percepción del entorno. Normalmente su uso es el de realizar una tarea de manera cíclica, pudiéndose adaptar a otra sin cambios permanentes en su material.

Por último, la Federación Internacional de Robótica (IFR, International Federation of Robotics) distingue entre robot industrial de manipulación y otros robots:

*"Por robot industrial de manipulación se entiende una máquina de manipulación automática, reprogramable y multifuncional con tres o más ejes que pueden posicionar y orientar materias, piezas, herramientas o dispositivos especiales para la ejecución de trabajos diversos en las diferentes etapas de la producción industrial, ya sea en una posición fija o en movimiento"*

En esta definición se debe entender que la reprogramabilidad y la multifunción se consiguen sin modificaciones físicas del robot.

Común en todas las definiciones anteriores es la aceptación del robot industrial como un brazo mecánico con capacidad de manipulación y que incorpora un control más o menos complejo. Un sistema robotizado, en cambio, es un concepto más amplio. Engloba todos aquellos dispositivos que realizan tareas de forma automática en sustitución de un ser humano y que pueden incorporar o no a uno o varios robots, siendo esto último lo más frecuente.



## **2.2. Aplicaciones de los robots**

En la actualidad los robots se usan de manera extensa en la industria, siendo un elemento indispensable en una gran parte de los procesos de manufactura. Impulsados principalmente por el sector del automóvil, los robots han dejado de ser máquinas misteriosas propias de la ciencia-ficción para ser un elemento más de muchos de los talleres y líneas de producción.

Por su propia definición el robot industrial es multifuncional, esto es, puede ser aplicado a un número, en principio ilimitado, de funciones. No obstante, la práctica ha demostrado que su adaptación es óptima en determinados procesos (soldadura, paletización, etc.) en los que hoy día el robot es sin duda alguna, la solución más rentable.

Junto con estas aplicaciones, ya arraigadas, hay otras novedosas en las que si bien la utilización del robot no se realiza a gran escala, si se justifica su aplicación por las condiciones intrínsecas del medio de trabajo (ambientes contaminados, salas asépticas, construcción, etc.) o la elevada exigencia en cuanto a calidad de los resultados (medicina, etc.). Estos robots se han venido llamando robots de servicio.

La Federación Internacional de la Robótica (IFR) estableció en 1998 una clasificación de las aplicaciones de la Robótica en el sector manufacturero:

- Trabajos en fundición
- Soldadura
- Aplicación de materiales
- Aplicación de sellantes y adhesivos
- Alimentación de máquinas
- Procesado
- Corte
- Montaje
- Paletización
- Control de calidad
- Manipulación en salas blancas

### **2.2.1. Trabajos en fundición**

La fundición por inyección fue el primer proceso robotizado (1960).

El robot se usa en:

- la fundición de las piezas del molde y transporte de éstas a un lugar de enfriado y posteriormente a otro proceso (desbardado, corte, etc.).

- la limpieza y mantenimiento de los moldes, eliminando rebabas (por aplicación de aire comprimido) y aplicando el lubricante.
- la colocación de piezas en el interior de los moldes (embutidos).

Las cargas manejadas por los robots en estas tareas suelen ser medias o altas (del orden de decenas de kilogramos), no se necesita una gran precisión y su campo de acción ha de ser grande. Su estructura más frecuente es la polar y la articular y su sistema de control es por lo general sencillo. En la Figura 1 vemos robots en trabajos en fundición.



*Figura 1. Robots en trabajos en fundición*

### **2.2.2. Soldadura**

La industria automovilística ha sido la gran impulsora de la robótica industrial, empleando la mayor parte de los robots instalados hoy día. La tarea robotizada más frecuente dentro de la fabricación de automóviles ha sido, sin duda alguna, la soldadura de carrocerías. En este proceso, dos piezas metálicas se unen en un punto para la fusión conjunta de ambas partes, denominándose a este tipo de soldadura por puntos.

La robotización de la soldadura por puntos admite dos soluciones: el robot transporta la pieza presentando ésta a los electrodos que están fijos, o bien, el robot transporta la pinza de soldadura posicionando los electrodos en el punto exacto de la pieza en la que se desea realizar la soldadura (podemos ver varios ejemplos en la Figura 2). El optar por uno u otro método depende del tamaño, peso y manejabilidad de las piezas.

En las grandes líneas de soldadura de carrocerías de automóviles, éstas pasan secuencialmente por varios robots dispuestos frecuentemente formando un pasillo; los robots, de una manera coordinada, posicionan las piezas de soldadura realizando varios puntos consecutivamente.

La gran demanda de robots para la tarea de soldadura por puntos ha originado que los fabricantes desarrollen robots especiales para esta aplicación que integran en su sistema de programación el control de la pinza de soldadura que portan en su extremo.

Los robots de soldadura por puntos precisan capacidad de cargas del orden de los 50-100 Kg. y estructura articular, con suficientes grados de libertad (5 o 6) para posicionar y orientar la pinza de soldadura (o pieza según el caso) en lugares de difícil acceso.



*Figura 2. Robots en trabajos de soldadura*

### **2.2.3. Aplicación de materiales**

El acabado de superficies por recubrimiento de un cierto material (pintura, esmalte, partículas de metal, etc.) con fines decorativos o de protección, es una parte crítica en muchos procesos de fabricación.

Tanto en la pintura como en el metalizado, esmaltado o arenado, la problemática a resolver es similar, siendo la primera la que cuenta con mayor difusión. Su empleo está generalizado en la fabricación de automóviles, electrodomésticos, muebles, etc.

En estos procedimientos se cubre una superficie (de forma tridimensional y en general complicada) con una mezcla de aire y material pulverizada mediante una pistola. Es preciso conseguir una perfecta homogeneidad en el reparto de la pintura, realizándose para ello un control de la viscosidad, de la distancia entre las piezas y la pistola, de la velocidad de movimiento de ésta, del número de pasadas, etc. Todos estos parámetros son tradicionalmente controlados por el operario.

Por otra parte el entorno en el que se realiza la pintura es sumamente desagradable y peligroso. En él se tiene simultáneamente un reducido espacio, una atmósfera tóxica, un alto nivel de ruido y un riesgo de incendio. Estas circunstancias han hecho de la pintura y operaciones afines, un proceso de interesante robotización (vemos un ejemplo en la Figura 3). Con el empleo del robot se eliminan los inconvenientes ambientales y se gana en cuanto a homogeneidad en la calidad del acabado, ahorro de pintura y productividad.

Normalmente los robots de pintura son específicos para este fin. Suelen ser robots articulares, ligeros, con 6 o más grados de libertad que les permiten proyectar pintura en todos los huecos de la pieza.

Tal vez la característica fundamental de los robots dedicados a estas tareas sea su método de programación. Obviamente, es preciso que cuenten con un control de trayectoria continua, pues no basta con especificar el punto inicial y final de sus movimientos, sino también la trayectoria. El método normal de programación es el de aprendizaje con un muestreo continuo de la trayectoria. El operario realiza una vez el proceso de pintura con el propio robot, mientras que la unidad de programación registra continuamente, y de manera automática, gran cantidad de puntos para su posterior repetición.



*Figura 3. Robot aplicando pintura*

#### **2.2.4. Aplicación de sellantes y adhesivos**

Los robots son frecuentemente utilizados para la aplicación de cordones de material sellante o adhesivos en la industria del automóvil (sellante de ventanas y parabrisas, material anticorrosión en los bajos del coche, etc.).

En este proceso el material a aplicar se encuentra en forma líquida o pastosa en un tanque, siendo bombeado hasta la pistola de aplicación que porta el robot, que regula el caudal de material que es proyectado.

El robot, siguiendo la trayectoria programada, proyecta la sustancia que se solidifica al contacto con el aire. En este proceso, tan importante como el control preciso de la trayectoria del robot es el control sincronizado de su velocidad y del caudal de material suministrado por la pistola, puesto que la cantidad de material proyectado en un punto de la pieza depende de ambos factores.

Es habitual una disposición del robot suspendido sobre la pieza, siendo necesario, por los motivos antes expuestos, que el robot tenga capacidad de control de trayectoria continua (posición y velocidad reguladas con precisión), así como capacidad de integrar en su propia unidad de control la regulación del caudal de material aportado en concordancia con la velocidad del movimiento.

#### **2.2.5. Alimentación de máquinas**

La alimentación de máquinas especializadas es otra tarea de manipulación de posible robotización. La peligrosidad y monotonía de las operaciones de carga y descarga de máquinas como prensas, estampadoras, hornos o la posibilidad de usar un mismo robot para transferir una pieza a través de diferentes máquinas de procesado, ha conseguido que gran número de empresas hayan introducido robots en sus talleres.

Los robots usados en estas tareas son, por lo general, de baja complejidad, precisión media, número reducido de grados de libertad y de control sencillo, bastando en ocasiones con manipuladores secuenciales. Su campo de acción interesa que sea grande. En cuanto

a la carga, varía mucho, pudiéndose necesitar robots con capacidad de carga de pocos kilogramos, hasta de algunos cientos (existen robots capaces de manipular hasta tonelada y media). Las estructuras más frecuentemente utilizadas son la cilíndrica, esférica y articular. También la cartesiana puede aportar en ocasiones la solución más adecuada. Podemos ver varios ejemplos en la Figura 4.

Atención especial merece la aplicación del robot en células flexibles de mecanizado, que han adquirido gran auge en los últimos años. Éstas emplean centros de mecanizado o varias máquinas de control numérico para conseguir complejos y distintos mecanizados sobre una pieza y dar a ésta la forma programada. La capacidad de programación de estas máquinas permite una producción flexible de piezas adaptándose así perfectamente a las necesidades del mercado actual. Estas máquinas emplean diferentes herramientas que se acoplan a un cabezal común de manera automática cuando el proceso de mecanizado lo precisa. Las herramientas a usar en el proceso concreto son almacenadas en tambores automáticos que permiten un rápido intercambio de la herramienta.

El robot es el complemento ideal de estas máquinas. Sus tareas pueden comenzar con la recogida de la pieza del sistema de transporte encargado de evacuarlas o para llevarla a otra máquina. Asimismo, el robot puede ocuparse de cargar el alimentador automático de herramientas de la máquina, reponiendo herramientas gastadas o seleccionando las adecuadas para la producción de una determinada pieza.



*Figura 4. Robots alimentando otras máquinas*

### **2.2.6. Procesado**

Dentro del procesado se incluyen operaciones en las que el robot se enfrenta a piezas y herramientas (transportando una u otra) para conseguir, en general, una modificación en la forma de la pieza (vemos varios ejemplos en la Figura 5).

El desbardado consiste en la eliminación de rebabas de la pieza de metal o plástico, procedentes de un proceso anterior (fundición, estampación, etc.). Esta operación se realiza manualmente con una esmeriladora o fresa, dependiendo la herramienta de las características del material a desbardar.

Un robot dedicado al desbardado porta la herramienta o la pieza, según la aplicación, haciendo entrar ambas en contacto. La herramienta debe seguir el contorno de la pieza, que en muchas ocasiones es complejo, con elevada precisión en su posicionamiento y velocidad. Por este motivo se precisan robots con capacidad de control de trayectoria continua y buenas características de precisión y control de velocidad. Además, puesto que las rebabas con que vienen las piezas presentan formas irregulares, conviene que el robot posea capacidad para adaptarse a éstas mediante el empleo de sensores o el desarrollo de un elemento terminal del robot auto adaptable.

Parecida al desbardado, en cuanto a necesidades, es la aplicación de pulido, cambiando básicamente la herramienta a emplear. Las necesidades de precisión y de empleo de sensores son tal vez en este caso menos exigentes.



*Figura 5. Robots procesando piezas*

### **2.2.7. Corte**

El corte de materiales mediante el robot es una aplicación reciente que cuenta con notable interés. La capacidad de reprogramación del robot y su integración en un sistema, hacen que aquél sea el elemento ideal para transportar la herramienta de corte sobre la pieza, realizando con precisión un programa de corte definido previamente desde un sistema de diseño asistido por computador (CAD).

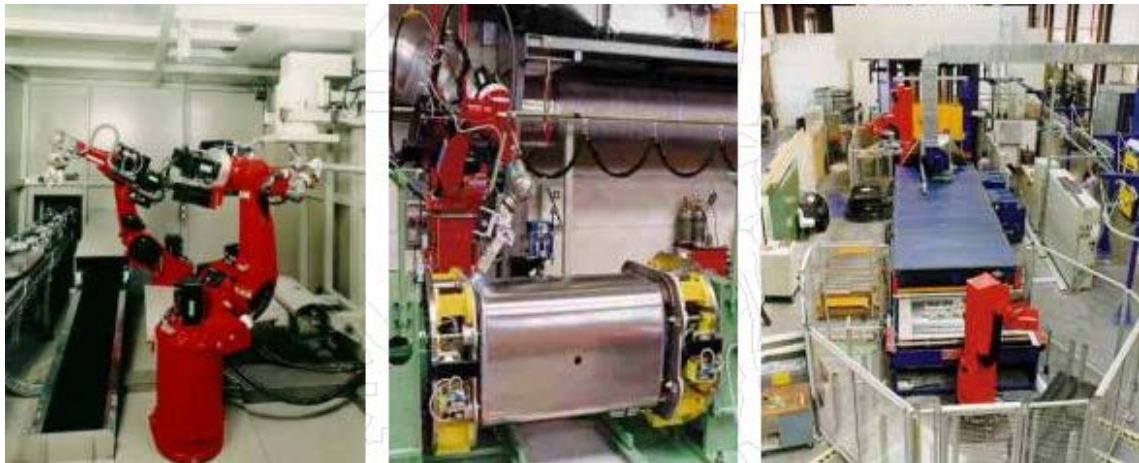
Los métodos de corte no mecánico más empleados son oxicorte, plasma, láser y chorro de agua, dependiendo de la naturaleza del material a cortar. En todos ellos el robot transporta la boquilla por la que se emite el material de corte, proyectando éste sobre la pieza al tiempo que sigue una trayectoria determinada.

Las piezas a cortar pueden disponerse en varias capas, unas encima de otras, realizándose el corte simultáneo de todas ellas (método de corte de patrones en la industria textil).

Si bien el oxicrotante y el corte por plasma son tecnologías muy extendidas, y consecuentemente bien conocidas, no ocurre lo mismo en el corte por láser y por chorro de agua, de más reciente aparición. La disposición típica del robot en el corte por chorro de agua es el robot suspendido trabajando sobre las piezas fundamentalmente en dirección vertical. Vemos algunos ejemplos de robots de corte en la Figura 6.

El robot porta una boquilla de pequeño diámetro (normalmente de 0.1mm.) por la que sale un chorro de agua, en ocasiones con alguna sustancia abrasiva, a una velocidad del orden de 900 m/s, y a una presión del orden de 4000 kg/cm<sup>2</sup>. El sistema completo precisa de bomba, intensificador, reguladores de presión y electro válvulas.

Los robots empleados requieren control de trayectoria continua y elevada precisión. Su campo de acción varía con el tamaño de las piezas a cortar siendo, en general, de envergadura media (de 1 a 3 metros de radio). En este sentido, como se ha comentado, con mucha frecuencia se dispone al robot suspendido boca abajo sobre la pieza.



*Figura 6. Robots dedicados al corte de piezas*

### **2.2.8. Montaje**

Las operaciones de montaje, por la gran precisión y habilidad que normalmente exigen, presentan grandes dificultades para su automatización flexible. Sin embargo, el hecho de que estas operaciones representen una buena parte de los costes totales del producto, ha propiciado las investigaciones y desarrollos en esta área, consiguiéndose importantes avances.

Muchos procesos de ensamblado, como el que vemos en la Figura 7, se han automatizado empleando máquinas especiales que funcionan con gran precisión y rapidez. Sin embargo, el mercado actual precisa de sistemas muy flexibles, que permitan introducir frecuentes modificaciones en los productos con unos costes mínimos. Por este motivo el robot industrial se ha convertido en muchos casos en la solución ideal para la automatización del ensamblaje.

En particular, el robot resuelve correctamente muchas aplicaciones de ensamblado de piezas pequeñas en conjuntos mecánicos o eléctricos. Para ello el robot precisa de una serie de elementos auxiliares cuyo coste es similar o superior al del propio robot.

Entre éstos cabe destacar a los alimentadores (tambores vibradores, por ejemplo), posicionadores y los posibles sensores que usa el robot para ayudarse en su tarea (esfuerzos, visión, tacto, etc.).

Estos sensores son indispensables en muchos casos debido a las estrechas tolerancias con que se trabaja en el ensamblaje y a los inevitables errores, aunque sean muy pequeños, en el posicionamiento de las piezas que entran a formar parte de él.

Los robots empleados en el ensamblaje requieren, en cualquier caso, una gran precisión y repetibilidad, no siendo preciso que manejen grandes cargas.

El tipo SCARA ha alcanzado gran popularidad en este tipo de tareas por su bajo coste y buenas características. Éstas se consiguen por su adaptabilidad selectiva, presentando facilidad para desviarse, por una fuerza externa, en el plano horizontal y una gran rigidez para hacerlo en el eje vertical.

También se usan con frecuencia robots cartesianos por su elevada precisión y, en general, los robots articulares que pueden resolver muchas de estas aplicaciones con suficiente efectividad.

La dificultad inherente de este tipo de tareas obliga, en casi todos los casos, a facilitarlas con un adecuado rediseño de las partes que componen el conjunto a ensamblar. De este modo, conjuntos cuyo ensamblaje automatizado sería inabordable con su diseño inicial, pueden ser montados de una manera competitiva mediante el empleo de robots.

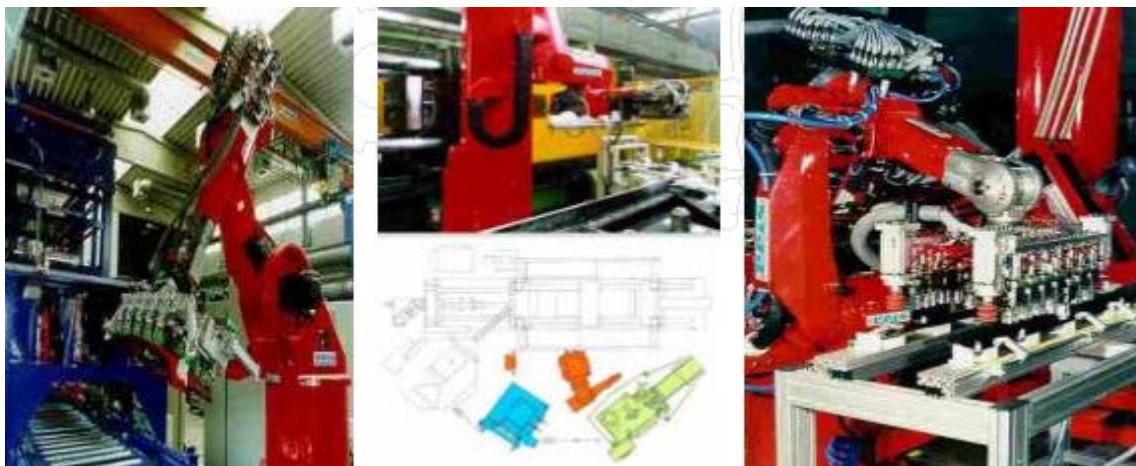


Figura 7. Robots en una cadena de montaje

### 2.2.9. Paletización

La paletización es un proceso básicamente de manipulación, consistente en disponer piezas sobre una plataforma o bandeja (palet). Las piezas en un palet ocupan normalmente posiciones predeterminadas, procurando asegurar la estabilidad, facilitar su manipulación



y optimizar su extensión. Los palets son transportados por diferentes sistemas (cintas transportadoras, carretillas, etc.) llevando su carga de piezas, bien a lo largo del proceso de fabricación, bien hasta el almacén o punto de expedición.

Existen diferentes tipos de máquinas específicas para realizar operaciones de paletizado. Éstas frente al robot, presentan ventajas en cuanto a velocidad y coste, sin embargo, son rígidas en cuanto a su funcionamiento, siendo incapaces de modificar su tarea de carga y descarga.

Así pues, los robots, como los que podemos ver en la figura 8, realizan con ventaja aplicaciones de paletización en las que la forma, número o características generales de los productos a manipular, cambian con relativa frecuencia. En estos casos, un programa de control adecuado permite resolver la operación de carga y descarga, optimizando los movimientos del robot, aprovechando la capacidad del palet o atendiendo a cualquier otro imperativo.

Generalmente, las tareas de paletización implican el manejo de grandes cargas, de peso y dimensiones elevadas. Por este motivo, los robots empleados en este tipo de aplicaciones acostumbran a ser robots de gran tamaño, con una capacidad de carga de 10 a 100 kg. No obstante, se pueden encontrar aplicaciones de paletización de pequeñas piezas, en las que un robot con una capacidad de carga de 5 kg es suficiente.

Las denominadas tareas de “pick and place”, aunque en general con características diferentes al paletizado, guardan estrecha relación con este. La misión de un robot trabajando en un proceso de pick and place consiste en recoger piezas de un lugar y depositarlas en otro. La complejidad de este proceso puede ser muy variable, desde el caso más sencillo en el que el robot recoge y deja las piezas en una posición prefijada, hasta aquellas aplicaciones en las que el robot precisa de sensores externos, como visión artificial o tacto, para determinar la posición de recogida y colocación de las piezas. Al contrario que en las operaciones de paletizado, las tareas de picking suelen realizarse con piezas pequeñas (peso inferior a 5 kg) necesitándose velocidad y precisión.



*Figura 8. Robots colocando cajas en palets*

### **2.2.10. Control de calidad**

La tendencia a conseguir una completa automatización de la producción abarca todas las etapas de ésta, inclusive el control de la calidad. El robot industrial puede participar en esta tarea usando su capacidad de posicionamiento y manipulación. Así, transportando en su extremo un palpador, puede realizar el control dimensional de piezas ya fabricadas. Para ello el robot toca con el palpador varios puntos claves de la pieza.

A partir del conocimiento que en todo instante tiene la unidad de control del robot de la posición y orientación de su extremo, se obtienen los datos relativos a la posición espacial de los puntos determinados de la pieza. Estos datos son utilizados para registrar posibles desviaciones sobre los valores deseados.

Otras posibles aplicaciones del robot en el control de calidad consisten en utilizar a éste para transportar el instrumental de medida (ultrasonidos, rayos X, etc.) a puntos concretos de la pieza a examinar. La situación de posibles defectos detectados puede registrarse y almacenarse a partir, como antes, de la propia unidad de control de robot.

Por último, el robot puede usarse como mero manipulador encargado de clasificar piezas según ciertos criterios de calidad (piezas correctas e incorrectas, por ejemplo). En este caso, el control y decisión de a qué familia pertenece la pieza se hace mediante un sistema específico, capaz de comunicarse con el robot (visión artificial). No existe, en este caso, un tipo concreto de robot más adecuado para estas tareas. En el control dimensional suelen usarse robots cartesianos por la precisión de estos pero, en general, son igualmente válidos robots articulares.

### **2.2.11. Manipulación en salas blancas**

Ciertos procesos de manipulación deben ser realizados en ambientes extremadamente limpios y controlados. En ellos, la actividad del operador se ve dificultada no por el trabajo en sí, que no tiene por qué ser especialmente complejo o delicado, sino por la necesidad de mantener elevadas medidas de control de impurezas mediante el uso de trajes especiales y controles rigurosos.

Las denominadas salas blancas de la industria de los semiconductores o las de fabricación de algunos productos farmacéuticos, son ejemplos típicos.

La utilización de un robot para estas funciones se realiza introduciendo éste de manera permanente en una cabina. El robot debe cumplir la normativa correspondiente al entorno siendo, por lo demás, válido cualquier robot comercial, normalmente de seis grados de libertad y alcance inferior a un metro, como el de la Figura 9. De este modo se consigue, entre otros beneficios, una reducción del riesgo de contaminación, una mayor homogeneidad en la calidad del producto y una reducción en el coste de la fabricación.



Figura 9. Robots típicos de salas blancas

### 2.2.12. Nuevos sectores de aplicación

Las aplicaciones de la robótica examinadas anteriormente responden a los sectores que, como el del automóvil o el de la manufactura, han sido desde hace 30 años usuarios habituales de los robots industriales. Este uso extensivo de los robots en los citados se ha visto propiciado por la buena adaptación del robot industrial a las tareas repetitivas en entornos estructurados. De este modo, la competitividad del robot frente a otras soluciones de automatización se justifica por su rápida adaptación a series cortas, sus buenas características de precisión y rapidez, y por su posible reutilización con costes inferiores a los de otros sistemas.

Sin embargo, existen otros sectores donde no es preciso conseguir elevada productividad, en los que las tareas a realizar no son repetitivas, y no existe un conocimiento detallado del entorno. Entre estos sectores podría citarse la industria nuclear, la construcción, la medicina o el uso doméstico. En ninguno de ellos existe la posibilidad de sistematizar y clasificar las posibles aplicaciones, pues éstas responden a soluciones aisladas a problemas concretos. Este tipo de robots ha venido a llamarse robots de servicio y están siendo aplicados en sectores como:

- Agricultura y silvicultura
- Ayuda a discapacitados
- Construcción
- Domésticos
- Entornos peligrosos
- Espacio
- Medicina y salud
- Minería
- Entornos submarinos
- Vigilancia y seguridad
- Telepresencia

En general, la aplicación de la robótica a estos sectores se caracteriza por la falta de estructuración tanto del entorno como de la tarea a realizar, y la menor importancia de criterios de rentabilidad económica frente a la de realizar tareas en entornos peligrosos o en los que no es posible el acceso de las personas. Estas características obligan a que los robots de servicio cuenten con un mayor grado de inteligencia, puesto que se traduce en el empleo de sensores y del software adecuado para la toma rápida de decisiones. Puesto que en muchas ocasiones el estado actual de la inteligencia artificial (disciplina que aborda esta problemática) no está lo suficientemente desarrollado como para resolver las situaciones planteadas a los robots de servicio, es frecuente que estos cuenten con un mando remoto, siendo en muchas ocasiones robots teleoperados.

## 2.3. Estructura de los robots industriales

Un manipulador robótico, Figura 10, consta de una secuencia de elementos estructurales rígidos, denominados enlaces o eslabones, conectados entre sí mediante juntas o articulaciones, que permiten el movimiento relativo de cada dos eslabones consecutivos.

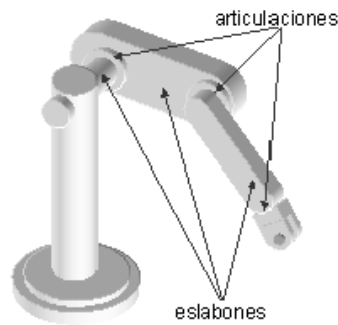


Figura 10. Estructura básica de un robot

Una articulación puede ser:

- **Lineal** (deslizante, traslacional o prismática), si un eslabón desliza sobre un eje solidario al eslabón anterior. Podemos distinguir entre:
  - Articulación lineal (tipo L) en la que el movimiento de traslación se da en la dirección de ambos conectores.

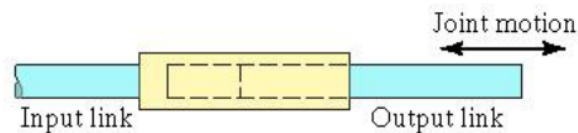


Figura 11. Articulación tipo L

- Articulación ortogonal (tipo O) en la que uno de los conectores es perpendicular al otro.

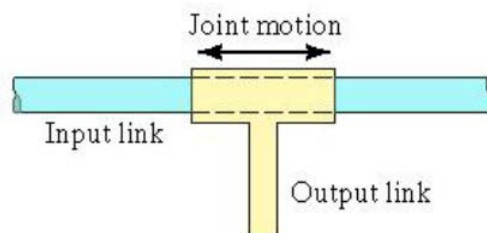


Figura 12. Articulación tipo O

- **Rotacional**, en caso de que un eslabón gire en torno a un eje solidario al eslabón anterior. Podemos distinguir entre:
  - Articulación de rotación (tipo R) en la que el eje de rotación es perpendicular a ambos conectores.

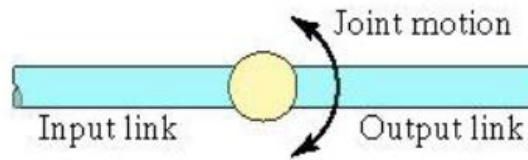


Figura 13. Articulación tipo R

- Articulación de torsión (tipo T) en la que el eje de rotación es paralelo a ambos conectores.

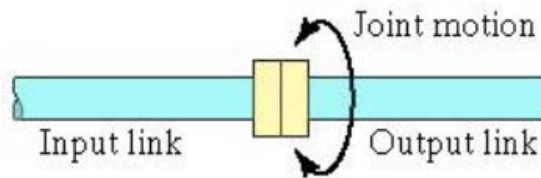


Figura 14. Articulación tipo T

- Articulación de revolución (tipo V) en la que el eje de rotación es paralelo al conector de entrada y perpendicular al de salida.

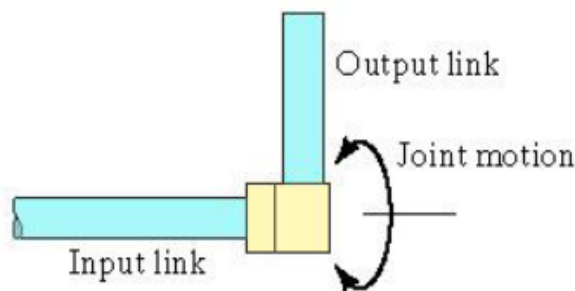


Figura 15. Articulación tipo V

El conjunto de eslabones y articulaciones se denomina cadena cinemática. Se dice que una cadena cinemática es abierta si cada eslabón se conecta mediante articulaciones exclusivamente al anterior y al siguiente, exceptuando el primero, que se suele fijar a un soporte, y el último, cuyo extremo final queda libre. A éste se puede conectar un elemento terminal o actuador final: una herramienta especial que permite al robot de uso general realizar una aplicación particular, que debe diseñarse específicamente para dicha aplicación: una herramienta de sujeción, de soldadura, de pintura, etc. El punto más

significativo del elemento terminal se denomina punto terminal (PT). En el caso de una pinza, el punto terminal vendría a ser el centro de sujeción de la misma (Figura 16).

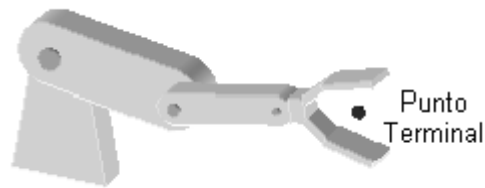


Figura 16. Punto terminal

Los elementos terminales pueden dividirse en dos categorías:

- **Pinzas** (gripper)
- **Herramientas**

Las pinzas se utilizan para tomar un objeto, normalmente la pieza de trabajo, y sujetarlo durante el ciclo de trabajo del robot. Hay una diversidad de métodos de sujeción que pueden utilizarse, además de los métodos mecánicos obvios de agarre de la pieza entre dos o más dedos. Estos métodos suplementarios incluyen el empleo de casquillos de sujeción, imanes, ganchos, y cucharas.

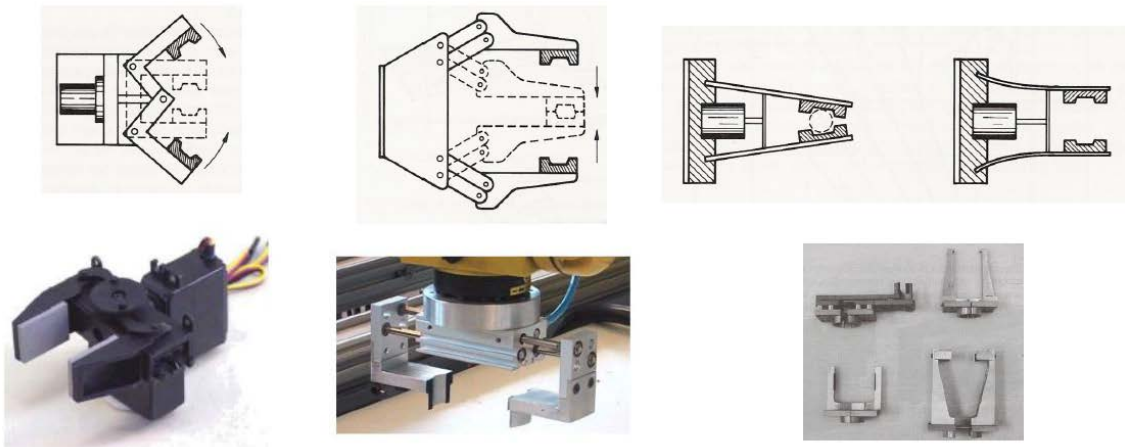


Figura 17. Distintos tipos de pinzas

Una herramienta se utiliza como actuador final en aplicaciones en donde se exija al robot realizar alguna operación sobre la pieza de trabajo. Estas aplicaciones incluyen la soldadura por puntos, la soldadura por arco, la pintura por pulverización y las operaciones de taladro. En cada caso, la herramienta particular está unida a la muñeca del robot para realizar la operación.



Figura 18. Herramienta usada por el robot para pintar

A los manipuladores robóticos se les suele denominar también brazos de robot por la analogía que se puede establecer, en muchos casos, con las extremidades superiores del cuerpo humano, como se puede ver en la Figura 19.

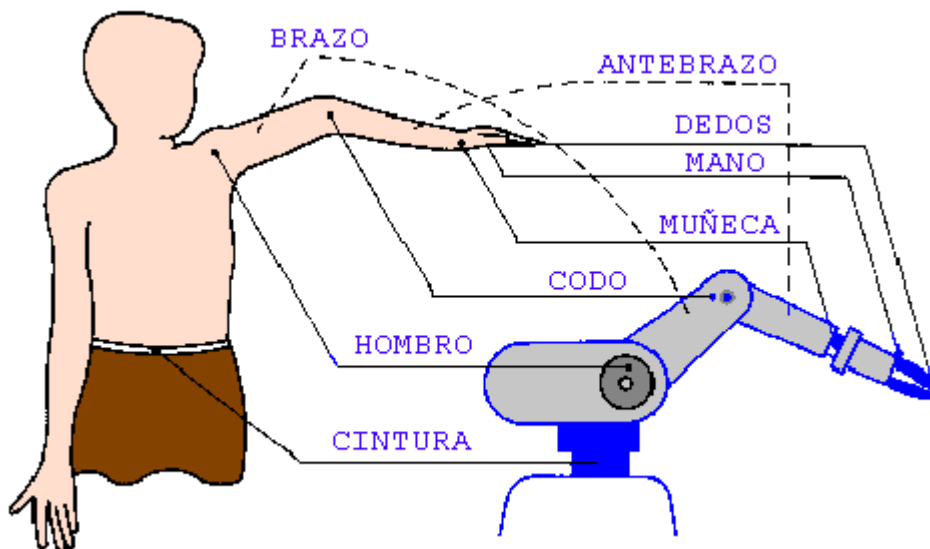


Figura 19. Analogía brazo-robot

Se denomina grado de libertad (g.d.l.) a cada una de las coordenadas independientes que son necesarias para describir el estado del sistema mecánico del robot (posición y orientación en el espacio de sus elementos). Normalmente, en cadenas cinemáticas abiertas, cada par eslabón-articulación tiene un solo grado de libertad, ya sea de rotación o de traslación. Pero una articulación podría tener dos o más g.d.l. que operan sobre ejes que se cortan entre sí.



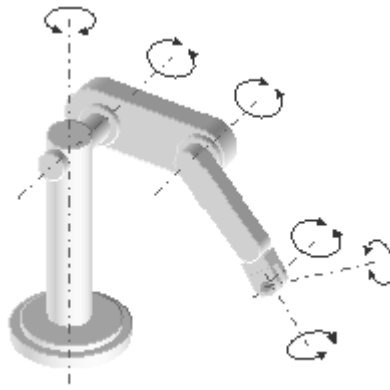


Figura 20. Grados de libertad de un robot

Para describir y controlar el estado de un brazo de robot es preciso determinar:

- La posición del punto terminal (o de cualquier otro punto) respecto de un sistema de coordenadas externo y fijo, denominado el sistema mundo.
- El movimiento del brazo cuando los elementos actuadores aplican sus fuerzas y momentos.

El análisis desde el punto de vista mecánico de un robot se puede efectuar atendiendo exclusivamente a sus movimientos (estudio cinemático) o atendiendo además a las fuerzas y momentos que actúan sobre sus partes (estudio dinámico) debidas a los elementos actuadores y a la carga transportada por el elemento terminal.

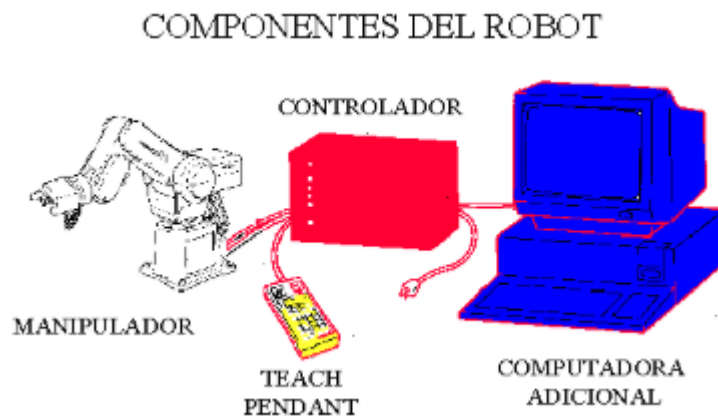


Figura 21. Componentes de un robot

Además del manipulador, los otros elementos que forman parte del robot son un controlador, mecanismos de entrada y salida de datos y dispositivos especiales (ver Figuras 21 y 22). El controlador del robot, como su nombre lo indica, es el que controla cada uno de los movimientos del manipulador y guarda sus posiciones. El controlador recibe y envía señales a otras máquinas-herramientas (por medio de señales de entrada/salida) y almacena programas. Los mecanismos de entrada y salida, más comunes

son: teclado, monitor y caja de comandos llamada "teach pendant". En la imagen siguiente tenemos un controlador (computer module) que envía señales a los motores de cada uno de los ejes del robot y la caja de comandos ("teach pendant") la cual sirve para enseñarle las posiciones al manipulador del robot.

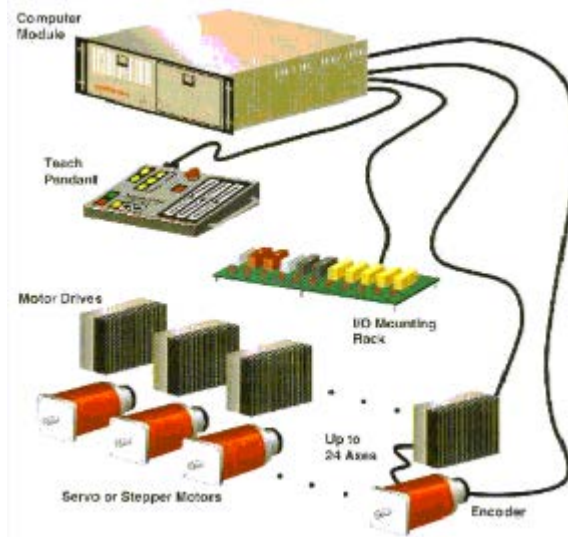


Figura 22. Controlador, teach pendant y motores

Para mandar instrucciones al controlador y para dar de alta programas de control, comúnmente se utiliza una computadora adicional. Es necesario aclarar que algunos robots únicamente poseen uno de estos componentes. En estos casos, uno de los componentes de entrada y salida permite la realización de todas las funciones.

Las señales de entrada y salida se obtienen mediante tarjetas electrónicas instaladas en el controlador del robot las cuales le permiten tener comunicación con otras máquinas-herramientas. En manufactura, por ejemplo, se utilizan estas tarjetas para comunicar al robot con las máquinas de control numérico (torno, centro de maquinado...). Estas tarjetas se componen de relevadores los cuales mandan señales eléctricas que después son interpretadas en un programa de control, estas señales nos permiten controlar cuando debe entrar el robot a cargar una pieza a la máquina, cuando debe empezar a funcionar la máquina o el robot, etc.

## 2.4. Configuraciones morfológicas y parámetros característicos de los robots industriales

Los robots industriales tienen generalmente una estructura antropomórfica y se componen de dos partes: un Cuerpo-Brazo Articulado, para el posicionamiento de objetos en el volumen de trabajo del robot, y una Muñeca, para orientar el Elemento Terminal (Herramienta) u Objeto de trabajo. Para describir su configuración morfológica los robots se designan usando símbolos comunes (L, O, R, T, V) para indicar los tipos de articulaciones utilizadas para construir el robot manipulador. Los grados de libertad del Cuerpo-Brazo Articulado se separan de los de la Muñeca con dos puntos (:).

Según la geometría de su estructura mecánica, un manipulador puede ser:

- **Cartesiano**, cuyo posicionamiento en el espacio se lleva a cabo mediante articulaciones lineales. Notación LOO:



Figura 23. Robot cartesiano

- **Cilíndrico**, con una articulación rotacional sobre una base y articulaciones lineales para el movimiento en altura y en radio. Notación TLO:



Figura 24. Robot cilíndrico

- **Polar**, que cuenta con dos articulaciones rotacionales y una lineal. Notación TRL:

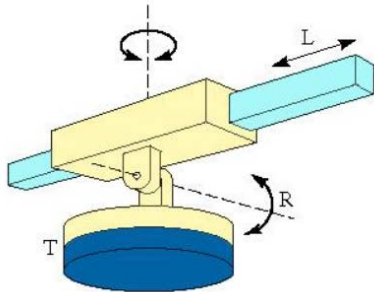


Figura 25. Robot polar

- **Esférico** (o de brazo articulado), con tres articulaciones rotacionales. Notación TRR:

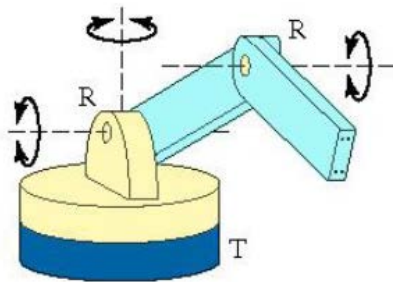


Figura 26. Robot esférico

- **Mixto**, que posee varios tipos de articulaciones, combinaciones de las anteriores. Es destacable la configuración SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arm), con notación VRO:

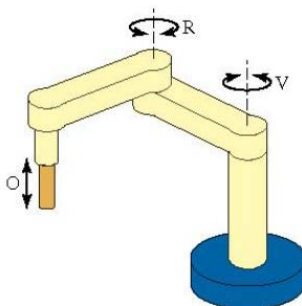


Figura 27. Robot mixto (SCARA)

- **Paralelo**, posee brazos con articulaciones prismáticas o rotacionales concurrentes.



Figura 28. Robot paralelo

Los principales parámetros que caracterizan a los robots industriales son:

- Número de grados de libertad. Es el número total de grados de libertad de un robot, dado por la suma de g.d.l. de las articulaciones que lo componen. Aunque la mayoría de las aplicaciones industriales requieren 6 g.d.l., como las de soldadura, mecanizado y almacenamiento, otras más complejas requieren un número mayor, tal es el caso de las labores de montaje.
- Espacio de accesibilidad o espacio (volumen) de trabajo. Es el conjunto de puntos del espacio accesibles al punto terminal, que depende de la configuración geométrica del manipulador. Un punto del espacio se dice totalmente accesible si el PT puede situarse en él en todas las orientaciones que permita la constitución del manipulador y se dice parcialmente accesible si es accesible por el PT pero no en todas las orientaciones posibles.
- Capacidad de posicionamiento del punto terminal. Se concreta en tres magnitudes fundamentales: resolución espacial, precisión y repetibilidad, que miden el grado de exactitud en la realización de los movimientos de un manipulador al realizar una tarea programada.
  - La resolución espacial se define como el incremento más pequeño de movimiento que puede ejecutar un robot. Depende directamente del control del sistema y de las inexactitudes mecánicas del robot. Del control del sistema porque éste, precisamente, es el medio para controlar todos los incrementos individuales de una articulación. Las inexactitudes mecánicas se encuentran estrechamente relacionadas con la calidad de los componentes que conforman las uniones y las articulaciones. Como ejemplos de inexactitudes mecánicas pueden citarse la holgura de los engranes, las tensiones en las poleas, las fugas de fluidos, etcétera.
  - La exactitud se refiere a la capacidad de un robot para situar el extremo de su muñeca en un punto señalado dentro del volumen de trabajo. La exactitud mantiene una relación directa con la resolución espacial, es decir, con la

capacidad del control del robot de dividir en incrementos muy pequeños el volumen de trabajo. El robot solamente podría acercarse al objeto posicionándose en el punto direccionable más próximo, que puede no ser la posición exacta requerida. Un robot presenta una mayor exactitud cuando su brazo opera cerca de la base. A medida que el brazo se aleja de la base, la exactitud se irá haciendo menor. Esto se debe a que las inexactitudes mecánicas se incrementan al ser extendido el brazo. Otro factor que afecta a la exactitud es el peso de la carga, las cargas más pesadas reducen la exactitud (al incrementar las inexactitudes mecánicas). El peso de la carga también afecta la velocidad de los movimientos del brazo y la resistencia mecánica.

- La repetibilidad, el tercer y último factor, se refiere a la capacidad del robot de regresar al punto que se le programó las veces que sean necesarias. Al robot se le enseña el punto programado (PP), al indicarle mediante un comando de programación que regrese al punto PP el robot se puede colocar en el punto de regreso (PR) o en otro punto de regreso que tenga la misma distancia hacia PP. En un robot industrial se espera que la repetibilidad sea del orden de +/- 0,0490 mm.
- Capacidad de carga. Es el peso que puede transportar el elemento terminal del manipulador. Es una de las características que más se tienen en cuenta en la selección de un robot dependiendo de la tarea a la que se destine.
- Velocidad. Es la máxima velocidad que alcanzan el PT y las articulaciones.

## **2.5. Sistemas de control**

Un robot puede verse como si fuese un sistema biológico: posee un sistema mecánico que interacciona con el mundo y un sistema de control que regula las acciones del sistema. Este sistema de control puede contemplarse como un sistema nervioso, dividido en distintos centros de control encargados de tareas. Cada uno de estos centros actuará de forma autónoma mediante distintas señales hacia los elementos mecánicos u otros centros de control, y su acción dependerá de la información que pueda captar del mundo exterior.

La unidad de control es el "cerebro" del robot, el órgano de tratamiento de la información. Es el responsable de determinar los movimientos precisos de cada parte del mecanismo para que el elemento terminal pueda ser movido a la posición y orientación requeridas en el espacio.

La clasificación de Robots por tipo de control según la ISO 8373, diferencia entre:

### **2.5.1. Secuencial**

Los movimientos se efectúan eje a eje en un orden dado, de modo que la finalización de un movimiento inicia el siguiente. Utilizan finales de carrera o topes mecánicos para indicar las posiciones relativas de las articulaciones. Los controladores son de 2 estados (arriba-abajo, abierto-cerrado). Entre ambos estados no se puede controlar la trayectoria ni la operación a realizar. Los movimientos se realizan mediante algún sistema secuenciador. No se considera programación.

### **2.5.2. Controlado por trayectoria**

Ejecuta un procedimiento controlado, por el cual los movimientos de 3 o más ejes se desarrollan según instrucciones que especifican en el tiempo la trayectoria requerida para alcanzar la siguiente posición (interpolación). Mediante una unidad de control se le "enseñan" (almacenan en memoria) al robot las posiciones o movimientos y luego él los repite bajo su propio control. Utilizan alguna forma de servocontrol para asegurar las posiciones almacenadas. Se clasifican en:

- Control punto a punto (PTP). No almacenan la trayectoria, solo los puntos por los que pasa.
- Control de trayectoria continua (CP). Almacenan los puntos inicial y final y el tipo de trayectoria. La unidad de control (interpolador) calcula los puntos intermedios.

### **2.5.3. Control adaptativo**

Añaden a la capacidad de reproducir un ciclo de movimiento almacenado, la capacidad de interactuar con el entorno mediante el uso de sensores. Exigen tanto de un computador digital como de un controlador. Pueden modificar su ciclo programado y tomar decisiones lógicas en función de los datos recibidos de los sensores.

#### 2.5.4. Teleoperado

Robot operado remotamente por un humano, extendiendo las capacidades motoras y sensoriales de éste.

Otra clasificación de control es la que distingue entre control en bucle abierto y control en bucle cerrado.

Control en **bucle abierto** es aquel en el que solo actúa el proceso sobre la señal de entrada y da como resultado una señal de salida independiente a la señal de entrada pero que se basa en ella. No hay retroalimentación hacia el controlador.

Control en **bucle cerrado** es aquel en el que la acción de control está en función de la señal de salida. Los sistemas de circuito cerrado usan la retroalimentación desde un resultado final para ajustar la acción de control en consecuencia.

El control en bucle abierto da lugar a muchos errores, y aunque es más simple y económico que el control en bucle cerrado, no se admite en aplicaciones industriales en las que la exactitud es una cualidad imprescindible. La inmensa mayoría de los robots que hoy día se utilizan con fines industriales se controlan mediante un proceso en bucle cerrado, es decir, mediante un bucle de realimentación. Este control se lleva a cabo con el uso de un sensor de la posición real del elemento terminal. La información recibida desde el sensor se compara con el valor inicial deseado y se actúa en función del error obtenido, de forma tal que la posición real coincida con la que se había establecido inicialmente.



## **2.6. Tipos de programación**

El proceso de programación de un robot consiste en introducir en su sistema de control las instrucciones necesarias para que desempeñe las tareas para las que ha sido diseñado. Existen varios procedimientos de programación de robots.

### **2.6.1. Programación guiada o directa**

El operario interviene guiando manualmente el brazo del robot, y hace que este vaya describiendo los movimientos y trace las trayectorias necesarias para cumplir su función. Cada uno de los movimientos realizados se va almacenando en la memoria del robot, de forma que podrán ser repetidos posteriormente, ya sin intervención humana. En este tipo de programación es necesario disponer del propio robot para la elaboración del programa. En muchas ocasiones se utiliza un sistema de guiado en forma de joystick para mover las articulaciones del robot. Es un tipo de programación sencilla, pero con el inconveniente de que no tiene en cuenta las variaciones del entorno.

### **2.6.2. Programación textual o indirecta**

En este caso no es necesaria la presencia del robot para realizar el programa, puesto que este se lleva a cabo en un lenguaje informático. El programa consiste en un texto formado por un conjunto de instrucciones; cuando el programa sea grabado en la memoria del robot, este realizará las acciones indicadas en el mismo.

Este tipo de programación permite realizar operaciones más complejas y con mayor grado de precisión. Además, presenta la ventaja de que es posible establecer relaciones entre el robot y su entorno. Para ello basta con introducir en el programa los datos procedentes de los sensores de forma que el robot actúe en consonancia con los mismos, tal y como ocurre en los denominados «robots inteligentes».

A su vez, la programación textual puede ser de dos tipos: explícita y especificativa.

La programación textual explícita se corresponde con los llamados lenguajes estructurados. Consiste en programar de forma secuenciada y estructurada el conjunto de acciones que debe realizar el robot para llevar a cabo la tarea encomendada. En dichas instrucciones pueden introducirse también las características del medio.

La programación textual especificativa está más en consonancia con los lenguajes de programación orientados a objetos. En este caso, el programa gira en torno a los elementos manipulados por el robot y las acciones que ha de realizar con ellos, teniendo en cuenta el ámbito en el que se desarrollan dichas acciones.

## 2.7. El Scorbot-ER VII

### 2.7.1. Descripción del robot

El Scorbot-ER VII (Figura 29) es un robot vertical articulado de cinco ejes, con control continuo de la trayectoria, que permite ser accionado manualmente mediante un mando colgante (o a través del teclado de un ordenador), y ejecutar tareas programadas en la memoria del controlador. Según la notación explicada en este capítulo el Scorbot sería TRRRT:.



Figura 29. Scorbot-ER VII

Las características más importantes del robot manipulador son las siguientes:

**Estructura mecánica:** Robot vertical articulado

**Número de ejes:** 5 más la pinza

**Manipulador terminal:** Pinza eléctrica

**Rango operativo:**

- Eje 1: Rotación de la base
  - estándar 250°
  - programable 310°
- Eje 2: Rotación del hombro 170°
- Eje 3: Rotación del codo 225°
- Eje 4: Inclinación de la muñeca 180°
- Eje 5: Balanceo de la muñeca
  - mecánicamente ilimitado
  - eléctricamente 360°

**Máxima capacidad de carga:** (incluida la pinza) 2 kg

La conexión con el controlador se realiza mediante una manguera flexible que contiene los seis cables de los conectores de los cinco ejes y de la pinza eléctrica.

### **2.7.2. Accesorios**

Los accesorios de los que dispone el robot son la pinza eléctrica y una base lineal.

#### **Pinza eléctrica**

La pinza eléctrica es el elemento manipulador terminal del robot más común, aunque no el único posible. Está accionada por un motor de corriente continua, permitiendo un movimiento paralelo de las dos pinzas, que poseen sendas almohadillas de caucho en sus extremos. El movimiento es de control todo-nada, sin posiciones intermedias entre las de apertura y cierre.

#### **Base lineal**

Para ampliar el campo de acción del robot se ha incorporado una base corredera lineal, sobre la que va montado éste.

Se compone de dos railes de acero y un tornillo sin fin sobre el que desliza el acoplamiento de la base del robot.

## 3. Modelado y simulación del Scorbot-ER VII

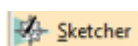
### 3.1. Modelado con Catia Part Design

CATIA (computer-aided three dimensional interactive application) es un programa informático de diseño, fabricación e ingeniería asistida por computadora comercial realizado por Dassault Systèmes. El programa está desarrollado para proporcionar apoyo desde la concepción del diseño hasta la producción y el análisis de productos.

En esta parte de la memoria se va a proceder a mostrar cómo se han ido modelando todas y cada una de las partes del robot y su posterior ensamblaje.

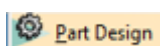
Para el modelado se ha utilizado el entorno de Diseño Mecánico. Este entorno proporciona todas las herramientas para la creación y edición de piezas, el análisis sistemático de cuestiones del diseño como ángulos de salida y desmoldeos, análisis de curvaturas, propiedades físicas, etc. También está directamente relacionado con el desarrollo de ensamblajes, puesto que casi siempre nuestra pieza ha de ir incluida en un producto final. Finalmente incluye un módulo de dibujo destinado a la extracción de los planos para la planta de fabricación.

Dentro de este entorno, para el desarrollo del trabajo hemos empleado los módulos siguientes:



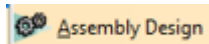
Sketcher

Sketcher: A partir de una gran cantidad de comandos disponibles, permite la generación de croquis o bocetos en 2D que se emplean como punto de partida de gran parte de las operaciones de modelado en 3D.



Part Design

Part Design: Este módulo fundamental tiene como misión la creación y edición de sólidos en 3D. Permite la generación de todo tipo de piezas y/o componentes de cierto grado de complejidad a partir de herramientas específicas para cada concepto de creación.



Assembly Design

Assembly Design: En este apartado se encuentran todos los comandos necesarios para el correcto ensamblaje de las distintas partes que constituyen un conjunto y que permitirán la correcta simulación cinemática y dinámica de mecanismos de forma específica en el módulo DMU Kinematics.

Tras una primera etapa de toma de medidas en el laboratorio en el que se encuentra el Scorbot, comienza el modelado del robot. Para ello distinguiremos entre distintas partes que una vez modeladas independientemente, se ensamblarán con el módulo pertinente. Podemos ver todas las partes en las Figuras 30 a la 36.

Distinguimos entre:

- Mesa
- Plataforma
- Base
- Cuerpo
- Brazo Grande
- Brazo Pequeño
- Muñeca-Pinzas

### Mesa

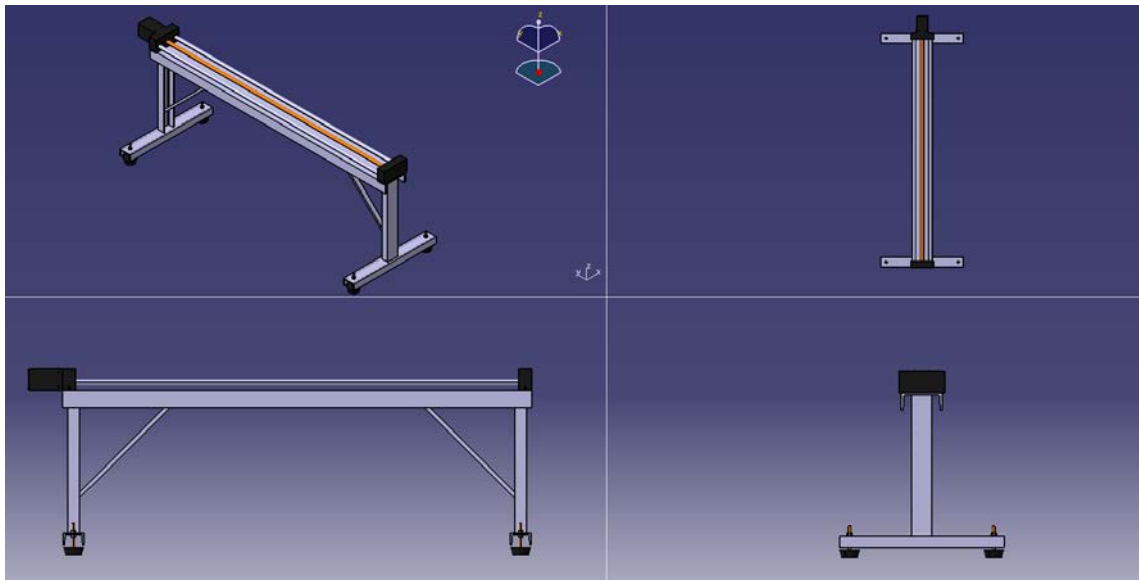


Figura 30. Mesa Scorbot

## Plataforma

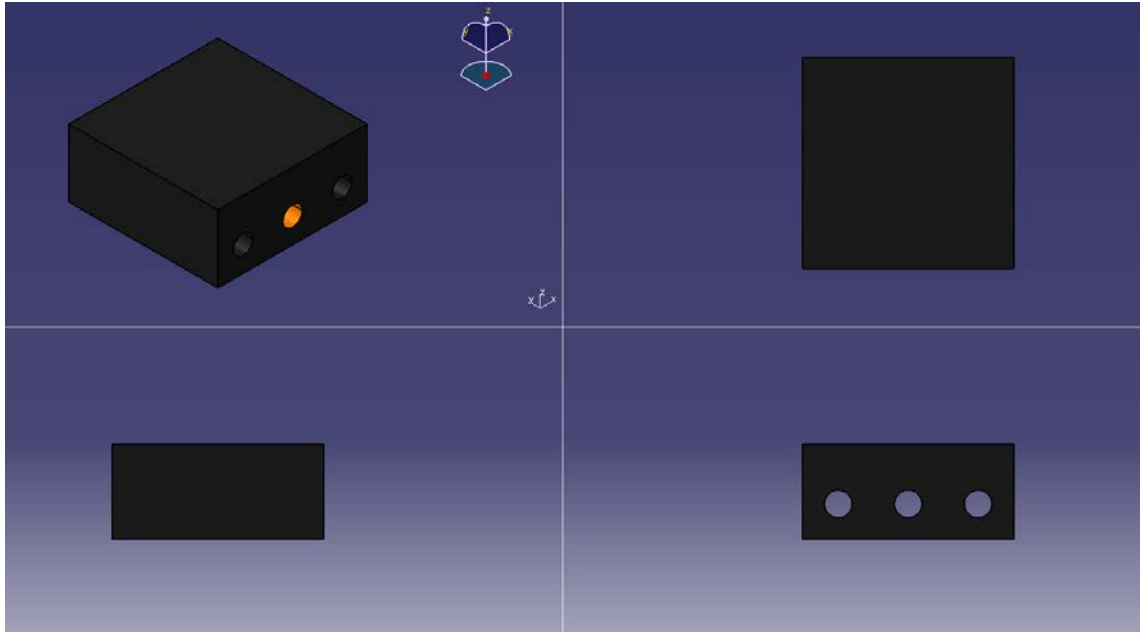


Figura 31. Plataforma Scorbot

## Base

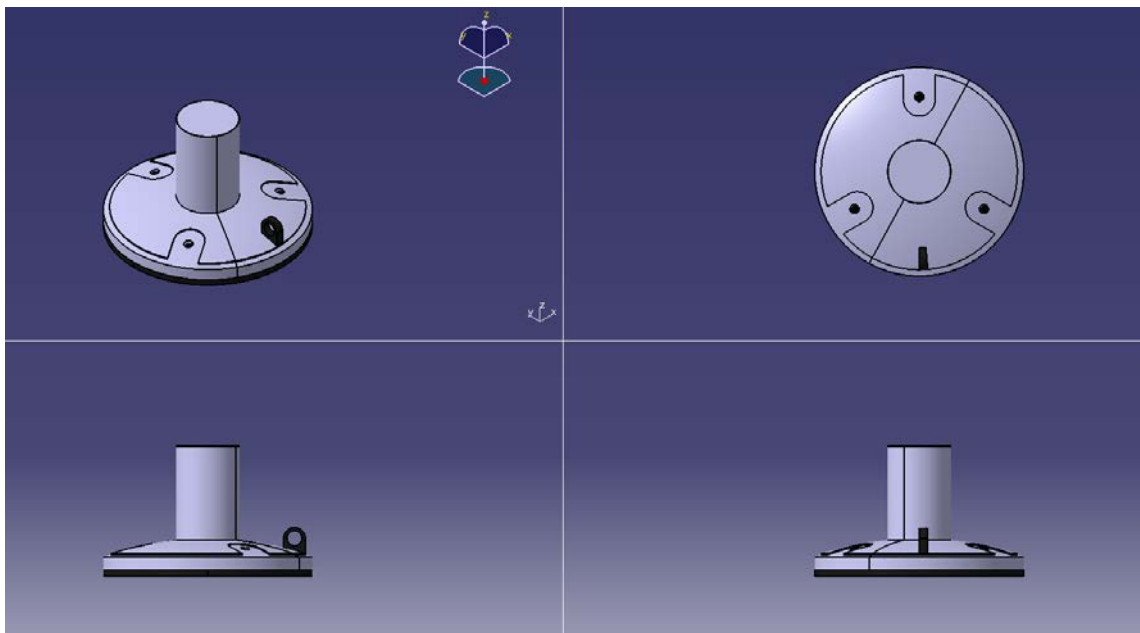


Figura 32. Base Scorbot

## Cuerpo

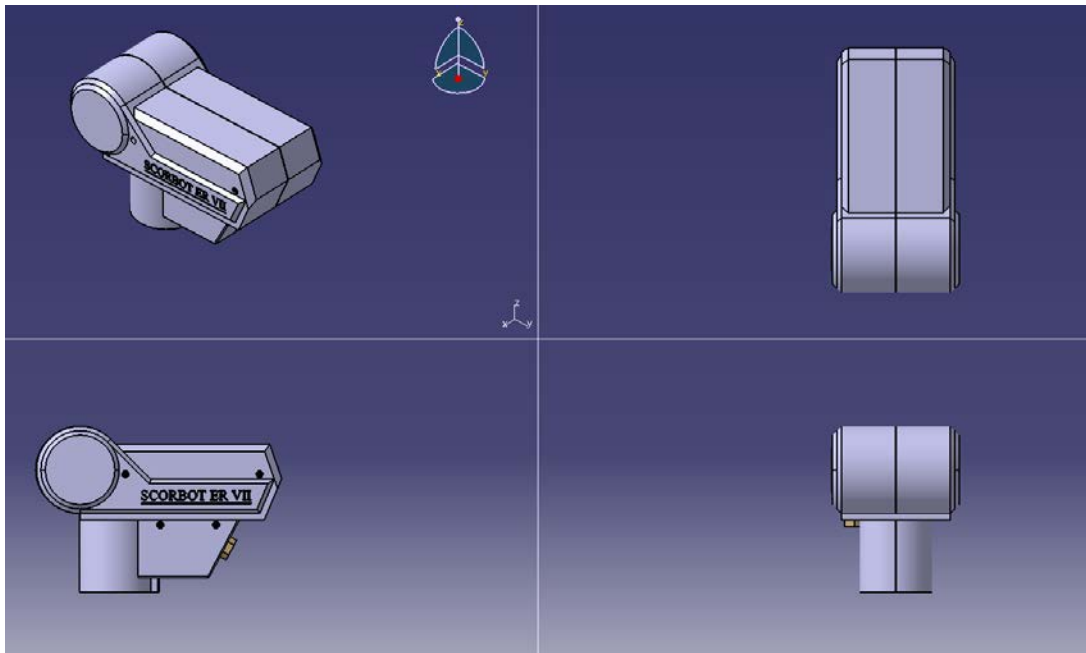


Figura 33. Cuerpo Scorbot

## Brazo Grande

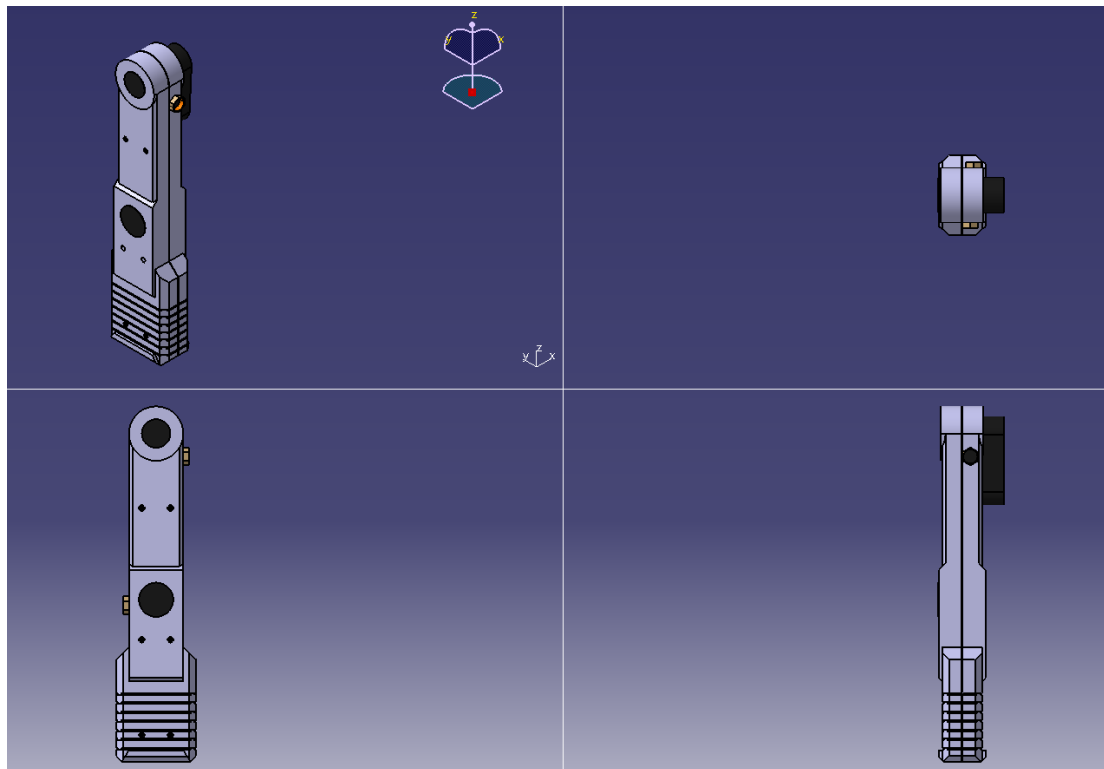


Figura 34. Brazo grande Scorbot

## Brazo Pequeño

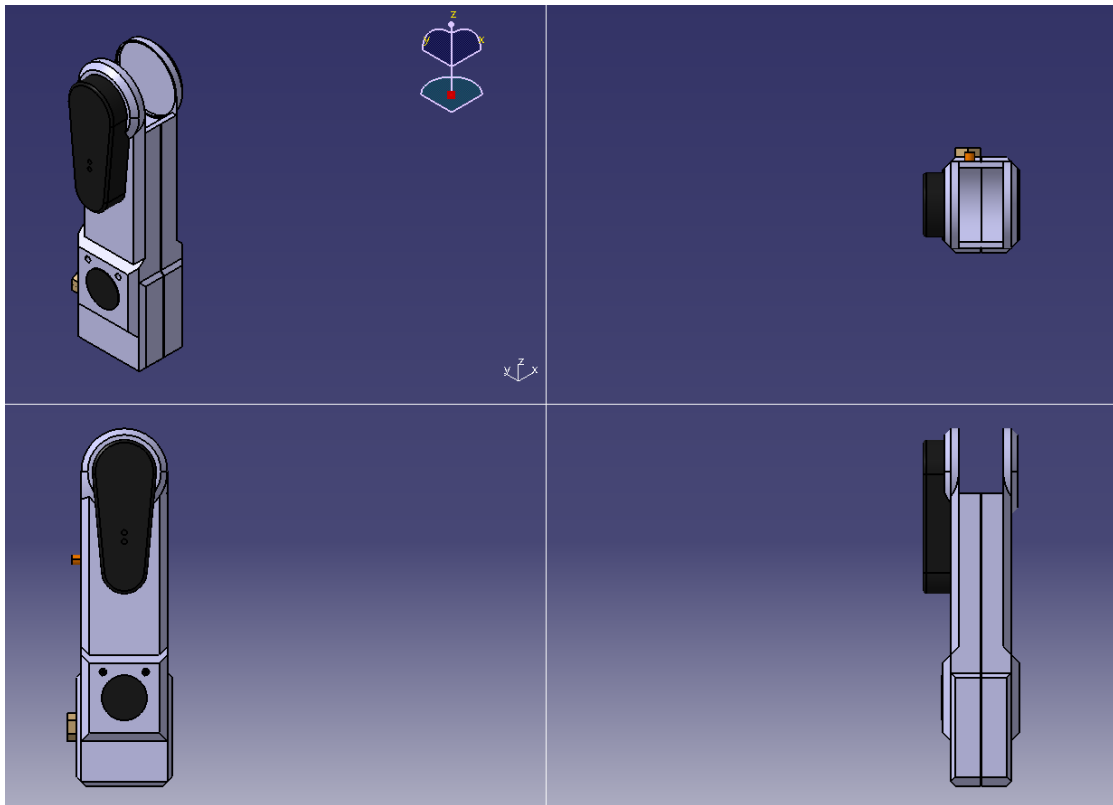


Figura 35. Brazo pequeño Scorbot

## Muñeca-Pinzas

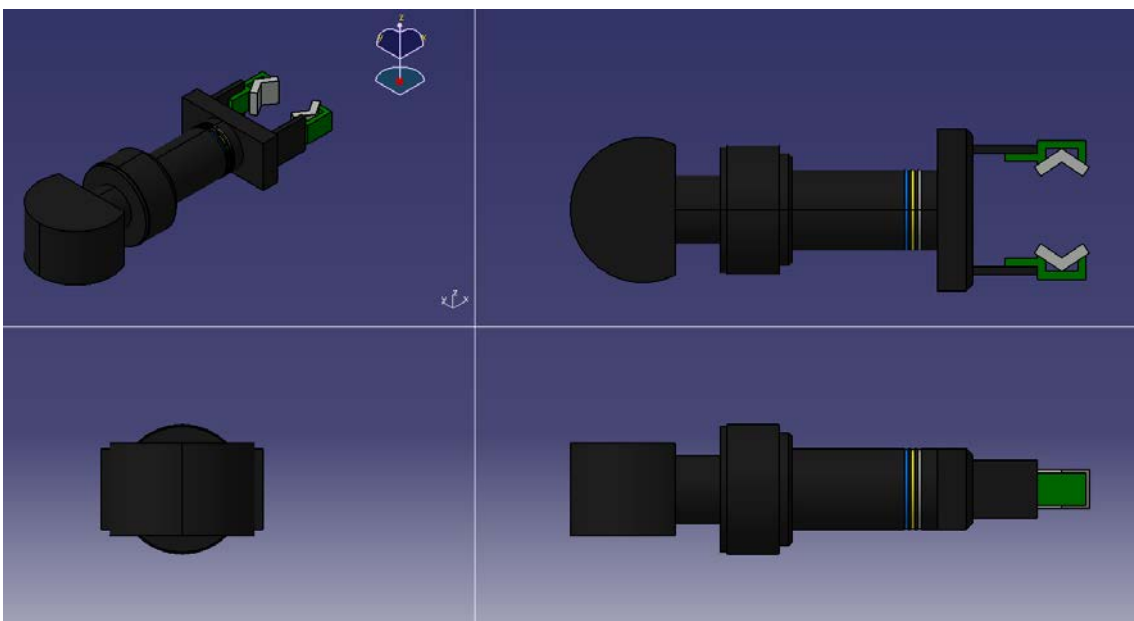
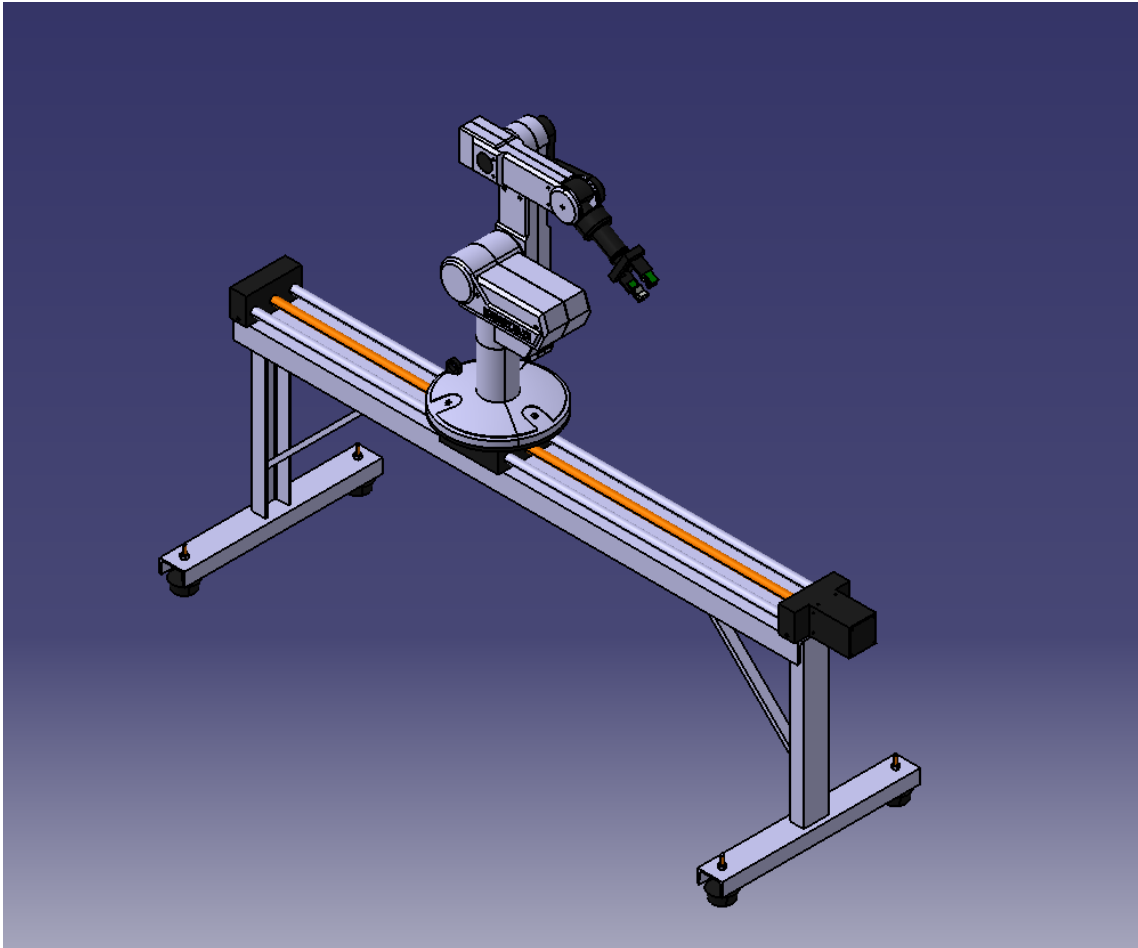


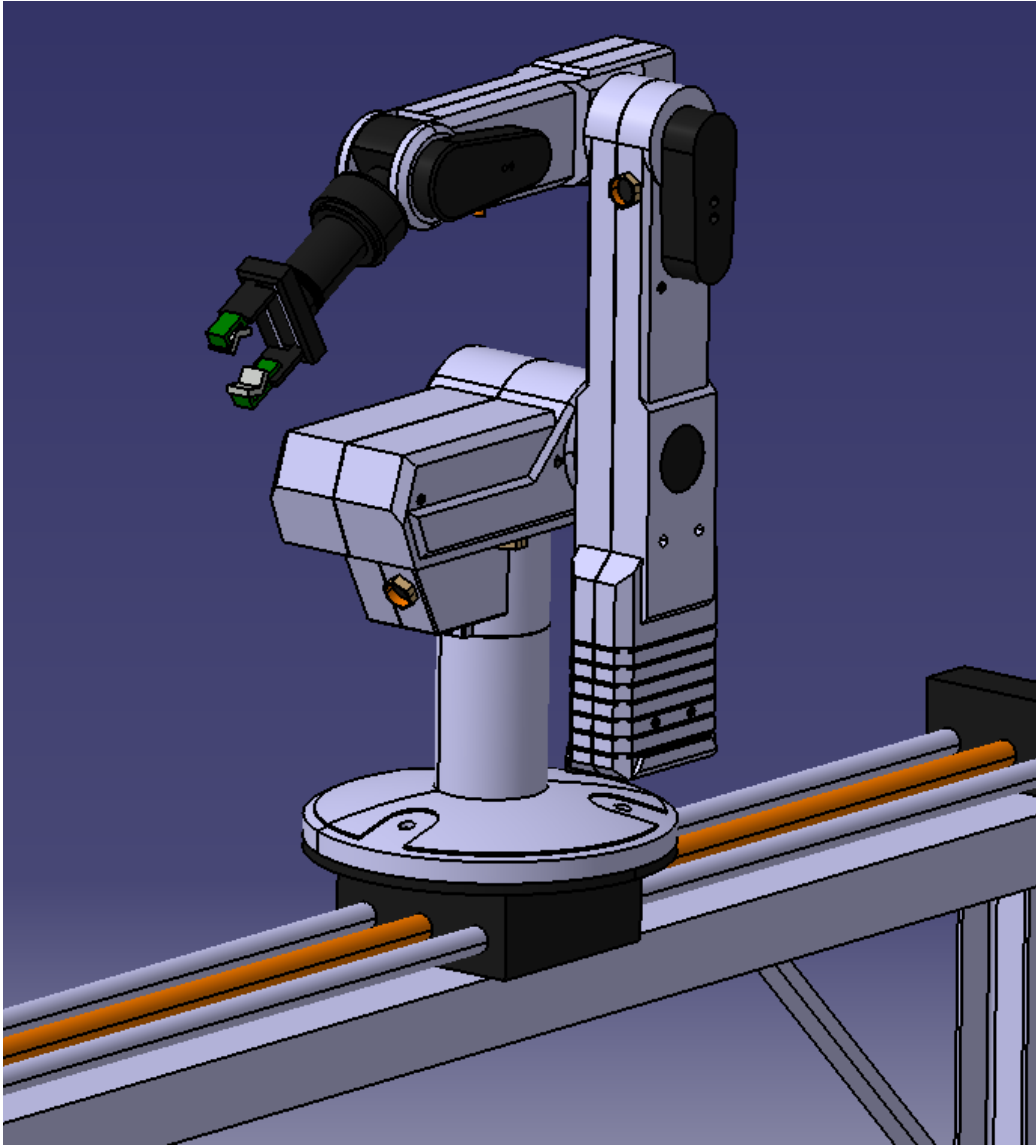
Figura 36. Muñeca-pinzas Scorbot



Una vez que todas las piezas están modeladas se procede al ensamblaje de todas ellas añadiendo las correspondientes restricciones en el módulo Assembly Design, quedando como resultado final tal y como se aprecia en las Figuras 37 y 38.



*Figura 37. Scorbot ensamblado (1)*



*Figura 38. Scorbot ensamblado (2)*

Cabe destacar que la posición relativa entre las distintas partes se ha elegido de tal manera que se pueda apreciar bien el conjunto, no siendo ésta necesariamente la posición de partida del robot.

## 3.2. Simulación de la cinemática con Catia DMU

En esta parte de la memoria vamos a estudiar las limitaciones que tiene Catia a la hora de simular la cinemática de nuestro robot mediante el uso del módulo Digital Mock-up Kinematics. Dentro del estudio distinguiremos entre la factibilidad de:

**Análisis cinemático directo:** dado los ángulos de las articulaciones y los parámetros geométricos de los elementos hallar y simular la orientación y posición del efector final respecto a un sistema de referencia fijo.

**Análisis cinemático inverso:** dada una posición y orientación deseada del efector final y los parámetros geométricos, estudiar si el robot puede alcanzar efectivamente esa posición con esa orientación y si puede, determinar cuántas configuraciones distintas satisfacen la misma condición.

El módulo DMU Kinematics permite dar las instrucciones motrices necesarias a las partes ensambladas para que estas se muevan tal y como nosotros queramos y analizar el movimiento del robot y determinar cualquier parámetro relacionado con éste como pueden ser distancias, velocidades, aceleraciones...

### 3.2.1. Grados de libertad

La primera tarea a realizar será definir los grados de libertad que tiene cada componente del robot con respecto al que va sujeto. En el caso que nos ocupa usamos las siguientes herramientas:



**Fixed Part:** Nos permite dejar fijo algún componente del robot que será con respecto al cual quedarán referidas las mediciones y las simulaciones. En nuestro caso, es la Mesa la que dejamos fija.



**Revolute Joint:** Esta herramienta necesita de dos ejes de dos componentes diferentes y dos planos. Esta herramienta deja colineales los dos ejes y mantiene en contacto ambos planos seleccionados.



**Rigid Joint:** Esta herramienta nos sirve para agrupar dos o más partes de modo que se muevan como un todo.



**Cylindrical Joint:** Esta herramienta precisa de dos ejes diferentes, uno de cada componente, que mantiene colineales. Permite el desplazamiento en la dirección transversal a este así como el giro en torno a los ejes.

Se muestran a continuación en la Figura 39 las diferentes articulaciones entre los componentes del Scorbot.

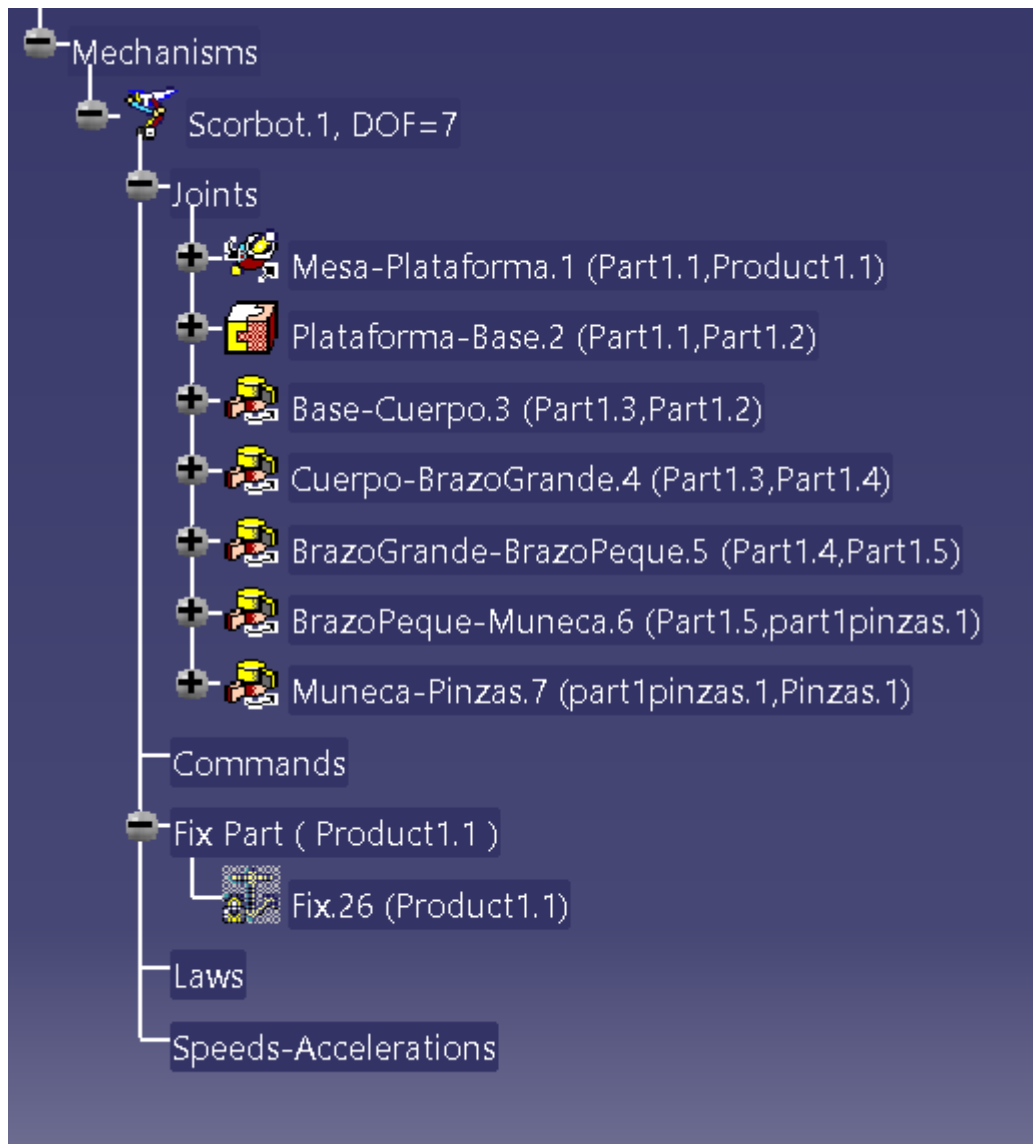


Figura 39. Articulaciones del Scorbot modeladas en DMU

En la figura anterior podemos observar las cinco articulaciones de las que dispone el Scorbot, que le proveen de sus cinco grados de libertad, todas ellas rotaciones, dos de tipo T torsionales (Base-Cuerpo y Muneca-Pinzas) y otras tres de tipo R rotacional. Se puede ver también cómo se ha usado “Rigid Joint” para unir los componentes Plataforma y Base para que se muevan como sólido rígido y “Cylindrical Joint” para definir el movimiento de traslación entre la Mesa y la Plataforma. Mencionar que, como se dijo anteriormente, la Mesa es nuestro componente fijo a partir del cual quedarán referidas las medidas y simulaciones posteriores.

### 3.2.2. Límites de movimiento

Una vez definidos todos los grados de libertad de los componentes de nuestro robot, comenzamos con el estudio de la viabilidad de Catia para el análisis de la cinemática de éste.

La primera tarea a realizar es definir el rango de movilidad de cada componente con respecto al anterior. Esta opción nos la da a la hora de usar las herramientas mencionadas anteriormente. En caso de no haberlas definido el programa entiende que no existe ninguna restricción en su movimiento. Haciendo doble click sobre las articulaciones ya definidas nos da la posibilidad de modificarlas. Para definir el rango entre los que se van a mover los parámetros nos ayudamos de la información de la que disponemos acerca del Scorbot y que ya fue presentada en el capítulo anterior. A modo de ejemplo, se muestra a continuación en la Figura 40 cómo podemos elegir el rango de movimiento de la articulación Cuerpo-BrazoGrande.

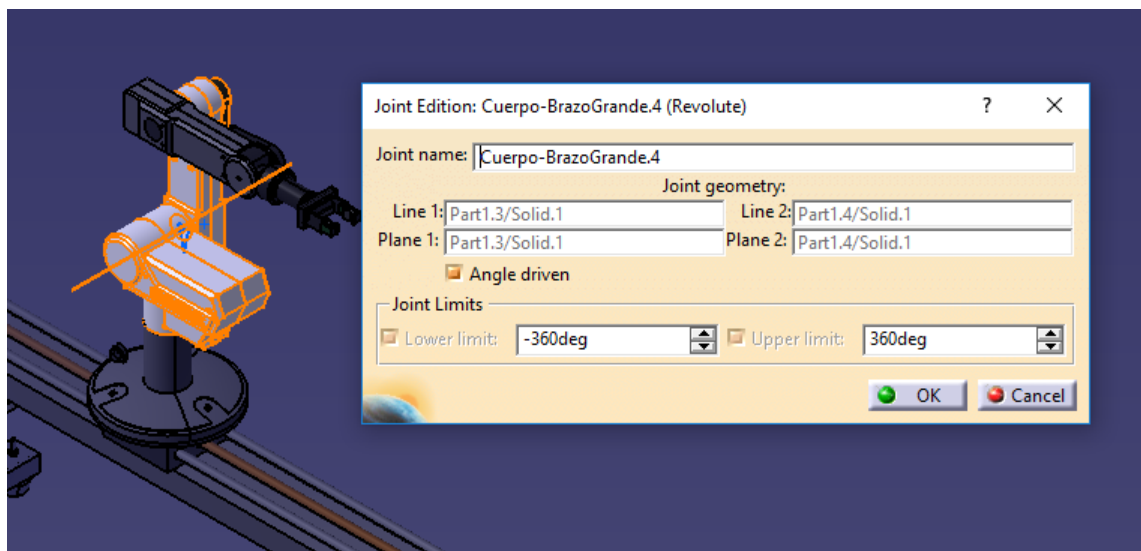


Figura 40. Rango de movimiento entre Cuerpo y Brazo grande

En las Figuras 41 hasta 46 se muestra el movimiento de las distintas partes entre sus topes, manteniendo el resto de los parámetros a cero, así como el valor de estos en la Figura 47.

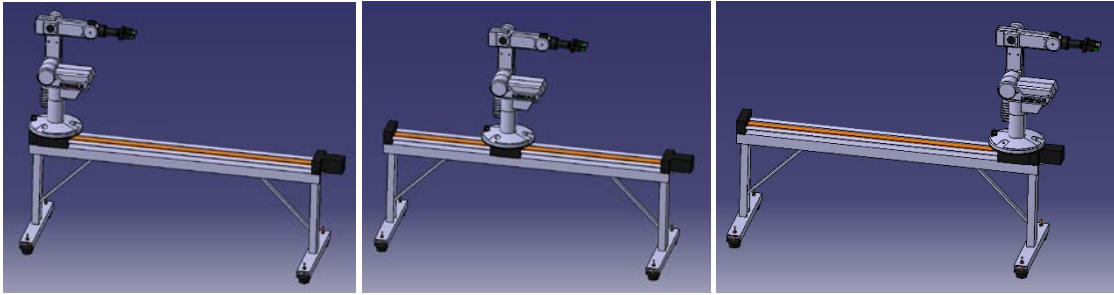


Figura 41. Rango movimiento Mesa-Plataforma

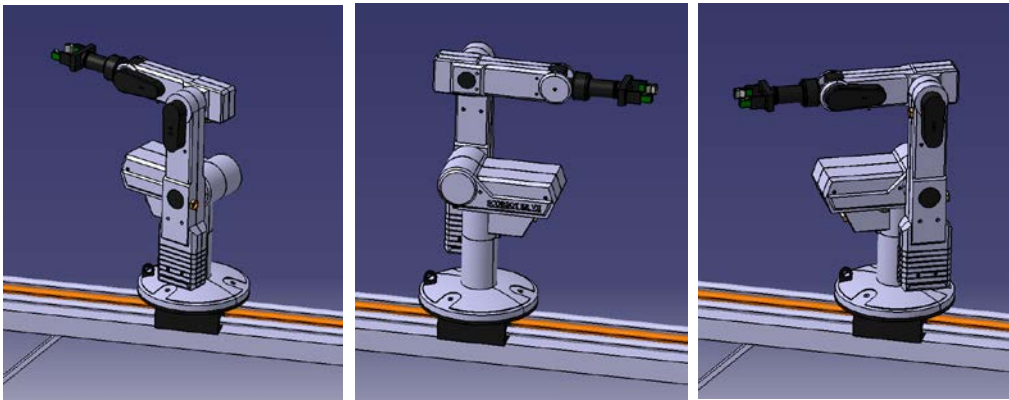


Figura 42. Rango movimiento Base-Cuerpo

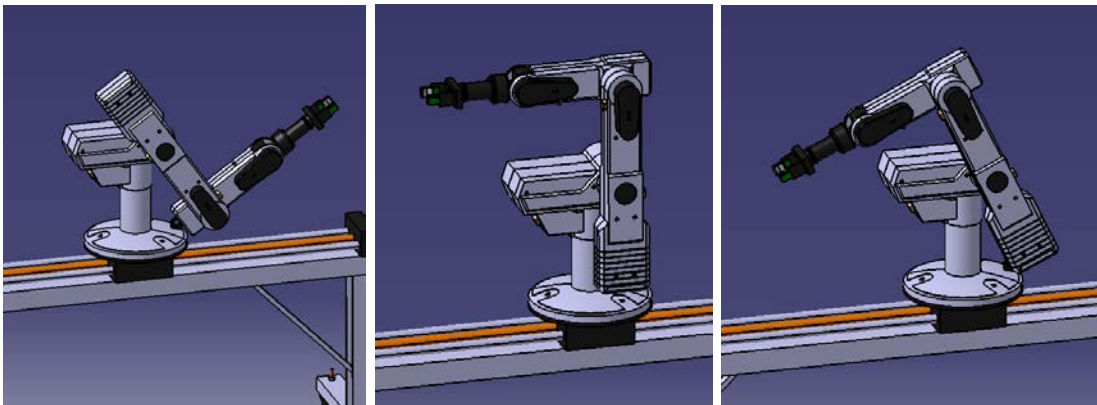


Figura 43. Rango movimiento Cuerpo-Brazo grande

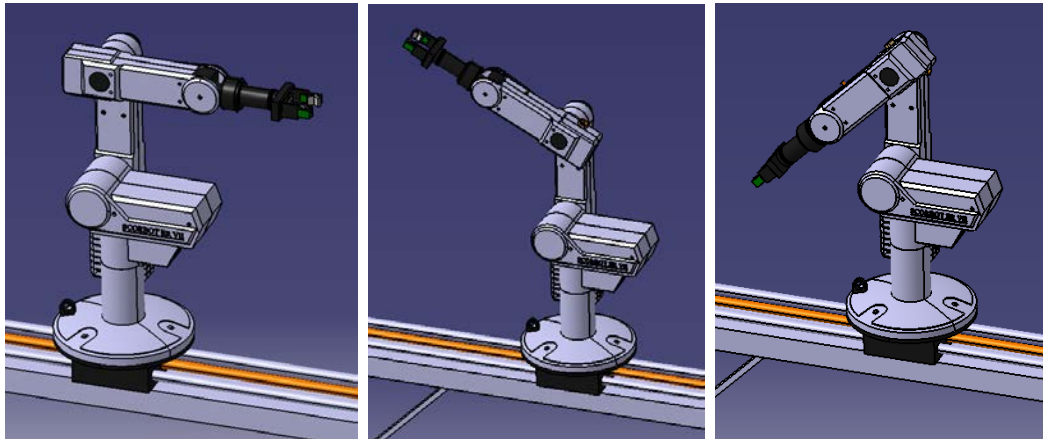


Figura 44. Rango movimiento Brazo grande-Brazo pequeño

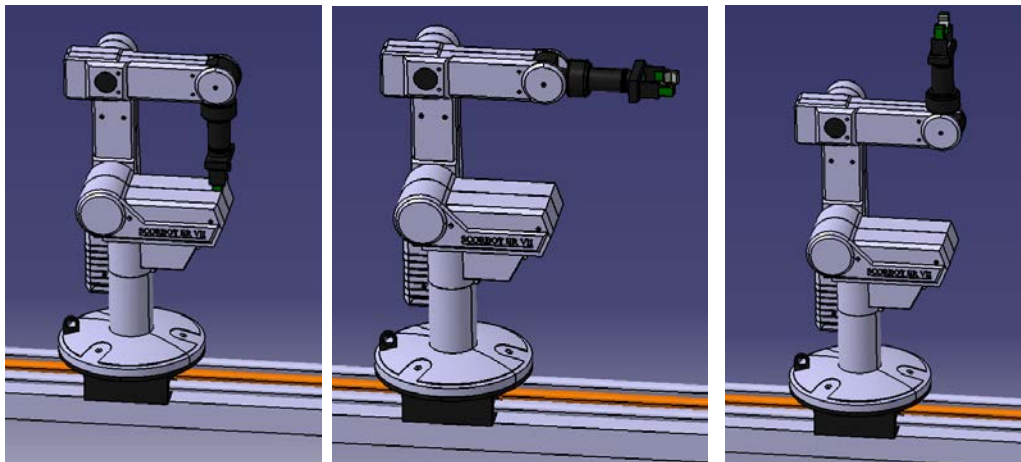


Figura 45. Rango movimiento Brazo pequeño-Muñeca

En este caso nos hemos encontrado un problema con la interferencia entre dos o más partes, que comentaremos posteriormente.

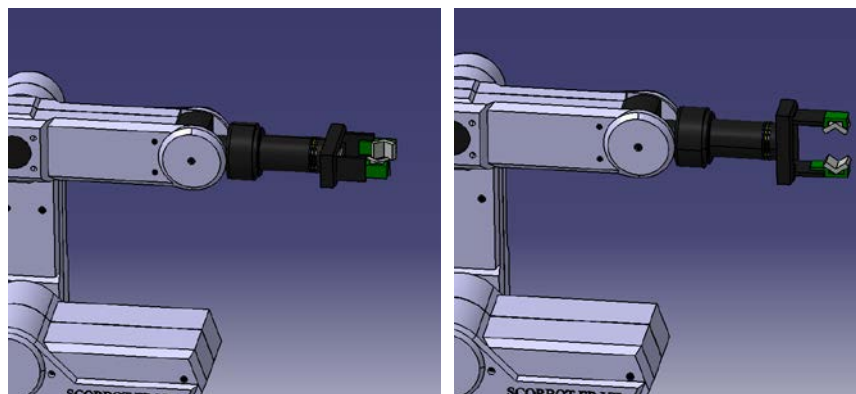


Figura 46. Rango movimiento Muñeca-Pinzas

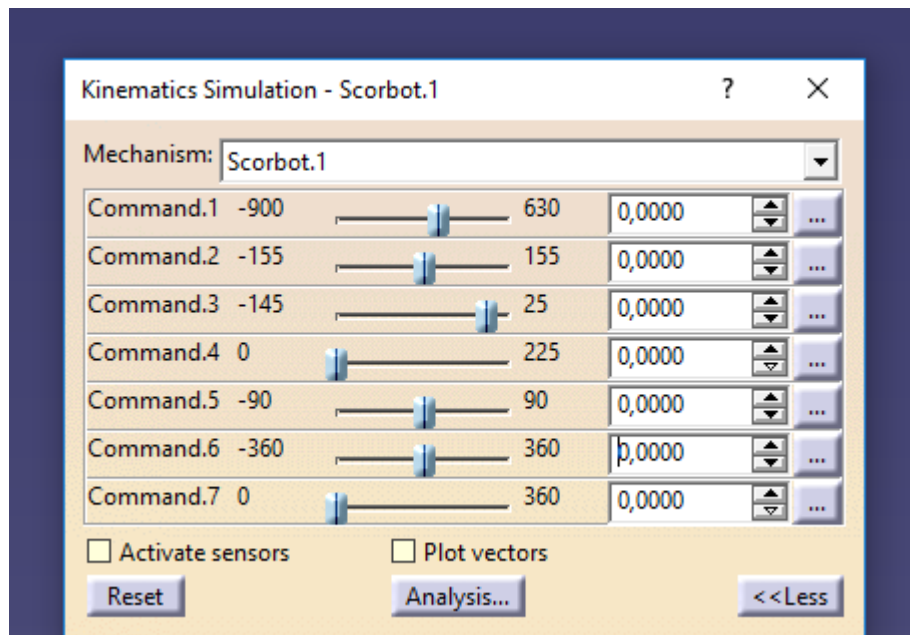


Figura 47. Rangos de movimiento de las articulaciones del Scorbot

En la última figura podemos observar los intervalos entre los que se van a poder mover los parámetros de las articulaciones, que concuerdan con el rango operativo descrito en el capítulo anterior.

Command.1 controla el desplazamiento transversal del robot sobre la mesa, estando los valores dados en milímetros.

Command.2 controla el ángulo, en grados, de rotación entre la base y el cuerpo.

Command.3 controla el ángulo, en grados, de rotación entre el cuerpo y el brazo grande.

Command.4 controla el ángulo, en grados, de rotación entre brazo grande y pequeño.

Command.5 controla el ángulo, en grados, de rotación entre el brazo pequeño y la muñeca.

Command.6 controla el ángulo, en grados, de rotación entre la muñeca y las pinzas.

Command.7 controla el ángulo, en grados, de rotación entre el robot y la mesa, que siempre se mantendrá en cero (Catia obliga a que el intervalo sea mayor que cero, por lo que es imposible restringir la totalidad del movimiento, simplemente con no darle ningún valor distinto de cero basta).

### 3.2.3. Colisiones entre componentes

El primer problema con el que nos encontramos es que Catia sólo nos deja definir los rangos de desplazamiento de un componente con respecto al que está conectado. De tal forma que aunque un cierto valor de un parámetro esté dentro del rango definido con anterioridad, puede ser que para cierta configuración del robot este valor no sea posible



ya que haya alguna interferencia o choque entre componentes, como se puede apreciar en la Figura 48.

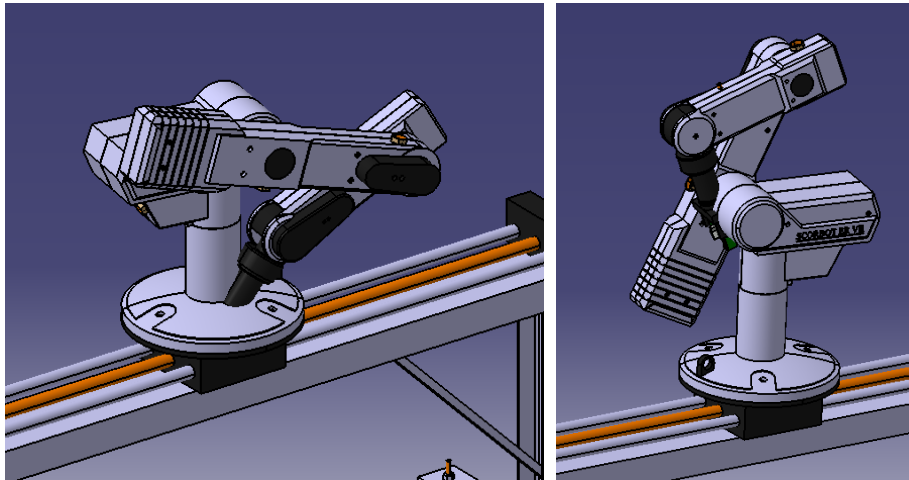



Figura 48. Interferencias entre distintos componentes del Scorbot

Tras investigar las herramientas que ofrece el programa, hay dos opciones que, si bien no solucionan el problema, nos indican cuándo se da éste. A la hora de realizar simulaciones Catia nos da a elegir entre: hacer caso omiso a las colisiones entre componentes, indicar cuando se producen éstas pero continuar con la simulación o indicar cuando se producen y detener la simulación en cuanto se diera alguna.

Para ello, lo primero que debemos hacer es seleccionar la herramienta “Clash”  del menú de Catia, con lo que conseguimos que el programa esté pendiente de las posibles colisiones, y marcamos la opción de que detecte cualquier interferencia entre todas las partes de nuestro modelo (ver Figura 49).

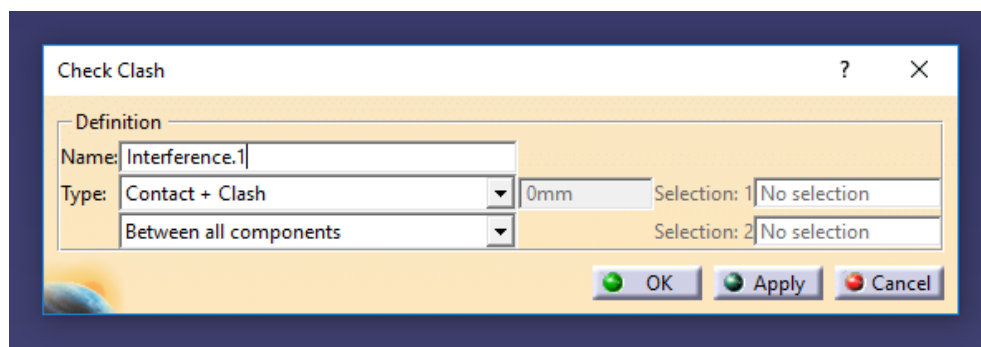


Figura 49. Detectar interferencias entre componentes

Con esto habremos creado un apartado de “interference” en el árbol de Catia y la aparición del sensor “Interference-Clash” dentro del apartado de sensores, del que hablaremos posteriormente.

Como hemos comentado antes, tenemos dos opciones a elegir dentro la detección de choques tal y como podemos ver en la Figura 50:

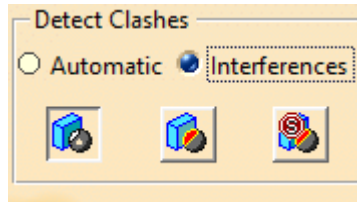


Figura 50. Opciones de detección de interferencias

La que viene marcada hace caso omiso a las colisiones, por lo que no nos interesa. La segunda detectaría las colisiones, y nos lo mostraría gráficamente remarcando los componentes que están tomando parte en dicha colisión como vemos en la Figura 51, pero no detiene la simulación.

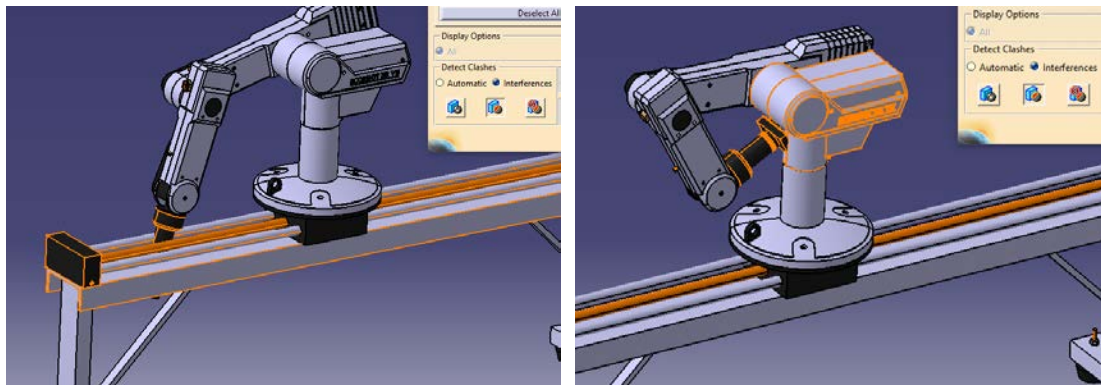


Figura 51. Detección de colisiones. En naranja componentes colisionando. La simulación continúa

La tercera permite detectar las colisiones, remarcando como en la anterior los componentes afectados pero, además, detiene la simulación en cuanto localiza que se ha producido un choque entre componentes. Aprovechando la misma simulación que en el segundo ejemplo mostrado anteriormente, en el que vemos que la pinza se introduce en el cuerpo, vemos en la Figura 52 como, ahora, con esta opción, el movimiento se detiene en cuanto la herramienta toca la base.

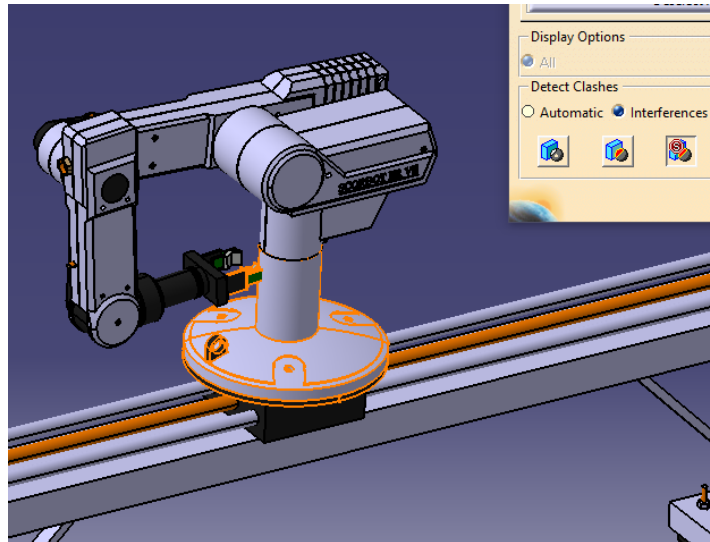


Figura 52. Detección de colisiones. En naranja componentes colisionando. La simulación se detiene

### 3.2.4. Tipos de simulación

A la hora de realizar simulaciones nos encontramos dos formas de hacerlo.



Simulation with Commands: se nos abre una ventana en la que aparecen los valores actuales de los parámetros de las distintas articulaciones y se nos permite cambiarlos libremente dentro de los rangos definidos anteriormente y, de nuevo, volvemos a tener dos posibilidades: o el robot se irá moviendo conforme nosotros vayamos cambiando los valores uno a uno o cambiamos todos los valores y luego le damos a empezar simulación y tendrán lugar todos los movimientos a la vez.

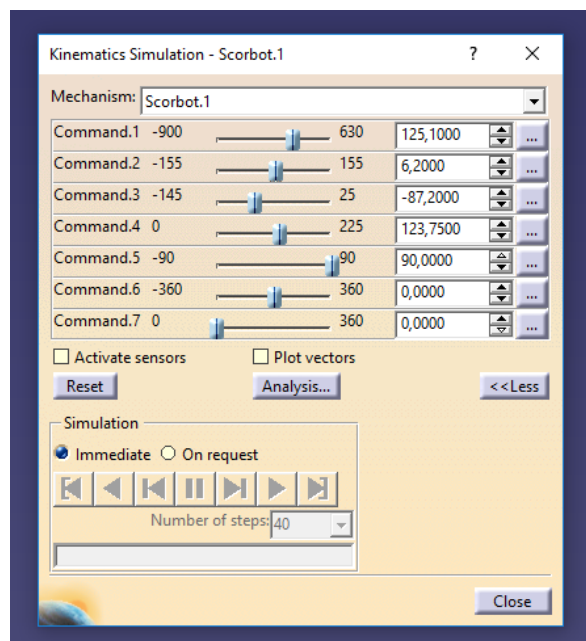



Figura 53. Simulación por parámetros



Simulation with Laws: la segunda opción que Catia nos brinda es la de simular a través de leyes, de tal forma que definimos un tiempo para el movimiento y la velocidad de cambio de cada parámetro (ya sea en °/s o mm/s) y este irá variando conforme a lo que hayamos elegido. Es posible encadenar una ley tras otra para realizar así movimientos más complejos.

Para ello lo primero que tenemos que hacer es seleccionar la opción “Formula”  de nuestra barra de herramientas. Una vez hecho, buscamos primeramente el tiempo entre todos los parámetros que nos aparecen y le damos el valor que creamos oportuno, que será lo que dure el movimiento. A continuación seleccionamos el parámetro que queramos modelar, que en nuestro caso, y a modo de ejemplo, es el ángulo de giro entre la base y el cuerpo (que como dijimos con anterioridad, viene gobernado por *Command.2*). Clicamos en “Add Formula” y escribimos la ley de movimiento que gobernará la variación del parámetro.

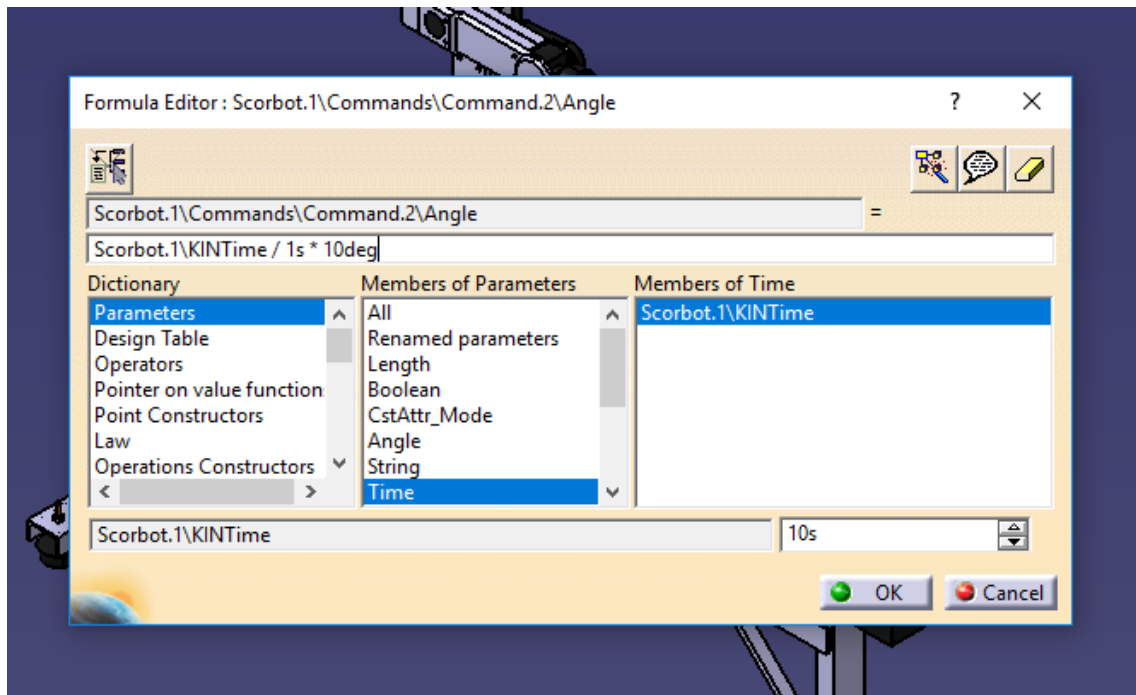


Figura 54. Creando ley de movimiento

En la Figura 54 vemos como, según la ley de movimiento que hemos escrito, el ángulo irá variando diez grados cada segundo, partiendo desde el valor actual.

Todas las fórmulas que vayamos creando aparecerán en el árbol de Catia dentro de la pestaña “Laws”. Una vez le demos a “Simulation with Laws” la simulación comenzará, y las leyes se irán sucediendo conforme nosotros hayamos definido, de lo que hablaremos a continuación. Cabe destacar que ésta última opción de simulación no tiene en cuenta los rangos de los parámetros que definimos con anterioridad y va a continuar sin

importarle que nos hayamos salido del intervalo, por lo que tenemos que ser nosotros al introducir los datos los que nos aseguremos que a la hora de simular los parámetros se mantienen entre los valores extremos.


### 3.2.5. Secuencias de movimientos

Pasamos ahora a hablar acerca de la sucesión de simulaciones. Por cada mecanismo que creamos (hasta ahora hemos estado trabajando siempre sobre el mecanismo “Scorbot.1” que se creó una vez definimos las articulaciones) disponemos de un parámetro tiempo, por lo que a la hora de simular, todos las leyes de movimiento transcurrirán a la vez y tendrán la misma duración. Para poder enlazar un movimiento con otro y darle a cada uno distinta duración según convenga, debemos crear otro mecanismo, siendo la manera más sencilla copiar el que ya tenemos y pegarlo, cambiándole el nombre para localizarlo más fácilmente, de tal forma que tengamos “Scorbot.1”, “Scorbot.2”... tantos como intervalos de tiempo diferentes queramos.




Figura 55. Árbol de Catia. Dos mecanismos con sus leyes de movimiento

De tal forma que el árbol nos quedaría tal y como se ve en la Figura 55, donde cada ley de movimiento está referenciada al tiempo del mecanismo correspondiente.

El movimiento tendrá lugar según la secuencia que hayamos marcado con la herramienta  “Edit Sequence”, que nos dejará definir el orden en el que irán sucediéndose las leyes así como un delay entre ellas en caso de ser necesario.

### 3.2.6. Análisis de velocidades y aceleraciones

Por último, y sin olvidar que de momento estamos hablando del análisis directo del movimiento, Catia nos da muchas opciones a la hora de estudiar la cinemática del robot si hemos elegido la simulación por leyes. Las más interesantes serían muestrear la posición, velocidad y/o aceleración de cualquier punto del robot, ver la traza que describe cualquier arista del mismo o incluso calcular el volumen que ocupa algún componente o más de uno durante su movimiento.

Para el cálculo de velocidades y aceleraciones disponemos de la herramienta  “Speed and Acceleration”. Es necesario definir un componente respecto al cuál se medirán y el punto del que se quieren calcular. Catia nos permite tanto ver la evolución del valor de las velocidades y aceleraciones conforme va teniendo lugar la simulación como esbozarlas en una gráfica. A modo de ejemplo, hemos calculado la velocidad y aceleración que tendría el extremo de la pinza durante un movimiento como podría ser rotación del cuerpo y del brazo grande, que se muestra a continuación.

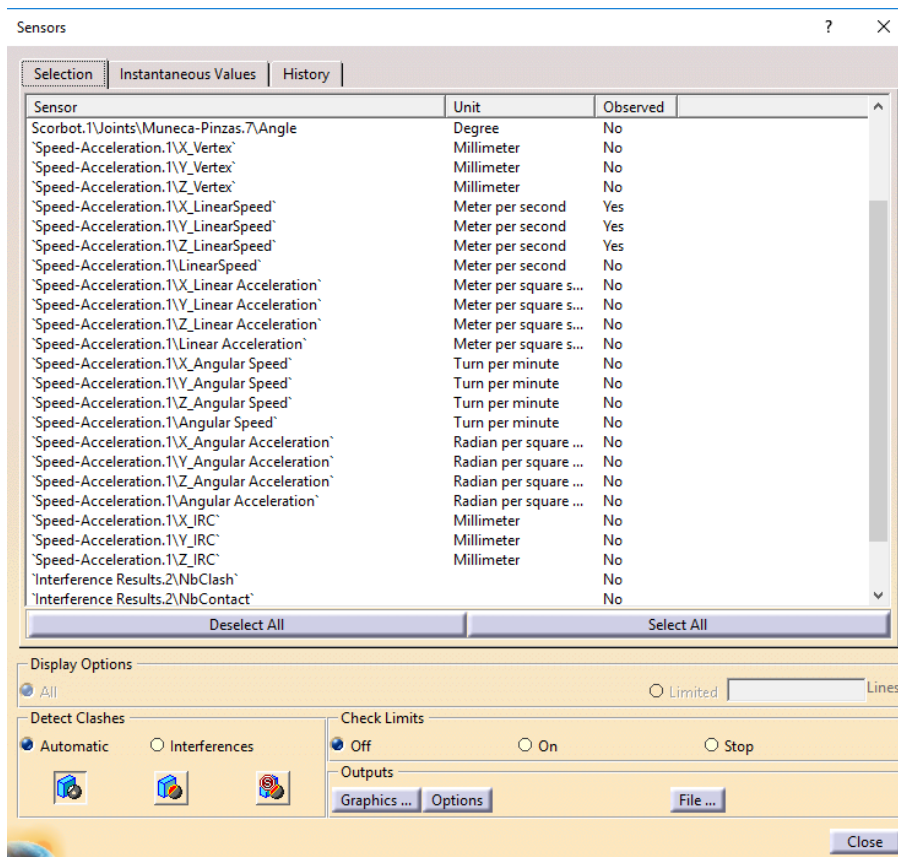


Figura 56. Velocidades y aceleraciones a calcular

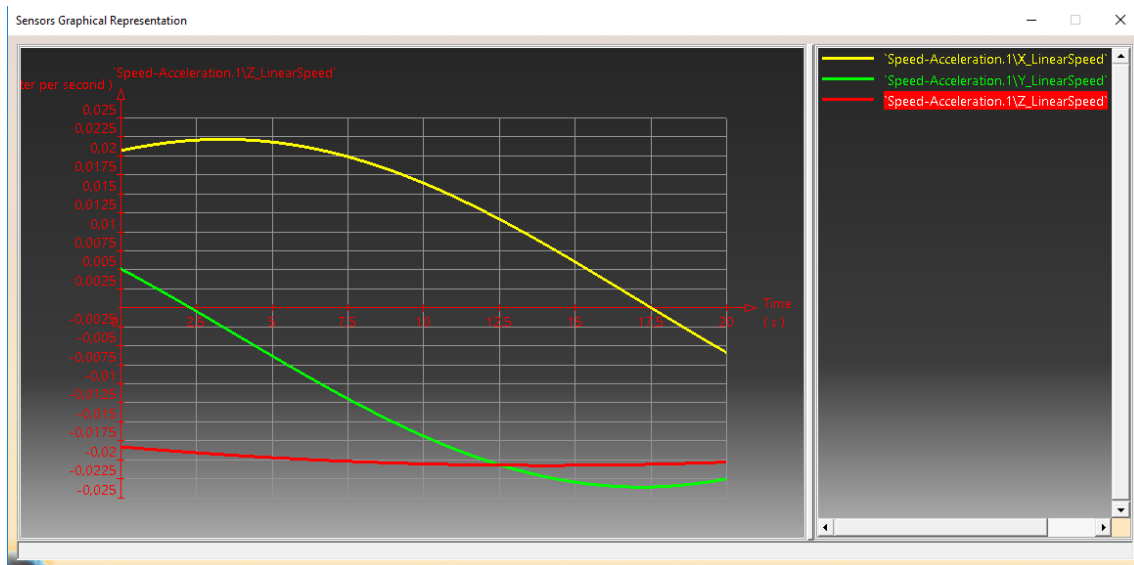


Figura 57. Velocidades lineales del extremo de las pinzas

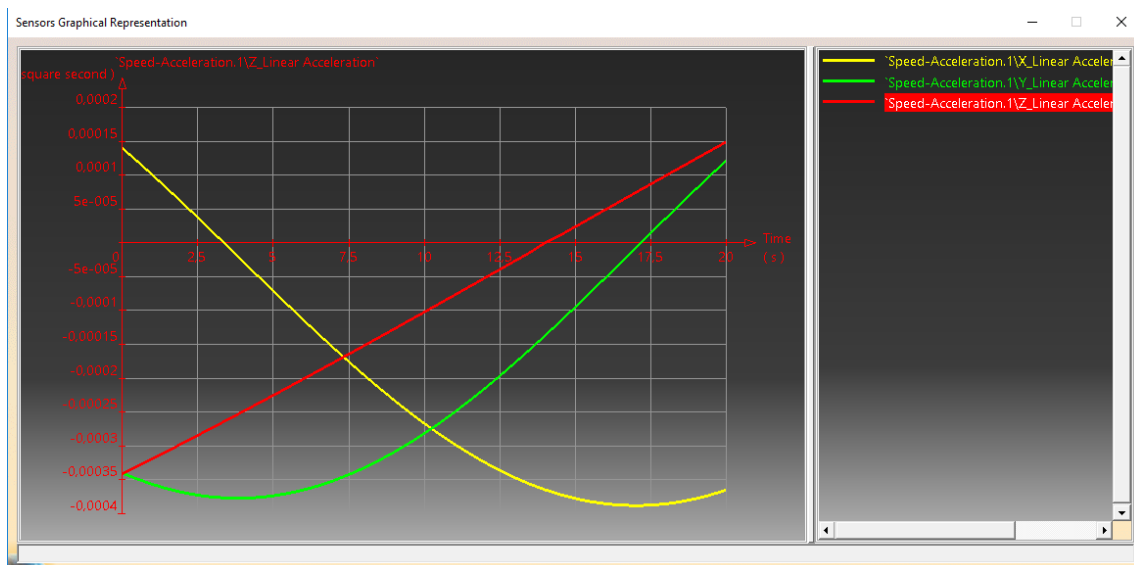




Figura 58. Aceleraciones lineales del extremo de las pinzas

Podemos observar en las Figuras 57 y 58 cómo las velocidades y aceleraciones concuerdan con las que se esperarían en un movimiento como este. Las velocidades en los ejes X e Y se van invirtiendo dado que el movimiento propuesto como ejemplo (proyectado en un plano horizontal) es similar a un cuarto de circunferencia y la del eje Z permanece casi constante. Con respecto a las aceleraciones vemos que el comportamiento en los ejes X e Y es similar al de las velocidades.

### 3.2.7. Análisis de trayectorias y volúmenes de trabajo

Con las herramientas  “Trace” y  “Swept Volume” vamos a poder calcular la traza que describe algún punto o arista del robot durante su movimiento o calcular el volumen que ocupa algún componente del robot durante su desplazamiento, respectivamente. A modo de ejemplo se muestra tanto la traza que describe un punto de la pinza (Figura 59) como el volumen de esta (Figura 60) durante el mismo movimiento utilizado para calcular las velocidades y aceleraciones anteriores.

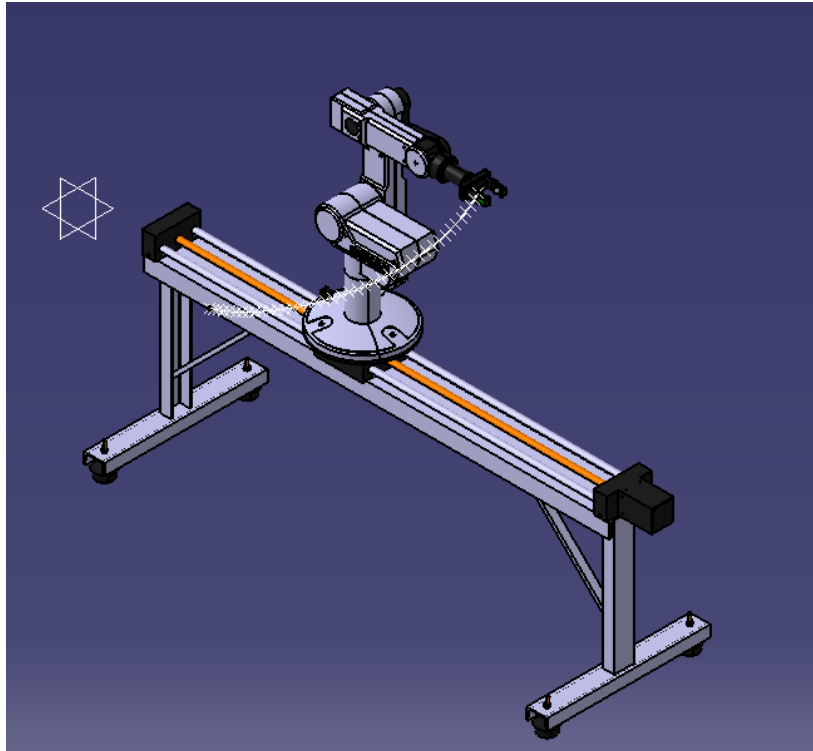
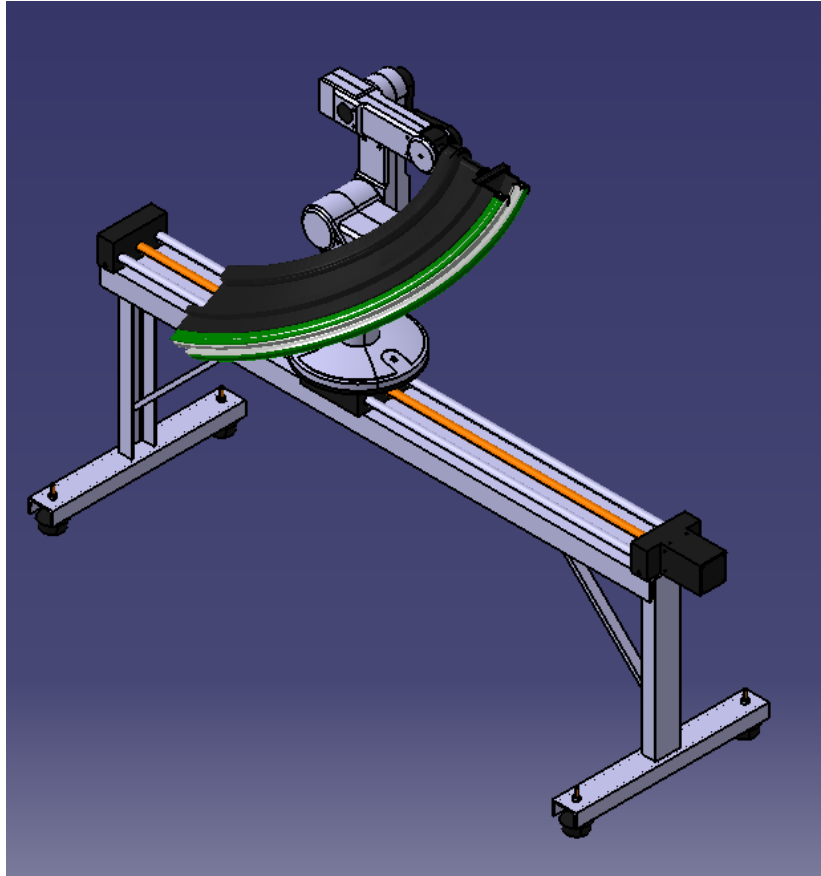


Figura 59. Traza del movimiento del extremo de las pinzas





*Figura 60. Volumen ocupado por las pinzas durante su movimiento*

### **3.2.8. Aplicación práctica: desplazamiento de una pieza**

Una vez analizadas todas las prestaciones de las que dispone Catia a la hora del análisis de la cinemática, vamos ahora, a modo de ejemplo y para una mejor comprensión, a estudiar la cinemática para un movimiento típico del robot, como es desplazarse para coger una pieza, desplazarse de nuevo para depositarla en su destino (torno, centro de mecanizado) para acabar volviendo a su posición original. En la Figura 61 se observa el robot en su posición inicial, recogiendo la pieza, desplazado hasta lugar de destino, depositando la pieza y recobrando su configuración hasta volver al punto de partida.

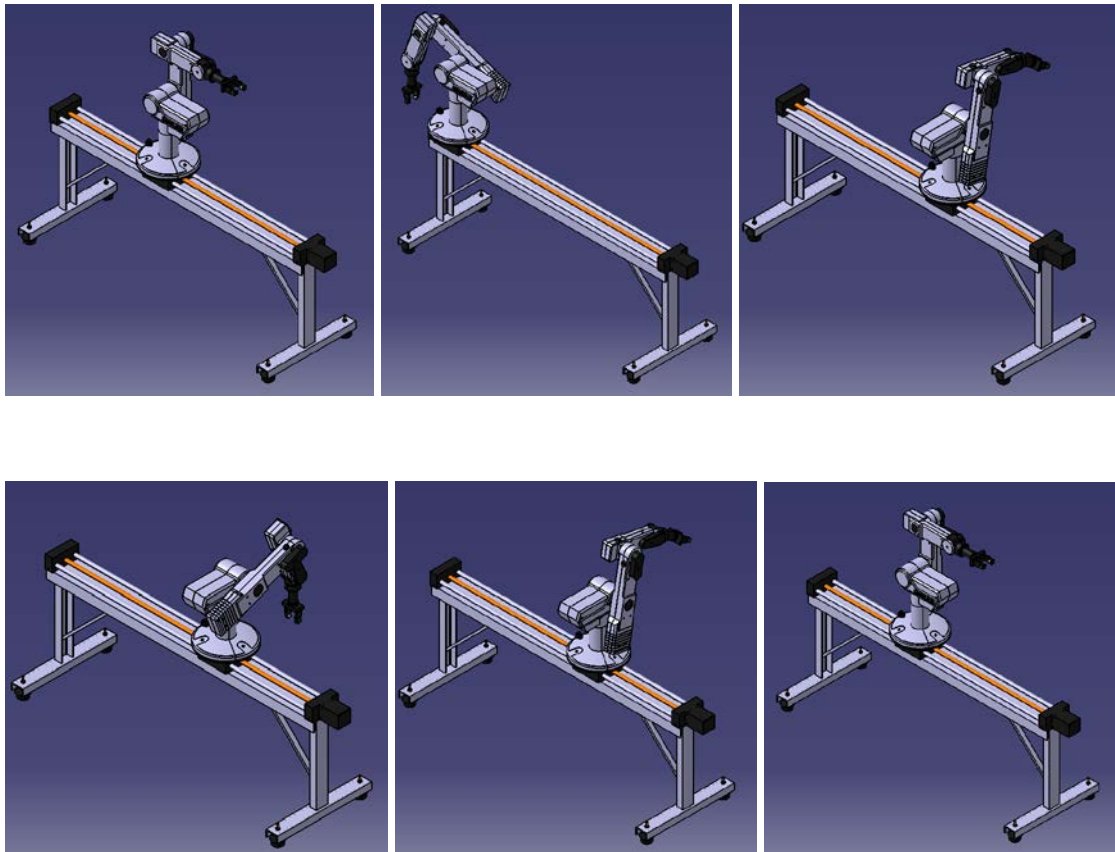


Figura 61. Movimiento típico de robot manipulador

Pasamos ahora a visualizar las velocidades y aceleraciones en los ejes del extremo de la pinza en la Figura 62. Cabe destacar que los cuatro saltos que hay entre tramos corresponden a las pausas (que son instantáneas pero que en la realidad tomarían varios segundos) entre los cinco movimientos que se originan dando lugar a las seis posiciones que se pueden ver en la figura anterior.

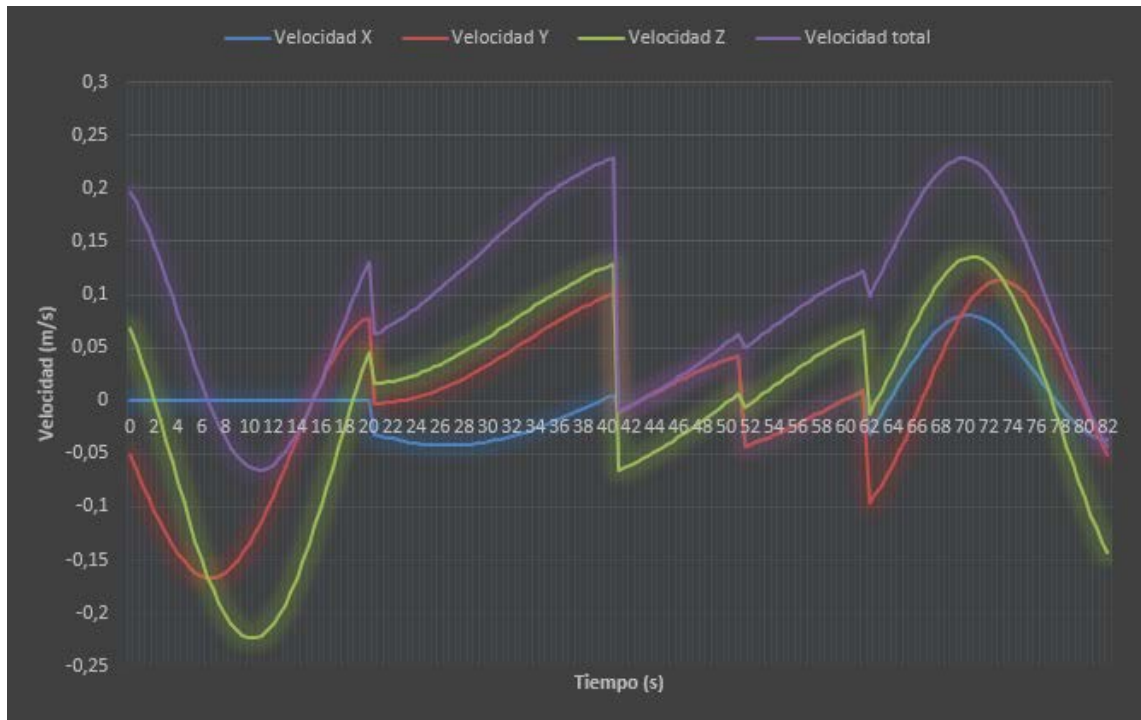


Figura 62. Velocidades lineales del extremo de las pinzas durante el movimiento



Figura 63. Aceleraciones lineales del extremo de las pinzas durante el movimiento

Por último vamos a esbozar la traza que describe el extremo de la pinza, así como el volumen que ocupa el Scorbot a lo largo de su movimiento en las Figuras 64 a 68.

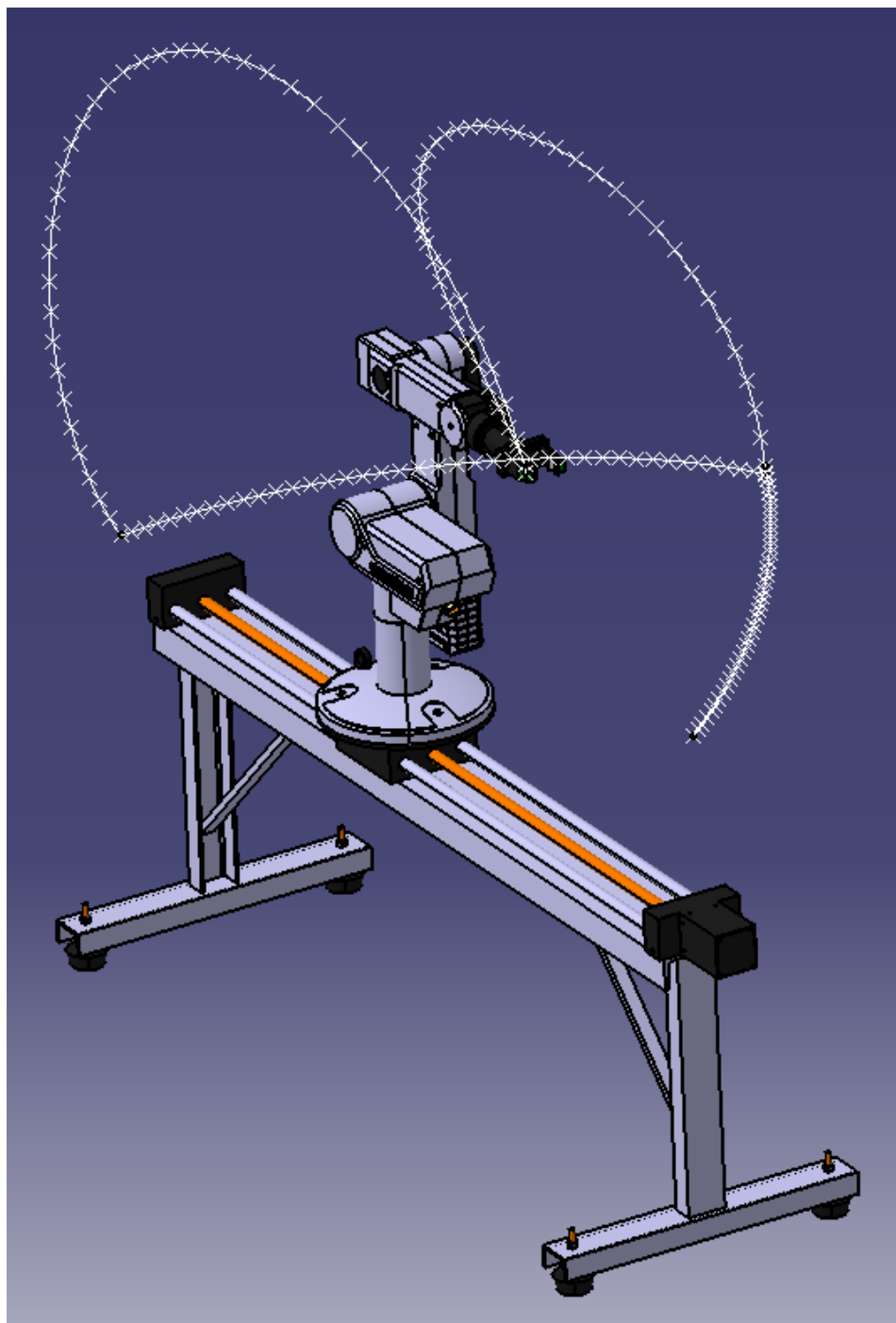


Figura 64. Traza del extremo de las pinzas durante el movimiento

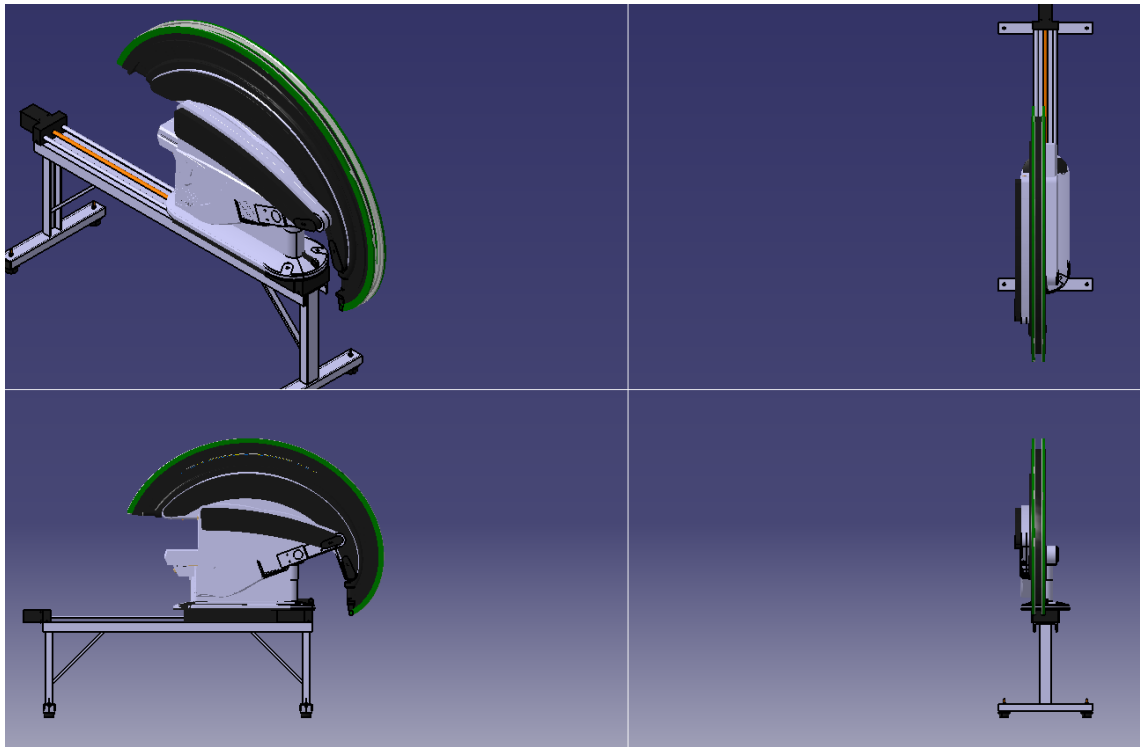


Figura 65. Volumen ocupado por el Scorbot durante el movimiento (1)

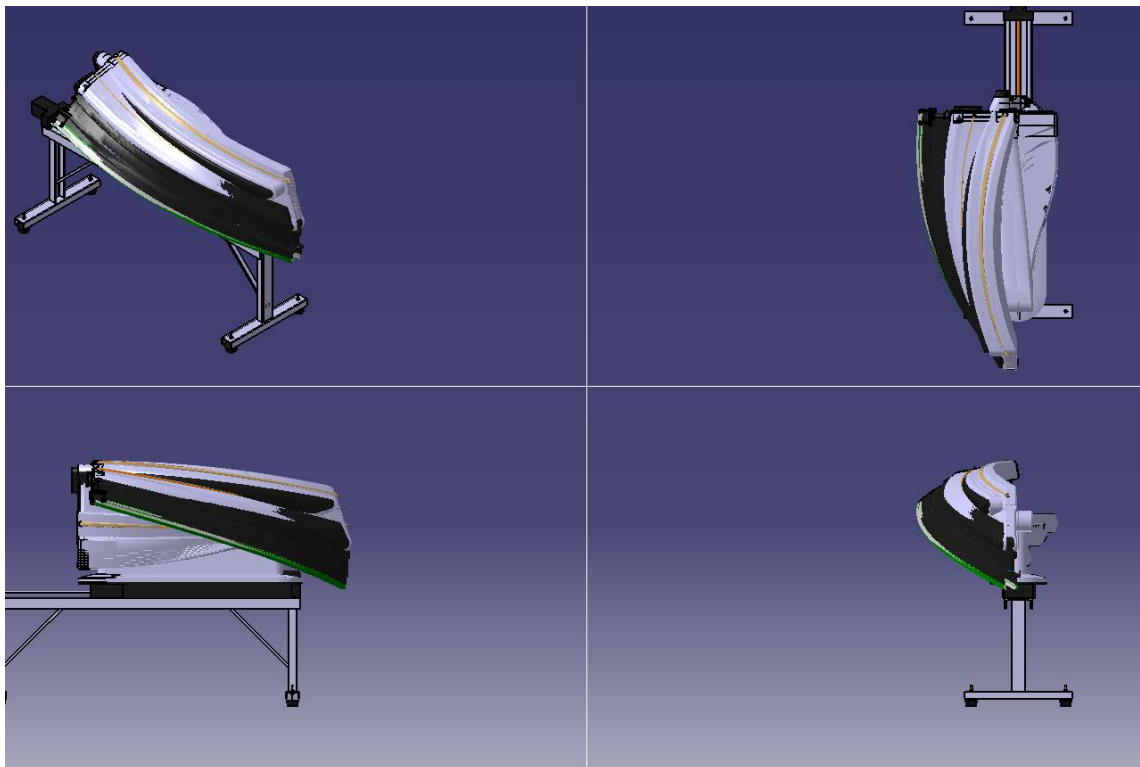


Figura 66. Volumen ocupado por el Scorbot durante el movimiento (2)

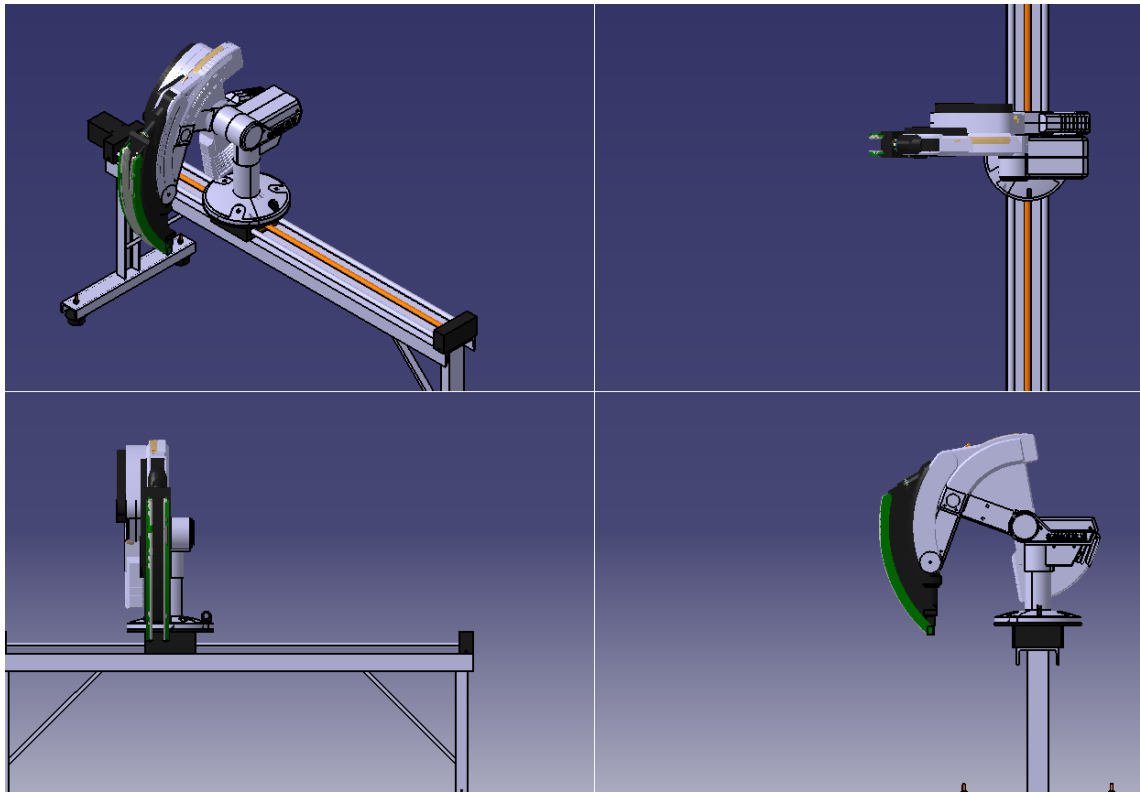


Figura 67. Volumen ocupado por el Scorbot durante el movimiento (3)

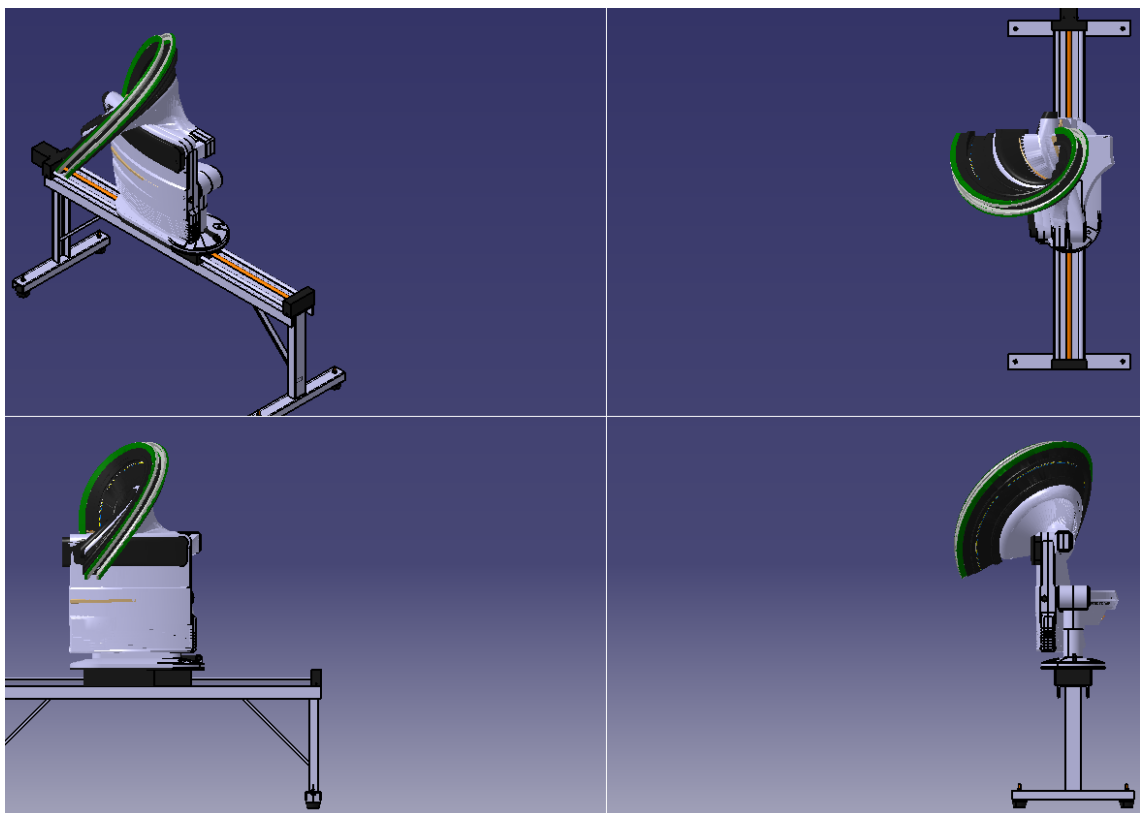


Figura 68. Volumen ocupado por el Scorbot durante el movimiento (4)

Con esto daríamos por finalizado el análisis directo de la cinemática del robot, que ha resultado ser bastante apto.

Con respecto al análisis inverso, no se ha encontrado ninguna herramienta que posibilite o facilite el cálculo del valor que deberían tener los parámetros de las articulaciones del Scorbot una vez que se hubiera definido la posición del elemento terminal, la pinza en nuestro caso.

## **4. Conclusiones y trabajos futuros**

### **4.1. Conclusiones**

Después del estudio realizado modelando el Scorbot y analizando su cinemática con el programa de diseño Catia, podemos afirmar que con lo que respecta al análisis directo del movimiento, los resultados obtenidos son bastantes prometedores, si bien nunca hay que olvidar que tiene sus limitaciones.

Es hablando del análisis inverso del movimiento cuando nos encontramos los mayores problemas, ya que no hemos encontrado ningún tipo de opción o herramienta que permita que el robot se mueva siguiendo una trayectoria que Catia calculara una vez dadas la posición inicial y final de la pinza.

Por lo que concluimos que, una vez conocido el movimiento a realizar por el robot y tras un estudio de la trayectoria que este tiene que seguir, que habría que hacer con anterioridad y sin ayuda de Catia, con el que averiguaríamos las leyes de movimiento que tendrían que seguir cada uno de los parámetros de las articulaciones, el programa de diseño es capaz de simularlo y de aportarnos como salida las variables cinemáticas de cualquier punto del Scorbot.

### **4.2. Trabajos futuros**

Como trabajo futuro de ampliación se propone la posibilidad de estudiar la viabilidad de programar el robot a través de Catia. Habría que estudiar la compatibilidad que existiría entre Catia y alguna herramienta de programación. Ver si sería posible importar en el programa de diseño comandos que rijan el movimiento del Scorbot, el lenguaje que debería utilizarse y en que directorio habría que introducirlo.

También se propone usar el diseño realizado del Scorbot para realizar simulaciones junto con máquinas herramientas que se encuentren en el laboratorio, de tal forma que todas conformen una célula de fabricación flexible que pudiera ser programada y analizada a través de Catia.





# Bibliografía

- [1] Mikell P. Groover, *Automation, Production Systems, and Computer-integrated Manufacturing*, Prentice Hall, 2001
- [2] Eduardo Torrecilla Insagurbe, *El Gran Libro de Catia*, S.A. Marcombo, 2012
- [3] Área de Ingeniería de los Procesos de Fabricación ETSI, *Robótica Industrial*
- [4] Antonio Barrientos, *Fundamentos de Robótica (2ª Edición)*, S.A. MCGRAW-HILL / INTERAMERICANA DE ESPAÑA, 2007
- [5] Eshed Robotec, *SCORBOT-ER VII User's Manual (2nd Edition)*, 1996
- [6] Dassault Systemes, *DMU Training (5<sup>th</sup> Version)*, 2005