

**METODOLOGIA PARA EL DISEÑO DE UN ROBOT PARALELO INDUSTRIAL
TIPO DELTA**

JHONATTAN DIDIER RUEDA FLOREZ

**BUCARAMANGA
UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍA Y ADMINISTRACIÓN
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECANICA
2008**

**METODOLOGIA PARA EL DISEÑO DE UN ROBOT PARALELO
INDUSTRIAL TIPO DELTA**

JHONATHAN DIDIER RUEDA FLOREZ
Monografía para optar por el título de
Ingeniero mecánico

Director del proyecto de grado
U.P.B. Bucaramanga
Luis Ángel Silva
Doctor en Robótica y Visión por Computador

Codirector del proyecto de grado
U.P.B. Bucaramanga
Miguel Angel Reyes
Ingeniero Mecánico

BUCARAMANGA
UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍA Y ADMINISTRACIÓN
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECANICA
2008

Quisiera compartir este logro con toda mi familia en especial con mis padres Ricardo Rueda Prada y Luz Mery Florez C. Que con su amor y sacrificio me ayudaron a construir esta meta, a mis hermanas por su apoyo incondicional, a mi novia linda Ingrid Vanessa por su amor, como también a mi director de proyecto de grado el doctor Luís Ángel Silva por su apoyo y por sus enseñanzas.

Un agradecimiento especial a Dios por todo lo que tengo y lo que soy, todo se lo debo a el, FILIPENSES 4:13.

Nota de Aceptación:

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

Bucaramanga, Julio 23 de 2008

RESUMEN

En este proyecto se presenta una metodología para el diseño de robots paralelos industriales, la cual se basa en el análisis estructural y el análisis dinámico del robot, empleando modelos de simulación desarrollados en SOLID EDGE, ANSYS y ADAMS. Esta metodología se aplica al diseño del robot paralelo tipo Delta, cuyas longitudes de los eslabones y radios de las plataformas son similares al Sistema Robotenis, un robot construido en la Universidad Politécnica de Madrid.

ABSTRAC

In this project a methodology for the design of industrial parallel robots is presented. It is based on the structural analysis and dynamic analysis of the robot using simulation models in solid edge, ansys and adams.

This methodology is applied to design of parallel robot Delta type. The lengths of the links and radius of the platforms are similar to the roboTennis system, a robot built in the Politecnic University of Madrid.

CONTENIDO

	Pág.
OBJETIVOS	13
1. INTRODUCCIÓN	14
2. MARCO TEORICO	16
2.1 ESTADO DEL ARTE DE LOS ROBOTS PARALELOS	16
2.1.1 Líneas Actuales de Investigación	22
2.1.1.1 Diseño Mecánico	23
2.1.1.2 Cinemática	23
2.1.1.3 Análisis de Singularidades	24
2.1.1.4 Espacio de Trabajo	25
2.1.1.5 Dinámica	26
2.1.1.6 Control	26
2.1.1.7 Calibración	27
2.1.2 El robot DELTA	28
2.1.2.1 El robot Delta en el Mercado	29
2.1.2.2 El robot DELTA a nivel académico	33
2.1.3 Aplicaciones de los Robots Paralelos	34
2.1.4 El sistema roboTenis	41
3. ANÁLISIS CINEMÁTICO DEL ROBOT DELTA	43
3.1 Introducción	43
3.2 Modelo Geométrico	43
3.3 Modelo Cinemático Inverso	45
3.4 Modelo Cinemático Directo	48
4. EL PLANIFICADOR DE TRAYECTORIAS	50
4.1. Planificación de trayectorias	50
4.1.1. Esquema General de Planificación de Trayectorias	51
4.1.2. Tipos de Trayectorias	54
4.1.3. Interpolación de trayectoria	55
4.1.4. 4.1.4. Polinomio 6-1-6	57
5. METODOLOGIA GENERAL DE DISEÑO DEL ROBOT DELTA	58
6. MODELOS DEL ROBOT	59
6.1. MODELO SOLID EDGE	59
6.1.1. Piezas	59
6.1.2. Subconjuntos	61
6.1.3. Ensamble final	61

6.2.	MODELO ANSYS	62
6.2.1.	Generalidades modelo ANSYS	62
6.2.2.	Geometría ANSYS	63
6.2.3.	Conexiones ANSYS	65
6.2.4.	Enmallado ANSYS	66
6.3.	MODELO DE SIMULACIÓN EN ADAMS	68
7.	METODOLOGIA DE DISEÑO ANSYS – ADAMS	76
7.1.	MASAS Y MOMENTOS DE INERCIA DE ANSYS A ADAMS	77
7.1.1.	Ventanas principales	77
7.1.2.	Masas y momentos de inercia importantes	79
7.2.	METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN DINAMICA	83
7.3.	RESULTADOS TORQUES EN ADAMS	84
7.3.1.	Procedimiento para graficar	84
7.3.2.	Procedimiento para Exportar datos de ADAMS.	85
7.4.	AMBIENTE ESTATICO	88
7.4.1.	Ambiente estructural estático en ANSYS	88
7.4.2.	Ejemplo	93
8.	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	96
9.	BIBLIOGRAFIA	97

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 2.1. La plataforma de Gough.	16
Figura 2.2. Plataforma de Stewart: (a) 3-3, (b) 3-6, (c) 6-6.	18
Figura 2.3 Plataforma Stewart: (a) 6-SPS, (b) 6-UPS.	19
Figura 2.4 Robot paralelo para mecanizado.	19
Figura 2.5 Prototipo del robot DELTA patentado en EEUU (1990) por Clavel.	28
Figura 2.6 El robot Delta en la industria del empaquetado	29
Figura 2.7 El robot Delta en aplicaciones quirúrgicas.	30
Figura 2.8 Robots Delta de Hitachi-Seiki.	31
Figura 2.9 Robot Delta IRB 340 FlexPicker (ABB).	32
Figura 2.10. Robots Delta, modelos C33 y CE33 fabricados por SIG.	32
Figura 2.11. Robot NUWAR	33
Figura 2.12. Robot paralelo FANUC, empleado en tareas de soldadura.	34
Figura 2.13 Joystick esférico de la Universidad de Laval (Canadá).	35
Figura 2.14 Cyber Air Base.	36
Figura 2.15 F-206 Hexapod.	36
Figura 2.16 Simulador de movimiento de barcos.	37
Figura 2.17 Delta Lab EX 800.	37
Figura 2.18 Fanuc F-100i.	38
Figura 2.19 Hexabot.	38
Figura 2.20 Plataforma de Stewart para Tele operación.	39
Figura 2.21 Robot HEXA.	40
Figura 2.22 Robot paralelo trepador	40
Figura 2.23: Sistema robotenis: (a) modelo de simulación en ADAMS,(b) prototipo	42
Figura 3.1 Modelo geométrico del robot	44
Figura 3.2 Parámetros geométricos del robot.	44
Figura 3.3. Posibles soluciones del modelo cinemático inverso para la articulación $i = 1$. Intersección de la esfera (3.5) centrada en B_i y del círculo (3.7) centrado en Σ_i . (a) Vista Frontal, (b) Vista isométrica.	47
Figura 3.4 Ocho posibles soluciones del problema cinemático inverso.	48
Figura 3.5. Posibles soluciones del problema cinemático directo. Intersección de tres esferas (3.5) centradas en C_i y de radios L_b . (a) Vista superior, (b) Punto de intersección superior, (c) Punto de intersección sobre el centro del efector final.	49
Figura 4.1 Esquema general del control cinemática	52
Figura 4.2 Control cinemático de un robot de 2 gdl [Barrientos-97].	

a) Posición inicial y final cartesiana. b) Puntos nudo cartesianos. c) Puntos nudo articulares. d) Trayectoria articular interpolada. e) Trayectoria cartesiana del robot.	53
Figura 4.3 Tipo de trayectorias para un robot SCARA de 2 gdl. [Barrientos-97] a) Movimiento eje a eje, b) Movimiento simultáneo de ejes, c) Trayectoria coordinada, d) Trayectoria continua	55
Figura 4.4 Grafica del polinomio 6-1-6.	57
Figura 6.1 Piezas en SOLID EDGE	60
Figura 6.2 Subconjuntos en SOLID EDGE.	61
Figura 6.3 Ensamble final del robot delta.	62
Figura 6.4 Inicio ANSYS 11.	62
Figura 6.5. Areas del modelo de ANSYS.	63
Figura 6.6: Pasos para cargar el modelo en ANSYS	63
Figura 6.7 Características del material seleccionado (a) y (b), en este caso aluminio.	64
Figura 6.8 Contacto bonded.	65
Figura 6.9 contacto No separation.	66
Figura 6.10 algunos tipos de enmallado.	67
Figura 6.11 Malla finalizada.	67
Figura 6.12 Se selecciona creación de un nuevo modelo.	68
Figura 6.13 Se selecciona el directorio	69
Figura 6.14 El directorio es la carpeta que contiene todo la programación	69
Figura 6.15, Se importa el modelo desarrollado en ADAMS	70
Figura 6.16, El modelo se llama build.cmd que se encuentra en el directorio	70
Figura 6.17, Compruebe que en la parte superior al lado de Help debe salir el nombre del directorio robotenis.	71
Figura 6.18, Selección de dimensiones del robot Delta.	71
Figura 6.19, Modelo cargado con sus medidas.	72
Figura 6.20, Vista isométrica modelo en ADAMS.	72
Figura 6.21, Búsqueda de la trayectoria (Path).	73
Figura 6.22, La trayectoria se guarda en un formato tipo documento de texto (txt).	73
Figura 6.23, Selección de la trayectoria a simular	74
Figura 6.24, Búsqueda de las uniones	74
Figura 6.25, Selección de las uniones	75
Figura 6.26, Una vez finalizado la selección de las uniones y la trayectoria	75
Figura 7.1, Detalle de masa y momentos de inercia en ANSYS.	78
Figura 7.2, Ventana de ADAMS para variar masa y momentos de inercia.	78
Figura 7.3, Masa y momentos de inercia de la plataforma fija en ANSYS.	79

Figura 7.4, Masa y momentos de inercia de la plataforma fija en ADAMS	79
Figura 7.5, Masa y momentos de inercia del brazo en ANSYS	80
Figura 7.6, Masa y momentos de inercia del brazo en ADAMS.	80
Figura 7.7, Masa y momentos de inercia del antebrazo en ANSYS.	81
Figura 7.8, Masa y momentos de inercia del antebrazo en ADAMS	81
Figura 7.9, Masa y momentos de inercia de la plataforma móvil en ANSYS	82
Figura 7.10, Masa y momentos de inercia de la plataforma móvil en ADAMS	82
Figura 7.11, Selección de interactive simulation controls (calculadora).	83
Figura 7.12, Imagen antes de simular la trayectoria	83
Figura 7.13, Imagen después de simular la trayectoria.	84
Figura 7.14, Grafica torque motor 1.	85
Figura 7.15, Paso 1: Se selecciona Export y luego Results file.	85
Figura 7.16, Paso 2: Se selecciona tipo tabla (Type table).	86
Figura 7.17, Paso 3: Se selecciona la grafica que se quiere exportar.	86
Figura 7.18, Paso 4: Se selecciona el formato que en este caso es tipo html.	87
Figura 7.19, Grafica torque motor y datos exportados tipo tabla en formato html.	87
Figura 7.20, Grafica de comparación entre los tres torques del motor	88
Figura 7.21, Selección del modulo Static Structural.	88
Figura 7.22, Barra de selección de diferentes tipos de análisis.	89
Figura 7.23, Herramientas para definir el ambiente estático	89
Figura 7.24, Selección de soporte fijo.	90
Figura 7.25, Herramientas para definir el ambiente estático	90
Figura 7.26, Reemplazos de puntos por comas	91
Figura 7.27, Copia de máximo momento	91
Figura 7.28, Se pega el máximo momento de cada motor en ANSYS.	92
Figura 7.29, El ambiente estructural final debe mostrar las cargas, soportes e inercias que intervienen en el análisis.	92
Figura 7.30, Grafica de Momento máximo de 51380 Nmm	93
Figura 7.31, Grafica ANSYS factor de seguridad de 1.3441	93
Figura 7.32, Cambios de masa, aumento del agujero en el brazo.	94
Figura 7.33, Grafica modelo final en ANSYS factor de seguridad de 1.05	94
Figura 7.34, Momento máximo de 28980 Nmm para el modelo final	95

LISTA DE TABLAS

Tabla 1	Dimensiones del RoboTenis	Pág. 42
----------------	---------------------------	------------

LISTA DE DIAGRAMAS

Diagrama 1:	Metodología general propuesta	58
Diagrama 2:	Metodología específica de diseño propuesta	77

Nota: las figuras y diagramas del capítulo 5 en adelante son del Autor.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Establecer una metodología para el diseño de robots paralelos industriales tipo Delta, empleando SOLID EDGE, ANSYS y ADAMS, que facilite la futura construcción de prototipos robóticos industriales acordes a las necesidades de automatización de la región.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Implementar a través de lenguaje C, un programa de computador que permita resolver los modelos cinemáticos inverso y directo del robot, para relacionar el espacio articular y el espacio cartesiano en el área de trabajo.
- Implementar a través de lenguaje C, un programa de computador que permita planificar la trayectoria espacial de efector final del robot para diferentes puntos deseados, empleando los modelos cinemáticos del robot.
- Desarrollar un modelo de simulación de Robot Delta en SOLID EDGE, para determinar el espacio de trabajo ocupado por las piezas, así como la posible interferencia entre ellas, utilizando las longitudes de los eslabones y los radios de las plataformas del sistema robotenis
- Desarrollar en ANSYS un ambiente estático que permita la simulación de la estructura mecánica del robot con sus cargas y a la vez definir materiales, espesores y masas.
- Desarrollar en ADAMS un ambiente de simulación que permita el análisis dinámico del robot para diferentes trayectorias del efector final.

1. INTRODUCCIÓN

Al igual que otras muchas ramas de la ciencia y la tecnología, la robótica nació llena de promesas de futuro de un desarrollo tan rápido e intenso que, en pocos años, habría alcanzado metas que en aquellos momentos correspondían al ámbito de la ciencia ficción. Las aportaciones de una informática en continuo desarrollo, junto a las novedosas metodologías de la inteligencia artificial, permitían prever la disponibilidad, en pocos años, de robots dotados de una gran flexibilidad y capacidad de adaptación al entorno, que invadirían todos los sectores productivos de forma imparable.

La robótica industrial ha alcanzado un elevado grado de madurez, y la compra e instalación de robots industriales en los entornos productivos ha dejado de ser una aventura para convertirse en una opción razonable en muchos contextos de la automatización.

Los robots industriales ocupan un lugar destacado dentro de la automatización de la producción y su papel se ha ido consolidando en los últimos años. No obstante, la industria automotriz continúa siendo el sector mayoritario en cuanto a utilización de robots. Si bien la soldadura en sus diversos tipos sigue siendo un campo muy importante de aplicación, el número de robots dedicados al montaje en el conjunto del mundo es mayoritario.

Por tanto, la automatización y la robótica se han convertido en uno de los grandes precursores de la economía de las grandes potencias, ya que ésta permite consolidar los productos, producir en masa con mayor calidad y con mejores precios.

Un Tratado de Libre Comercio (TLC) con un país desarrollado es una gran oportunidad para que los industriales y empresarios de todos los sectores de la economía nacional, los profesionales y los trabajadores de Colombia ingresen competitivamente con productos y servicios, a los mercados de los países firmantes del Tratado. Estas nuevas condiciones, plantean para Colombia el reto próximo de cambiar su infraestructura creando así, un prototipo de empresa de un grado alto de automatización que permita competir con mayor eficiencia, más calidad, mejor tecnología y con precios favorables.

Ante esta realidad, el grupo de investigación de Robótica y Visión (RoVi) perteneciente a la Universidad Pontificia Bolivariana de Bucaramanga quiere hacer un aporte a la industria colombiana dando el primer paso en el diseño y desarrollo de robots industriales en Santander. Para ello propone a través de este proyecto, una metodología aplicada al diseño óptimo de un robot paralelo industrial a escala,

el cual permitirá dar a conocer este tipo de tecnología a la industria de la región y su futura aplicación a la solución de problemas concretos de automatización.

La estructura mecánica seleccionada es similar a la estructura mecánica del robot comercial DELTA, un robot paralelo de tres grados de libertad, empleado en tareas robóticas de alta velocidad. La selección de la estructura está motivada por la sencillez de la misma y su futura aplicación a tareas de alta velocidad como lo es selección de productos agrícolas.

A partir de las especificaciones de operación deseadas como son el espacio de trabajo y la velocidad del efector final del robot, la metodología de diseño empleará los conceptos de optimización cinemática y optimización dinámica. La optimización cinemática hallará las dimensiones físicas de la estructura mecánica del robot y la optimización dinámica hallará las masas de cada elemento de la estructura mecánica y a la vez, permitirá la selección comercial de los motores. En los procesos de simulación, la optimización cinemática empleará MATLAB y la optimización dinámica empleará ANSYS y ADAMS.

Una vez finalizado el proyecto, se contará con una metodología para el diseño de robots industriales basada en el análisis estructural especializado aplicado a robots de estructura mecánica similar y con diferentes grados de libertad. Esto permitirá, la investigación en este tipo de estructuras en la UPB-Bga, el desarrollo de nuevas aplicaciones, así como la futura oferta de servicios a la industria de la región con unos parámetros particulares de operación en los procesos de automatización.

2. MARCO TEORICO

En este apartado se revisa el estado actual de la técnica de los robots paralelos. Inicialmente, se presenta el estado del arte de los robots paralelos con de 6 y menos grados de libertad. Seguidamente, se presentan las principales líneas actuales de investigación en el campo de los robots paralelos. Luego, se profundiza de manera especial en la estructura DELTA, que es la empleada en nuestro modelo y por ultimo se muestra el reciente trabajo realizado en relación a un robot delta por el Dr. Luis Angel Silva.

2.1 ESTADO DEL ARTE DE LOS ROBOTS PARALELOS

Se define un robot paralelo como

“Aquellos robots en los que el extremo final está unido a la base por más de una cadena cinemática independiente”.

La arquitectura de los robots paralelos es muy diferente a la de los robots serie, lo que conduce a que la mayoría de los problemas teóricos se deban reconsiderar. De hecho existe una extraña dualidad entre ambos tipos de mecanismos, ya que un problema de difícil solución para un tipo de estructura, es fácilmente resoluble por el otro tipo de estructura, y viceversa (Zamanov, 1991), (Waldron, 1991). La estructura cinemática de los robots paralelos se conoce desde hace mucho tiempo. Ya en 1813, Cauchy estudió la rigidez de un octaedro articulado. Sin embargo, fue mucho más tarde cuando Gough y Whitehall (1962) propusieron un mecanismo similar para el ensayo de neumáticos, Figura 2.1.

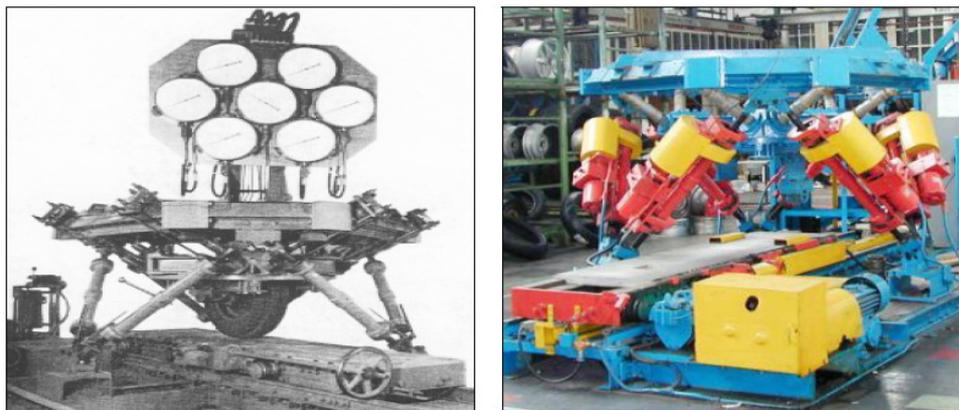


Figura 2.1 La plataforma de Gough.

En 1965, Stewart (1965) propuso el uso de una estructura paralela de seis grados de libertad para generar movimiento en el espacio, como la solución más práctica en la construcción de simuladores de vuelo. La elección de este tipo de mecanismo se justifica por la buena relación carga admisible/peso propio. De hecho, en una plataforma de Gough se distribuye la carga, de modo que cada uno de sus 6 actuadores soporta aproximadamente $1/6$ de los esfuerzos totales, siendo además, estos esfuerzos de tracción y compresión, lo que proporciona gran rigidez al mecanismo. Esto queda ilustrado con el ejemplo de un prototipo de robot paralelo que con 35 kg de peso tiene una carga nominal de 600 kg.

El mecanismo de Stewart, consistía en una plataforma triangular unida mediante articulaciones esféricas a tres actuadores lineales ajustables en longitud, que se conectaban a su vez, a una base fija mediante articulaciones universales. A pesar de que el mecanismo de Stewart es menos representativo que el de Gough, los robots paralelos son llamados frecuentemente plataformas de Stewart. Con el tiempo, la arquitectura de la plataforma de Stewart fue sufriendo modificaciones. La plataforma de Stewart tal como se la conoce hoy día, consiste en dos plataformas (la base y la plataforma móvil) unidas a través de seis actuadores extensibles mediante articulaciones esféricas en ambos lados, o con articulaciones esféricas a un lado y universales al otro.

Hasta mediados de la década de los 80, la mayoría de los diseños se centraron en dos configuraciones. Una con la base y el efector final con forma triangular y los actuadores de dos en dos coincidiendo en los vértices de cada triángulo; y otra, con la plataforma móvil de forma triangular y los actuadores coincidiendo dos a dos en los vértices del triángulo y con seis puntos distintos contenidos en el plano de la base con forma hexagonal. Estas configuraciones se denotan como 3-3 plataforma de Stewart (Figura 2.2a) y 6-3 plataforma de Stewart (Figura 2.2b), respectivamente. Muy pronto se observó que la coincidencia de las articulaciones esféricas restringía de forma severa la movilidad del manipulador, sin embargo la configuración 6-3 todavía se mantuvo popular por algún tiempo. Otra configuración que empezó a ser muy popular es la que tenía hexágonos semirregulares como puntos de conexión tanto en la base como en el efector final (6-6 plataforma de Stewart) (Figura 2.2c).

Existe una gran variedad de configuraciones mecánicas para este tipo de robots, según sea la estructura de las cadenas cinemáticas que unen la base con el efector final. La estructura cinemática con articulaciones esféricas a ambos lados de cada actuador (Figura 2.3a), se denota como plataforma de Stewart 6-SPS, donde 6 se refiere al número de grados de libertad del robot y SPS viene del inglés (Spherical – Prismatic – Spherical). De igual forma, la estructura con articulaciones universales en la base y esféricas en el efector final se denota como plataforma de Stewart 6-UPS (Universal – Prismatic – Spherical) (Figura 2.3b).

Estas dos estructuras son idénticas salvo que la plataforma 6-SPS presenta seis grados de libertad pasivos que permite la rotación de cada cadena cinemática sobre su eje.

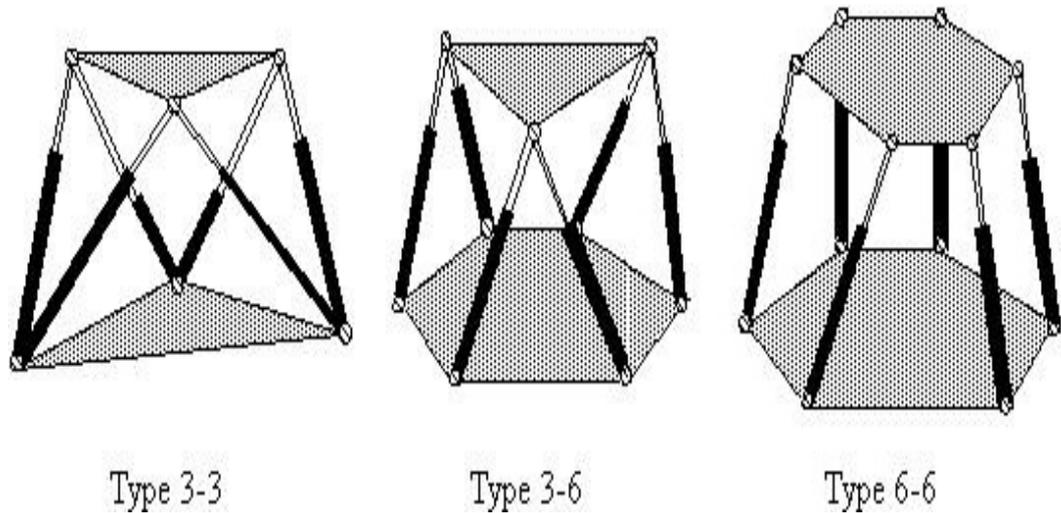


Figura 2.2 Plataforma de Stewart: (a) 3-3, (b) 3-6, (c) 6-6.

Más tarde en 1978, Hunt (1978) sugirió que los mecanismos actuados de forma paralela de los simuladores de vuelo, se usaran como robots manipuladores y destacó, que los manipuladores paralelos requerían de un estudio más detallado en el contexto de las aplicaciones robóticas a la vista de las ventajas en cuanto rigidez y precisión respecto a los robots serie convencionales.

Además de la excelente relación carga admisible/peso propio, los robots paralelos presentan otras características interesantes. En 1979, McCallion y Truong (1979) propusieron usar la plataforma de Stewart como un manipulador paralelo dentro de una célula de ensamblaje robotizada (Figura 2.4), fundamentalmente porque la posición del efector final es mucho menos sensible a los errores que los sensores articulares de los robots en serie. La gran rigidez asegura que las deformaciones de los actuadores sean mínimas. Esta característica contribuye en gran manera a la precisión en el posicionamiento del manipulador.

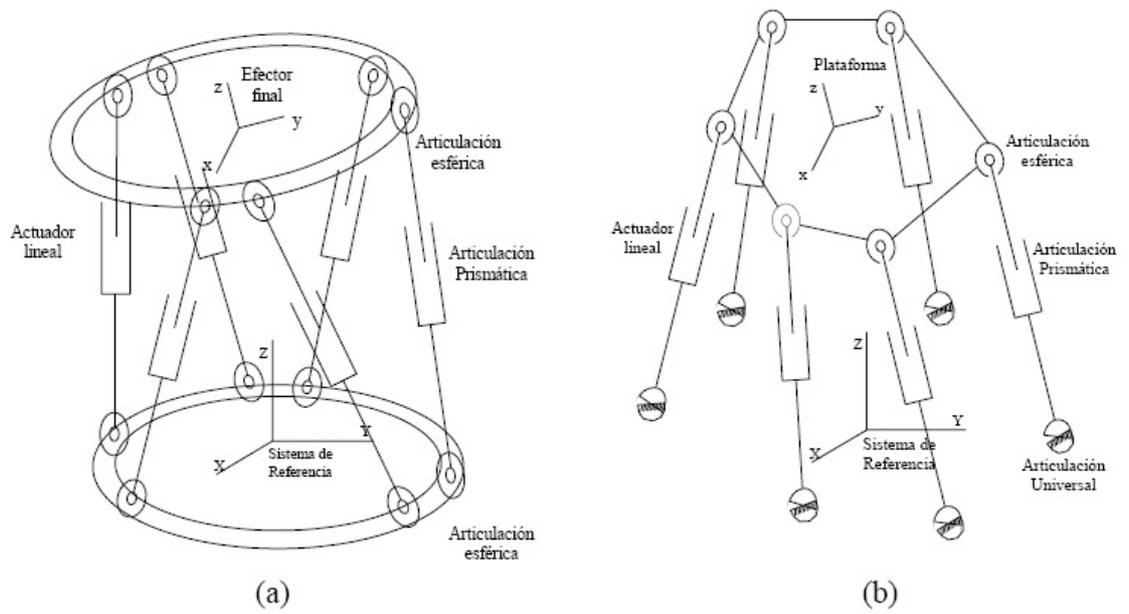


Figura 2.3 Plataforma Stewart: (a) 6-SPS, (b) 6-UPS.

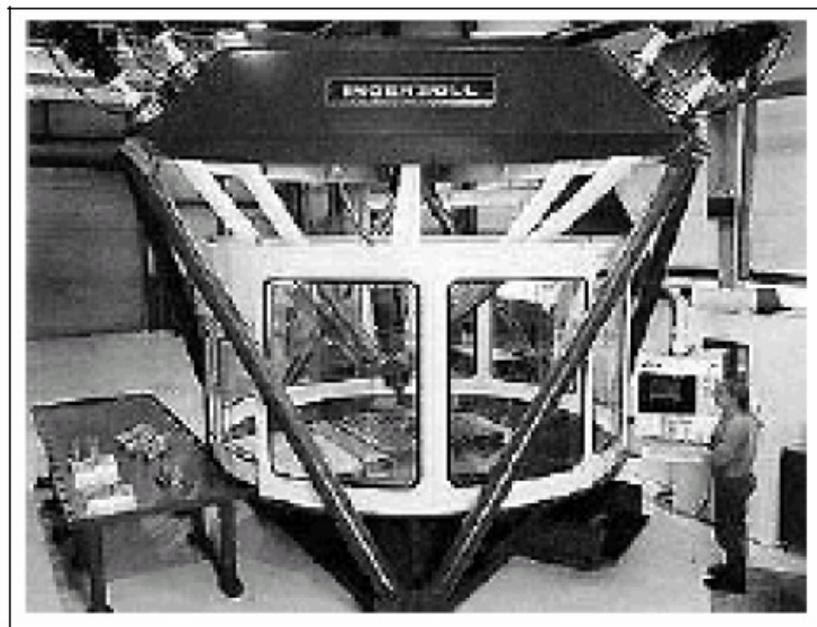


Figura 2.4 Robot paralelo para mecanizado.

Earl y Rooney (1983) analizaron la estructura cinemática para aplicaciones robóticas y las dualidades entre mecanismos serie y paralelos, presentando métodos de síntesis de nuevas estructuras cinemáticas. Hunt (1983) estudió la estructura cinemática de los manipuladores paralelos basándose en la “teoría screw”, y enumeró varias estructuras cinemáticas con futuro prometedor. También analizó las singularidades en términos geométricos clasificándolas en “configuraciones estacionarias” y en “configuraciones con incertidumbre”, discutiendo las diferentes formas de ensamblaje de los manipuladores paralelos.

Fichter y McDowell aplicaron el método convencional de los manipuladores serie, para resolver la cinemática inversa de cada eslabón individual de un manipulador paralelo. Este método fue implementado en la plataforma de Stewart. Mohamed y Duffy (1983,1985) estudiaron la cinemática de los manipuladores paralelos basándose en la teoría Screw y presentaron la solución para la transformación inversa y directa.

Yang y Lee (1984) desarrollaron un diseño práctico para el modelo cinemática de la plataforma de Stewart. Realizaron un primer intento de analizar el espacio de trabajo de la plataforma en un determinado plano, dando evidencias numéricas de que el espacio de trabajo y la maniobrabilidad del manipulador paralelo eran bastante limitados.

La fase inicial en el desarrollo de los robots paralelos como campo de investigación se consolidó a través de las contribuciones de Fichter y Merlet. Fichter derivó las ecuaciones cinemáticas de la plataforma de Stewart, y formuló las ecuaciones dinámicas de una forma rudimentaria (despreciando la masa de los actuadores y la fricción de las articulaciones). Enumeró unas cuantas configuraciones singulares y realizó varias recomendaciones para la construcción práctica de la plataforma de Stewart, describiendo el proceso de construcción del robot en la Universidad de Oregon. Merlet consideró los aspectos de diseño de la plataforma de Stewart, tratando las diferentes arquitecturas mencionadas anteriormente. Presentó una descripción del prototipo de plataforma de Stewart construida en el INRIA, Sophia-Antipolis, Francia, dando las directrices para solucionar las ecuaciones cinemáticas, desarrollar el Jacobiano, derivar las ecuaciones dinámicas en condiciones más generales que las propuestas por Fichter y la determinación del espacio de trabajo. También mencionó el potencial de la plataforma de Stewart como sensor de fuerza y como dispositivo de acoplamiento pasivo.

Dadas las principales limitaciones de la plataforma de Stewart en cuando a espacio de trabajo reducido, dificultad en la resolución de la cinemática directa y complejidad en el diseño mecánico, recientemente se han propuesto diferentes estructuras paralelas con menos grados de libertad. En comparación con un

manipulador paralelo de 6 grados de libertad, un manipulador paralelo de menos grados de libertad tiene como ventajas, un diseño mecánico más simple, un bajo coste de fabricación, un espacio de trabajo mayor y un controlador más sencillo.

Particularmente, destaca el desarrollo de manipuladores paralelos con 3 grados de libertad, dados sus potenciales usos en aplicaciones industriales (Clavel, 1988), (Tsai, 1996), (Tsai et al., 1996), (Gosselin and Angeles, 1989), (Karouia and Hervé, 2000). Sin embargo, pocos reportes se tiene en el desarrollo de manipuladores paralelos con 4 o 5 grados de libertad. Esto se debe principalmente, a que los manipuladores de 4 o 5 grados de libertad, no pueden ser construidos empleando cadenas cinemáticas idénticas, como apuntaron Hunt (1983) y Tsai (1998).

Según la estructura cinemática, los manipulantes paralelos de tres grados de libertad, se clasifican en cuatro tipos: planar, esférico, espacial y mixto. Robots paralelos con dos grados de libertad rotacionales y uno trranslacional han sido propuestos por (Agrawal 1991), (Fang and Huang, 1997), (Lee and Shah, 1987), (Lee and Arjuman, 1991), (Pfreunds Schuh et al., 1991), (Song and Zhang, 1995), (Waldron et al., 1989). Manipuladores paralelos planares y esféricos han sido estudiados por (Asada and Cro Granito 1985), (Cox and Tesar, 1989), (Gosselin eta al., 1992), (Gosselin and Lavoie, 1993), (Gosselin et al.,1996), (Carretero et al., 2000), (Vischer and Clavel, 2000). Las estructuras mixtas son empleadas como simuladores de movimiento, muñecas en robots híbridos serie-paralelo y en sistemas de mixtos de posicionamiento y orientación (Lee and Shah, 1988), (Waldron et al., 1989), (Carretero et al., 2000), (Di Gregorio and Parenti-Castelli, 2001).

Recientemente, se han presentado varios manipuladores paralelos de 4 grados de libertad con cadenas cinemáticas no simétricas. Hesselbach et al. (1998) desarrolla un manipulador paralelo de 4 grados de libertad, con dos cadenas cinemáticas asimétricas para el corte los paneles convexos de cristal. Lenarcic et al., (2000) utilizaron un mecanismo paralelo de 4 grados de liberad, con una cadena cinemática PS (Prismatic -Spherical) y tres cadenas cinemáticas SPS (Spherical-Prismatic-Spherical), para simular el hombro de un humanoide. Rolland (1999) empleó el concepto de paralelogramo, empleado en el robot Delta, para la construcción de dos manipuladores paralelos de 4 grados de libertad, llamados Kanuk y Manta, respectivamente. Los dos manipuladores poseen un grado de libertad rotacional y tres grados de libertad de translación. Tanev (1998) estudio la cinemática directa de un manipulador paralelo de 4 grados de libertad con una cadena cinemática RPR (Rotational-Prismatic- Rotational) y dos cadenas cinemáticas SPS (Spherical-Prismatic-Spherical). Wang y Gosselin (1988) investigan la cinemática y las singularidades de un robot paralelo de 4 grados de libertad con 4 cadenas cinemáticas RUS (Rotational-Universal-Spherical) y una cadena cinemática RS (Rotational-Spherical) pasiva.

Chen et al., (2002) presentó un robot paralelo de 4 grados de libertad, con dos cadenas cinemáticas cerradas PRS (Prismatic-Rotational-Spherical) y dos cadenas cinemáticas PSS (Prismatic-Spherical-Spherical).

Un manipulador con cadenas cinemáticas no simétricas, da lugar a un espacio de trabajo no simétrico, lo cual, puede complicar el planeamiento de la tarea. En este aspecto, varios investigadores han hecho grandes esfuerzos en diseñar manipuladores paralelos de 4 grados de libertad con cuatro cadenas cinemáticas idénticas. Company and Pierrot (1999) presentan un nuevo manipulador paralelo 3T-1R (3 grados de libertad translacional y un grado de libertad rotacional). Pierrot and Company (1999) y Pierrot et al., (2001) investigaron una familia de manipuladores paralelos de 4 grados de libertad (H4) con cadenas cinemáticas idénticas. Utilizaron el principio del paralelogramo para construir dos conjuntos de cadenas cinemáticas. Cada conjunto está formado por dos cadenas cinemáticas idénticas PUU (Prismatic-Universal-Universal) conectadas a la plataforma móvil por medio de una articulación rotacional común. Zlatanov y Gosselin (2001) proponen una estructura paralela de 4 grados de libertad con cadenas cinemáticas RRRRR (Rotational-R-R-R). Este es el primer manipulador paralelo de 4 grados de libertad con cuatro cadenas seriales idénticas.

Hasta la fecha, se han propuesto muy pocos manipuladores paralelos de 5 grados de libertad. Wang y Gosselin (1997) investigaron la cinemática y las singularidades de un manipulador paralelo 5 grados de libertad con cinco cadenas RUS (Rotational-Universal Spherical) y una cadena pasiva US (Universal- Spherical). Lee and Park (1999) investigan la cinemática y la dinámica de un manipulador paralelo de 5 grados de libertad. Merlet et al., (2000) investigaron el problema asociado al planeamiento de trayectorias de una máquina-herramienta de cinco ejes, basada en un manipulador paralelo de 6 grados de libertad. El algoritmo propuesto, hace uso del grado de libertad adicional para evitar las posiciones singulares. Recientemente, Huang and Li (2002) presentaron dos manipuladores paralelos de 4 grados de libertad y dos manipuladores paralelos de 5 grados de libertad con estructuras idénticas de cada cadena cinemática.

2.1.1 Líneas Actuales de Investigación

El análisis y desarrollo de nuevas estructuras paralelas, plantea actualmente grandes desafíos tanto en el aspecto teórico como en el aspecto práctico. A continuación se describen los avances y problemas abiertos en las principales líneas de investigación en el campo de los robots paralelos.

2.1.1.1 Diseño Mecánico

Un problema interesante es encontrar un método para diseñar la arquitectura de un robot paralelo dado el número y el tipo de grados de libertad. Una aproximación a este problema basada en la teoría de grupos fue presentada por Hervé (1992). Usando esta aproximación, el autor ha diseñado un nuevo robot, STAR, con tres grados de libertad traslacionales. Sin embargo queda trabajo por hacer, especialmente en el diseño de robots paralelos que combinen diferentes grados de libertad traslacionales y rotacionales.

2.1.1.2 Cinemática

Hay que distinguir dos aspectos: la cinemática inversa y la cinemática directa. El problema cinemático inverso, un problema difícil para los robots serie, es sencillo para los robots paralelos. Sin embargo, la cinemática directa es mucho más complicada. En general este problema tiene más de una solución, por ejemplo, la plataforma de Gough tiene 16 posturas diferentes dadas las 6 longitudes de sus actuadores (Merlet, 1989, 1990, 1992). Ronga (1992) demostró que en el caso más general no hay más de 40 soluciones. Algunos algoritmos se han presentado para resolver casos especiales (Merlet, 1992), (Innocenti, 1993), (Angeles, 1992), (Ait and Ahmed, 1993), pero soluciones analíticas solo se han encontrado en arquitecturas muy especiales (Lee, 1993). Ku (1999) propone el análisis del modelo cinemático directo de la plataforma de Stewart empleando el método de Newton-Raphson, mostrando una mayor simplicidad y eficiencia en cuanto a coste computacional comparado con la formulación en forma cerrada. Yang (1999) se centra en el diseño y análisis cinemático de robots modulares paralelos reconfigurables de tres cadenas cinemáticas y 6 grados de libertad. Para la solución del problema cinemática directo utiliza un algoritmo basado en información sensorial de las articulaciones pasivas para simulaciones en línea y el algoritmo de iteración numérica de Newton-Raphson para simulaciones fuera de línea.

Otra forma práctica de resolver la cinemática directa es implementar sensores de posición y de orientación para calcular la postura de la plataforma móvil (Inoue, 1985), (Arai, 1990), (Merlet, 1992). Recientemente Bonev (1999) propone un nuevo método de solución del problema directo usando tres sensores lineales adicionales. La información adicional proporcionada por los sensores reduce el problema a un sistema sobredeterminado de seis ecuaciones cuadráticas con tres incógnitas.

2.1.1.3 Análisis de Singularidades

De forma análoga a los robots serie, los robots paralelos pueden adoptar configuraciones en las que las fuerzas articulares no puedan equilibrar los esfuerzos sobre la plataforma móvil. Es importante determinar estas configuraciones en cuya vecindad las fuerzas articulares tienden a infinito y el robot puede colapsar. Un estudio analítico elemental de este tipo de singularidades se puede encontrar en Gosselin y Angeles (1990) donde se denominan como 'singularidades de segundo tipo'. Estas disposiciones singulares están caracterizadas por la anulación del determinante de la matriz jacobiana inversa. A pesar de que esta matriz sea conocida, en la mayoría de los casos la computación simbólica de este determinante no conduce a soluciones analíticas, por lo que hay que recurrir a procedimientos numéricos (Douady, 1991] o, más eficientemente, procedimientos geométricos para encontrar las configuraciones singulares (Merlet, 1989).

Merlet hizo un extenso uso de la geometría de Grassman para enumerar con detalle las condiciones geométricas singulares de diferentes robots paralelos. Liu et al. (1993) realizaron un estudio geométrico de las singularidades de la plataforma de Stewart, en el que analizaron la matriz jacobiana para cuatro posiciones singulares. Ma y Angeles (1991) mostraron que algunas arquitecturas simétricas de la plataforma de Stewart, presentan singularidades extendidas por todo el espacio del trabajo o regiones importantes dentro del mismo, caracterizadas por la capacidad de movimiento continuo de la plataforma móvil con todos los actuadores bloqueados. A estas singularidades las llamaron singularidades de arquitectura. Aunque estas singularidades dan lugar a serios problemas de control, estas se pueden eliminar en la fase de diseño. Gosselin estudió la asociación del condicionamiento de la matriz de transformación estática con la rigidez de la plataforma de Stewart, donde se perdía rigidez cerca de configuraciones singulares. Un problema que queda por resolver es determinar, de una forma simultánea, si existen configuraciones singulares dentro del espacio de trabajo de un robot paralelo (Sefrioui, 1992). Una completa descripción y caracterización de las singularidades sería parametrizar por completo las hipersuperficies en el espacio de trabajo del robot. Este análisis permitiría establecer las regiones del espacio de trabajo donde las singularidades restringen la maniobrabilidad del robot.

Un punto importante asociado, es la planificación de trayectorias evitando las singularidades. Bhattacharya et al. (1998) desarrollaron un esquema de planificación de trayectorias evitando singularidades, de forma que reestructuraba la planificación en la vecindad de una singularidad. Dasgupta y Mruthyunjaya (1998) formularon el problema de la planificación de trayectorias evitando singularidades y desarrollaron una estrategia para planificar entre dos puntos trayectorias bien condicionadas en el espacio de trabajo del robot. Sin embargo,

un criterio riguroso sobre la existencia de dichas trayectorias no está todavía disponible. Aracil et al. (2000b) proponen un algoritmo de control de movimiento para la planificación de trayectorias de un robot paralelo de 6 grados de libertad, basado en la plataforma de Stewart, donde se evita el problema de las singularidades comprobando el determinante de la matriz jacobiana en posiciones discretas del camino.

2.1.1.4 Espacio de Trabajo

En contraste con los robots serie más comunes, con tres ejes intersectantes en la muñeca, en los robots paralelos el espacio de trabajo no se puede desacoplar en dos sub-espacios 3D caracterizando los movimientos de traslación y de orientación. Este acoplamiento hace que la representación del espacio de trabajo de la gran mayoría de los robot paralelos, sólo sea posible en seis dimensiones, lo que dificulta su representación y aun más su uso en aplicaciones prácticas. Ante esto, cabe desglosar el problema en dos: dada una orientación constante, representar el espacio de trabajo de todas las posibles posiciones 3D, o bien, dada una posición representar el espacio de trabajo de las posibles orientaciones (3D). Otra solución es representar algunas proyecciones del espacio de trabajo completo. Una forma usual es representar las posibles traslaciones de la plataforma móvil a una altura y orientación constantes, mediante un procedimiento de discretización (Fichter, 1986), (Arai, 1991) o, más eficientemente, por un algoritmo geométrico (Merlet, 1992), (Gosselin, 1990) que tenga en cuenta los límites de los actuadores, sus interferencias y las restricciones de las articulaciones. Haug (1989) desarrolló una formulación general para el análisis de la destreza y del espacio de trabajo de los manipuladores paralelos en términos de la matriz jacobiana y de las ecuaciones de restricción para la plataforma de Stewart. Masory y Wang (1995) consideraron el problema de determinar secciones del espacio de trabajo incluyendo los límites angulares de las articulaciones y la interferencia de los actuadores.

Aunque la mayoría de los autores estudiaron el espacio de trabajo manteniendo una orientación fija, Merlet (1993) desarrolló un algoritmo para la representación de todas las posibles rotaciones dentro del espacio de trabajo, alrededor de un punto considerado fijo en la plataforma móvil.

Otro punto interesante desde el punto de vista práctico, es verificar que una trayectoria deseada esté contenida dentro del espacio de trabajo del manipulador. Merlet (1994) propone la inclusión completa de una trayectoria recta en el espacio de trabajo, para una orientación constante y para una variación lineal de los ángulos de orientación. Otro problema interesante es determinar las dimensiones de un robot para que abarque un espacio de trabajo deseado (Merlet, 1995).

2.1.1.5 Dinámica

El análisis dinámico de los robots paralelos es complicado dada la existencia de múltiples cadenas cinemáticas cerradas. Diferentes formulaciones han sido propuestas: Dasgupta y Mruthyunjaya, Do y Yang, Guglielmetti y Longchamp y, Tsai y Kholi proponen la formulación de Newton-Euler, Lebret y Liu, Miller y Chavel, Pang y Shahingpoor, proponen la formulación langrangiana, y por último Miller, Codourey y Burdet, Tsai, Wang y Gosselin, Zang y Song proponen el principio de los trabajos virtuales, todas estas referencias se pueden encontrar en (Tsai, 1999). Do y Yang (1988) solucionan la dinámica inversa de la plataforma de Stewart empleando la formulación de Newton-Euler. El modelo dinámico propuesto asume que las articulaciones no tienen fricción y que las cadenas cinemáticas son simétricas y delgadas (es decir, despreciando los momentos axiales de inercia). Geng et al. (1992) y Liu et al. (1993) desarrollaron las ecuaciones de movimiento de Lagrange para la plataforma de Stewart, asumiendo ciertas simplificaciones en cuanto a geometría y distribución inercial de la plataforma.

(Dasgupta and Mruthyunjaya, 1998) y (Gosselin, 1996) proponen un modelo dinámico inverso para la plataforma de Stewart, usando la formulación de Newton-Euler. Dasgupta and Mruthyunjaya (1998b) derivaron las ecuaciones de la dinámica en forma cerrada para las plataformas de Stewart 6-UPS y 6-SPS. Más recientemente Liu et al. (2000) proponen las ecuaciones del modelo dinámico directo para la plataforma de Stewart-Gough, empleando las ecuaciones de Kane. Este método considera cada cadena cinemática de la plataforma, como una estructura independiente. El sistema de ecuaciones dinámicas, asociado a la plataforma, estaba formado por las ecuaciones dinámicas de las cadenas cinemáticas independientes y el conjunto de las ecuaciones de restricción entre las mismas. Comparado con el tradicional método de Newton-Euler y la formulación de Lagrange, este proceso de modelado era más directo y sistemático, y las ecuaciones dinámicas finales más concisas.

2.1.1.6 Control

El control de los robots paralelos es todavía un campo abierto y los trabajos aportados hasta la fecha no son muy rigurosos. Liu et al. (1990, 1992) discutieron varios aspectos prácticos en relación con el control dinámico de robots paralelos. El análisis es aplicado a una plataforma de Stewart dentro de un centro de mecanizado. Sin embargo, la aplicación de su esquema de control en tiempo real está en duda debido a las intensas tareas computacionales implicadas en la solución de la cinemática directa.

Otra estrategia de control dinámico fue desarrollada por Hatip y Ozgoren (1995). Empleaban una plataforma de Stewart para estabilizar el movimiento de un barco. Wang et al (1995) presentaron un esquema de control basado en redes neuronales y mostraron su superioridad respecto al control cinemático. Harris (1995) empleo el control cinemático y realizo un análisis sobre la eficiencia computacional entre trayectorias helicoidales y trayectorias en línea recta. Además, demuestra que en determinadas situaciones, un movimiento de rotación y traslación del efector final entre dos puntos requería menos movimiento en los actuadores.

En los robots paralelos rápidos, es necesario resolver el modelo dinámico para llegar a un control satisfactorio. Aun no se han establecido soluciones analíticas, pero, se suelen hacer ciertas simplificaciones que permiten simular el comportamiento dinámico de estas plataformas (Seguchi, 1990), (Reboulet, 1991), (Pierrot et al. 1991, 1994), (Do, 1988).

(Reboulet, 1992) y (Arai, 1991) emplean las señales de diferentes sensores de esfuerzo dentro del sistema de control, para una plataforma de Stewart en aplicaciones de ensamblaje y seguimiento de superficies. La dinámica y el control de plataformas de Stewart teniendo en cuenta la flexibilidad de los actuadores fueron propuestos por Lee y Geng (1993), a través del modelado simplificado de la inercia y la flexibilidad de las cadenas cinemáticas.

2.1.1.7 Calibración

La precisión de un robot paralelo no solo depende del control, sino también del buen conocimiento de sus características geométricas. En función de las tolerancias de fabricación muchos factores intervienen en la precisión del robot. Wang (1993) demostró que en una plataforma de Gough son necesarios 132 parámetros para describir sus características geométricas. Sin embargo mediante un cuidadoso diseño estos parámetros se pueden reducir al conjunto de coordenadas articulares (36 parámetros) y los recorridos de los actuadores (6 parámetros). La calibración de robots paralelos sigue como un problema abierto aunque ha sido tratado (Masory, 1993), (Wampler, 1992).

2.1.2 El robot DELTA

En este apartado, se llevará a cabo una revisión del estado del arte en cuanto al robot Delta se refiere, dado que su geometría es semejante a la del modelo usado en esta tesis.

En los años 80, Reymond Clavel, profesor en EPFL (École Polytechnique Fédérale de Lausanne) irrumpe con la idea brillante de usar paralelogramos para construir una estructura paralela robusta con tres grados de libertad de translación y un rotatorio. Al contrario de las publicaciones científicas hasta el momento, su inspiración era verdaderamente original y no viene de un mecanismo paralelo patentado por Willard L. Pollard en 1942. A esta estructura se le dio el nombre de robot Delta, sin sospechar que al final de siglo, sería uno de los diseños paralelos más acertados con varios cientos de estructuras activas en todo el mundo. En 1999, el Dr. Clavel es premiado con el “Golden Robot Award” (patrocinado por ABB) por su trabajo innovador en el robot paralelo Delta.

En la Figura 2.5, se muestra un esquema mecánico del robot Delta. En ella, se pueden observar las tres cadenas cinemáticas idénticas, que unen la plataforma fija y la móvil, además del brazo central que dota al sistema de un 4º grado de libertad rotativo.

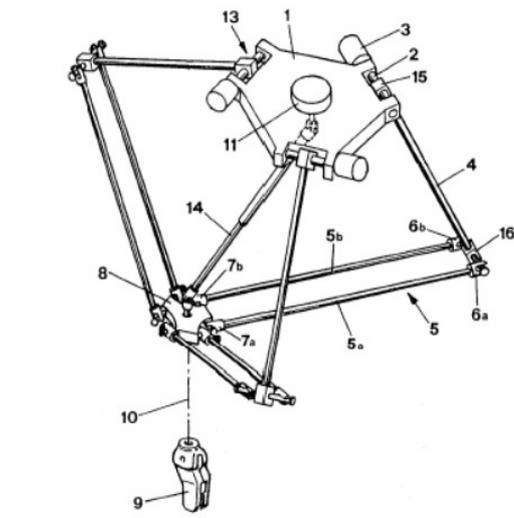


Figura 2.5 Prototipo del robot DELTA patentado en EEUU (1990) por Clavel. (Patente No. 4.976.582).

La idea básica que estaba detrás del diseño del robot paralelo Delta es el uso de paralelogramos. El uso de tres de estos paralelogramos restringe totalmente la orientación de la plataforma móvil, que permanece con sólo 3 grados de libertad puramente translacionales. Los acoplamientos de entrada de los tres

paralelogramos están montados en ejes rotativos (3) y estos ejes pueden ser actuados:

- mediante motores eléctricos de C.C o C.A, o.
- mediante actuadores lineales.

Finalmente, un cuarto brazo se utiliza para transmitir el movimiento rotatorio de la base a un efector final montado en la plataforma móvil.

El uso de actuadores montados en la base y la escasa masa de los acoplamientos permiten aceleraciones en la plataforma móvil de hasta 50g en entornos experimentales y de 12g en aplicaciones industriales. Esto hace del Delta el perfecto candidato para operaciones de “pick and place” de objetos ligeros (desde 10 gr hasta 1 kg). Los robots Delta disponibles en el mercado tienen un espacio de trabajo cilíndrico con 1 m de diámetro y 0.2 m de altura.

2.1.2.1 El robot Delta en el Mercado

La historia del marketing del robot Delta es larga y complicada. Todo comenzó en 1983, cuando los hermanos suizos Marc-Olivier y Pascal Demarex crearon la compañía Demarex con base en Laussane (Suiza). Después de obtener una licencia para el robot Delta en 1987, su mayor objetivo era llegar a comercializar el robot paralelo para la industria del empaquetado (Figura 2.6). Después de varios años, Demarex ocupaba un importante lugar en este mercado. Cuatro versiones eran comercializadas bajo los nombres de: Pack-Place, Line-Placer, Top-Placer, y Presto.



Figura 2.6 El robot Delta en la industria del empaquetado

La patente del robot Delta fue comprada por los hermanos Demarex de EPFL en 1996. Sin embargo, antes de que se llevara a cabo la transacción, EPFL había vendido ya dos licencias. El primer referente a robots de pequeña dimensión (brazo + paralelogramo <800mm) fue atribuido exclusivamente a Demarex en 1987. El segundo, referente a robots de mayores dimensiones fue vendido a AID y después revendido a DeeMed. Esta compañía, comprada después por la sueca Elekta, se especializa en intervenciones quirúrgicas y diseña el robot Delta para llevar un microscopio pesado (unos 20 Kg), Figura 2.7. La tecnología del robot Delta fue consecuentemente vendida a Medtronic al final de 1999.



Figura 2.7 El robot Delta en aplicaciones quirúrgicas.

Antes de la transacción de SurgiScope, Elekta IGS inició negociaciones acerca de la licencia de su Delta con el grupo ABB de Zurich. Como resultado, ABB obtuvo una licencia para fabricar robots Delta de grandes dimensiones. Al mismo tiempo, Demarex anunció su decisión de producir robots de mayores dimensiones (entorno a 1200 mm). Sin embargo, Demarex no puede producir robots de mayor

tamaño, ya que la compañía tiene la obligación de no entrar en el mercado de dimensiones superiores a 1200 mm.

Demaurex también dio licencia a la compañía japonesa Hitachi Seiki para fabricar robots Delta de pequeñas dimensiones, para empaquetado (DELTA) y para perforación (PA35), Figura 2.8. De hecho, Hitachi Seiki representa a Demarex en Japón.



Figura 2.8 Robots Delta de Hitachi-Seiki.

ABB Flexible Automation, lanzó su robot Delta en 1999 bajo el nombre **IRB 340 FlexPicker** (Figura 2.9). Tres sectores de la industria eran su objetivo: el alimentario, farmacéutico y las industrias electrónicas. El FlexPicker está equipado con un sistema de vacío capaz de transportar objetos de un punto a otro con un peso de más de 1 Kg. El robot está guiado con un sistema de visión diseñado por Cognex y un controlador S4C de ABB. Las velocidades alcanzables con este sistema son de 10 m/s y 3.6 grados/s (unos 150 movimientos por minuto), y unas aceleraciones de hasta 100 m/s² y 1.2 rad/s². El robot está disponible en dos versiones, una de las cuales es sellada, resistente a la corrosión y diseñada para su uso en ambientes extremadamente limpios.

Después de más de quince años como única empresa en el mercado, Demarex se encontró repentinamente con la decisión del gigante sueco ABB de entrar en este mercado. En un intento de asegurar su estabilidad a largo plazo, Demarex cambió su línea de producción y comenzó a fabricar robots con células completas. Sin embargo, con el objetivo de hacerse con un mercado mundial, el “pequeño”

Demaurex comenzó a buscar un socio. Y tanto es así, que a finales de 1999, Demarex fue adquirido por el grupo suizo SIG.

El grupo SIG está formado por tres ramas, una de las cuales (rama de empaquetado) emplea ella sola cerca de 2000 trabajadores, lo que convierte a SIG en una compañía lo suficientemente grande como para atender la necesidad de Demarex de acceder al mercado mundial. Demarex mantiene su nombre y a sus dos fundadores. Actualmente, se están fabricando tres modelos diferentes del Delta ofrecidos por "SIG Pack Systems", mientras que los modelos C23 y C33 son fabricados por Demarex, el modelo CE33 es fabricado por "SIG Pack Systems", Figura 2.10.



Figura 2.9 Robot Delta IRB 340 FlexPicker (ABB).



Figura 2.10 Robots Delta, modelos C33 y CE33 fabricados por SIG.

2.1.2.2 El robot DELTA a nivel académico

El diseño del robot Delta ha atraído gran interés no sólo en el mundo de la industria sino también en laboratorios académicos. Un gran número de variantes han sido propuestas pero la mayoría de esos prototipos son muy similares al modelo original. Uno de estos robots modificados fue construido en la Universidad de Maryland (Stamper et al, 1998). Otra versión modificada fue construida en la Universidad de Génova. En esos diseños los paralelogramos son sustituidos por mecanismos equivalentes.

Otra versión más optimizada (**NUWAR**), está en construcción en el Departamento de Mecánica y Materiales de la Universidad de Australia Occidental (UWA), Figura 2.11. Este robot forma parte de la próxima generación de los robots paralelos y cuando esté terminado se espera que sea el más rápido del mundo. El diseño del NUWAR está basado en el robot Delta 4, capaz de alcanzar aceleraciones de hasta 500 m/s², y su configuración trae consigo mejoras en dos aspectos: El espacio de trabajo, y la rigidez que presenta el sistema (Miller, 1995, 1996).

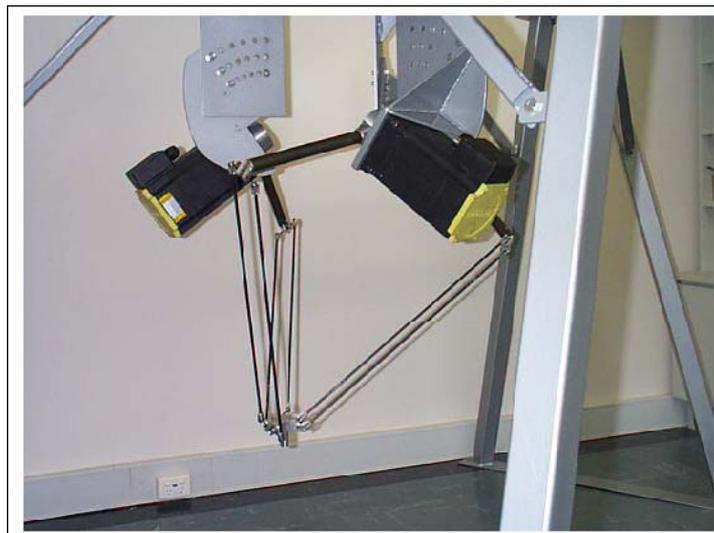


Figura 2.11 Robot NUWAR

Tres versiones del robot Delta con motores lineales, han sido construidas en Ferdinand-von Steinbeis Schule, ETH Zúric, y la Universidad de Stuttgart. Otras versiones lineales fueron fabricadas para la realización de proyectos de final de carrera en la Universidad de Michigan.

Como es natural, la mayor parte de los miembros de la familia de robots Delta se encuentra en su lugar de nacimiento, l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL). Además varias estructuras Delta (Delta 720 y Microdelta 240), han sido

construidas por el grupo de robótica paralela dirigido por el profesor Reymond Clavel.

2.1.3 Aplicaciones de los Robots Paralelos

La realización práctica de prototipos para robots paralelos, ha surgido en función de los desarrollos de su cinemática y dinámica. La gran precisión en el posicionamiento y orientación de la plataforma, ha propiciado su aplicación en muñecas para brazos manipuladores (Arai, 1993) (Innocenti, 1993). Los seis grados de libertad hacen que su aplicación sea atractiva en simuladores de vuelo para los que fueron originalmente usados, simuladores de movimientos ecuestres, aplicaciones de realidad virtual.

A pesar de lo reciente que es el concepto de robots paralelos, varios laboratorios han propuesto prototipos muy interesantes (Fichter, 1986), (Arai, 1990). Deben ser mencionados los robots paralelos desarrollados por MEL en Japón: uno de los cuales es un micro manipulador cuyos actuadores lineales tiene un rango de trabajo de pocos micrómetros y permiten realizar movimientos de nanómetros (Arai, 1993) y otro es un gigantesco manipulador para la industria minera (Nakashima, 1992).

El primer robot paralelo comercial, el “Gadfly”, un manipulador de 6 grados de libertad para el ensamblado de componentes electrónicos, fue diseñado por Marconi (Marconi, 1985). Posteriormente esta compañía diseñó un gran robot híbrido serie-paralelo, el “Tetrabot” (Marconi, 1986). Otro prototipo interesante es el robot paralelo desarrollado por Fanuc para tareas de soldadura en la industria del automóvil, Figura 2.12.



Figura 2.12 Robot paralelo FANUC, empleado en tareas de soldadura.

Especial mención merecen los prototipos para la cirugía oftalmológica (Merlet et al., 1991), (Grace et al., 1993), el joystick esférico desarrollado por Gosselin et al. (1998) en Canadá por la Universidad de Laval (Figura 2.13), y el uso de una clásica plataforma de Gough para la manipulación de cargas de hasta 230 kg, con alta repetitibilidad, en el European Synchrotron Radiation Facility (ESRF).

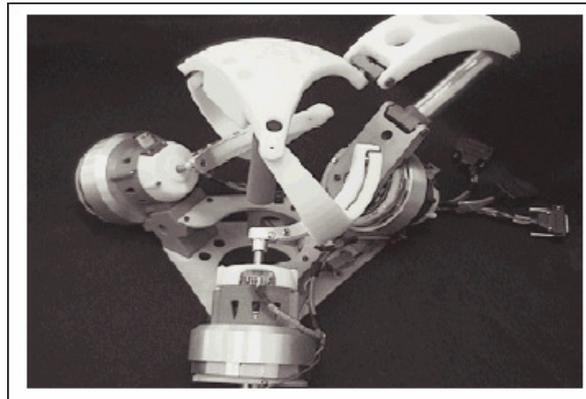


Figura 2.13 Joystick esférico de la Universidad de Laval (Canadá).

Recientemente están apareciendo numerosas aplicaciones y desarrollos de los robots paralelos. La tendencia es la aplicación en estaciones de mecanizado, aunque continúan los desarrollos en las primeras aplicaciones en simuladores de vuelo, y empiezan a aparecer más aplicaciones específicas, tales como el diseño de muñecas en brazos manipuladores, y el diseño de maestros y esclavos en aplicaciones de teleoperación.

La Cyber Air Base (C.A.B.) mostrada en la Figura 2.14, ha sido desarrollada por VIRtogo. Se usa como simulador de vuelo y para la producción de videojuegos por entidades tales como la Nasa, Universidad de Yale, SEGA. La plataforma requiere alimentación eléctrica e hidráulica para alzarse y sufrir procesos de aceleración que son automáticamente controlados desde la silla.



Figura 2.14 Cyber Air Base.

El robot F-206 Hexapod construido por Physik Instrumente, tiene como aplicación principal la micromanipulación. Es un sistema de microposicionamiento provisto de seis grados de libertad y una resolución de $0.1 \mu\text{m}$. El software utilizado es Labview (drivers y librerías), Simulation Tools Terminal Software que se comunica con el robot utilizando los puertos serie RS-232 (Figura 2.15).

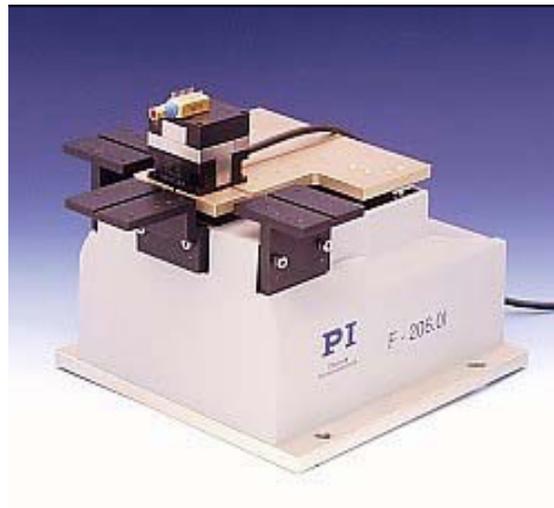


Figura 2.15 F-206 Hexapod.

AUGUST Company ha diseñado y construido un simulador de movimiento de un barco (Figura 2.16). El sistema permite al usuario simular físicamente el movimiento de cualquier nave.

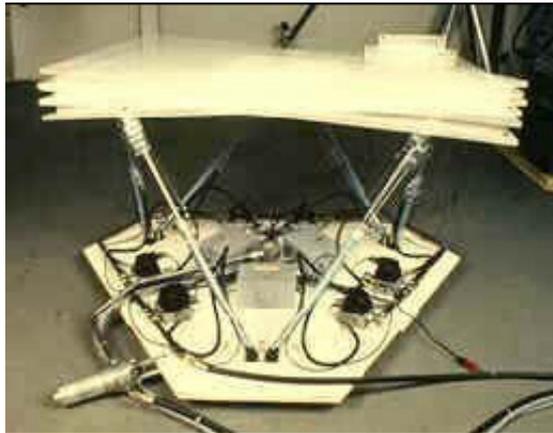


Figura 2.16 Simulador de movimiento de barcos.

La Plataforma Deltalab EX 800 (Figura 2.17), es una maqueta de seis grados de libertad con la que se puede estudiar el comportamiento de mecanismos complejos como los empleados, en aviones comerciales, simuladore de vehículos con motor, herramientas de maquinaria, montajes dinámicos de cámaras cinematográficas, robots o grandes telescopios astronómicos.

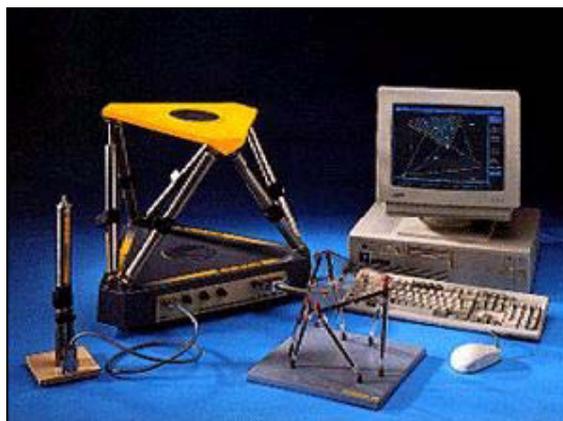


Figura 2.17 Delta Lab EX 800.

El robot F-100i de Fanuc, Figura 2.18, es un mecanismo paralelo de seis grados de libertad, de una alta precisión. La fabricación del robot de una alta rigidez se plasma en su capacidad de carga 140 Kg en dirección vertical, y 75 Kg en desplazamientos horizontales. El cuerpo compacto del robot permite instalarlo en espacios reducidos. Las aplicaciones del robot son manipulación y ensamblaje.

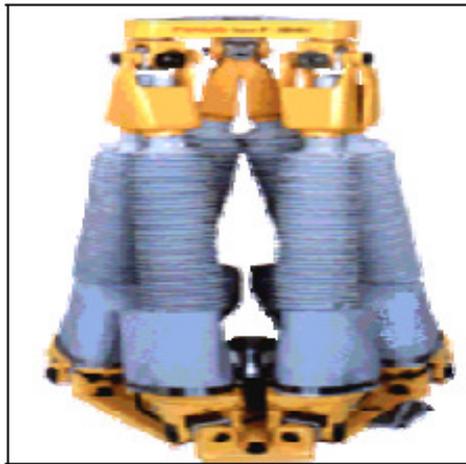


Figura 2.18 Fanuc F-100i.

El robot Hexabot de seis grados de libertad, es un robot que combinado con una máquina tradicional de mecanizado da lugar a una máquina CNC, que puede producir piezas de una alta calidad, con una fácil programación y configuración, Figura 2.19.



Figura 2.19 Hexabot.

Un prototipo basado en la plataforma Stewart y empleado en aplicaciones de tele manipulación, Figura 2.20, fue desarrollado entre Pacific Norwest National Laboratory y DARPA. Sobre el prototipo se investiga alternativas en el diseño de los robots manipuladores. Los componentes del sistema en el manipulador esclavo son todos de alimentación neumática y, unos sensores colocados en la base del maestro controlan la tele-operación. Este sistema se diseñó con la intención de proveer al operador con el mismo rango de movimientos y grados de libertad que el ser humano. El prototipo puede moverse a la velocidad de un brazo humano y cargas de 5 a 7.5 Kg.

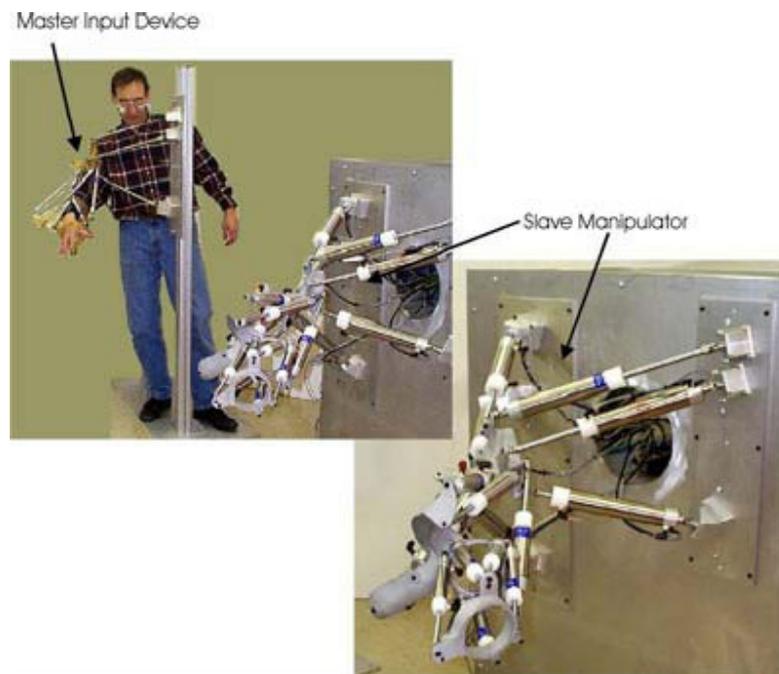


Figura 2.20 Plataforma de Stewart para Tele operación.

(Pierrot et al, 1991) propone un robot paralelo rápido de 6 GDL, el "HEXA" cuya estructura paralela esta basada en el robot DELTA, Figura 2.21. El robot construido por Tohoku University (Japón) está formado por seis cadenas cinemáticas ligeras e idénticas, compuestas por una varilla, y dos uniones esféricas. La base del robot HEXA es fija y los seis motores están colocados en ella. Cada motor maneja una cadena cinemática y actúa directamente sobre ella. Cada cadena cinemática posee tres articulaciones aunque solo una de ellas es activa, la que está unida a la base, mientras que el resto son articulaciones pasivas. Dichas cadenas proporcionan los seis grados de libertad activos que posee el robot.

Los motores seleccionados son DM1015B, de la empresa Yokogawa Precisions, tienen un par máximo de 15 N·m, y una velocidad máxima de 2.4 rps. Cada motor está equipado con un encoder óptico de alta precisión. Se usa un sensor adicional para medir el par que efectúa el extremo del robot con la superficie sobre la que actúa.

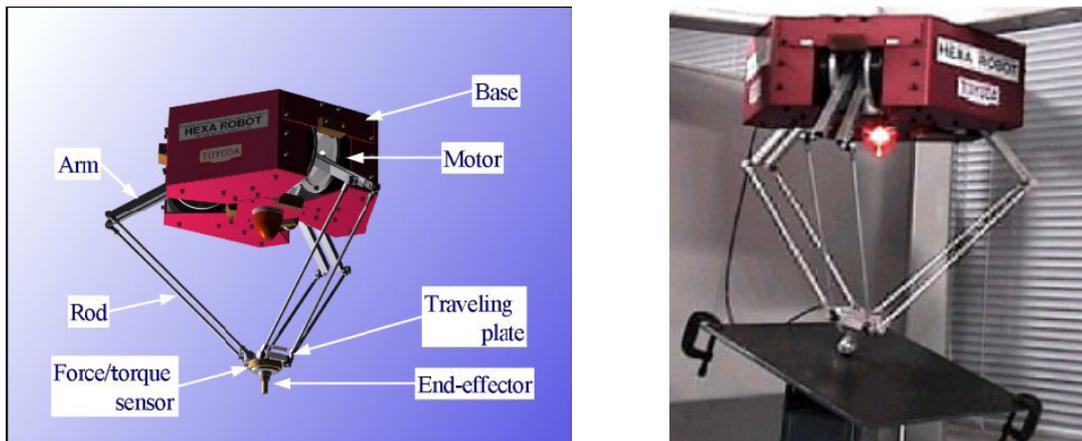


Figura 2.21 Robot HEXA.

Por último, comentar las recientes aplicaciones de los robots paralelos como robots móviles (Saltarén et al., 1999), (Aracil et al., 1999). Un ejemplo de ello, se muestra en la Figura 2.22, donde se propone el uso de la plataforma de Stewart como robot trepador, para el mantenimiento de palmeras y estructuras cilíndricas alargadas (Almonacid et al., 2003).



Figura 2.22 Robot paralelo trepador

2.1.4 El sistema roboTenis

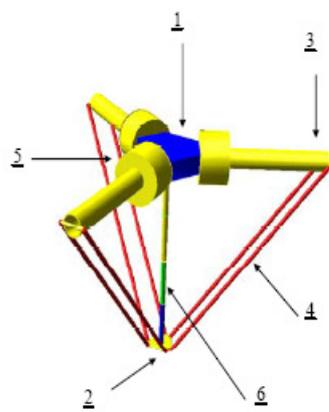
La plataforma llamada roboTenis, se construye en la Universidad Politécnica de Madrid con dos propósitos:

- i)* desarrollar una estructura abierta para la investigación en el campo del control visual de robots paralelos, y
- ii)* *ii)* evaluar el nivel de integración entre un robot paralelo de alta velocidad y un sistema de visión en aplicaciones con entornos dinámicos.

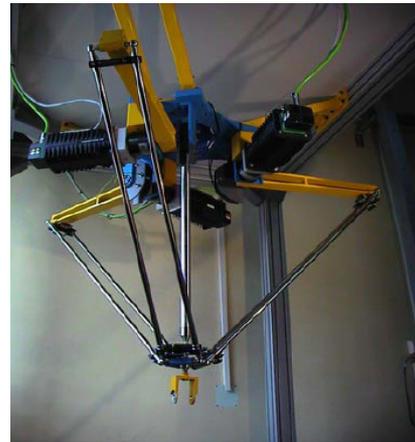
El diseño de la plataforma plantea la construcción del robot de estructura paralela, el control articular a bajo nivel, la integración del sistema de visión y el desarrollo de algoritmos de control servo-visual.

La estructura mecánica del sistema roboTenis esta inspirada en el robot DELTA (Clavel, 1988). La selección de la estructura mecánica del robot es una consecuencia de los altos requerimientos del sistema en cuanto a velocidad, aceleración y exactitud. Una fotografía del prototipo construido se muestra en la Figura 2.23. El robot esta constituido por dos plataformas (una fija (1) y una móvil (2)), y tres cadenas cinemáticas cerradas separadas por un ángulo de 120° . Cada cadena cinemática esta formada por dos eslabones (el brazo (3) y el antebrazo (4)), y cuatro articulaciones esféricas pasivas. Los motores (5) están colocados sobre la base del robot (plataforma fija) y transfieren el movimiento a la plataforma móvil mediante la combinación de movimientos de cada cadena cinemática cerrada. La posición fija de los motores, permite que la carga inercial manejada sea reducida, logrando mayores velocidades y aceleraciones en el efector final.

Cada antebrazo esta formado por un par de barras paralelas. Estas aseguran que la plataforma móvil siempre permanece paralela a la base del robot, lo que permite posicionar el efector final de acuerdo a los ejes x , y , z . Para la aplicación de jugar al tenis de mesa, la raqueta se monta sobre la plataforma móvil. La rotación de la raqueta, usa un motor fijo en la base del robot y un brazo telescópico (6) que une la plataforma fija con la plataforma móvil mediante dos uniones universales [1].



(a)



(b)

Figura 2.23:Sistema robotenis: (a) modelo de simulación en ADAMS,(b) prototipo [1]

Las longitudes de los eslabones y los radios de las plataformas del prototipo construido se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1

Dimensiones del RoboTennis	
Parámetros Geométricos	Valor Optimo
Radio del anillo fijo (R)	297.5 mm
Radio del anillo móvil (r)	63 mm
Longitud del brazo (L_a)	900 mm
Longitud del antebrazo (L_b)	540 mm

Estas dimensiones son las que se emplearán en la metodología de diseño propuesta en este proyecto.

3. ANÁLISIS CINEMÁTICO DEL ROBOT DELTA

3.1 Introducción

La cinemática estudia los movimientos que puede realizar un mecanismo sujeto por un lado, a las restricciones geométricas del mismo, y por otro, a las restricciones que imponen las articulaciones que unen los cuerpos que lo constituyen. El análisis cinemático resuelve dos problemas, el problema cinemático inverso y el problema cinemático directo. La cinemática inversa permite determinar los valores de las coordenadas articulares, a partir de una posición y orientación del efector final dada. El problema cinemático directo, permite calcular la posición y orientación del efector final dadas las coordenadas articulares.

Si bien, el análisis cinemático en el espacio de sistemas mecánicos con un elevado número de grados de libertad ya implica cierta complejidad, el hecho de que el sistema mecánico incluya cadenas cinemáticas cerradas (robots paralelos), lo acentúa mucho más. De hecho, un problema sencillo en robots serie como es la cinemática directa, es complicado en los robots paralelos y viceversa.

En este capítulo se presenta el análisis cinemático en el Sistema Delta. Este análisis permite resolver el problema cinemático inverso y el problema cinemático directo.

3.2 Modelo Geométrico

El modelo geométrico del robot se desarrolla a partir de la Figura 3.2. El sistema de referencia global Σ (X, Y, Z) está ubicado sobre el centro de la plataforma fija, con el eje z perpendicular a la misma y el eje x perpendicular al eje del motor 1. Un segundo sistema de coordenadas Σ_{eff} ($X_{eff}, Y_{eff}, Z_{eff}$) es colocado en el centro de la plataforma móvil y representa la posición operacional del robot con respecto al sistema Σ .

Dada la triple simetría del robot, cada cadena cinemática (brazo + antebrazo) puede ser tratada por separado. Las longitudes de cada brazo y antebrazo son L_a y L_b , respectivamente. Sobre cada brazo, se selecciona un sistema de coordenadas Σ_i (X_i, Y_i, Z_i) localizado a una distancia R del sistema de referencia global Σ , y rotado un ángulo θ_i ($0^\circ, 120^\circ$ y 240°).

Las articulaciones ubicadas en los sistemas Σ_i son activas y sus posiciones articulares se representan por α_i . Las articulaciones en los puntos B_i y C_i son pasivas. Los radios de las plataformas fija y móvil son R y r , respectivamente.

De la Figura 3.3, los parámetros geométricos del robot son ($i = 1,2,3$):

$$\|\Sigma \Sigma_i\| = R, \|\Sigma_{eff} B_i\| = r, \|B_i C_i\| = L_b, \|\Sigma_i C_i\| = L_a. \quad (3.1)$$

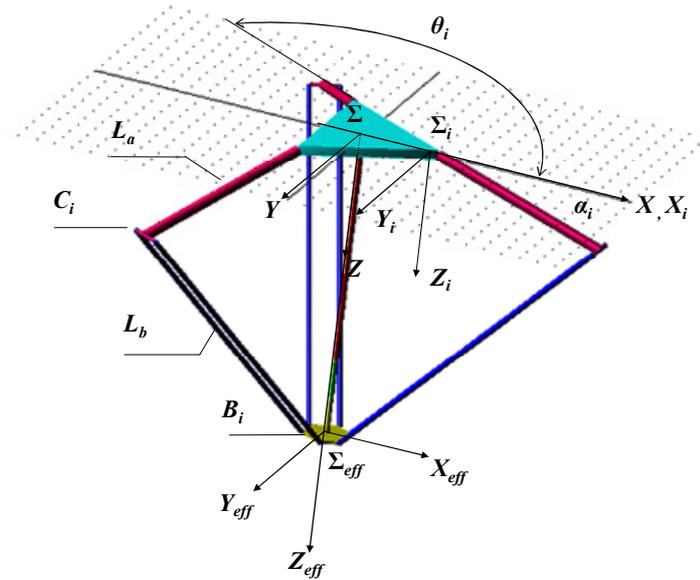


Figura 3.2 Modelo geométrico del robot.

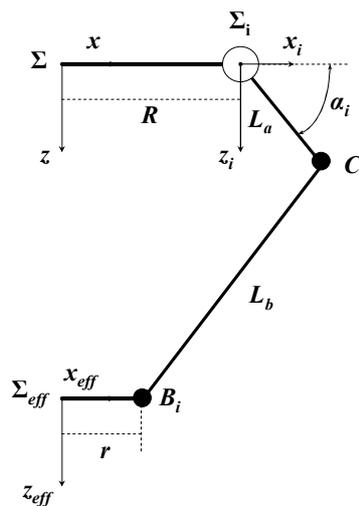


Figura 3.3 Parámetros geométricos del robot.

La ecuación cinemática para cada cadena, está dada por la relación vectorial:

$$\mathbf{B}_i \mathbf{C}_i = \mathbf{C}_{i\Sigma} - \mathbf{B}_{i\Sigma}, \quad i = 1, 2, 3, \quad (3.2)$$

donde, $\mathbf{C}_{i\Sigma}$ y $\mathbf{B}_{i\Sigma}$ representan los vectores de posición de las articulaciones esféricas no actuadas C_i y B_i , con respecto al sistema de referencia global Σ .

La ecuación (3.2) puede ser expresada en términos de los parámetros geométricos del robot (3.1) y de la posición espacial de la plataforma móvil (x, y, z) con respecto al sistema de referencia global Σ , como

$$\mathbf{B}_i \mathbf{C}_i = {}^\Sigma R_{\Sigma_i} \begin{bmatrix} L_a \cos(\alpha_i) \\ 0 \\ L_a \sin(\alpha_i) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta r \cos(\theta_i) \\ \Delta r \sin(\theta_i) \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}, \quad i = 1, 2, 3, \quad (3.3)$$

donde, $\Delta r = R - r$, y ${}^\Sigma R_{\Sigma_i}$ es la matriz de rotación entre los sistemas Σ_i y Σ .

Considerando los antebrazos como cuerpos rígidos y de longitud constante, las ecuaciones de restricción para el robot están dadas por:

$$\|\mathbf{B}_i \mathbf{C}_i\|^2 = L_b^2, \quad i = 1, 2, 3, \quad (3.4)$$

las cuales pueden ser expresadas como

$$(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2 = L_b^2, \quad i = 1, 2, 3, \quad (3.5)$$

con,

$$\begin{aligned} x_i &= (\Delta r + L_a \cos(\alpha_i)) \cos(\theta_i), \\ y_i &= (\Delta r + L_a \cos(\alpha_i)) \sin(\theta_i), \\ z_i &= L_a \sin(\alpha_i). \end{aligned} \quad (3.6)$$

3.3 Modelo Cinemático Inverso

El modelo cinemático inverso encuentra los ángulos de entrada al robot (α_i) para una posición dada del punto Σ_{eff} . El modelo usa el resultado encontrado por Clavel

(1991). En este caso, la ecuación (3.5) representa una esfera de radio L_b , centrada en B_i , la cual da el lugar geométrico de C_i . Una segunda restricción es impuesta por la trayectoria circular de C_i centrada en Σ_i y con radio L_a :

$$(x - R)^2 + z^2 = L_a^2. \quad (3.7)$$

El punto C_i se localiza sobre la intersección de la esfera (3.5) y el círculo (3.7) en el plano

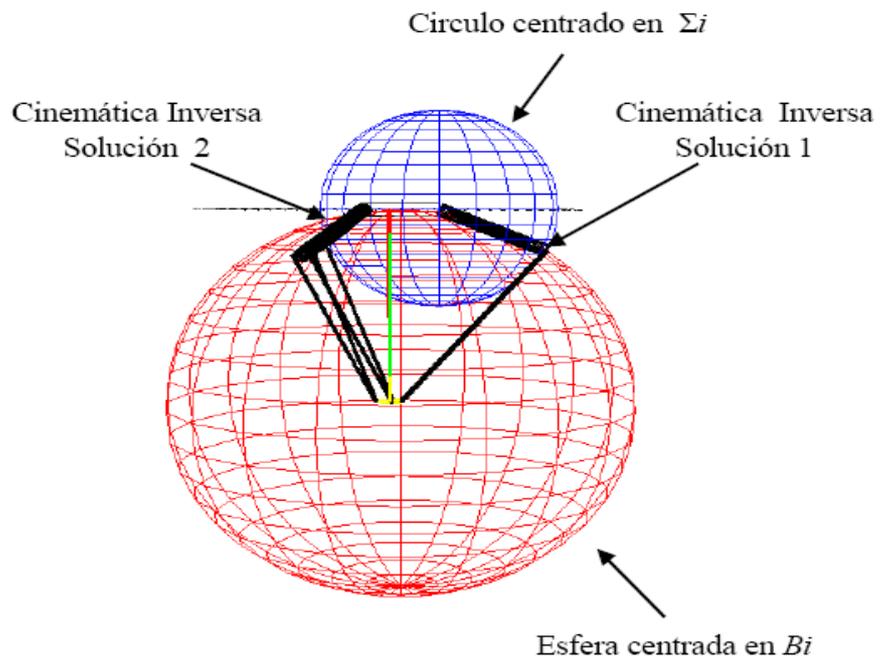
$$y = 0. \quad (3.8)$$

Las ecuaciones (3.5), (3.7) y (3.8) generan una ecuación cuadrática en x , necesaria para encontrar

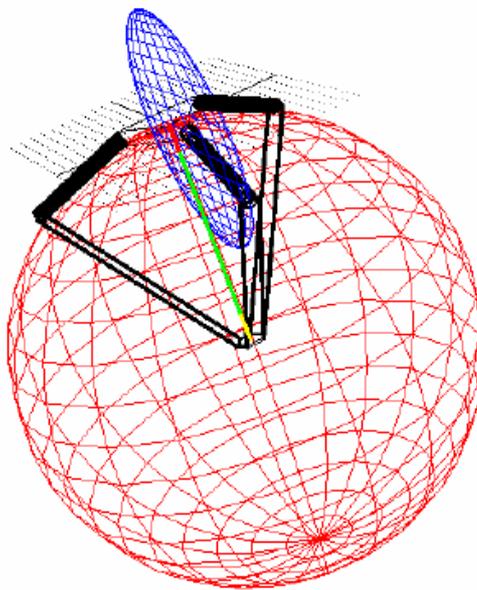
$$\alpha_i = \text{Sin}^{-1}\left(\frac{z}{L_a}\right). \quad (3.9)$$

La ecuación (3.9) define dos posibles soluciones para cada articulación. Solo una de ellas puede ser alcanzada físicamente por el manipulador, como se muestra en la figura 3.3. Este resultado permite concluir que existen ocho soluciones posibles del modelo cinemático inverso para una posición operacional dada (Figura 3.4). Con el fin de evitar singularidades y asegurar una realización práctica, la elección de cada posición articular está sujeta a las siguientes condiciones geométricas:

$$\begin{array}{ll} \text{Si} & x - R \geq 0 & \alpha_i \text{ esta dada por la ecuación (3.9),} \\ \text{y si} & x - R < 0 & \alpha_i \text{ es corregida por } \alpha_i = \pi - \alpha_{i..} \end{array}$$



(a)



(b)

Figura 3.3 Posibles soluciones del modelo cinemático inverso para la articulación $i=1$. Intersección de la esfera (3.5) centrada en B_i y del círculo (3.7) centrado en Σ_i . (a) Vista Frontal, (b) Vista isométrica.

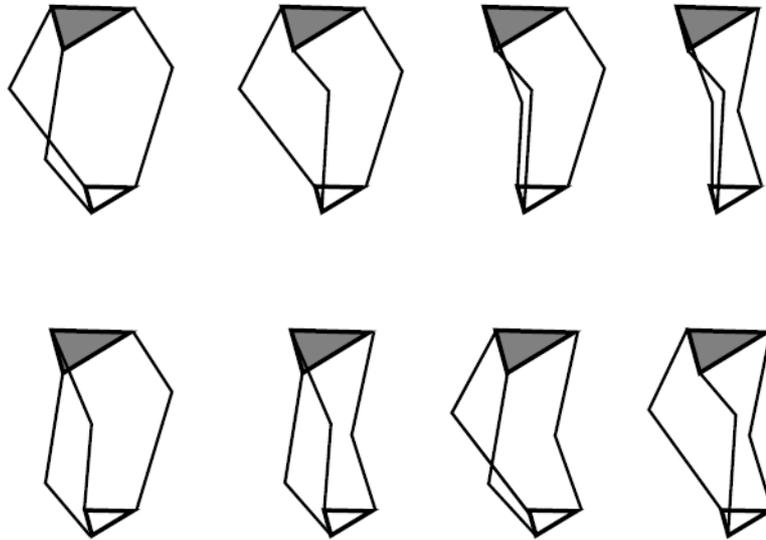
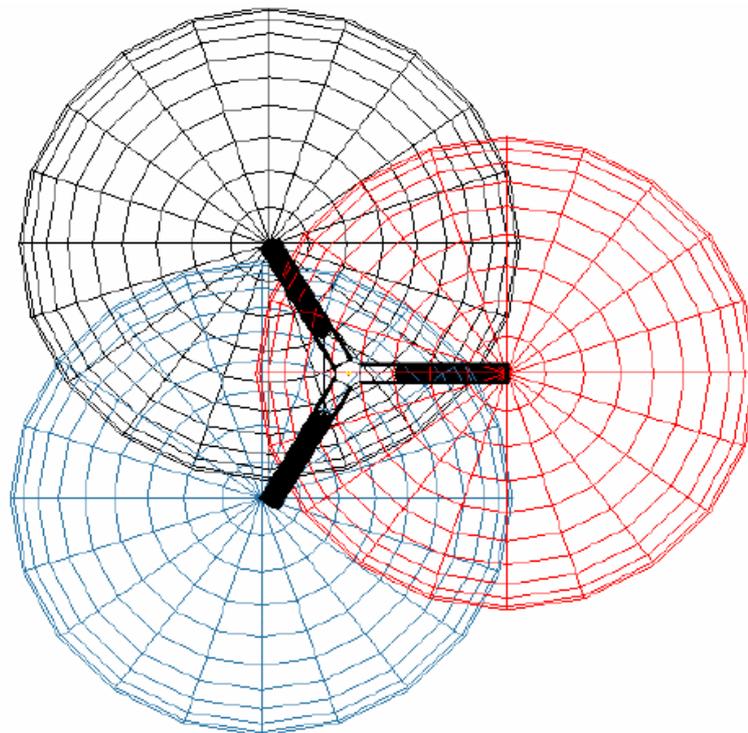


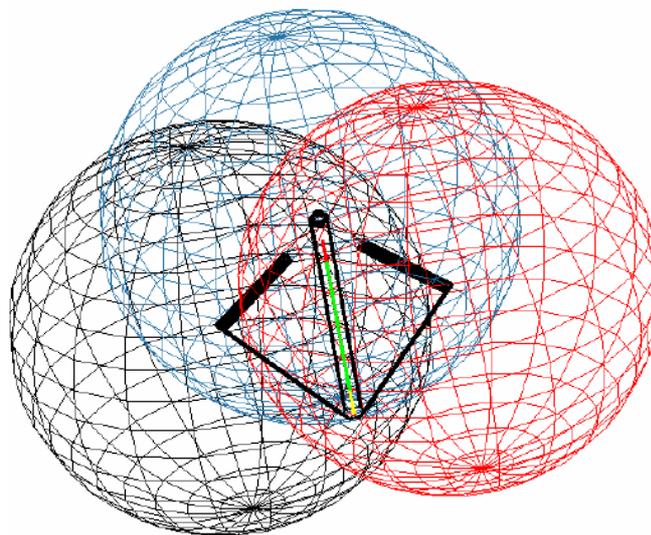
Figura 3.4 Ocho posibles soluciones del problema cinemático inverso.

3.4 Modelo Cinemático Directo

Aquí, los ángulos α_i son dados y se debe determinar la posición del punto Σ_{eff} . El centro del anillo móvil es la intersección de tres esferas (ecuación (3.5)) centradas en C_i y con radios Lb . Existen dos posibles puntos de intersección, pero solamente uno se puede alcanzar físicamente (Figura 3.5). La solución analítica del modelo cinemático directo, tiene un planteamiento similar a al empleado en la técnica de posicionamiento global, GPS.



(a)



(b)

Figura 3.5 Posibles soluciones del problema cinemático directo. Intersección de tres esferas (3.5) centradas en C_i y de radios L_b . (a) Vista superior, (b) Punto de intersección superior, (c) Punto de intersección sobre el centro del efector final.

EL PLANIFICADOR DE TRAYECTORIAS

Una vez obtenidos los modelos cinemáticos del robot se puede abordar el problema del control de movimiento. Definir el movimiento de un robot implica controlar dicho robot de manera que siga un camino preplanificado. El objetivo es por tanto establecer las trayectorias que debe seguir cada articulación del robot a lo largo del tiempo para conseguir que el efector final siga la trayectoria preplanificada, al mismo tiempo se exigen una serie de restricciones físicas impuestas por los actuadores y de calidad de la trayectoria, como son suavidad, precisión, etc.

Para un estudio más estructurado del problema de control del robot, éste suele dividirse en dos bloques:

- *Control cinemático o planificación de trayectorias.* Consiste en describir el movimiento deseado del manipulador como una secuencia de puntos en el espacio (con posición y orientación). El control cinemático interpola el camino deseado mediante una clase de funciones polinomiales y genera una secuencia de puntos a lo largo del tiempo.
- *Control dinámico o control de movimiento.* Trata de conseguir que el robot siga realmente las trayectorias marcadas por el control cinemático teniendo en cuenta las limitaciones de los actuadores y el modelo dinámico del robot. Tal y como se estudió en la capítulo 3, el modelo dinámico del robot es fuertemente no lineal, multivariable y acoplado, por lo que su control es extremadamente complejo

4.1 Planificación de trayectorias

El control cinemático establece cual es la evolución temporal de la trayectoria que debe seguir cada articulación del robot para lograr los objetivos fijados por el usuario (punto de destino, trayectoria cartesiana del efector final del robot, velocidad y aceleración, etc.). Estas trayectorias se seleccionan atendiendo a las restricciones físicas propias de los accionamientos y a ciertos criterios de calidad de trayectoria, como suavidad o precisión de la misma.

El control cinemático deberá realizar las siguientes funciones:

1. Convertir la especificación del movimiento dada en una trayectoria analítica en espacio cartesiano.
2. Muestrear la trayectoria cartesiana obteniendo un número finito de puntos de dicha trayectoria.

3. Utilizando la cinemática inversa, convertir cada uno de estos puntos en sus correspondientes coordenadas articulares.
4. Interpolación de los puntos articulares, generando para cada articulación una función continua realizable por los actuadores.
5. Muestrear la referencia articular para generar referencias al control dinámico.

4.1.1 Esquema General de Planificación de Trayectorias.

La realidad del problema de planificación de trayectorias exige tener en consideración las prestaciones reales de los actuadores, de forma que el movimiento del robot sea un movimiento suave y coordinado.

Para obtener un planificador de trayectorias los pasos a seguir son los siguientes:

1. Estudiar las necesidades de movimiento especificadas por el usuario o por los sensores propios del sistema robotizado, evitando colisiones con el entorno etc., obteniendo una expresión analítica en coordenadas cartesianas de la trayectoria deseada en función del tiempo (libre de colisiones).
2. Muestrear la trayectoria anterior en una serie finita de *puntos nudo* de control que se utilizan como puntos inicial y final de cada segmento. Cada uno de estos puntos está especificado por sus componentes cartesianas de posición y orientación $(x,y,z,\alpha,\beta,\gamma)$.
3. Pasar cada uno de estos puntos a coordenadas articulares del robot, utilizando para ello los modelos cinematicos expuestos anteriormente.
4. Realizar la interpolación entre los puntos de las coordenadas articulares y obtener para cada articulación una expresión analítica del tipo $q_i(t)$.

Se observa que un planificador consiste en obtener una función de trayectoria $q(t)$ que se modifica en cada intervalo de control. Si consideramos el planificador de trayectorias como un bloque de control, encontramos el esquema de la Figura 4.1.

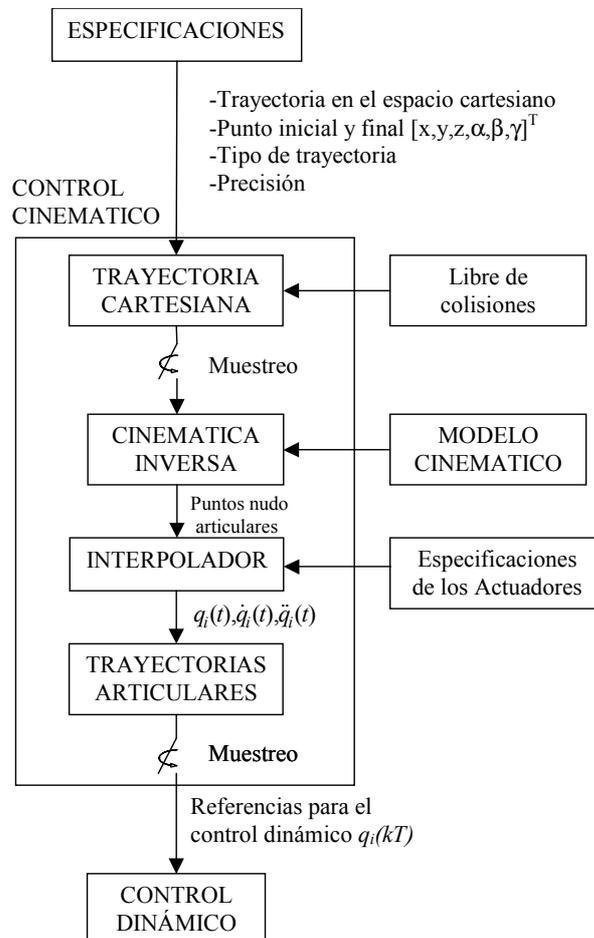


Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..1 Esquema general del control cinemática

Hay que hacer notar que el paso 3 debe tratarse con cuidado, ya que hay que tener en cuenta las posibles múltiples soluciones de la transformación inversa así como la posible existencia de configuraciones singulares que impidan la continuidad de la trayectoria deseada.

Una posible variación de este esquema es realizar el estudio de las necesidades de movimiento en el espacio de las articulaciones del robot, con la ventaja de que se está realizando sobre las variables a controlar directamente y que se evita la utilización intensiva de las transformaciones inversas, pero tiene la dificultad de que es difícil realizar un movimiento libre de colisiones al ser éstas difíciles de detectar trabajando con coordenadas articulares. Además las coordenadas articulares no distinguen entre posición y orientación.

Un ejemplo del esquema de planificación de trayectorias de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se presenta en el control cinemático de un robot de dos grados de libertad. Se trata de mover el robot en línea recta desde la posición cartesiana j^1 hasta j^4 , Figura **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..2(a)**. Para ello se añaden como puntos auxiliares j^2 y j^3 en el espacio cartesiano, Figura **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..2(b)**. Cada uno de estos puntos nudo se pasan al espacio articular (en este caso bidimensional) a través de la transformación inversa, Figura **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..2(c)**. El siguiente paso es realizar la interpolación en el espacio articular, encontrando un polinomio que cumpla con las especificaciones requeridas, Figura **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..2(d)**. La trayectoria cartesiana del robot pasará en este caso por los puntos nudo, si bien entre ellos pudiera ser que no realice una trayectoria perfectamente recta, Figura **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..2(e)**.

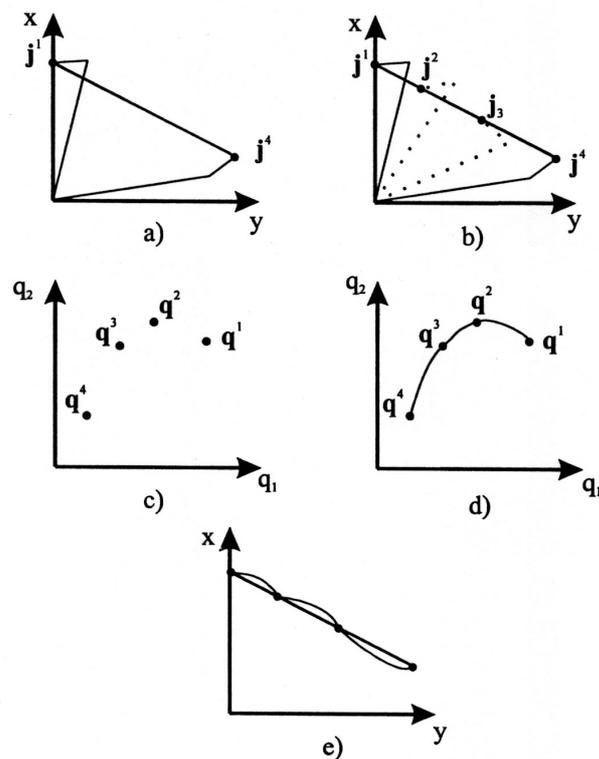


Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..2 Control cinemático de un robot de 2 gdl [Barrientos-97]. a) Posición inicial y final cartesiana. b) Puntos nudo cartesianos. c) Puntos nudo articulares. d) Trayectoria articular interpolada. e) Trayectoria cartesiana del robot.

4.1.2 Tipos de Trayectorias

Los avances tecnológicos han permitido que los robots puedan realizar trayectorias cada vez más complejas, ya que éstas pueden ser calculadas con antelación. A continuación se cita brevemente una clasificación de tipos de trayectorias de robots comerciales clásicos.

Trayectorias punto a punto

En este tipo de trayectorias cada articulación se mueve independientemente, sin considerar el efecto del resto de las articulaciones. Dentro de este tipo se engloban las trayectorias con movimiento eje a eje y las de movimiento simultáneo de ejes. En las trayectorias con movimiento eje a eje en primer lugar se actúa sobre un motor, y cuando este ha finalizado su recorrido, se activa el siguiente motor. Este tipo de movimiento tiene como única ventaja un menor consumo de potencia instantánea. En las trayectorias con movimiento simultáneo de ejes todos los actuadores comienzan simultáneamente a mover sus articulaciones a una velocidad específica para cada una de ellas. El tiempo total invertido coincidirá con el del eje que más tiempo emplee en realizar su movimiento particular.

Trayectorias coordinadas o isócronas

En este tipo de trayectorias se trata de que el movimiento de todos los actuadores sea coordinado e isócrono. Esto quiere decir que el actuador que tarda más tiempo en alcanzar la posición requerida ralentiza al resto, de manera que ningún movimiento acaba antes que el de otra articulación. El tiempo total invertido en el movimiento es el menor posible, y los requerimientos de velocidad y aceleración de los motores son menores que en otro tipo de movimiento. El inconveniente de este tipo de planificadores es que la trayectoria que describe el extremo del robot es desconocida a priori.

Trayectorias continuas

En este tipo de trayectorias se pretende que el camino seguido por el extremo del robot sea conocido. Para ello las trayectorias articulares deben acomodarse conjuntamente. Cada articulación por separado parece tener un movimiento desordenado, sin embargo el resultado es que el extremo se mueve siguiendo el camino previsto.

La Figura **¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..3** representa un ejemplo de los cuatro tipos de trayectorias indicadas, tanto en el espacio articular $q_i(t)$, como en el espacio de la tarea (x,y) , para un robot SCARA de 2 grados de libertad.

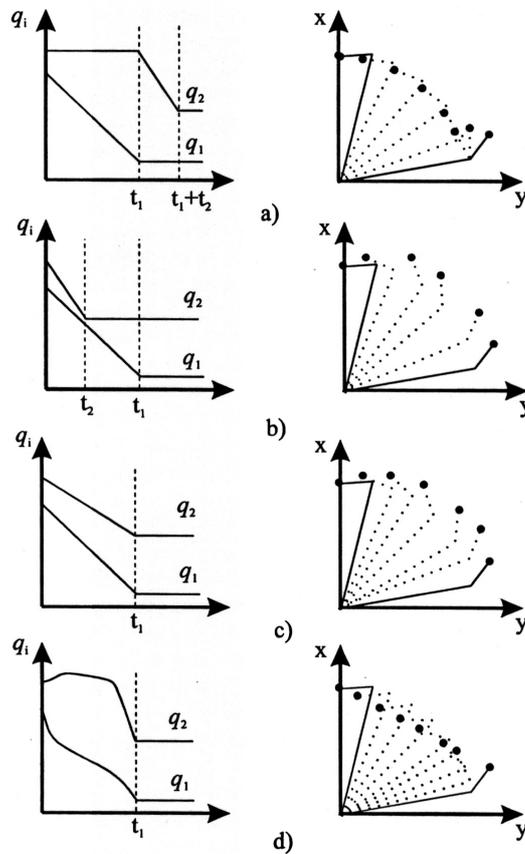


Figura 4.1.3 Tipo de trayectorias para un robot SCARA de 2 gdl. [Barrientos-97] a) Movimiento eje a eje, b) Movimiento simultáneo de ejes, c) Trayectoria coordinada, d) Trayectoria continua.

4.1.3 Interpolación de trayectorias

Se parte del supuesto de que se conoce la posición y orientación de dos puntos nudos en coordenadas cartesianas $[x, y, z, \alpha, \beta, \gamma]^T$. Se quiere que el robot evolucione desde el punto inicial al punto final en un tiempo conocido. Asimismo se tienen una serie de especificaciones máximas en los motores de las articulaciones. De acuerdo con el esquema general, el paso siguiente es obtener las coordenadas articulares de los puntos inicial y final.

Este primer paso se resuelve con la solución de la cinemática inversa. En el caso de los robots paralelos el cálculo de la cinemática inversa proporciona una única solución, por tanto sólo debe tenerse en cuenta la posible existencia de singularidades en alguna de las configuraciones del robot.

En segundo lugar, debe hallarse un polinomio interpolador entre los dos puntos nudos que cumpla con las especificaciones de los actuadores y que proporcione un movimiento suave al robot. Como se ha visto anteriormente, este punto puede ser abordado bajo varios enfoques y diferentes tipos de trayectorias. Cada enfoque produce un resultado distinto pero igualmente válido dependiendo de los requerimientos del usuario. Se puede pretender que el robot siga una determinada trayectoria en línea recta o mover el robot a lo largo de una trayectoria polinomial uniforme que satisface las ligaduras de posición y orientación en ambos puntos extremos.

En [Fu-89],[Barrientos-97] y [Saltarén-00] se encuentran varios ejemplos con distintos enfoques en los que se utilizan desde simples interpoladores lineales hasta series de polinomios encadenados que satisfacen todas las restricciones de la trayectoria. A continuación se revisarán los tipos de interpoladores de trayectorias más comunes y en apéndice A, se analizará con detalle el interpolador 4-3-4.

Trayectorias de articulación interpolada

Existen diferentes formas de dividir la trayectoria de la articulación, y cada método posee propiedades diferentes. El objetivo es unir puntos de la trayectoria con funciones continuas, derivables dos veces y computacionalmente manejables. Los métodos más comunes son los siguientes:

Trayectoria 4-3-4

La trayectoria de cada articulación se divide en tres segmentos: el primer segmento es un polinomio de cuarto grado que especifica la trayectoria desde la posición inicial hasta la posición de despegue (velocidad máxima). El segundo segmento de trayectoria es un polinomio de tercer grado que especifica la trayectoria desde la posición de despegue hasta la posición de asentamiento (deceleración máxima). El último segmento de trayectoria es un polinomio de cuarto grado que especifica la trayectoria desde la posición de asentamiento hasta la posición final.

Trayectoria 3-5-3

Lo mismo que en el caso anterior pero utilizando un polinomio de tercer grado para el primer segmento, uno de quinto grado para el segundo segmento y uno de tercer grado para el tercer segmento.

Trayectoria de 5 splines cúbicas

Cada articulación se divide en cinco segmentos de trayectoria y se utilizan funciones "spline" cúbicas de polinomios de tercer grado para cada segmento. Estas funciones preservan la continuidad en la primera y segunda derivada en los puntos de interpolación.

4.1.4. Polinomio 6-1-6

Las ecuaciones de este perfil son las siguientes:

$$Pos_{tramo1} = C_{10} + C_{11} \cdot t + C_{12} \cdot t^2 + C_{13} \cdot t^3 + C_{14} \cdot t^4 + C_{15} \cdot t^5 + C_{16} \cdot t^6$$

$$Pos_{tramo2} = C_{20} + C_{21} \cdot t$$

$$Pos_{tramo3} = C_{30} + C_{31} \cdot t + C_{32} \cdot t^2 + C_{33} \cdot t^3 + C_{34} \cdot t^4 + C_{35} \cdot t^5 + C_{36} \cdot t^6$$

Siendo los coeficientes los siguientes, tras la imposición de continuidad de posición, velocidad, aceleración y jerk, y restricción mediante una velocidad máxima:

$C_{10} = q_0$ $C_{11} = 0$ $C_{12} = 0$ $C_{13} = 0$ $C_{14} = \frac{5}{2 \cdot T_{acel}^3} * v_{max}$ $C_{15} = \frac{-3}{T_{acel}^4} * v_{max}$ $C_{16} = \frac{1}{T_{acel}^5} * v_{max}$	$C_{20} = q_0 + (T_{acel}/2) * v_{max}$ $C_{21} = v_{max}$	$C_{30} = (-3/2 * T_{acel} + T_{total}) * v_{max} + q_0$ $C_{31} = v_{max}$ $C_{32} = 0$ $C_{33} = 0$ $C_{34} = \frac{-5}{2 \cdot T_{acel}^3} * v_{max}$ $C_{35} = \frac{3}{T_{acel}^4} * v_{max}$ $C_{36} = \frac{-1}{T_{acel}^5} * v_{max}$
--	---	---

Tabla 2: Coeficientes 6-1-6

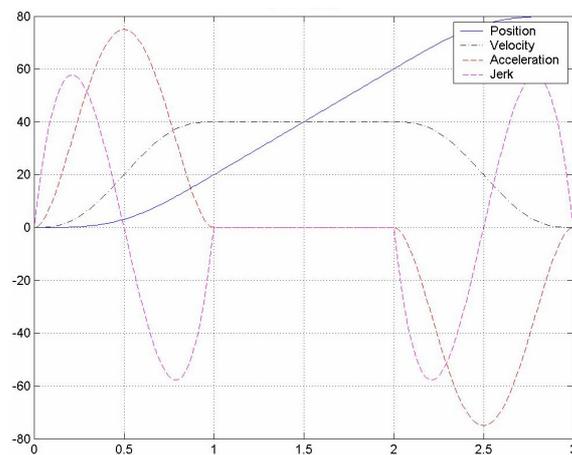


Figura 4.4 Grafica del polinomio 6-1-6

La función polinomial que crea la mejor trayectoria de puntos en cuanto a suavidad en relación a calculo computacional es el polinomio 616 adicionalmente que tiene en cuenta el jerk.

5. METODOLOGIA GENERAL DE DISEÑO DEL ROBOT DELTA

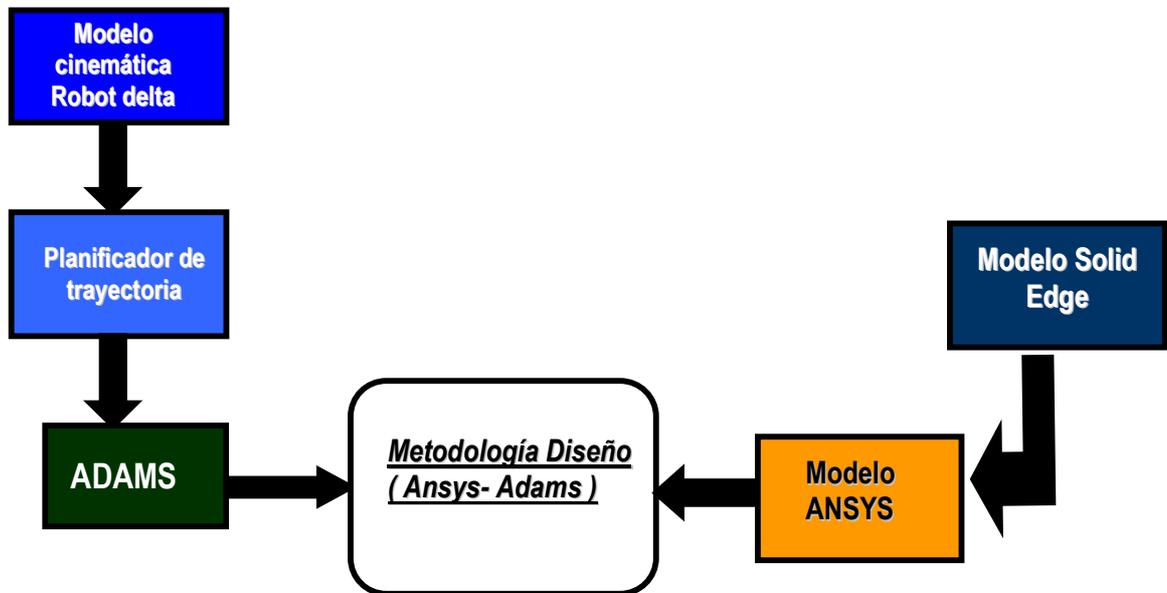


Diagrama 1: Metodología general propuesta

1. Se desarrolla el modelo cinemático del robot delta el cual me permitirá hallar los ángulos de los motores para cualquier posición en el plano cartesiano.
2. El planificador de trayectoria se desarrolla con la intención de poder hallar cualquier trayectoria en el robot, con una calidad de trayectoria suave y coordinada.
3. ADAMS me permite simular la trayectoria hallada en el planificador y el modelo cinemático y poderla interpretar en el análisis dinámico.
4. SOLID EDGE me permite hallar el modelo del robot delta en detalle identificando posibles interferencias y el espacio ocupado por el robot.
5. ANSYS me permite hacer el análisis dinámico de mi sistema con el modelo final de SOLID EDGE y la respuesta del análisis dinámico.

6. MODELOS DEL ROBOT

CAD (Diseño asistido por ordenador)

- Diseño asistido por ordenador CAD es el uso de la tecnología de computadoras para ayudar en el diseño y especialmente la redacción (dibujo técnico) de una parte o producto, incluidos edificios enteros.

CAE (Ingeniería asistida por computadora)

- Conjunto de programas informáticos que permiten analizar y simular los diseños de ingeniería realizados con el ordenador, o creados de otro modo e introducidos en el ordenador, para valorar sus características, propiedades, viabilidad y rentabilidad. Su finalidad es optimizar su desarrollo y consecuentes costos de fabricación y reducir al máximo las pruebas para la obtención del producto deseado.

CAM (Asistida por ordenador de fabricación)

- Es el uso de ordenador basado en herramientas de software que ayudan a los ingenieros y los maquinistas en la fabricación de prototipos de productos o componentes. CAM es una herramienta de programación que le permite la fabricación de modelos físicos utilizando el diseño asistido por ordenador (CAD) de programas. CAM crea en vida real las versiones de componentes diseñados dentro de un paquete de software.

En la metodología para el diseño de un robot industrial tipo delta se trabajara con un programa CAD que será SOLID EDGE y dos CAE los cuales son ANSYS Y ADAMS, aparte de los programas en lenguaje C.

6.1. MODELO SOLID EDGE

En esta sección se mostrara alguna de las piezas que fueron desarrolladas en SOLID EDGE las cuales sirvieron para determinar el espacio de trabajo ocupado por las piezas, así como la posible interferencia entre ellas, utilizando las longitudes de los eslabones y los radios de las plataformas del sistema robotenis (tabla 1).

6.1.1. Piezas

Para la construcción de estas piezas se usaron las herramientas que contiene SOLID EDGE las cuales son protrusiones, vaciados, agujeros, redondeo, bocetos, protrusion por revolución, cotas, etc.

- En la figura se puede observar algunas piezas claves en la construcción del robot delta a través de SOLID EDGE.

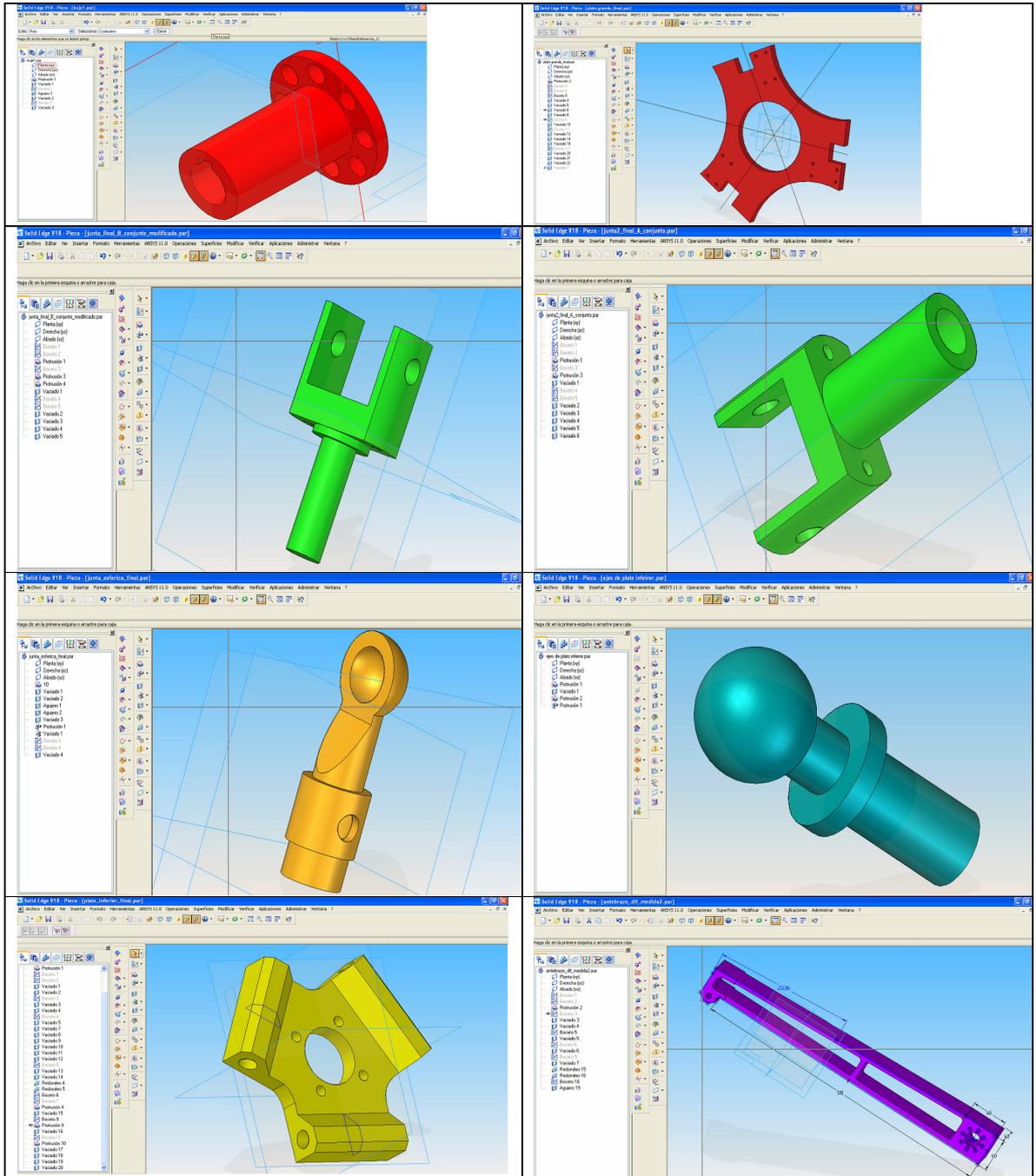


Figura 6.1: Piezas en SOLID EDGE

6.1.2. Subconjuntos

Los subconjuntos son uniones de piezas ya terminadas las cuales facilitan el trabajo del ensamble final. Los subconjuntos se generan uniendo las piezas ya terminadas con relaciones entre ellas como coincidir, alineación plana, insertar, alinear ejes, tangente, etc.

- Específicamente en la construcción del robot delta se observa que los brazos y antebrazos se repiten 3 veces. Con el ensamble de un solo antebrazo y un solo brazo como se ve en la figura 4.9 y 4.10 se puede llamar 2 veces mas los subconjuntos del antebrazo y brazo, evitando la perdida de tiempo en la construcción repetida de estos.

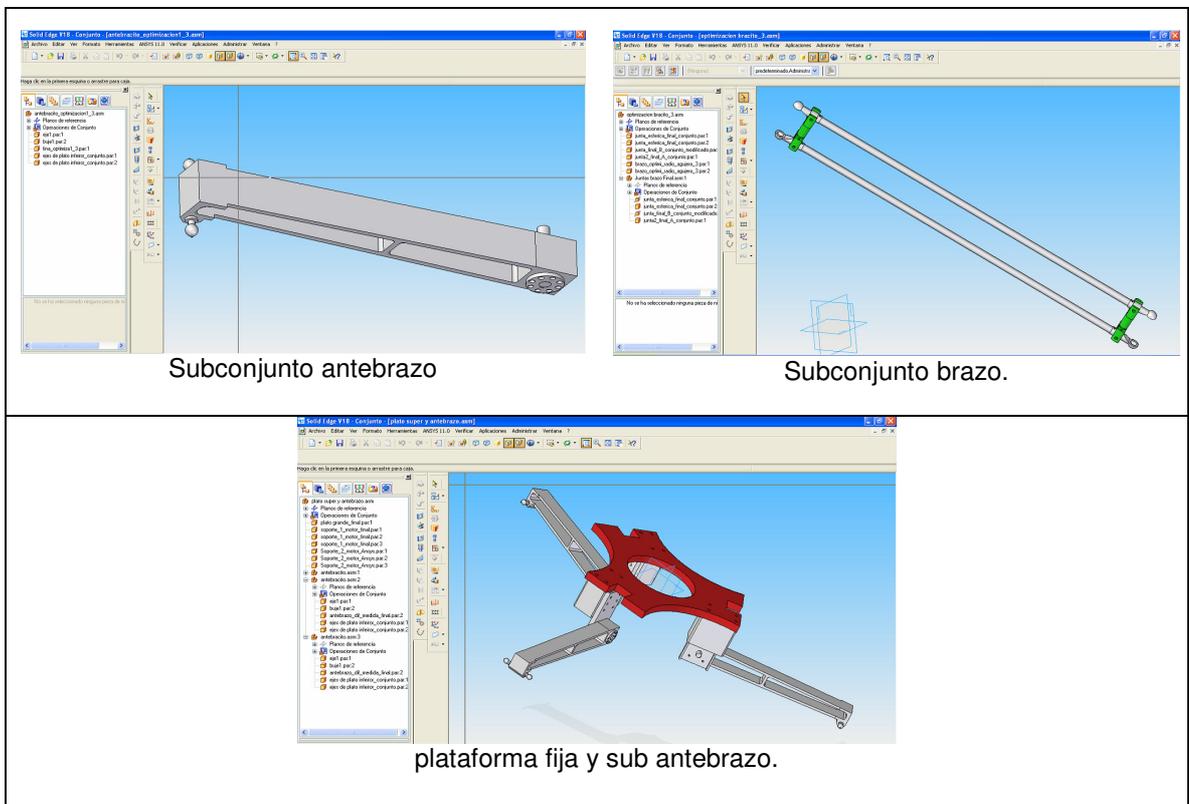


Figura 6.2: Subconjuntos en SOLID EDGE.

6.1.3. Ensamble final

- El ensamble final es un ensamble entre subconjuntos el cual permite organizar y facilitar la tarea del ensamble total, Este tipo de ensamble usa las mismas relaciones de ensamble que los subconjuntos. como: coincidir, alineación plana, insertar, alinear ejes, tangente, etc.

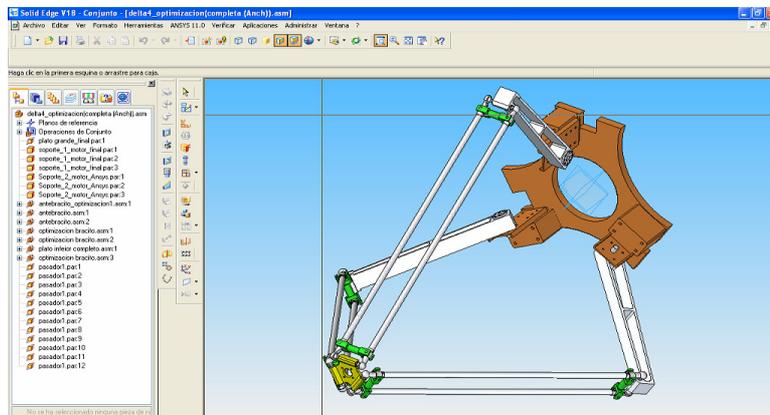


Figura 6.3 Ensamble final del robot delta

6.2. MODELO ANSYS

El modelo en ANSYS fue desarrollado en ANSYS 11 debido a sus características especiales ideales para el análisis de estructuras móviles como robots. Es importante tener en cuenta que para cargar en ANSYS los modelos de SOLID EDGE, es necesario que SOLID EDGE sea instalado primero que ANSYS.

6.2.1. Generalidades modelo ANSYS

- En el inicio del programa se selecciona Simulación que es la plataforma que se va a trabajar en ANSYS 11.

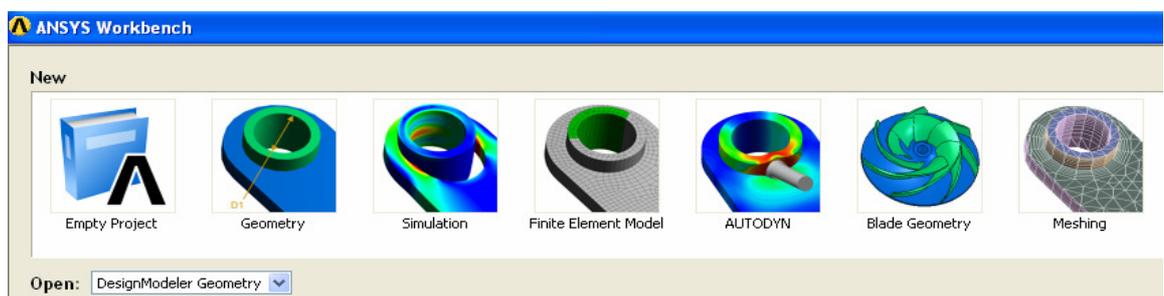


Figura 6.4 Inicio ANSYS 11.

- Las principales 4 áreas del modelo de ANSYS son la Geometría, el sistema coordinado, las conexiones y el enmallado.

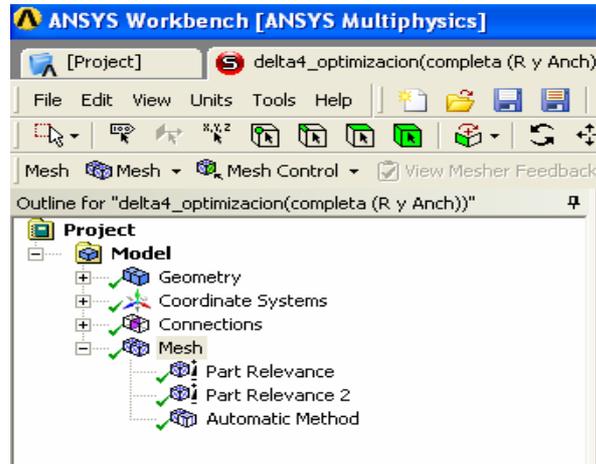


Figura 6.5. Areas del modelo de ANSYS.

6.2.2. Geometría ANSYS

- Primero se carga la geometría la cual fue diseñada en SOLID EDGE, para cargar todo el robot delta se debe cargar el ensamble final (.asm). A continuación en la figura 6.6 los pasos para cargarla.

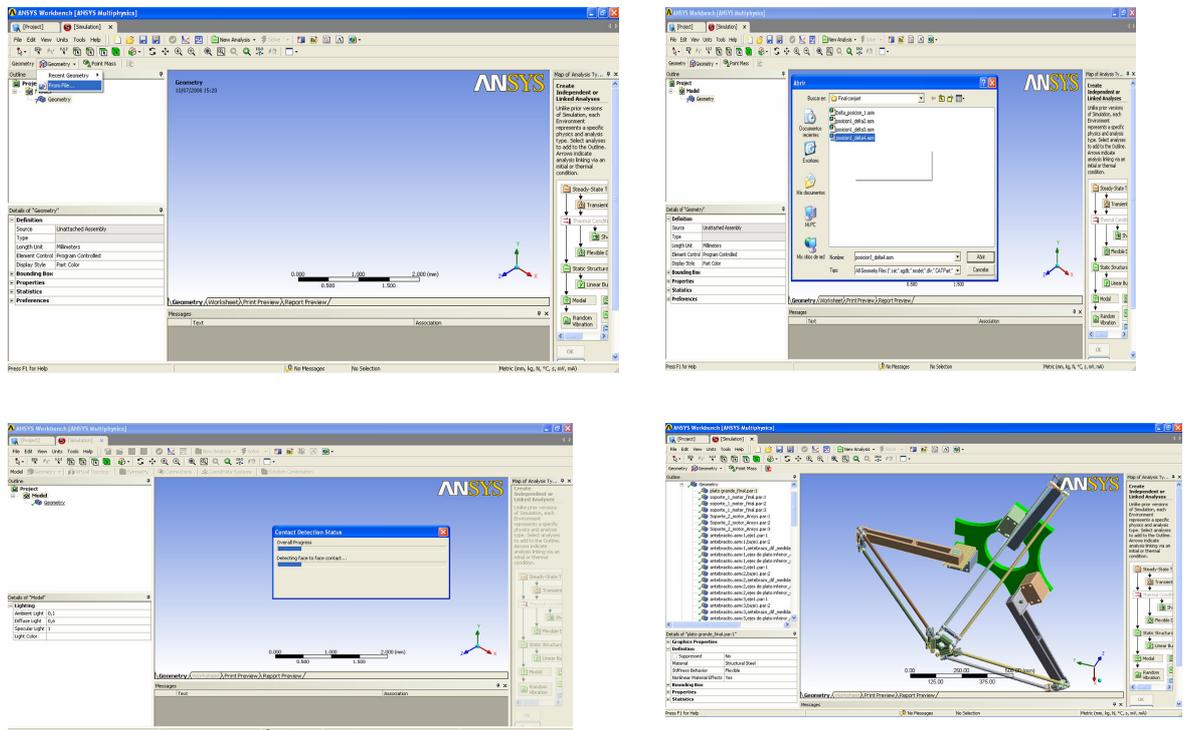
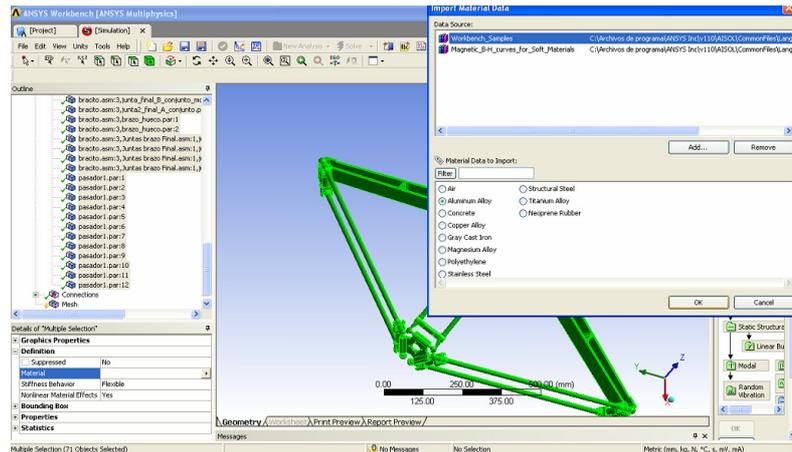
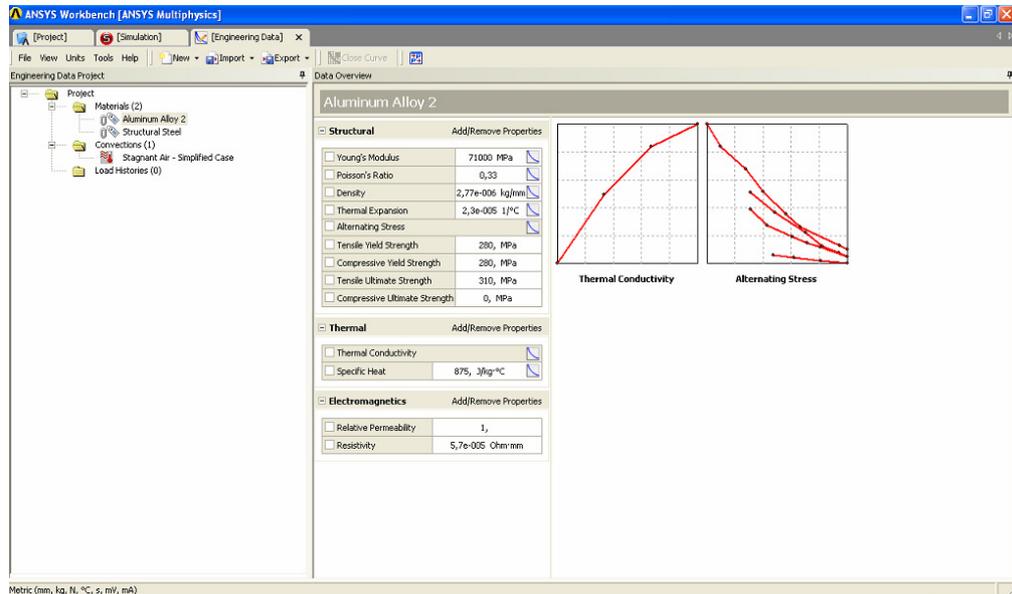


Figura 6.6: Pasos para cargar el modelo en ANSYS

- El material debe ser elegido correctamente según sea la estructura y se recomienda referirse a páginas especializadas en Internet en materiales para comprobar las características de los materiales utilizados.



(a)



(b)

Figura 6.7 Características del material seleccionado (a) y (b), en este caso aluminio.

6.2.3. Conexiones ANSYS

ANSYS 11 es un Software actualizado el cual incluye características especiales ideales para estructuras móviles, es por esto que ANSYS 11 cuenta con conexiones especializadas como esféricas, cilíndricas, por revolución, universales, planar, etc.

Las condiciones de limitación para los contactos son estas:

- **Bonded:** se asume como si estuviera pegado o soldado.
- **No Separation:** es similar a bonded, la separación de las caras (vacíos) no se permiten pero si permite una pequeña cantidad de deslizamiento entre caras.
- **Frictionless:** se puede formar vacíos, se considera el coeficiente de fricción igual a cero, es no lineal.
- **Rough :** se puede formar vacíos, se considera el coeficiente de fricción es infinito, es no lineal.
- **Frictional :** se puede formar vacíos, se puede variar el coeficiente de, es no lineal.

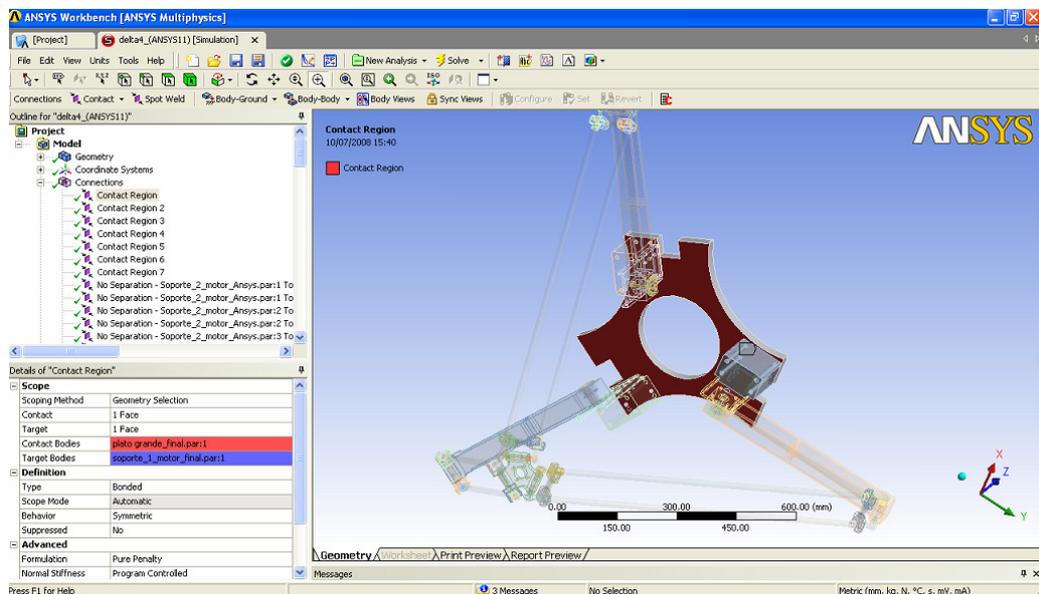


Figura 6.8 Contacto bonded.

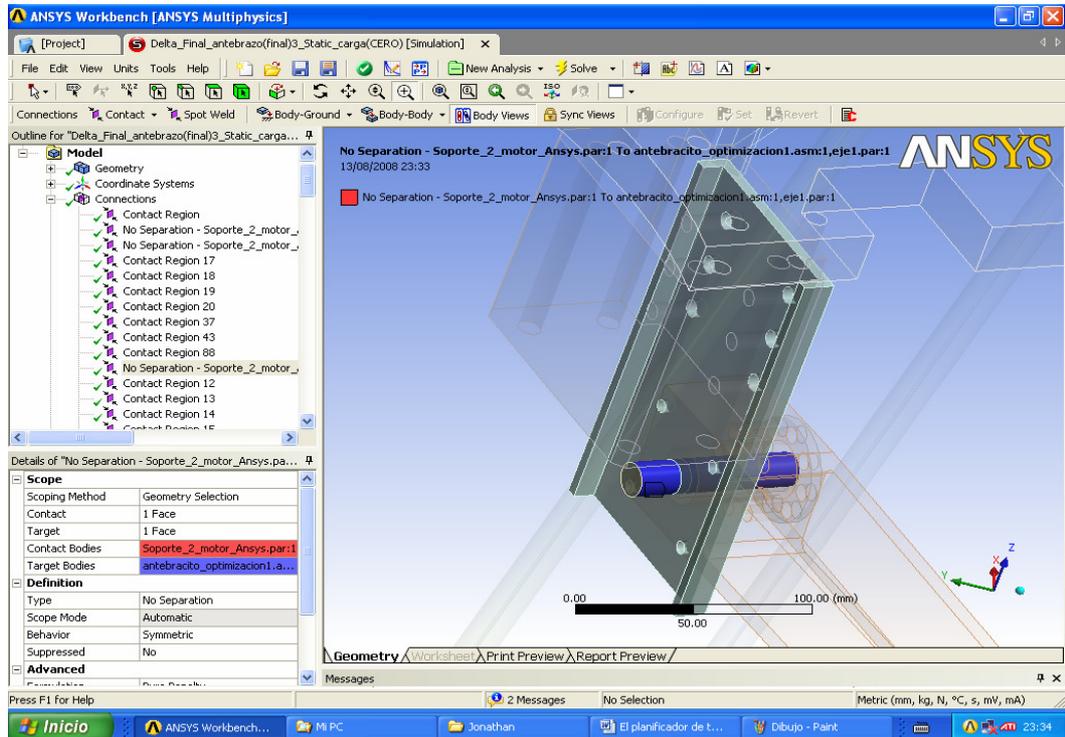


Figura 6.9 contacto No separation.

6.2.4. Enmallado ANSYS

El tipo de enmallado en ANSYS define la cantidad de nodos que se presentan en el enmallado, a su vez la cantidad de nodos representa la exactitud en la respuesta, entre mas nodos tenga un análisis mas exacto será al comportamiento real.

- El enmallado part relevance permite elevar la relevancia de unas piezas específicas para obtener una respuesta más exacta en las piezas críticas del análisis, sin necesidad de incrementar la relevancia a todo el análisis.

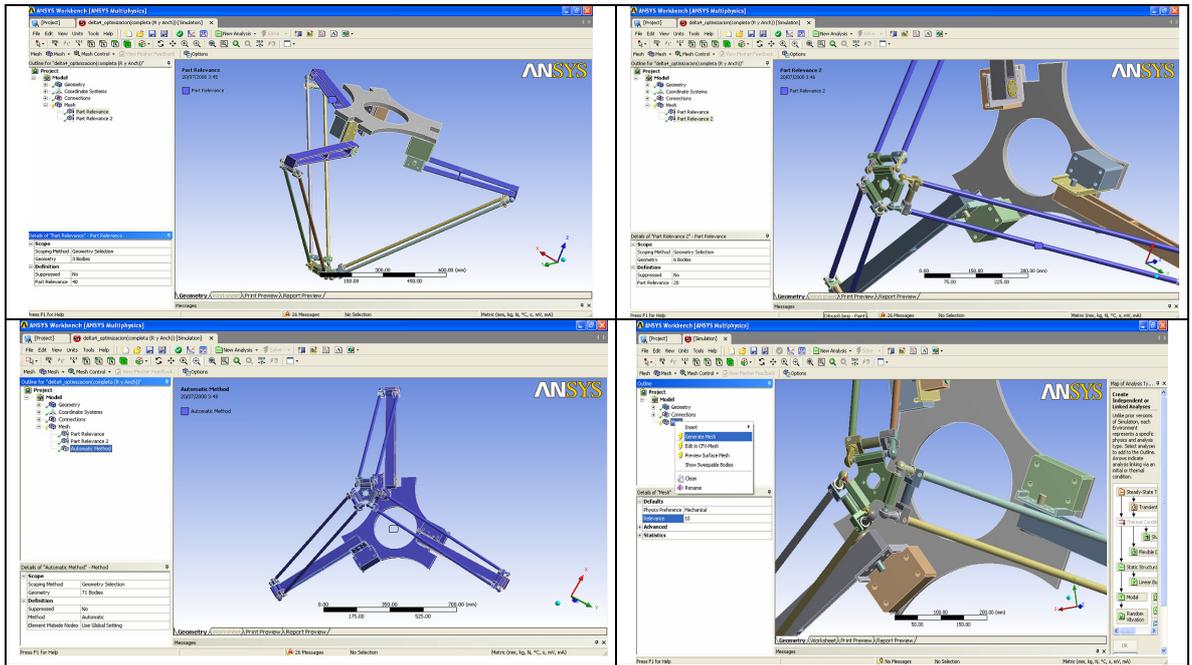


Figura 6.10 algunos tipos de enmallado

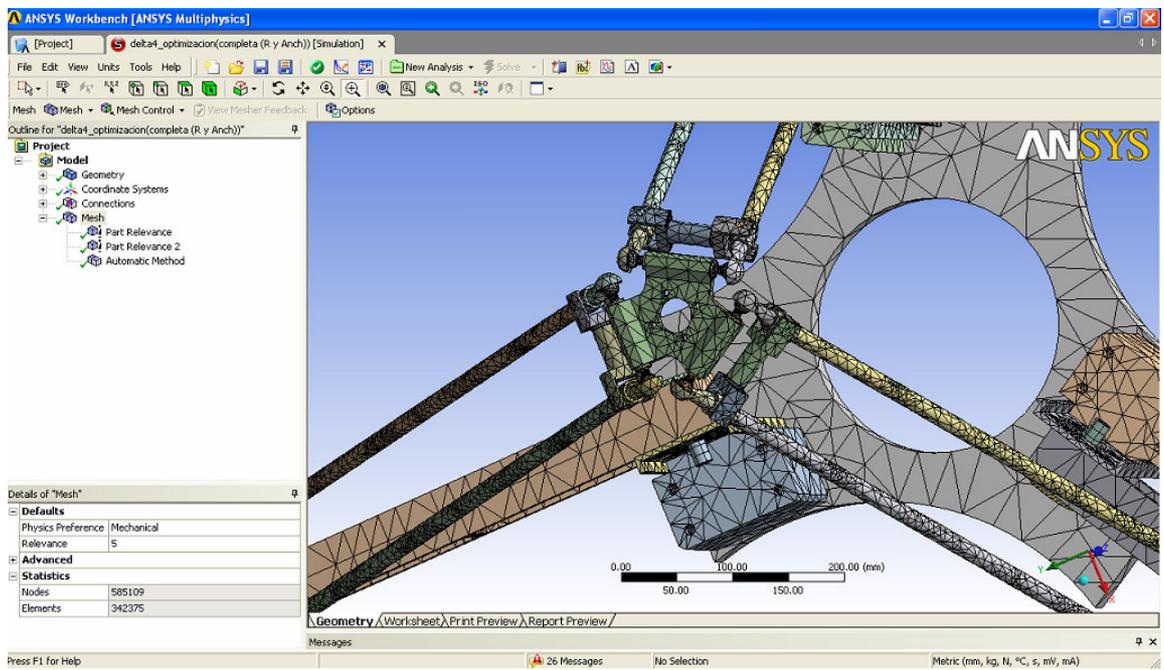


Figura 6.11 Malla finalizada.

6.3. MODELO DE SIMULACIÓN EN ADAMS

El modelo de ADAMS se realizó debido a que este software es especializado en el análisis de movimientos en mecanismos, tiene herramientas especializadas las cuales me permiten analizar torques, desplazamiento transnacional, velocidad translacional, velocidad angular, aceleración angular, fuerzas, etc.

En esta sección se mostrará el procedimiento a seguir para implementar un ambiente dinámico utilizando de lenguaje ADAMS. Además, se muestran los pasos a seguir para cargar el modelo de simulación del robot delta desarrollado con anterioridad por el Ing. Luís Ángel Silva.

- De la figura 6.12 a la 6.17 se muestra los pasos de como cargar el Robot delta en ADAMS.

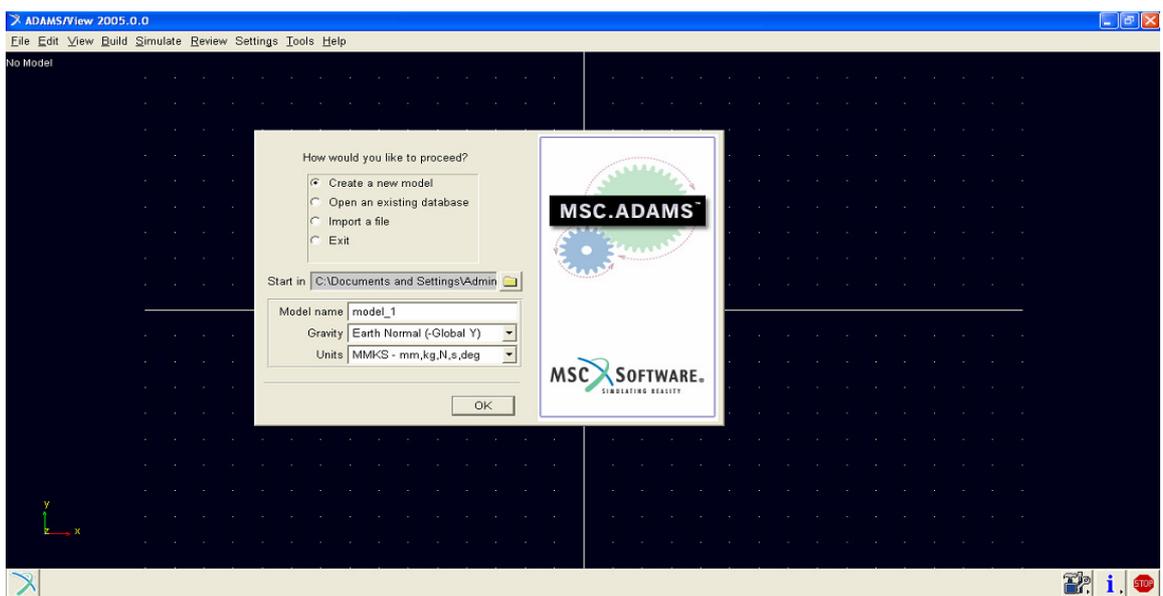


Figura 6.12 Se selecciona creación de un nuevo modelo.

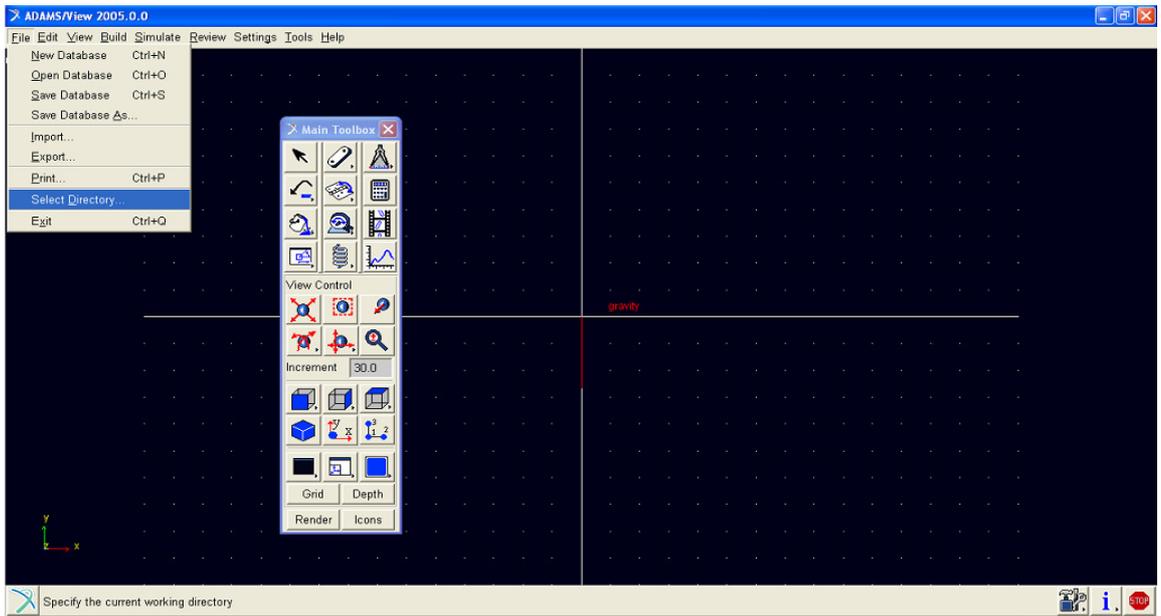


Figura 6.13 Se selecciona el directorio

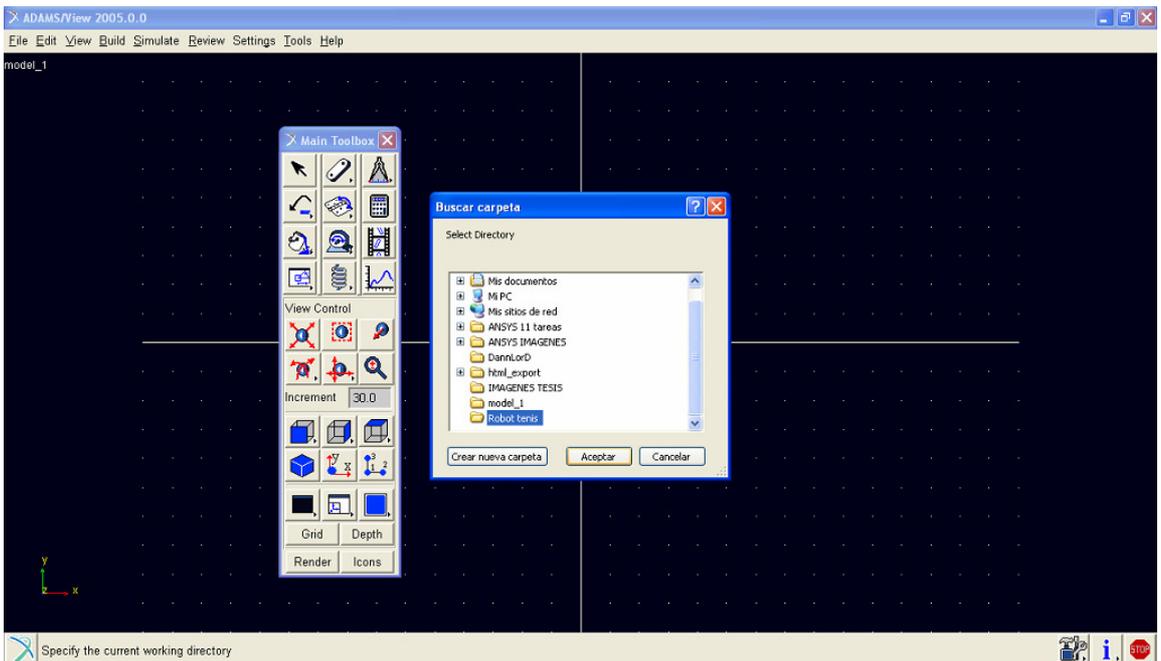


Figura 6.14 El directorio es la carpeta que contiene todo la programación

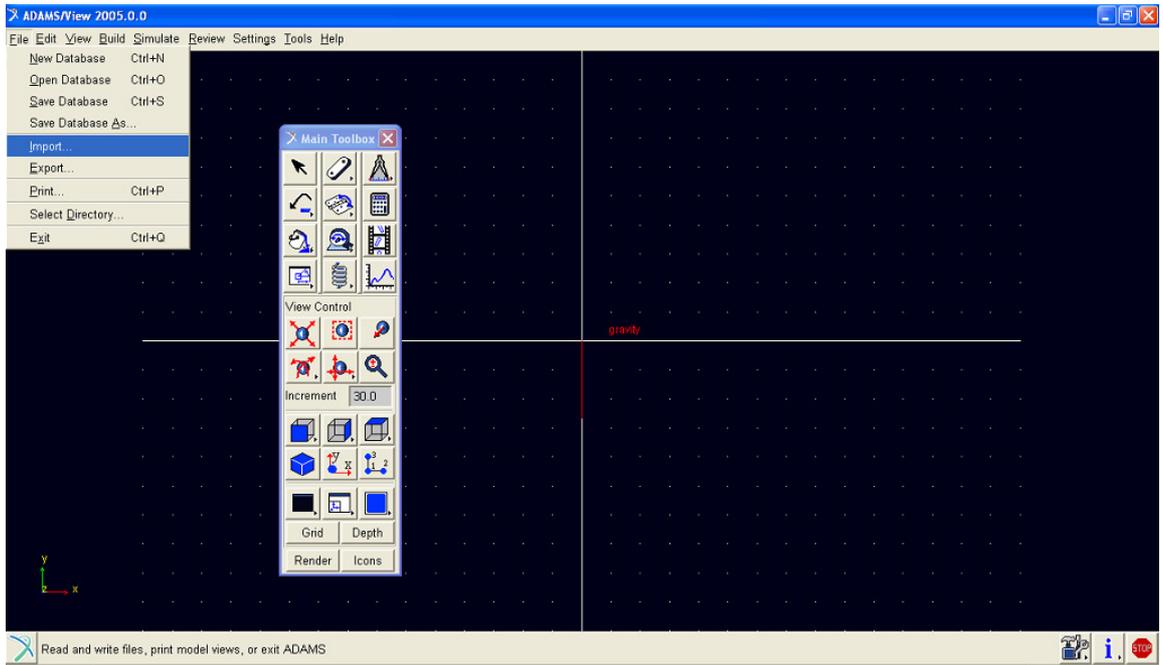


Figura 6.15, Se importa el modelo desarrollado en ADAMS.

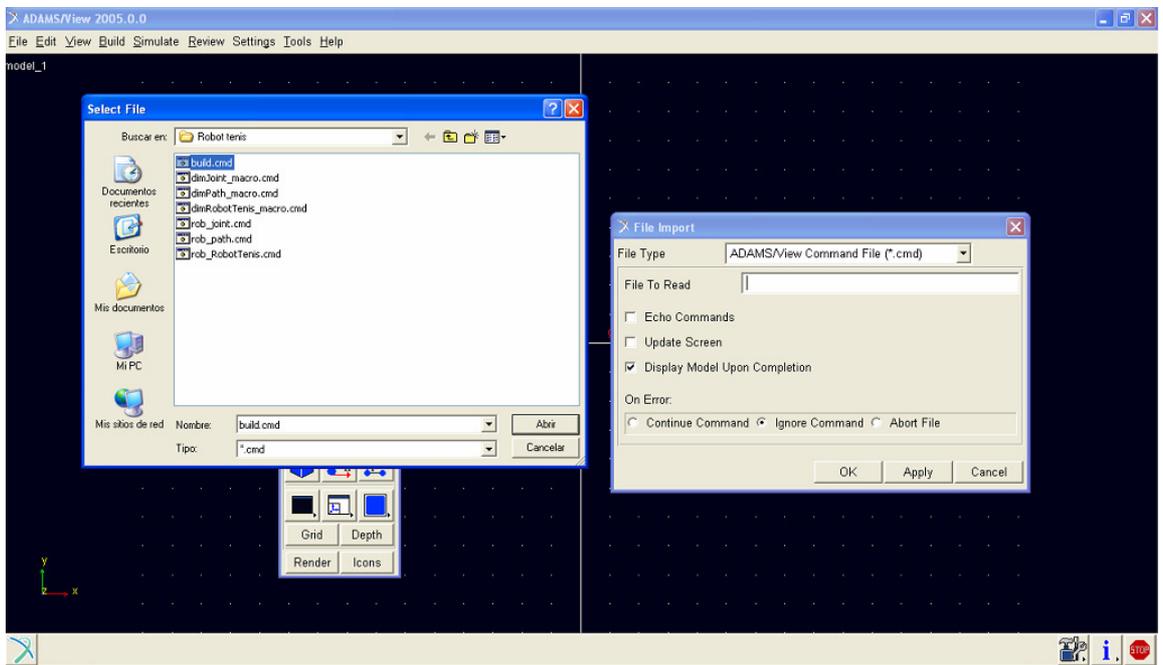


Figura 6.16, El modelo se llama build.cmd que se encuentra en el directorio.

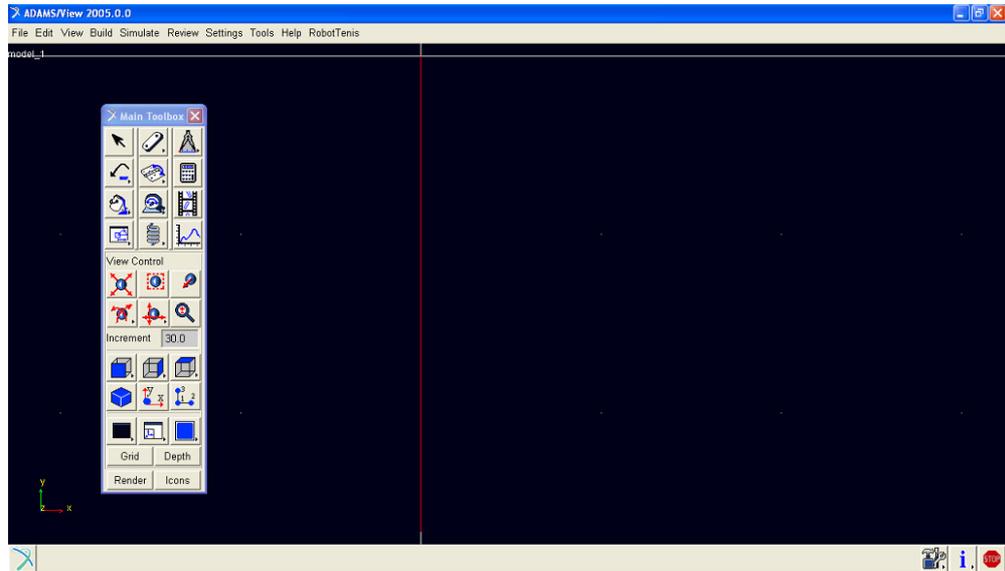


Figura 6.17, Compruebe que en la parte superior al lado de Help debe salir el nombre del directorio robotenis.

- Una vez halla sido cargado el programa correctamente se proseguirá dar las longitudes de los eslabones y los radios de las plataformas que serán las del sistema robotenis que se presentan en la tabla 1.

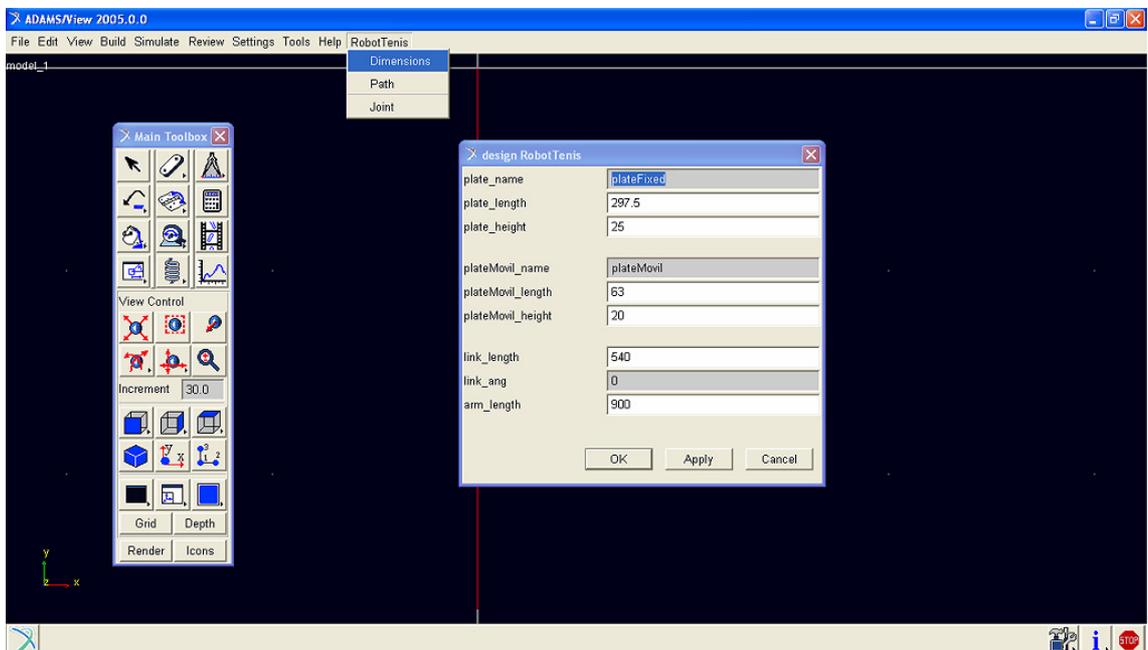


Figura 6.18, Selección de dimensiones del robot Delta.

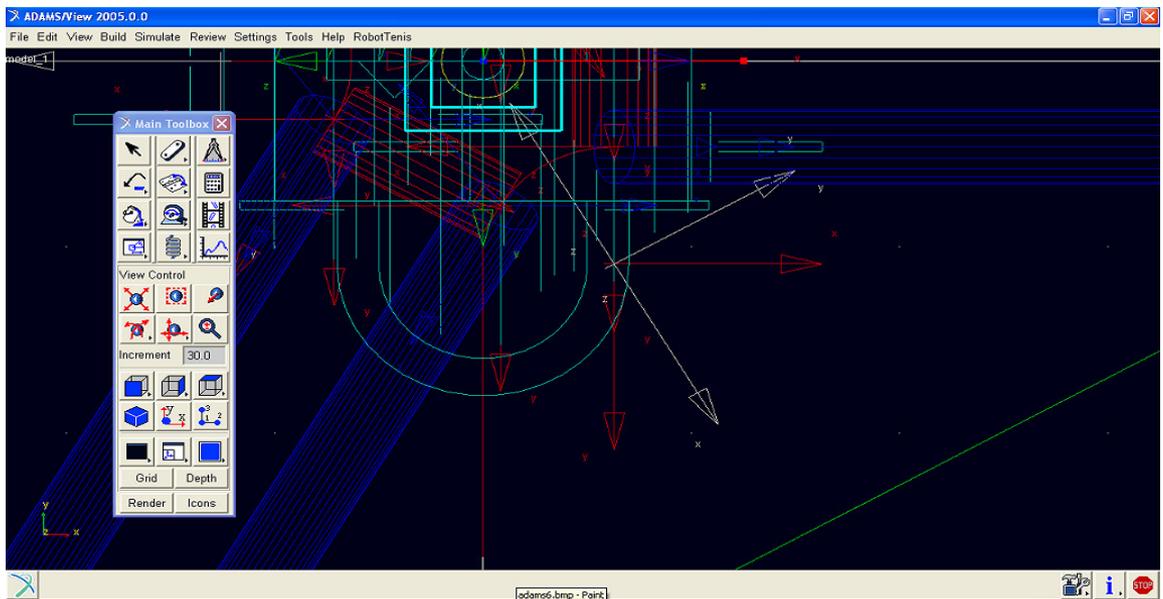


Figura 6.19, Modelo cargado con sus medidas.

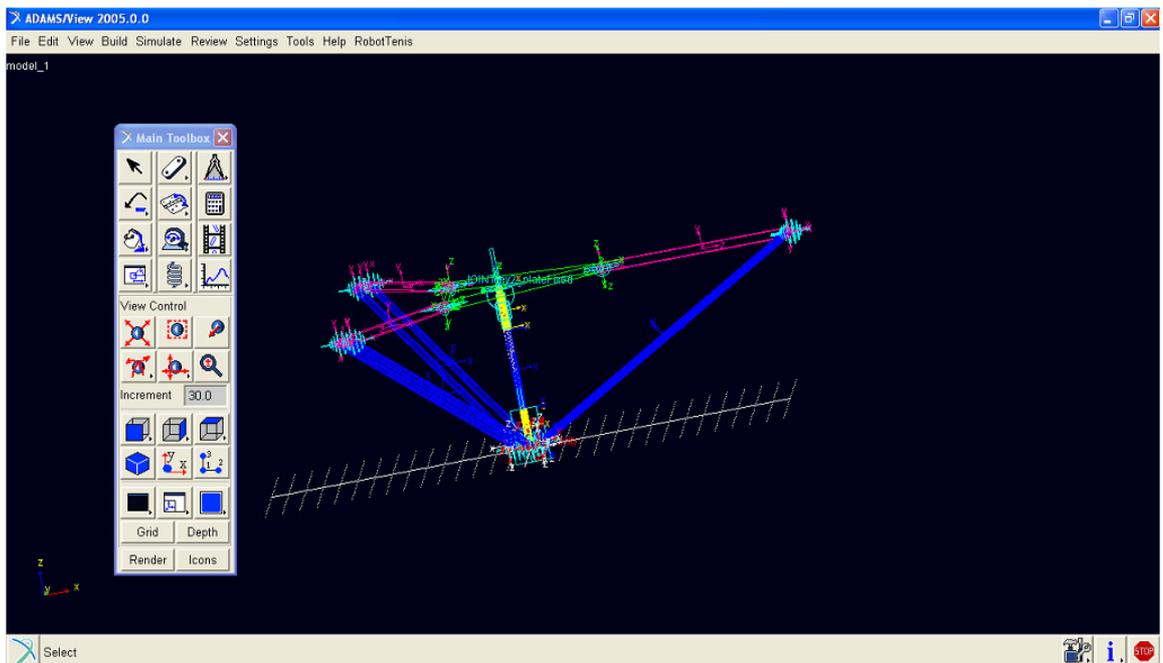


Figura 6.20, Vista isométrica modelo en ADAMS.

- Adicionalmente de las longitudes mecánicas del robot para un análisis dinámico se debe tener la trayectoria del robot y seleccionar las uniones donde se va a correr la trayectoria. La trayectoria es definida a través del planificador de trayectorias.

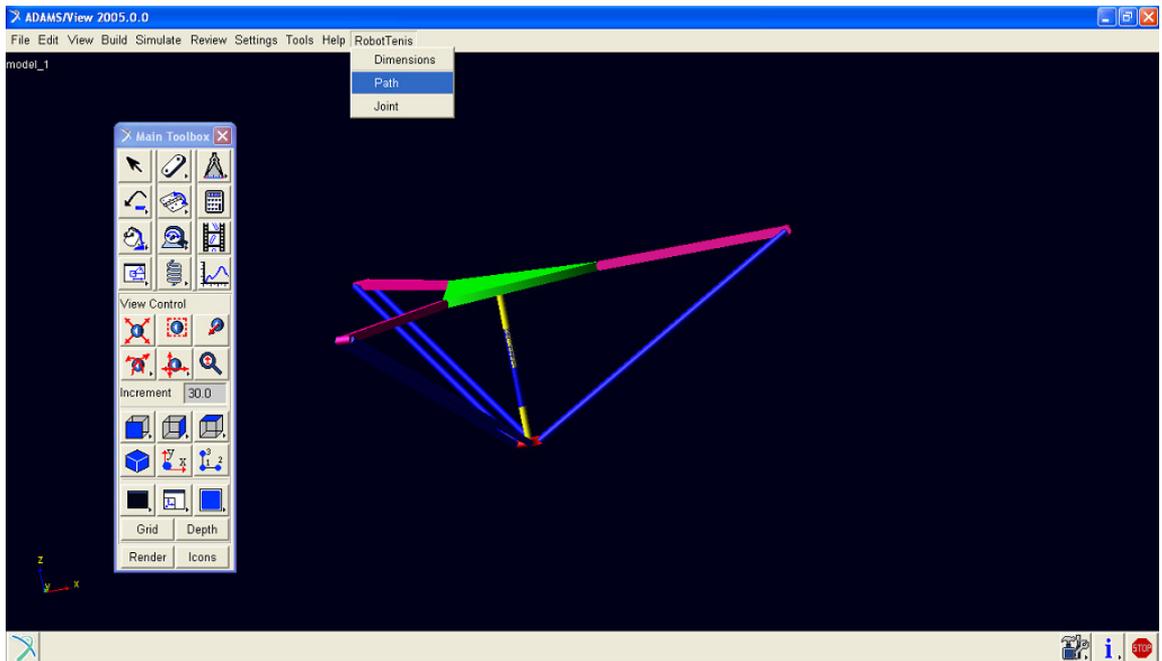


Figura 6.21, Búsqueda de la trayectoria (Path).

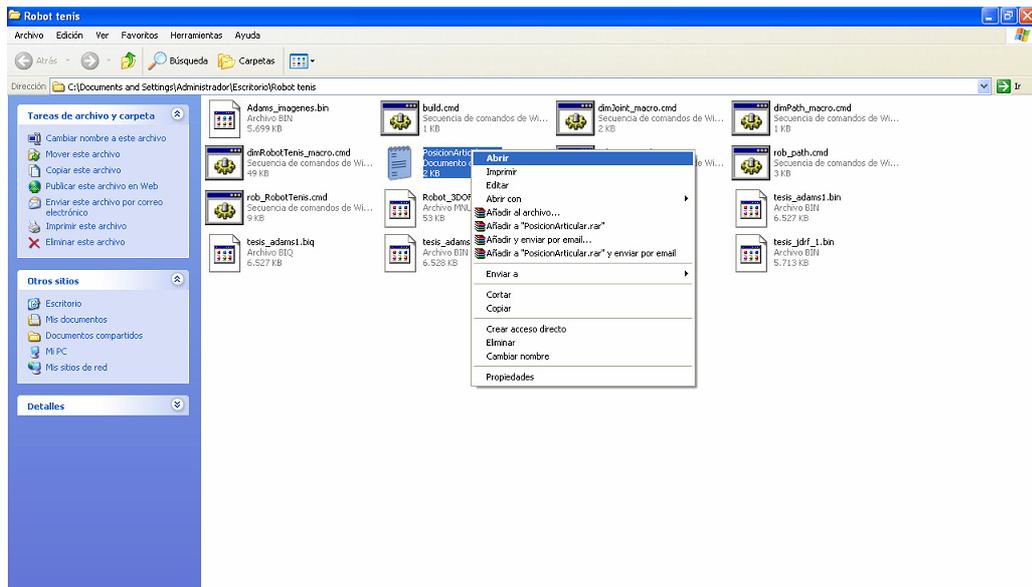


Figura 6.22, La trayectoria se guarda en un formato tipo documento de texto (txt).

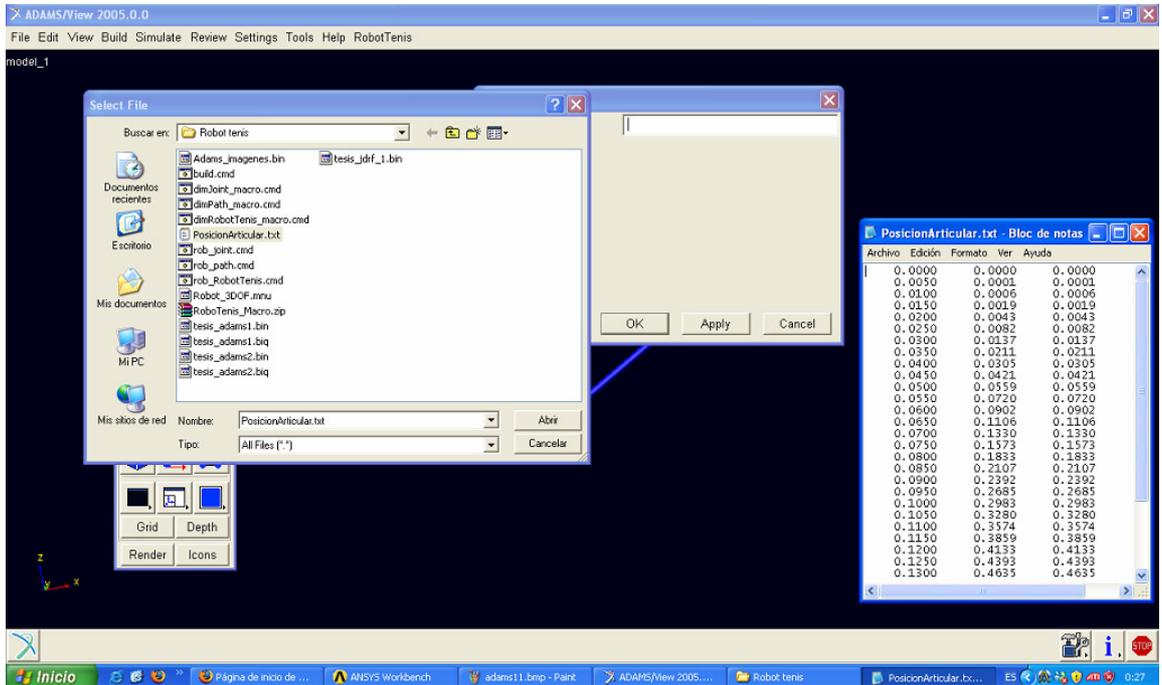


Figura 6.23, Selección de la trayectoria a simular.

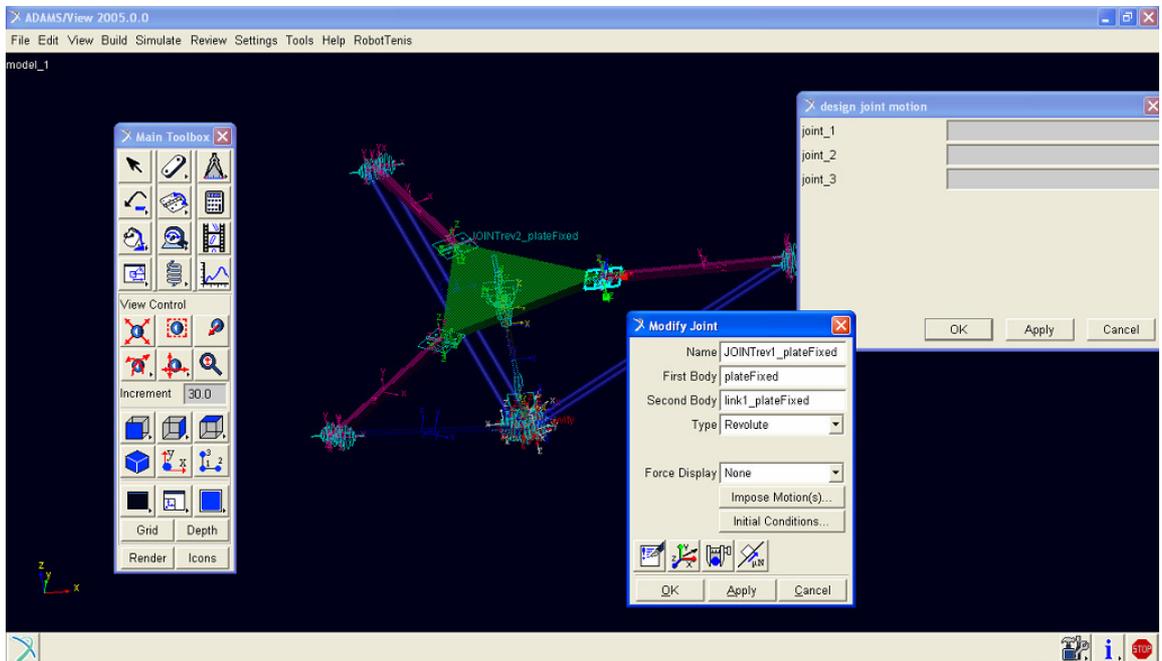


Figura 6.24, Búsqueda de las uniones.

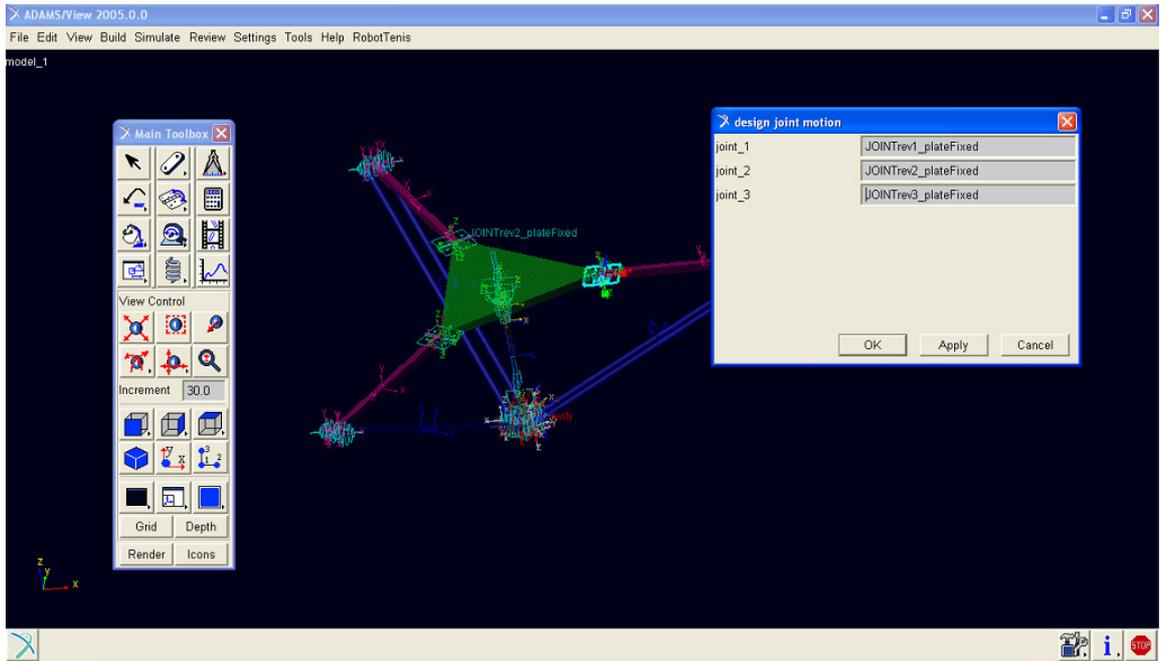


Figura 6.25, Selección de las uniones.

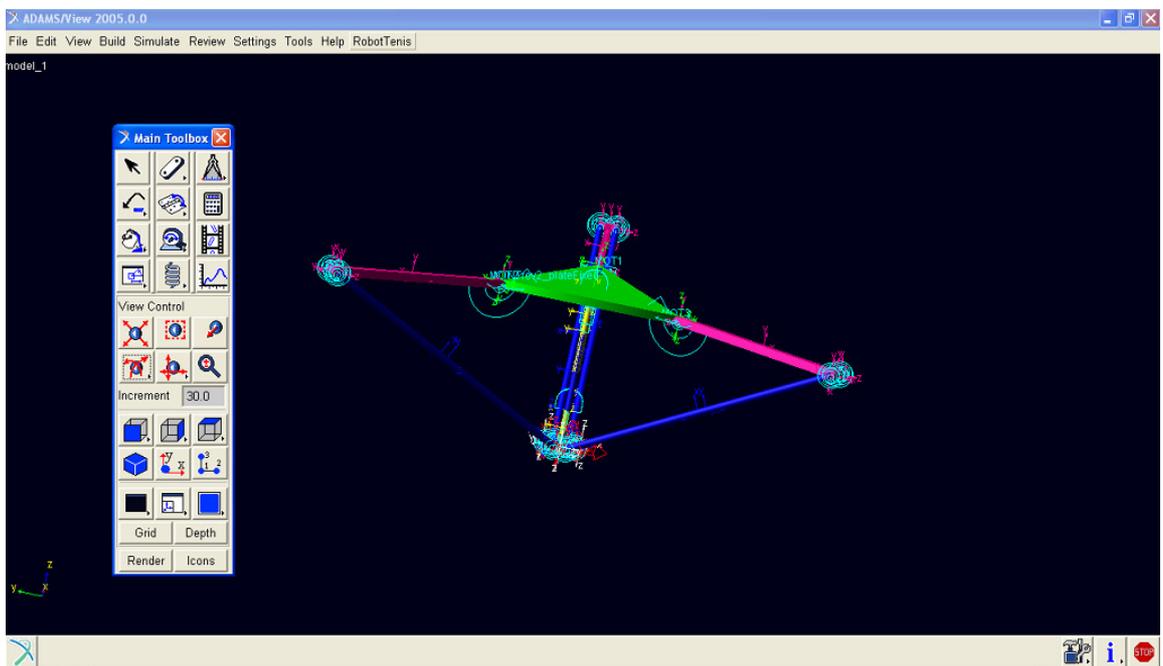


Figura 6.26, Una vez finalizado la selección de las uniones y la trayectoria.

7. METODOLOGIA DE DISEÑO ANSYS – ADAMS

Una vez hallado el modelo cinemático del robot y hallada la trayectoria deseada con sus características deseadas como calidad de la trayectoria, suavidad, precisión, etc. Se procede al desarrollo del análisis dinámico con la trayectoria hallada y por otra parte al análisis estático con el modelo desarrollado en SOLID EDGE.

La metodología emplea los programas ANSYS 11 y ADAMS y busca obtener las mejores características de cada programa para hallar la mejor respuesta en el análisis estático y el análisis dinámico aplicado a estructuras móviles como son los robots.

ADAMS cuenta con características para el análisis de sistemas no lineales y su respectivo análisis dinámico, y por su parte, ANSYS es un software que se emplea en el análisis estructural estático.

El diagrama 2, permite ver la metodología propuesta para el proceso de diseño de la estructura mecánica de un robot. Es importante tener en cuenta que el objetivo de esta metodología de diseño, es obtener las masas de cada uno de los componentes del robot así como el par de los motores que permitan tener el mejor comportamiento dinámico de la estructura mecánica a partir de los criterios de deformación total, stress equivalente y fatiga.

La metodología se desarrolla de la siguiente manera: Se parte del modelo en SOLID EDGE y se carga en ANSYS. A partir del modelo ANSYS, se toman los valores de masa e inercia para cada uno de los componentes del robot. Estos datos son cargados en el modelo de simulación ADAMS, y junto con el movimiento espacial deseado para el efector final, el cual es generado por el planificador de trayectorias, se obtienen los pares que deben ser aplicados a la estructura. Los pares obtenidos son cargados en ANSYS y aplicados a cada motor. A continuación, se reduce la masa del modelo según alguno de los criterios de deformación total, stress equivalente o fatiga. Este proceso, da como resultado un nuevo valor de masa a cada componente del robot (en este caso, el brazo). Se reduce masa o se incrementa masa hasta cumplir con el parámetro deseado en ANSYS y una vez finalizado se pasan las masas y los momentos de inercia a ADAMS el cual calcula el momento final del robot lo cual define el motor necesario para nuestra estructura.

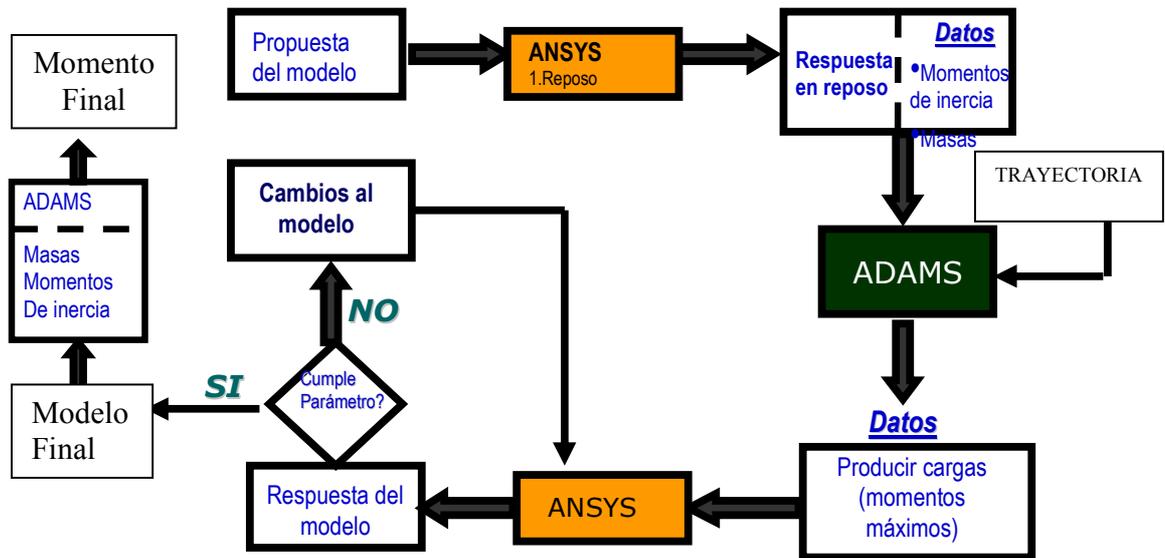


Diagrama 2. Metodología específica de diseño propuesta.

A continuación se detallan los pasos seguidos en el desarrollo de la metodología de diseño propuesta.

7.1. MASAS Y MOMENTOS DE INERCIA DE ANSYS A ADAMS

En las siguientes figuras se mostrara el procedimiento a seguir en la obtención de masas y momentos de inercia necesarios para el análisis dinámico en ADAMS.

- Las masas y momentos de inercia de cada componente del robot, se toman de ANSYS debido a que este software calcula la masa dependiendo de la geometría y el tipo de material.

7.1.1. Ventanas principales

- Para mirar la masa y los momentos de inercia de cada pieza en ANSYS es necesario pararse en la pieza la cual se encuentra en la geometría.

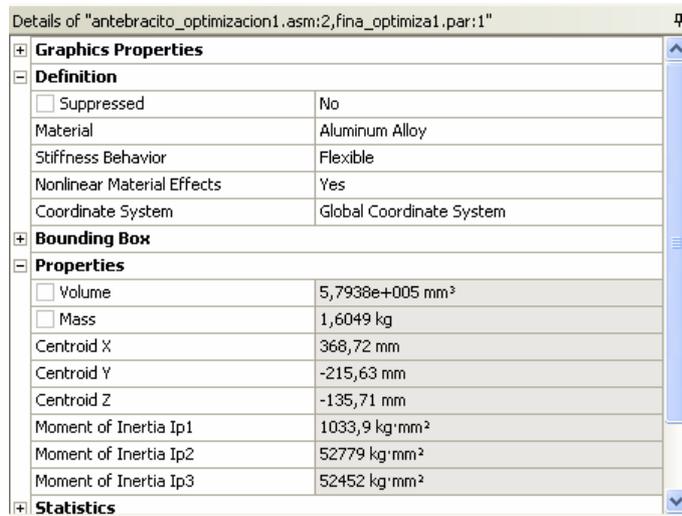


Figura 7.1, Detalle de masa y momentos de inercia en ANSYS.

- Para agregar los momentos de inercia y la masa calculada en ANSYS A ADAMS solo basta con hacer doble click sobre la pieza y a continuación puede cargar los datos en Define Mass By User Input.

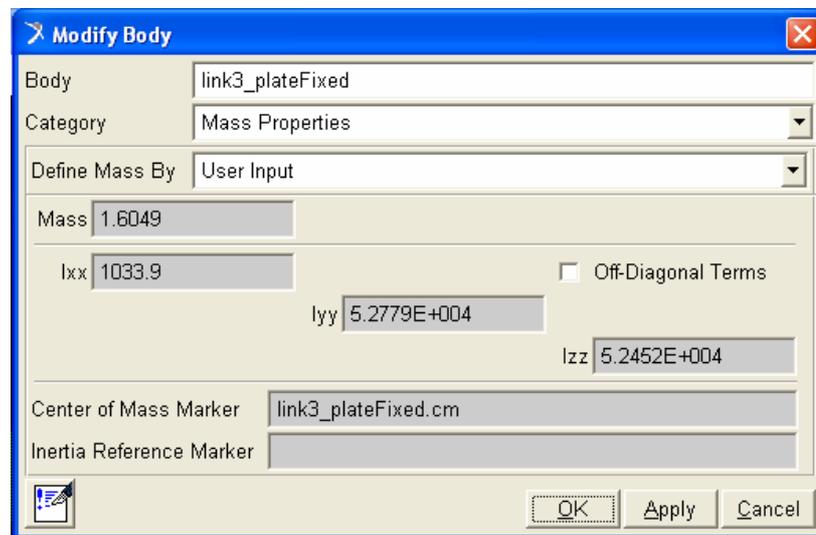


Figura 7.2, Ventana de ADAMS para variar masa y momentos de inercia.

7.1.2. Masas y momentos de inercia importantes

- Los momentos de inercia y la masa de la plataforma fija en ANSYS son llevados y cargados en ADAMS.

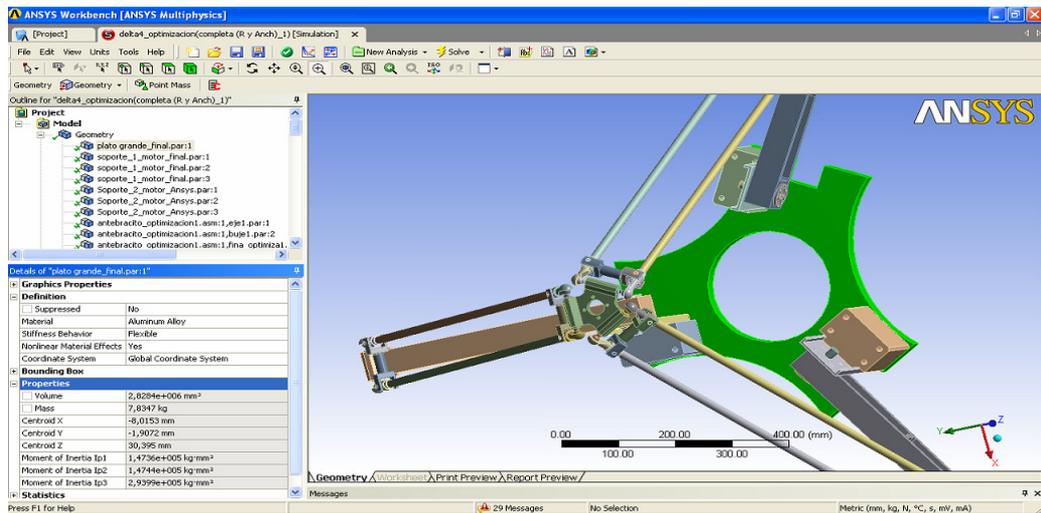


Figura 7.3, Masa y momentos de inercia de la plataforma fija en ANSYS.

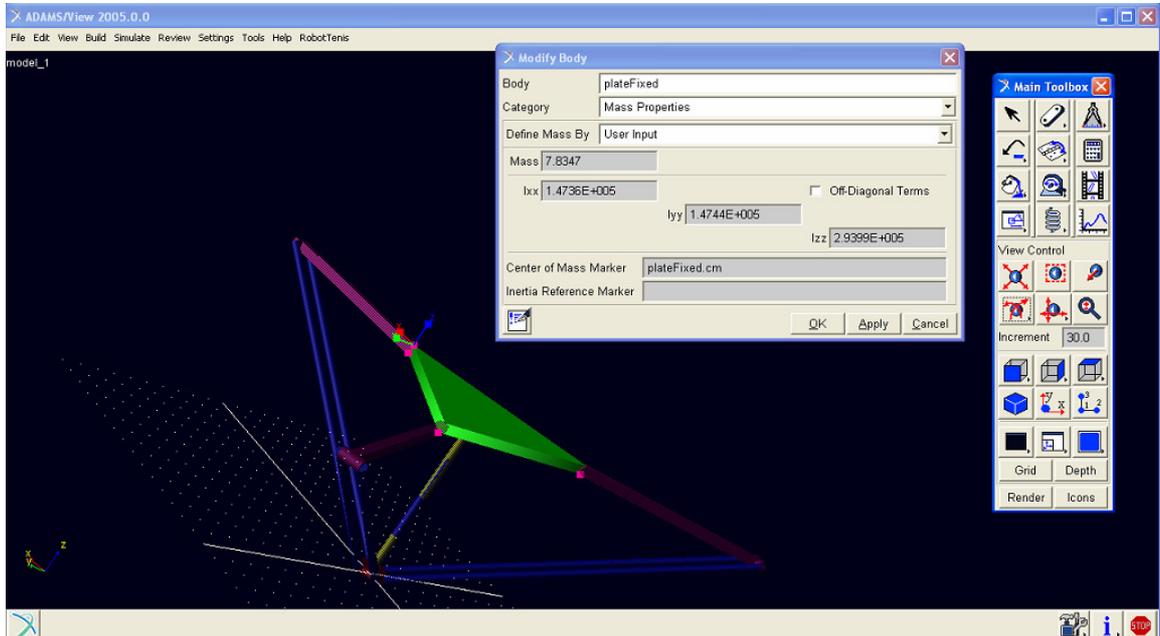


Figura 7.4, Masa y momentos de inercia de la plataforma fija en ADAMS.

- Los momentos de inercia y la masa del brazo en ANSYS son llevados y cargados en ADAMS.

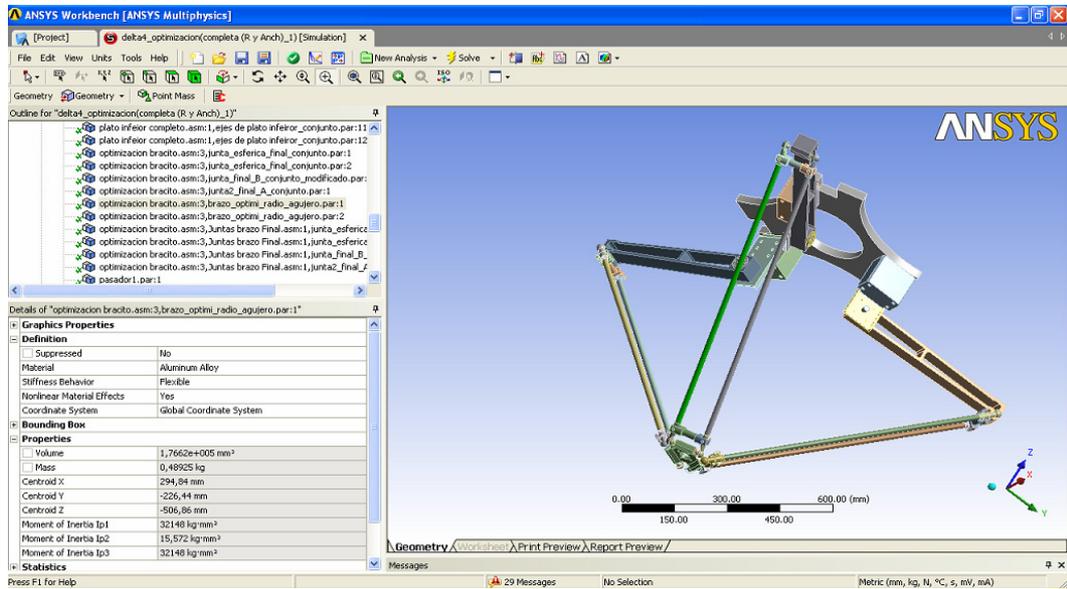


Figura 7.5, Masa y momentos de inercia del brazo en ANSYS.

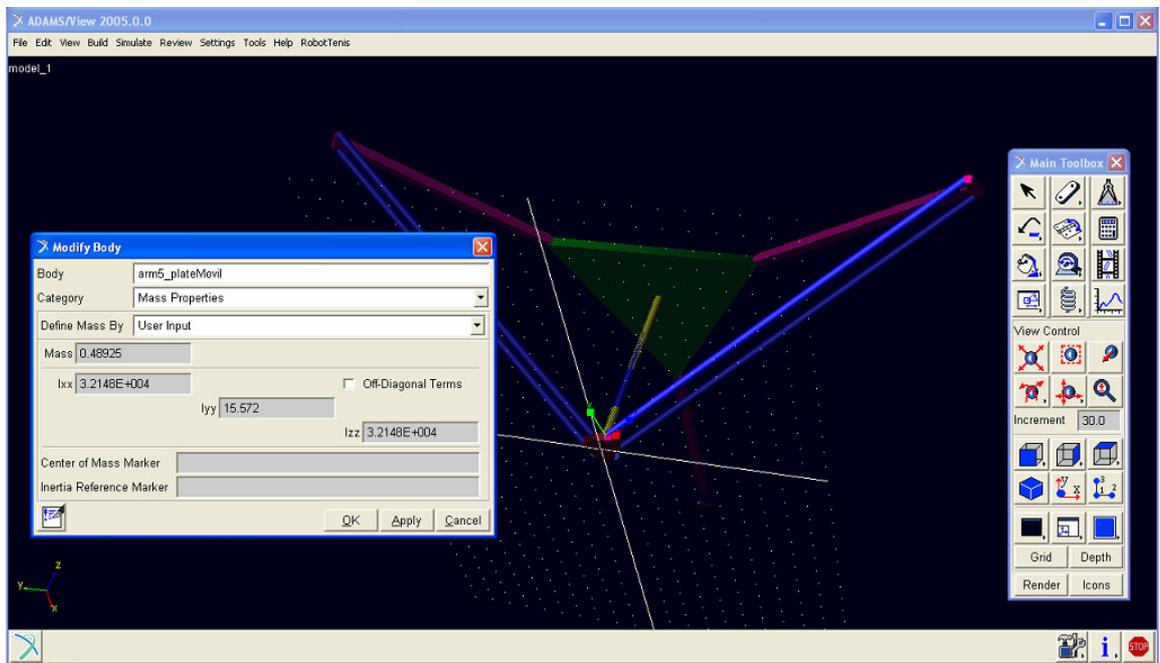


Figura 7.6, Masa y momentos de inercia del brazo en ADAMS.

- Los momentos de inercia y la masa del antebrazo en ANSYS son llevados y cargados en ADAMS.

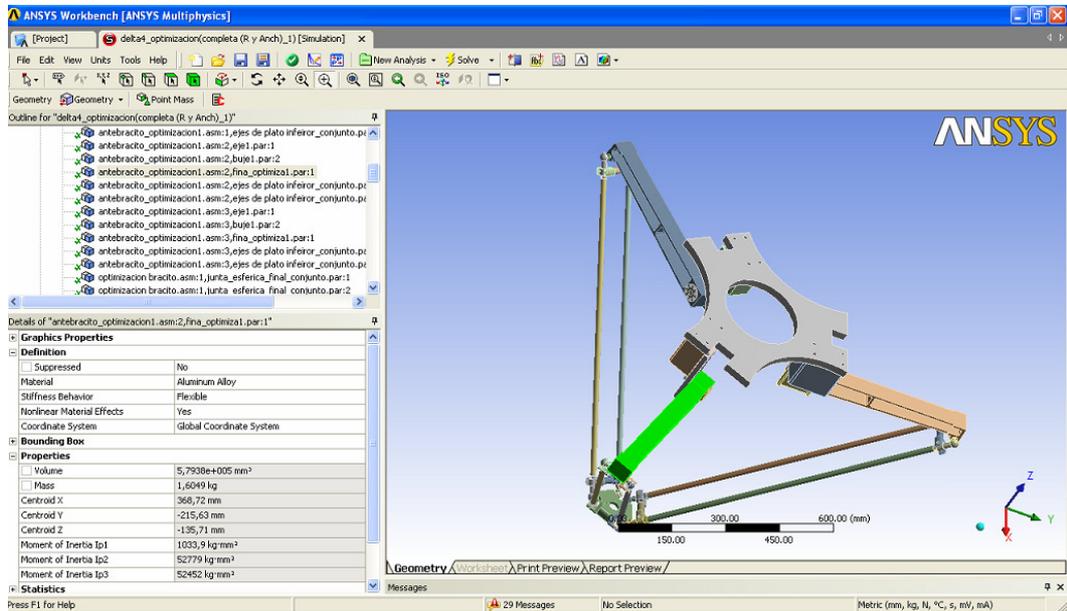


Figura 7.7, Masa y momentos de inercia del antebrazo en ANSYS.

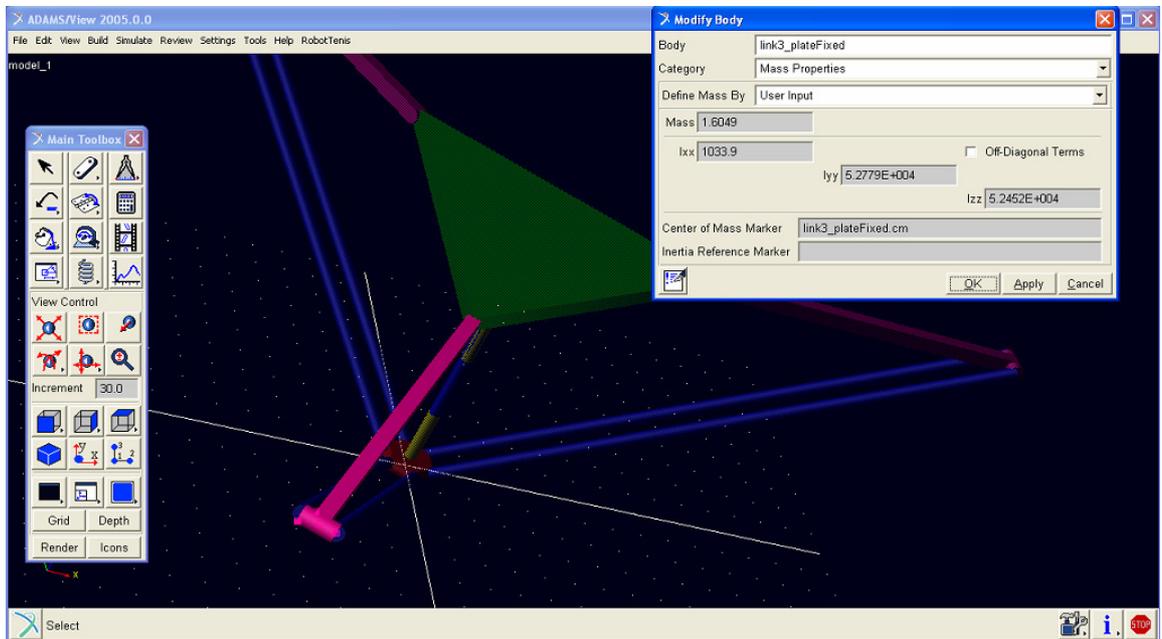


Figura 7.8, Masa y momentos de inercia del antebrazo en ADAMS.

- Los momentos de inercia y la masa de la plataforma móvil en ANSYS son llevados y cargados en ADAMS.

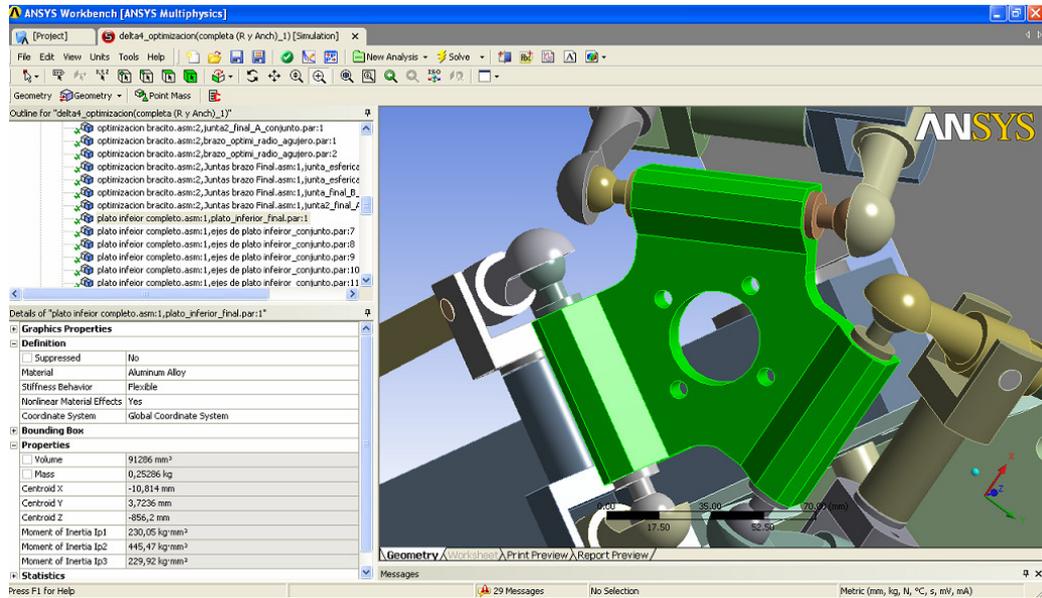


Figura 7.9, Masa y momentos de inercia de la plataforma móvil en ANSYS.

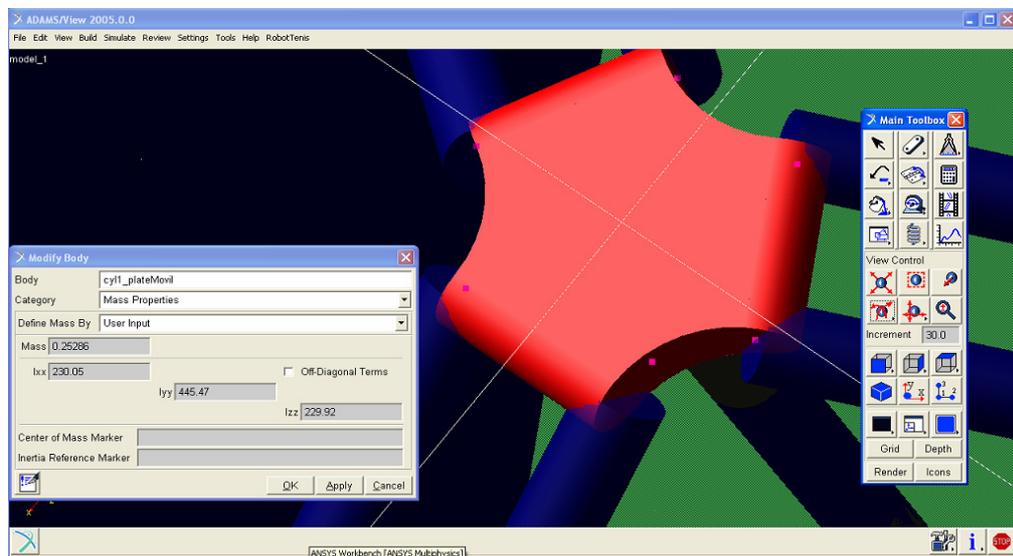


Figura 7.10, Masa y momentos de inercia de la plataforma móvil en ADAMS.

7.2. METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN DINAMICA

Interactive simulation controls (calculadora) en una herramienta de ADAMS que permite simular la trayectoria ya cargada con anterioridad, para realizar la simulación es necesario primero definir el tiempo de finalización (End time) que sería el tiempo máximo que dura la trayectoria y el tamaño del paso (Step size) que es el incremento de tiempo, entre mas pequeño sea el Step size mas lenta va ser la simulación y mas fácil de observar.



Figura 7.11, Selección de interactive simulation controls (calculadora).

- Imágenes de antes y después de la simulación dinámica de la trayectoria.

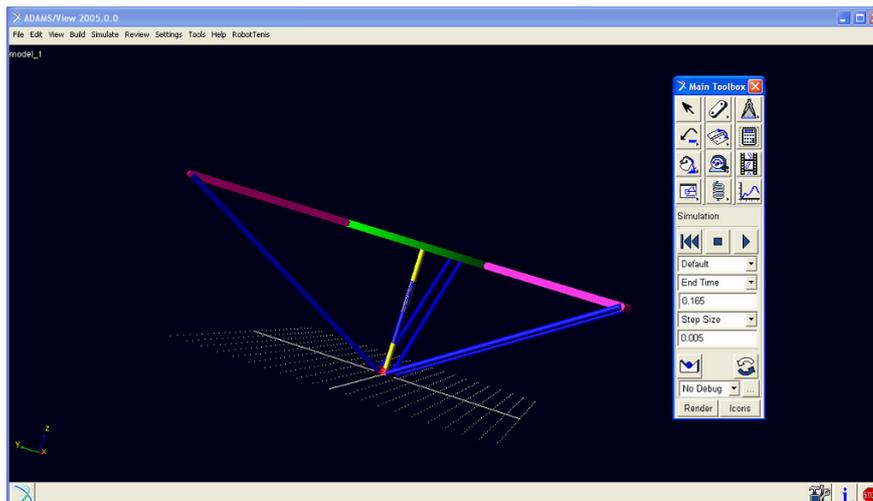


Figura 7.12, Imagen antes de simular la trayectoria.

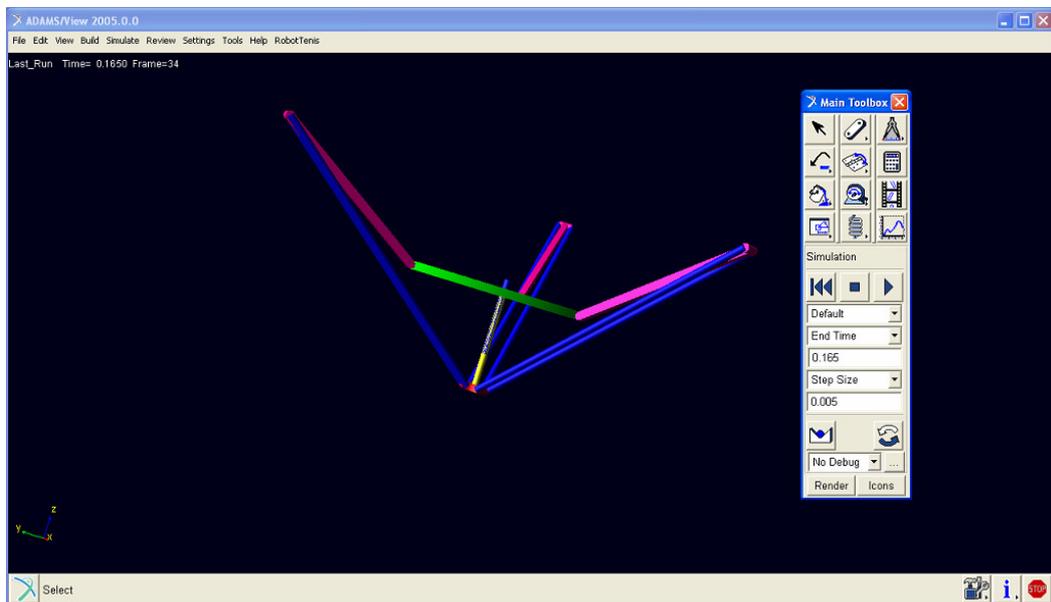


Figura 7.13, Imagen después de simular la trayectoria.

7.3. RESULTADOS TORQUES EN ADAMS

ADAMS posee un modulo que se llama PostProcessor el cual permite visualizar, comparar y analizar las respuestas de la simulación dinámica de la trayectoria.

Para éste análisis, es necesario hallar los torques en los motores requeridos para cumplir con la trayectoria en el tiempo determinado el cual se ha dado de 0.165 seg.

7.3.1. Procedimiento para graficar

- Para poder graficar en el PostProcessor es necesario seleccionar el modelo, seguido del objeto, la característica y la componente. Una vez definido lo que se desea graficar se selecciona Add curves y aparecerá la grafica.

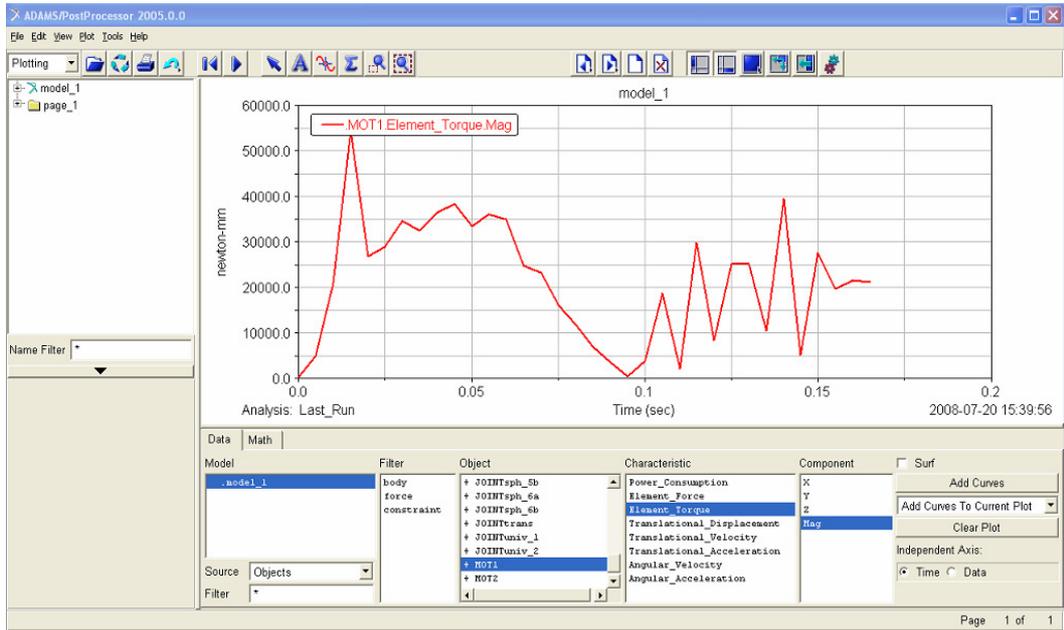


Figura 7.14, Grafica torque motor 1.

7.3.2. Procedimiento para Exportar datos de ADAMS.

- Pasos para exportar respuestas de ADAMS.

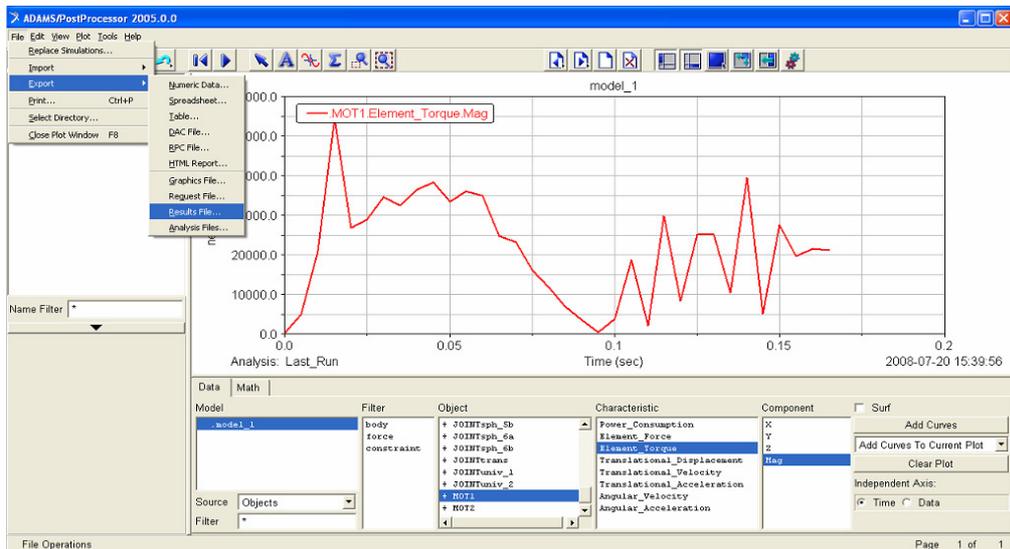


Figura 7.15, Paso 1: Se selecciona Export y luego Results file.

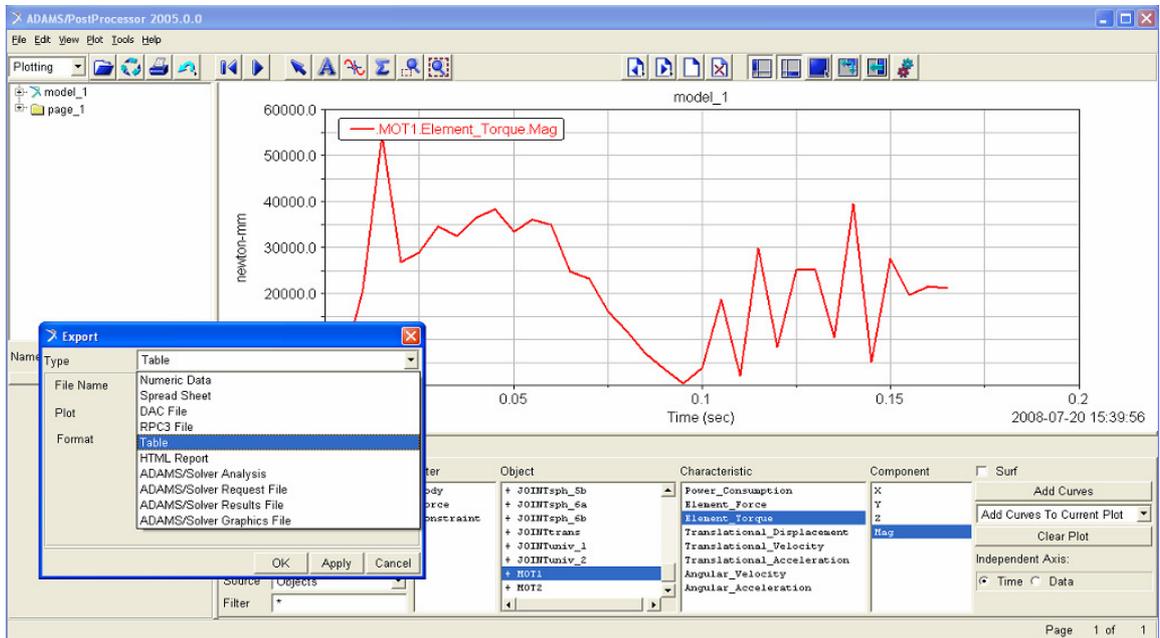


Figura 7.16, Paso 2: Se selecciona tipo tabla (Type table).

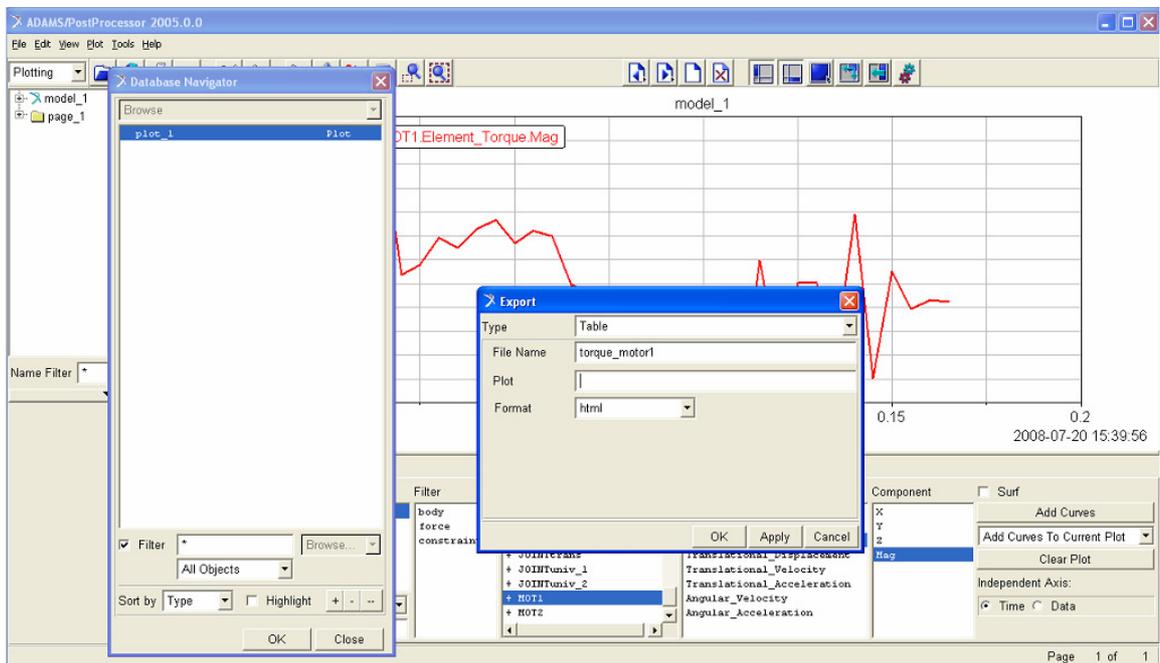


Figura 7.17, Paso 3: Se selecciona la grafica que se quiere exportar.

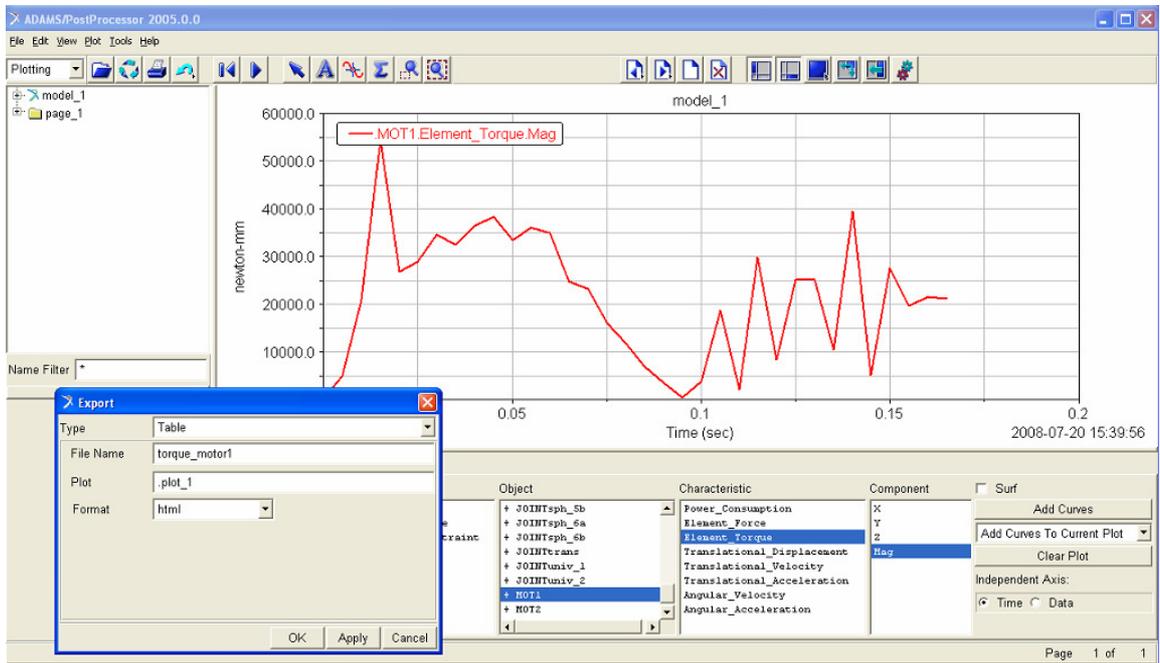


Figura 7.18, Paso 4: Se selecciona el formato que en este caso es tipo html.

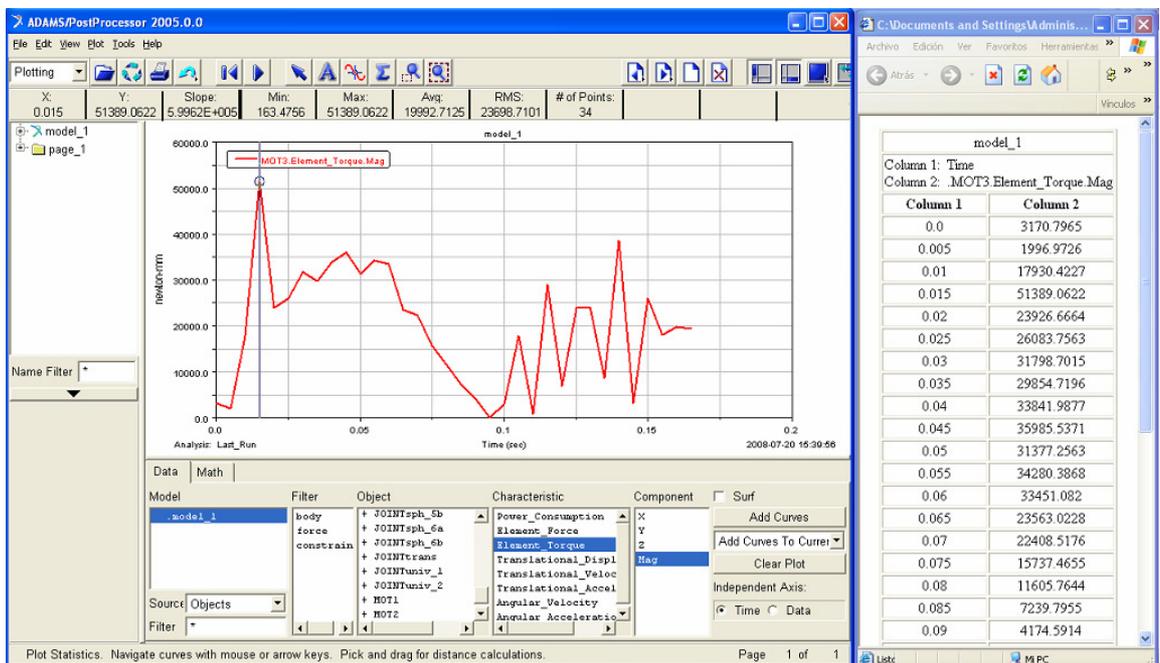


Figura 7.19, Grafica torque motor y datos exportados tipo tabla en formato html.

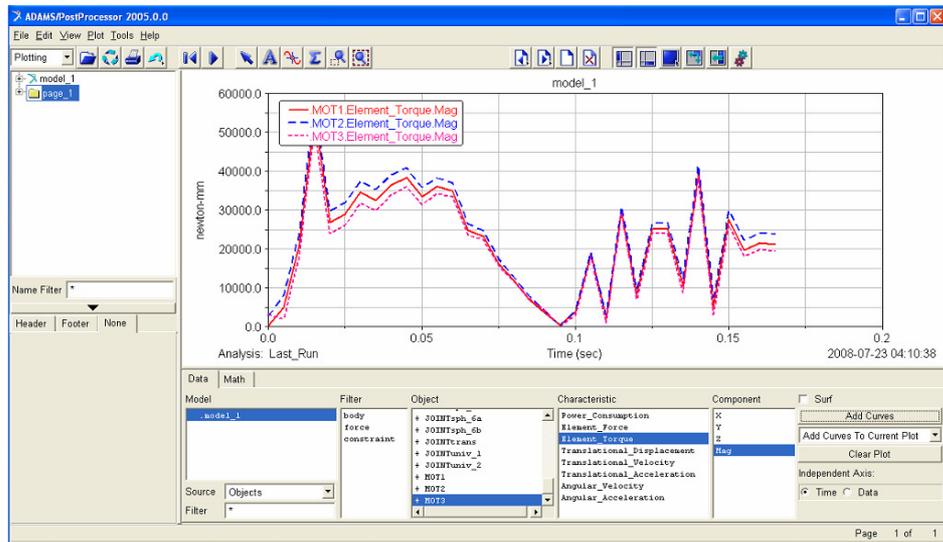


Figura 7.20, Grafica de comparación entre los tres torques del motor.

7.4. AMBIENTE ESTÁTICO

7.4.1. Ambiente estructural estático en ANSYS

Ya que se quiere hallar el comportamiento estructural en ANSYS con las cargas halladas en ADAMS es necesario colocar el modulo Static Structural, como se observa en la figura 7.21.

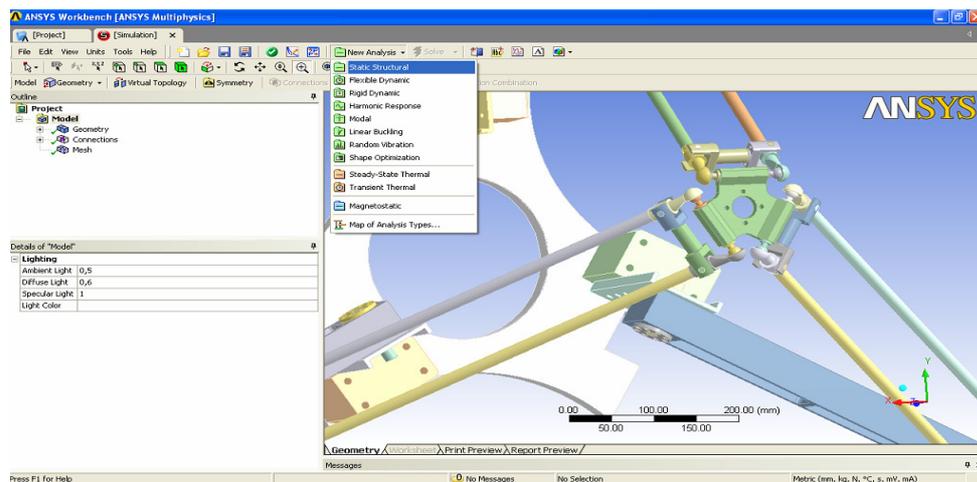


Figura 7.21, Selección del modulo Static Structural.

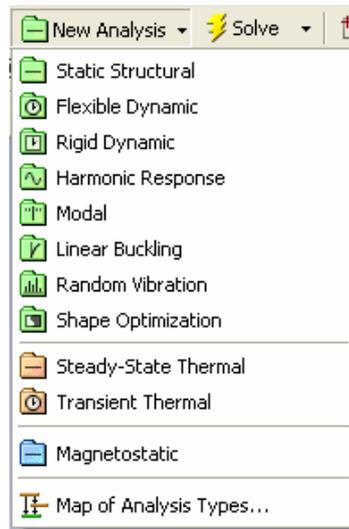


Figura 7.22, Barra de selección de diferentes tipos de análisis.

- Una vez colocado el modulo Static Structural se debe trabajar sobre el, esto quiere decir se debe definir el ambiente estático, para tal motivo se cuentan con diferentes ambientes como lo son soportes, cargas, inercias y condiciones. Adicionalmente cada ambiente tiene varias herramientas como se muestra en la siguiente figura.

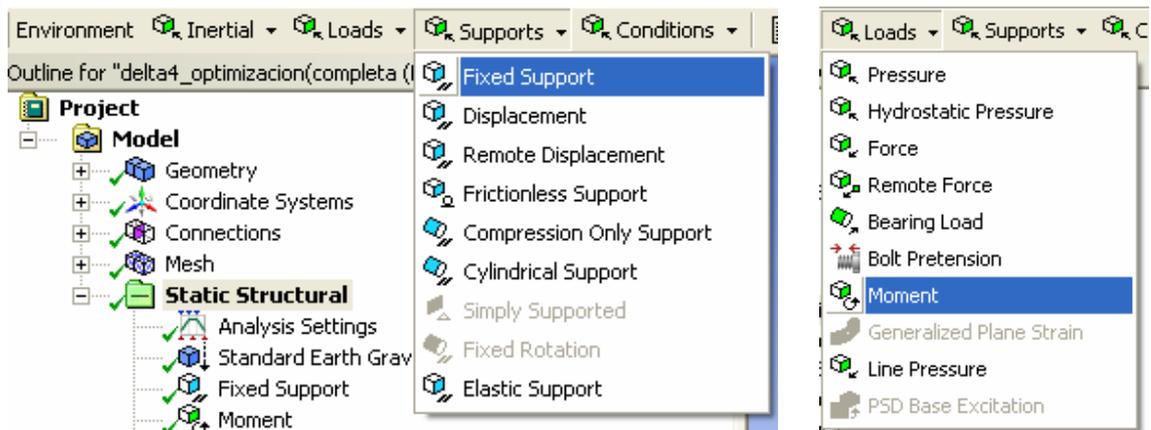


Figura 7.23, Herramientas para definir el ambiente estático.

- se debe definir el soporte de la estructura y decir que tipo de soporte es, para este caso el soporte es la parte superior de la plataforma fija y el soporte es fijo.

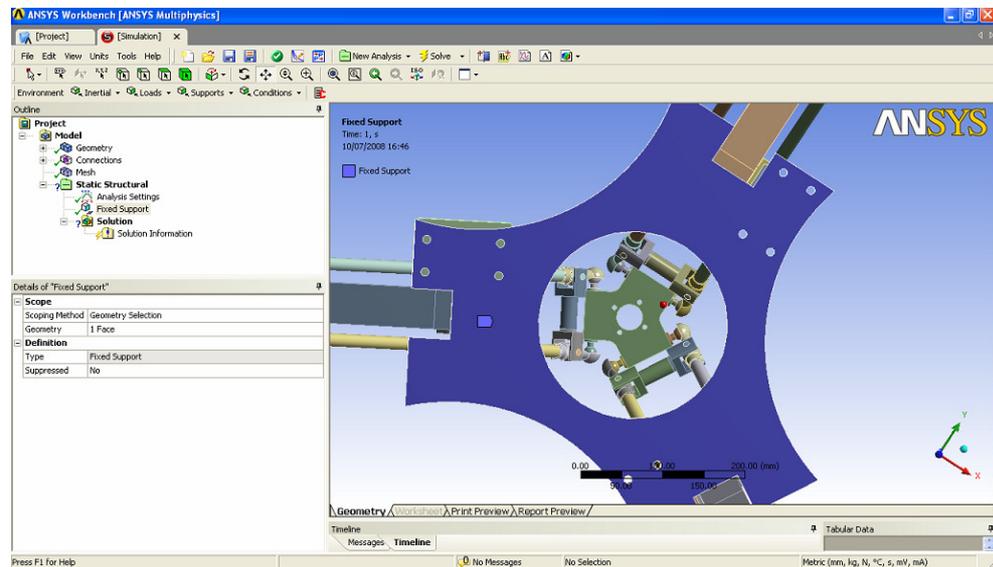


Figura 7.24, Selección de soporte fijo.

- Debido a que se hallaron los torques en ADAMS es necesario en el ambiente estático introducir el máximo momento, para esto se selecciona la pieza donde se aplica el torque que son los ejes del motor.

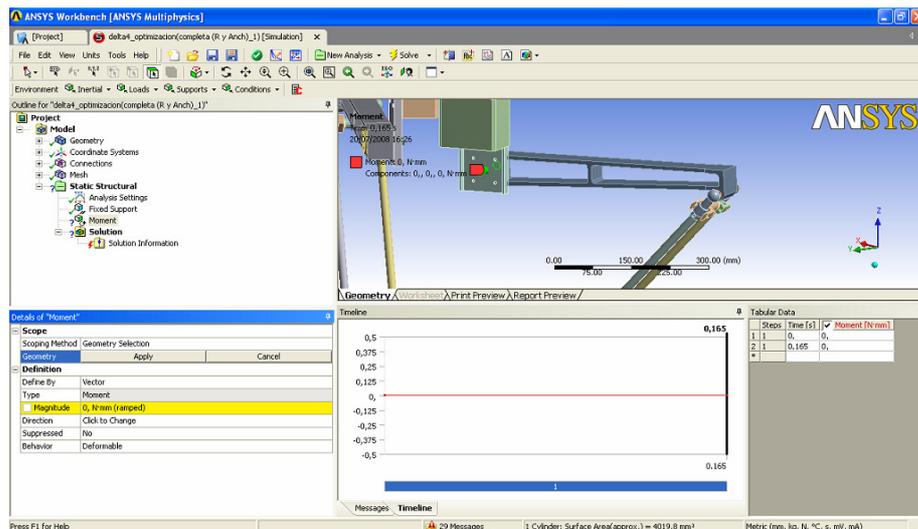


Figura 7.25, Herramientas para definir el ambiente estático.

- Se debe cambiar los puntos por comas ya que las respuestas en ADAMS son con puntos y los datos que se manejan en ANSYS son con comas.

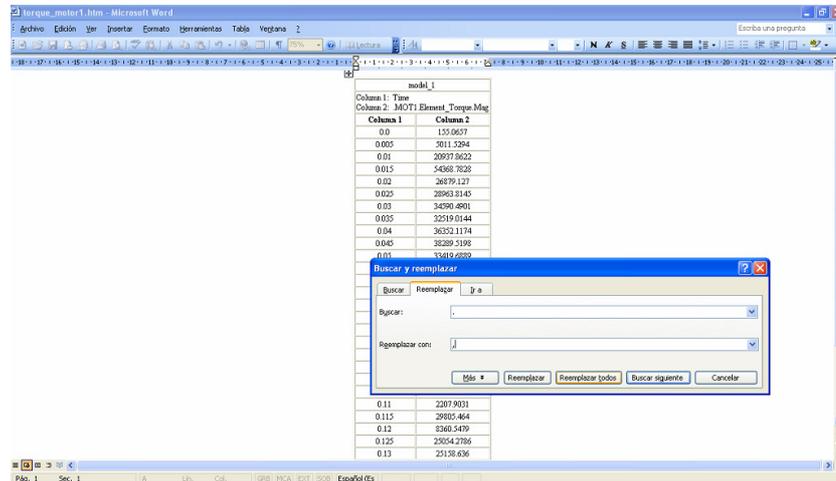


Figura 7.26, Reemplazos de puntos por comas. .

- Se debe copiar el dato de mayor momento en la tabla de cada motor y pegarlos en ANSYS y además se debe poner la estructura en la posición en la cual se produjo el máximo momento.

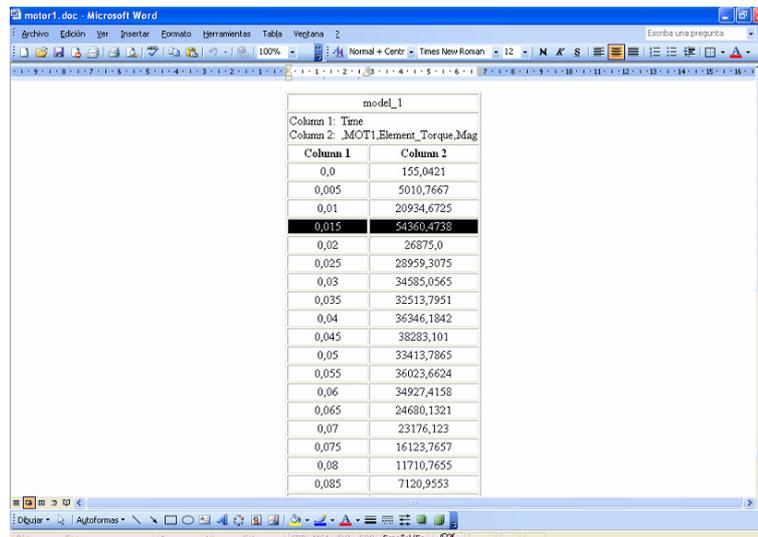


Figura 7.27, Copia de máximo momento.

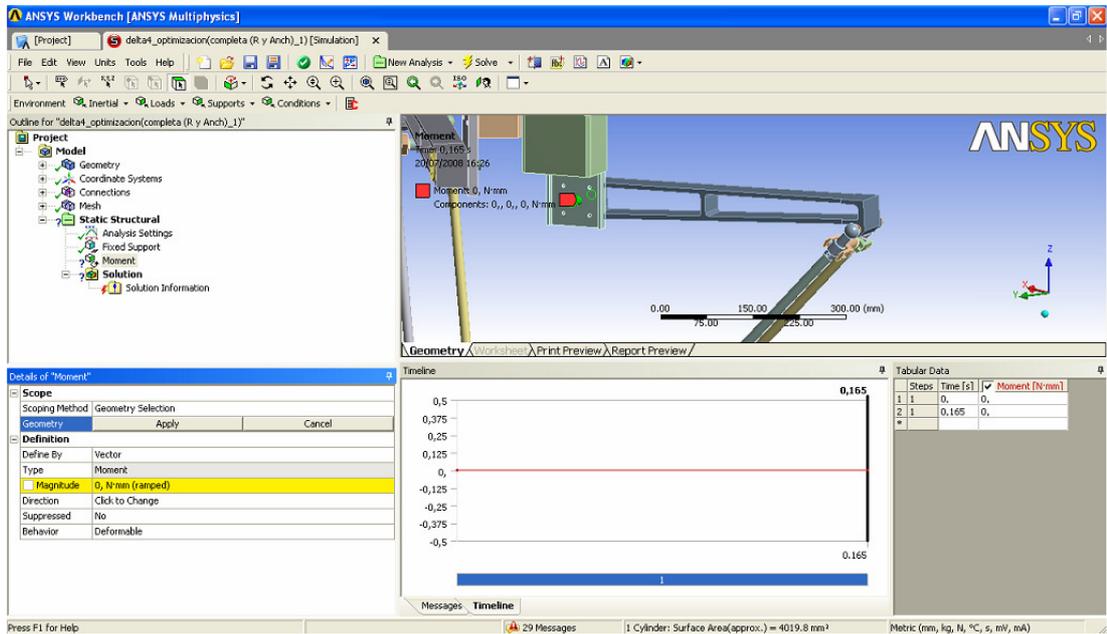


Figura 7.28, Se pega el máximo momento de cada motor en ANSYS.

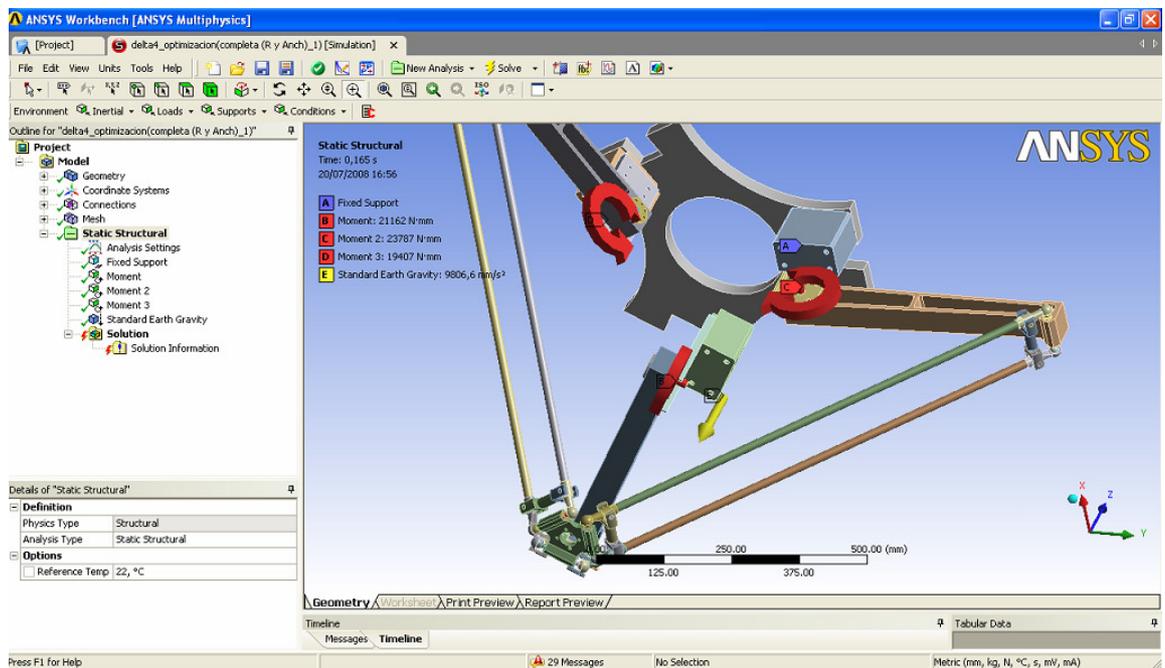


Figura 7.29, El ambiente estructural final debe mostrar las cargas, soportes e inercias que intervienen en el análisis.

7.4.2. Ejemplo:

- A manera de ejemplo se ha hallado los momentos para una estructura a través de ADAMS se desea que la estructura tenga un factor de seguridad de 1 y hallar los momentos para ese caso.

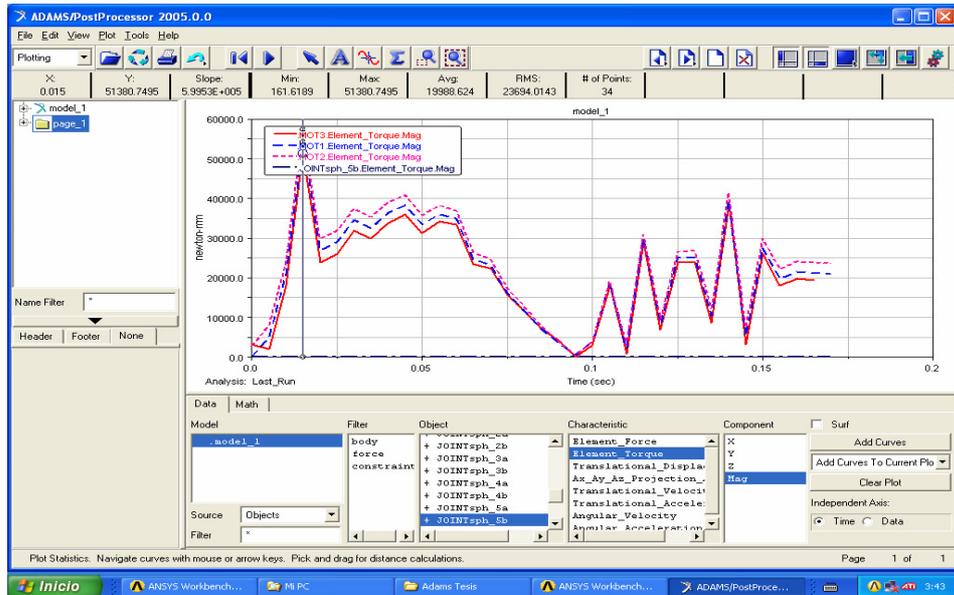


Figura 7.30, Grafica de Momento máximo de 51380 Nmm

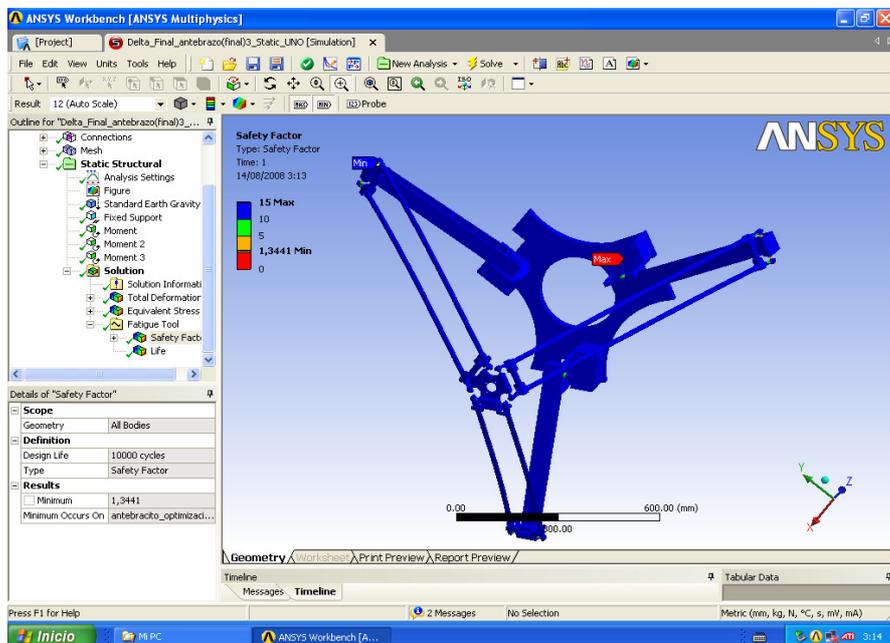


Figura 7.31, Grafica ANSYS factor de seguridad de 1.3441

- Se realiza cambios al modelo en este caso se reduce la masa aumentando el radio del agujero en el brazo.

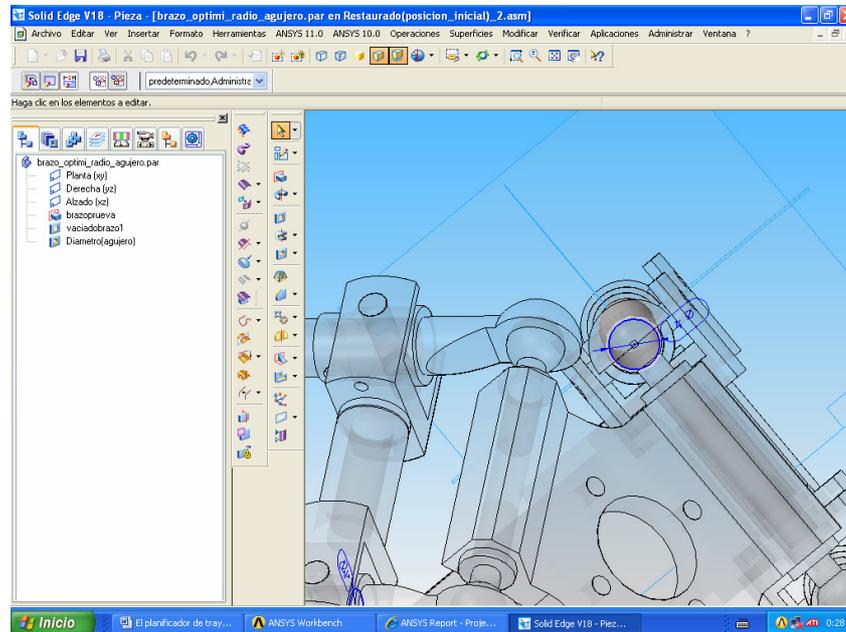


Figura 7.32, Cambios de masa, aumento del agujero en el brazo.

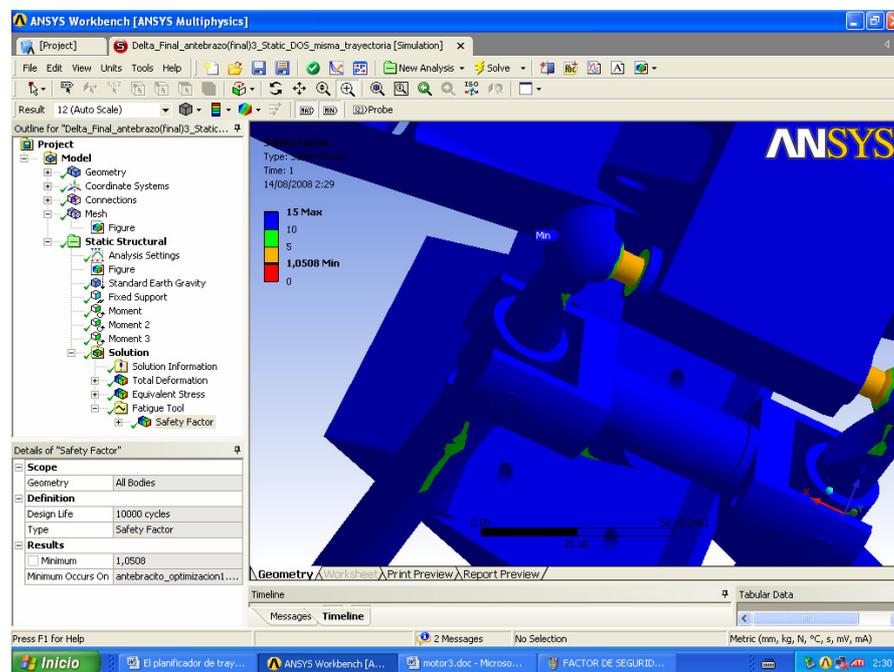


Figura 7.33, Grafica modelo final en ANSYS factor de seguridad de 1.05

- Como se puede observar en este ejemplo se pudo hallar una estructura con menor masa que cumpliera con un criterio de factor de seguridad 1 y para esta estructura se pudo hallar un momento máximo de 28980 Nmm lo cual equivale casi a la mitad del momento máximo con el que se inicio que era de 51380 Nmm, esto se puede hacer de igual manera tomando como criterio la deformación o simplemente el que el diseñador vea conveniente.

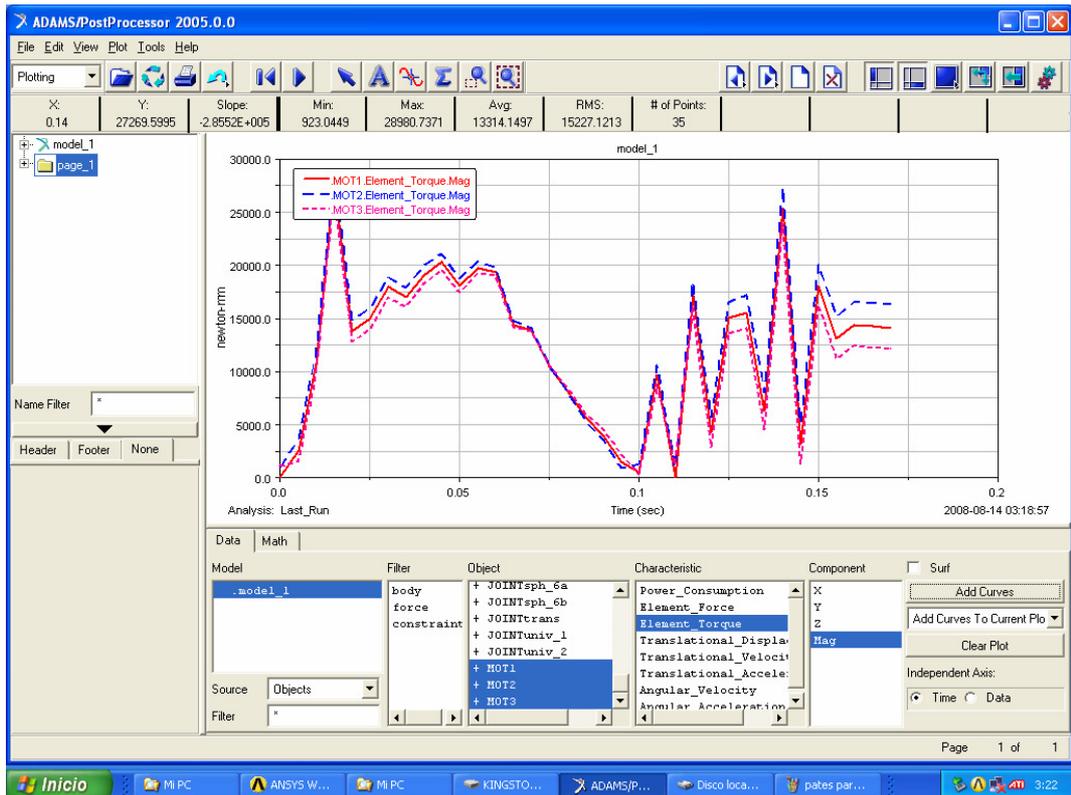


Figura 7.34, Momento máximo de 28980 Nmm para el modelo final

8. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

- Se dio a conocer las herramientas (análisis cinemático, planificador, Solid Edge, Ansys y Adams) disponibles para diseñar una estructura mecánica como un robot delta y el alcance en cada una de ellas.
- La función polinomial que crea la mejor trayectoria de puntos en cuanto a suavidad en relación a cálculo computacional es el polinomio 616 adicionalmente que tiene en cuenta el jerk.
- En este proyecto se propuso una nueva metodología de diseño estructural aplicada a un robot delta, con la cual no se contaba en la región. Esta metodología se puede usar para la construcción de robots con diferentes grados de libertad, lo cual permite a la universidad UPB afianzar sus conocimientos para la ofertas de servicios en robótica a la región.
- El motivo que hace que sea indispensable el uso de EL MODELO CINEMATICO, EL PLANIFICADOR DE TRYECTORIA, SOLID EDGE, ANSYS y ADMAS en la construcción de prototipos mecánicos para la industria de la región, es: permite hallar los motores adecuados y la estructura adecuada para cumplir con la tarea asignada sin necesidad de sobredimensionar el modelo e incurrir en gastos innecesarios.
- Para un futuro se espera realizar trabajos en el análisis estructural para robot con diferentes grados de libertad ya que esta metodología que fue desarrollada en este proyecto de grado para el robot delta sirve para cualquier tipo de robot.

9. BIBLIOGRAFIA

- [1].Ángel, L., (2005). “Control visual de robots paralelos. Análisis, desarrollo y aplicación a la plataforma robotenis”, Tesis Doctoral, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales.
- [2].Cauchy, A. (1813). Deuxième mémoire sur les polygones et les polyèdres. Journal de l'Ecole Polytechnique, pages 87-98.
- [3].Clavel, R. (1988). “DELTA: a fast robot with parallel geometry,” *18th International Symposium on Industrial Robot*, pp. 91-100. Sydney, Australia.
- [4].Gough, V.E., Whitehall, S.G. (1962). Proc. 9th Int Tech. Congr. FISITA, Instr. Mech 177
- [5]. Stewart D. (1965). A platform with 6 degrees of freedom. Proc. of the Institution of mechanical engineers, 180 (Part 1, 15): pp 371-386.
- [6].Waldron, K.J. and Hunt, K.H. (1991). “Series-parallel dualities in actively coordinated mechanisms”. *The Int. J. of Robotics Research*, 10(2):473- 480.
- [7].Zamanov, V.B and Sotirov, Z.M. (1991). “A contribution to the serial and parallel manipulator duality”. *In 8th World Congress on the Theory of Machine and Mechanisms*, pp. 517-520, Prague, 26-3.