

**ANALISIS ESTRUCTURAL DE UN ROBOT PARALELO INDUSTRIAL TIPO
DELTA USANDO EL SOFTWARE DE SIMULACION "FLEXIBLE DYNAMIC" DE
ANSYS 11.0**

JHONATTAN DIDIER RUEDA FLOREZ

**BUCARAMANGA
UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍA Y ADMINISTRACIÓN
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRONICA
2009**

**ANALISIS ESTRUCTURAL DE UN ROBOT PARALELO INDUSTRIAL TIPO
DELTA USANDO EL SOFTWARE DE SIMULACION “FLEXIBLE DYNAMIC” DE
ANSYS 11.0**

JHONATHAN DIDIER RUEDA FLOREZ
Trabajo de grado para optar por el título de
Ingeniero Electrónico

Director
U.P.B. Bucaramanga
Luis Angel Silva
Doctor en Robótica y Visión por Computador

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍA Y ADMINISTRACIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRONICA
BUCARAMANGA
2009

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 Katherine y Stephanie 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 (Todo lo puedo en Cristo que me fortalece).

Nota de Aceptación:

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

Bucaramanga, Marzo 26 de 2009

CONTENIDO

Pág.

OBJETIVOS

1.	INTRODUCCIÓN	13
2.	MARCO TEORICO	17
2.1	Diseño de máquinas	17
2.1.1	Diseño de ingeniería	17
2.1.1.1	Iteración	19
2.1.2	Análisis Estructural	19
2.1.2.1	Esfuerzo	20
2.1.2.2	Deformación	20
2.1.2.3	El diagrama de esfuerzo-deformación unitaria	21
2.1.2.4	Cargas repetidas. Fatiga	25
2.1.2.5	Factor de seguridad	26
2.1.2.6	Filosofía del diseño	27
2.2	Estado del arte de los robots paralelos	28
2.2.1	Líneas Actuales de Investigación	29
2.2.1.1	Diseño mecánico	29
2.2.1.2	Cinemática	29
2.2.1.3	Análisis de singularidades	30
2.2.1.4	Espacio de trabajo	31
2.2.1.5	Dinámica	32
2.2.1.6	Control	33
2.2.1.7	Calibración	34
2.2.2.	El Robot Paralelo Tipo DELTA	34
2.2.2.1	El robot Delta en la Industria	35
3.	MODELOS DE SIMULACION	37
3.1	Solid Edge	38
3.1.1	Historia Solid Edge	38
3.1.1.1	Interfase SOLID EDGE	39
3.1.2	Modelo de de simulación en SOLID EDGE	40
3.1.2.1	Piezas	40
3.1.2.2	Subconjuntos	42
3.1.2.3	Ensamble final	43
3.2	Ansys 11	44
3.2.1	Historia Ansys	44
3.2.1.1	Interfase ANSYS 11	45
3.2.2	Modelo de simulación en ANSYS 11	46
3.2.2.1	Geometría ANSYS	47
3.2.2.2	Conexiones ANSYS	49
3.2.2.3	Enmallado ANSYS	52
3.2.2.4	Modelo en Flexible Dynamic	55

4.	ANALISIS DE TRAYECTORIA	58
4.1	Selección de la trayectoria crítica	59
4.2	Trayectoria crítica.	62
4.2.1	Trayectoria crítica en Ansys 11	63
5.	ANALISIS ESTRUCTURAL DEL ROBOT DELTA Y OPTIMIZACION DE LA ESTRUCTURA MECANICA	65
5.1	Selección de pieza	65
5.1.1	Selección de pieza entre brazo y el plato móvil	65
5.2	Selección del material	70
5.2.1	Característica de los materiales	70
5.2.1.1	Aluminio	70
5.2.1.2	Acero	70
5.2.2	Modelo de simulación empleando aluminio	72
5.2.2.1	Características del brazo en Aluminio	72
5.2.3	Modelo de simulación empleando acero estructural	73
5.2.3.1	Características del brazo en Acero estructural	73
5.2.4	Aluminio vs. Acero estructural	74
5.3	Optimización de masa	76
5.3.1	Modelos con diferentes masas en Ansys 11	76
5.3.1.1	Modelo 1: Masa= 4.5397 Kg.	76
5.3.1.2	Modelo 2: Masa= 2.6522 Kg.	77
5.3.1.3	Modelo 3: Masa= 2.2682 Kg.	77
5.3.1.4	Modelo 4: Masa= 1.8867 Kg	77
5.3.1.5	Modelo 5: Masa= 1.7235 Kg	78
5.3.1.6	Modelo 6: Masa= 1.5771 Kg	78
5.3.1.7	Modelo 7: Masa= 1.4235 Kg	78
5.3.1.8	Modelo 8: Masa=1.3083 Kg	79
5.3.2	Análisis del proceso de optimización de masa	80
6.	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	82
7.	BIBLIOGRAFÍA	84

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1. Robot Delta	15
Figura 2.1 Esfuerzo	20
Figura 2.2 Deformacion	20
Figura 2.3 Diagrama convencional de esfuerzo-deformación unitaria.	22
Figura 2.4 Falla del acero	24
Figura 2.5 Esfuerzo vs. Número de ciclos	26
Figura 2.6 Plataforma de Stewart.	29
Figura 2.7 Prototipo del robot DELTA patentado en EEUU (1990) por Clavel.	34
Figura 2.8 El robot Delta en la industria del empaquetado	35
Figura 2.9 El robot Delta en aplicaciones quirúrgicas	36
Figura 3.1 Robot Delta IRB 340 FlexPicker (ABB)	37
Figura 3.2 Interfase de Solid Edge	39
Figura 3.3 Piezas del robot en SOLID EDGE	41
Figura 3.4 Subconjuntos en SOLID EDGE. (a) Subconjunto brazo, (b) Subconjunto antebrazo y (c) Plataforma fija y Subconjunto brazo.	42
Figura 3.5 Ensamble final del robot delta	43
Figura 3.6 Interfase de ANSYS 11	45
Figura 3.7 Áreas del modelo de ANSYS	46
Figura 3.8 Pasos para cargar el modelo en ANSYS	47
Figura 3.9 Características del material seleccionado: (a) Librería de materiales en Ansys y (b) características mecánicas para el aluminio.	48
Figura 3.10 Contacto bonded	50
Figura 3.11 Contacto No separation	50
Figura 3.12. Barra de visualización para los grados de libertad de una unión	51
Figura 3.13 Uniones esféricas	52
Figura 3.14 Enmallado en ANSYS: (a) con relevancia de cero, (b) con relevancia de 100.	53
Figura 3.15 Relevancia de piezas: (a) brazos, (b) antebrazos	53
Figura 3.16 Enmallado "Sizing"	54
Figura 3.17 Malla finalizada	54
Figura 3.18. Fuerza de gravedad	55
Figura 3.19. Desplazamiento angular: (a) actuador 1, (b) actuador 2, (c) actuador 3.	56
Figura 3.20 Ambiente estructural dinámico completo	57
Figura 4.1 Ejemplo de trayectoria del robot Delta	58
Figura 4.2 Movimiento 1 "estrella" en 3D	59
Figura 4.3 Movimiento 2 "Cruz arriba abajo" en 3D	59
Figura 4.4 Movimiento 3 "Cuadrado abajo" en 3D.	60

Figura 4.5 Ejemplo de modelo (referencia brazos)	60
Figura 4.6 Esfuerzo movimiento 1 "estrella" (Esfuerzo vs. Tiempo).	61
Figura 4.7 Esfuerzo movimiento 2 "Cruz arriba abajo" (Esfuerzo vs. Tiempo).	61
Figura 4.8 Esfuerzo movimiento 3 "Cuadrado abajo" (Esfuerzo vs. Tiempo).	61
Figura 4.9 Área de trabajo robot Delta IRB 340 FlexPicker de ABB.	62
Figura 4.10 Desplazamiento del efector final en 3D (espacio de trabajo nuevo).	63
Figura 4.11 Moviendo de la trayectoria crítica , realizado por el robot delta en ANSYS 11.	64
Figura 5.1. Posición de máximo esfuerzo del brazo 1	66
Figura 5.2. Posición de máximo esfuerzo de la plataforma móvil	66
Figura 5.3. Zoom al máximo esfuerzo del brazo 1	67
Figura 5.4. Zoom al máximo esfuerzo de la plataforma móvil	67
Figura 5.5. Brazo 1(Esfuerzo (Mpa) vs. Tiempo(s)).	68
Figura 5.6. Brazo 2 (Esfuerzo (Mpa) vs. Tiempo(s)).	69
Figura 5.7. Brazo 3 (Esfuerzo (Mpa) vs. Tiempo(s)).	69
Figura 5.8. Plato móvil (Esfuerzo (Mpa) vs. Tiempo(s)).	69
Figura 5.9. Puente fabricado en acero	71
Figura 5.10. Modelo general de la geometría en aluminio	72
Figura 5.11. Masa del aluminio	72
Figura 5.12. Modelo general de la geometría en acero.	73
Figura 5.13. Masa del acero	73
Figura 5.14. Gráficas (Esfuerzo (Mpa) vs. Tiempo(s)). (a) Aluminio, (b) Acero estructural.	75
Figura 5.15. Modelo 1, sin vaciado, esfuerzo de 18.59 Mpa, FS > 15.	76
Figura 5.16. Modelo 2, esfuerzo de 23.906 Mpa, FS > 15.	77
Figura 5.17. Modelo 3, esfuerzo de 24.968 Mpa, FS > 15.	77
Figura 5.18. Modelo 4, esfuerzo de 27.1 Mpa, FS > 15.	77
Figura 5.19. Modelo 5, esfuerzo de 33.642 Mpa, FS > 15.	78
Figura 5.20. Modelo 6, esfuerzo de 53.576 Mpa, FS= 7.608.	78
Figura 5.21. Modelo 7, esfuerzo de 70.895 Mpa, FS= 6.337.	78
Figura 5.22. Modelo 8, esfuerzo de 120.04 Mpa, FS=1.073.	79
Figura 5.23. Relación Masa (Kg) vs. Factor de seguridad, para todos los modelos.	79
Figura 5.24. Relación Masa (Kg) vs. Esfuerzo (Mpa) para todos los modelos.	80
Figura 5.25. Gráficas de Esfuerzo (a) y factor de seguridad (b) del modelo 6.	81

LISTA DE TABLAS

Tabla 1	Dimensiones Óptimas del Robot Delta de ABB	Pág. 37
Tabla 2	Tipos de uniones empleadas en Ansys	51

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Realizar el análisis estructural de un robot paralelo industrial tipo DELTA empleando los programas SOLID EDGE y ANSYS 11, que facilite la optimización de su estructura mecánica.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Recopilar información acerca de las estrategias empleadas en el diseño de de máquinas y de las variables que se manejan en el análisis estructural.
- Desarrollar un modelo de simulación de Robot Delta en SOLID EDGE, para determinar el espacio de trabajo ocupado por cada una de las piezas, así como la posible interferencia entre ellas.
- Desarrollar un ambiente de simulación dinámica para el robot Delta empleando Flexible Dynamics de ANSYS 11.0.
- Seleccionar la trayectoria crítica para el desarrollo del análisis estructural.
- Realizar el análisis estructural del robot Delta que permita optimizar su estructura mecánica basado en uno(s) de los siguientes criterios de evaluación: geometría, vida útil, selección de materiales o factor de seguridad.

RESUMEN

ANALISIS ESTRUCTURAL DE UN ROBOT PARALELO INDUSTRIAL TIPO DELTA USANDO EL SOFTWARE DE SIMULACION “FLEXIBLE DYNAMIC” DE ANSYS 11.0

AUTOR: JHONATTAN DIDIER RUEDA FLOREZ
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRONICA
DIRECTOR: LUIS ANGEL SILVA Ph.D

PALABRAS CLAVE: ANSYS, SOLID EDGE, esfuerzo, factor de seguridad, fatiga, Flexible Dynamic, trayectoria crítica.

En este proyecto de grado se presenta una novedosa herramienta de simulación para el análisis estructural de un robot delta empleando SOLID EDGE y ANSYS 11, la cual permite optimizar la estructura mecánica del robot en cuanto a materiales, geometría y costos de fabricación.

Para el desarrollo de la herramienta de simulación se obtuvo un modelo tridimensional del robot delta en SOLID EDGE, se realizó el análisis de trayectoria dando como resultado la selección de la trayectoria crítica entre múltiples movimientos posibles. Finalmente se realizó el análisis estructural dinámico del robot en Flexible Dynamic de ANSYS 11, teniendo en cuenta las fuerzas dinámicas de inercia que intervienen en el modelo, así como el análisis de esfuerzos a lo largo de la trayectoria crítica seleccionada.

ABSTRACT

ANALISIS ESTRUCTURAL DE UN ROBOT PARALELO INDUSTRIAL TIPO DELTA USANDO EL SOFTWARE DE SIMULACION “FLEXIBLE DYNAMIC” DE ANSYS 11.0

**JHONATTAN DIDIER RUEDA FLOREZ
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRONICA
LUIS ANGEL SILVA Ph.D**

KEY WORDS: ANSYS, SOLID EDGE, STRESS, SECURITY FACTOR, FATIGUE, FLEXIBLE DYNAMIC, CRITICAL TRAJECTORY.

This thesis project involved the implementation of a new innovative simulation software tool used for the structural analysis of a Delta robot. These software programs are SOLID EDGE and ANSYS 11, which allowed the optimization of the mechanic structure of the robot in different aspects such as materials, geometry and construction costs.

For the development of the simulation tool, it was required a tridimensional model of the Delta robot with the software SOLID EDGE. An analysis of the trajectory was made to obtain a critical trajectory between multiple possible movements. Finally a dynamic structural analysis of the Delta robot was made using the Flexible Dynamic- ANSYS 11 software. For this dynamic analysis, were Taken intoaccount the dynamic forces of inertia that intervened in the model, as well as the stress analysis along the selected critical trajectory.

1. INTRODUCCIÓN

El diseño de ingeniería es el proceso de determinar componentes, sistemas o procesos que satisfagan las necesidades de la sociedad en las áreas de vivienda, producción de alimentos, transporte, comunicación, recreación y muchas otras más. Para desempeñar este importante y trascendente papel, los ingenieros deben comprender las ciencias básicas, las ciencias aplicadas y los métodos de fabricación y construcción, así como la economía, sea que se diseñe un automóvil, un avión, un puente, un edificio, un microchip o un proceso químico.

El proceso de diseño empieza con la identificación de las necesidades y expectativas del cliente. Estas deben estar formuladas de forma clara y precisa a través de las funciones, los requisitos y los criterios de evaluación del diseño.

Las funciones indican lo que debe hacer el dispositivo, mediante afirmaciones generales no cuantitativas. Los requisitos de diseño son declaraciones detalladas, en general cuantitativas, de los valores esperados de funcionamiento, condiciones ambientales de trabajo, limitaciones de espacio o peso o materiales, y componentes disponibles comercialmente que puedan usarse. Los criterios de evaluación son declaraciones de características cualitativas deseables en un diseño, que permiten hacer una evaluación crítica completa de las propiedades, las ventajas y las desventajas de cada concepto de diseño, para decidir cual es el modelo óptimo a construir, y en consecuencia viable para producir.

Los temas de mecánica de materiales son fundamentales para diseñar cualquiera de los objetos que soporten o transmitan cargas, como los puentes, edificios, tanques de almacenamiento, máquinas, vehículos terrestres, aviones. Estos temas comprenden desde el análisis de esfuerzos y deformaciones hasta la selección del material en el que será construida la estructura. Esta ciencia es conocida como análisis estructural.

El análisis estructural es la parte del proceso que comprende el diseño, cálculo y comprobación de la estructura, definiendo y calculando los movimientos, fuerzas, esfuerzos, deformaciones y cambios de energía que permitan determinar el tamaño, las formas y los materiales necesarios para cada uno de los componentes interrelacionados de la máquina, sin que exista falla alguna bajo las condiciones especificadas de carga.

El análisis estructural se hace mediante ecuaciones y teoremas de mecánica de materiales y diseño de máquinas. La elaboración de estos cálculos manualmente es muy tediosa, por lo cual organizaciones de investigación como la NASA desarrollaron en el año de 1960 programas de elementos finitos, para ayudar al desarrollo de estructuras mecánicas de la industria aeroespacial (Nastran, history).

En la actualidad, la industria del diseño emplea software que facilita su labor. Existen programas para el Diseño asistido por computador (CAD), análisis de ingeniería asistida por computador (CAE) y fabricación asistida por computador (CAM). Este conjunto de programas informáticos permiten el diseño de detalle, analizar y simular los diseños de ingeniería, valorar sus características, propiedades, viabilidad y rentabilidad. Así como, optimizar su desarrollo y consecuentes costos de fabricación y reducir al máximo las pruebas para la obtención del producto deseado y por último facilitar su fabricación física. En este proyecto se empleará los siguientes softwares de simulación: SOLID EDGE (CAD) y ANSYS WORKBENCH (CAE).

La robótica ocupa en la actualidad un papel preponderante en el proceso de modernización e innovación de las industrias. Es conocido que ésta contribuye fundamentalmente a la calidad del producto y al mejoramiento de la productividad.

Los manipuladores robóticos son una de las mejores soluciones para sustituir al hombre en procesos repetitivos, trabajos que se desarrollan en ambientes tóxicos, con factores de riesgo elevados, en tareas complejas, en tareas muy rápidas, en elaboraciones a escala micro o macroscópica, etc. Esto ha motivado que una parte del ambiente científico internacional esté inmerso en el diseño y desarrollo de estos mecanismos.

En general, el proceso de diseño de un robot industrial parte de unas especificaciones deseadas de operación según las necesidades de la aplicación. Entre estas especificaciones de operación se encuentran: el máximo espacio de trabajo, la velocidad máxima del efector final, la precisión del posicionamiento, el peso de la estructura, los materiales empleados, los costos de fabricación, entre otros.

Una vez definidas las especificaciones de operación, el proceso de diseño de un robot industrial cumple las siguientes etapas: optimización cinemática, optimización dinámica, análisis de trayectorias y diseño del sistema de control. La optimización cinemática permite seleccionar la estructura mecánica y las longitudes de cada uno de sus eslabones. La optimización dinámica, emplea el análisis estructural para definir las fuerzas, esfuerzos, deformaciones, materiales y geometría de cada uno de los componentes de la estructura mecánica, así como seleccionar comercialmente los actuadores del robot. El análisis de trayectorias define las posibles “trayectorias críticas”. En estas trayectorias la estructura mecánica del robot experimenta los máximos esfuerzos. El diseño del sistema de control toma en cuenta la dinámica del sistema y permite al efector final cumplir con los requerimientos de operación deseados en precisión, velocidad y suavidad de movimiento (Ángel, 2005).

En esta tesis se plantea el análisis estructural de un robot Delta usando ANSYS 11.0. La selección de la estructura mecánica del robot es una consecuencia de los

altos requerimientos del sistema en cuanto a velocidad, aceleración y exactitud. El robot Delta (Fig. 1.1), está 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 está 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 está 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 (Delta, 1988).

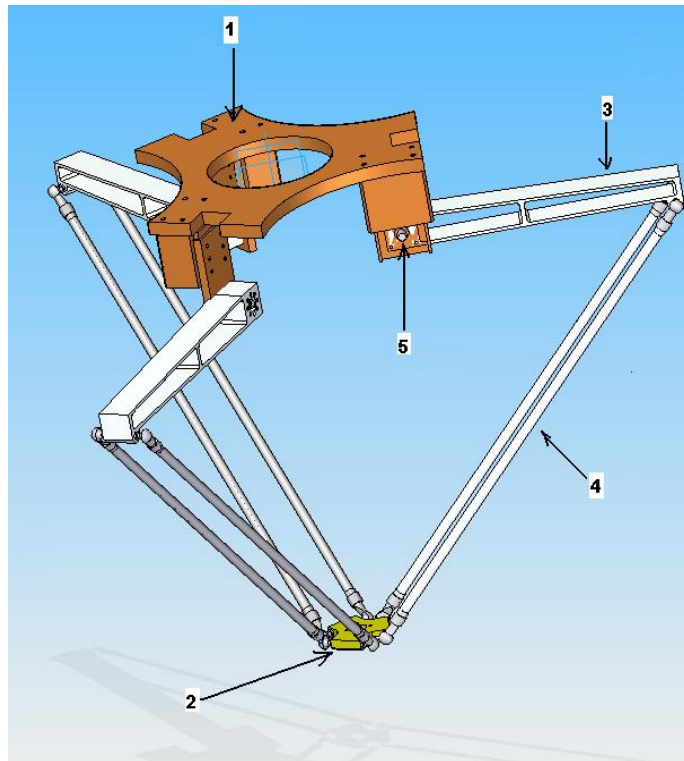


Fig. 1.1. Robot Delta

Como resultado de este proyecto de grado se presenta una novedosa herramienta de simulación para el análisis estructural de un robot delta empleando SOLID EDGE y ANSYS 11, la cual permite optimizar la estructura mecánica del robot en cuanto a materiales, geometría y costos de fabricación.

Para el desarrollo de la herramienta de simulación se obtuvo un modelo tridimensional del robot delta en SOLID EDGE, se realizó el análisis de trayectoria dando como resultado la selección de la trayectoria crítica entre múltiples movimientos posibles y finalmente se realizó el análisis estructural dinámico del robot en Flexible Dynamic de ANSYS 11, teniendo en cuenta las fuerzas dinámicas de inercia que intervienen en el modelo, así como el análisis de esfuerzos a lo largo de la trayectoria crítica seleccionada.

A continuación se presentará los principales temas tratados así como los resultados obtenidos a lo largo del desarrollo de este proyecto.

Inicialmente se revisa el estado actual para el diseño de máquinas y el análisis estructural. Luego se presenta el concepto fundamental del robot paralelo y su aplicación al robot delta. Los modelos de simulación desarrollados en SOLID EDGE y ANSYS 11 son presentados en el capítulo 3. El análisis de trayectoria y la selección del movimiento crítico son tratados en el capítulo 4. En el capítulo 5 se presenta el análisis estructural del robot delta y la optimización de su estructura mecánica. Finalmente, se presenta las conclusiones y aportes de este proyecto, así como la bibliografía tratada.

2. MARCO TEORICO

En este apartado se revisa el estado actual de la técnica para el diseño de máquinas y el análisis estructural, adicionalmente se introduce el robot paralelo.

Inicialmente, se presenta el estado del arte del diseño mecánico y el análisis estructural, donde se tocan aspectos tales como diseño de ingeniería, iteración, análisis estructural, diagrama de esfuerzo-deformación unitaria, fatiga, filosofía del diseño entre otros. Luego se introduce al robot paralelo con sus principales líneas actuales de investigación y por ultimo se profundiza de manera especial en la estructura DELTA, que es la empleada en el proyecto como modelo de simulación.

2.1. Diseño de máquinas

2.1.1. Diseño de ingeniería

El diseño de ingeniería se puede definir como el proceso de aplicar las diversas técnicas y los principios científicos con el objetivo de definir un dispositivo, un proceso o un sistema con suficiente detalle para permitir su realización.

El diseño de máquinas se ocupa de la creación de maquinaria que funcione segura y confiablemente bien. Una máquina puede definirse de muchas maneras, entre ellas las dos siguientes:

- Aparato formado de unidades interrelacionadas.
- Dispositivo que modifica una fuerza o un movimiento.

Las partes interrelacionadas a las cuales hace referencia la definición a veces también se conocen en este contexto como elementos de máquinas. La idea de trabajo útil es fundamental a la función de una máquina, ya que en ello casi siempre habrá alguna transferencia de energía. La mención de fuerzas y movimientos también es vital para nuestros intereses ya que, al convertir la energía de una forma a otra, las máquinas crean movimientos y generan fuerzas. Es la tarea del ingeniero definir y calcular movimientos, fuerzas y cambios de energía a fin de determinar el tamaño, las formas y los materiales necesarios para cada uno de los componentes interrelacionados de la máquina. En ello está la esencia del diseño de máquinas.

Aunque por necesidad se debe diseñar una máquina elemento por elemento, es vital reconocer que la función y el desempeño de cada una de las partes (y por lo tanto su diseño) dependen de muchas otras piezas interrelacionadas dentro de la máquina misma.

El objetivo último en el diseño de máquinas es dimensionar y formar las piezas (elementos de máquinas) y escoger materiales y procesos de manufactura apropiados, de manera que la máquina resultante se comporte o lleve a cabo sin falla su función pretendida. Esto requiere que el ingeniero sea capaz de calcular y prever el modo y las condiciones de falla de cada uno de los elementos, y acto seguido diseñarlo para evitar tales condiciones. Esto obliga a que se efectúe un análisis de esfuerzos y deflexión para cada pieza. Dado que los esfuerzos son una función de las cargas aplicadas y de inercias, así como de la geometría de la misma, deberá llevarse a cabo un análisis de fuerzas, momentos, pares de torsión y dinámica del sistema, antes que calcular completamente los esfuerzos y las deflexiones.

Si la máquina a diseñar no tiene partes en movimiento se le llama estructura, entonces la tarea de diseño se hace mucho más sencilla, ya que solo es necesario un análisis de fuerzas estáticas. Las estructuras asimismo deben diseñarse contra fallas y, de hecho, grandes estructuras externas (puentes, edificios, etcétera) también están sujetas a cargas dinámicas por el viento, terremotos, el tránsito, etcétera; por lo tanto, también deben diseñarse para que soporten tales condiciones. Si los movimientos de la máquina son muy lentos y las aceleraciones despreciables, entonces bastará un análisis de fuerzas estáticas. Si la máquina incluye aceleraciones significativas, entonces será necesario un análisis de fuerzas dinámicas y las partes sometidas a una aceleración se “convierten en víctimas de su propia masa”.

Como ejemplo podemos tomar una estructura estática, como el piso de un edificio, diseñado para soportar un peso en particular, el factor de seguridad de la estructura se incrementa añadiendo material, apropiadamente distribuido, a sus partes estructurales. Aunque resultara mas pesado (mas peso muerto), si esta correctamente diseñado, soporta mas peso vivo (carga útil) que antes, y todavía sin falla. En una máquina dinámica, añadir peso (masa) a partes en movimiento pudiera tener el efecto opuesto, con lo que se reduciría el factor de seguridad de la máquina, su velocidad permisible y su capacidad de carga útil. Esto se debe a que parte de la carga que genera los esfuerzos en las partes en movimiento es consecuencia de las fuerzas de inercia previstas por la segunda ley de Newton, $F=ma$. Dado que la aceleraciones de las partes en movimiento dentro de la máquina esta dictada por su diseño cinemático y por su velocidad de operación, agregar masa en partes en movimiento incrementara las cargas por inercias de estas mismas partes o piezas, a menos de que se reduzcan sus aceleraciones cinemáticas bajando la velocidad de operación. Aunque la masa añadida pudiera aumentar la resistencia de la pieza, dicho beneficio quedaría reducido o cancelado por los incrementos resultantes en fuerzas de inercia.

2.1.1.1 Iteración

Por lo general, antes de llegar a la etapa de dimensionar las piezas ya se han definido los movimientos cinemáticos de la máquina. Además, se sabrán cuales son las fuerzas externas que aporta el “mundo exterior”. En algunos casos, las cargas externas sobre la máquina serán muy difíciles de prever, como las de un automóvil en movimiento. El diseñador no puede prever con exactitud a que cargas presentes en el entorno someterá el usuario la máquina (baches, virajes bruscos, etcétera). En estos casos, un análisis estadístico, partiendo de datos empíricos obtenidos de pruebas reales suele proporcionar alguna información para efectos de diseño.

Lo que queda por definir son las fuerzas de inercia generadas por aceleraciones cinemáticas ya conocidas. Aquellas que actúan sobre las no definidas masas de partes en movimiento. Este dilema se resuelve únicamente por iteración. Se debe asumir alguna configuración de prueba para cada pieza, aplicar las propiedades de la masa (masa, localización del centro de gravedad y momento de inercia) de esta configuración de prueba en un análisis de fuerzas dinámico para determinar fuerzas, momentos y pares de torsión que actúan sobre la pieza, y a continuación aprovechar la geometría de la sección transversal del diseño de prueba para calcular los esfuerzos resultantes. En general, la determinación precisa de todas las cargas sobre una máquina es la tarea mas difícil del proceso de diseño. Una vez conocidas las cargas, es posible calcular los esfuerzos.

Lo más probable es que en la primera prueba se encuentre que el diseño falla o que los materiales no resisten los niveles de esfuerzos que se presentan. Entonces se debe volver a diseñar la pieza (hacer una iteración) cambiando forma, dimensiones, materiales, procesos de manufactura y otros factores, a fin de alcanzar un diseño aceptable.

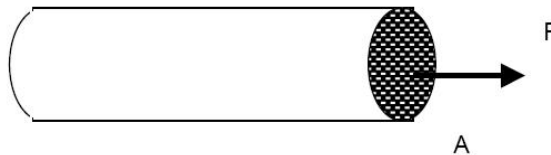
Por lo general no es posible conseguir un resultado de éxito sin tener que efectuar varias iteraciones siguiendo este proceso de diseño. Observe también que un cambio en la masa de la pieza también afectara a fuerzas que se apliquen a piezas interconectadas con ella, y por lo tanto, también ellas necesitaran ser rediseñadas (Robert L. Norton, Diseño de máquinas).

2.1.2. Análisis Estructural

El análisis estructural es la parte del proceso del proyecto que comprende el diseño, cálculo y comprobación de la estructura, permitiendo establecer las condiciones de idoneidad de la estructura respecto a su finalidad. Dentro del análisis estructural se encuentran conceptos tales como esfuerzo, deformación, diagrama de esfuerzo-deformación unitaria, fatiga, factor de seguridad y filosofía

del diseño entre otros los cuales son conceptos importantes de aclarar para una mayor comprensión.

2.1.2.1 Esfuerzo: es la resistencia interna que ofrece una unidad de área de un material contra una carga externa aplicada (Figura 2.1).



$$\text{Esfuerzo} = \frac{\text{Fuerza aplicada}}{\text{Area sobre la cual se aplica la fuerza}}$$

Fig. 2.1. Esfuerzo

2.1.2.2 Deformación: Cualquier fuerza externa que se aplique sobre un material causa deformación. Para el caso de una fuerza de tensión, el material se alarga en sentido de la aplicación de la fuerza, y se acorta en la dirección transversal de la fuerza, como se observa en la Figura 2.2.

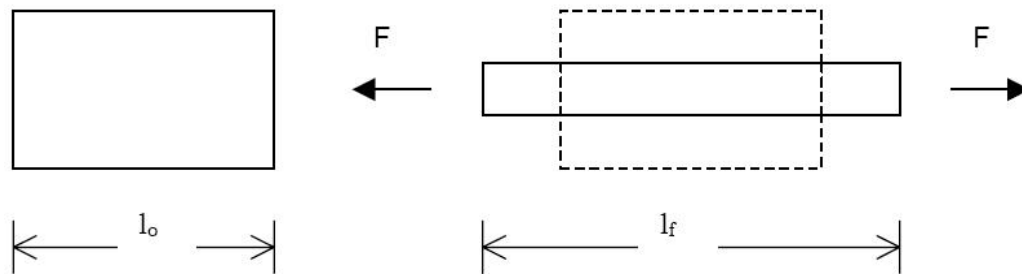


Fig. 2.2. Deformación

La deformación del material se define como el cambio en la longitud a lo largo de la línea de aplicación de la fuerza. En forma matemática:

$$\text{Deformación} = \Delta L = L_f - L_o$$

2.1.2.3 El diagrama de esfuerzo-deformación unitaria

A partir de los datos de un ensayo de tensión o de compresión, es posible calcular varios valores del esfuerzo y la deformación unitaria de una pieza y luego graficar los resultados. La curva resultante se llama diagrama de esfuerzo-deformación unitaria y hay dos maneras de describirlo.

Usando los datos registrados, se puede determinar el esfuerzo nominal o de ingeniería dividiendo la carga P aplicada entre el área A_0 de la sección transversal original de la pieza. Este cálculo supone que el esfuerzo es *constante* en la sección transversal y en toda la región entre los puntos calibrados:

$$\sigma = P/A_0$$

De la misma manera, la deformación nominal o de ingeniería se determina directamente leyendo el calibrador o dividiendo el cambio en la longitud calibrada δ , entre la longitud calibrada original de la pieza L_0 . Aquí se supone que la deformación unitaria es constante en la región entre los puntos calibrados. Entonces,

$$\epsilon = \delta / L_0$$

Si se graficaran los valores correspondientes de σ y ϵ , con los esfuerzos como ordenada y las deformaciones unitarias como abscisas, la curva resultante se llama diagrama convencional de esfuerzo-deformación unitaria. Este diagrama es muy importante en la ingeniería ya que proporciona los medios para obtener datos sobre la resistencia a tensión (o a compresión) de un material sin considerar el tamaño o forma geométrica del material. Sin embargo, debe ser claro que nunca serán exactamente iguales dos diagramas de esfuerzo-deformación unitaria para un material particular, ya que los resultados dependen entre otras variables de la compresión del material, de imperfecciones microscópicas, de la manera en que este fabricado, de la velocidad de carga y de la temperatura durante la prueba.

A manera de ejemplo a continuación se presenta las características de la curva convencional esfuerzo deformación unitaria del *acero*, material comúnmente usado para la fabricación de miembros estructurales y elementos mecánicos. En la figura 2.3 se muestra el diagrama característico de esfuerzo-deformación unitaria de una probeta de acero, usando el método antes descrito. En esta curva podemos identificar cuatro maneras diferentes en que el material se comporta, dependiendo de la cantidad de la deformación unitaria inducida en el material, las cuales son: Comportamiento elástico, Fluencia, Endurecimiento por deformación y Formación del cuello o estricción. A continuación se relacionan cada uno de estos conceptos.

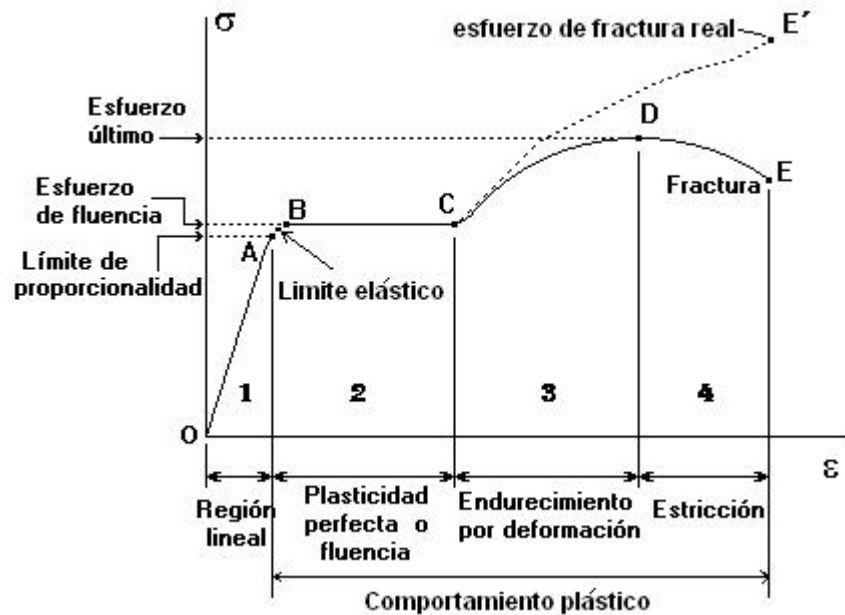


Fig. 2.3. Diagrama convencional de esfuerzo-deformación unitaria.

Comportamiento elástico

Este comportamiento elástico ocurre cuando las deformaciones unitarias en el modelo están dentro de la región número 1 de la curva mostrada en la Figura 2.3, Puede verse que la curva es en realidad una *línea recta* a través de toda esta región, así que el esfuerzo es proporcional a la deformación unitaria. En otras palabras se dice que el material es *linealmente elástico*. El límite superior del esfuerzo en esta relación lineal se llama límite de proporcionalidad, σ_{lp} . Si el esfuerzo excede un poco el límite de proporcionalidad, el material puede todavía responder elásticamente; sin embargo, la curva tiende a aplanarse causando un incremento del esfuerzo. Esto continúa hasta que el esfuerzo llega al límite elástico, Para determinar este punto en cualquier pieza, se debe aplicar, y luego retirar, una carga creciente hasta que se detecte una deformación permanente en el mismo. Sin embargo, en el acero rara vez se determina el límite elástico, puesto que esta muy cerca del límite de proporcionalidad y, por tanto, su detección es bastante difícil.

Fluencia

Un ligero aumento en el esfuerzo más allá del límite elástico provocará un colapso del material y causará que se *deforme permanente*. Este comportamiento se llama fluencia, y esta indicado por la región número 2 de la curva (Figura 2.3). El esfuerzo que origina la fluencia se llama esfuerzo de fluencia o punto de fluencia, σ_y , y la deformación que ocurre se llama deformación plástica. Aunque no se muestra en la Figura 2.3, en los aceros con bajo contenido de carbono o en aquellos que sean laminados o rodados en caliente, se distinguen dos valores para el punto de fluencia. El punto superior de fluencia ocurre primero, seguido por una disminución súbita en la capacidad de soportar carga hasta un *punto inferior de*

fluencia. Sin embargo, una vez que se ha alcanzado el punto inferior de fluencia, la pieza continua alargándose *sin ningún incremento de carga*. La Figura 2.3 no esta trazada a escala. Si lo estuviera, la deformaciones unitarias inducidas debido a la fluencia seria de 10 a 40 veces mas grande que las producidas hasta el límite elástico. Cuando el material esta en este estado, suele decidirse que es perfectamente plástico.

Endurecimiento por deformación

Cuando la fluencia ha terminado, puede aplicarse mas carga a la probeta, resultando una curva que se eleva continuamente pero se va aplanando hasta llegar a un esfuerzo máximo, llamado esfuerzo último, σ_n . La elevación en la curva de esta manera se llama endurecimiento por deformación, y se identifica en la Figura 2.3 como la región número 3, a lo largo de la prueba, y mientras el espécimen se esta alargando, el área de su sección transversal disminuirá. Esta disminución de área es bastante *uniforme* en toda la longitud calibrada del espécimen, incluso hasta la deformación unitaria que corresponde al esfuerzo último.

Formación del cuello o estricción

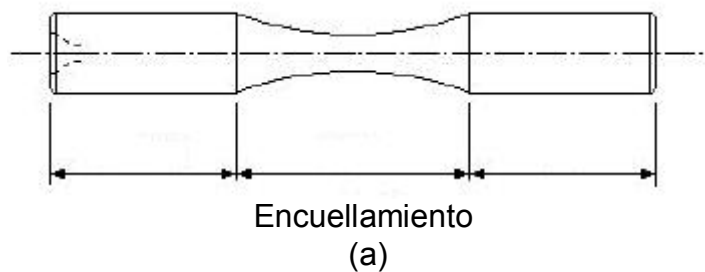
En el esfuerzo último, el área de la sección transversal comienza a disminuir en una zona localizada de la probeta, en lugar de hacerlo en toda su longitud. Este fenómeno es causado por planos de deslizamiento que se forman dentro del material y las deformaciones producidas son causadas por esfuerzos cortantes. Como resultado, tiende a desarrollarse un “cuello” en esta zona a medida que la probeta se alarga cada vez mas, Figura 2.4 (a). Puesto que el área de la sección transversal en esta zona esta decreciente. De aquí que el diagrama de esfuerzos-deformación unitaria tienda a curvase hacia abajo hasta que la probeta se rompe en el punto de esfuerzo de fractura, σ_f , Figura 2.4 (b). Esta región de la curva debido a la deformación del cuello está representada como la zona 4 en la Figura 2.3.

Diagrama real de esfuerzo-deformación unitaria

En lugar de usar siempre el área de la sección transversal y la longitud *originales* de la muestra para calcular el esfuerzo y la deformación unitaria (de ingeniería), se podría haber usado el área de la sección transversal y la longitud *reales* de la pieza en el *instante* en que la carga se esta midiendo. Los valores del esfuerzo y de las deformaciones unitarias calculados a partir de estas mediciones se llaman *esfuerzo real y deformación unitaria real*. y un trazo de sus valores se llama diagrama real de esfuerzo-deformación unitaria. Cuando se traza este diagrama, se observa que tiene la forma mostrada por la línea que forma la curva en la Figura 2.3. Ambos diagramas (el convencional y el real) prácticamente coinciden cuando la deformación unitaria es pequeña. Las diferencias entre los diagramas comienzan a aparecer en la zona de endurecimiento por deformación, donde la magnitud de la deformación unitaria es más significativa. En particular, la gran divergencia dentro de la zona de formación del cuello. Se observa que según el

diagrama $\sigma - \epsilon$ convencional, la probeta de ensayo *en realidad* soporta una carga decreciente, puesto que A_0 es constante cuando se calcula el esfuerzo nominal, $\sigma = P/A_0$. Sin embargo, según el diagrama $\sigma - \epsilon$ real, el área real A dentro de la región de formación del cuello esta siempre decreciendo hasta que ocurre la falla σ_f , y así el material realmente soporta un *esfuerzo creciente*, puesto que $\sigma = P/A$.

Aunque los diagramas de esfuerzo-deformación real y convencional son diferentes, la mayor parte del diseño en ingeniería se lleva a cabo dentro de la zona elástica, ya que la distorsión del material en general no es severa dentro de este intervalo. Siempre que el material sea “rígido”, como son la mayoría de los metales, la deformación unitaria hasta el límite de elasticidad permanece pequeña y el error en el uso de los valores nominales de σ y de ϵ será muy pequeño (alrededor de 0.1%) comparado con sus valores verdaderos. Esta es una de las razones primordiales para usar diagramas de esfuerzo-deformación convencionales (R.C. Hibbeler, Mecánica de materiales).



Falla de un material dúctil.
(b)

Fig. 2.4. Falla del acero

2.1.2.4 Cargas repetidas. Fatiga

Si el esfuerzo máximo en la probeta no excede el límite elástico del material, la probeta retorna a sus condiciones iniciales cuando se retira la carga. Ciertamente se podrá concluir que una carga dada puede repetirse muchas veces, siempre que los esfuerzos permanezcan en los rangos elásticos. Tal conclusión es correcta para ciclos que se repitan unas pocas docenas o aun centenares de veces. Sin embargo, esto no se cumple cuando los ciclos se repiten miles o millones de veces. En tales casos, la ruptura ocurrirá a esfuerzos muchos mas bajos que la resistencia estática de ruptura. Este fenómeno se conoce como *fatiga*. Una falla por fatiga es de naturaleza frágil aun para materiales normalmente dúctiles.

Se debe considerar la fatiga en el diseño de todos los componentes estructurales y de máquinas que están sometidas a cargas repetidas o fluctuante. El número de ciclos de carga que puede esperarse durante la vida útil de una componente varia mucho. Por ejemplo, una viga que soporta una grúa industrial puede cargarse dos millones de veces en 25 años (300 cargas por día de trabajo), el eje de un auto tendrá medio millón de ciclos en 200000 millas, y una hoja de turbina, varios cientos de billones de ciclos durante su vida útil.

Algunas cargas son de naturaleza fluctuante. Por ejemplo, el tráfico sobre un puente causara niveles de esfuerzos que fluctúan con respecto al nivel de esfuerzos debido al peso del puente. Una condición más serena ocurre cuando se produce una inversión de carga durante el ciclo carga. Los esfuerzo en el eje de un vagón de ferrocarril, por ejemplo, se invierten completamente después de cada media vuelta de la rueda.

El número de ciclos de carga necesarios para causar la falla de una probeta sometida sucesivamente a carga e inversión de carga puede determinarse experimentalmente para cualquier nivel de esfuerzo. Si se realiza una serie de pruebas a diferentes niveles de esfuerzos, los resultados pueden graficarse como una curva σ -n. para cada prueba el máximo esfuerzo σ se traza como ordenada y el número de ciclos como abscisa. Puesto que los ciclos son números grandes, se trazan escala logarítmica.

La Figura 2.5 muestra una curva σ -n típica para acero. Obsérvese que si el máximo esfuerzo aplicado es grande, pocos ciclos, relativamente, se requieren para la ruptura. A medida que se reduce el esfuerzo máximo, el número de ciclos necesarios para causar la ruptura aumenta hasta que se alcanza un esfuerzo llamado *límite de fatiga*. El límite de fatiga es el esfuerzo para el cual no ocurre ruptura, aun para numerosos ciclos de carga. Para aceros con bajo contenido de carbono como el acero estructural, el límite de fatiga es aproximadamente la mitad de su resistencia última.

Para metales no ferrosos, como aluminio y cobre, una curva σ -n típica (Figura 2.5) muestra que el esfuerzo de falla continua creciendo al aumentar el número de ciclos. Para tales materiales se define el *límite de fatiga* como el esfuerzo correspondiente a la falla después de un número especificado de ciclos, tal como 500 millones.

El examen de probetas, de ejes, de resortes y de otros componentes que han fallado por fatiga muestra que la falla se inicia en grietas microscópicas o en alguna imperfección similar. En cada ciclo la grieta se agranda ligeramente. Durante los ciclos de carga sucesivos la grieta se propaga a través del material hasta que la parte sana es insuficiente para resistir la carga y sobre viene entonces una falla súbita y quebradiza. Como la fatiga puede presentarse en cualquier grieta o imperfección, el estado de la superficie de la pieza tiene un efecto importante en el valor que se obtiene en el límite de fatiga. El límite de fatiga para elementos bien terminados y pulidos es mayor que para componentes corroídas. En aplicaciones en el mar o cerca de el, o en otros casos donde se pueda esperar corrosión, podría anticiparse una reducción del 50% en el límite de fatiga (Ferdinand P. Beer, E y Russell Johnston, Jr, McGRAW-HILL).

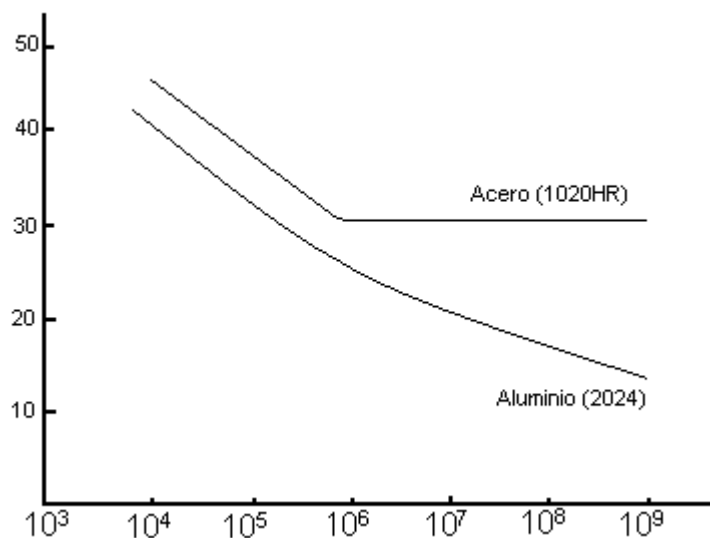


Fig. 2.5. Esfuerzo vs. Número de ciclos.

2.1.2.5 Factor de seguridad

El factor de seguridad es un número que se utiliza en ingeniería para los cálculos de diseño de elementos o componentes de maquinaria, estructuras o dispositivos en general, proporcionando un margen extra de prestaciones por encima de las máximas estrictamente necesarias.

El intervalo normal de valores del factor de seguridad va de 1.3 a 3 aunque en ocasiones se puede aplicar un valor hasta de 10. El uso de un valor pequeño para el factor de seguridad (por ejemplo $FS=1.1$) solo se puede justificar cuando es posible reducir al mínimo, mediante análisis y pruebas, las incertidumbres, y cuando no hay probabilidad de que la falla ocasione circunstancias inaceptables. Como por ejemplo muertes o lesiones graves en el personal, por otro lado, no es conveniente usar un factor de seguridad innecesariamente grande como $FS>3$, porque conduciría a un exceso de peso estructural y eso, a su vez, implica exceso de costos iniciales y de operación. Como la elección de un valor de factor de seguridad tiene tantas e importantes implicaciones económicas y legales, las especificaciones del de diseño, que incluyan el o los factores de seguridad relevantes que se vayan a emplear, se deben aplicar a códigos u otras normas de diseño desarrollados por grupos de ingenieros experimentado, en asociaciones de ingenieros o en diversas oficinas gubernamentales. Como ejemplo de esos códigos y especificaciones tenemos: 1) para acero: *Code of Standard Practice for steel Buildings and bridges*, por el American Institute of steel construction, Y 2) para concreto: *Building Code Requirement for reinforced concrete* (ACI318-89), por el american Concrete Institute (Roy R. Craig, JR, 2002).

2.1.2.6 Filosofía del diseño

Todos los métodos de diseño deben definir la relación entre el esfuerzo aplicado sobre un componente y la resistencia del material con el que se va a fabricar, al considerar las condiciones de servicio. El criterio de diseño puede ser la resistencia de fluencia en tensión, compresión o cortante; la resistencia última en tensión, compresión o cortante; la resistencia a la fatiga, o alguna combinación de ellas. El objetivo del proceso de diseño es obtener un factor de diseño adecuado (a veces llamado *factor de seguridad*) que garantice que el componente sea seguro. Esto es, la resistencia del material debe ser mayor que los esfuerzos aplicados.

La secuencia del análisis de diseño será distinta, dependiendo de lo que se haya especificado y de lo que queda por determinar. Por ejemplo:

1. Se conoce la geometría del componente y sus cargas: Se aplica el factor de diseño N adecuado al esfuerzo real que se espera. Para determinar la resistencia requerida del material. Entonces se podrá especificar un material apropiado.

2. Se conoce las cargas y se ha especificado el material del componente: Se calcula el esfuerzo de diseño mediante la aplicación del factor de diseño N deseado, a la resistencia correspondiente del material. Esta es la resistencia admisible máxima donde se puede exponer cualquier parte del componente.

Entonces se podrá completar el análisis de esfuerzos, para determinar que forma y tamaño del componente garantizan que los esfuerzos sean seguros.

3. Se conoce las cargas, y se ha especificado el material y la geometría completa del componente: se calcula tanto el esfuerzo aplicado máximo como el esfuerzo de diseño. Al comparar estos esfuerzos, se podrá determinar el factor de diseño N para el diseño propuesto, y juzgar su aceptación. Podrá necesitarse un rediseño, si el factor es demasiado bajo (inseguro) o demasiado alto (sobrediseñado) (Robert L. Mott, 2006).

2.2. 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.

La estructura cinemática de los robots paralelos se conoce desde hace mucho tiempo. Ya en 1813, Cauchy estudió la rigidez de un octaedro articulado (Cauchy, 1813). Sin embargo, fue mucho más tarde cuando Gough y Whitehall (1962) propusieron un mecanismo similar para el ensayo de neumáticos (Gough, V.E., Whitehall, S.G, 1962).

En 1965 Stewart 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 (Figura 2.6) (Stewart D, 1965).

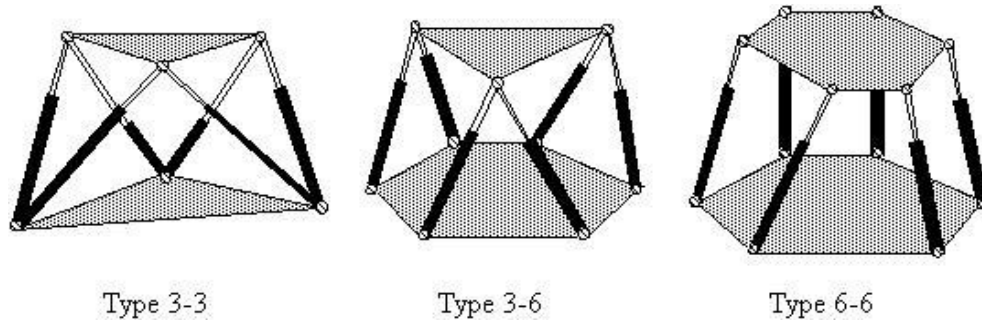


Figura 2.6. Plataforma de Stewart (Stewart D, 1965).

2.2.1 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.

2.2.1.1 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.

2.2.1.2 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.

2.2.1.3 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.

2.2.1.4 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 robots 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).

2.2.1.5 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 lagrangiana, 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.

2.2.1.6 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 (Clavel, 1988) 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) empleó el control cinemático y realizó 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.

2.2.1.7 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).

2.2.2. El Robot Paralelo Tipo DELTA

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 (Clavel, 1988).

En la Figura 2.7, 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.

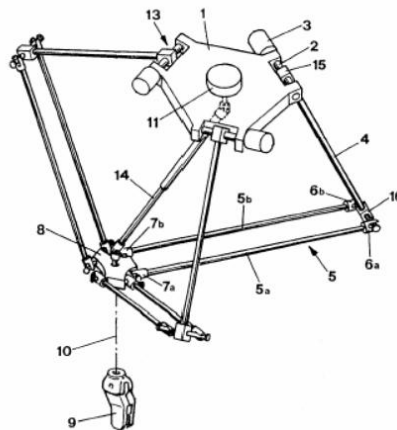


Figura 2.7. Prototipo del robot DELTA patentado en EEUU (1990) por Clavel. (Patente No. 4.976.582).

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 traslacionales. 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.

2.2.2.1 El robot Delta en la Industria

La historia del marketing del robot Delta es larga y complicada. Todo comenzó en 1983, cuando los hermanos suizos Marc-Olivier y Pascal Demaurex crearon la compañía Demaurex 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. Después de varios años, Demaurex ocupaba un importante lugar en este mercado. Cuatro versiones eran comercializadas bajo los nombres de: Pack Place, Line-Placer, Top-Placer, y Presto. En la figura 2.8 se muestra una aplicación de robot delta en la industria del empaquetamiento



Figura 2.8. El robot Delta en la industria del empaquetado (Ángel, 2005).

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 2.9. La tecnología del robot Delta fue consecuentemente vendida a Medtronic al final de 1999.



Figura 2.9 El robot Delta en aplicaciones quirúrgicas (Ángel, 2005).

Actualmente, el robot paralelo delta se encuentra presente en diferentes sectores como alimentario, farmacéutico, las industrias electrónicas, la soldadura, el montaje, entre otras.

3. MODELOS DE SIMULACION

Los modelos de simulación fueron desarrollados en 2 programas informáticos. Un programa de diseño asistido por computador llamado SOLID EDGE y un programa de análisis de elementos finitos llamado ANSYS 11. Estos dos programas de simulación trabajan conjuntamente debido a sus características especiales ideales para el diseño y análisis de estructuras móviles como robots, permitiendo simular los diseños de ingeniería, valorado sus características, propiedades, viabilidad y rentabilidad. Así como, optimizar su desarrollo y consecuentes costos de fabricación.

En este proyecto se va a utilizar como base de simulación el robot Delta IRB 340 FlexPicker (Figura 3.1), Este robot es un robot industrial de estándar internacional fabricado por ABB.

Las dimensiones de la estructura mecánica aparecen en la tabla 1.

Tabla 1. Dimensiones Óptimas del Robot Delta de ABB

Parámetros Geométricos	Valor Optimo
Radio del anillo fijo (R)	297.5 mm
Radio del anillo móvil (r)	63 mm
Longitud del brazo (La)	900 mm
Longitud del antebrazo (Lb)	540 mm



Figura 3.1 Robot Delta IRB 340 FlexPicker (ABB).

3.1 Solid Edge

Solid Edge es un programa de parametrizado de piezas en 3D basado en un software de sistema de diseño asistido por ordenador (CAD). Permite el modelado de piezas de distintos materiales, doblado de chapas, ensamblaje de conjuntos, soldadura y funciones de dibujo en plano para ingenieros (generación de planos). Este es uno de los paquetes instalados a enterrar el uso masivo del CAD 2D dando paso al CAD 3D.

Actualmente Solid Edge cuenta con tecnología Synchronous la cual consiste en eliminar el orden de generación de las operaciones en el diseño de piezas, lo que quiere decir esto es que no importa el orden en que se han creado las operaciones, recalcula sólo las geometrías necesarias, y con la introducción de la steering wheel, podemos dinámicamente modificar los sólidos sin siquiera tocar el boceto. Esta tecnología también permite actuar sobre las operaciones de geometrías importadas de otras plataformas CAD con total libertad, acelerando el proceso de creación y modificación de geometría entre empresas que cuentan con programas diferentes.

3.1.1 Historia Solid Edge

Presentado en 1996, inicialmente fue desarrollado por Intergraph como uno de los primeros entornos basados en CAD para Windows NT, ahora pertenece y es desarrollado por SIEMENS. Su kernel de modelado geométrico era originalmente ACIS, pero fue cambiado a Parasolid.

Recientemente adquirido por Siemens AG está empezando a formar parte de todas sus plantas de producción e ingeniería por lo que está sufriendo unas mejoras considerables. Esta inclusión de Solid Edge dentro de Siemens está suponiendo muchos cambios funcionales dentro del software que lo están mejorando notablemente y está ayudando a que evolucione.

Dentro de las mejoras más notables en esta última versión v.20 cabe destacar la traducción de archivos de otras plataformas, lo que permitirá sin duda que se abra paso en sectores antes condenados al uso de un determinado software por la falta de compatibilidad de sus archivos con otros paquetes de CAD. Entre sus similares encontramos al Autodesk Inventor, al Solidworks, al Pro Engineer.

3.1.1.1 Interfase SOLID EDGE

La interfaz gráfica de usuario empleada por Solid Edge se muestra en la Figura 3.2. En ella se destacan las siguientes secciones: barra principal, barra de operaciones, ventana del modelo, entre otras. A continuación se describen brevemente cada una de las secciones.

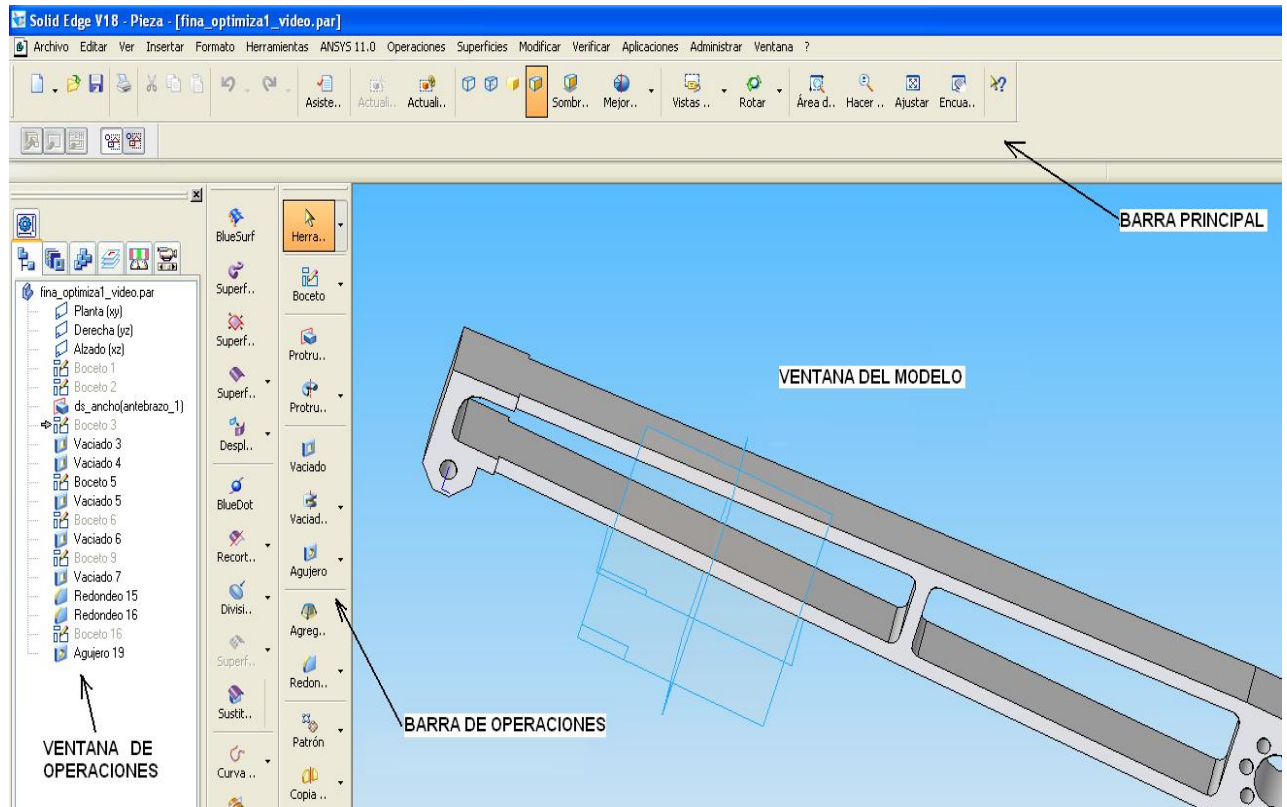


Fig. 3.2. Interfase de Solid Edge.

Barra principal: En esta barra se encuentra herramientas para guardar, abrir, crear una nueva pieza además también se encuentran herramientas para visualizar la pieza con la cual se está trabajando. Como: ajustar, rotar, área de zoom, encuadre, hacer zoom, sombrear, etc.

Barra de operaciones: en esta barra se encuentran las herramientas principales de Solid Edge para la construcción de piezas las cuales son: protrusiones, vaciados, agujeros, redondeo, bocetos, protrusion por revolución, cotas, etc.

Ventana de operaciones: la ventana de operaciones almacena todas las operaciones que se han elaborado para la realización de la pieza, como también muestra el estado de la operación, además permite pararse sobre cualquier operación deseada y modificarla o eliminarla.

Ventana del modelo: la ventana del modelo permite visualizar la pieza que se esta elaborando de forma tridimensional.

3.1.2 Modelo de de simulación en SOLID EDGE

En esta sección se mostrará 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. Se ha utilizando las longitudes de los eslabones y los radios de las plataformas del robot delta de ABB.

3.1.2.1 Piezas

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

En la Figura 3.3 se puede observar algunas piezas claves en la construcción del robot delta a través de SOLID EDGE: el acople entre el brazo y el motor, plataforma fija, uniones de las barras del antebrazo, uniones esféricas, plataforma móvil y brazo del robot.

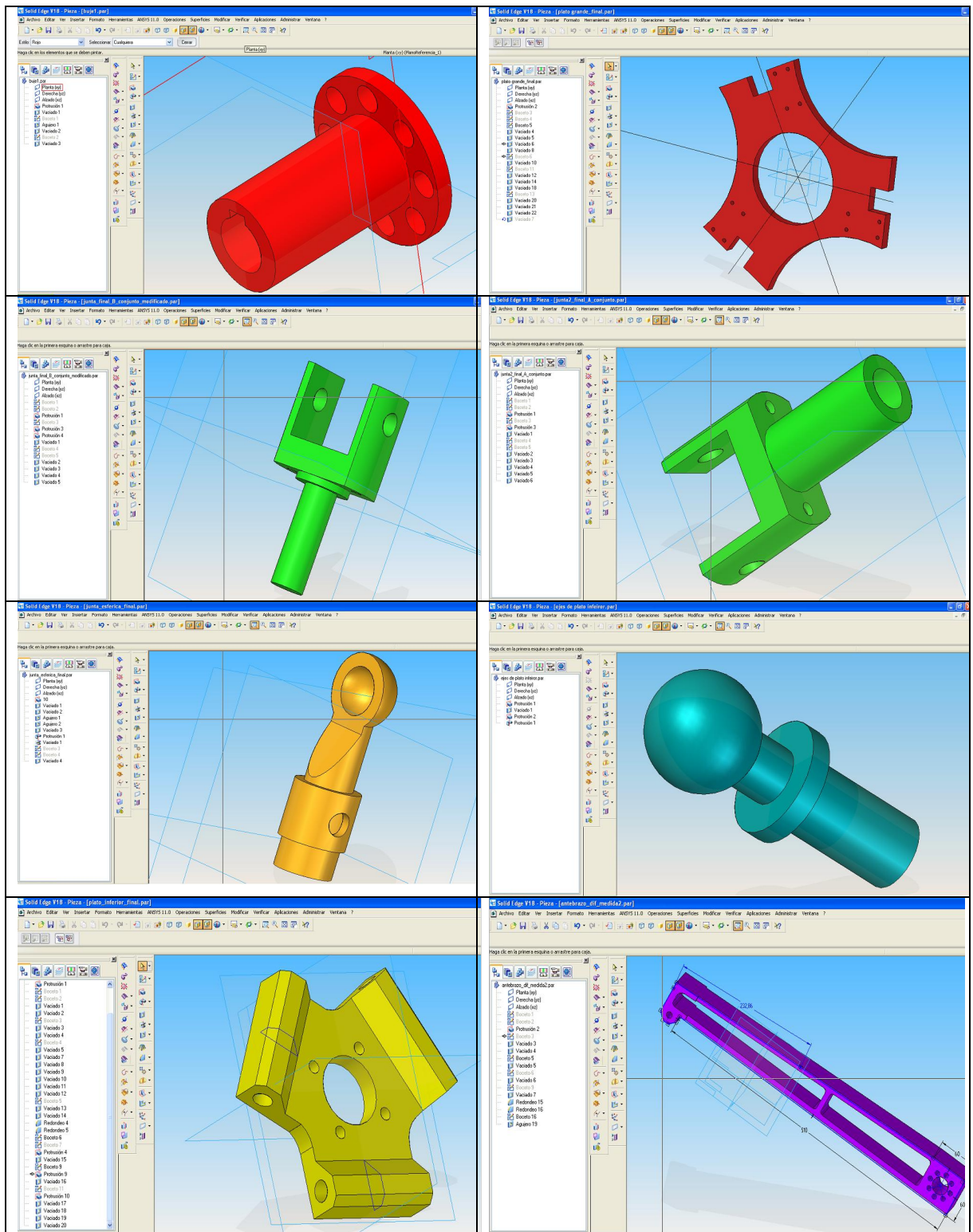


Figura 3.3: Piezas del robot en SOLID EDGE

3.1.2.2. Subconjuntos

Los subconjuntos son uniones de piezas ya terminadas las cuales facilitan el trabajo del ensamble final. Las piezas se relacionan con opciones 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 (Figura 3.4), se puede llamar 2 veces mas los subconjuntos del antebrazo y brazo, evitando la perdida de tiempo en la construcción repetida de estos.

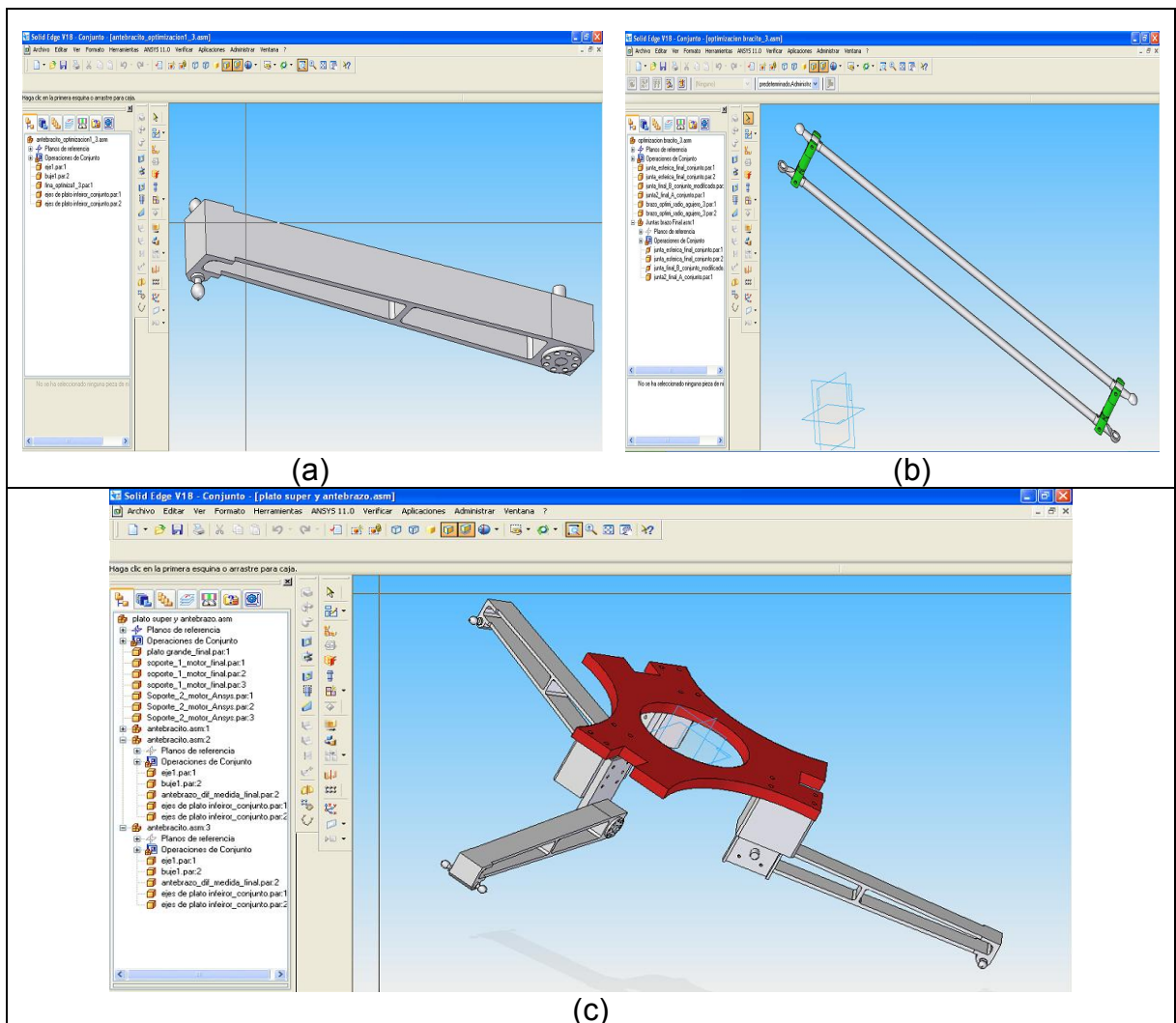


Figura 3.4. Subconjuntos en SOLID EDGE. (a) Subconjunto brazo, (b) Subconjunto antebrazo y (c) Plataforma fija y Subconjunto brazo.

3.1.2.3 Ensamble final

El ensamble final es un ensamble entre subconjuntos que 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 3.5).

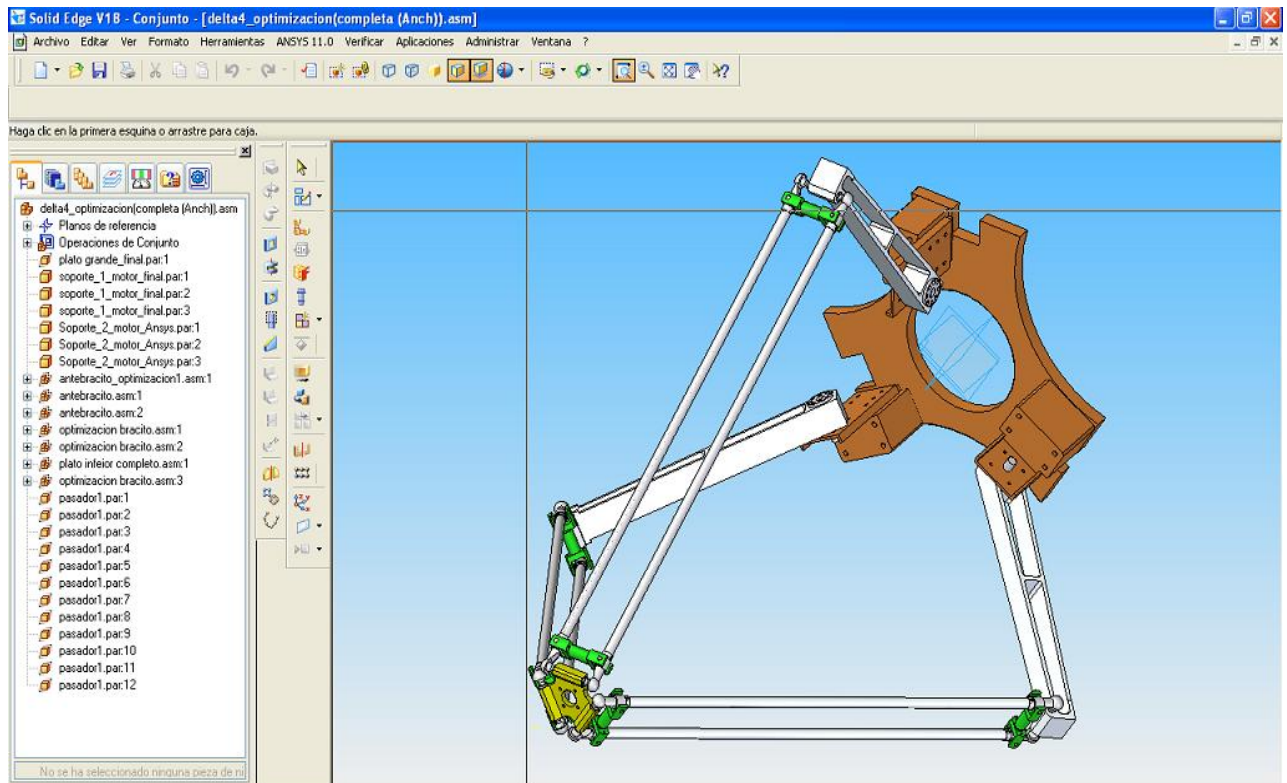


Figura 3.5 Ensamble final del robot delta

3.2 Ansys 11

ANSYS es un software de análisis de ingeniería por computador (CAE), el cual está dividido en tres herramientas principales llamados módulos: pre-procesador (creación de geometría y mallado), procesador (Aplicación de cargas) y post-procesador (Visualización de resultados). Todos los módulos de Ansys están previstos de una amigable interfaz gráfica. Este procesador de elemento finito para la solución de problemas mecánicos incluye: análisis de estructuras dinámicas y estáticas (ambas para problemas lineales y no-lineales), análisis de transferencia de calor y fluidodinámica, y también problemas de acústicas y de electromagnetismo. Usualmente el uso de estas herramientas se utiliza simultáneamente logrando mezclar problemas de estructuras junto a problemas de transferencia de calor como un todo. Este software es usado en ingeniería mecánica, civil, eléctrica, física y química. Todo esto permite al ingeniero evaluar sus proyectos en cuanto a su viabilidad y rentabilidad y así obtener mejores resultados y diseños más eficientes.

3.2.1 Historia Ansys

En 1963, Dr. John Swanson trabajó en los laboratorios nucleares de Westinghouse en Pittsburgs. Él era el responsable del análisis del reactor nuclear junto a todos sus componentes. Él utilizó códigos computacionales para predecir las curvas de esfuerzos del rotor del reactor, el cual se veía afectado tanto por la presión como por la temperatura. Con el pasar de los años, Swanson fue afinando el método para poder ser utilizado bajo geometría en 3-D, análisis no lineales para deformaciones plásticas, análisis dinámico, y los códigos para transferencia de calor fueron avances realizados por Wilson at Aerojet. El código original desarrollado por John incluía un análisis 2D axisimétrico, John quería combinar estos avances así como remover códigos que se repetían en la resolución de ecuaciones y en el post-procesamiento.

Swanson quería una integración que hiciera del código una herramienta para disminuir el tiempo de cálculo y análisis de los ingenieros de Westinghouse y otra compañías, esta ahorraría mucho dinero a los que la utilizaran, pero John no estaba de acuerdo, de tal forma Swanson abandono la compañía en 1969, pero no sin antes haber mandado el código a COSMIC para el poder retomar el proyecto más tarde por su cuenta.

Swanson Analysis Systems, Inc fue incorporada a mediados de los años 1970 en la casa de Swanson por otro lado John continuaba trabajando en STASYS (el software que venía desarrollando para Westinghouse). Con el tiempo él se convirtió en un consultor y no en un empleado y pidió permiso para integrar los avances que había hecho Swanson en STASYS y Westinghouse no tuvo ningún problema debido a que lo que ellos querían era la solución efectiva de sus

problemas. De esta forma los avances de Swanson y de John se unieron acelerando el proceso y el avance de ANSYS.

La primera versión de ANSYS fue programada a finales de 1970. Westinghouse fue el primer cliente que usaba ANSYS como programa principal de análisis en el diseño. Según el Dr. Swanson, el nombre ANSYS se escogió porque los abogados le aseguraron a Swanson que ANSYS era solo un nombre y que nada podía afectar los derechos de autor sobre el código ya creado. Durante ese periodo todos los programas eran escritos sobre tarjetas perforadas. La instalación del programa incluía el traslado de personal para hacer las adaptaciones necesarias a la máquina para poder insertar las tarjetas en las grandes computadoras.

Dr. Peter Kohnke conoció a John Swanson a principios de 1971. Swanson le ofreció trabajo a Kohnke en otoño de 1971, y éste finalmente aceptó en 1973 y hasta diciembre de 2005 aún trabaja en ANSYS Inc.²

3.2.1 .1 Interfase ANSYS 11

La interfaz gráfica de usuario empleada por Ansys se presenta en la Figura 3.6. En ella se destaca las siguientes ventanas: ventana del modelo, ventana del proyecto, ventana de simulación en el tiempo, ventana de tabla de datos, ventana de detalles del proyecto. A continuación se detalla brevemente cada ventana.

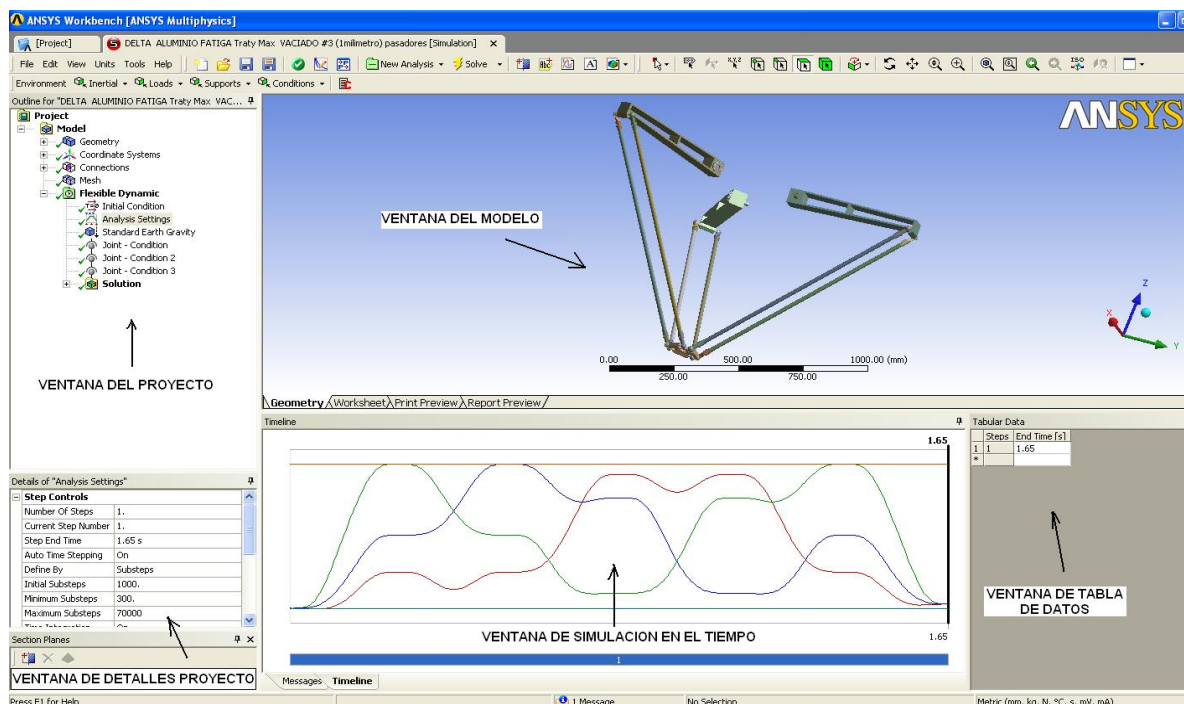


Fig. 3.6. Interfase de ANSYS 11.

Ventana del proyecto: En esta ventana se encuentra el modelo en 3D con sus respectivos conexiones además se encuentra el tipo de análisis que se quiere realizar con la herramienta de solución.

Ventana de detalles del proyecto: En esta ventana se encuentra cada detalle de cada uno de los componentes que conforman el proyecto como la geometría, conexiones, enmallado, tipo de análisis, solución, etc.

Ventana del modelo: En esta ventana se encuentra el modelo tridimensional con cada una de las partes con las que fue construido, mostrando su distribución y su longitud gracias a una regla en la parte inferior.

Ventana de simulación en el tiempo: Esta ventana muestra los resultados de las soluciones deseadas en relación al tiempo que dura la simulación.

Ventana de tabla de datos: Esta ventana permite ver en forma de tabla y numéricamente los resultados de la simulación a través del tiempo.

3.2.2 Modelo de simulación en ANSYS 11

Las principales 4 áreas del modelo de simulación en ANSYS 11, son la Geometría, el sistema coordenado, las conexiones y el enmallado (Fig. 3.7).

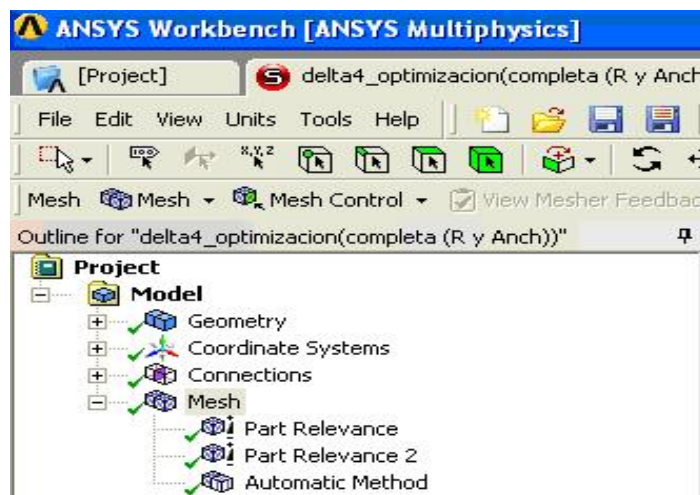


Figura 3.7. Áreas del modelo de ANSYS.

3.2.2. Geometría ANSYS

Inicialmente se carga la geometría del robot delta diseñada en SOLID EDGE. El archivo con el ensamble final tiene la extensión (.asm). La Figura 3.8 muestra los pasos para cargar el archivo.

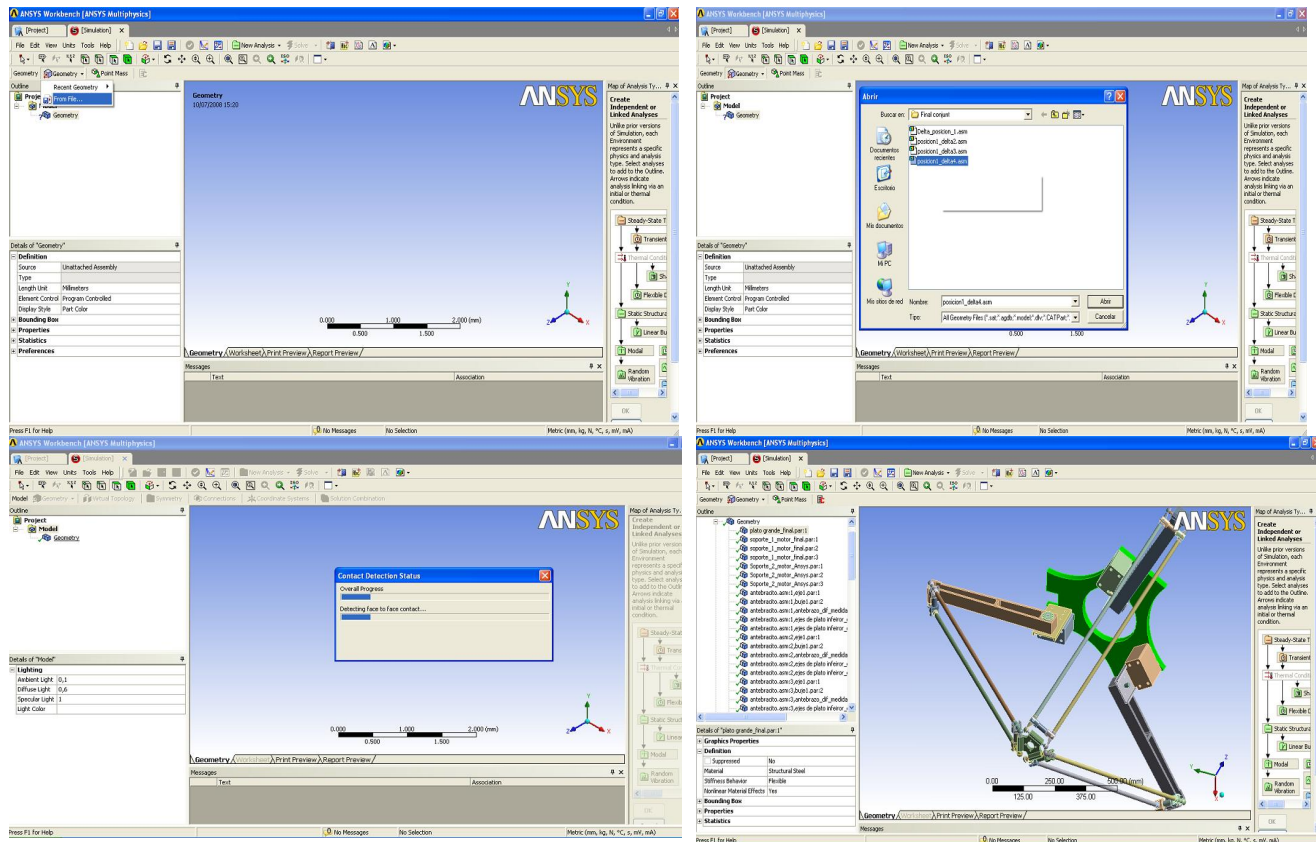
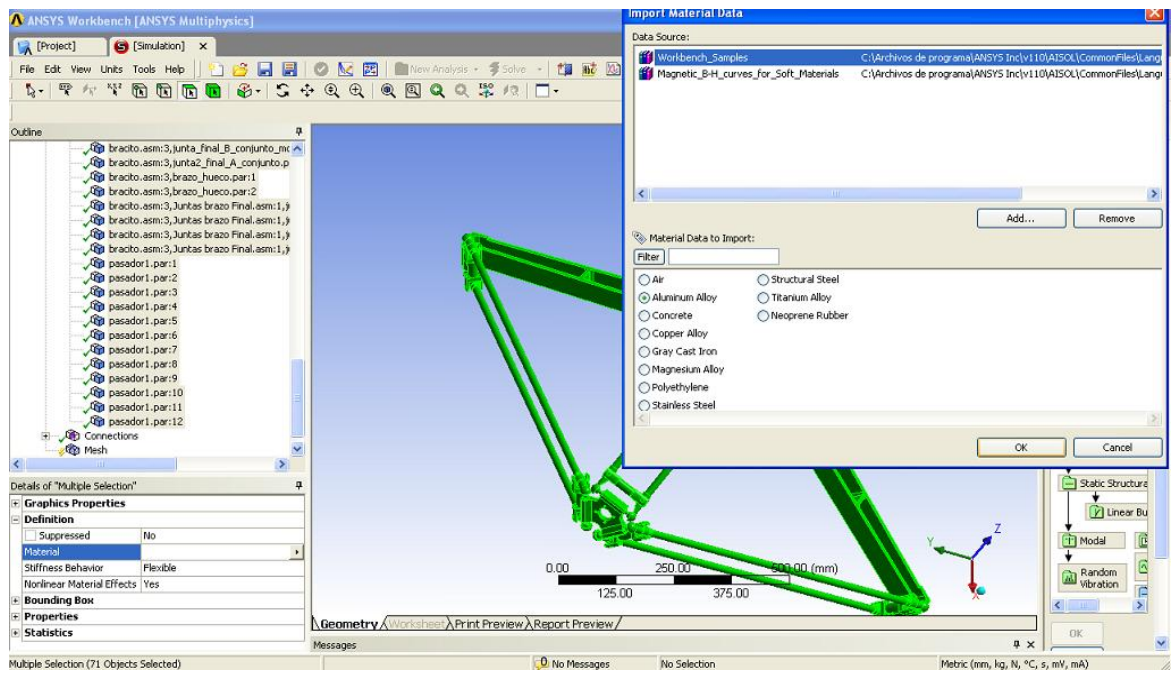
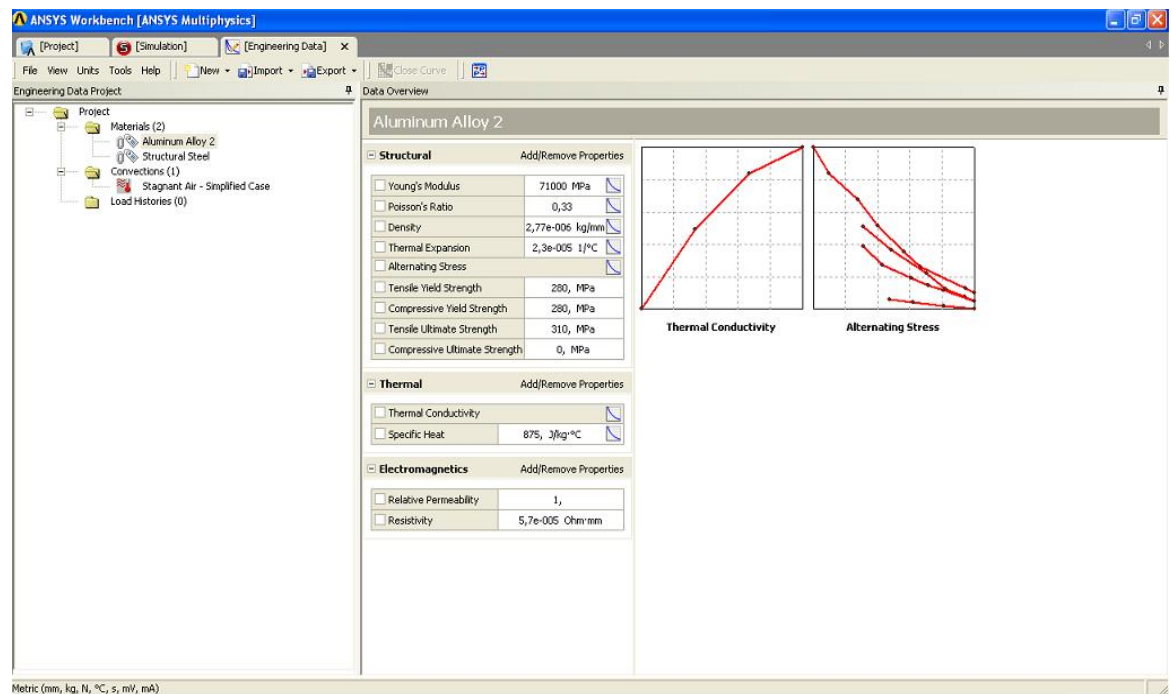


Figura 3.8. Pasos para cargar el modelo en ANSYS

ANSYS 11 posee una librería de materiales con los materiales más utilizados en el mundo, y sus respectivas características técnicas como son, el módulo de young, la densidad, la expansión térmica, el radio de poisson, el esfuerzo último a tensión, etc. Estas características también se pueden variar o construir una tabla nueva para un material a partir de resultados experimentales. En la Figura 3.9 (a), se muestra los diferentes materiales empleados por ANSYS. En la Figura 3.9 (b), se presenta las características mecánicas para el aluminio.



(a)



(b)

Figura 3.9 Características del material seleccionado: (a) Librería de materiales en Ansys y (b) características mecánicas para el aluminio.

3.2.2.2 Conexiones ANSYS

ANSYS 11 es un Software actualizado que incluye características especiales en cuanto estructuras móviles como son Robots. Este software cuenta con conexiones especializadas llamadas contactos y uniones.

Contactos

Los contactos permiten definir el comportamiento entre las caras de las piezas que se tocan. Los contactos manejados por ANSYS son: Bonded, No Separation, Frictionless, Rough, Frictional.

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.

En las figuras 3.10 y 3.11 se presentan 2 ejemplos de contactos empleados en el ensamble del robot Delta.

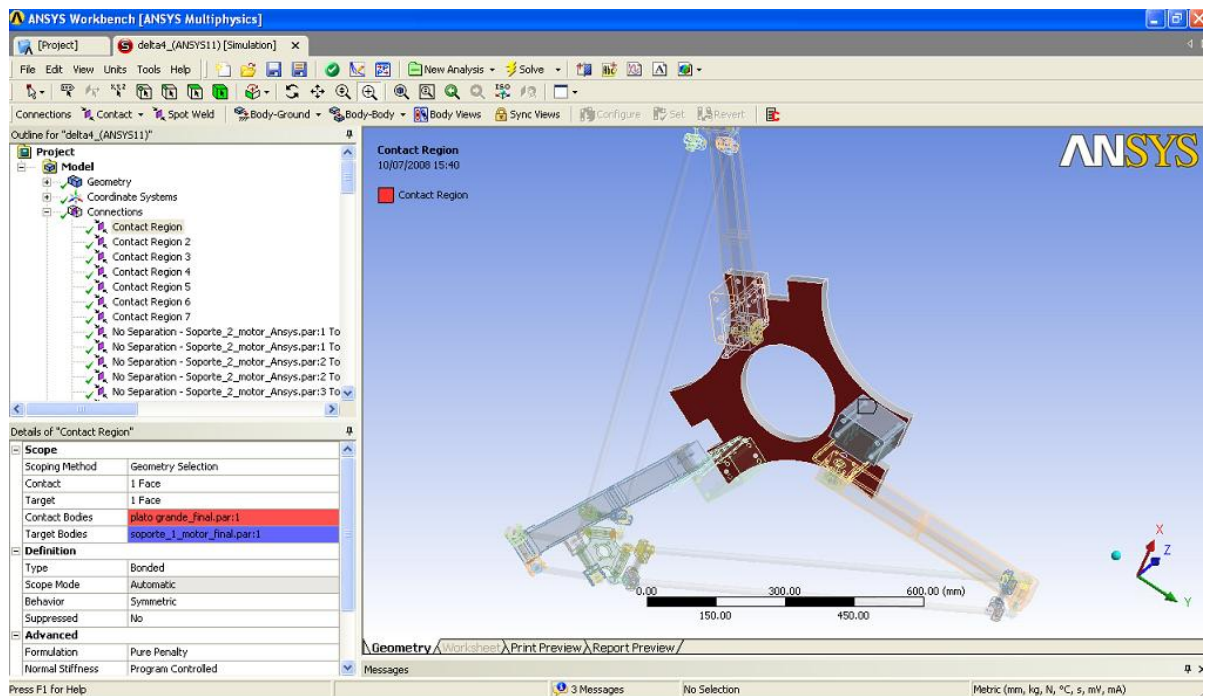


Figura 3.10 Contacto bonded.

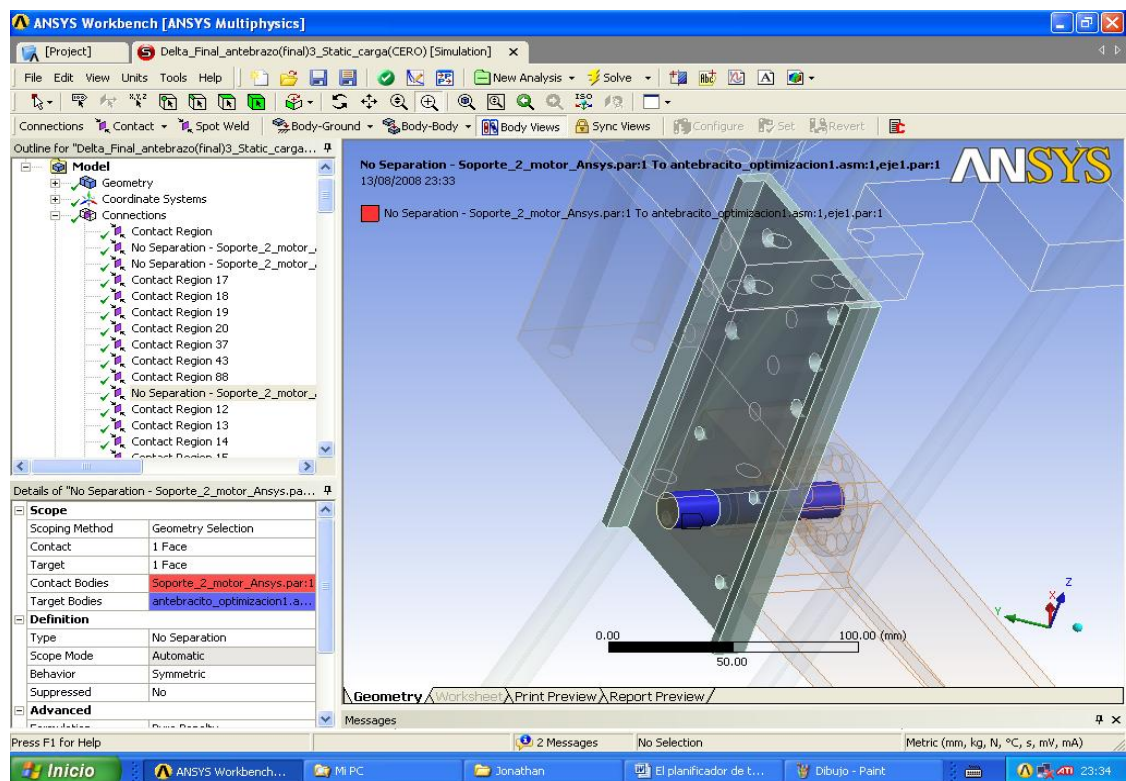


Figura 3.11 Contacto No separation.

Uniones

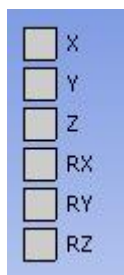
Las uniones sirven normalmente para unir piezas entre si cuando estas se encuentran cerca. Los tipos de uniones están caracterizados por grados de libertad rotacionales y traslacionales los cuales pueden ser fijos o libres.

Las uniones que se pueden encontrar en Ansys 11 son las siguientes: fija, revolución, cilíndrica, trasnacional, Slot, universal, esférica, planar y general. Estas se relacionan en la tabla 2.

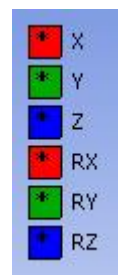
Tabla 2. Tipos de uniones empleadas en Ansys

Tipo de unión	Grados de libertad
Fixed	Ninguno
Revolute	ROTZ
Cylindrical	UZ, ROTZ
Translational	UX
Slot	UX, ROTX, ROTY, ROTZ
Universal	ROTX, ROTZ
Spherical	ROTX, ROTY, ROTZ
Planar	UX, UY, ROTZ
General	Libre X, libre Y, libre Z, y libre todos.

En la Figura 3.12 se muestra la barra de visualización para los grados de libertad de una unión.



Ningún grado de libertad.



Todos los grados de libertad.

Fig. 3.12. Barra de visualización para los grados de libertad de una unión.

En la Figura 3.13 se muestra un ejemplo del tipo de unión esférica empleada para el robot delta. El diagrama corresponde a la unión entre los antebrazos y la plataforma móvil.

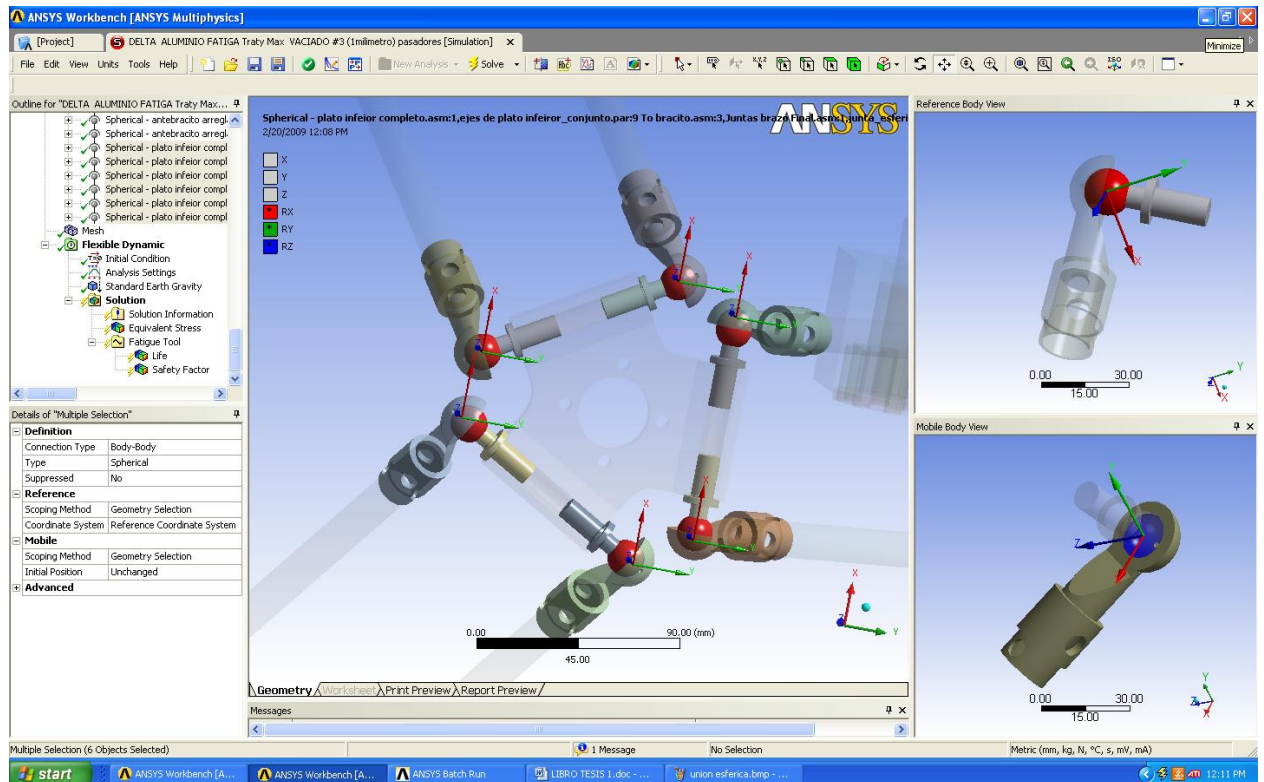


Fig. 3.13. Uniones esféricas.

3.2.2.3 Enmallado ANSYS

El enmallado es la herramienta que permite encontrar la distribución de esfuerzos a lo largo de una pieza determinada.

Adicionalmente, el enmallado en ANSYS define la cantidad de nodos que se presentan en una pieza. La cantidad de nodos representa la exactitud en la respuesta: entre mas nodos tenga un análisis más exacto será al comportamiento real.

En la Figura 3.14 se presenta el enmallado empleado para el brazo del robot con diferentes relevancias. La relevancia del enmallado hace referencia a la cantidad de nodos empleados.

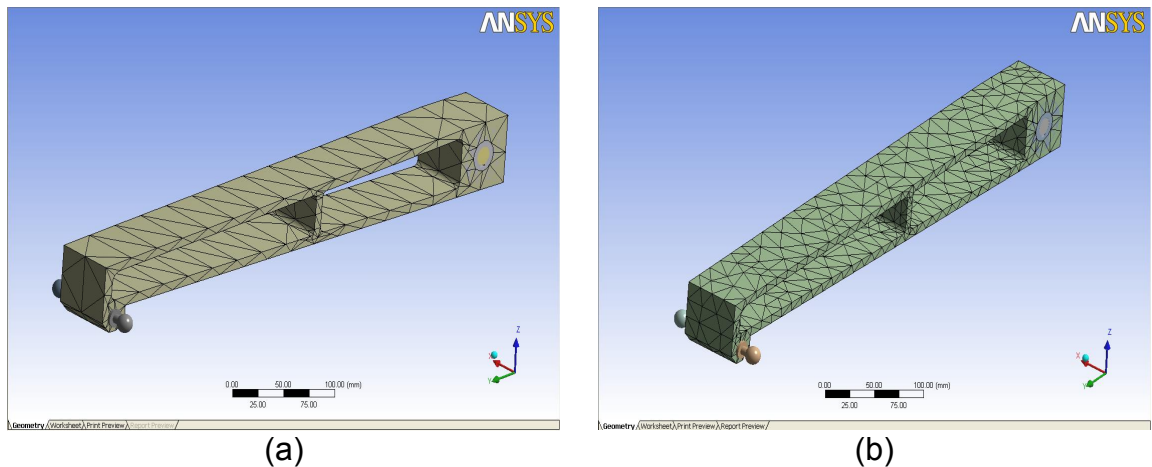


Fig. 3.14 Enmallado en ANSYS: (a) con relevancia de cero, (b) con relevancia de 100.

La opción de enmallado “part relevante” 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 3.15).

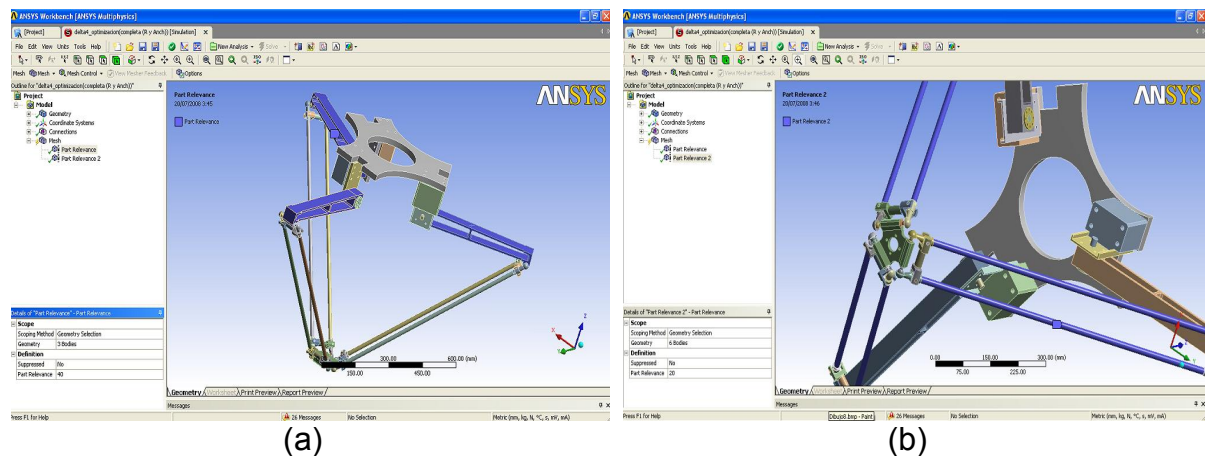


Fig. 3.15, Relevancia de piezas: (a) brazos, (b) antebrazos.

La opción de enmallado “Sizing” es un tipo de enmallado que permite enmallar toda la pieza o solamente una cara de la misma, con el fin de obtener una respuesta mas exacta en una zona crítica , además que me permite definir la longitud de mi enmallado (que tan fino quiero que sea) (Figura 3.16).

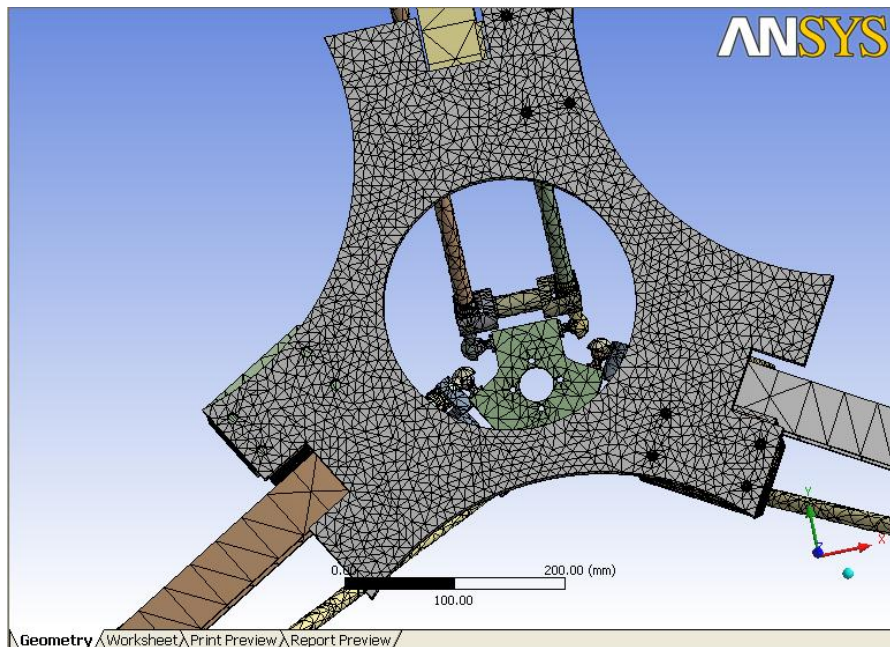


Fig. 3.16. Enmallado “Sizing”

En la Figura 3.17 se presenta el enmallado final empleado para el robot Delta. Se observa que se ha utilizado el enmallado “Sizing” para los antebrazos y la plataforma móvil y el enmallado “part relevante” para el brazo y la plataforma fija.

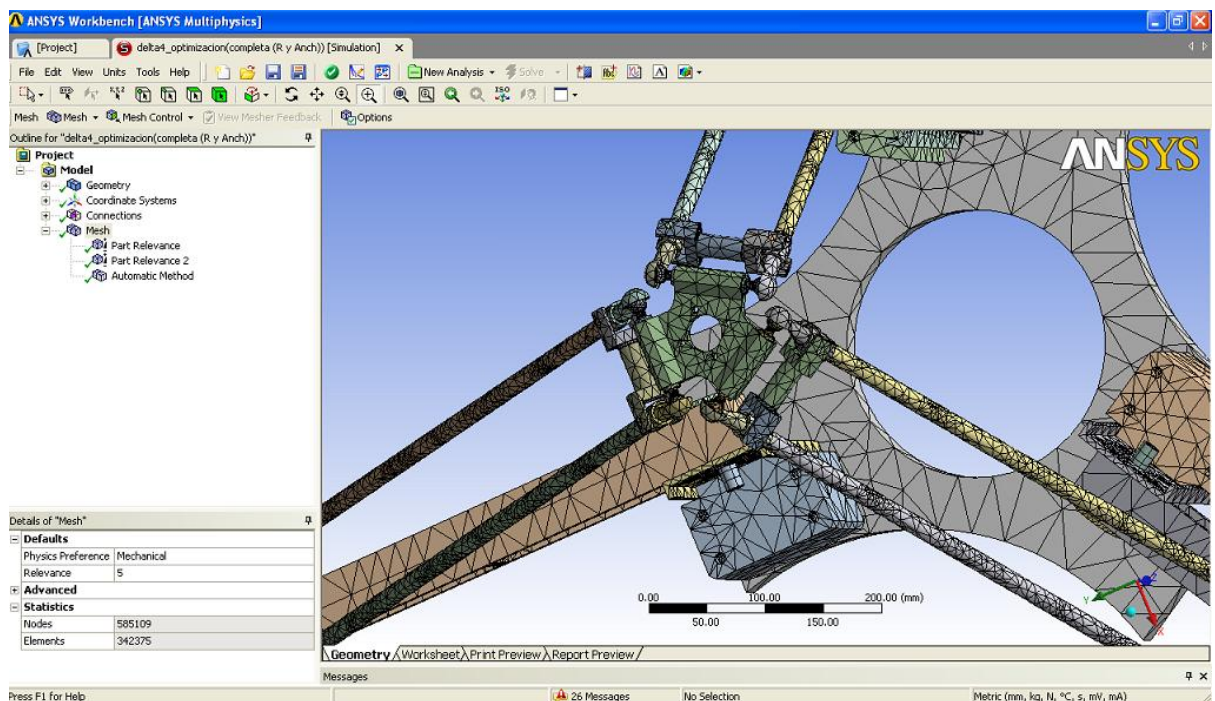


Fig. 3.17 Malla finalizada.

3.2.2.4 Modelo en Flexible Dynamic

La herramienta Flexible Dynamic de ANSYS 11 permite definir las cargas que intervienen en el análisis dinámico del modelo de simulación. En el caso del robot delta las cargas son los desplazamientos angulares de los tres motores y la fuerza de gravedad.

La fuerza de gravedad es de $-9806.6 \text{ (mm/s}^2\text{)}$. El signo indica la dirección de la fuerza de gravedad, que en este caso en dirección del eje $-Z$ (Figura 3.18).

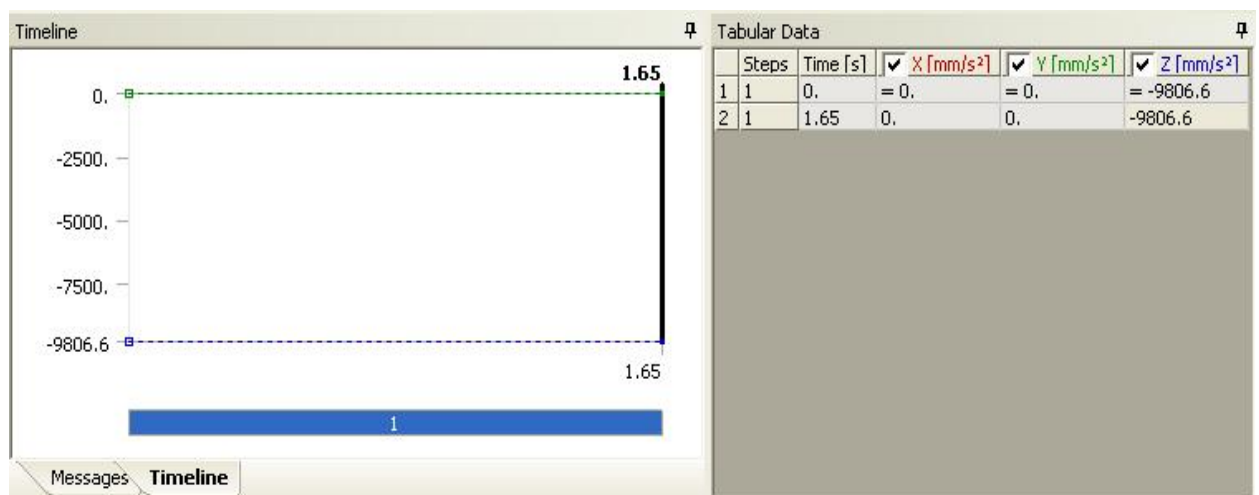
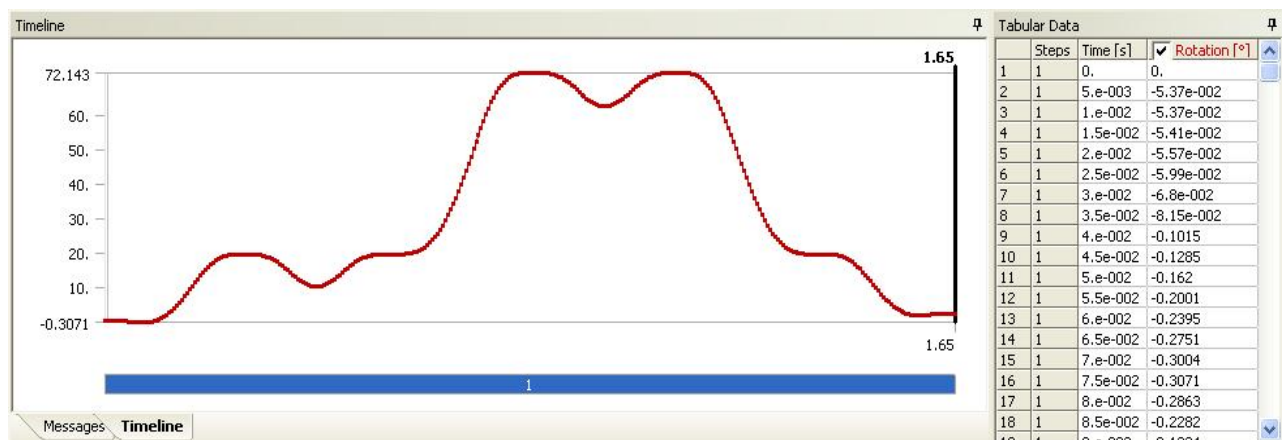
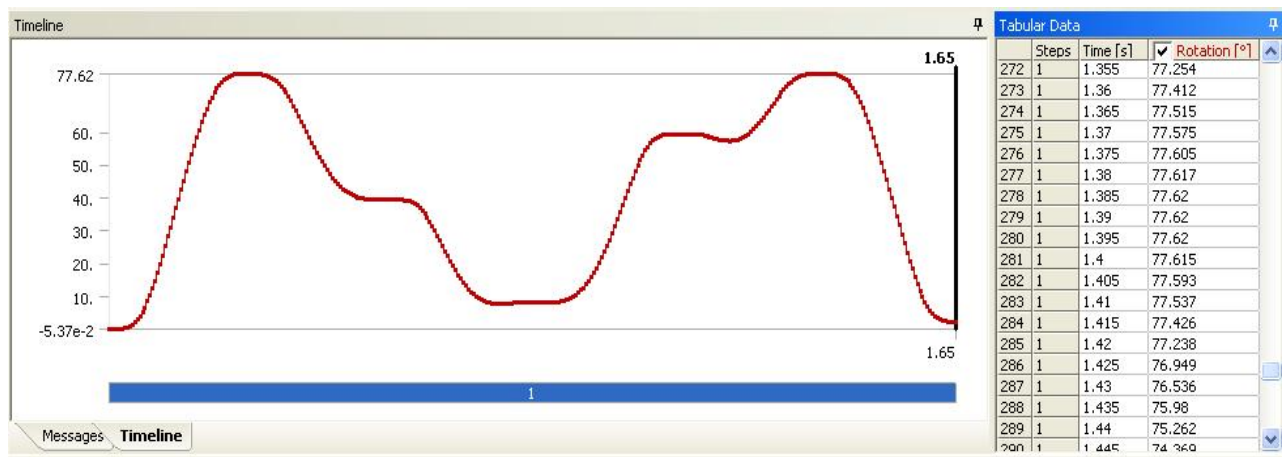


Fig. 3.18. Fuerza de gravedad

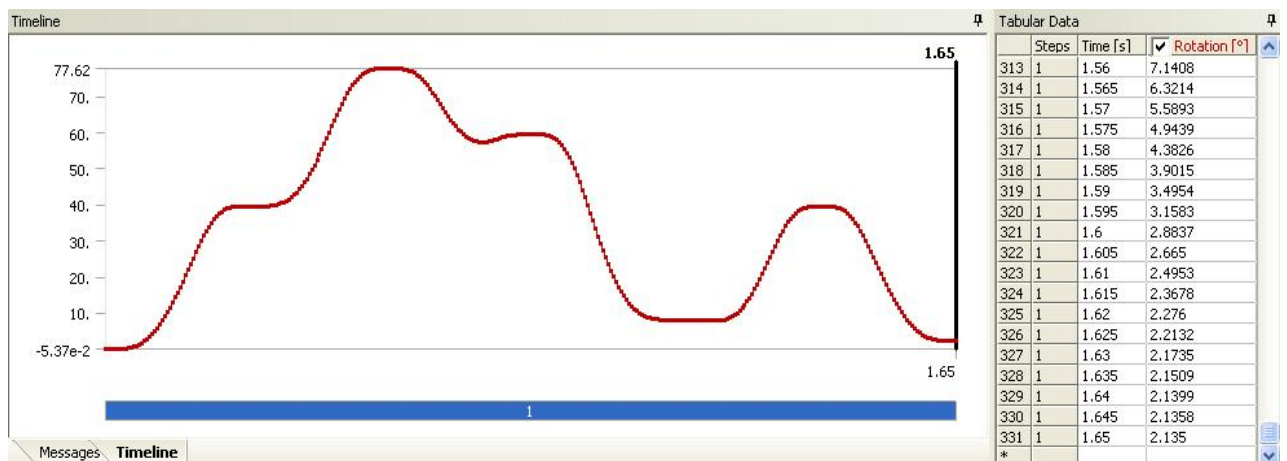
En la Figura 3.19 se muestra el desplazamiento angular para cada motor como una secuencia de posiciones angulares muestreadas cada 5 mili segundos. El tiempo de duración del movimiento completo es de 1.65 segundos con 331 posiciones angulares. El mayor ángulo producido es de 77.62 grados.



(a)



(b)



(c)

Fig. 3.19. Desplazamiento angular: (a) actuador 1, (b) actuador 2, (c) actuador 3.

El modelo completo de simulación y el ambiente estructural dinámico ANSYS 11 se muestra en la Figura 3.20. Los movimientos angulares se presentan mediante flechas circulares alrededor de cada motor y la fuerza de gravedad con su dirección.

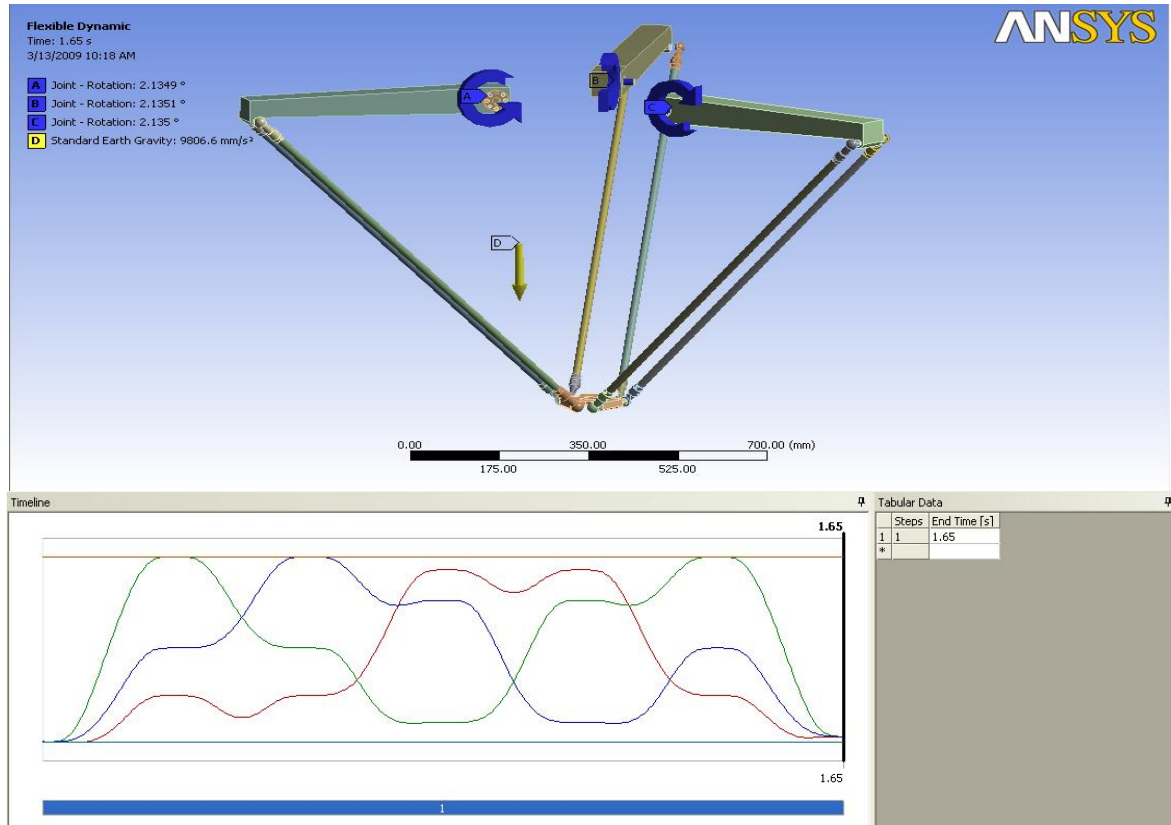


Fig. 3.20. Ambiente estructural dinámico completo.

4. ANALISIS DE TRAYECTORIA

El análisis de trayectorias involucra el estudio de diferentes tipos de movimientos críticos que se desean para el efector final del robot delta desarrolle y a través del análisis del máximo esfuerzo seleccionar la trayectoria crítica. Esta trayectoria servirá como base para el análisis estructural del robot delta y la optimización de su estructura mecánica.

Para el análisis de trayectoria se ha tenido en cuenta los datos proporcionados por el fabricante del robot Delta IRB 340 FlexPicker.

- Espacio de trabajo: 1130 mm de diámetro.
- Velocidad máxima: 10 m/s.

Las trayectorias para el robot delta se ha desarrollado utilizando un planificador de trayectoria basados en polinomios 616 (Ángel, 2005), con una velocidad máxima de 10 m/s. Un ejemplo de las múltiples trayectorias con las que se trabajó se en la Figura 4.1.

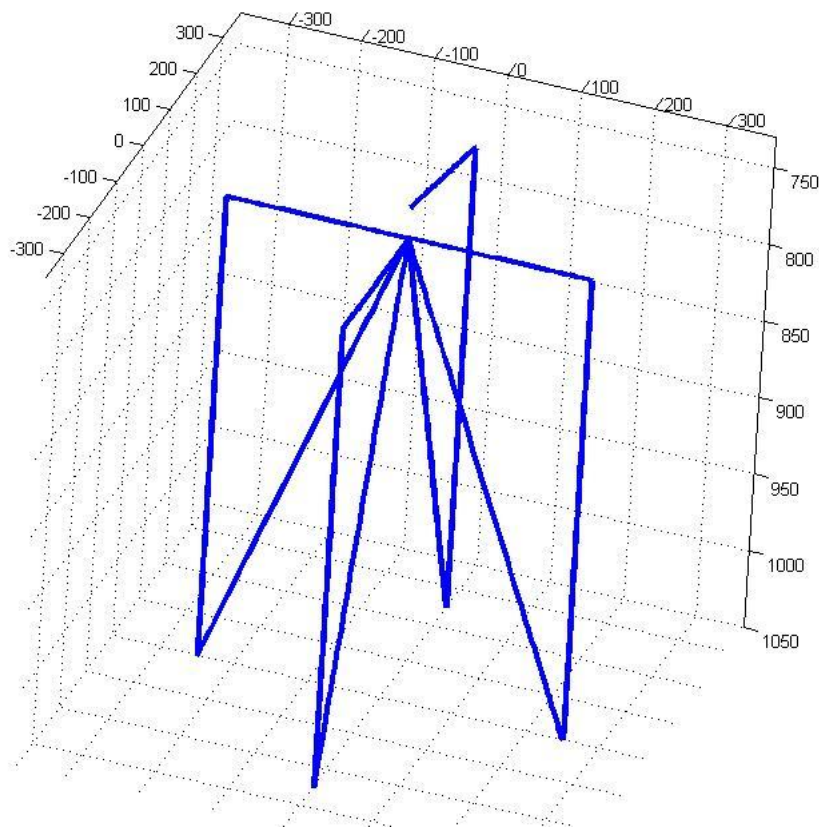


Fig. 4.1. Ejemplo de trayectoria para el robot Delta

4.1 Selección de la trayectoria crítica

Para este estudio se tomaron 3 posibles trayectorias críticas. Estas se cargaron en Flexible Dynamic de ANSYS 11, con el objetivo de encontrar la trayectoria que produzca el máximo esfuerzo en la estructura mecánica del robot. Para todos los movimientos analizados (Figuras 4.2, 4.3, 4.4) el espacio de trabajo utilizado corresponde a un cilindro de diámetro 500 mm y de altura 250 mm. La velocidad del efector es de 2 m/s.

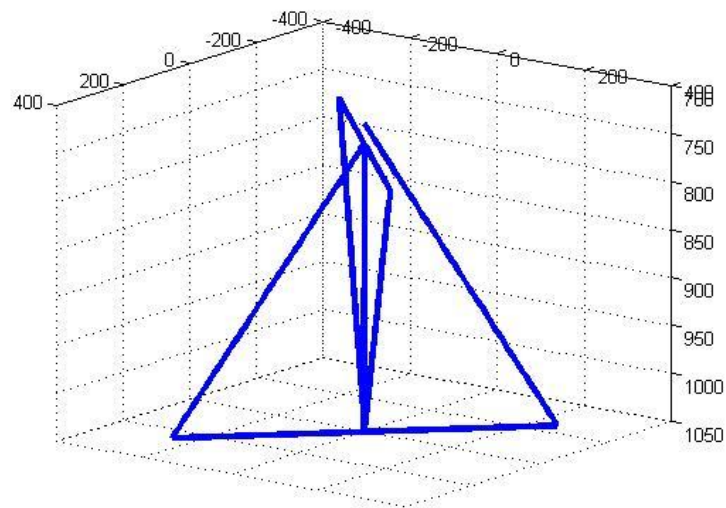


Fig. 4.2. Movimiento 1 "estrella" en 3D.

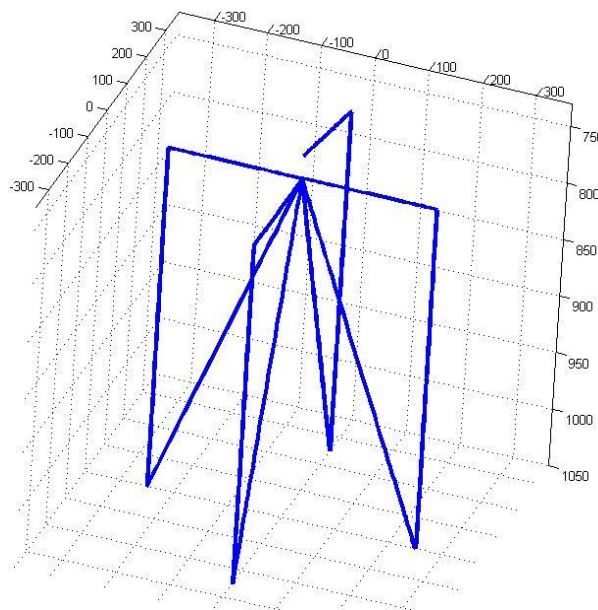


Fig. 4.3. Movimiento 2 "Cruz arriba abajo" en 3D.

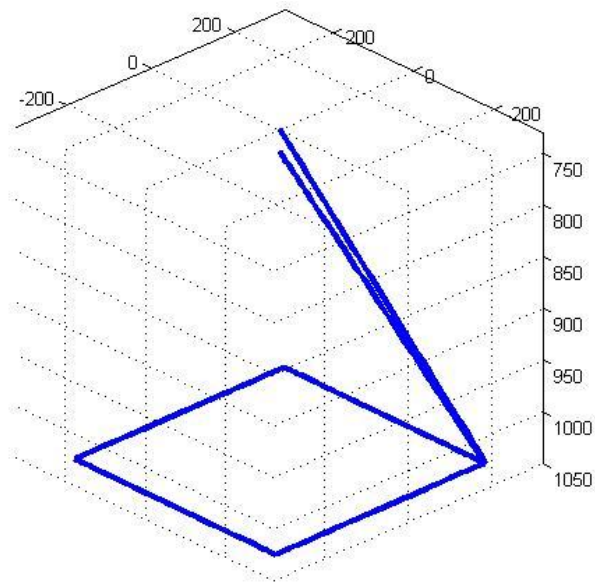


Fig. 4.4. Movimiento 3 “Cuadrado abajo” en 3D.

Una vez ejecutados los movimientos anteriores, se observa cual de los movimientos produjo mayor esfuerzo en una misma pieza. Para este análisis se tomo como referencia los brazos del robot Delta (Figura 4.5).

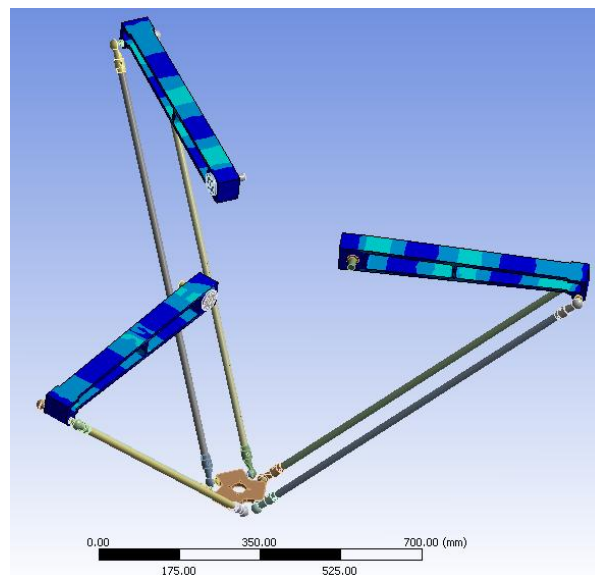


Fig. 4.5. Ejemplo de modelo (referencia brazos)

En las figuras 4.6, 4.7 y 4.8 se muestran los esfuerzos producidos para cada uno de los movimientos de prueba.

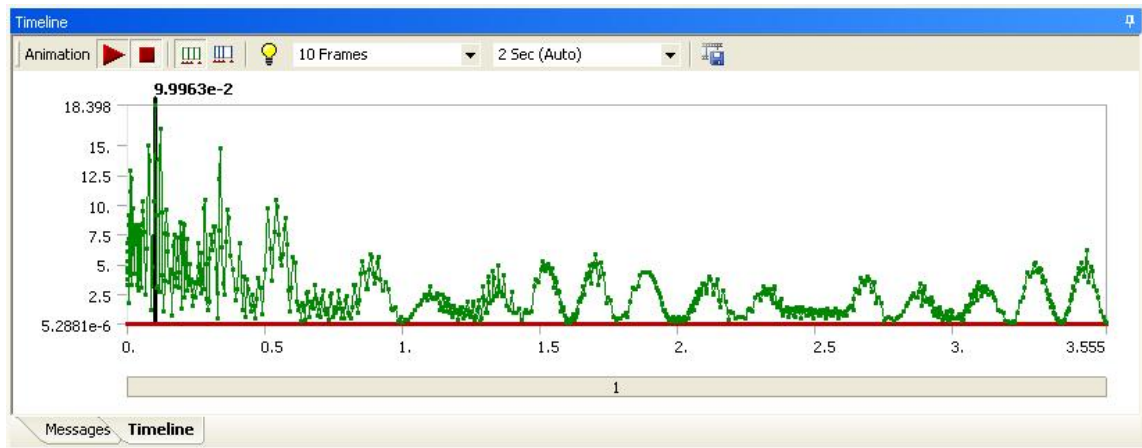


Fig. 4.6. Esfuerzo movimiento 1 "estrella" (Esfuerzo vs. Tiempo).

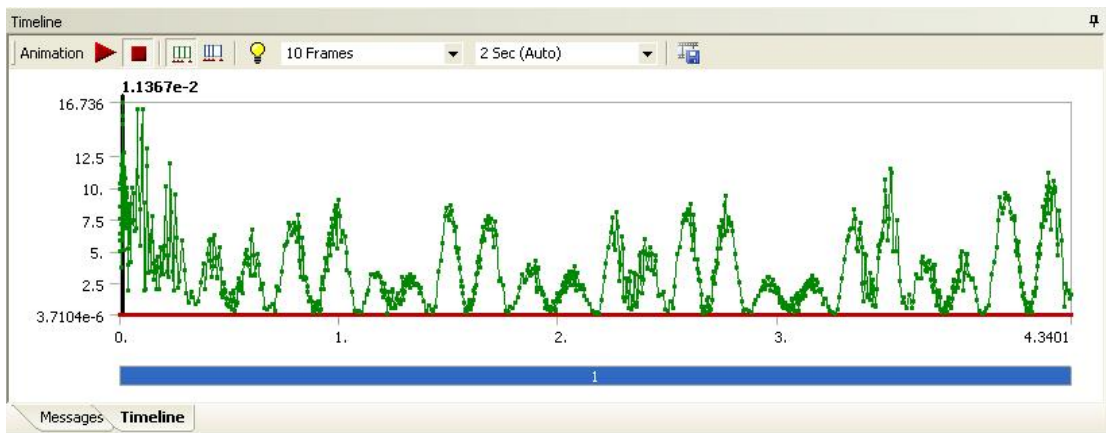


Fig. 4.7. Esfuerzo movimiento 2 "Cruz arriba abajo" (Esfuerzo vs. Tiempo).

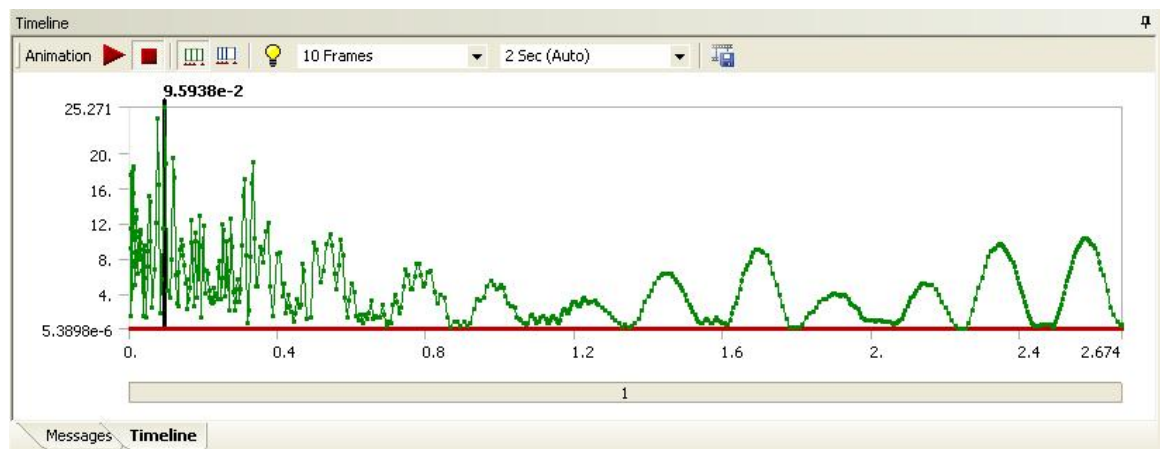


Fig. 4.8. Esfuerzo movimiento 3 "Cuadrado abajo" (Esfuerzo vs. Tiempo).

Como se puede observar de los resultados presentados anteriormente, el movimiento 1 produjo un esfuerzo máximo de 18.39 Mpa, el movimiento 2 produjo un esfuerzo máximo de 16.73 Mpa y por último el movimiento 3 produjo un esfuerzo máximo de 25.271 Mpa. Dado que el movimiento 3 da mayor esfuerzo, se selecciona este movimiento como la trayectoria crítica del modelo de simulación.

4.2 Trayectoria crítica.

Una vez seleccionado el movimiento 3 como la trayectoria crítica, cabe destacar que este movimiento no trabaja en los límites máximos del área de trabajo, además que tampoco se mueve a la velocidad máxima deseada. A continuación se toma este movimiento y se incrementa la velocidad de 2 m/s a 10 m/s (máxima velocidad) y el área de trabajo de 500 mm de diámetro a 800 mm de diámetro, tomando en cuenta las especificaciones del Robot Delta IRB 340 FlexPicker de ABB (Figura 4.9). El resultado de este movimiento genera la trayectoria crítica que servirá como base para el análisis estructural del robot delta y su optimización.

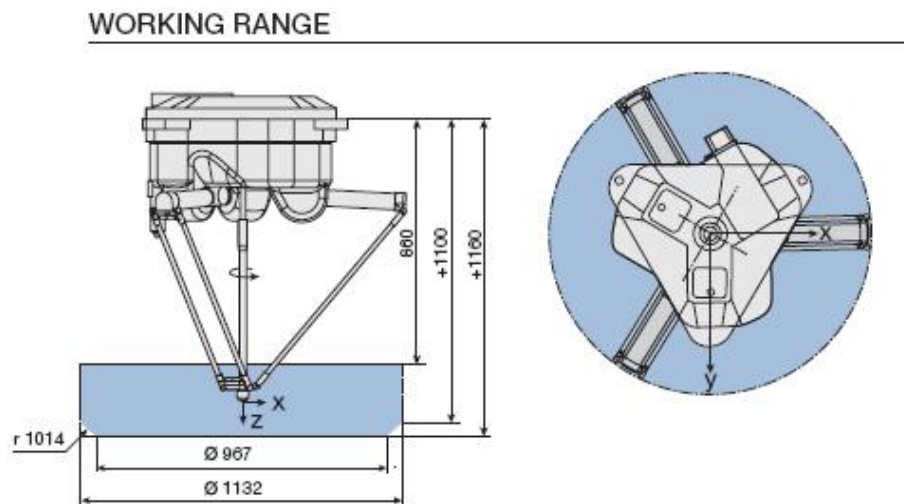


Fig. 4.9. Área de trabajo robot Delta IRB 340 FlexPicker de ABB.

La Figura 4.10 muestra el espacio de trabajo ampliado y la trayectoria crítica seleccionada.

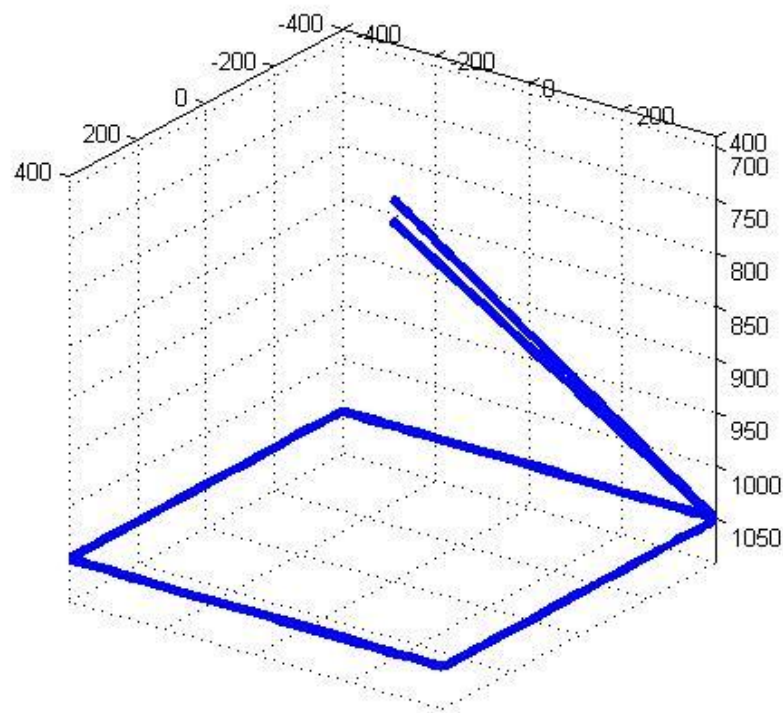


Fig. 4.10, Desplazamiento del efector final en 3D (espacio de trabajo nuevo).

4.2.1 Trayectoria crítica en Ansys 11.

Ansys 11 es una herramienta muy poderosa que a diferencia de sus anteriores versiones cuenta con análisis estructural dinámico. Lo cual, la hace una herramienta indispensable en el desarrollo de estructuras móviles como robots.

Además su interfase gráfica no solo permite analizar los resultados estructurales de la trayectoria, sino también ver el movimiento completo del robot a lo largo del movimiento ejecutado. Esto permite verificar si el movimiento se está cumpliendo a cabalidad o no, ya que si se le coloca un movimiento imposible de alcanzar por el robot, ANSYS 11 muestra un error de no convergencia.

En la Figura 4.11 se muestra una secuencia de los movimientos producidos por el robot en el seguimiento de la trayectoria crítica seleccionada. En esta se observa las diferentes posiciones que adopta la estructura mecánica del robot a lo largo de la trayectoria ejecutada.

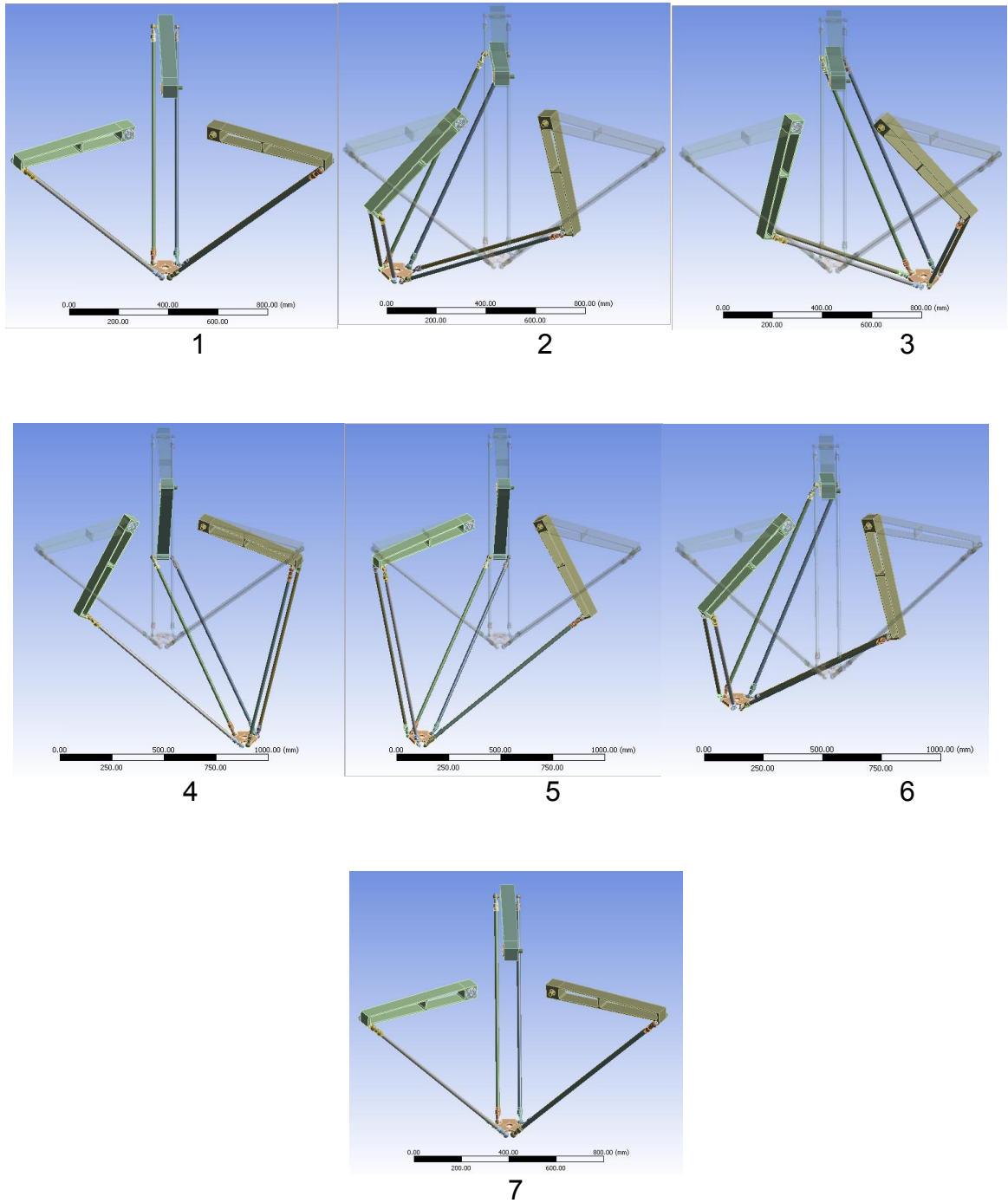


Fig. 4.11 Moviendo de la trayectoria crítica, realizado por el robot delta en ANSYS 11

5. ANALISIS ESTRUCTURAL DEL ROBOT DELTA Y OPTIMIZACION DE LA ESTRUCTURA MECANICA

En este capítulo se presenta la metodología seguida para el análisis estructural del robot delta. Esta metodología emplea la trayectoria crítica seleccionada y el modelo de simulación desarrollado en ANSYS 11. Como criterios de evaluación para la estructura mecánica se emplean el esfuerzo máximo y el factor de seguridad.

Inicialmente se llevó a cabo el proceso de selección de la pieza crítica en el modelo de simulación. Esto simplifica el análisis estructural y permite trabajar con la pieza que experimenta mayor esfuerzo. Luego se selecciona el material con el cual se va a construir la estructura mecánica. Finalmente se optimizó la masa de la pieza que experimenta mayor esfuerzo construida con el material seleccionado anteriormente.

5.1. Selección de pieza

Una estructura mecánica esta conformada por varias unidades interrelacionadas o elementos de máquinas. Por tanto es indispensable que una vez obtenido un diseño preliminar se definan cuales son las partes débiles de la estructura. La optimización de estas partes débiles permitirá un correcto funcionamiento del futuro prototipo robotico.

Para la selección del eslabón débil es necesario realizar un análisis de esfuerzos a cada componente y el que presente un mayor esfuerzo será la pieza a optimizar.

5.1.1 Selección de pieza entre brazo y el plato móvil.

En las Figuras 5.1 y 5.2 se muestran las posiciones en donde se produce el máximo esfuerzo de uno de los brazos y de la plataforma móvil del robot para una trayectoria determinada. En las figuras 5.3 y 5.4 se realiza un zoom, mostrando así el lugar específico de máximo esfuerzo en cada una de ellas.

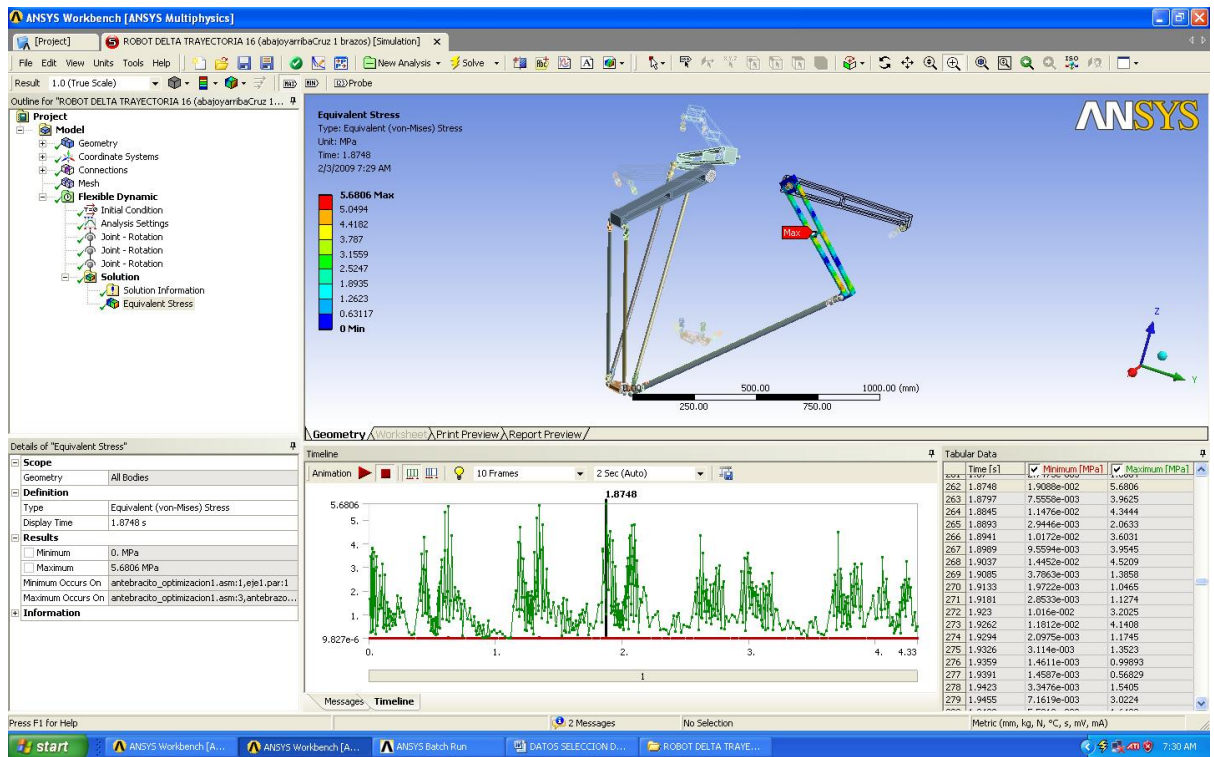


Fig. 5.1. Posición de máximo esfuerzo del brazo 1.

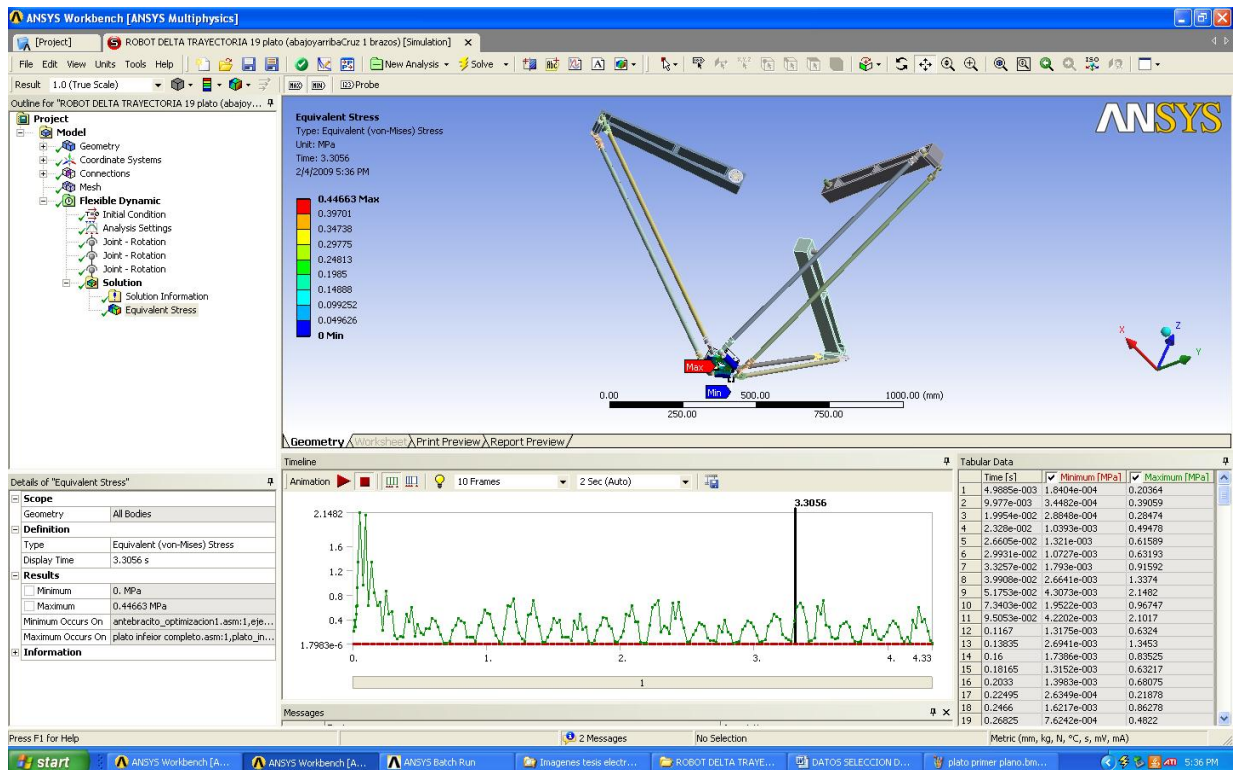


Fig. 5.2. Posición de máximo esfuerzo de la plataforma móvil.

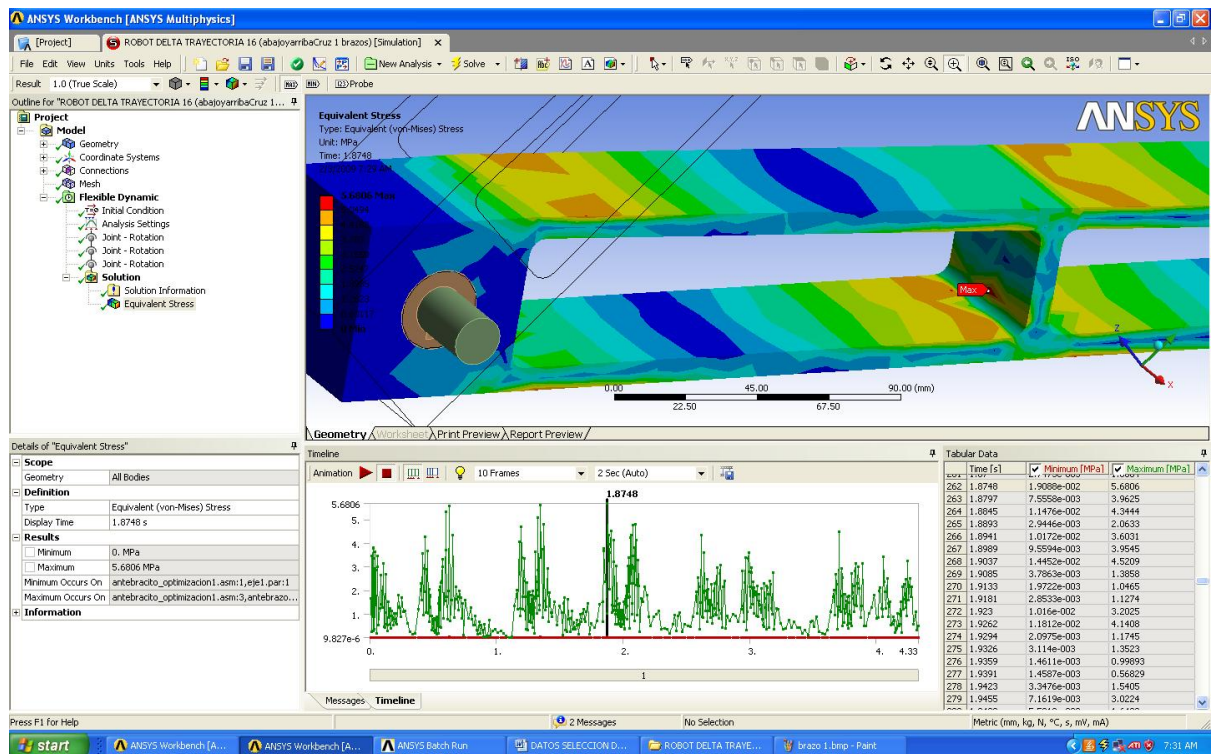


Fig. 5.3. Zoom al máximo esfuerzo del brazo 1.

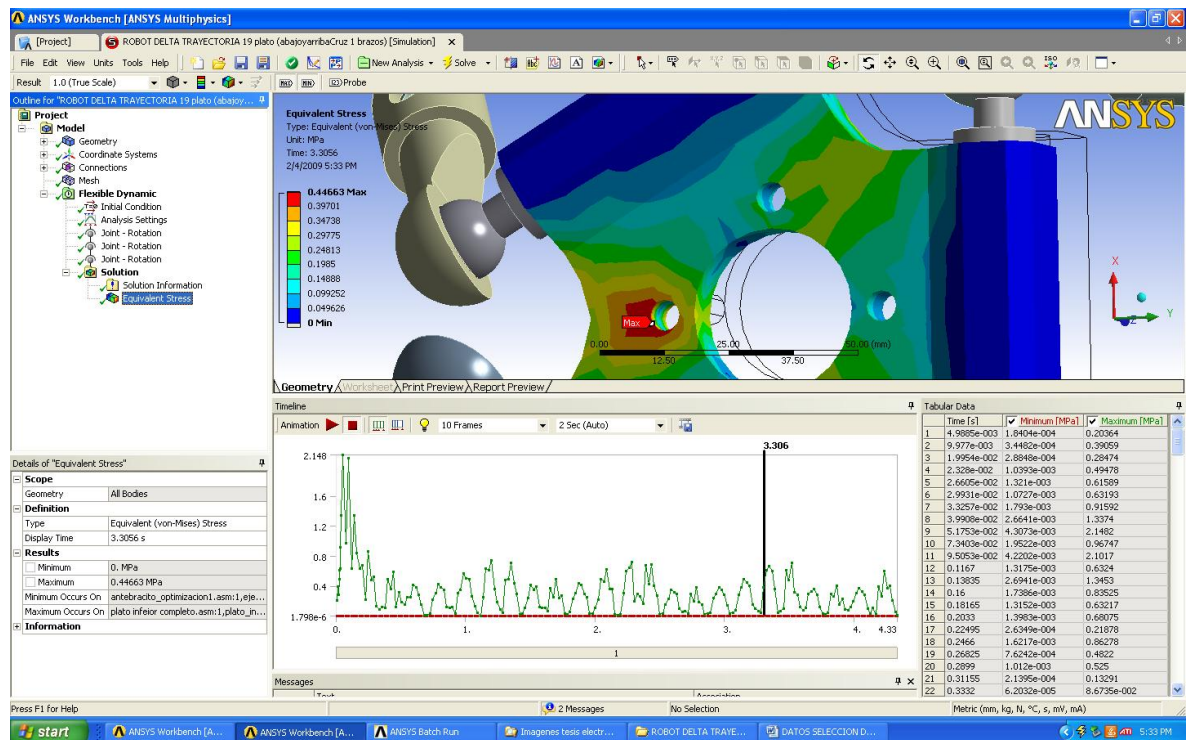


Fig. 5.4. Zoom al máximo esfuerzo de la plataforma móvil.

Para el movimiento a lo largo de la trayectoria crítica, los esfuerzos obtenidos en cada uno de los brazos y en la plataforma móvil del robot, se muestran las Figuras 5.5, 5.6, 5.7 y 5.8. Los máximos esfuerzos fueron 5.68 Mpa, 6.44 Mpa y 17.57 Mpa, en los brazos 1,2 y 3 respectivamente. Para la plataforma móvil el máximo esfuerzo fue de 2.148 Mpa. Esto quiere decir que el máximo esfuerzo en la plataforma móvil es siempre menor en comparación con cualquier brazo. Sin embargo, si se toma el mayor valor de esfuerzo en los brazos, 17.57 Mpa, y este se compara con el esfuerzo de la plataforma móvil, 2.148 Mpa, se puede apreciar que la relación entre los esfuerzos obtenidos es (1:8), dando como resultado la pieza del brazo como eslabón débil.

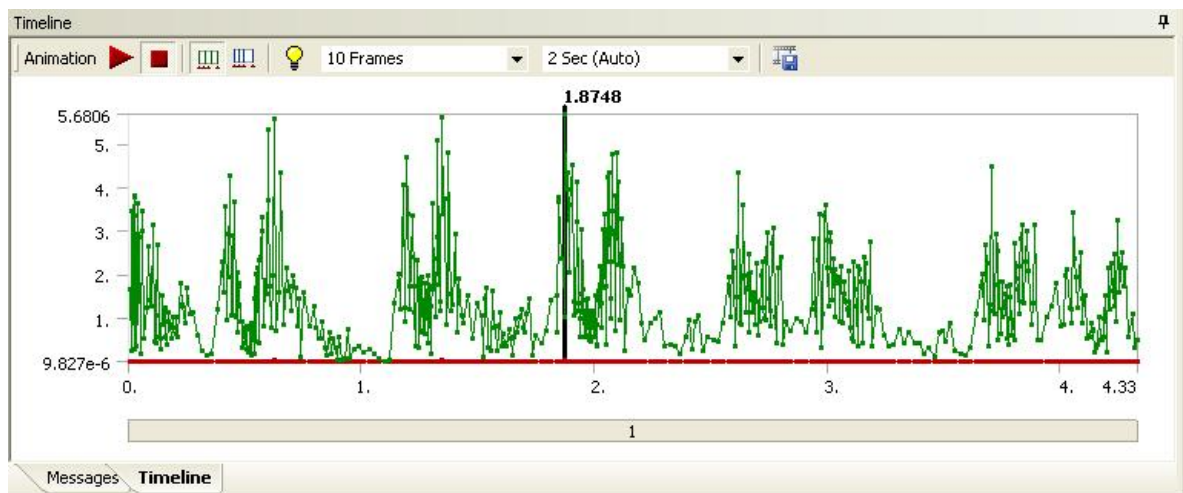


Fig. 5.5. Brazo 1(Esfuerzo (Mpa) vs. Tiempo(s)).

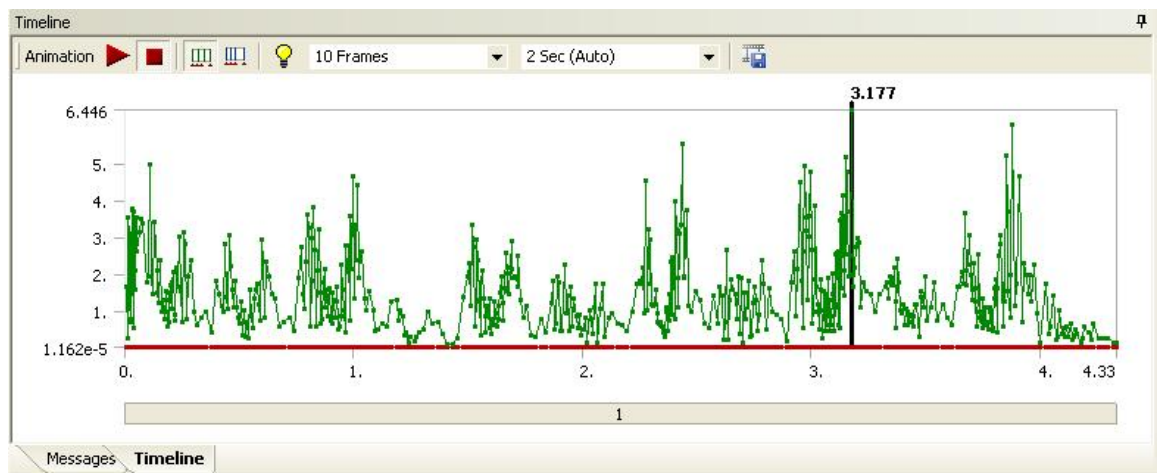


Fig. 5.6. Brazo 2 (Esfuerzo (Mpa) vs. Tiempo(s)).

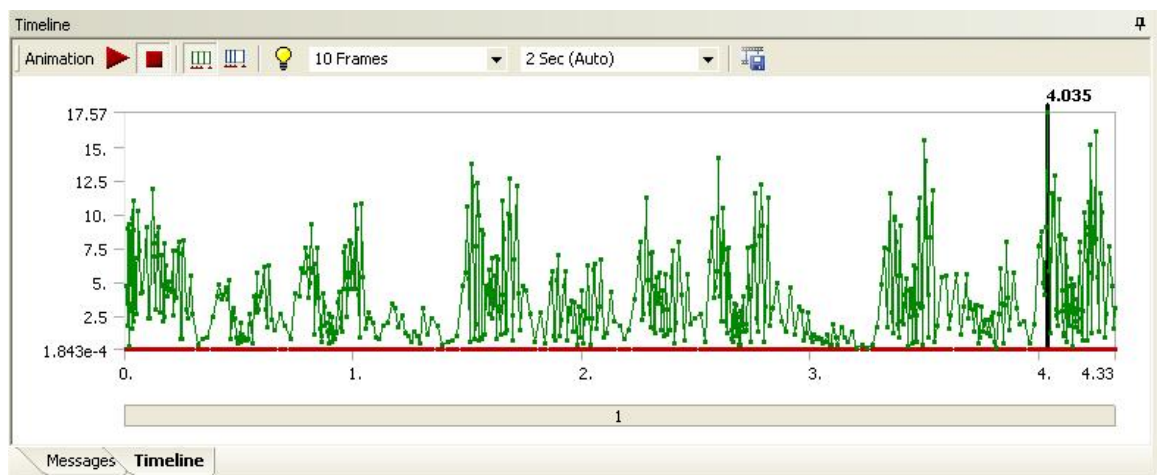


Fig. 5.7. Brazo 3 (Esfuerzo (Mpa) vs. Tiempo(s)).

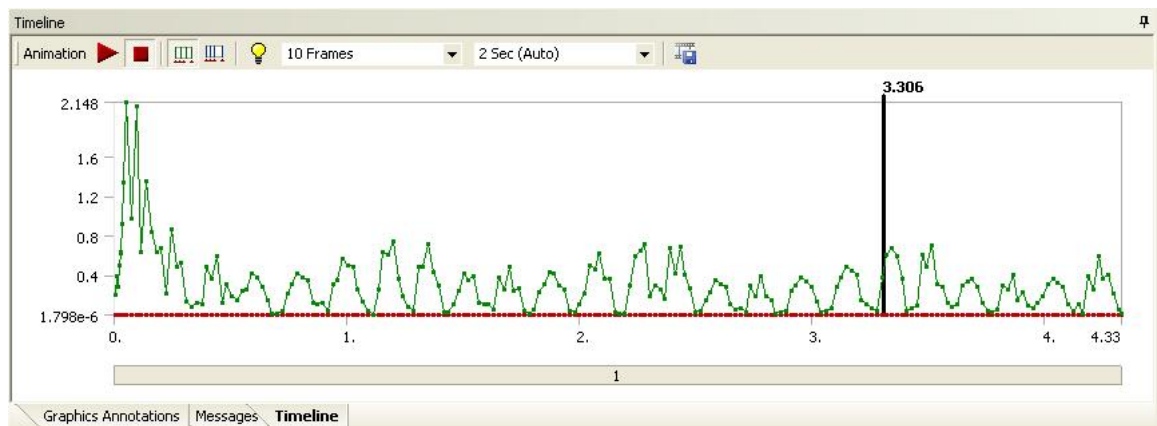


Fig. 5.8. Plato móvil (Esfuerzo (Mpa) vs. Tiempo(s)).

5.2. Selección del material

La selección del material es un paso importante en la optimización de la estructura mecánica del robot. En la metodología propuesta, la selección del material se hará variando el material para la pieza crítica y a través de análisis de esfuerzos, encontrar que tipo de material cumple con las especificaciones de operación de manera más eficiente. Para este análisis se toman como materiales de estudio el aluminio y el acero estructural.

5.2.1 Característica de los materiales.

5.2.1.1 Aluminio

El aluminio es un elemento químico, de símbolo Al y número atómico 13. Se trata de un metal no ferroso. Es el tercer elemento más común encontrado en la corteza terrestre. Los compuestos de aluminio forman el 8% de la corteza de la tierra y se encuentran presentes en la mayoría de las rocas, de la vegetación y de los animales. En estado natural se encuentra en muchos silicatos (feldespatos, plagioclasas y micas). Como metal se extrae del mineral conocido con el nombre de bauxita, por transformación primero en alúmina mediante el proceso Bayer y a continuación en aluminio mediante electrólisis.

Este metal posee una combinación de propiedades que lo hacen muy útil en ingeniería mecánica, tales como su baja densidad (2.700 kg/m^3) y su alta resistencia a la corrosión. Mediante aleaciones adecuadas se puede aumentar sensiblemente su resistencia mecánica (hasta los 690 MPa). Es buen conductor de la electricidad, se mecaniza con facilidad y es relativamente barato. Por todo ello es desde mediados del siglo XX el metal que más se utiliza después del acero.

Fue aislado por primera vez en 1825 por el físico danés H. C. Oersted. El principal inconveniente para su obtención reside en la elevada cantidad de energía eléctrica que requiere su producción. Este problema se compensa por su bajo coste de reciclado, su dilatada vida útil y la estabilidad de su precio.

5.2.1.2 Acero

El acero es la aleación de hierro y carbono, donde el carbono no supera el 2,1% en peso¹ de la composición de la aleación, alcanzando normalmente porcentajes entre el 0,2% y el 0,3%. Porcentajes mayores que el 2,0% de carbono dan lugar a

las fundiciones, aleaciones que al ser quebradizas y no poderse forjar —a diferencia de los aceros—, se moldean.

La definición anterior, sin embargo, se circunscribe a los aceros al carbono en los que éste último es el único aleante o los demás presentes lo están en cantidades muy pequeñas pues de hecho existen multitud de tipos de acero con composiciones muy diversas que reciben denominaciones específicas en virtud ya sea de los elementos que predominan en su composición (aceros al silicio), de su susceptibilidad a ciertos tratamientos (aceros de cementación), de alguna característica potenciada (aceros inoxidable) e incluso en función de su uso (aceros estructurales). Usualmente estas aleaciones de hierro se engloban bajo la denominación genérica de aceros especiales, razón por la que aquí se ha adoptado la definición de los comunes o "al carbono" que amén de ser los primeros fabricados y los más empleados, sirvieron de base para los demás. Esta gran variedad de aceros llevó a Siemens a definir el acero como «un compuesto de hierro y otra sustancia que incrementa su resistencia».

Por la variedad ya apuntada y por su disponibilidad —sus dos elementos primordiales abundan en la naturaleza facilitando su producción en cantidades industriales — los aceros son las aleaciones más utilizadas en la construcción de maquinaria, herramientas, edificios y obras públicas (Figura 5.9), habiendo contribuido al alto nivel de desarrollo tecnológico de las sociedades industrializadas. Sin embargo, en ciertos sectores, como la construcción aeronáutica, el acero apenas se utiliza debido a que es un material muy denso, casi tres veces más denso que el aluminio (7850 kg/m^3 de densidad frente a los 2700 kg/m^3 del aluminio).



Fig. 5.9. Puente fabricado en acero.

5.2.2 Modelo de simulación empleando aluminio

El modelo de simulación empleando como material el aluminio se presenta en la Figura 5.10. Las características mecánicas para el brazo en aluminio se muestran en la Figura 5.11. Se observa que la masa de cada brazo es 4.5397 kg.

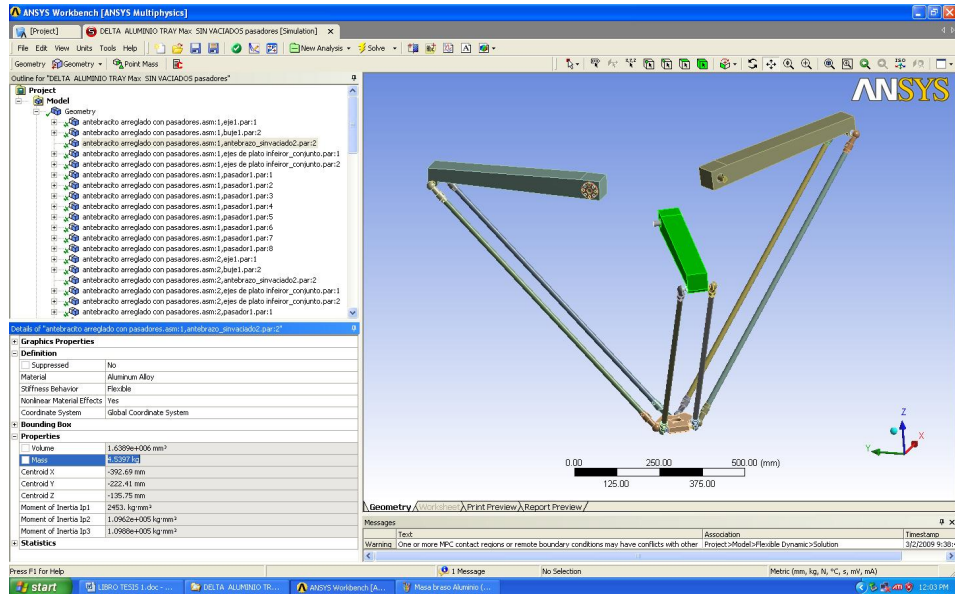


Fig. 5.10. Modelo general de la geometría en aluminio

5.2.2.1 Características del brazo en Aluminio

Details of "antebrazo arreglado con pasadores.asm:1,antebrazo...	
+ Graphics Properties	
- Definition	
☐ Suppressed	No
Material	Aluminum Alloy
Stiffness Behavior	Flexible
Nonlinear Material Effects	Yes
Coordinate System	Global Coordinate System
+ Bounding Box	
- Properties	
☐ Volume	1.6389e+006 mm ³
☒ Mass	4.5397 kg
Centroid X	-392.69 mm
Centroid Y	-222.41 mm
Centroid Z	-135.75 mm
Moment of Inertia Ip1	2453. kg·mm ²
Moment of Inertia Ip2	1.0962e+005 kg·mm ²
Moment of Inertia Ip3	1.0988e+005 kg·mm ²
+ Statistics	

Fig.5.11. Masa del aluminio

5.2.3 Modelo de simulación empleando acero estructural.

El modelo de simulación empleando como material el acero estructural para los brazos se presenta en la Figura 5.12. Las características mecánicas de cada brazo en acero se muestran en la Figura 5.13. Se observa que la masa de cada brazo es de 12.865 kg.

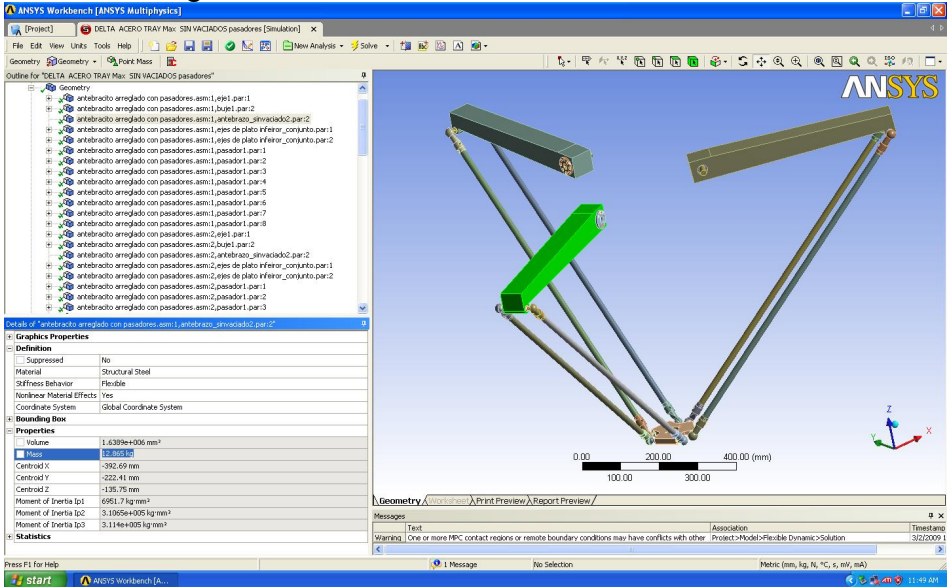


Fig. 5.12. Modelo general de la geometría en acero.

5.2.3.1 Características del brazo en Acero estructural

Details of "antebrazito arreglado con pasadores.asm:1, antebrazo..."	
Graphics Properties	
Definition	
☐ Suppressed	No
Material	Structural Steel
Stiffness Behavior	Flexible
Nonlinear Material Effects	Yes
Coordinate System	Global Coordinate System
Bounding Box	
Properties	
☐ Volume	1.6389e+006 mm ³
☒ Mass	12.865 kg
Centroid X	-392.69 mm
Centroid Y	-222.41 mm
Centroid Z	-135.75 mm
Moment of Inertia Ip1	6951.7 kg·mm ²
Moment of Inertia Ip2	3.1065e+005 kg·mm ²
Moment of Inertia Ip3	3.114e+005 kg·mm ²
Statistics	

Fig. 5.13. Masa del acero.

5.2.4 Aluminio vs. Acero estructural

De las Figuras 5.11 y 5.13 mostradas anteriormente, puede verse que para los dos materiales la geometría es la misma, con un volumen para los dos modelos de $1.6389\text{E}6 \text{ mm}^3$. Sin embargo, la masa de cada brazo varía dando 4.5397 kg para el aluminio y 12.865 kg para el acero, esto debido a las diferentes densidades de los materiales.

El acero estructural es conocido como un material de grandes propiedades mecánicas y en comparación con el aluminio en estructuras estáticas como puentes, edificios, etc. es más utilizado debido a su mayor resistencia mecánica, en donde el aluminio a veces solo hace parte de la decoración.

No obstante el análisis de esfuerzo en Flexible Dynamic de Ansys 11 da que el máximo esfuerzo para los brazos en acero fue 42.643 Mpa y para el aluminio el máximo esfuerzo fue de 18.59 Mpa (Figura 5.14). Se muestra que para casos dinámicos donde se tiene en cuenta las fuerzas de inercia, el tener mayor masa o un material de mayores propiedades mecánica (estáticas), no es garantía de tener una mayor resistencia mecánica en un análisis dinámico, cumpliéndose la teoría siguiente: En una máquina dinámica, añadir peso (masa) a partes en movimiento pudiera tener el efecto opuesto, con lo que se reduciría el factor de seguridad de la máquina, su velocidad permisible y su capacidad de carga útil. Esto se debe a que parte de la carga que genera los esfuerzos en las partes en movimiento es consecuencia de las fuerzas de inercia previstas por la segunda ley de Newton, $F=ma$. Dado que la aceleraciones de las partes en movimiento dentro de la máquina esta dictada por su diseño cinemático y por su velocidad de operación, agregar masa en partes en movimiento incrementara las cargas por inercias de estas mismas partes o piezas, a menos de que se reduzcan sus aceleraciones cinemáticas bajando la velocidad de operación. Aunque la masa añadida pudiera aumentar la resistencia de la pieza, dicho beneficio quedaría reducido o cancelado por los incrementos resultantes en fuerzas de inercia. “convirtiéndose en víctimas de su propia masa”.

Del análisis anterior y teniendo en cuenta que la velocidad de movimiento que se maneja para el análisis estructural es de 10 m/s, se concluye que mayor masa en movimiento requiere de mayor par, lo cual implica un motor de mayor tamaño y mayor costo, por lo que se deduce que el material que mejor se comporta para el robot delta es el aluminio, lo cual lo convierte en el material elegido y base del siguiente paso de optimización.

5.3. Optimización de masa

La optimización de masa consiste en hallar la masa adecuada para una pieza, tomando como criterio de evaluación de diseño, el factor de seguridad para un número de ciclos de trabajo determinado.

Anteriormente se tomo el robot delta IRB 340 FlexPicker (ABB) como referencia, el cual puede realizar un promedio de 150 picks por minuto, que equivale a 788400000 ciclos en 10 años. Para el modelo de simulación propuesto se ha tomado 700 millones de ciclos de trabajo en 10 años y un factor de seguridad de 1.

5.3.1 Modelos con diferentes masas en Ansys 11

Para poder realizar la optimización de masa es necesario realizar un proceso iterativo. El proceso iterativo inicia con una masa determinada, se halla el máximo esfuerzo y el factor de seguridad. Si el factor de seguridad es mayor al deseado, se elimina más masa y se halla nuevamente el factor de seguridad. Este proceso se repite hasta que el factor de seguridad sea el deseado.

A continuación se presentan los esfuerzos y el factor de seguridad obtenidos al ir quitando masa en forma gradual al modelo de simulación.

5.3.1.1 Modelo 1: Masa= 4.5397 Kg.

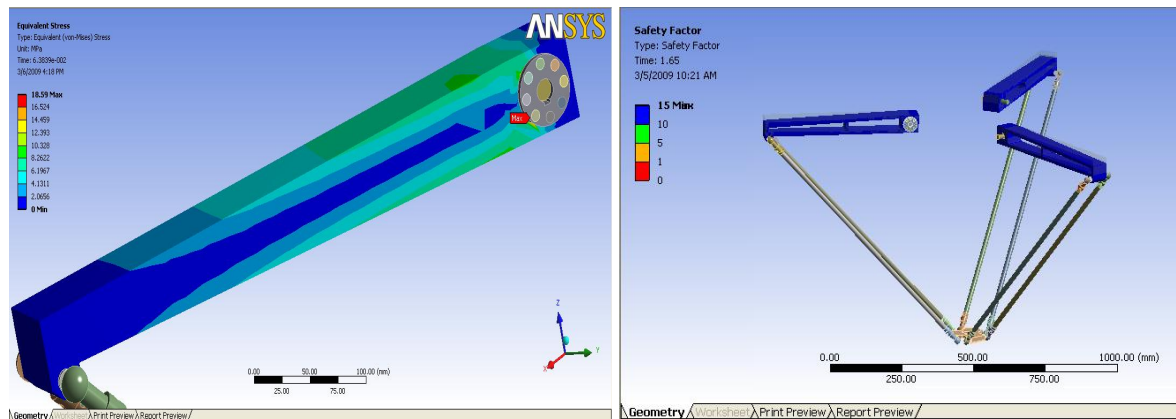


Fig. 5.15. Modelo 1, sin vaciado, esfuerzo de 18.59 Mpa, FS > 15.

5.3.1.2 Modelo 2: Masa= 2.6522 Kg.

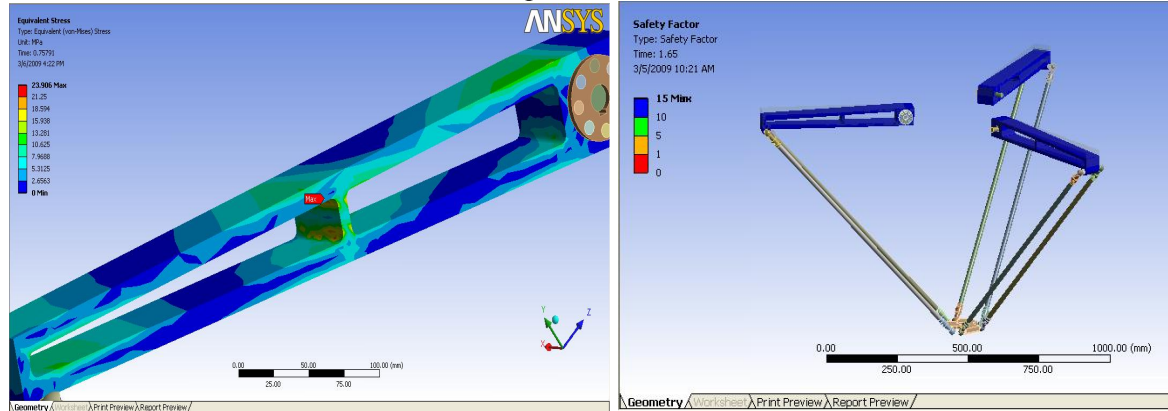


Fig. 5.16. Modelo 2, esfuerzo de 23.906 Mpa, FS > 15.

5.3.1.3 Modelo 3: Masa= 2.2682 Kg.

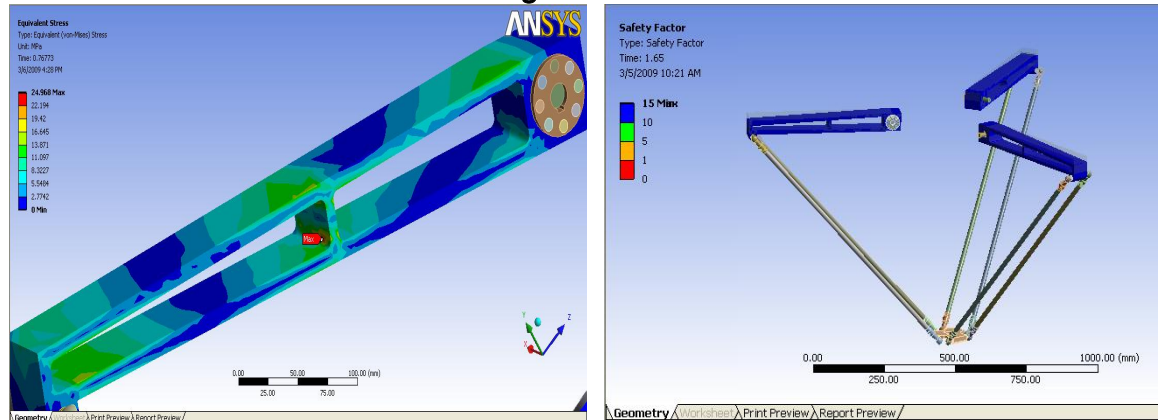


Fig. 5.17. Modelo 3, esfuerzo de 24.968 Mpa, FS > 15.

5.3.1.4 Modelo 4: Masa= 1.8867 Kg.

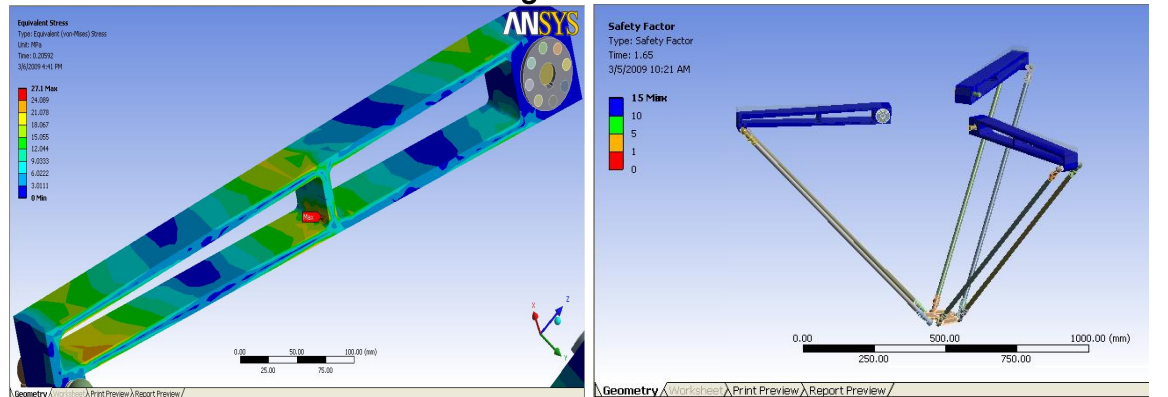


Fig. 5.18. Modelo 4, esfuerzo de 27.1 Mpa, FS > 15.

5.3.1.5 Modelo 5: Masa= 1.7235 Kg.

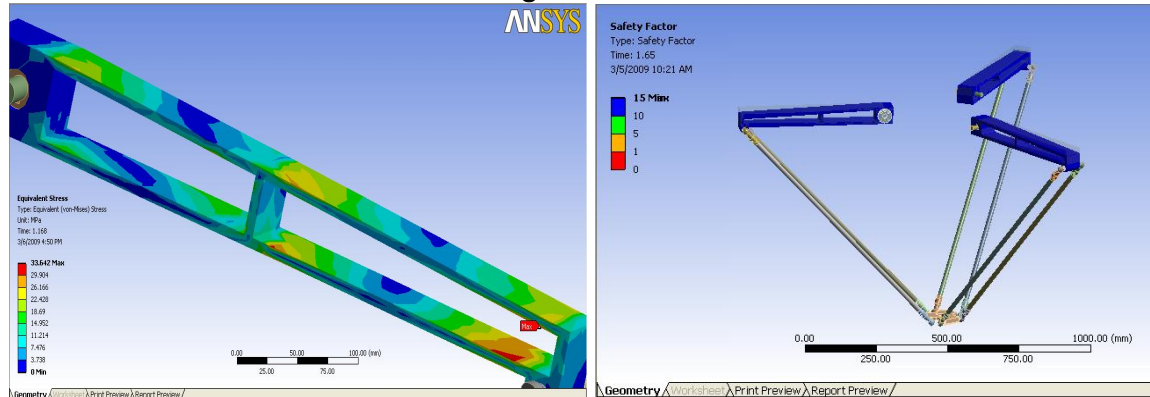


Fig. 5.19. Modelo 5, esfuerzo de 33.642 Mpa, FS > 15.

5.3.1.6 Modelo 6: Masa= 1.5771 Kg.

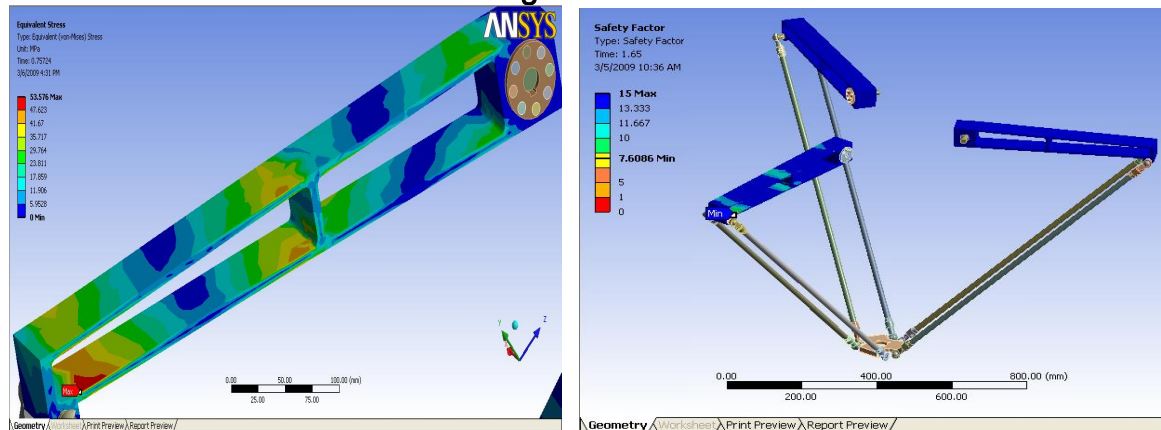


Fig. 5.20. Modelo 6, esfuerzo de 53.576 Mpa, FS= 7.608.

5.3.1.7 Modelo 7: Masa= 1.4235 Kg.

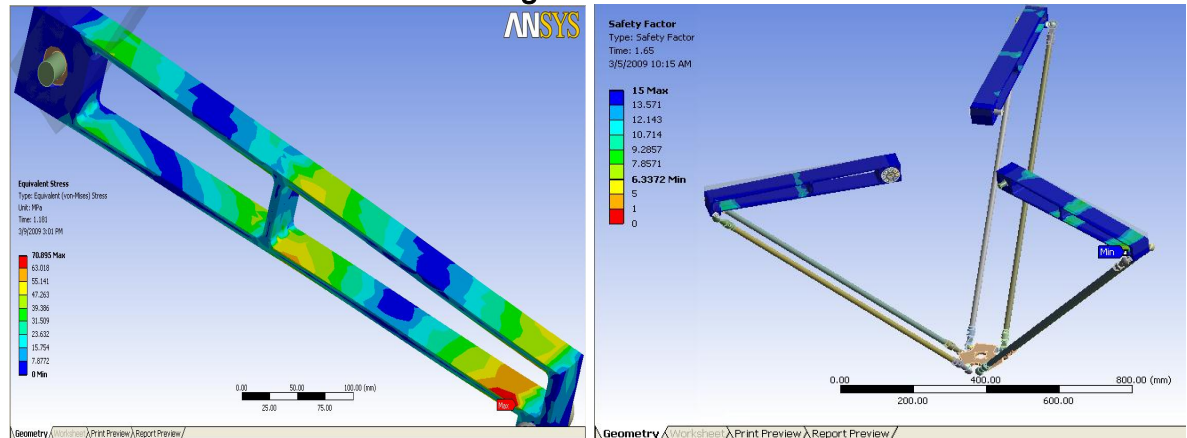


Fig. 5.21. Modelo 7, esfuerzo de 70.895 Mpa, FS= 6.337.

5.3.1.8 Modelo 8: Masa=1.3083 Kg.

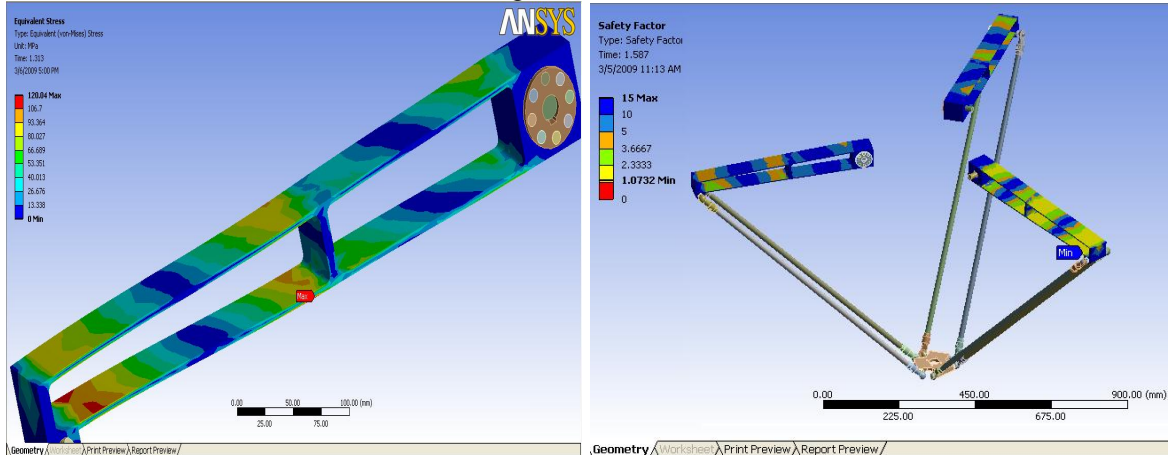


Fig. 5.22. Modelo 8, esfuerzo de 120.04 Mpa, FS=1.073.

La relación entre la variación de la masa y el factor de seguridad, así como la variación de la masa y el esfuerzo obtenido en cada paso del proceso iterativo se presentan en las Figuras 5.23 y 5.24.

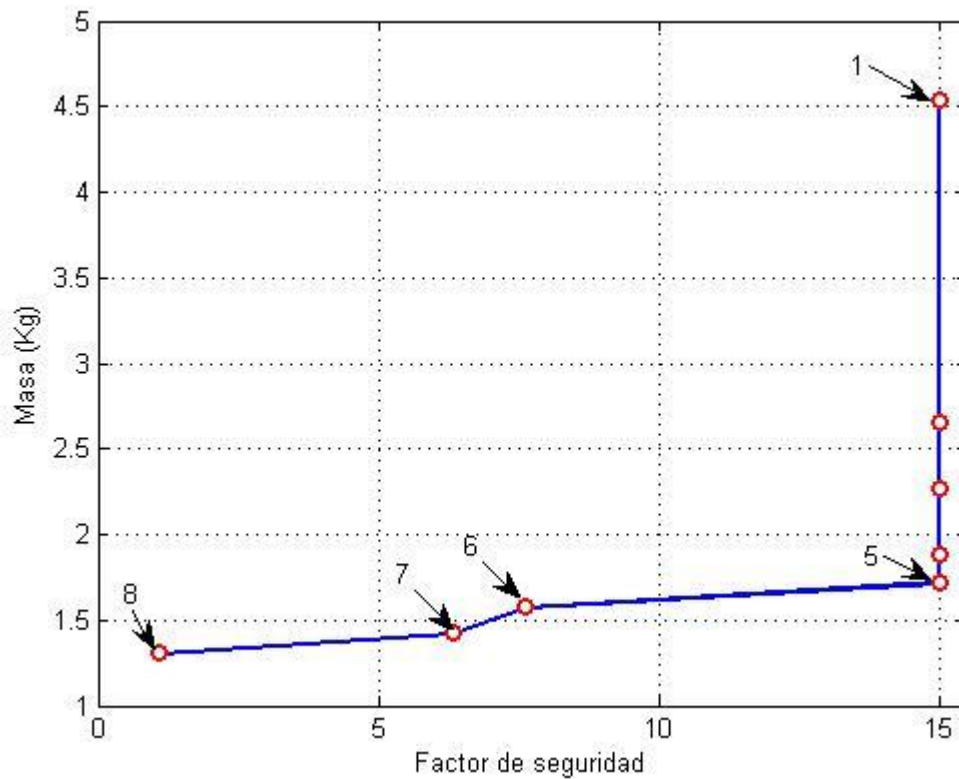


Fig. 5.23. Relación Masa (Kg) vs. Factor de seguridad, para todos los modelos.

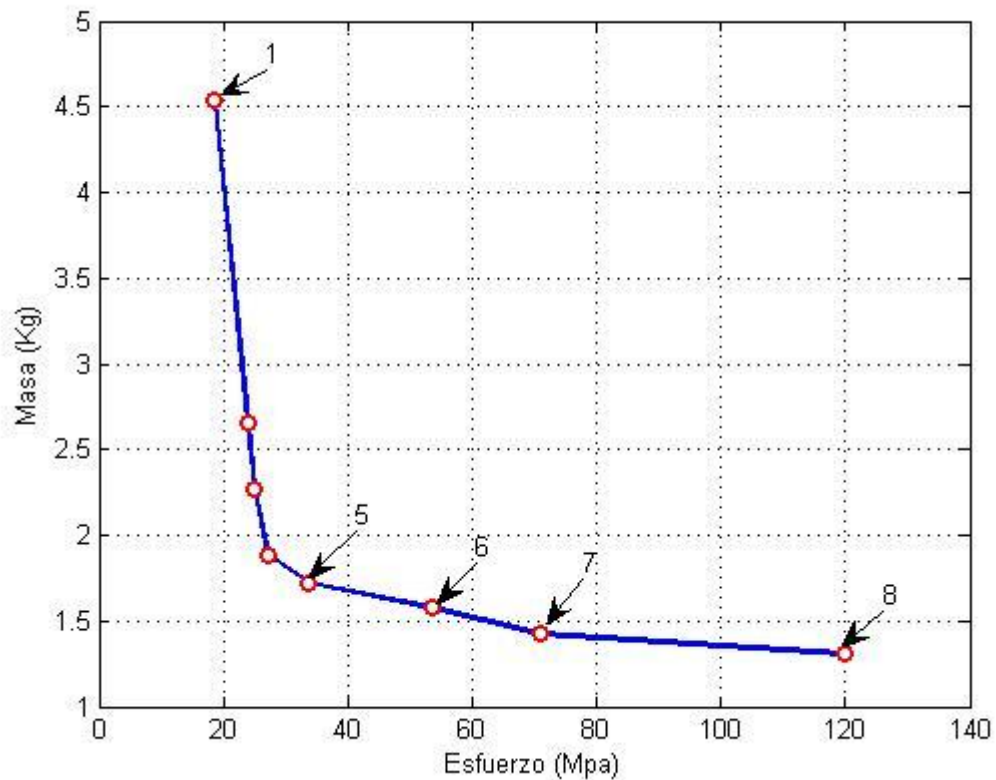


Fig. 5.24. Relación Masa (Kg) vs. Esfuerzo (Mpa) para todos los modelos.

5.3.2 Análisis del proceso de optimización de masa

Se puede observar que en las zonas donde se presentan mayores esfuerzos son las zonas donde el factor de seguridad es menor. Como se puede observar en la figura 5.25.

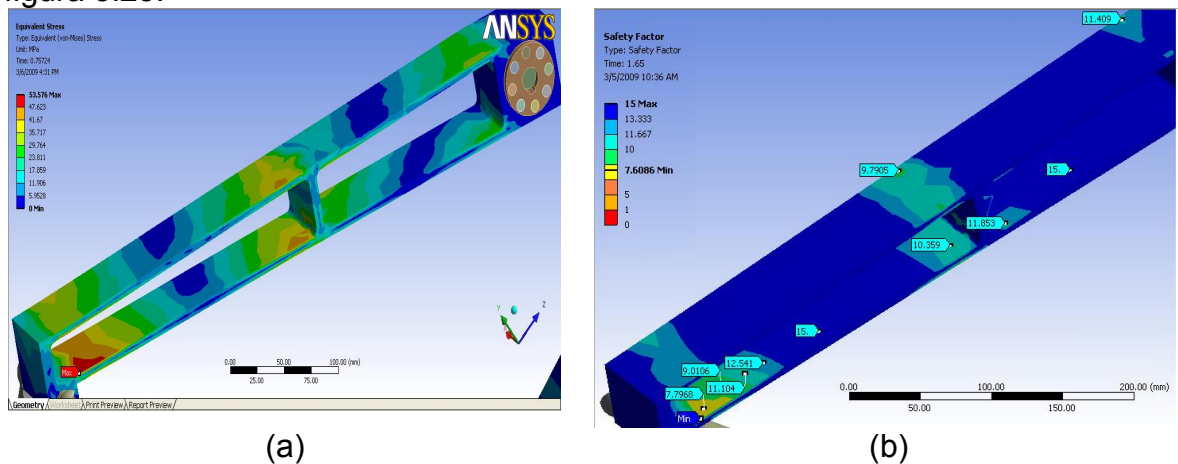


Fig. 5.25. Gráficas de Esfuerzo (a) y factor de seguridad (b) del modelo 6.

De la figura 5.24 se observa que existe un incremento mínimo en el esfuerzo cuando la masa del brazo varía entre 4.5 kg y 1.7235 Kg. Por debajo de 1.7235 kg, una reducción mínima de la masa se traduce en un aumento significativo en el esfuerzo. Esto concuerda con los resultados del factor de seguridad, en donde los modelos del 1 al 5 presentan un factor de seguridad mayor a 15 y solo los modelos posteriores registran factores de seguridad significativos.

Además, se puede deducir que para optimizar la masa es necesario quitar masa donde la estructura este sobredimensionada (zona de menor esfuerzo) y agregar masa donde sea necesario (zona de mayor esfuerzo). Para el caso de la primera iteración, se encontró que los brazos estaban sobredimensionados ya que el factor de seguridad es > 15 . Esta fue la pieza seleccionada para el proceso iterativo de optimización de masa.

Teóricamente una máquina en donde no se ponga en peligro la vida humana como el robot delta, se considera sobredimensionada si el factor de seguridad es superior a 3. Para el modelo de simulación propuesto se ha seleccionado un factor de seguridad $= 1$.

Como conclusión, se puede deducir que el modelo que cumplió con los criterios de diseño (700 millones de ciclos con un factor de seguridad inferior a 3) es el modelo 8. Para este modelo el $FS = 1.07$.

6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Se obtuvo un modelo tridimensional en SOLID EDGE el cual permitió determinar el espacio de trabajo ocupado por las piezas, así como la posible interferencia entre ellas.

La trayectoria crítica para nuestro modelo de simulación fue el cuadrado abajo, dado que fue el movimiento que presentó mayor concentración de esfuerzos en el robot delta. Con base a esta trayectoria se hace la selección del material, la optimización de masa y la selección de los motores.

La comprobación de la estructura se puede realizar bajo criterios de evaluación que emplean el esfuerzo máximo, la vida útil, el factor de seguridad, la facilidad de construcción y servicio, entre otros. Para el modelo de simulación propuesto en este proyecto el criterio de evaluación utilizado fue el factor de seguridad para un número de 700 millones de ciclos de trabajo. Adicionalmente se tuvo en cuenta los costos de implementación.

El material seleccionado fue el aluminio ya que en una máquina dinámica, añadir peso (masa) a partes en movimiento pudiera tener el efecto opuesto, con lo que se reduciría el factor de seguridad de la máquina, su velocidad permisible y su capacidad de carga útil. Dado que la aceleraciones de las partes en movimiento dentro de la máquina esta dictada por su diseño cinemático y por su velocidad de operación, agregar masa en partes en movimiento incrementara las cargas por inercias de estas mismas partes o piezas, a menos de que se reduzcan sus aceleraciones cinemáticas bajando la velocidad de operación. Aunque la masa añadida pudiera aumentar la resistencia de la pieza, dicho beneficio quedaría reducido o cancelado por los incrementos resultantes en fuerzas de inercia. “convirtiéndose en víctimas de su propia masa “.

La optimización de masa es un proceso iterativo que busca cumplir con un criterio de evaluación, el cual permita cumplir con unas especificaciones de operación deseadas.

ANSYS 11 y SOLID EDGE son dos programas de simulación que trabajan conjuntamente debido a sus características especiales ideales para el diseño y análisis de estructuras móviles como robots, permitiendo simular los diseños de ingeniería, valorado sus características, propiedades, viabilidad y rentabilidad. Así como, optimizar su desarrollo y consecuentes costos de fabricación.

Esta metodología permite seleccionar el mejor motor, el cual consume menor cantidad de energía, mayor eficiencia en la relación peso potencia y adicionalmente menor costo.

El análisis dinámico permite visualizar la distribución de esfuerzo de cada posición a lo largo de toda la trayectoria, esto es algo novedoso y significativo en este proyecto ya que anteriormente solo se podía hallar la distribución de esfuerzo de una sola posición de toda la trayectoria. Además que era tedioso y se necesitaba de dos software tipo CAE.

El análisis dinámico permite tener en cuenta los momentos de inercia, los cuales permiten a su vez seleccionar de manera correcta el material ya que tienen en cuenta la masa.

En este proyecto de grado se ha desarrollado una metodología para el análisis estructural dinámico de un robot paralelo delta basado en el software de simulación ANSYS 11. La metodología permite optimizar la estructura mecánica del robot en cuanto a materiales, geometría, motores y costos de fabricación. Lo cual permite a la universidad UPB afianzar sus conocimientos para la ofertas de servicios en robótica a la región. Como por ejemplo la selección de productos agrícolas.

Esto a su vez fortalece el grupo de investigación RoVi, puesto que hace realidad el desarrollo de prototipos robóticos industriales.

Como trabajos futuros se plantea: extender el análisis estructural a robots tipo serie y paralelo de cualquier cantidad de grados de libertad, ya que la metodología que fue desarrollada en este proyecto para el robot delta sirve para cualquier tipo de robot.

7. BIBLIOGRAFIA

Aracil, R., Saltarén, R.J, Azorín, JM, Almonacid, M., Sabater, JM. (2000b). "Climbing Parallel Robots Morphologies", *6th International IFAC Symposium on ROBOT CONTROL - SYROCO 2000*. Vienna, Austria.

Ángel, L., "Control visual de robots paralelos. Análisis, desarrollo y aplicación a la plataforma robotenis", Tesis Doctoral, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Madrid, España, 2005.

Arai, T. (1990). "Development of a parallel link manipulator". In *ICAR*, pages 839 - 844, Pisa, 19-22.

Arai, T., Stoughton, R., and Jaya, Y.M. (1991). Micro hand module using parallel link mechanism. In *Japan/USA Symp. on Flexible Automation*, pages 163-168, San Francisco, 13-15.

Bhattacharya, S., Hatwal, H., and Ghosh, A. (1998). "Comparison of an exact and an approximate method of singularity avoidance in platform type parallel manipulators". *Mechanism and Machine Theory*, 33(7):965- 974.

Bonev, I.A., Ryu, J. (1999). "A simple new closed-form solution of the direct kinematics using three linear extra sensors. In *IEEE/ASME Int. Conf. On Advanced Intelligent Mechatronics*, pages 526-530, Atlanta, 19-23.

Cauchy, A. (1813). Deuxième mémoire sur les polygones et les polyèdres. Journal de l'Ecole Polytechnique, pages 87-98.

Clavel, R, "DELTA: a fast robot with parallel geometry", 18th International Symposium on Industrial Robot, , pp. 91-100. Sydney, Australia, 1988.

Dasgupta, B., Mruthyunjaya, T.S. (1998a). "Singularity-free planning for the Stewart platform manipulator", *Mech. Mach. Theory* Vol 33, Nº 6, pp 711-725.

Dasgupta, B., Mruthyunjaya, T.S. (1998b). Closed-Form Dynamic equations of the general Stewart platform through the Newton-Euler approach. *Mech. Mach. Theory* Vol 33, Nº 7, pp 993-1012.

Douady, D. (1991). Contribution à la modélisation des robots parallèles: conception d'un nouveau robot à 3 liaisons et six degrés de liberté. *Thèse de doctorat, Université Paris VI*, Paris.

Ferdinand P. Beer, E y Russell Johnston, Jr, Mecánica de materiales, Segunda edición, McGRAW-HILL.

- Fichter, E.F. (1986). A Stewart platform based manipulator: general theory and practical construction. *Int. J. of Robotics Research*, 5(2):157-181.
- Gough, V.E., Whitehall, S.G. (1962). Proc. 9th Int Tech. Congr. FISITA, Instn. Mech 177
- Gosselin, C., and Angeles, J. (1990). "Singularity analysis of closed-loop kinematic chains". *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 6(3):281- 290.
- Haug, E. J. (1989). Computer Aided Kinematics and Dynamics Of Mechanical Systems, Allyn and Bacon, USA.
- Harris D.M.J. (1995). Parallel-linkage robot coordinate transformation through screw theory. *9th World Congress on the Theory of Machines and Mechanisms*, pp1565-1568.
- Hatip, O.E. and Ozgoren M.K. (1995). Utilization of a Stewart platform mechanism as a stabilizer. *9th World Congress on the Theory of Machines and Mechanisms*, pages 1393-1396.
- Lee, J.D. and Geng, Z. (1993). Modeling and control of a flexible Stewart platform. *IFAC 12th Triennial World Congress*, pp 441-444, Sydney.
- Liu, M.J. Li, C.X., and Li, C.N. (2000). "Dynamics Analysis of the Gough-Stewart Platform Manipulator" *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol. 16, N° 1.
- Liu, Y., Huang, T.S. and Faugeras, O.D. (1990). Determination of camera location from 2-d to 3-d line and point correspondences. *IEEE Trans. Pat. Anal. Machine Intell.*, n°1, pp 28-37.
- Liu, K., Lewis, F., Lebrete, G., Taylor, D. (1993). "The singularities and dynamics of a Stewart platform manipulator", *Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications*. vol.8, no.3, pp.287-308.
- Ma, O. and Angeles, J. (1991). "Architecture singularities of platform manipulator". *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp 1542-1547, Sacramento.
- Masory, O. and Wang, J. (1995). "Workspace evaluation of Stewart platforms". *Advanced robotics*, 9(4), pp 443-461.
- Merlet, J-P. (1989). An algorithm for the forward kinematics of general 6 d.o.f. parallel manipulators. Research Report 1331, INRIA.

Merlet, J. P. (1992). Direct kinematics and assembly modes of parallel manipulators. *International Journal of Robotics Research*, 11(2), 150-162.

Merlet, J-P. (1993). Orientation workspace of a parallel manipulator with a fixed point. In *ICAR*, pages 141-146, Tokyo.

Merlet, J-P. (1995). "Designing a parallel robot for a specific workspace". Rapport de Recherche 2527, INRIA.

Nastran, www.me.caltech.edu/centennial/history/nastran.htm

Pierrot, F., Dauchez, P., and Fournier, A. (1991). Towards a fully-parallel 6 d.o.f. robot for high speed applications. In *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp 1288-1293, Sacramento.

Reboulet, C. and Pigeyre R. (1992a.). Hybrid control of a 6 d.o.f. in parallel actuated micro-manipulator mounted on a SCARA robot. *Int. J. of Robotics and Automation*.

Robert L. Norton, Diseño de máquinas, Cuarta edición, Pearson.

R.C. Hibbeler, Mecánica de materiales, Sexta edición, traducción, Pearson.

Roy R. Craig, JR, Mecánica de materiales, Primera edición, Compañía editorial continental. México 2002.

Robert L. Mott, Diseño de elementos de máquinas, Cuarta edición, Prentice Hall, 2006.

Sefrioui, J. and Gosselin, C. (1992). "Singularity analysis and representation of planar parallel manipulators". *Robotics and Autonomous Systems*, 10:209-224.

Stewart D. (1965). A platform with 6 degrees of freedom. *Proc. of the Institution of mechanical engineers*, 180 (Part 1, 15): pp 371-386.

Wang, J. and Masory, O. (1995). On the accuracy of a Stewart platform-part I: The effect of manufacturing tolerances. *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pages 114-120, Atlanta.