

**CO-SIMULACIÓN ADAMS/MATLAB PARA EL CONTROL DE POSICIÓN DEL
ROBOT GRYPHON**

MARY PAOLA PEREZ SANDOVAL

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
BUCARAMANGA
2012**

**CO-SIMULACIÓN ADAMS/MATLAB PARA EL CONTROL DE POSICIÓN DEL
ROBOT GRYPHON**

MARY PAOLA PEREZ SANDOVAL

PROYECTO DE GRADO

Director

Ph.D.

LUIS ANGEL SILVA

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
BUCARAMANGA**

2012

Nota Aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Bucaramanga, septiembre 2012

AGRADECIMIENTOS

Gracias,

Primeramente a Dios por brindarme la oportunidad de vivir, ofreciéndome cada día salud, bienestar y sabiduría.

Seguidamente a mis padres Ana Beatriz Sandoval y Rafael Pérez, quienes me educaron de forma íntegra, con valores de casa para ser una buena persona y con su arduo trabajo me han apoyado siempre para ser una gran profesional.

A mis hermanos Yalile, William y familia quienes de una u otra forma siempre me han acompañado en el proceso de la realización de mis sueños.

Al amor de mi vida Esteban Correa por ser el motor que generó en mí, trabajar con una sonrisa permanente y con una ilusión constante en mi proyecto de tesis.

A mi gran amiga Yuli Álvarez compañera de laboratorios de electrónica, quien me enseñó que la amistad combinado con el trabajo y una pizca de diversión, es el equilibrio de un estudiante de ingeniería.

A mi director de tesis, profesores, compañeros y amigos de la universidad Pontificia Bolivariana con quienes tuve el gusto de aprender, compartir, reír, soñar y sobretodo vivir tantos maravillosos momentos.

Y por último a mi gato MummRa, quien fue mi fiel compañero en noches de traspasos, frente a mi PC acompañados de café.

Mary Paola Pérez S.

CONTENIDO

1	RESUMEN	14
2	INTRODUCCIÓN	15
3	OBJETIVOS	17
3.1	Objetivo general	17
3.2	Objetivos específicos.....	17
4	MARCO TEORICO.....	18
4.1	ROBOT INDUSTRIAL.....	18
4.1.1	Robot Paralelo	19
4.1.2	Robot Serie	20
4.2	DESCRIPCIÓN DEL ROBOT GRYPHON EC	21
4.2.1	Grados de Libertad (GDL)	22
4.2.2	Articulaciones	23
4.2.3	Volumen de Trabajo.....	23
4.2.4	Capacidad de Carga	24
4.2.5	Exactitud de Posición.....	24
	Transmisiones.....	24
	Correas dentadas.....	24
	Actuadores	24
4.2.6	Efecto Final-Pinza.....	25
4.3	ESTRATEGIAS DE CONTROL EMPLEADAS EN ROBOTS INDUSTRIALES	26
4.3.1	Control de Posición.....	27
	Control P con retroalimentación de velocidad y control PD	27
	Control PD con compensación de gravedad	27
	Control PD con compensación Pre-calculada de gravedad	28
	Control PID	29

4.3.2	Control de movimiento	30
	Control por Precompensación.....	30
	Control PD con Precompensación	31
4.3.3	Control Par-Calculado y Control Par-Calculado+.....	32
	Control Par-Calculado.....	32
	Control Par-Calculado+.....	32
4.3.4	PLATAFORMAS DE SIMULACIÓN	33
	Software CATIA V5 R7	33
	Software SOLIDWORKS.....	34
	SOFTWAREADAMS MSc.....	35
	SOFTWARE MATLAB	36
4.4	CO-SIMULACION.....	37
5	MODELOS CINEMATICOS Y DINAMICOS DEL ROBOT GRYPHON EC	40
5.1	DESCRIPCION FÍSICA y GEOMETRICA DELROBOT GRYPHON.....	40
5.1.1	BASE	42
5.1.2	ESLABON 1.....	43
5.1.3	ESLABON 2.....	45
5.1.4	ESLABON 3.....	46
5.1.5	EFECTOR FINAL-PINZA.....	47
5.1.6	SISTEMA DE PINONES	49
	Formulas de Trazado Rueda	49
	Formulas de Trazado Pinon.....	50
5.2	MODELO CINEMÁTICO.....	54
5.2.1	Modelo Cinemático Directo.....	54
5.2.2	Modelo Cinemático Inverso	54
5.2.3	Modelo Geométrico Directo del Robot Gryphon	55
	Calculo de las Matrices de Transformación	56
5.3	MODELO DINAMICO	58
5.3.1	Modelo Dinámico Inverso	59

5.3.2	Modelo Dinámico Directo.....	59
5.4	PLANIFICADOR DE TRAYECORIAS	60
5.4.1	Desarrollo matemático del Polinomio 616.....	60
	Tramo I de Aceleración	61
	Tramo II de Velocidad	62
	Tramo III de Desaceleración	63
6	MODELOS DE SIMULACIÓN	64
6.1	MODELO DE SIMULACIÓN EN CATIA	64
6.2	MODELO DE SIMULACION EN SOLIDWORKS.....	72
6.2.1	Importación y Exportación de piezas desde software CATIA a SOLIDWORKS.....	76
6.2.2	Ensamble del robot GRYPHON en SOLIDWORKS.....	78
6.2.3	Propiedades físicas.....	81
6.3	MODELO DE SIMULACIÓN EN ADAMS MSc	82
7	MODELO DE CO-SIMULACIÓN Y eSTRATEGIAS DE CONTROL.....	85
7.1	CARACTERIZACIÓN Y SELECCIÓN COMERCIAL DEL MOTOR.....	85
7.1.1	Escenario 1.....	87
7.1.2	Escenario 2.....	88
7.1.3	Escenario 3.....	90
7.2	MODELO DE CO-SIMULACION ADAMS/MATLAB	94
7.2.1	Prueba 1	97
8	PRUEBAS Y RESULTADOS OBTENIDOS.....	105
8.1	Prueba 1.....	110
8.2	Prueba 2.....	112
9	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	114
10	BIBLIOGRAFÍA	116
11	ANEXOS	119

LISTA DE ILUSTRACIONES

Figura 1. Robot Paralelo IRB 340 FlexPicker(ABB).	20
Figura 2. Robot Serie IRB 6400RF (ABB).	21
Figura 3. Robot GRYPHON.	22
Figura 4. GDL Robot GRYPHON.	23
Figura 5. Correas Dentadas.	25
Figura 6. Efecto Final.	26
Figura 7. Esquema control de Posición [13]	27
Figura 8. Control PD con retroalimentación de velocidad y control PD [13].	28
Figura 9. Control PD con compensación de gravedad[13].	28
Figura 10. Control PD con compensación precalculada de gravedad [5].	29
Figura 11. Control PID[13].	29
Figura 12. Control de movimiento[13]	30
Figura 13. Control por Precompensación[13].	31
Figura 14. Control PD con Precompensación[13].	31
Figura 15. Control Par-Calculado[13].	32
Figura 16. Control Par-Calculado+[13].	33
Figura 17. Logos a) CATIA. b) DASSAULT SYSTEMES.	34
Figura 18. Logo SOLIDWORKS.	35
Figura 19. Logo a) MSC SOFTWARE b) ADAMS.	36
Figura 20. Logo MATLAB.	37
Figura 21. Prototipo real Robot Gryphon EC.	41
Figura 22. Base Robot Gryphon EC.	43
Figura 23. Eslabón 1 - Gryphon EC.	44
Figura 24. Eslabón 2 - Gryphon EC.	46
Figura 25. Eslabón 3 - Gryphon EC.	47
Figura 26. Pinza - Gryphon EC.	48
Figura 27. Sistema de Trazado Piñones Cónicos [25].	49
Figura 28. Ángulos del Cono del diámetro Primitivo [25]	51
Figura 29. Ángulo de la Cara del Diente[25].	52
Figura 30. Sistema de Piñones Cónicos.	53
Figura 31. Cinemática Directa.	54
Figura 32. Cinemática Inversa.	55
Figura 33. Modelo Geométrico del Robot Gryphon.	55
Figura 34. Dinámica Inversa.	59
Figura 35. Dinámica Directa.	59

Figura 36. Pol 616 Tramos de Posición, Aceleración y Velocidad.	61
Figura 37. Espacio de Trabajo CATIA	64
Figura 38. Selección de Diseño Mecánico de Parte.	65
Figura 39. Entorno grafico Sketcher.	66
Figura 40. Profundidad de la Pieza.	67
Figura 41. Diseño de Cilindro.....	67
Figura 42. Creación del Cilindro.....	68
Figura 43. Profundidad de la Pieza.	68
Figura 44. Propiedades de la Pieza.	69
Figura 45. Base del Robot Gryphon Diseñada en CATIA.	70
Figura 46. Robot Gryphon EC modelado pieza por pieza en CATIA.	71
Figura 47. Entorno Grafico de SOLIDWORKS.....	72
Figura 48. Espacio de Trabajo de SOLIDWORKS.....	73
Figura 49. ToolBox GB de SOLIDWORKS.	73
Figura 50. Selección de Piñón Cónico.	74
Figura 51. Configuración de Piñón Cónico.	74
Figura 52. Sistema de Piñones en SOLIDWORKS.....	75
Figura 53. a) Pieza IGS b) Importación de pieza c) Pieza en SOLIDWORKS.	77
Figura 54. Piezas en el espacio de trabajo de SOLIDWORKS.....	78
Figura 55. Relaciones de Posición.....	79
Figura 56. Engranés y Piñonera (Arriba), Pinza Completa (Abajo).....	80
Figura 57. Ensamble del robot Gryphon.	81
Figura 58. Propiedades Físicas del robot Gryphon.	82
Figura 59. Proceso de Importación del robot Gryphon en ADAMS.....	83
Figura 60. Modelo del robot Gryphon en ADAMS MSc.....	84
Figura 61. Sistema de Engranés y Pinza en ADAMS MSc.	84
Figura 62. Circuito para Caracterización del Motor.....	85
Figura 63. Función de Transferencia de Parámetros del Motor.	86
Figura 64. Escenario 1, posición inicial y final.....	87
Figura 65. Escenario 1, Pares, Velocidad y Posición Angular Vs tiempo.	88
Figura 66. Escenario 2, posición inicial y final.....	89
Figura 67. Escenario 2, Pares, Velocidad y Posición Angular Vs Tiempo.	90
Figura 68. Escenario 3, posición inicial y final.....	91
Figura 69. Escenario 3, Pares, Velocidad y Posición Angular Vs tiempo.	92
Figura 70. Diagrama de Bloques de un Motor DC	94
Figura 71. ADAMS/Controls.....	94
Figura 72. Configuración del Joint.	95
Figura 73. Configuración del Motion.	96
Figura 74. Configuración de Articulaciones del Robot GRYPHON.	97

Figura 75. Simulacion1, Posición inicial y Final.	98
Figura 76. Simulación1 Posición (Grados-Rad.).....	99
Figura 77. Creación de Variables.....	99
Figura 78. Asignación de Variables de Entrada.	100
Figura 79. Asignación de Variables de Salida.	100
Figura 80. Herramienta ADAMS/Controls.	101
Figura 81. Controls/PlantExport.	101
Figura 82. Workspace de MATLAB Adams_Sub.	102
Figura 83. Diagrama de Bloques en Simulink.	102
Figura 84. Importación de Resultados PostProcessor.	103
Figura 85. Posiciones Angulares Vs Tiempo.	103
Figura 86. Velocidad Angular Vs Tiempo.....	104
Figura 87. Control PD con Realimentación de Velocidad.	105
Figura 88. Proceso de Pruebas.	105
Figura 89. SFORCE en Cada Articulación.	106
Figura 90. Sintonización del Controlador PD para la articulación 1.	107
Figura 91. Prueba de Eslabon1 $q_d=45^\circ$ en MATLAB.....	107
Figura 92. Posición q_1 en ADAMS.....	108
Figura 93. Planta del Robot en MATLAB	108
Figura 94. Controlador PD en MATLAB/Simulink.	109
Figura 95. Prueba 1, Posicion deseada y Velocidad Angular Vs Tiempo MATLAB.	110
Figura 96. Posición y Velocidad Angular Vs Tiempo ADAMS.....	111
Figura 97. Recorrido de la Posición deseada ADAMS.....	112
Figura 98. Prueba 2, Posicion deseada y Velocidad Angular Vs Tiempo MATLAB.	112
Figura 99. Prueba 2 Recorrido de la Posición deseada ADAMS.	113
Figura 100. Prueba 2 Trayectoria efectuada.....	113

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Dimensiones del Robot Gryphon.	43
Tabla 2. Dimensiones específicas de la base - Robot Gryphon.....	44
Tabla 3. Dimensiones específicas del eslabón 1 - Robot Gryphon EC.	46
Tabla 4. Dimensiones específicas del Eslabón 2 - Robot Gryphon EC.....	47
Tabla 5. Dimensiones específicas del Eslabón 3 - Robot Gryphon EC.....	48
Tabla 6. Dimensiones específicas del Eslabón 3 - Robot Gryphon EC.....	50
Tabla 7. Dimensiones específicas de los Piñones - Robot Gryphon EC.	55
Tabla 8. Parametros Denavit-Hartenberg	58
Tabla 9. Posición y Pares Máximos de articulaciones	97
Tabla 10. Características Generales Motores.....	97
Tabla 11. Pruebas de posición.....	115

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Introduccion al uso de CATIA.	
Anexo 2. Introduccion al uso de SOLIDWORKS.....	
Anexo 3. Introduccion al uso de ADAMS MSC	
Anexo 4. Datasheets motores.....	
Anexo 5. Datasheet robot Gryphon.....	

1 RESUMEN

El presente proyecto, pretende mostrar el uso de la Co-Simulación como alternativa para el diseño, implementación y simulación de manipuladores robóticos en la industria en general. El objetivo del proyecto, es aplicar una metodología para el control de posición de un robot industrial a través de la Co-Simulación. Esta tesis, prueba dicha metodología a través de una serie de pasos que describiremos a continuación: Primero se realiza un modelado virtual de las piezas mecánicas que componen el Robot del caso de estudio (Robot GRYPHON de 5 grados de libertad) en los entornos virtuales CATIA Y SOLIDWORKS. Luego se realiza una simulación de la dinámica del robot en el software ADAMS y se obtiene un sistema con todos datos del prototipo. Seguidamente con ayuda de MATLAB se programa un planificador de trayectorias con el cual se prueban las estrategias de control de posición del modelo y se hace la Co-Simulación ADAMS /MATLAB del sistema. Finalmente se presentan las pruebas y resultados de la metodología.

Palabras Clave: Co-Simulación, MATLAB, ADAMS, SOLIDWORKS, CATIA, modelo matemático, posición espacial, posición articular, pares, robots, estrategias de control.

Abstract

This project aims to demonstrate the use of the co-simulation as an alternative for the design, implementation and simulation of robotic manipulators in the industry. The project objective is to implement a methodology for the position control of an industrial robot through co-simulation. This thesis, try this methodology through a series of steps described below: First, we create a virtual model of mechanical parts from the Robot GRYPHON (A robot of 5 degrees of freedom) in CATIA and SOLIDWORKS softwares. Then we make a robot dynamics simulation in ADAMS software getting a system with prototype data. Then using MATLAB we program a path planner to test control strategies for model position and make the Co-Simulation ADAMS / MATLAB system. Finally we present the results of the tests and also an analysis of the methodology applied.

Keywords: Co-simulation, MATLAB, Adams, mathematical model, spatial position, joint position, torque, robotics, control strategy.

2 INTRODUCCIÓN

En la actualidad la automatización ha sido una de las principales fuentes de desarrollo para las sociedades, generando crecimiento y una mayor eficiencia en los procesos. La robótica industrial es un componente fundamental en la automatización, la cual redundando en una mayor efectividad de los procesos, rentabilidad de la maquinaria aumento del nivel de producción, entre otros.

La demanda industrial de los diferentes procesos de consumo en el mundo, se ha convertido en uno de los grandes desafíos de la humanidad. La tecnología es y ha sido en los últimos años fuente de los cimientos y crecimiento de la automatización, sin discriminación del nivel de desarrollo de los países. Un ejemplo sobresaliente es aquel que está atravesando nuestro país por estos tiempos con el tratado de libre comercio o “TLC”. Con el fin de ampliar el mercado de bienes y servicios, deseando un impacto positivo para el crecimiento de la economía, aumento de las exportaciones y generación de empleo significativo para los colombianos.

En Colombia la mano de obra ofrece una alta competitividad, pero es necesario dinamizar las empresas, para mejorar e incrementar el volumen y la calidad de sus productos. Se identifica de esta manera la necesidad de implementar la robótica en nuestra industria.

Existen robots industriales fabricados por grandes y prestigiosas compañías. A los cuales se puede acceder por un determinado costo, ofreciendo grandes ventajas de funcionalidad. Se propone el estudio a fondo de éstos robots, como iniciativa para la construcción de nuestros propios prototipos.

Uno de los robots manipuladores más conocidos es el tipo serie. En la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga, se tiene el modelo físico del robot GRYPHON¹, el cual abre la alternativa de explorarlo e investigarlo desde el punto de vista de diseño, análisis mecánico y desarrollo de estrategias de control.

¹ El robot Gryphon es un robot industrial tipo serie, de 5 grados de libertad. Tomado de Pag. 19

Gracias a la gran solicitud de tecnología y que invade cada día más a la sociedad, este proyecto pretende contribuir en la comunidad santandereana, facilitando e incentivando nuevas opciones de desarrollo manufacturero, económico y óptimo para las empresas. Enfatizando en las líneas de producción en masa que requieren un alto nivel de calidad y altos volúmenes de producción.

Este proyecto plantea el estudio del modelo físico del robot Gryphon. Su diseño mecánico empleando los software CATIA y SOLIDWORKS. Y el desarrollo de estrategias de control de posición mediante el modelo de Co-Simulación MATLAB/ADAMS.

El documento está estructurado de la siguiente manera: inicialmente se describe la estructura física de cada uno de los componentes mecánicos del robot Gryphon. Posteriormente, se desarrollarán los modelos de simulación empleando los software CATIA Y SOLIDWORKS. Luego se hallan los modelos cinemáticos del robot, el desarrollo del planificador de trayectorias y el modelo de simulación dinámico en ADAMS. Seguidamente se establece un modelo de Co-Simulación ADAMS/MATLAB y se desarrollan las estrategias de control de posición. Finalmente se presentan los resultados obtenidos y las conclusiones derivadas del proyecto.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

Desarrollar un modelo de Co-Simulación en ADAMS/MATLAB para el control de posición del Robot GRYPHON.

3.2 Objetivos específicos

- Construir un modelo del robot GRYPHON en el software CATIA
- Diseñar el modelo dinámico del robot GRYPHON en el software ADAMS
- Realizar las pruebas de simulación en el software ADAMS.
- Obtener los modelos cinemáticos del robot.
- Desarrollar el planificador de trayectorias basado en los modelos cinemáticos del robot.
- Establecer la Co-Simulación ADAMS/MATLAB
- Implementar un controlador de posición PD (proporcional derivativo).

4 MARCO TEORICO

En este capítulo se pretende dar a conocer el estado del arte de los robots industriales, tales como el robot Gryphon, Ec. mostrar el proceso de la Co-Simulación, una breve reseña de los programas informáticos que se implementaron en el proceso de este proyecto, como lo son CATIA, SOLIDWORKS, ADAMS y MATLAB y para terminar la teoría de los tipos de control.

4.1 ROBOT INDUSTRIAL

Un robot es una maquina programable capaz de realizar tareas específicas, repetitivas optimizando el tiempo de trabajo. Puede ser controlada por el humano ó en la mayoría de las ocasiones por la computadora, existen diversos tipos de robots dependiendo del trabajo que va a ejecutar.

La palabra robot proviene del término “robota” referida al trabajo realizado de manera forzada. En 1921 fue utilizada en la obra teatral “Rossum’s Universal Robot” escrita por Karen Capek. Consecutivamente aparecería en el argumento del filme alemán Metrópolis de Thea von Harbou y Fritz Lang en 1926. Isaac Asimov, escritor prolífico estadounidense, en los años cuarenta, fue el pionero en usar la palabra robot en el campo científico de construcción y programación de los mismos. En el año 1942 en su obra “Rundaround” establece las tres leyes de la robótica [18].

- Un robot no puede perjudicar a un ser humano, ni con su inacción permitir que un ser humano sufra daño.
- Un robot a de obedecer las órdenes recibidas de un ser humano, excepto si tales órdenes entran en conflicto con la primera ley.
- Un robot debe proteger su propia existencia mientras tal protección no entre en conflicto con la primera o la segunda ley.

Las primeras generaciones de los robots fueron en las décadas de los 70's y 80's donde en su construcción contaban con dispositivos estacionarios, electromecánicos, sensores y controladores programables. Las generaciones

siguientes a partir de los años 90's hasta la actualidad se encuentran en fase de investigación y desarrollo contando con características de programación sofisticada, reconocimiento de voz, visión artificial entre otras. Lo último en inteligencia robótica puede adoptar formas imaginables (Midmarket CIO Definitions) [19].

Un robot industrial es un manipulador reprogramable con varios grados de libertad capaz de manipular: materias, piezas, herramientas o dispositivos especiales según trayectorias variables programadas para realizar diversas tareas. (Definición adaptada por la *Organización Internacional de Estándares ISO*) [21].

La robótica industrial ha evolucionado a través de las diferentes generaciones incursionando en áreas como: medicina, inteligencia militar, academia, mecánica, entre otras. Los robots según su estructura mecánica se clasifican en dos tipos, los paralelos y el tipo serie.

4.1.1 Robot Paralelo

Los robots paralelos son aquellos cuyo efector final con n grados de libertad, se encuentra unido a la base por más de una cadena cinemática independiente. Esta condición hace que los manipuladores paralelos tengan mayor rigidez (estabilidad estructural), velocidad, relación carga/peso y precisión [20]. En la **Figura 1** se puede observar la arquitectura mecánica de un manipulador tipo DELTA fabricado por la compañía ABB.



Figura 1. Robot Paralelo IRB 340 FlexPicker(ABB).

4.1.2 Robot Serie

Los robots tipo serie están formados por una cadena cinemática abierta, con una estructura similar al brazo humano (antropomórficos). Éste tipo de robots articulados es comúnmente usado en las grandes industrias, como por ejemplo en la industria automovilística se emplean numerosos robots para las operaciones repetitivas como pintado, atornillado, soldado entre otras. En la Figura 2 se puede observar la arquitectura mecánica de un manipulador tipo SERIE fabricado por la compañía ABB.



Figura 2. Robot Serie IRB 6400RF (ABB).

4.2 DESCRIPCIÓN DEL ROBOT GRYPHON EC

Forma parte de una familia de robots designado por el grupo Walli, productos de la empresa Italtec, Italia. GRYPHON es un robot convencional emulando el movimiento del brazo humano, mano y ejes de rotación sobre el hombro, el codo y la muñeca. Véase la Figura 3.

La estructura mecánica del robot está compuesta por:

- Eslabones
- Accionadores
- Transmisiones

La unión entre los eslabones se denomina nodos y el mecanismo que permite dicha unión y movimiento se llama articulación. La capacidad de carga depende del dimensionamiento y características estructurales de los eslabones, sistemas de transmisión y accionadores. Existe un subsistema mecánico ubicado en el

extremo del robot en el que se localiza el efector final (pinza). Su funcionalidad es adaptarse de forma específica a la aplicación concreta a realizar por el robot, permitiendo orientarse en el espacio de trabajo del mismo [22]. El peso del robot es de 11kg. El material que componen los eslabones es acero, los cilindros son de acero inoxidable y bujes de cobre. La parte superior de la pinza es de aluminio.



Figura 3. Robot GRYPHON.

4.2.1 Grados de Libertad (GDL)

Los grados de libertad de un sistema son aquellos parámetros independientes que se necesitan para definir unívocamente su posición, en el espacio en cualquier instante. Este concepto es fundamental para la síntesis y análisis de los mecanismos. Determinando el GDL como el número de entradas que se necesita proporcionar, a fin de originar una salida predecible [23]. También se podría definir como los posibles movimientos básicos (giratorios y de desplazamiento) independientes. Un mayor número de grados de libertad conlleva a un aumento de flexibilidad en el posicionamiento del efector final. El robot GRYPHON posee cinco grados de libertad como se muestra en la Figura 4 tres de ellos determinan la posición en el espacio del aprehensor (θ , α , β) y los otros dos (Φ , Ψ) la orientación del mismo [22].

4.2.2 Articulaciones

La arquitectura del manipulador y la relación entre sus elementos proporcionan una configuración mecánica, dando origen a los parámetros para definir orientación y posición del elemento terminal. La estructura del GRYPHON se relaciona con un modelo de coordenadas y un tipo de articulación de revolución operada por motores eléctricos, correas y transmisiones. Los movimientos de cada articulación pueden ser de desplazamiento, de giro o una combinación entre ambos.



Figura 4. GDL Robot GRYPHON.

4.2.3 Volumen de Trabajo

Espacio en el cual el robot puede manipular el extremo de la muñeca, dentro de éste se tiene en cuenta que el posicionamiento del efector final del robot está limitado debido a su estructura mecánica por cada uno de los ejes de rotación. El robot usa tres juntas de rotación para posicionar el efector final, generalmente el

volumen de trabajo es aproximadamente esférico. Los límites rotacionales de las articulaciones son: θ ($-135^\circ, 135^\circ$), α ($180^\circ, 135^\circ$), β ($-90^\circ, 210^\circ$).

4.2.4 Capacidad de Carga

La capacidad de carga útil para el robot GRYPHON es de 1kg a su mayor extensión, para cuando la pinza está abierta la capacidad es limitada especialmente por la magnitud de ésta, abriéndose 50mm. La capacidad de levantamiento es afectado por la velocidad, seleccionada en la programación, en el rango de 0 a 3. El torque generado y la capacidad de levantamiento está relacionado con la característica Velocidad-torque del motor.

4.2.5 Exactitud de Posición

Capacidad del robot para situar el extremo de su muñeca en un punto de destino deseado dentro del volumen de trabajo.

Transmisiones

Acción en la cual se efectúa la transmisión de potencia mecánica empleada en la robótica. Para el robot GRYPHON actúan:

Correas dentadas

Son empleadas para ejecutar el movimiento, sobre ruedas de ejes paralelos generando fricción entre estas. Este mecanismo garantiza un movimiento suave para el brazo articulado. Véase Figura 5 sistema de engranes.

En los piñones helicoidales, sus dientes se encuentran engranados de tal manera que forman un ángulo agudo, siendo conveniente para altas cantidades de carga. La fuerza que producen logra mover las ruedas dentadas a lo largo de su eje.

Actuadores

Estos, generan a través de aire comprimido, fluido por presión o electricidad, fuerza electro-motriz para las articulaciones del robot.



Figura 5. Correas Dentadas.

4.2.6 Efector Final-Pinza

Elemento encargado de realizar una o varias tareas específicas, en el caso del robot GRYPHON el efecto final es la pinza mecánica utilizado para agarrar y sostener objetos que el robot debe cargar, descargar y mover. Es parte de las herramientas de uso especial para el robot. Ver Figura 6.

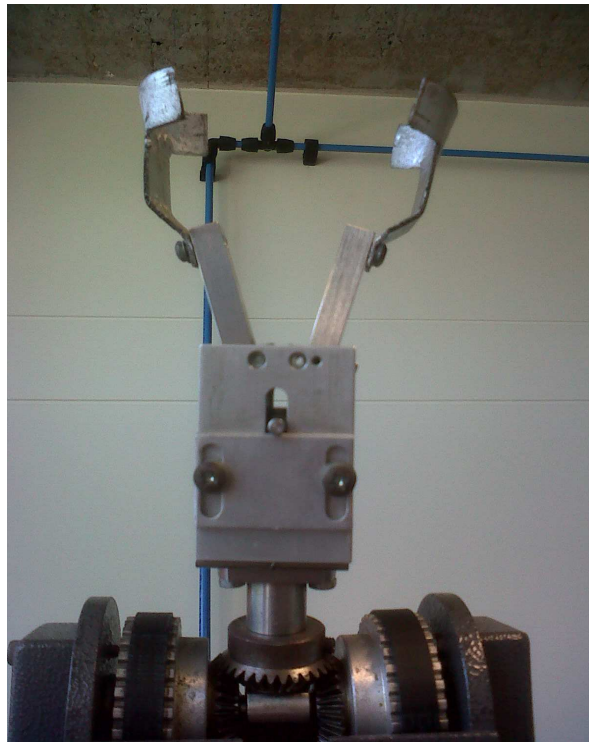


Figura 6. Efecto Final.

4.3 ESTRATEGIAS DE CONTROL EMPLEADAS EN ROBOTS INDUSTRIALES

El control automático es parte elemental e integral de los procesos industriales y de manufactura. En la robótica industrial obtiene un desempeño óptimo de los sistemas dinámicos, se aligera la carga de muchas operaciones manuales repetitivas y se obtiene una mejor productividad. Como el Profesor Rafael Kelly propone en su libro [13], se muestran algunos de sus sistemas de control, esto dando una idea general para ser implementados en los prototipos robóticos.

En el siguiente análisis se asume que el modelo dinámico de cualquier estructura robótica industrial se puede expresar mediante la ecuación en el capítulo 4 se especifican sus parámetros [13]:

$$\tau = M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) + f(\dot{q})$$

4.3.1 Control de Posición

El control de posición es usado en los robots manipuladores cuando en su trayectoria, interactúan con el medio ambiente. En un controlador de posición se usa posiciones y velocidades angulares deseadas y actuales del planificador, como se muestra en la Figura 7, el objetivo de este controlador es determinar τ tal que:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} q(t) = q_d$$

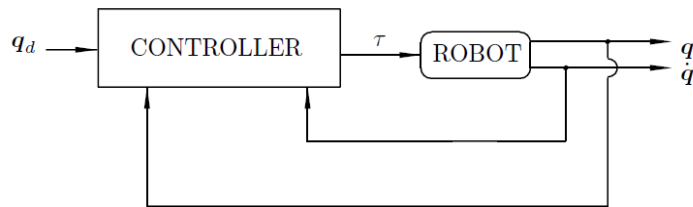


Figura 7. Esquema control de Posición [13]

Control P con retroalimentación de velocidad y control PD

Este es el controlador más sencillo que se puede emplear, la ecuación del controlador es:

$$\tau = K_p \tilde{q} + K_v \dot{\tilde{q}}$$

Siendo K_p y K_v matrices simétricas positivas. El vector $\tilde{q}$ está dado por $\tilde{q} = q_d - q$ error de posición, y $\dot{\tilde{q}}$ la derivada del error de posición como el error de velocidad. El lazo de control de este controlador corresponde a la siguiente **Figura 8**.

Control PD con compensación de gravedad

En un controlador PD no se consigue eliminar el error en régimen permanente sin la acción integral (K_i), el control PD con compensación de gravedad utilizando el vector de gravedad $g(q)$ compensa el τ en tiempo real con la posición actual (q). Para este tipo de controlador es necesario el conocimiento parcial del modelo del manipulador, es decir $g(q)$, la ley de control PD con compensación en gravedad viene dada por:

$$\tau = K_p \tilde{q} + K_v \dot{\tilde{q}} + g(q)$$

Por lo tanto, una compensación calculada a partir de los términos de gravedad, permitirá utilizar un controlador PD (Figura 8) asegurando que el error permanente es nulo.

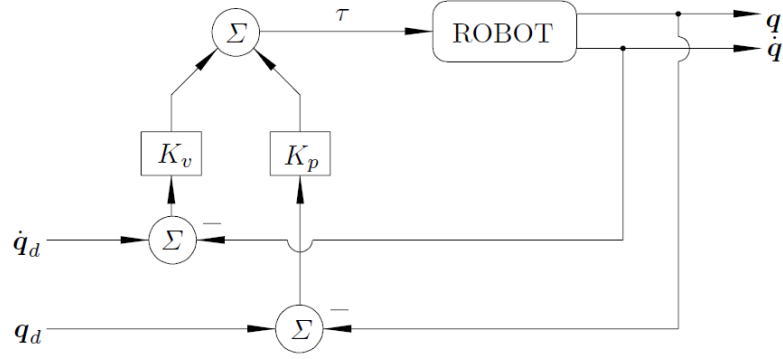


Figura 8. Control PD con retroalimentación de velocidad y control PD [13].

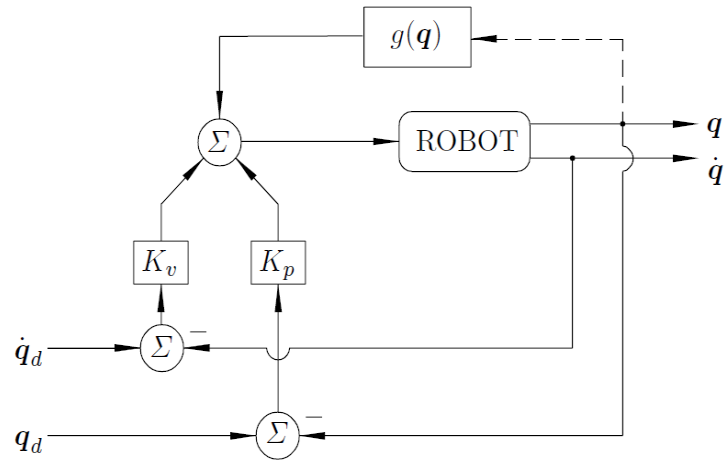


Figura 9. Control PD con compensación de gravedad[13].

Control PD con compensación Pre-calculada de gravedad

La única diferencia con el Anterior controlador radica en que el termino $g(q_d)$ reemplaza a $g(q)$, la ley de control PD (Figura 10) con compensación pre calculada de gravedad viene dada por:

$$\tau = K_p \tilde{q} + K_v \dot{\tilde{q}} + g(q_d)$$

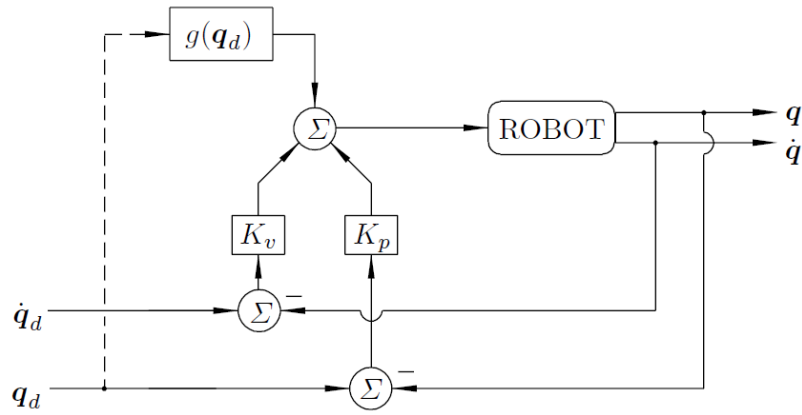


Figura 10. Control PD con compensación precalculada de gravedad[5].

Control PID

Al implementar uno de los controladores anteriores no va a satisfacer el objetivo de control de que el error en posición debido a que va a tender a un vector constante pero siempre diferente a $\tilde{q} = 0$. La alternativa es la introducción del componente integral para llevar a cero el error de posición. La ley de control PID (Figura 11) viene dada por:

$$\tau = K_p \tilde{q} + K_v \dot{\tilde{q}} + K_i \int_0^t \tilde{q}(\sigma) d\sigma$$

Donde K_p, K_v, K_i son matrices de diseño simétricas y definidas positivas.

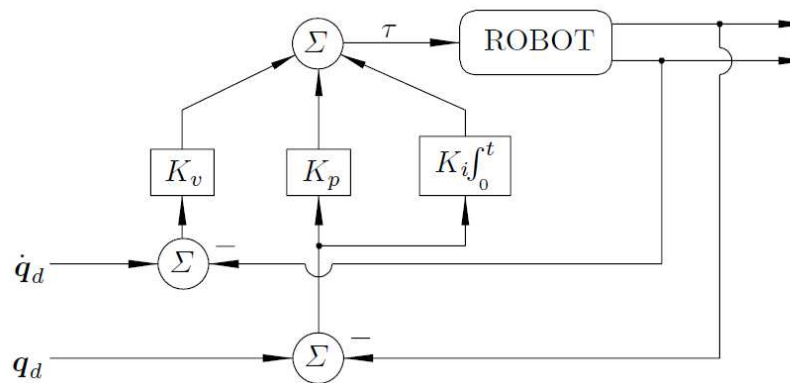


Figura 11. Control PID[13].

4.3.2 Control de movimiento

El control de movimiento o también llamado de trayectoria es usado en un espacio de trabajo libre siguiendo una trayectoria de varios puntos sin interactuar con el medio ambiente. (Figura 12).

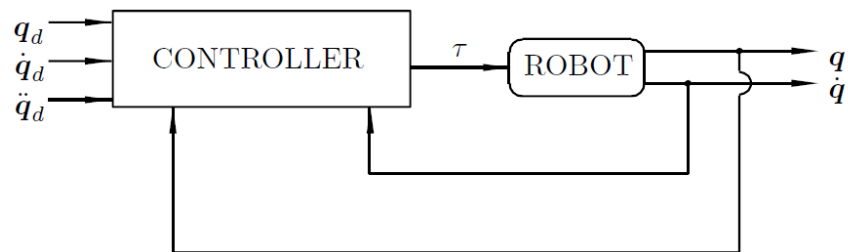


Figura 12. Control de movimiento[13]

Control por Precompensación

Control en malla abierta (Figura 13) donde el controlador es el modelo dinámico inverso, por lo tanto es incapaz de satisfacer el objetivo de control de movimiento. La ley de control viene dada por:

$$\tau = M(q_d)\ddot{q}_d + C(q_d, \dot{q}_d)\dot{q}_d + g(q_d)$$

Esta no depende de q ni de $\dot{q}$, este tipo de controlador solo se basa en el modelo del robot.

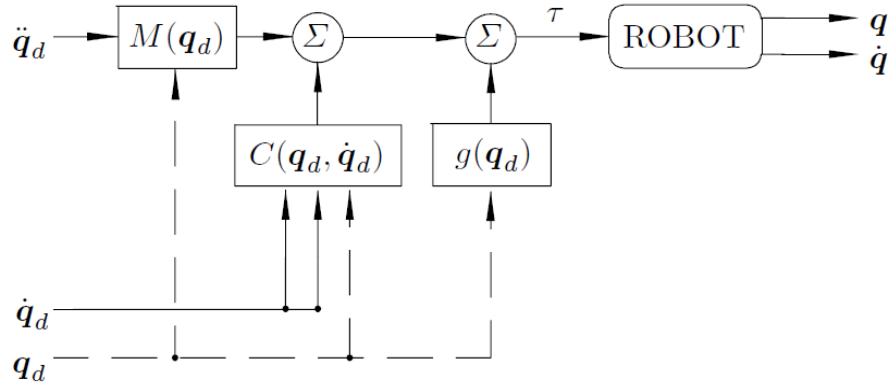


Figura 13. Control por Precompensación[13].

Control PD con Precompensación

Este tipo de controlador tiene los fundamentos del PD, puesto que se basa en el modelo de energía, fue introducido debido a la necesidad de un controlador que siga las trayectorias variantes en el tiempo. La ley de control viene dada por:

$$\tau = K_p \tilde{q} + K_v \dot{\tilde{q}} + M(q_d) \ddot{q}_d + C(q_d, \dot{q}_d) \dot{q}_d + g(q_d)$$

La siguiente Figura 14 muestra el bloque correspondiente al control PD conprecompensación de robots.

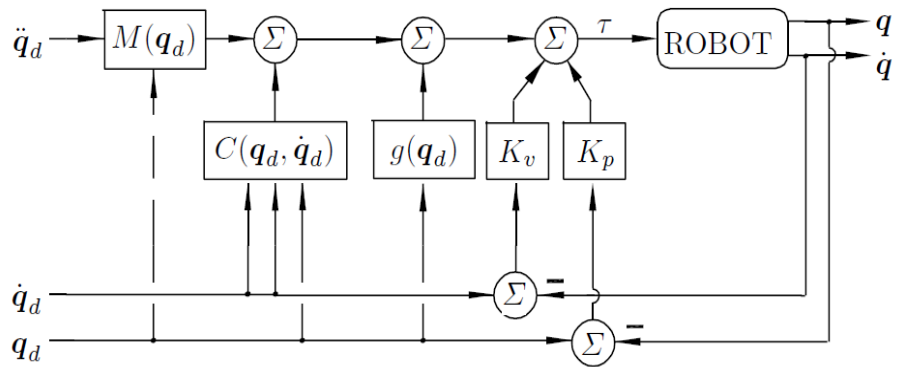


Figura 14. Control PD con Precompensación[13].

Para obtener óptimos resultados utilizando este tipo de controlador es necesariouna adecuada selección de la matriz de ganancia proporcional K_p .

4.3.3 Control Par-Calculado y Control Par-Calculado+

En los controladores anteriores tenían en común el control PD. Estos dos controladores presentados no presentan este término lineal PD permitiendo obtener una ecuación de malla cerrada lineal.

Control Par-Calculado

El control Par-Calculado hace uso explícito del conocimiento de las matrices $M(q)$, $C(q, \dot{q})$ y del vector $g(q)$. La ley de control viene dada por:

$$\tau = M(q)[\ddot{q}_d + K_p \tilde{q} + K_v \dot{\tilde{q}}] + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q)$$

La siguiente Figura 15 el bloque correspondiente al control Par-Calculado.

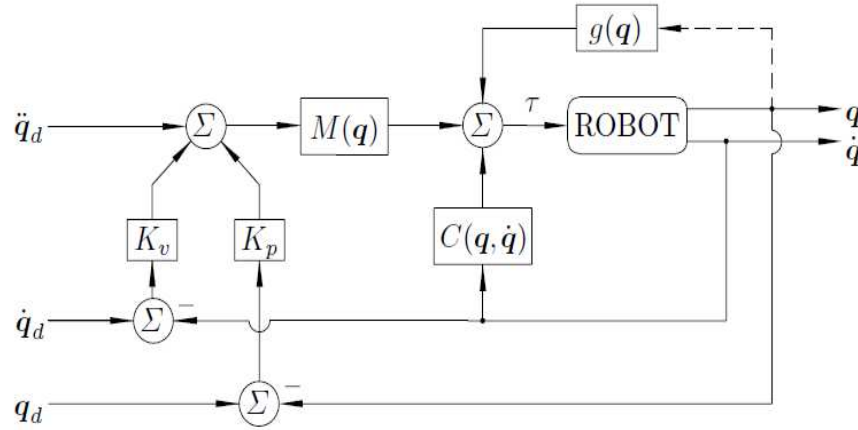


Figura 15. Control Par-Calculado[13].

Control Par-Calculado+

La ley de control viene dada por:

$$\tau = M(q)[\ddot{q}_d + K_p \tilde{q} + K_v \dot{\tilde{q}}] + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) - C(q, \dot{q})\dot{q}$$

El vector v se obtiene de filtrar los errores de posición $\tilde{q}$ y de velocidad $\dot{\tilde{q}}$ de la siguiente manera:

$$v = -\frac{bp}{p+\lambda}\tilde{q} - \frac{b}{p+\lambda}[k_v\dot{\tilde{q}} + k_p\tilde{q}]$$

Donde p es el operador diferencial ($p = \frac{d}{dt}$) y λ, b son constantes positivas de diseño. La siguiente Figura 16 muestra el bloque correspondiente al control Par-Calculado+.

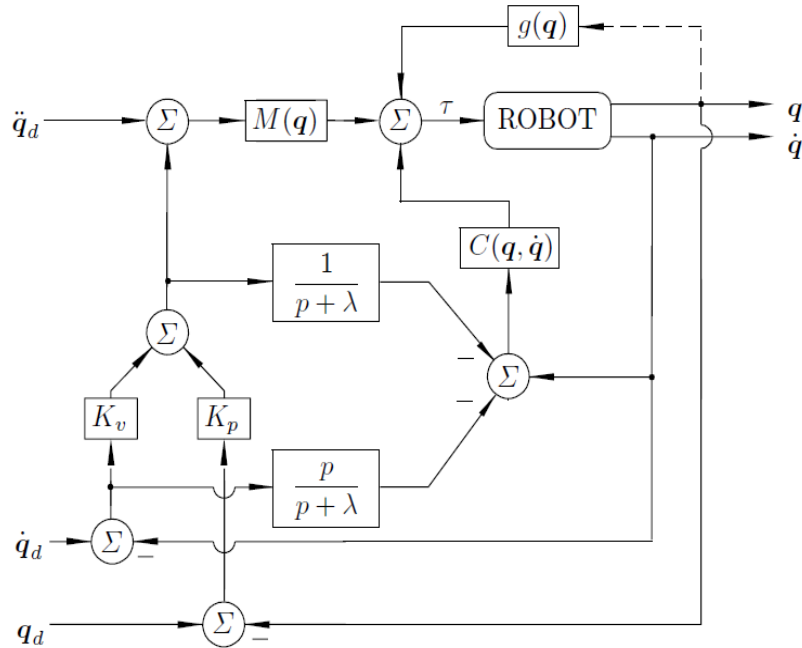


Figura 16. Control Par-Calculado+[13].

4.3.4 PLATAFORMAS DE SIMULACIÓN

Seguidamente se encontrara la descripción de los paquetes de software usados en el proyecto, además de una breve familiarización con cada aplicación. Esto con el fin de ilustrar y mostrar las diversas herramientas informáticas, a las cuales se puede acceder para el diseño de diferentes prototipos en la industria de la robótica.

Software CATIA V5 R7

El software CATIA V5 R7 (Computer-Aided Three Dimensional Interactive Application) es una herramienta para ingeniería en el diseño, modelamiento, simulación de piezas mecánicas 2D, 3D, entre otras [15], en la Figura 17 se muestra el logo oficial del software CATIA. Comercialmente es distribuido por la compañía francesa Dassault Systèmes(3DEXPERIENCE) quien ofrece a empresas y particulares ambientes virtuales para el diseño y creación de

prototipos sostenibles. En la **Figura 17b** se observa el logo de la compañía Dassault Systèmes.



a)



b)

Figura 17. Logos a) CATIA. b) DASSAULT SYSTEMES.

Para la familiarización y uso de CATIA se recomienda al lector, leer el documento adjunto (Introducción al uso de CATIA, SOLIDWORKS Y ADAMS).

Software SOLIDWORKS

Es un paquete software de modelamiento mecánico en 3D, asistido por computadora, cuenta con una gran gama de herramientas de diseño de pieza, ensamblajes y dibujo, SOLIDWORKS incluye herramientas de productividad, de gestión de proyectos, de presentación y de análisis y simulación que lo hacen uno de los estándares de diseño mecánico más competitivo del mercado [16]. Distribuido por la compañía DassaultSystème, utiliza un entorno gráfico basado en Microsoft Windows intuitivo y fácil de manejar. Ver **Figura 18**.



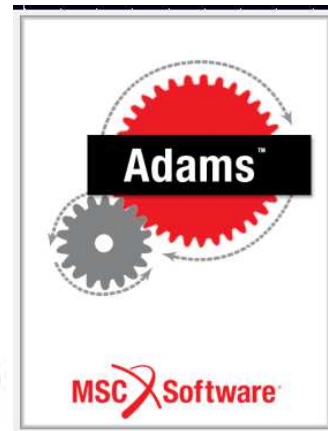
Figura 18. Logo SOLIDWOKS.

SOFTWAREADAMS MSc

Es un software para el análisis y simulación de mecanismos dinámicos lineales y no lineales. Cuenta con herramientas para la Co-Simulación con otros programas informáticos permitiendo el análisis de sistemas de control. Ofrece un entorno amigable, accesible y familiar para el usuario. Además de sus múltiples ventajas como simulador dinámico. Permite la creación de piezas para modelar sistemas mecánicos, accede a modificar sus parámetros, a introducir la programación necesaria para su funcionamiento y análisis. Contiene módulos de trabajo, donde se especifican los tipos de simulación que el usuario desea realizar. Cuenta con aplicaciones tales como: ADAMS (Car, View, Solver, Chassis, Driveline, Flex, Post-Proccesor, Insight) MD. Comercialmente es distribuido por la compañía alemana MSC Software. Ver **Figura 19**.



a)



b)

Figura 19. Logo a) MSC SOFTWARE b) ADAMS

En este documento se implementan las herramientas Adams/View y Adams/Controls.

La primera (Adams) cuenta con un entorno gráfico de simulación, donde se logra obtener fuerzas, torques, análisis de vibraciones entre otras. Se desarrolla el prototipo virtual del mecanismo a simular, con una interfaz gráfica donde se tiene un acceso a las herramientas de simulación dinámica [12], este modelo contiene características generales tales como: peso, longitudes, tipo de material etc. Adams/Controls nos abre la ventana de comunicación con los otros softwares, en éste estudio se realiza la Co-Simulación con MATLAB.

SOFTWARE MATLAB

Es un lenguaje de programación que cuenta con una amplia biblioteca matemática, herramientas gráficas, representación de datos y funciones, implementación de algoritmos, cajas de herramientastoolboxes, Simulink con los paquetes de bloques (blocksets), incluidas funciones de interfaz etc. El programa informático tiene la capacidad de vincularse con otros lenguajes de programación tradicionales [17]. El conjunto de aplicaciones facilita al usuario el análisis visual de problemas matemáticos. Ver logo en **Figura 20**.

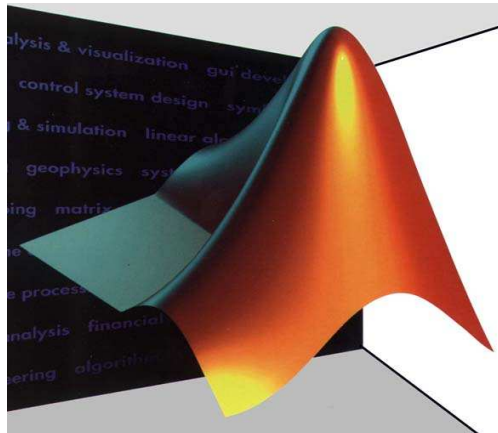


Figura 20. Logo MATLAB.

4.4 CO-SIMULACION

La Co-Simulación es una alternativa para el diseño de prototipos. Es de gran importancia en la automatización de procesos industriales. Provee a éstos mayor efectividad, debido a una significativa disminución en el costo, manejo efectivo del tiempo de fabricación, aumento del nivel de productividad, entre otros. La simulación es aquella actividad en la cual se pueden extraer datos y analizarlos como resultados del comportamiento de un sistema. Se emplean como un método de optimización de parámetros, detección de errores en un sistema, o simplemente como una experiencia, acerca del comportamiento dinámico del mismo, sin riesgo de daño físico en la estructura mecánica del prototipo. Mediante ensayos se mide la confiabilidad del sistema. Se observan las ventajas y desventajas del prototipo. En ciertas ocasiones, por métodos analíticos es posible desarrollar el modelo matemático aunque exista un alto grado de complejidad, a pesar de las aproximaciones realizadas, por lo que se recomienda la simulación. Ésta proporciona un método más sencillo de solución.

La Co-Simulación es una herramienta fundamental en la etapa de diseño, a través de programas informáticos existentes en el área comercial. Siendo el diseñador quien opta por la mejor decisión en la solución de problemas presentados en el sistema. Los modelos de simulación permiten verificar o establecer diversas características del modelo como: parámetros, pesos, dimensiones, trayectorias, medición de aceleraciones, velocidades, ángulos, espacio de trabajo, rangos y límites.

Existen varios software en el mercado para modelado de manipuladores robóticos, tales como:

- ANSYS Engineering simulation solution
- FREECAD Software libre de simulacion dinamica
- CATIA Computer-aided three dimensional interactive application
- ADAMS MscMultibody Dynamics Simulation Solution
- UNIVERSAL MECHANISM Simulation of kinematics and dynamics of planar and spatial mechanical systems
- SILUX Multi-cuerpo software de simulación dinámica
- Entre otros.

Una vez construido el manipulador, se pueden implementar estrategias de control, a través de MATLAB (Entorno de computación y desarrollo matemático), con el cual se logra la Co-simulación del prototipo.

Algunas de las aplicaciones de la Co-simulación en la industria:

- Study on Automatic spray of Distribution Boom system of Truck-Mounted Concrete Pump: Sistema de aspersión automática de concreto del sistema de distribución de la pluma sobre camión bomba de hormigón, Co-simulación entre el software ANSYS, ADAMS, MATLAB/Simulink, una simulación tridimensional fue programado para imitar el proceso de pulverización automática y verificar el algoritmo de control [1].
- Co-Simulation Study of Vehicle ESP System Base on ADAMS and MATLAB: sistema de seguridad activa para vehículos en caso de emergencia, Un prototipo virtual de un modelo de vehículo fue construido en ADAMS/Car, la co-simulación se estableció en Matlab/Simulink, para estudiar la estabilidad del vehículo con el ESP [2].
- Research on co-simulation of rigid- flexible coupling system of parallel robot: Un metodo de Co-Simulación ADAMS/ANSYS para el sistema de acoplamiento rigido-flexible, con el fin de resolver la dinámica del 3-TPT robot paralelo [3].
- Comparison of intelligent Algorithms for Determining Optimal Grasp Location for Object Manipulation: El objetivo es maximizar el valor del índice de MAG, el manipulador seleccionado es Stäubli TX40 © brazo, que se basa en ADAMS y las trayectorias deseadas se calcularía de acuerdo con MATLAB[4].

- Control Laws Design and Validation of Autonomous Mobile Robot Off-Road Trajectory Tracking Base on ADAMS and MATLAB Co-Simulation Platform: El control de movimiento para vehículos skid- steering en un terreno lleno de baches y control de trayectoria [5].
- Uncertain Quantification in Ground Vehicle Dynamics Through high Fidelity Co-Simulation: Sistema dinámico operado bajo la incertidumbre de entrada, se centra en sistemas de tierra para vehículos en entornos múltiples; ADAMS / Car se utiliza para modelar el vehículo y FTIRE para la simulación de las llantas [6].
- Modeling and Simulation of aircraft anti-skid braking and steering using Co-Simulation Method: Método de co-simulación para estudiar las maniobras en tierra de aviones anti-deslizante de frenado y dirección, software utilizados ADAMS, MATLAB y EASY5 [7].
- Vehicle Modeling and ADAMS-Simulink Co-Simulation with Integrated Continuously Controlled Electronic suspension (CES) and Electronic Stability Control (ESC) Models: Modelo de vehículo en ADAMS, sistema CES en MATLAB-Simulink, la Co-Simulación se utiliza para integrarlas [8].
- Application of Virtual Prototyping for Optimization of Fuzzy-Based Active Suspension System: Creación de prototipos virtuales para la optimización genética; usando algoritmos genéticos en MATLAB-ADAMS de Co-Simulación de procesos [9].
- Velocity Control of a Hybrid Quadruped Bounding Robot: Aplicación de un regulador de velocidad inteligente en la plataforma de ruedas (PAW), permitiendo un seguimiento de la velocidad deseada en un entorno de Co-Simulación del modelo MATLAB/ADAMS [10].
- Adaptive Neural Network Control of a 5 DOF Robot Manipulator: Un controlador de red neuronal para dirigir los ángulos de las articulaciones de robots manipuladores en trayectorias asintóticas. La Co-Simulación MATLAB/ADAMS es capaz de producir resultados realistas del comportamiento del sistema en bucle cerrado [11].

5 MODELOS CINEMATICOS Y DINAMICOS DEL ROBOT GRYPHON EC

Este proyecto contempla la implementación de un robot Gryphon de 5 grados de libertad, con piezas previamente diseñadas en plataformas como CATIA (eslabones principales) y SOLIDWORKS (Juego de engranes y piñonería cónica). Estas piezas, son importadas en ADAMS, el cual, nos sirve como plataforma para la creación y el análisis del modelo dinámico, además de permitir la Co-simulación del modelo con MATLAB. Este proceso es descrito a continuación.

5.1 DESCRIPCION FÍSICA y GEOMETRICA DEL ROBOT GRYPHON

En la Figura 21 se muestra el prototipo real del robot Gryphon el cual se va a construir, en la Tabla 1 se especifican las características dimensionales de cada una de las piezas que componen el robot, es importante mencionar que estas dimensiones han sido tenidas en cuenta para el modelado del mismo y que en líneas generales el manipulador se compone de: Base, Eslabón 1, Eslabón 2, Eslabón 3, Sistema de piñones y Efecto final-Pinza.

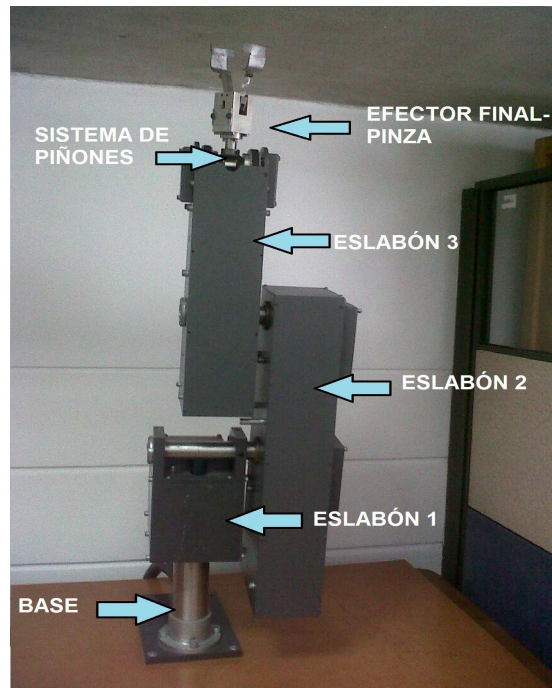


Figura 21. Prototipo real Robot Gryphon EC.

PIEZA\Propiedad	LOGITUD (mm)	ANCHO (MM)	ALTURA (MM)	DIAMETRO (MM)
BASE	230	150	15	NA
CILLINDRO	NA	NA	190	58
ESLABÓN 1	216	136	205	NA
ESLABON 2	L1= 176 l2=116	100	518	NA
ESLABON 3	L1= 124 l2=70	100	376	NA
PINZA	38	20	177	NA

Tabla 1. Dimensiones del Robot Gryphon.

5.1.1 BASE

Como primera etapa en el desarrollo de construcción de piezas, se diseñó la base también llamada cuerpo, ésta es aquella en la cual la estructura del robot se apoya y da lugar a las coordenadas respectivas con las que el manipulador se moverá en el espacio de trabajo. Las características específicas de esta pieza se presentan en la Tabla 2. En la Figura 22 se muestra la pieza real.

BASE	LOGITUD (mm)	ANCHO (mm)	altura (mm)	Diámetro (mm)
Asiento	230	150	15	NA
CILLINDRO1	NA	NA	190	58
CILLINDRO 2	NA	NA	60	75
CILLINDRO 3	NA	NA	10	102
TORNILLOS	NA	NA	15	0.3125

Tabla 2. Dimensiones específicas de la base - Robot Gryphon.



Figura 22. Base Robot Gryphon EC.

5.1.2 ESLABON 1

Presenta una articulación de revolución en el nodo de la parte superior, las características específicas de esta pieza se presentan en la Tabla 3 en la Figura 23 observa la pieza real.

ESLABON 1	LOGITUD (mm)	ANCHO (mm)	altura (mm)	DIAMETRO (mm)
CAJA	216	136	140	NA
PARTE 1	126	102	25	NA
PARTE 2	L1= 83 L2=100	15	H1= 40 H2=65	75
CILLINDRO 1	NA	NA	140	30
TORNILLOS	NA	NA	10	0.25

Tabla 3. Dimensiones especificas del eslabón 1 - Robot Gryphon EC.



Figura 23. Eslabón 1 - Gryphon EC.

5.1.3 ESLABON 2

Se puede observar que la pieza mecánica presenta un comportamiento parecido a la de un musculo humano, en esta parte se encuentran dos articulaciones de rotación. (Ver Figura 24) Especificaciones del eslabón 2 en la Tabla 4.

ESLABON 2	LOGITUD (mm)	ANCHO (mm)	altura (mm)	DIAMETR O (mm)
PARTE 1	L1= 176 L2=116	100	517	NA
PARTE 2	104	20	125	NA
PARTE 3	104	20	125	NA
CILLINDRO	NA	NA	NA	30

Tabla 4. Dimensiones específicas del Eslabón 2 - Robot Gryphon EC.



Figura 24. Eslabón 2 - Gryphon EC.

5.1.4 ESLABON 3

La pieza mecánica presenta un comportamiento de dos articulaciones de rotación. En la Figura 25 se observa el eslabón 3 del prototipo real. Las características y especificaciones se pueden observar en la tabla 5.

ESLABON 3	LOGITUD (mm)	ANCHO (mm)	altura (mm)	DIAMETRO (mm)
PARTE 1	L1= 124 L2=70	100	376	NA
PARTE 2	33	20	80	NA
CILLINDRO	NA	NA	NA	30

Tabla 5. Dimensiones específicas del Eslabón 3 - Robot Gryphon EC.



Figura 25. Eslabón 3 - Gryphon EC.

5.1.5 EFECTOR FINAL-PINZA

El efector final- pinza, presenta un sistema para agarrar y sostener de objetos en la parte superior. Adicionalmente dos articulaciones, cuyo movimiento es ejercido por un sistema de piñones y correas (Ver Figura 26). Las especificaciones de pueden observar en la Tabla 7. El propósito general de la pinza es realizar una tarea específica.

ESLABON 2	LOGITUD (mm)	ANCHO (mm)	ALTUR A (mm)	DIAMETRO (mm)
PARTE 1	38	38	55	NA
PARTE 2	12	20	20	NA
PARTE 3	12	8	38	NA
PARTE 4	L1=30 L2=45	5	40	NA
PARTE 5	35	3	24	5
PARTE 6	23	20	9	NA
CILLINDRO	NA	NA	15	16

Tabla 6. Dimensiones específicas del Eslabón 3 - Robot Gryphon EC.



Figura 26. Pinza - Gryphon EC.

5.1.6 SISTEMA DE PINONES

Presenta un sistema de piñones cónicos cuyos dientes están engranados generando movimiento entre sus ejes perpendiculares. En la Figura 27 se puede observar el esquema de trazado en ruedas y piñones para obtener su medición. En la Tabla 7 se muestran las especificaciones, como en la Figura 30 el sistema en prototipo real.

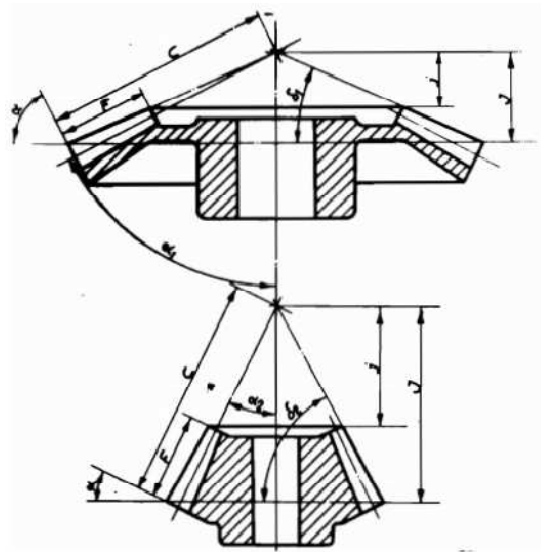


Figura 27. Sistema de Trazado Piñones Cónicos [25].

Casillas ofrece un método de trazado geométrico con el cual cuyas fórmulas nos facilita hallar las especificaciones de los del pinones y ruedas cuyos ángulos fueron obtenidos gracias a las tablas que se muestran en la Figura 28 y Figura 29.

Formulas de Trazado Rueda

$$J = \frac{D_p}{2} * \operatorname{tg} \delta_1$$

$$j = J * \frac{C - F}{C}$$

$$C = \frac{D_p}{2 * \operatorname{Sen} x_1}$$

$$F = \text{Paso} * 2,5(\text{Normal})$$

$$F = \frac{C}{3}(\text{Máximo})$$

Formulas de Trazado Pinon

$$J = \frac{de}{2} * tg \delta_2$$

$$j = J * \frac{C - F}{C}$$

$$C = \frac{d_p}{2 * \text{Sen} x_2}$$

$$F = \text{Paso} * 2,5(\text{Normal})$$

$$F = \frac{C}{3}(\text{Máximo})$$

Donde:

$J=j$ =Coeficiente de variacion del espesor del diente.

C =Longitud de la generatriz del cono primitivo.

F =Longitud del Diente.

$De=de$ = Diametro externo

Dp =Diametro Primitivo

$\delta_1 = \delta_2$ =Semi-ángulo del cono primitivo del pinon conico

$x_1=x_2$ = ángulo de inclinacion normal exterior

M = Modulo

ANGULOS DEL CONO DEL DIAMETRO PRIMITIVO α_1 α_2

		NUMERO DE DIENTES DE LA RUEDA											
		72	71	70	69	68	67	66	65	64	63	62	61
NUMERO DE DIENTES DEL PIÑON	12	80° 33'	80° 25'	80° 16'	80° 8'	79° 59'	79° 51'	79° 42'	79° 32'	79° 23'	79° 13'	79° 3'	78° 52'
	13	79° 46'	79° 37'	79° 29'	79° 20'	79° 11'	79° 1'	78° 51'	78° 41'	78° 31'	78° 20'	78° 9'	77° 58'
	14	79° 0'	78° 51'	78° 41'	78° 32'	78° 22'	78° 11'	78° 1'	77° 51'	77° 40'	77° 28'	77° 17'	77° 5'
	15	78° 14'	78° 4'	77° 54'	77° 44'	77° 34'	77° 23'	77° 12'	77° 0'	76° 48'	76° 36'	76° 24'	76° 11'
	16	77° 28'	77° 18'	77° 7'	76° 57'	76° 45'	76° 34'	76° 22'	76° 10'	75° 58'	75° 45'	75° 32'	75° 18'
	17	76° 43'	76° 32'	76° 21'	76° 10'	75° 58'	75° 45'	75° 33'	75° 21'	75° 8'	74° 54'	74° 40'	74° 25'
	18	75° 58'	75° 46'	75° 35'	75° 23'	75° 10'	74° 58'	74° 45'	74° 31'	74° 17'	74° 3'	73° 49'	73° 33'
	19	75° 13'	75° 1'	74° 49'	74° 36'	74° 23'	74° 10'	73° 56'	73° 42'	73° 28'	73° 13'	72° 58'	72° 42'
	20	74° 29'	74° 16'	74° 3'	73° 50'	73° 37'	73° 23'	73° 9'	72° 54'	72° 39'	72° 23'	72° 7'	71° 51'
	21	73° 45'	73° 32'	73° 18'	73° 4'	72° 50'	72° 36'	72° 21'	72° 6'	71° 50'	71° 34'	71° 17'	71° 0'
	22	73° 1'	72° 47'	72° 33'	72° 19'	72° 4'	71° 49'	71° 34'	71° 18'	71° 2'	70° 45'	70° 28'	70° 10'
	23	72° 17'	72° 3'	71° 49'	71° 34'	71° 19'	71° 3'	70° 47'	70° 30'	70° 14'	69° 57'	69° 39'	69° 20'
	24	71° 34'	71° 19'	71° 5'	70° 49'	70° 34'	70° 17'	70° 1'	69° 44'	69° 26'	69° 9'	68° 50'	68° 31'
	25	70° 51'	70° 36'	70° 21'	70° 5'	69° 49'	69° 32'	69° 15'	68° 57'	68° 40'	68° 21'	68° 3'	67° 43'
	26	70° 9'	69° 53'	69° 37'	69° 21'	69° 4'	68° 48'	68° 30'	68° 12'	67° 54'	67° 34'	67° 15'	66° 55'
	27	69° 27'	69° 10'	68° 54'	68° 38'	68° 20'	68° 3'	67° 45'	67° 26'	67° 8'	66° 48'	66° 28'	66° 7'
	28	68° 45'	68° 29'	68° 12'	67° 55'	67° 37'	67° 19'	67° 1'	66° 42'	66° 22'	66° 2'	65° 42'	65° 21'
	29	68° 4'	67° 47'	67° 30'	67° 12'	66° 54'	66° 36'	66° 17'	65° 57'	65° 37'	65° 16'	64° 55'	64° 34'
	30	67° 23'	67° 6'	66° 48'	66° 30'	66° 12'	65° 52'	65° 33'	65° 14'	64° 53'	64° 32'	64° 10'	63° 49'
	31	66° 42'	66° 25'	66° 6'	65° 48'	65° 29'	65° 10'	64° 50'	64° 30'	64° 9'	63° 48'	63° 26'	63° 3'
	32	66° 2'	65° 44'	65° 26'	65° 7'	64° 48'	64° 28'	64° 8'	63° 47'	63° 26'	63° 4'	62° 42'	62° 19'
	33	65° 23'	65° 4'	64° 45'	64° 26'	64° 7'	63° 47'	63° 26'	63° 5'	62° 43'	62° 21'	61° 58'	61° 35'
	34	64° 43'	64° 25'	64° 5'	63° 46'	63° 26'	63° 5'	62° 45'	62° 23'	62° 1'	61° 38'	61° 15'	60° 52'
	35	64° 5'	63° 45'	63° 26'	63° 6'	62° 46'	62° 25'	62° 4'	61° 42'	61° 19'	60° 57'	60° 33'	60° 9'
	36	63° 26'	63° 7'	62° 47'	62° 27'	62° 6'	61° 45'	61° 23'	61° 1'	60° 38'	60° 15'	59° 51'	59° 27'
	37	62° 48'	62° 28'	62° 8'	61° 48'	61° 27'	61° 5'	60° 44'	60° 21'	59° 58'	59° 35'	59° 10'	58° 46'
	38	62° 11'	61° 51'	61° 30'	61° 9'	60° 48'	60° 26'	60° 4'	59° 41'	59° 18'	58° 54'	58° 30'	58° 5'

Los grados de arriba corresponden a la rueda y los grados de abajo al piñon

Figura 28. Ángulos del Cono del diámetro Primitivo [25]

ANGULO DE LA CARA DEL DIENTE $\delta_1 \delta_2$												
		NUMERO DE DIENTES DE LA RUEDA										
		24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14
NUMERO DE DIENTES DEL PIÑON	12	22° 18'	23° 8'	24° 3'	25° 2'	26° 3'	27° 11'	28° 25'	29° 43'	31° 11'	32° 44'	34° 26'
		59° 10'	58° 2'	56° 49'	55° 32'	54° 7'	52° 39'	51° 3'	49° 17'	47° 25'	45° 24'	43° 14'
	13	24° 15'	25° 9'	26° 6'	27° 8'	28° 14'	29° 25'	30° 42'	32° 4'	33° 34'	35° 10'	36° 55'
		57° 21'	56° 11'	54° 56'	53° 36'	52° 10'	50° 39'	49° 2'	47° 16'	45° 22'	43° 20'	41° 9'
	14	26° 8'	27° 5'	28° 4'	29° 9'	30° 20'	31° 33'	32° 52'	34° 17'	35° 50'	37° 28'	39° 15'
		55° 38'	54° 25'	53° 8'	51° 47'	50° 20'	48° 47'	47° 8'	45° 21'	43° 26'	41° 24'	
	15	27° 58'	28° 58'	30° 0'	31° 6'	32° 19'	33° 36'	34° 56'	36° 23'	37° 57'	39° 38'	
		53° 58'	52° 44'	51° 26'	50° 2'	48° 33'	47° 0'	45° 20'	43° 33'	41° 39'		
	16	29° 43'	30° 44'	31° 50'	32° 58'	34° 12'	35° 31'	36° 54'	38° 23'	39° 57'		
		52° 21'	51° 6'	49° 46'	48° 22'	46° 52'	45° 19'	43° 38'	41° 51'			
17	31° 26'	32° 28'	33° 35'	34° 47'	36° 0'	37° 21'	38° 45'	40° 15'	.....	.....	.....	
	50° 48'	49° 32'	48° 11'	46° 47'	45° 16'	43° 43'	42° 1'					
18	33° 4'	34° 8'	35° 15'	35° 28'	37° 45'	39° 5'	40° 31'	.....	.....	.....	.....	
	49° 18'	48° 2'	46° 41'	45° 16'	43° 45'	42° 11'						
19	34° 38'	35° 49'	36° 53'	83° 6'	93° 24'	40° 45'	.....	.....	.....	.....	.....	
	47° 54'	46° 36'	45° 15'	43° 50'	42° 20'							
20	36° 8'	37° 16'	38° 26'	39° 39'	40° 57'	.....	.....	.....	.....	.....	.....	
	46° 32'	45° 14'	43° 52'	42° 27'								
21	37° 37'	38° 44'	39° 54'	41° 8'	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	
	45° 13'	43° 56'	42° 34'									
22	39° 0'	40° 8'	41° 19'	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	
	43° 58'	42° 40'										
23	40° 20'	41° 28'	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	
	42° 46'											
24	41° 38'	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	

Figura 29. Ángulo de la Cara del Diente[25].

Modulo	1
# Dientes	30
#Dientes Engranés	30
Angulo de Presión	20°
Ancho de Cara	10 mm
Diámetro Cubo	26 mm
Distancia de Montaje	15 mm
Diámetro Eje Nominal	16 mm
Angulo del Diámetro Primitivo	45°

Tabla 7. Dimensiones específicas del los Piñones - Robot Gryphon EC.

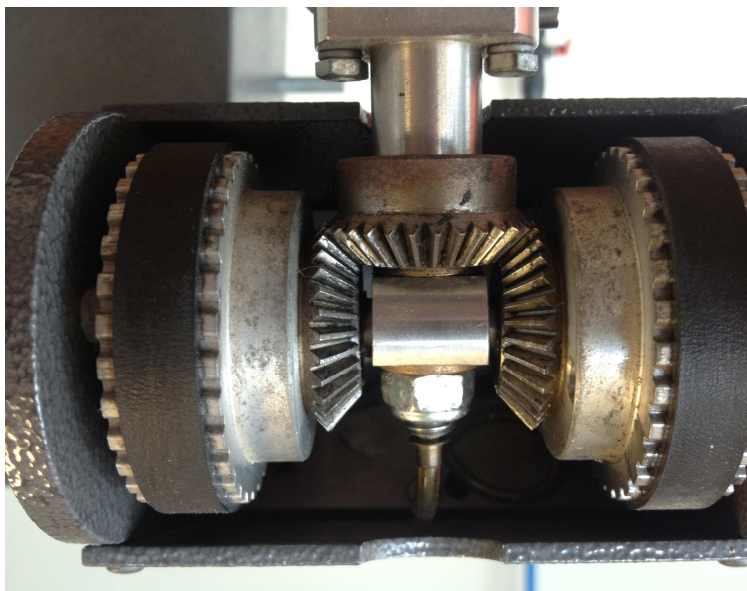


Figura 30. Sistema de Piñones Cónicos.

5.2 MODELO CINEMÁTICO

La cinemática del robot es un estudio del movimiento del mismo, sin involucrar las fuerzas que ejercen dicho movimiento, su principal objetivo es especificar la posición y orientación del robot determinado por su eje de coordenadas. Existen dos problemas de análisis en la cinemática, el problema directo e el inverso.

5.2.1 Modelo Cinemático Directo

Conocidos los valores de las articulaciones y parámetros geométricos de los elementos del robot, el modelo cinemático directo consiste en obtener la posición y orientación del eje de referencia del efector final con respecto al eje de la base. Para resolver este tipo de problemas se plantean los métodos numéricos como solución. En la Figura 31 se observa el diagrama de bloques de un modelo cinemático directo.



Figura 31. Cinemática Directa.

5.2.2 Modelo Cinemático Inverso

El modelo cinemático inverso pretende hallar los valores de ángulos entre las articulaciones que podrían usarse para adquirir la posición y orientación deseada. Para resolver este problema se plantean múltiples soluciones: métodos geométricos, desacoplo cinemático, matrices de transformación homogénea entre otras. En la Figura 32 se observa el diagrama de bloques de un modelo cinemático inverso.



Figura 32. Cinemática Inversa.

5.2.3 Modelo Geométrico Directo del Robot Gryphon

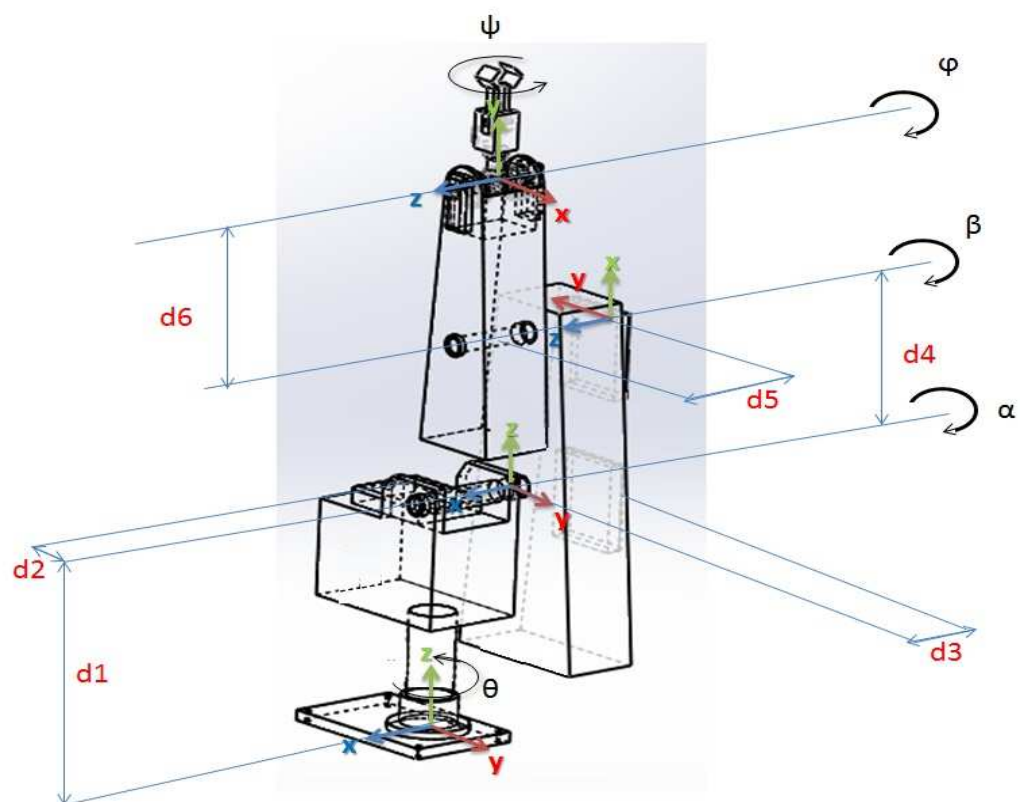


Figura 33. Modelo Geométrico del Robot Gryphon.

Calculo de las Matrices de Transformación

Una matriz de transformación homogénea geoméricamente representa la localización de un sistema de coordenadas ligado al cuerpo, con respecto a un sistema de coordenadas de referencia. Se aplica el algoritmo de Denavit-Hartenberg, que es un método matricial que permite establecer de manera sistemática un sistema de coordenadas ligado a cada eslabón de una cadena articulada, pudiéndose determinar a continuación las ecuaciones cinemáticas de la cadena completa. En la Tabla 8 se muestran los parámetros D-H donde α, θ son relativos al tamaño y forma del eslabón; y d, r son parámetros que relacionan la posición relativa de un eslabón con respecto al anterior.

	α	d	θ	r
1	0°	0	q_1+90°	d_1
2	90°	d_2	q_2+90°	$-d_3$
3	0°	d_4	q_3	0
4	0°	d_6	-90°	d_5
5	0°	0	q_4	0
6	-90°	0	q_5-90°	d_7

Tabla 8. Parametros Denavit-Hartenberg

De acuerdo con los parámetros D-H se tienen las matrices de transformación homogéneas, para cada una de las articulaciones.

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} -sq_1 & -cq_1 & 0 & 0 \\ cq_1 & -sq_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^1T_2 = \begin{bmatrix} -sq_2 & -cq_2 & 0 & d_2 \\ 0 & 0 & -1 & d_3 \\ cq_2 & -sq_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$${}^0T_2 = {}^0T_1 {}^1T_2 = \begin{bmatrix} sq_1sq_2 & sq_1cq_2 & cq_1 & sq_1d_2 - cq_1d_3 \\ -cq_1sq_2 & -cq_1cq_2 & sq_1 & cq_1d_3 - d_3sq_1 \\ cq_2 & -sq_2 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^2T_3 = \begin{bmatrix} cq_3 & -sq_3 & 0 & d_4 \\ sq_3 & cq_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^3T_4 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & d_6 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^4T_5 = \begin{bmatrix} cq_4 & -sq_4 & 0 & 0 \\ sq_4 & cq_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^5T_6 = \begin{bmatrix} sq_5 & cq_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_7 \\ cq_5 & -sq_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
{}^4T_6 &= {}^4T_5 {}^5T_6 = \begin{bmatrix} cq_5sq_5 & cq_4cq_5 & -sq_4 & -d_7sq_4 \\ sq_4sq_5 & sq_4cq_5 & cq_4 & d_7cq_4 \\ cq_5 & -sq_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
{}^3T_6 &= {}^3T_4 {}^4T_6 = \begin{bmatrix} sq_4sq_5 & sq_4cq_5 & cq_4 & d_7cq_4 + d_6 \\ -cq_4sq_5 & -cq_4cq_5 & sq_4 & d_7sq_4 \\ cq_5 & -sq_5 & 0 & d_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
{}^2T_6 &= {}^3T_3 {}^6T_6 = \begin{bmatrix} sq_5s(q_3 + q_4) & cq_5s(q_3 + q_4) & c(q_3 + q_4) & d_7c(q_3 + q_4) + d_6cq_3 + d_4 \\ -sq_5s(q_3 + q_4) & -cq_5s(q_3 + q_4) & s(q_3 + q_4) & d_7c(q_3 + q_4) + d_6sq_3 \\ cq_5 & -sq_5 & 0 & d_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
{}^1T_6 &= {}^3T_3 {}^6T_6 = \begin{bmatrix} sq_5[cq_2(c(q_3 + q_4) - sq_2(s(q_3 + q_4))) & cq_5[cq_2c(q_3 + q_4) - sq_2s(q_3 + q_4)] \\ & -cq_5 & sq_5 \\ sq_5[sq_2c(q_3 + q_4) + cq_2s(q_3 + q_4)] & cq_5[sq_2c(q_3 + q_4) + cq_2s(q_3 + q_4)] & cq_2c(q_3 + q_4) \\ & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
\boxed{\begin{aligned} x &= d_7sq_1s(q_2 + q_3 + q_4) + d_4sq_1[s(q_2 + q_3) + sq_2] - d_5cq_1 - d_2sq_1 \\ y &= -d_7cq_1s(q_2 + q_3 + q_4) - d_4cq_1[s(q_2 + q_3) - sq_2] - d_5cq_1 + d_2sq_1 \\ z &= d_7c(q_2 + q_3 + q_4) + d_4[c(q_2 + q_3) + cq_2] + d_1 \end{aligned}}
\end{aligned}$$

5.3 MODELO DINAMICO

La dinámica en un robot es el estudio de su movimiento y las fuerzas requeridas para producirlo. Es importante hallar las ecuaciones de movimiento para cada articulación. El modelo dinámico general de un manipulador de n grados de libertad está regido por:

$$\tau = M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) + f(\dot{q})$$

Siendo,

τ : Torque ejercido por los actuadores de cada articulación

q : Vector de variables articulares

$M(q)$: Matriz de inercia

$C(q, \dot{q})$: Matriz centrífuga y de coriolis

$g(q)$: Vector de gravedad

$f(\dot{q})$: Propiedades de la dinámica residual

5.3.1 Modelo Dinámico Inverso

Este modelo expresa las fuerzas y pares que intervienen en función de la evolución de las coordenadas articulares y sus derivadas [21]. Ver Figura 34.



Figura 34. Dinámica Inversa.

5.3.2 Modelo Dinámico Directo

Expresa la evolución temporal de las coordenadas articulares del robot en función de las fuerzas y pares que intervienen [21]. Ver Figura 35. Dinámica Directa



Figura 35. Dinámica Directa.

El modelo matemático dinámico del robot no se obtuvo, ya que su análisis es demasiado complejo. Para suplir esta necesidad empleamos en todo momento el modelo dinámico desarrollado en el software de simulación ADAMS y que será presentado en el capítulo 5.

5.4 PLANIFICADOR DE TRAYECTORIAS

El objetivo general del planificador de trayectorias es ordenarle al robot que realice un movimiento de una posición inicial a una final, en un determinado espacio de trabajo. De tal manera que el motor arranque suavemente, se mantenga a velocidad máxima y frene suavemente. El trayecto desde la posición inicial a la final, se divide en 3 tramos (Posición, Aceleración, Velocidad), para cada uno de ellos se halla una función polinómica. Véase **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Para Generar posición, velocidad y aceleración, el mínimo polinomio que se puede trabajar es el denominado 3-1-3, con tal polinomio, el motor tiende a cambios bruscos ó se producen ruidos debido a que el jerk da se da en escalón. Para evitar estos problemas se ha decidido trabajar con un polinomio 6-1-6 evitando la inconsistencia genera con el 5-1-5 al tener 7 ecuaciones y 6 incógnitas. Con el Polinomio 6-1-6 tenemos 7 ecuaciones 7 incógnitas. El planificador se programo en el editor de MATLAB. Para mayor información acerca del desarrollo del planificador de trayectorias véase [14].

5.4.1 Desarrollo matemático del Polinomio 616

Para el desarrollo de los tramos del planificador se asume que la curva característica de posición está dada por la curva mostrada en la Figura 36.

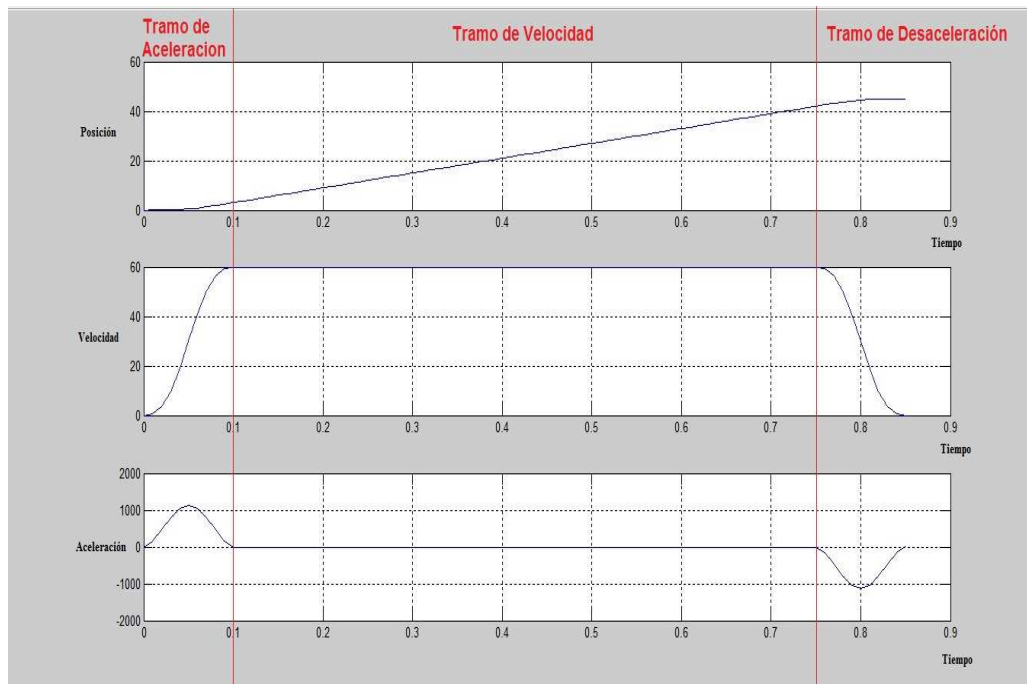


Figura 36. Pol 616 Tramos de Posición, Aceleración y Velocidad.

Tramo I de Aceleración

$$q_1(t) = a_6 * t^6 + a_5 * t^5 + a_4 * t^4 + a_3 * t^3 + a_2 * t^2 + a_1 * t + a_0$$

$$\dot{q}_1(t) = 6a_6 * t^5 + 5a_5 * t^4 + 4a_4 * t^3 + 3a_3 * t^2 + 2a_2 * t + a_1$$

$$\ddot{q}_1(t) = 30a_6 * t^4 + 20a_5 * t^3 + 12a_4 * t^2 + 6a_3 * t + 2a_2$$

$$\dddot{q}_1(t) = 120a_6 * t^3 + 60a_5 * t^2 + 24a_4 * t + 6a_3$$

Condiciones Iniciales	Condiciones Finales
--------------------------	------------------------

$$q_1(0) = 0 \quad q_1(t_a) = q_1(f)$$

$$\dot{q}_1(0) = 0 \quad \dot{q}_1(t_a) = \dot{q}_{1\max}$$

$$\ddot{q}_1(0) = 0 \quad \ddot{q}_1(t_a) = 0$$

$$\dddot{q}_1(0) = 0 \quad \dddot{q}_1(t_a) = 0$$

$$a_0 = 0 \quad a_1 = 0 \quad a_2 = 0 \quad a_3 = 0$$

$$a_4 = \frac{5\dot{q}_{1\max}}{2(t_a)^3} \quad a_5 = \frac{-3\dot{q}_{1\max}}{(t_a)^4} \quad a_6 = \frac{\dot{q}_{1\max}}{(t_a)^5}$$

$$q_1(t) = \frac{\dot{q}_{1\max} t^6}{(t_a)^5} - \frac{3\dot{q}_{1\max} t^5}{(t_a)^4} + \frac{5\dot{q}_{1\max}}{2(t_a)^3} \quad 0 \leq t \leq t_a$$

Tramo II de Velocidad

$$q_2(t) = b_1 t + b_0$$

Condiciones Iniciales	Condiciones Finales
--------------------------	------------------------

$$q_2(t_a) = \frac{\dot{q}_{2\max} t_a}{2} \quad q_2(t_t - t_a) = q_2(f)$$

$$\dot{q}_2(t_a) = \dot{q}_{2\max} \quad \dot{q}_2(t_t - t_a) = \dot{q}_{2\max}$$

$$\ddot{q}_2(t_a) = 0 \quad \ddot{q}_2(t_t - t_a) = 0$$

$$b_1 = \dot{q}_{2\max} \quad b_0 = \frac{-\dot{q}_{2\max} t_a}{2}$$

$$q_2(t) = \dot{q}_{2\max} t - \frac{\dot{q}_{2\max} t_a}{2} \quad t_a \leq t \leq t_t - t_a$$

Tramo III de Desaceleración

$$q_3(t) = c_6 * t^6 + c_5 * t^5 + c_4 * t^4 + c_3 * t^3 + c_2 * t^2 + c_1 * t + c_0$$

$$\dot{q}_3(t) = 6c_6 * t^5 + 5c_5 * t^4 + 4c_4 * t^3 + 3c_3 * t^2 + 2c_2 * t + c_1$$

$$\ddot{q}_3(t) = 30c_6 * t^4 + 20c_5 * t^3 + 12c_4 * t^2 + 6c_3 * t + 2c_2$$

$$\ddot{\ddot{q}}_3(t) = 120c_6 * t^3 + 60c_5 * t^2 + 24c_4 * t + 6a_3$$

Condiciones
Iniciales

Condiciones
Finales

$$q_3(t_t - t_a) = \dot{q}_{3\max}(t_t - t_a) - \frac{\dot{q}_{3\max} t_a}{2}$$

$$q_3(t_t) = q_3(f)$$

$$\dot{q}_3(t_t - t_a) = \dot{q}_{3\max}$$

$$\dot{q}_3(t_t) = 0$$

$$\ddot{q}_3(t_t - t_a) = 0$$

$$\ddot{q}_3(t_t) = 0$$

$$c_0 = \dot{q}_{3\max}(t_t) - \frac{3\dot{q}_{3\max} t_a}{2} \quad c_4 = -\frac{5\dot{q}_{3\max}}{2(t_a)^3}$$

$$c_1 = \dot{q}_{3\max} \quad c_5 = \frac{3\dot{q}_{3\max}}{2(t_a)^3}$$

$$c_2 = c_3 = 0 \quad c_6 = -\frac{\dot{q}_{3\max}}{(t_a)^5}$$

$$q_3(t) = -\frac{\dot{q}_{3\max}}{(t_a)^5} t^6 + \frac{3\dot{q}_{3\max}}{2(t_a)^3} t^5 - \frac{5\dot{q}_{3\max}}{2(t_a)^3} t^4 + \dot{q}_{3\max} * t + \dot{q}_{3\max}(t_t) - \frac{3\dot{q}_{3\max} t_a}{2}$$

6 MODELOS DE SIMULACIÓN

6.1 MODELO DE SIMULACIÓN EN CATIA

El proceso de construcción de las piezas se basó en las dimensiones de la estructura física real del robot Gryphon. Gracias a las cajas de herramientas que ofrece el software CATIA se realiza el proceso de modelado. A continuación se da a conocer el diseño de la primera pieza llamada base.

Como primera etapa se ingresa al software de simulación CATIA V5, el espacio de trabajo observa en la Figura 37, en el menú principal de opciones de diseño, se habilita >> Diseño Mecánico>> Diseño de Parte, como se muestra en la Figura 38. En la parte izquierda del espacio de trabajo se encuentra el árbol, ésta aplicación tiene una alta importancia, ya que contiene toda la información de las piezas, ensambles, modelos, material, es decir todas las propiedades de la parte que se está diseñando. Además se puede visualizar las diferentes barras de herramientas y comandos para utilizar en modelado 3D.

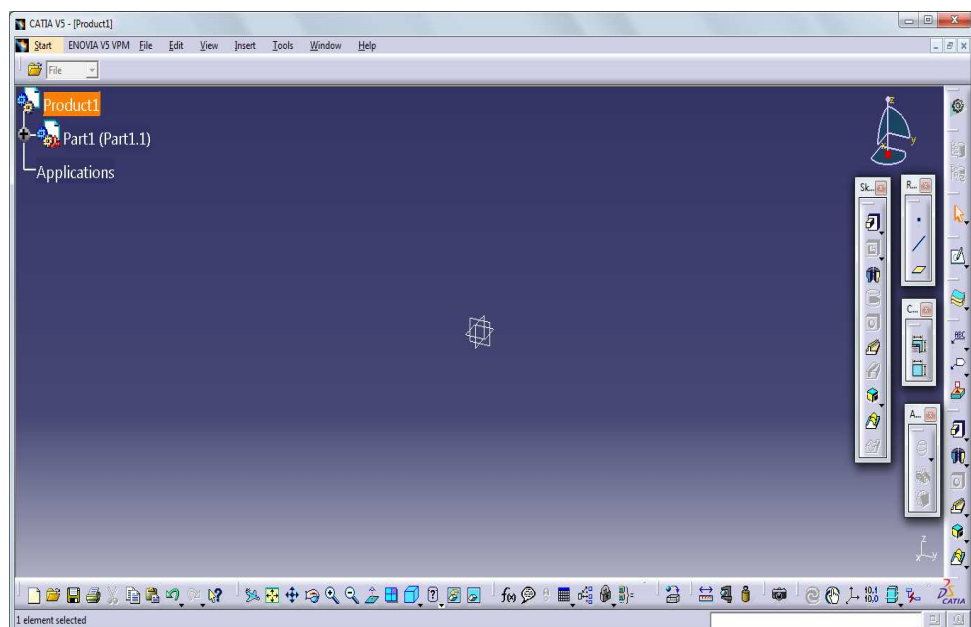


Figura 37. Espacio de Trabajo CATIA

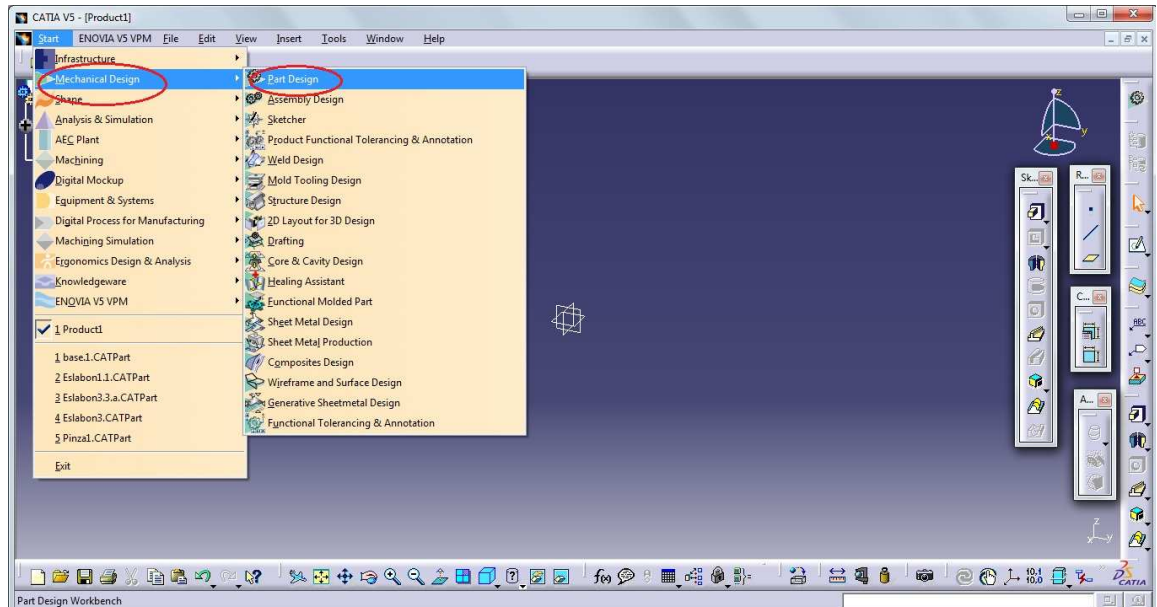


Figura 38. Selección de Diseño Mecánico de Parte.

Seguidamente seleccionamos la interfaz sketcher ubicada en la barra de herramientas en la parte derecha del espacio de trabajo (véase Figura 39). Éste entorno grafico facilita la construcción de diseño y modelado en 3D ya que es un generador de perfiles para la parte a construir. Se realizó la primera estructura en forma de rectángulo como base principal para el prototipo.

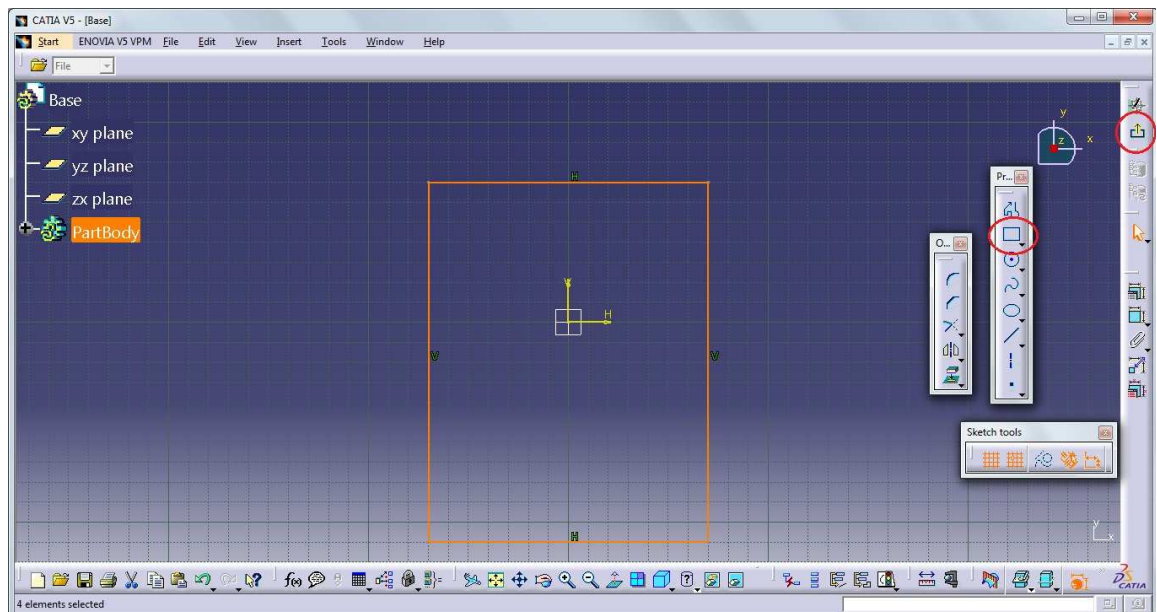


Figura 39. Entorno grafico Sketcher.

En la segunda etapa de construcción del modelo, se aplica la profundidad y solidos de la pieza, seleccionando el icono de extrusión con las dimensiones deseadas (VéaseFigura 40). Seguidamente se diseñauncírculo sobre la pieza plana que hace función de soporte de la base. Figura 41.

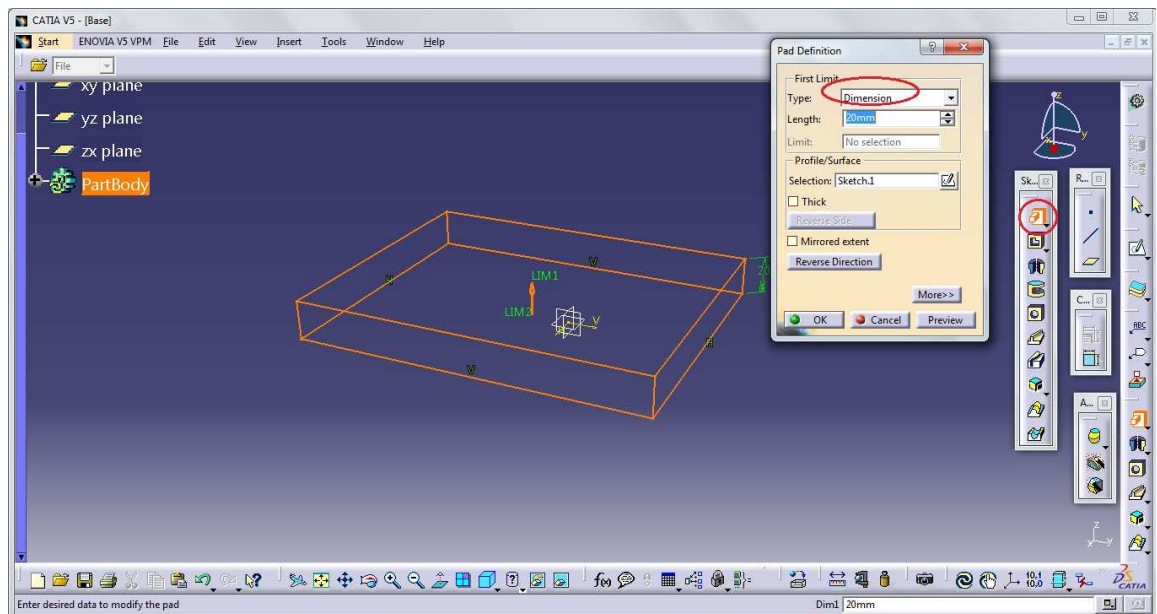


Figura 40. Profundidad de la Pieza.

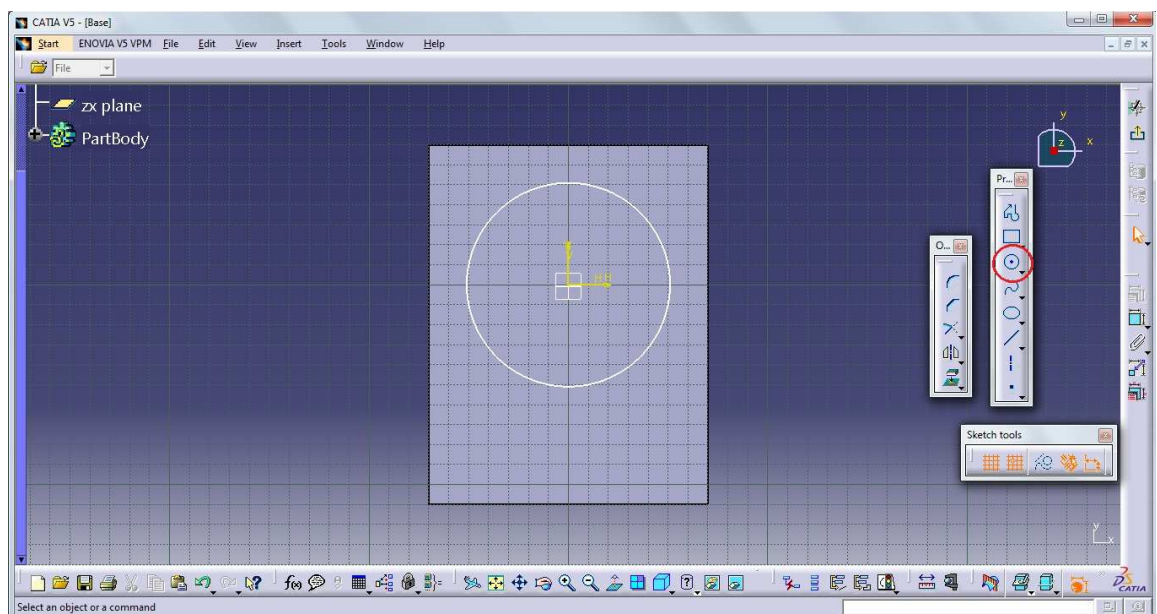


Figura 41. Diseño de Cilindro.

Como tercera etapa del proceso, se selecciona extrusión al círculo, automáticamente el programa genera un cilindro con las dimensiones deseadas

por el diseñador. Como se puede observar en la Figura 42. De esta misma manera se crean 2 cilindros adicionales de diferentes dimensiones unidos al soporte principal. Véase Figura 43

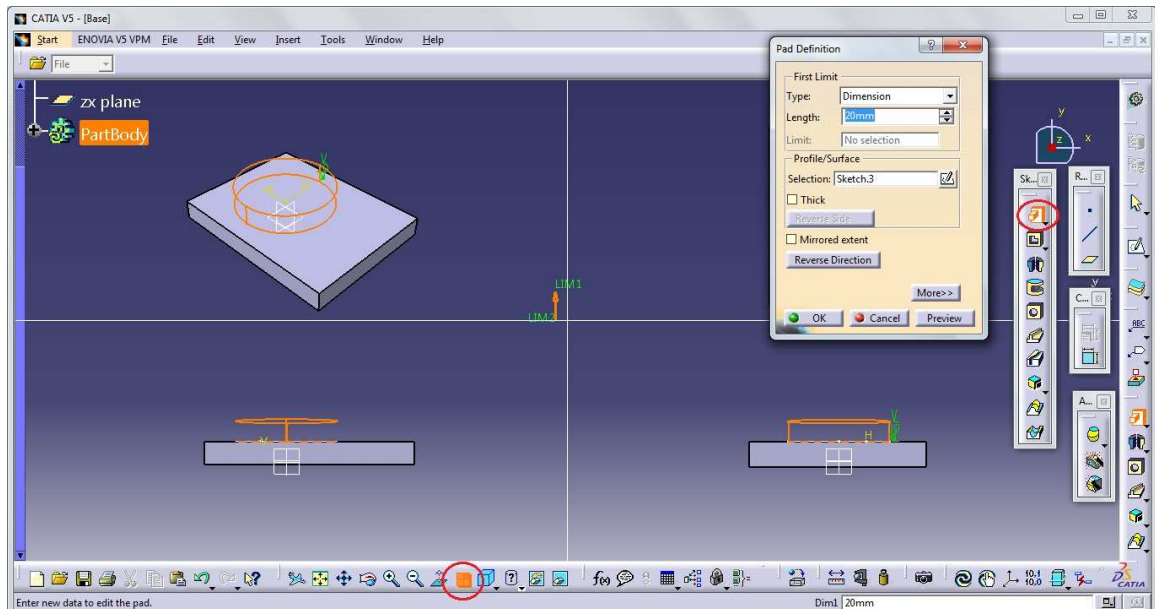


Figura 42. Creación del Cilindro.

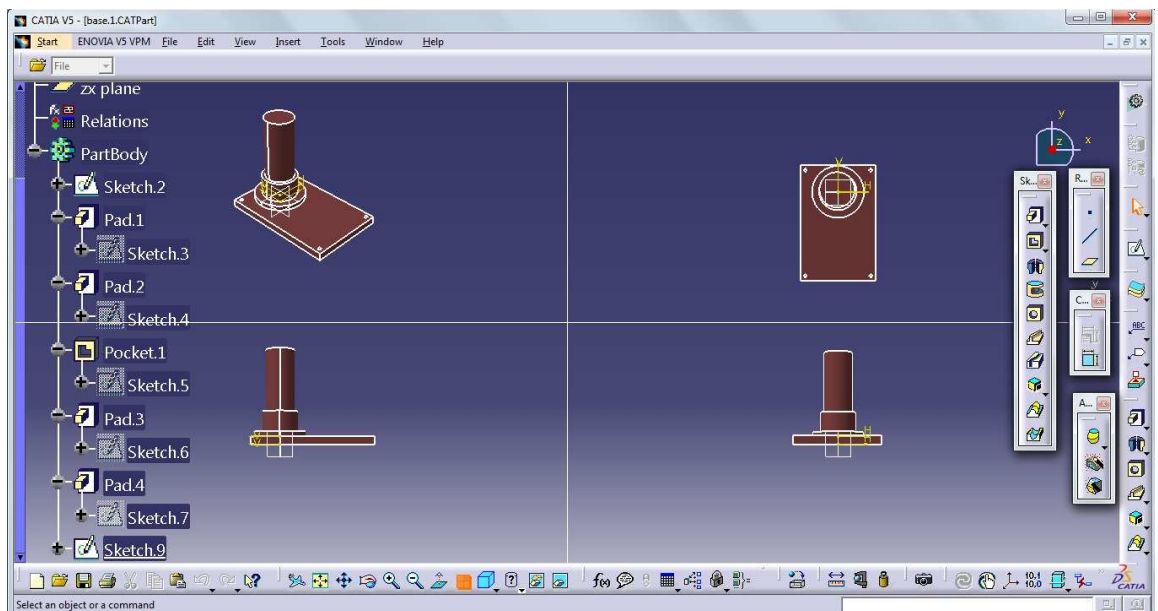


Figura 43. Profundidad de la Pieza.

Una de las herramientas del software CATIA en cuando diseño y construcción de las piezas, es la propiedad de selección de materiales, visualización de las aristas, cambios de color, textura entre otras. Dando click derecho sobre la parte creada se abre una ventana para habilitar dichas aplicaciones como se muestra en la Figura 44.

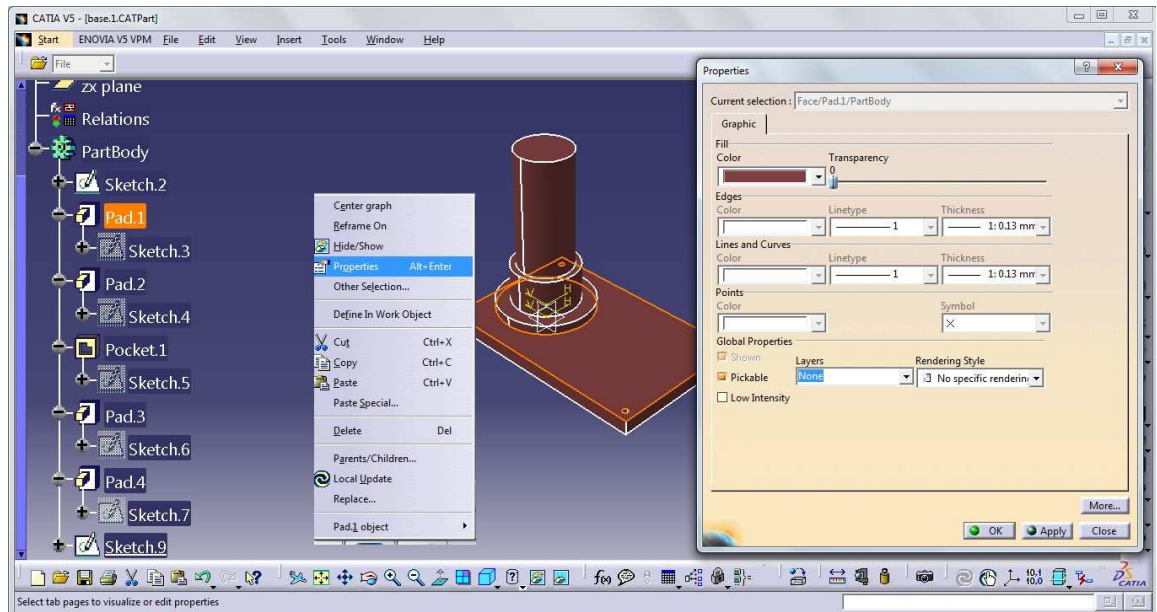


Figura 44. Propiedades de la Pieza.

En la Figura 45 se puede observar la pieza llamada base finalmente terminada, de esta misma manera se diseñaron los tres eslabones y la pinza del robot Gryphon (Figura 46). Para mayor información de los comandos, herramientas y creación de piezas en el software de simulación CATIA V5 véase los anexos.

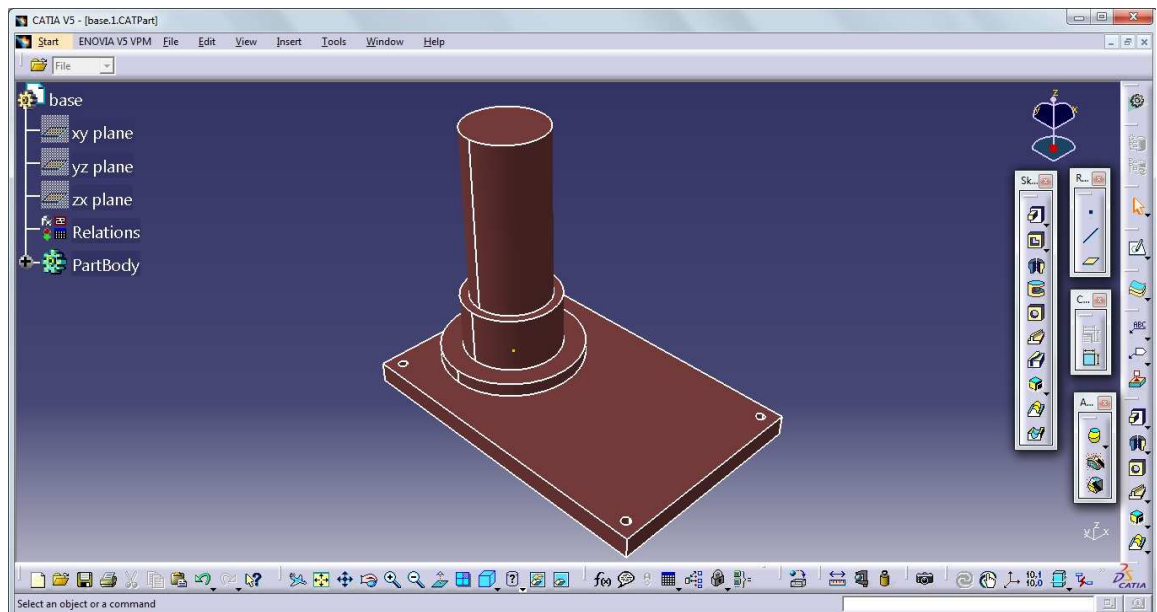


Figura 45. Base del Robot Gryphon Diseñada en CATIA.

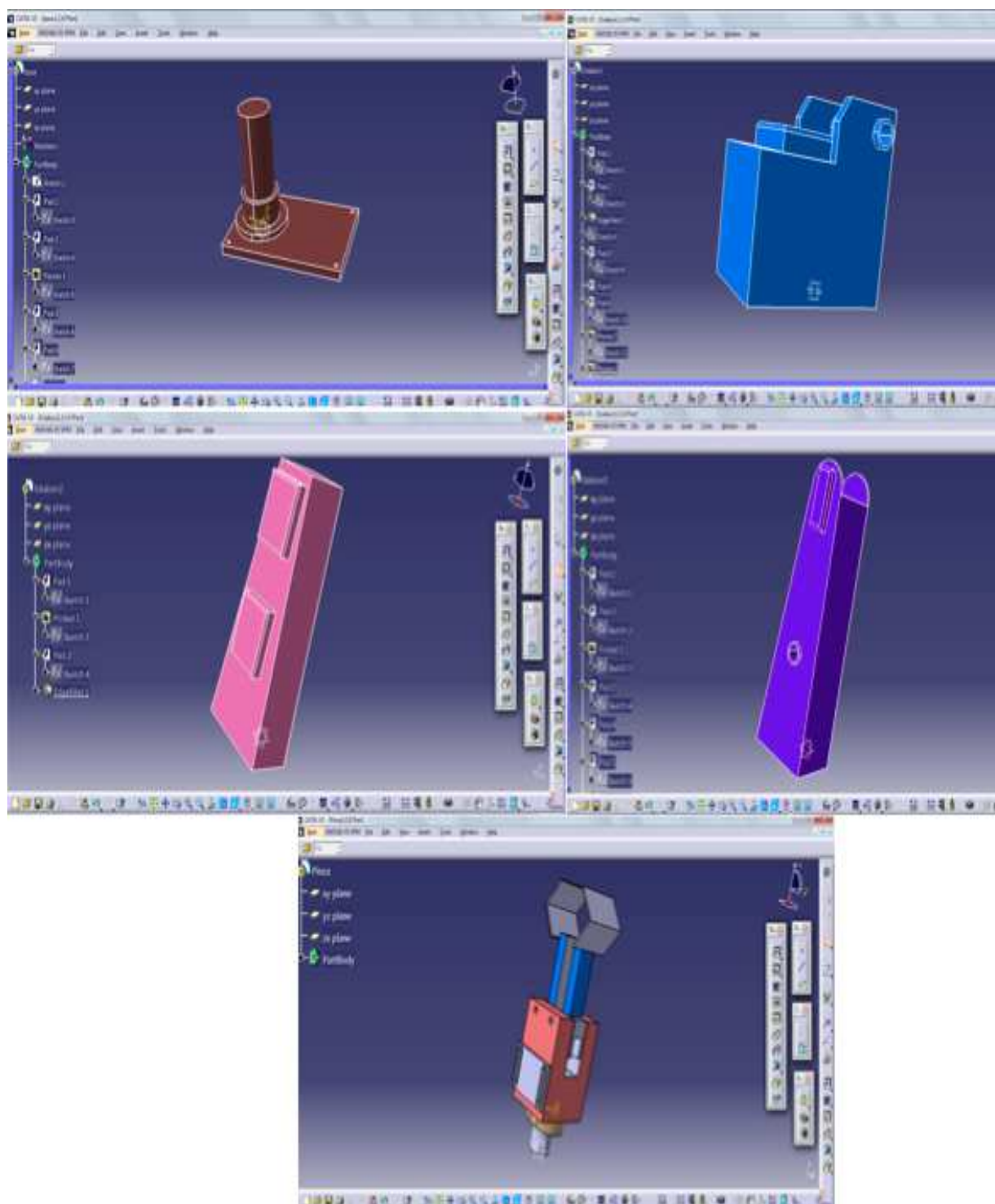


Figura 46. Robot Gryphon EC modelado pieza por pieza en CATIA.

6.2 MODELO DE SIMULACION EN SOLIDWORKS

El sistema de piñones y engranes de la pinza han sido enteramente diseñados en el software de simulación SOLIDWORKS, teniendo en cuenta los principios de diseño de maquinas como simetría, engrane cónico, etc.

Como primera etapa de diseño, abrimos el entorno grafico de Solidworks (véase Figura 47), en donde se despliega una ventana con las opciones de creación de piezas, ensamble o dibujo técnico. Para el diseño del sistema de piñones se da click en la primera opción.

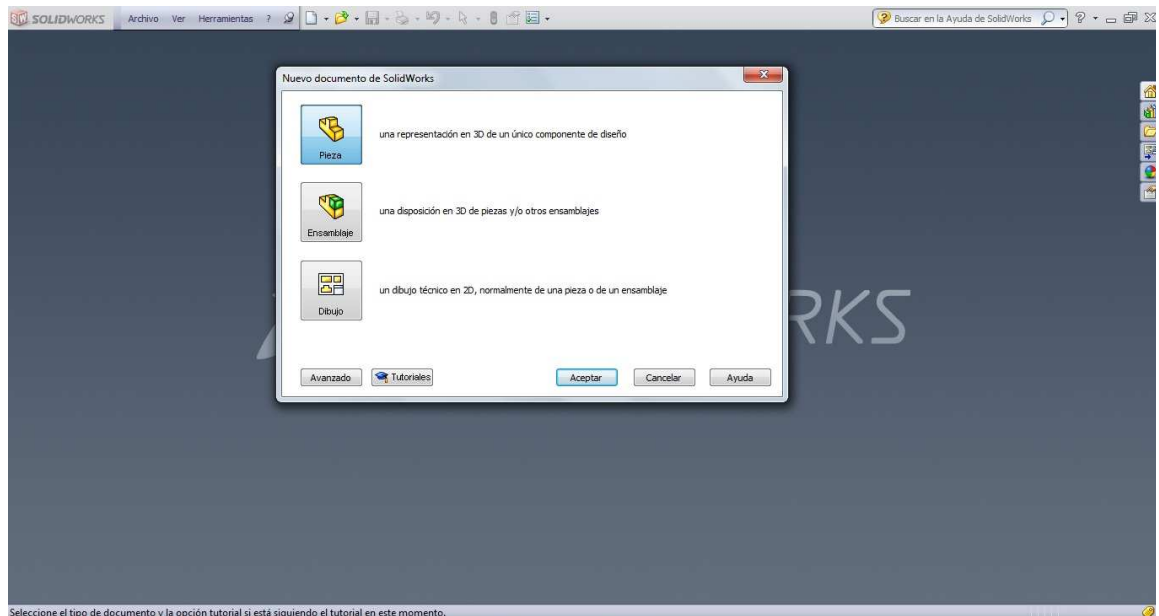


Figura 47. Entorno Grafico de SOLIDWORKS.

En la Figura 48 se observa el espacio de trabajo del software de simulación SOLIDWORKS, el programa cuenta con una alta gama de herramientas para el diseño y modelado de piezas mecánicas en 3D. Para la construcción de los piñones se ejecuta una Toolbox dando click en GB, Transmisión de potencia y Engranajes, ésta brinda al usuario las opciones de diseño, la creación de los piñones se basaron con las normas ISO (*Organización Internacional de Estándares*). Véase Figura 49.

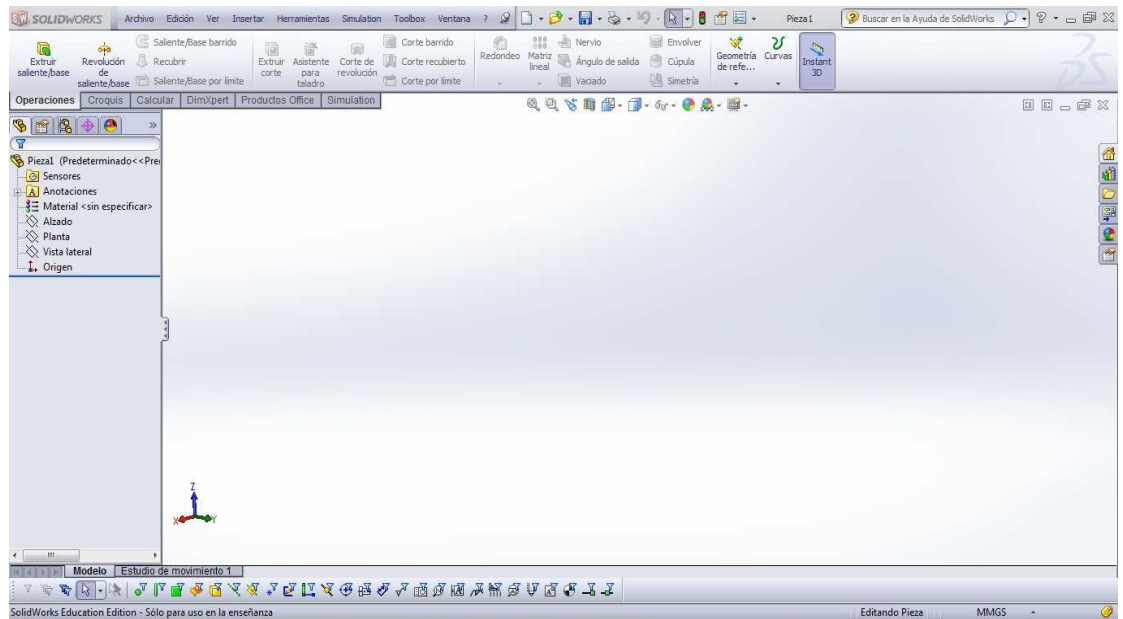


Figura 48. Espacio de Trabajo de SOLIDWORKS.

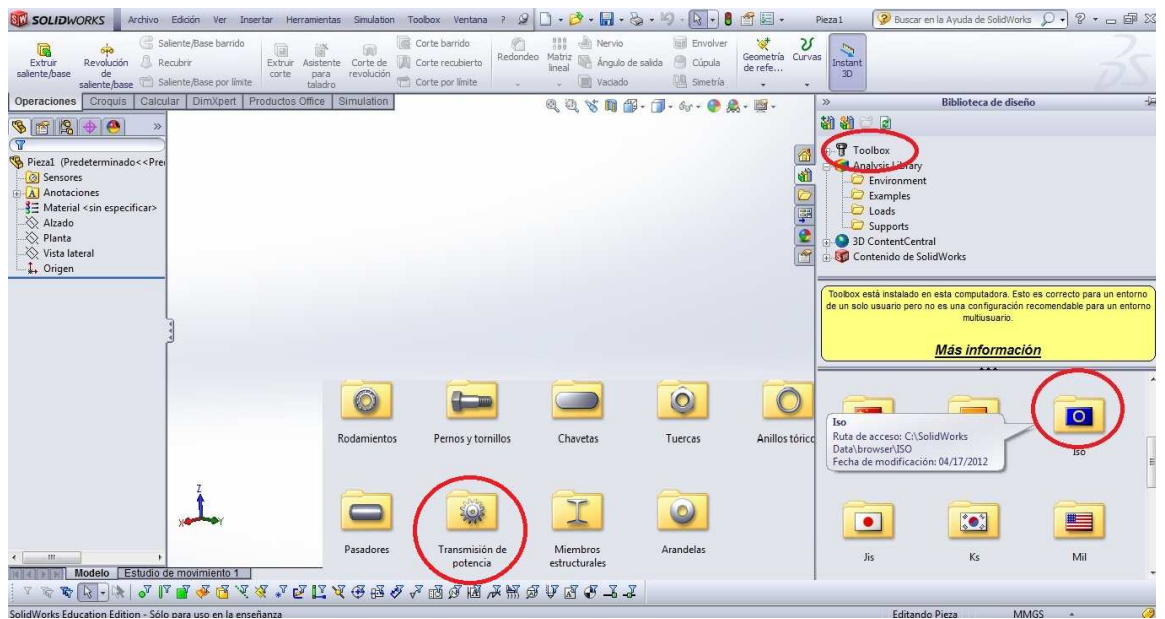


Figura 49. ToolBox GB de SOLIDWORKS.

Seguidamente de habilitar la caja de herramientas>>Transmisión de Potencia, se despliega una ventana en la cual se selecciona la pieza que se desea implementar>> Piñón cónico (véase Figura 50). En la parte izquierda del espacio de trabajo se observa una ventana en la cual se realiza la configuración de la pieza con las dimensiones deseadas (véase Figura 51).

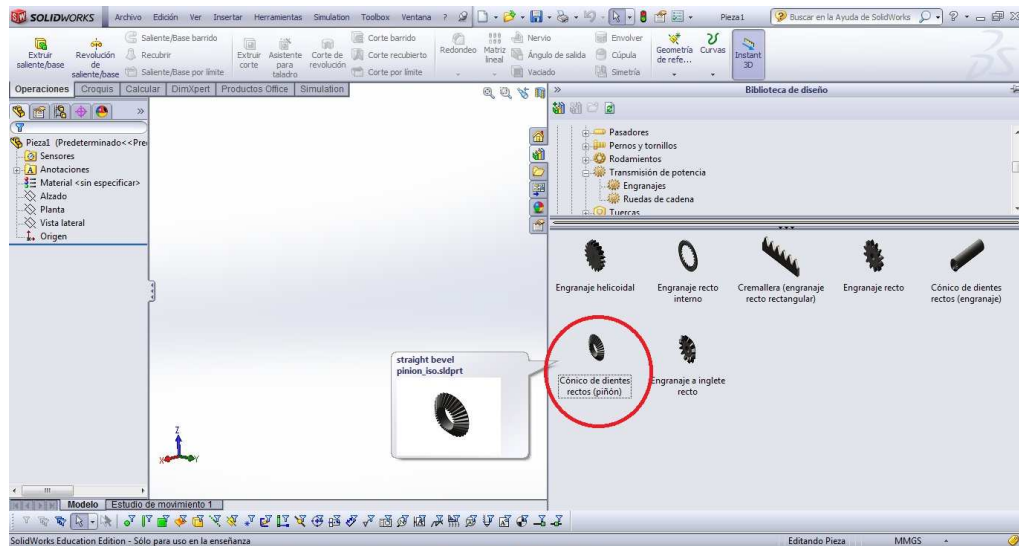


Figura 50. Selección de Piñón Cónico.

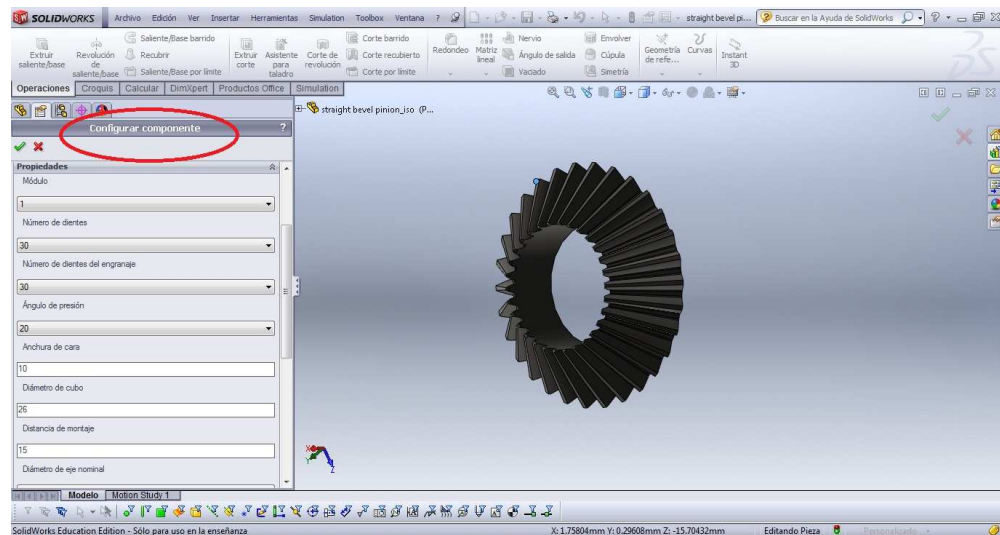


Figura 51. Configuración de Piñón Cónico.

Teniendo los piñones con las especificaciones reales del robot Gryphn, se desarrollo el sistema de engranes, las piezas terminadas se muestran en la Figura 52

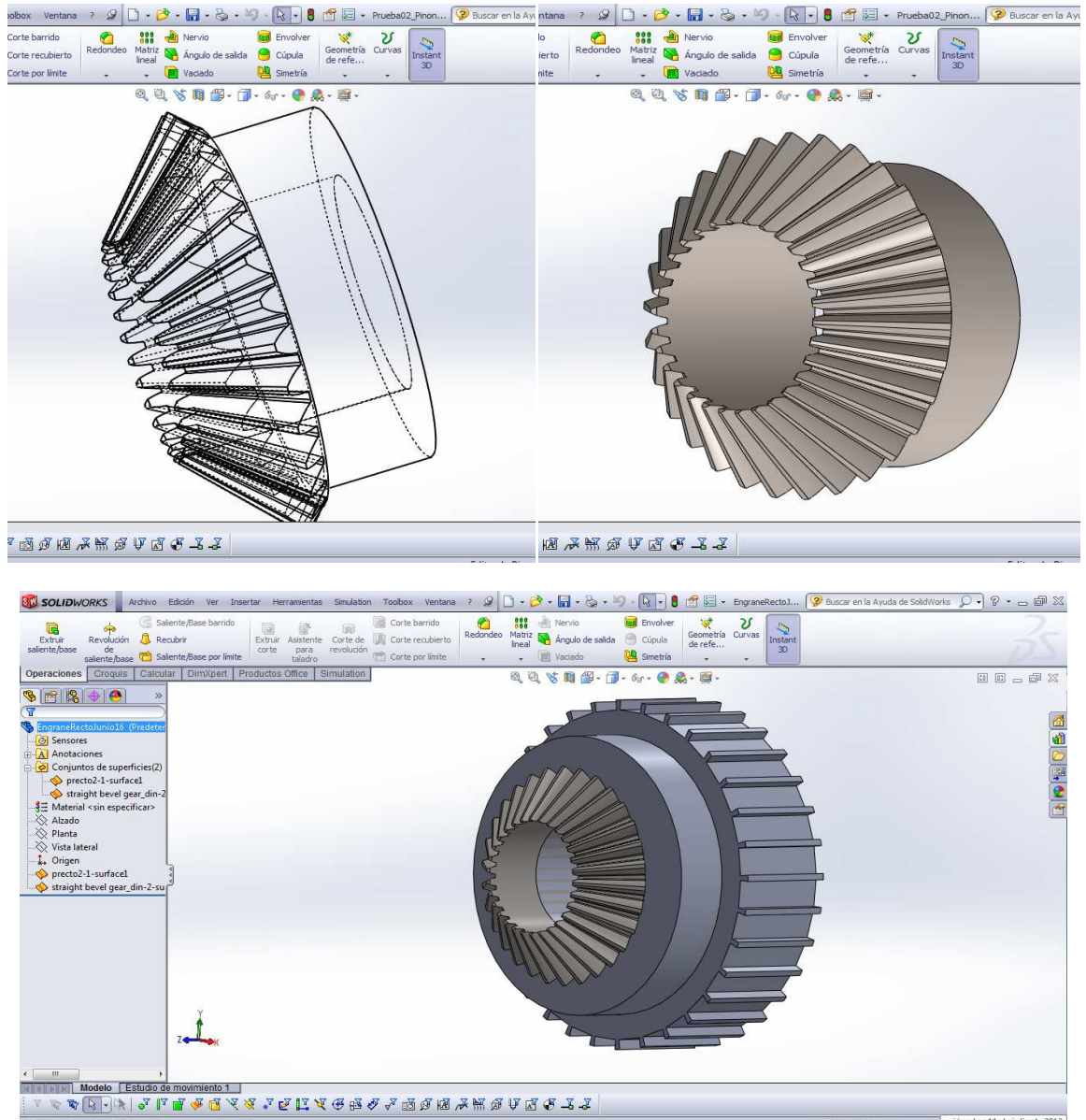


Figura 52. Sistema de Piñones en SOLIDWORKS.

6.2.1 Importación y Exportación de piezas desde software CATIA a SOLIDWORKS

Debido a que los programas informáticos CATIA y SOLIDWORKS pertenecen a la misma casa Dessault Systemes, son compatibles en diversos formatos. La importación y exportación de piezas es de gran importancia en el desarrollo de este proyecto, ya que a través de la comunicación virtual que ofrecen los programas, se obtienen las partes del robot Gryphon de forma independiente conservando sus cualidades físicas.

Las piezas en el software CATIA son guardadas en la extensión .IGS luego son exportadas al software SOLIDWORKS con la misma extensión (véase Figura 53). Este proceso tiene como finalidad unificar las piezas en un solo espacio de trabajo para seguidamente realizar el ensamble de las partes y obtener un conjunto armónico de piezas mecánicas denominado Robot Gryphon.

6.2.2 Ensamble del robot GRYPHON en SOLIDWORKS

Seguidamente de la importación de las piezas, se propone realizar la unión de los eslabones y la pinza en el espacio de trabajo de SOLIDWORKS (véase Figura 54). Se eligió éste programa porque contiene de propiedades de construcción de modelos mecánicos, tales como: restricciones de movimiento, acoplamiento de componentes al seleccionar superficies, aristas; creación de relaciones mecánicas entre diferentes partes; ejecuta pruebas de interferencia, colisión y alineación en el modelo; además de enlazar el movimiento de poleas, ruedas de engranajes y sistemas de piñones.

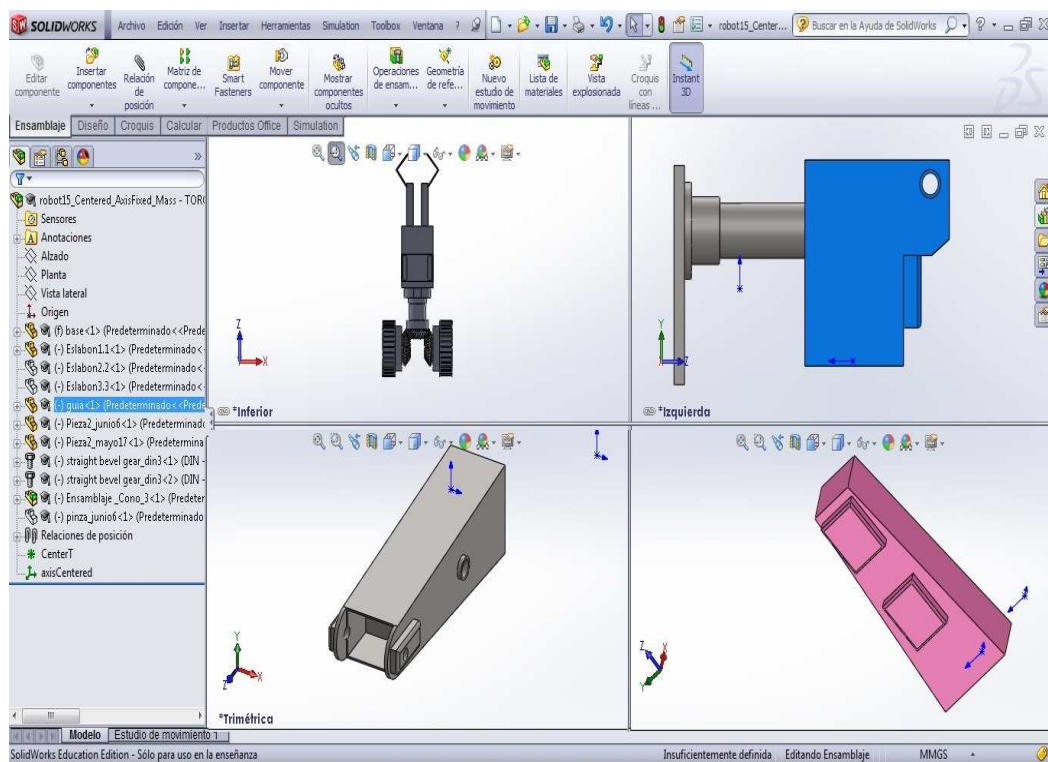


Figura 54. Piezas en el espacio de trabajo de SOLIDWORKS.

El proceso de ensamble del robot GRYPHON se realiza a través de la herramienta >> Relaciones de Posición (véase Figura 55). Acoplando las piezas importadas desde el software CATIA. En las juntas de los eslabones se utilizó la propiedad >> relación de posición concéntrica.

En la Figura 56 se puede observar el sistema de piñones, pinza y estabón 3, éste fue uno de los retos más sobresalientes del proyecto, ya que se debía realizar un sistema armónico, con el cual los dientes de los piñones cónicos lograrán un engranaje preciso para la generación de movimiento de la pinza.

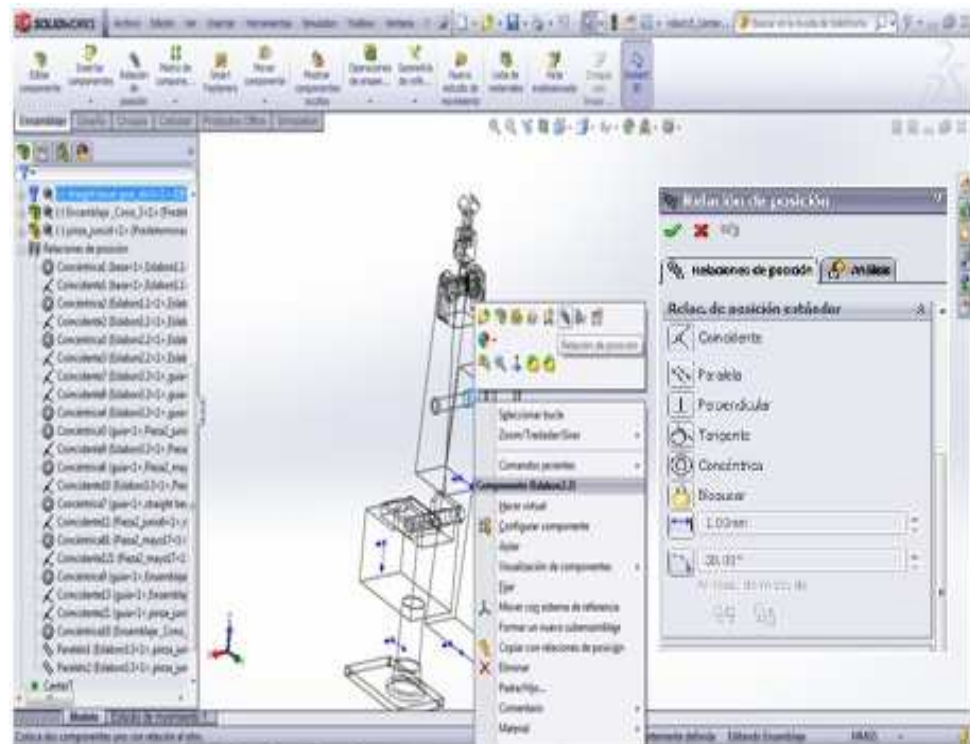


Figura 55. Relaciones de Posición.

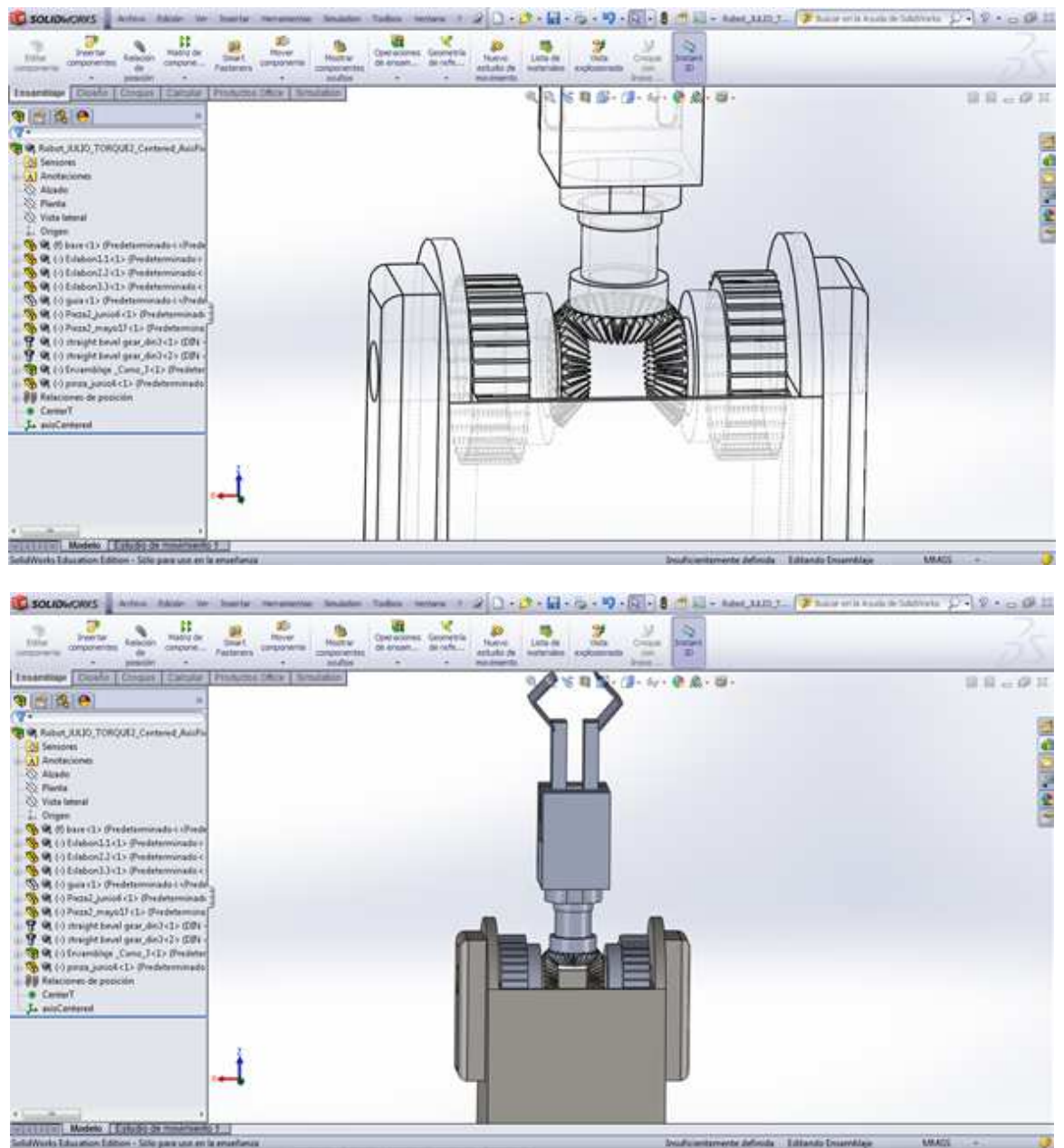


Figura 56. Engranos y Piñonera (Arriba), Pinza Completa (Abajo).

Adicionalmente, procesos como el centrado de todo el modelo y el cambio de ejes de coordenadas, los cuales son definidos arbitrariamente por el desarrollador de la herramienta de modelado, fueron realizados en Solidworks, ya que ofrece la posibilidad de importar los modelos individuales de CATIA (Figura 57), facilitando la tarea de ensamble de todo el robot.

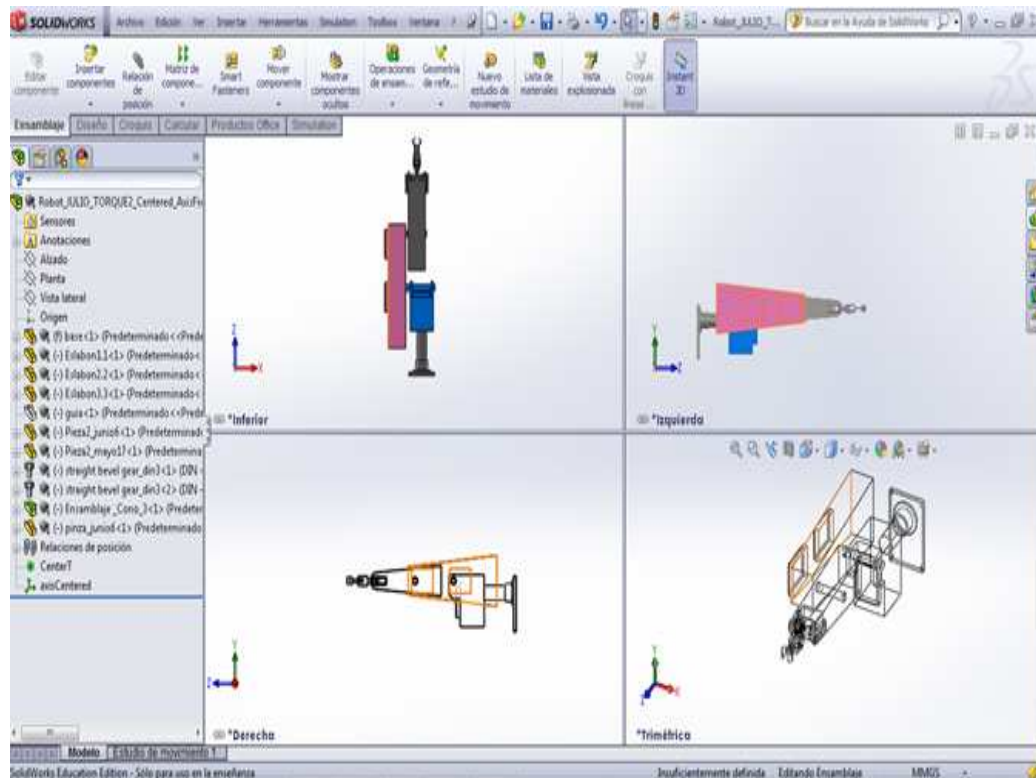


Figura 57. Ensamble del robot Gryphon.

6.2.3 Propiedades físicas

En el menú principal del programa computacional SOLIDWORKS se ingresa a Herramientas, el cual despliega una ventana que permite definir las propiedades físicas de la estructura del robot (ver Figura 58).

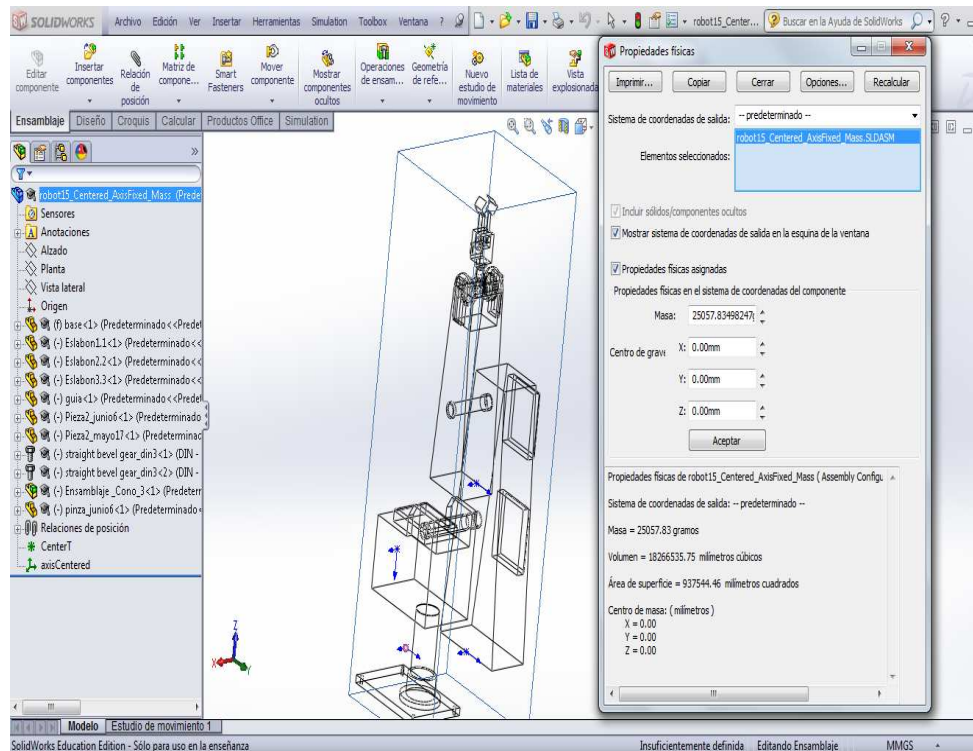


Figura 58. Propiedades Físicas del robot Gryphon.

Para finalizar con Solidworks, todo el modelo ha sido guardado en el formato Parasolid², altamente usado en aplicaciones CAD, y recomendado para conservar los ejes de referencia y las propiedades físicas de cada pieza, además de ser compatible con ADAMS.

6.3 MODELO DE SIMULACIÓN EN ADAMS MSc

El ensamblaje del robot GRYPHON se exportó al software de simulación computacional ADAMS MSc. Éste es el encargado de realizar la adquisición de datos del sistema dinámico del prototipo, teniendo en cuenta sus propiedades físicas. En la Figura 59 se puede observar el proceso de importación del modelo. En la Figura 60 se muestra el prototipo del robot en el entorno gráfico del

²Parasolid= Modelo geométrico, creado por ShapeData (<http://en.wikipedia.org/wiki/Parasolid>)

simulador ADAMS MSc. La pinza y el sistema de engranes se pueden observar en la Figura 61.

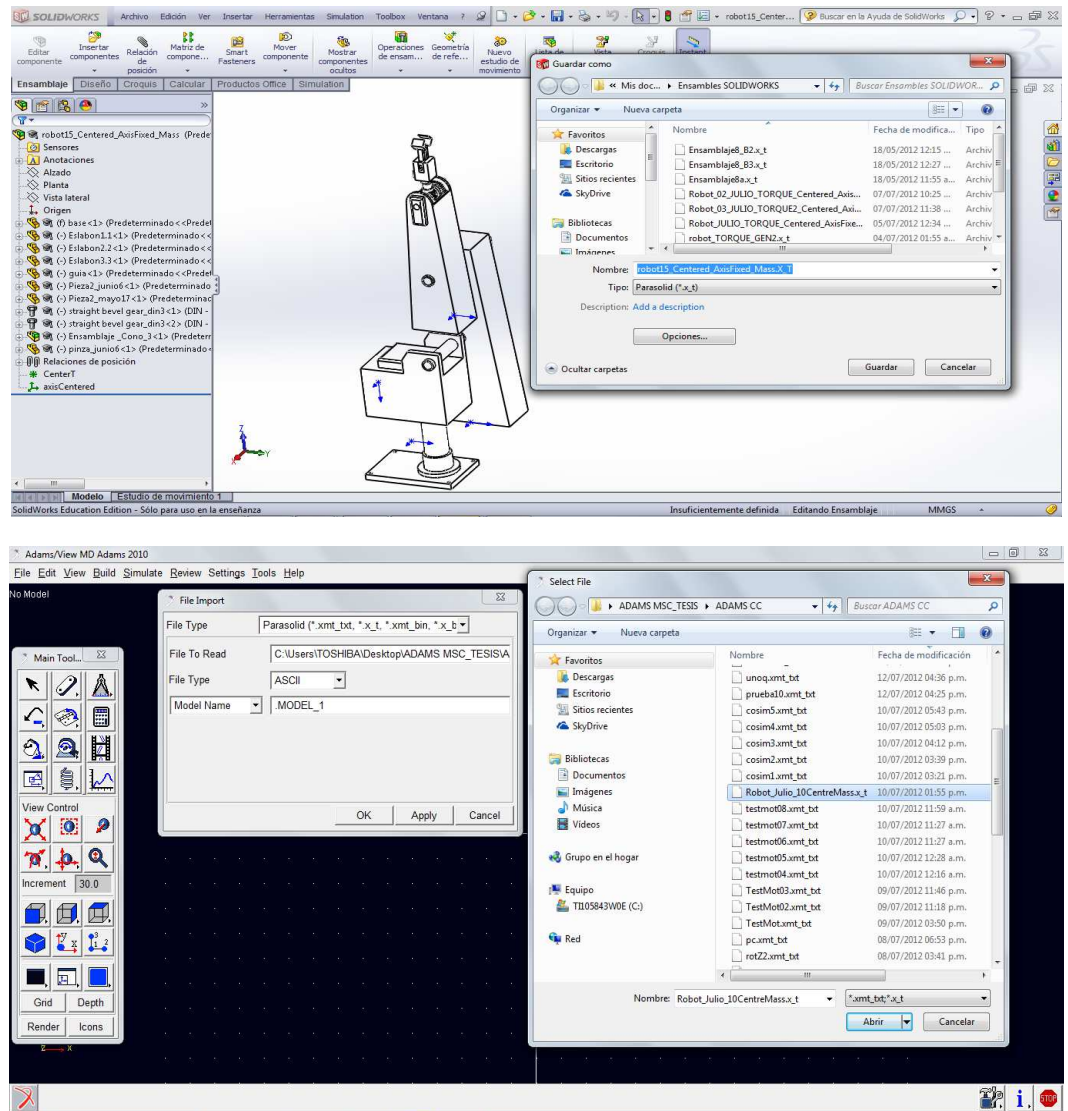


Figura 59. Proceso de Importación del robot Gryphon en ADAMS.

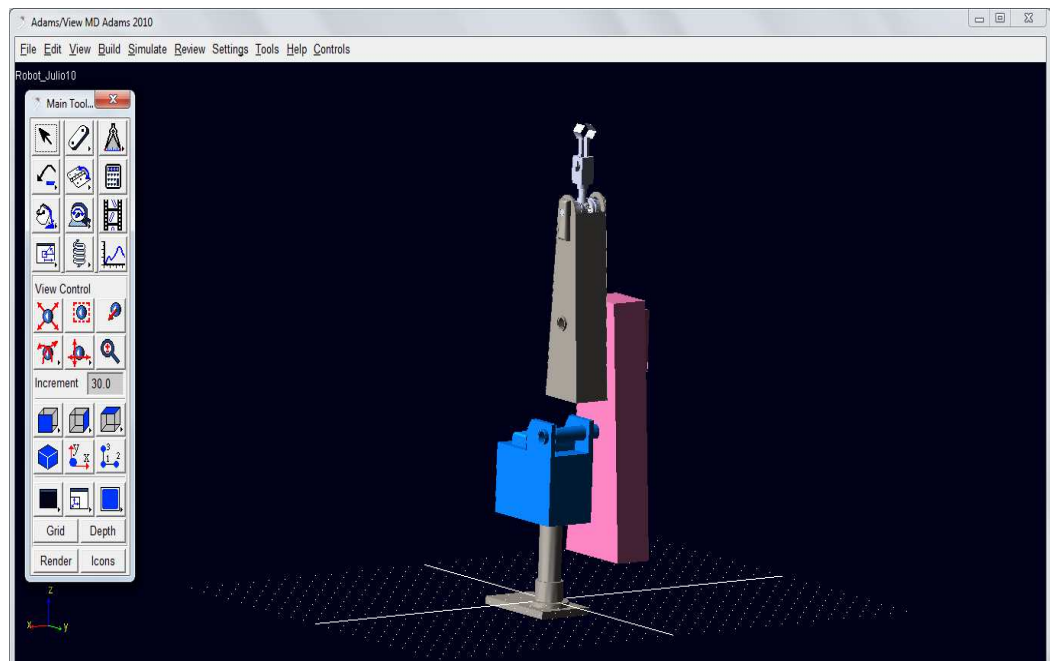


Figura 60. Modelo del robot Gryphon en ADAMS MSc.

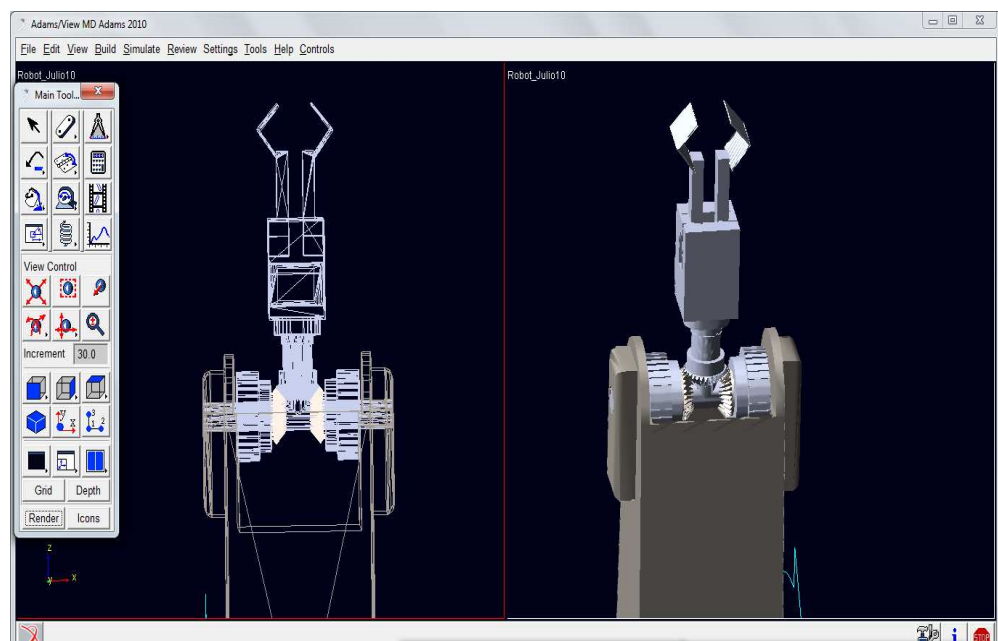


Figura 61. Sistema de Engranes y Pinza en ADAMS MSc.

7 MODELO DE CO-SIMULACIÓN Y ESTRATEGIAS DE CONTROL

7.1 CARACTERIZACIÓN Y SELECCIÓN COMERCIAL DEL MOTOR

Como primera etapa se desarrolla el circuito de caracterización del motor, seguidamente para la selección de los motores a usar en los tres eslabones, se propone un análisis de pares en distintos escenarios, los cuales, buscan encontrar la posición de máximo esfuerzo de todos los eslabones del robot, esto permitirá descubrir el máximo torque necesario por cada uno de ellos teniendo en cuenta una velocidad angular de 36 deg/seg.

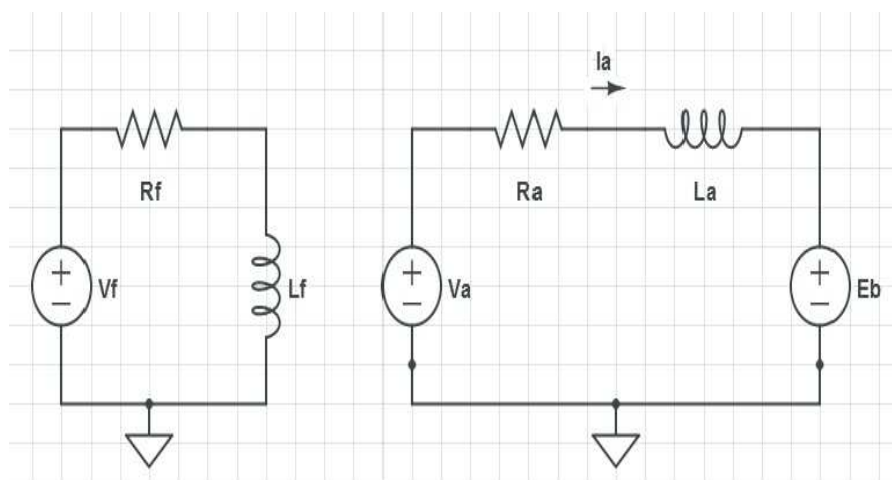


Figura 62. Circuito para Caracterización del Motor.

Aplicando las leyes de Kirchoff, obtenemos las ecuaciones del circuito, se aplica laplace para facilitar el desarrollo, ya que el objetivo es obtener la función de transferencia de caracterización del motor. Véase Figura 63.

$$\lambda e = \lambda m$$

$$Va(s) = RIa(s) + SLa(s) + Eb(s)$$

$$Ia(s) = \frac{Va(s) - Eb(s)}{R + SLa(s)}$$

$$\lambda e(s) = k_t Ia(s)$$

$$\lambda e(s) = k_t * \frac{Va(s) - Eb(s)}{R + SLa(s)}$$

$$Eb(t) = K_v \dot{q}(t) \quad Eb(s) = K_v SQ(s)$$

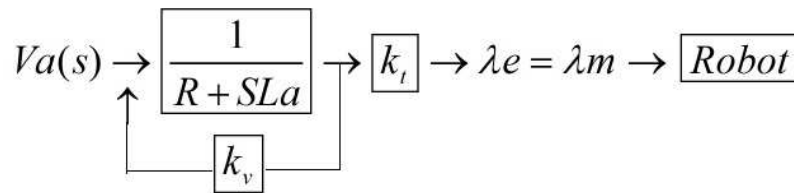


Figura 63. Función de Transferencia de Parámetros del Motor.

Donde:

λe = Torque electrico.

λm = Torque magnetico

$K = K_v = k_t$ = Constantes de Fuerza electromotriz

Va = Voltaje

Ra = Resistencia del motor

La = Inductancia del motor

7.1.1 Escenario 1

Para este escenario nos concentraremos en mover el eslabón 1 (Pieza azul) sobre la base, en una circunferencia de 180 grados Ver Figura 64.

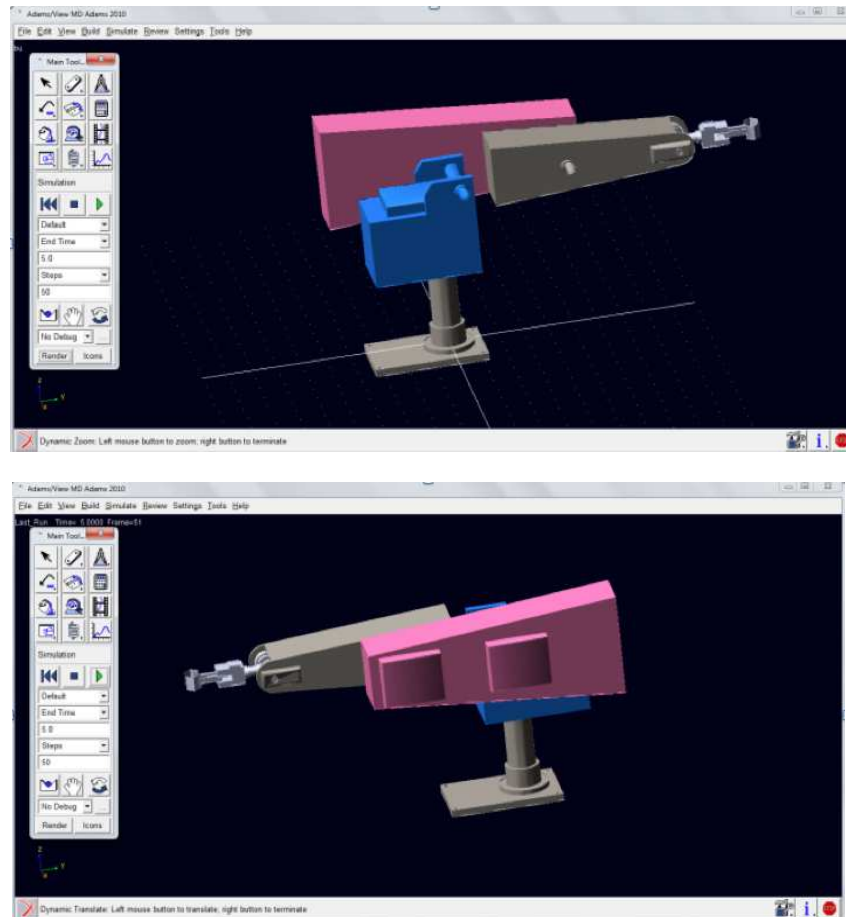


Figura 64. Escenario 1, posición inicial y final.

Configuramos en la articulación el motion correspondiente para 180 grados y obtenemos los resultados tanto de par para cada eslabón, así como su velocidad y posición angular ver Figura 65.

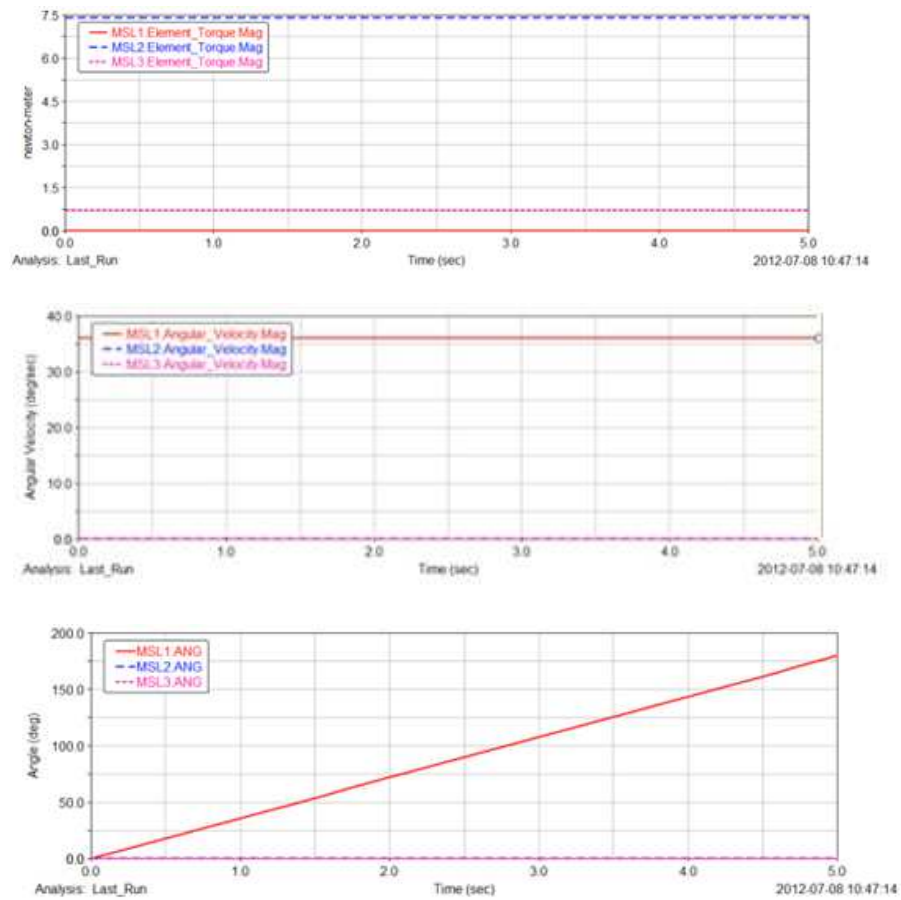


Figura 65. Escenario 1, Pares, Velocidad y Posición Angular Vs tiempo.

En la anterior figura se observa como las posiciones y velocidades de los eslabones no involucrados se conservan en valores próximos a cero, siguiendo lo esperado, en el caso del par del eslabón 2 se obtiene un máximo de 7.4Nm, ya que en él, recae el mayor esfuerzo para sostener el eslabón 3 y la pinza.

7.1.2 Escenario 2

Para este escenario eslabón 2 (Pieza Rosada), en un ángulo de 180 grados Ver Figura 66. Figura 66. Escenario 2, posición inicial y final.

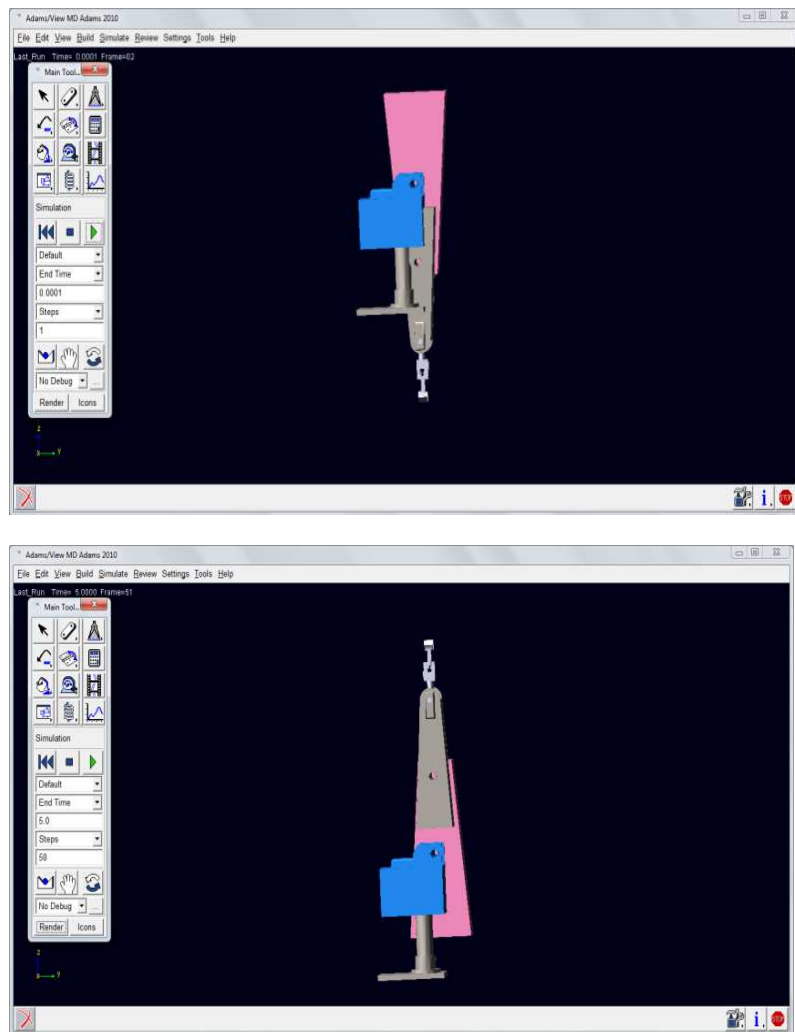


Figura 66. Escenario 2, posición inicial y final.

Realizando las respectivas simulaciones se obtienen resultados de los pares y velocidades respectivos a la posición inicial. Ver Figura 67.

Nota: En el escenario 2 la posición del robot en el prototipo real es físicamente imposible de ejecutar, pero ésta prueba se realizó con el fin de encontrar el torque máximo de la articulación.

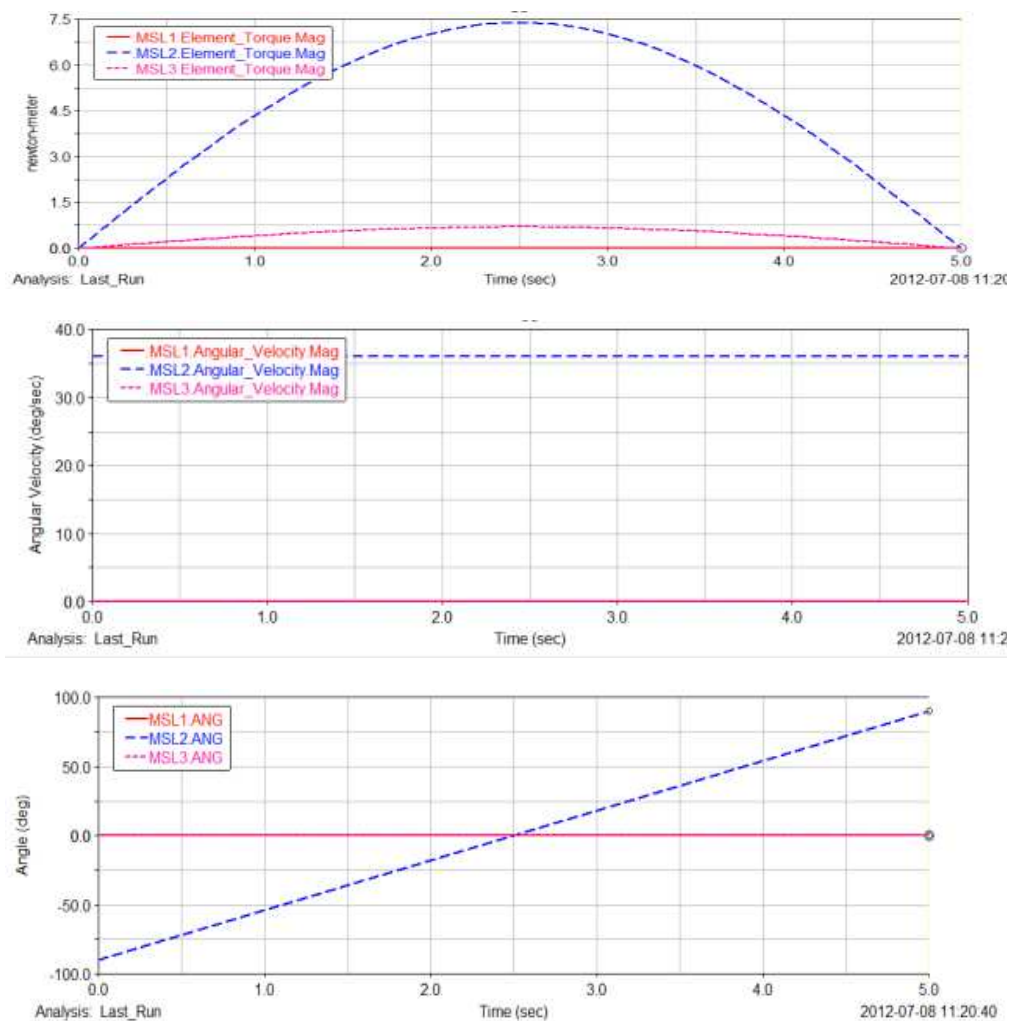


Figura 67. Escenario 2, Pares, Velocidad y Posición Angular Vs Tiempo.

7.1.3 Escenario 3

En éste escenario el eslabón 2 (Pieza Rosada), está ubicado en un ángulo de 90 grados, el eslabón 3 (pieza gris) en un ángulo de 90 grados. Véase Figura 68.

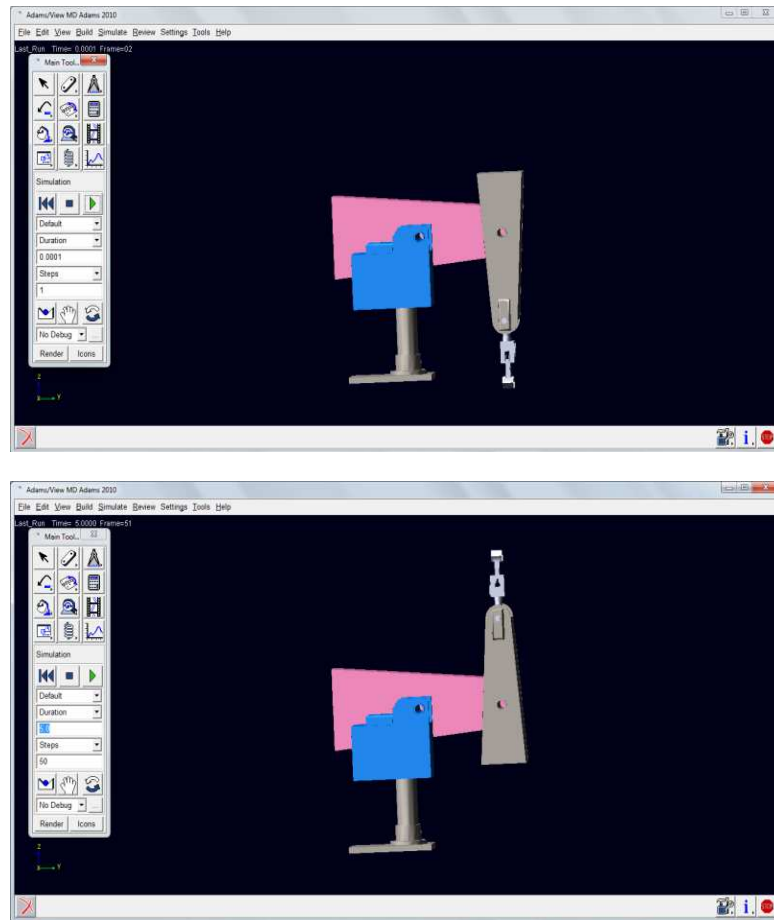


Figura 68. Escenario 3, posición inicial y final.

Se obtienen los resultados de los pares, velocidades y posición de la simulación, éstos se muestran en las graficas a continuación, VerFigura 69. Escenario 3, Pares, Velocidad y Posición Angular Vs tiempo.Figura 69.

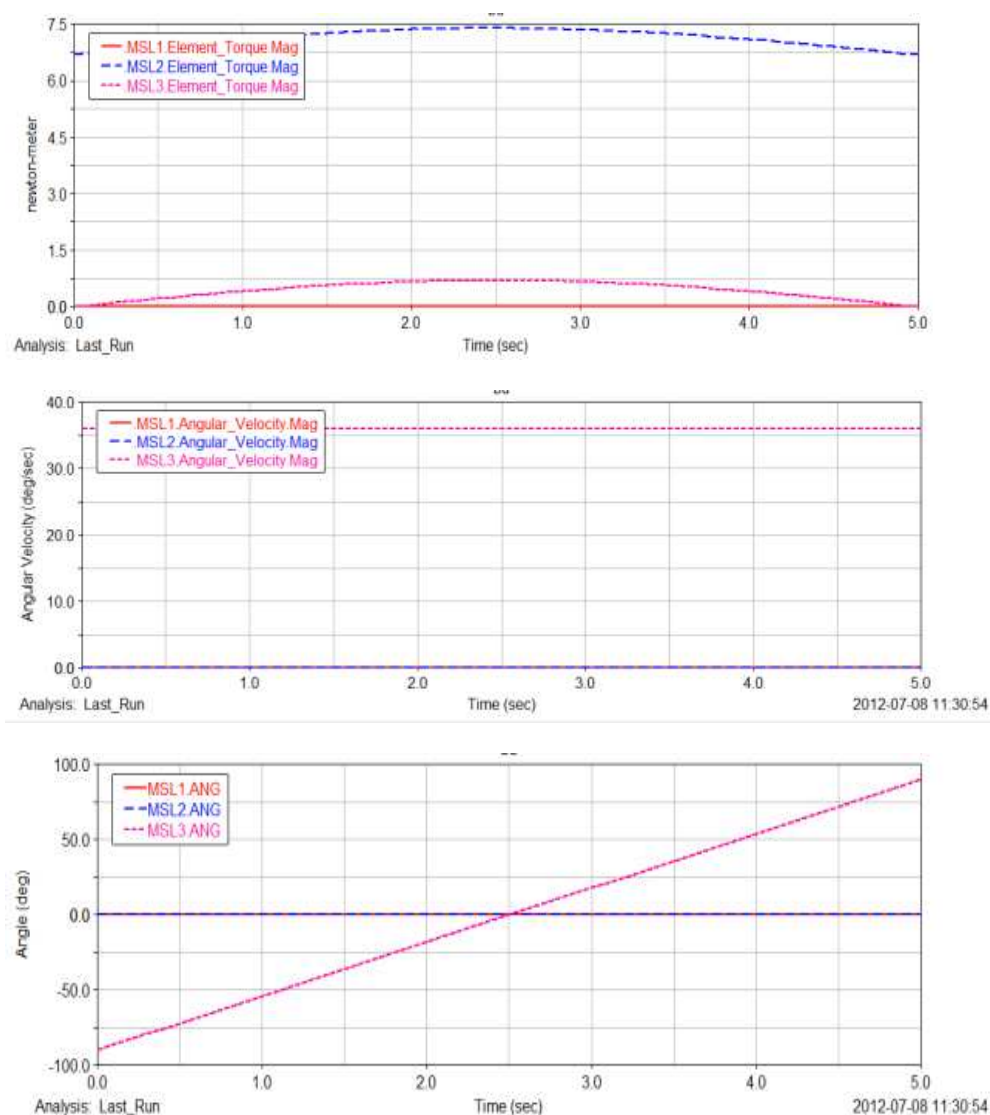


Figura 69. Escenario 3, Pares, Velocidad y Posición Angular Vs tiempo.

Gracias a los resultados obtenidos, se establece el par máximo generado por cada articulación, (véase Tabla 9) con éstos parámetros se eligen los respectivos motores necesarios para mover cada eslabón. A través de la página web de specamotor se ingresan las especificaciones y éste ofrece una alta variedad de motores.

Se seleccionaron motores de marca *Electric Motor* plus adecuados para el mejor desempeño en el cada eslabón. En la Tabla 10 se muestran las especificaciones correspondientes a cada motor.

ARTICULACION	POSICION INICIAL (GRADOS)	POSICION FINAL (GRADOS)	PAR Max. (Nm)
q1,q2,q3	0, 90, 0	180. 90, 0	7.2
q1,q2,q3	0,-180,0	0,0,0	7.4
q1,q2,q3	0,90,-90	0 0, 180	7.5

Tabla 9. Posición y Pares Máximos de articulaciones

	Par_max [Nm]	R [Ω]	L [H]	k [Vs/rad or Nm/A]	Referencia
SL1	0,35	31,4	6,61E-04	8,18E-03	RE-13-118547 Electric Motor plus GP 13 A-1/1119
SL2	10	10,5	9,40E-04	4,68E-02	Serie 3557 024 C Electric Motor plus 38/2 S-1:592
SL3	0,7	193	8,00E-03	4,59E-02	Serie 2230 040 S Electric Motor plus 23/1-1:989

Tabla 10. Características Generales Motores

A continuación se presenta el diagrama de bloques del un motor DC, como descripción esquemática interna de su funcionamiento. Ver Figura 70

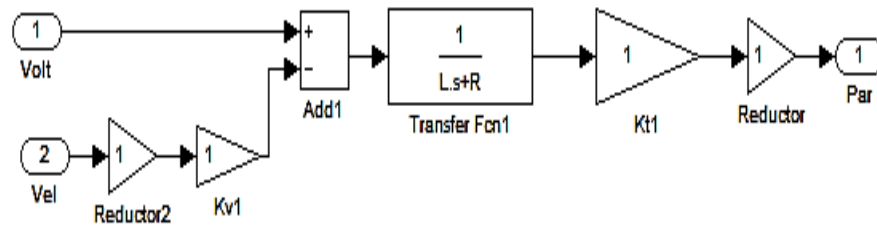


Figura 70. Diagrama de Bloques de un Motor DC

7.2 MODELO DE CO-SIMULACION ADAMS/MATLAB

La Co-Simulación entre los dos paquetes de computación ADAMS Msc y MATLAB, se hace posible gracias a una herramienta llamada ADAMS/Controls, ofreciendo la comunicación entre los dos programas informáticos. Vease Figura 71. Ésta herramienta es encargada de enlazar en forma simultánea el modelo de simulación desarrollado en ADAMS y la estrategia de control implementada en MATLAB, dicha relación donde los dos programas ejecutan la simulación en un tiempo preestablecido se denomina Co-Simulación. Una de las grandes ventajas de la Co-Simulación es la cooperación de aplicaciones informáticas con respecto a las falencias producidas por alguna de ellas en circunstancias específicas.

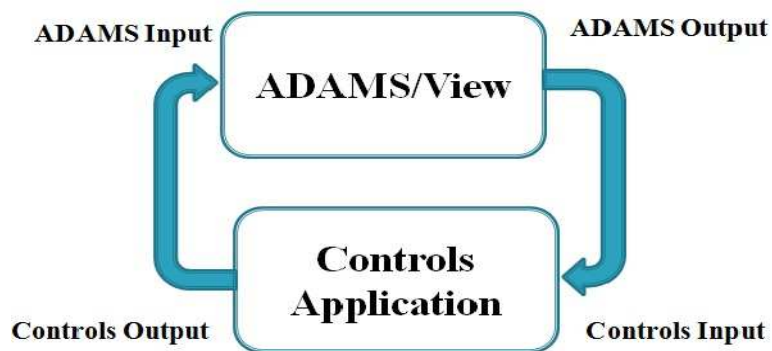


Figura 71. ADAMS/Controls

A continuación se mostrará el modelo del robot Gryphon, teniendo en cuenta las aplicaciones ADAMS View/Controls. Como primera etapa se trabajo en el espacio de trabajo de ADAMS/View. Se importo el modelo del robot Gryphon. Una vez se tiene el manipulador importado en el software ADAMS se procede a introducir el movimiento a las articulaciones. Como primera etapa se agrega un Joint en cada articulación, éste se comporta como una bisagra entre los eslabones permitiendo el movimiento, además indicando el sentido de orientación en el cual se desea que gire el eslabón. En la Figura 72 se muestra la configuración del Joint SL2.

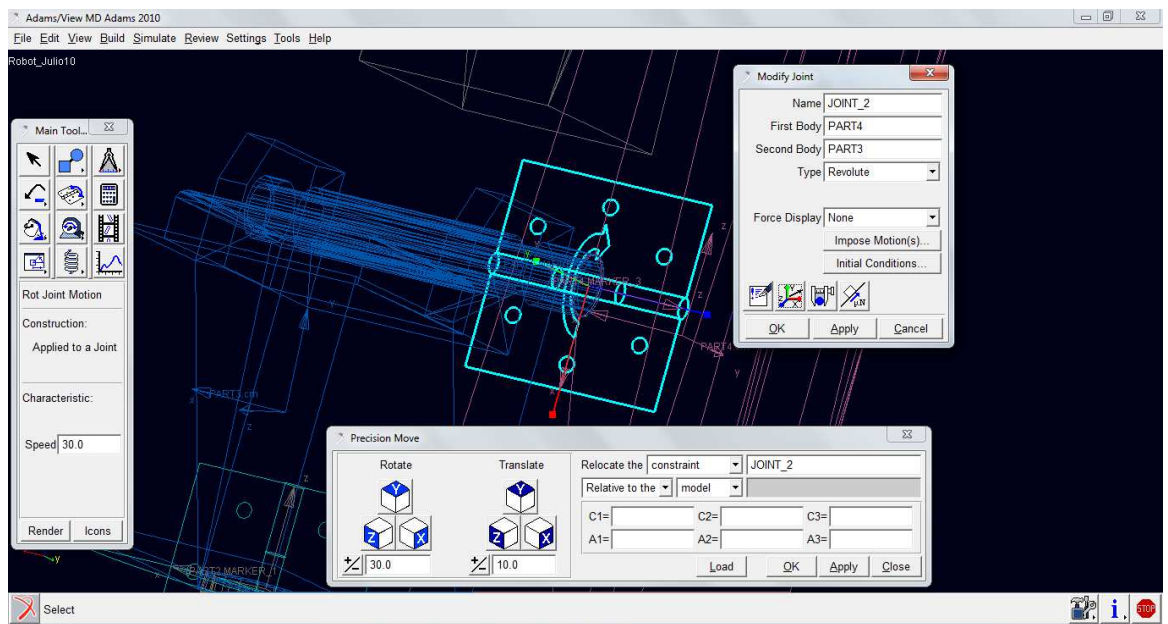


Figura 72. Configuración del Joint.

En la siguiente etapa se configura el movimiento de la articulación a través de la herramienta Motion, en el cual ingresamos los grados que se desea mover el eslabón. Véase la Figura 73.

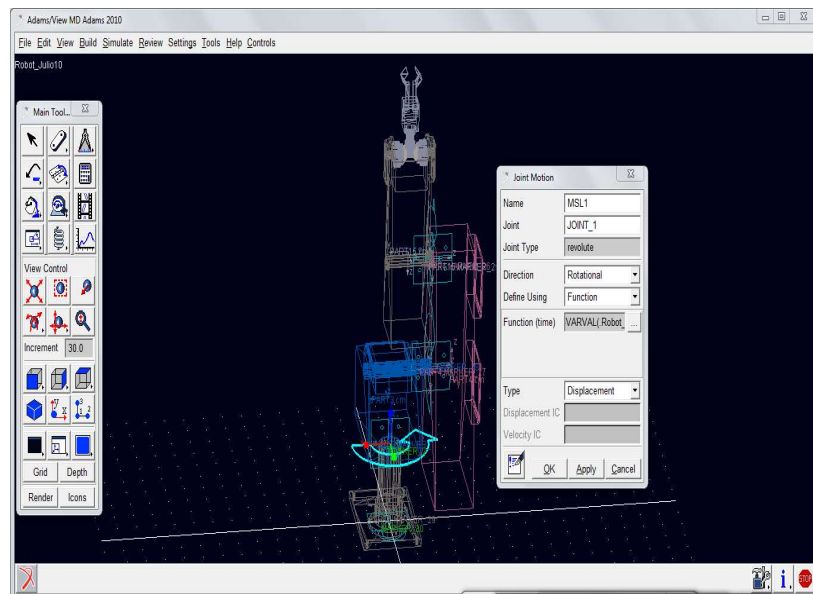


Figura 73. Configuración del Motion.

De esta manera cada articulación se define para ejercer movimiento, ingresando la orientación espacial que el desarrollador desee. En la Figura 74 se observa el robot GRYPHON con la correspondiente configuración de eslabones.

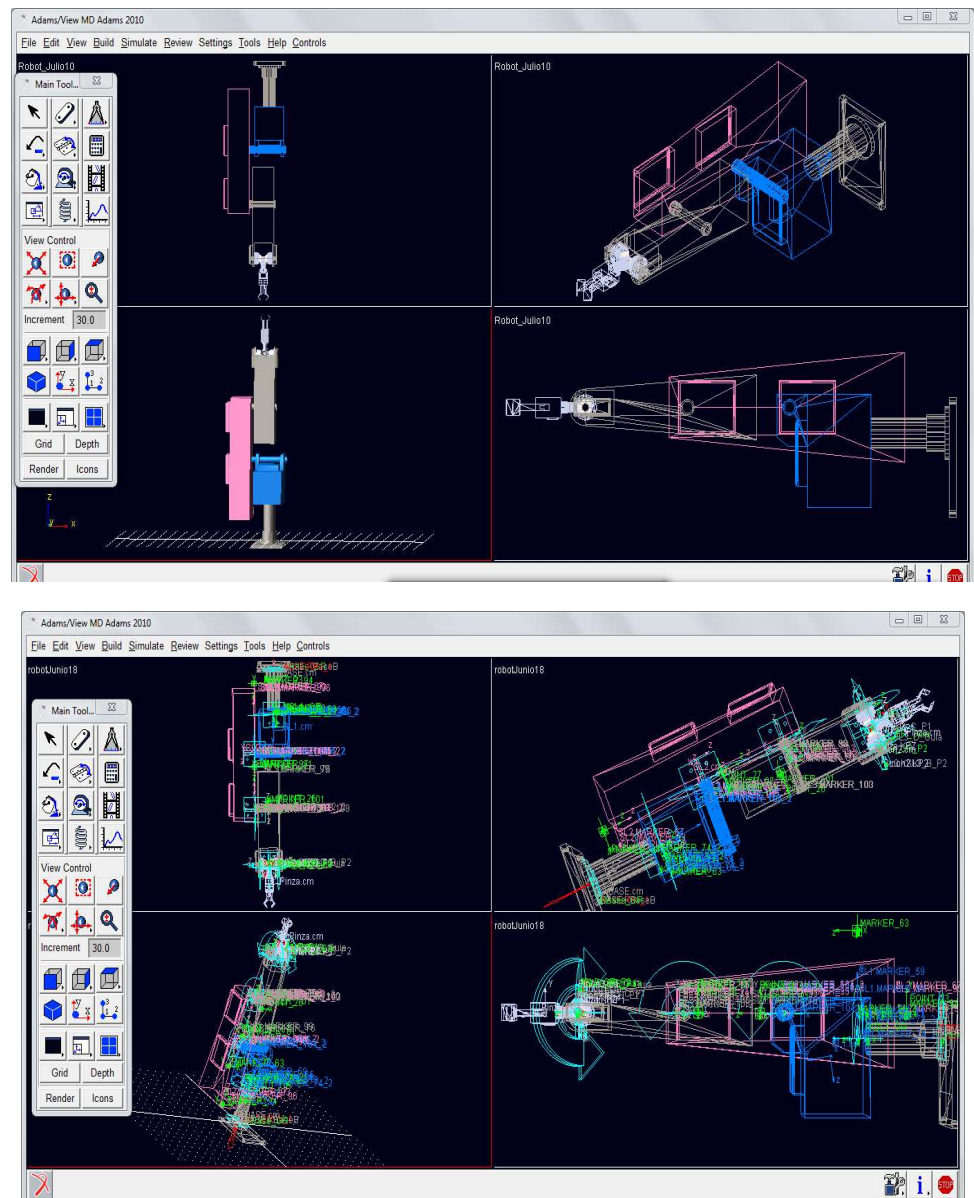


Figura 74. Configuración de Articulaciones del Robot GRYPHON.

7.2.1 Prueba 1

En la prueba 1 se muestra el comportamiento y funcionamiento del robot GRYPHON, mediante la Co-Simulación ADAMS/MATLAB. Se establecen

Posiciones de entrada y se verifica que la planta del sistema genere las posiciones de salida idénticas.

Como primera etapa se denominan posiciones angulares para cada articulación de 90 grados ($\pi/2=1.57$ rad) y se hacen la respectiva simulación en el software ADAMS MSc. Ver Figura 75.

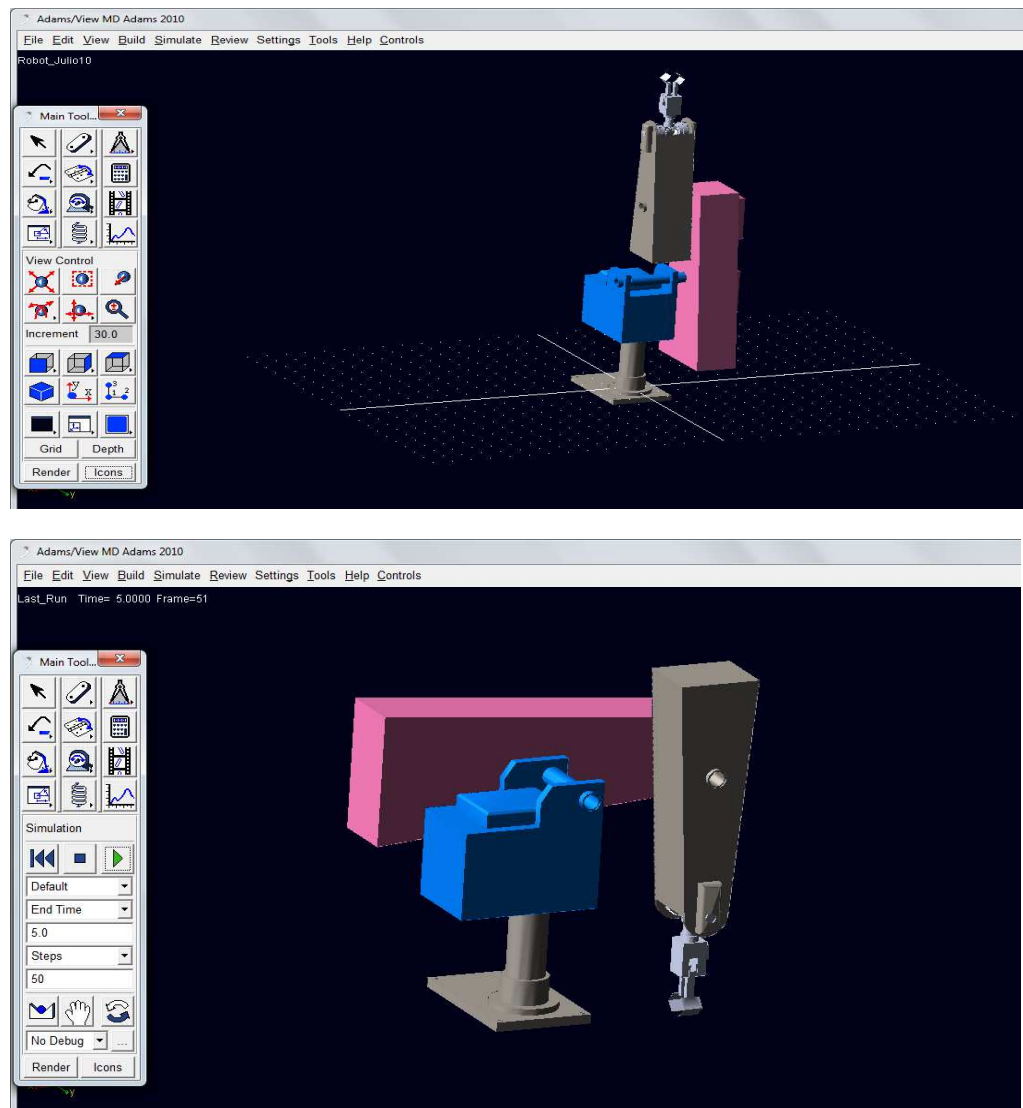


Figura 75. Simulacion1, Posición inicial y Final.

El PostProcessor es una herramienta en la cual podemos visualizar resultados gráficos las simulaciones realizadas. Ver Figura 76.

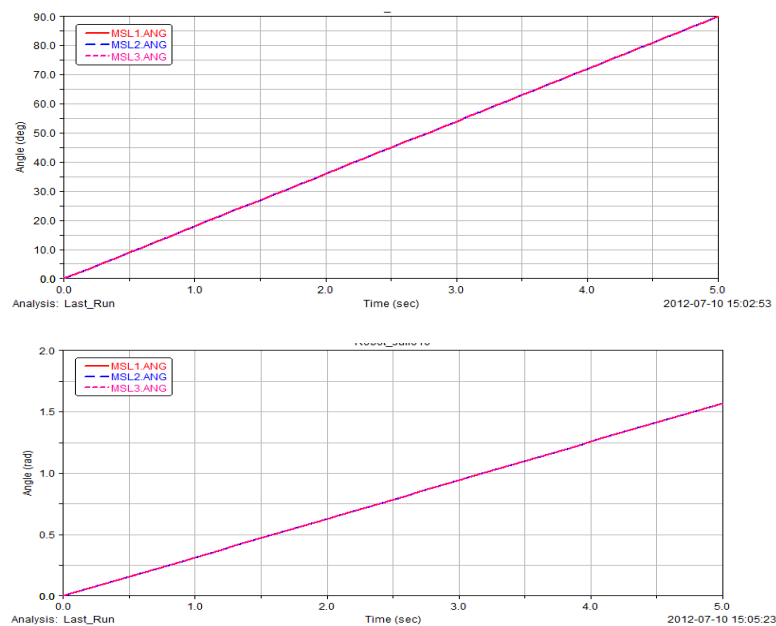


Figura 76. Simulación1 Posición (Grados-Rad.)

Se crean las variables de entrada q_1, q_2, q_3 (por cada articulación) y las variables de salida del sistema y_1, y_2, y_3 ver Figura 77. Creación de Variables.



Figura 77. Creación de Variables.

Seguidamente se realiza la asignación de las variables de entrada a las articulaciones MSL1,MSL2,MSL3; esto se logra gracias a un comando de ADAMS denominado VARVAL(x). VerFigura 78.

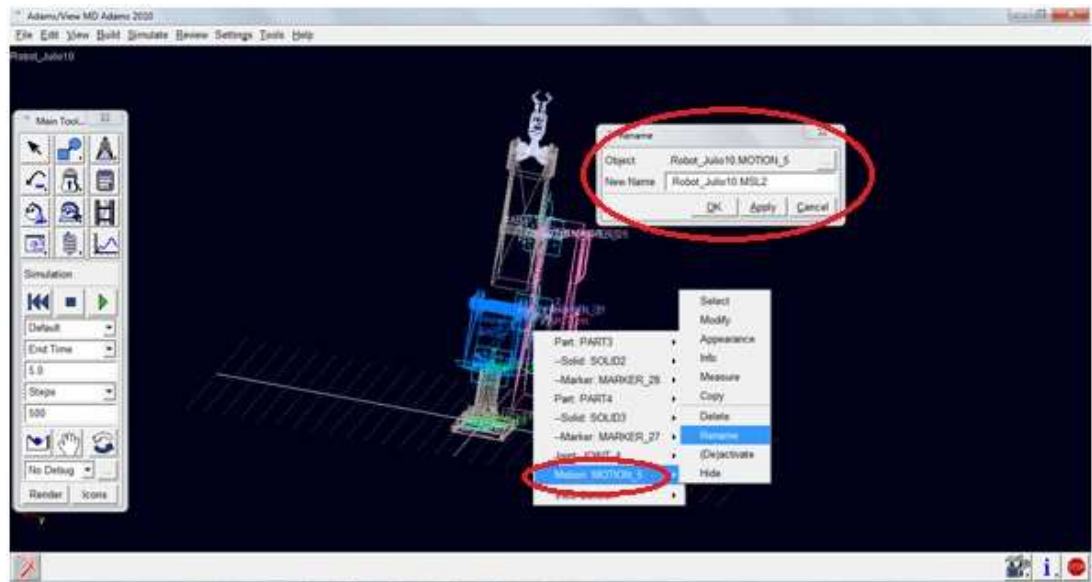


Figura 78. Asignación de Variables de Entrada.

Gracias a la función F5 de ADAMS MSc. Despliega una ventana que muestra el grafo de escena del prototipo, con el cual se puede observar las variables de salida y designarlas respectivamente como se muestra en la Figura 79.

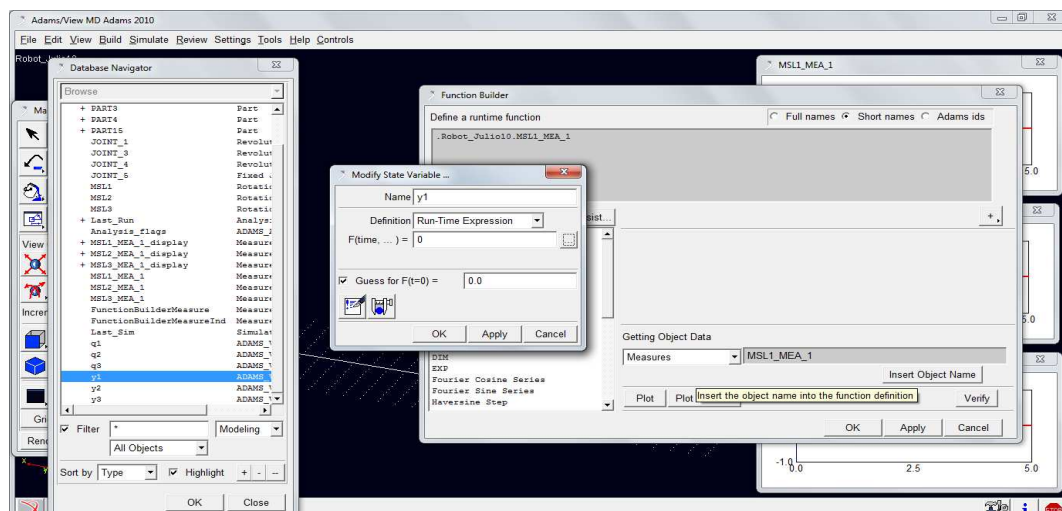


Figura 79. Asignación de Variables de Salida.

Se habilita la comunicación entre los dos programas informáticos ADAMS/MATLAB; **Error! No se encuentra el origen de la referencia..** Seguidamente se despliega una ventana donde: se denomina la planta que se desea exportar, se llaman las variables de entrada y salida, se autoriza el software MATLAB. Ver Figura 80.

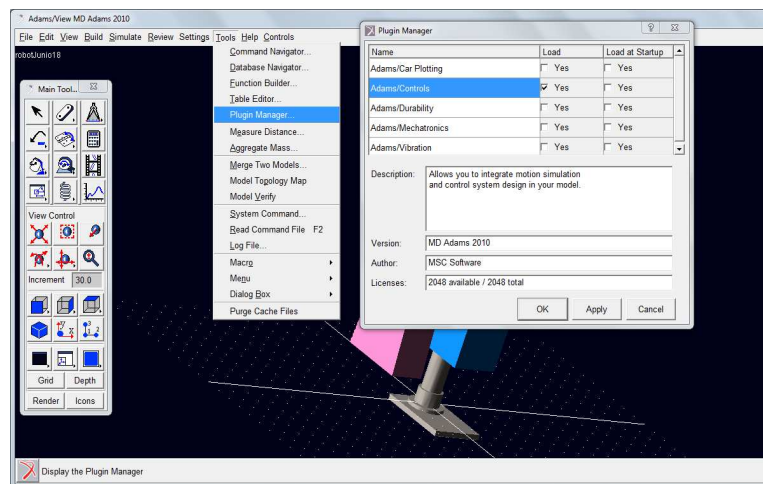


Figura 80. Herramienta ADAMS/Controls.

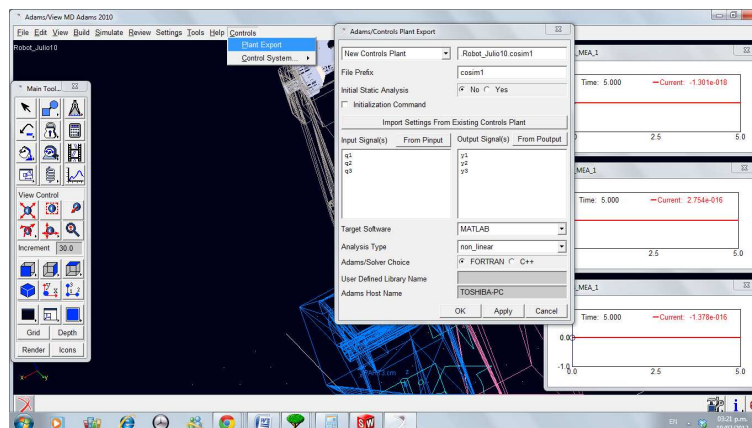


Figura 81. Controls/PlantExport.

En el entorno de MATLAB se genera un subsistema, éste bloque de color naranja llamado: Adams_sub representa al modelo virtual del robot en Adams/view, los datos de variables de entrada/salida, además de las características en general del prototipo. En laFigura 82 se muestra la planta.

Seguidamente se implementa un sistema de bloques con las entradas angulares al sistema, con la herramienta Simulink de MATLAB. Se realiza la simulación, para este caso con un tiempo de 5 segundos. En la Figura 83 Se puede observar las graficas de respuesta del sistema.

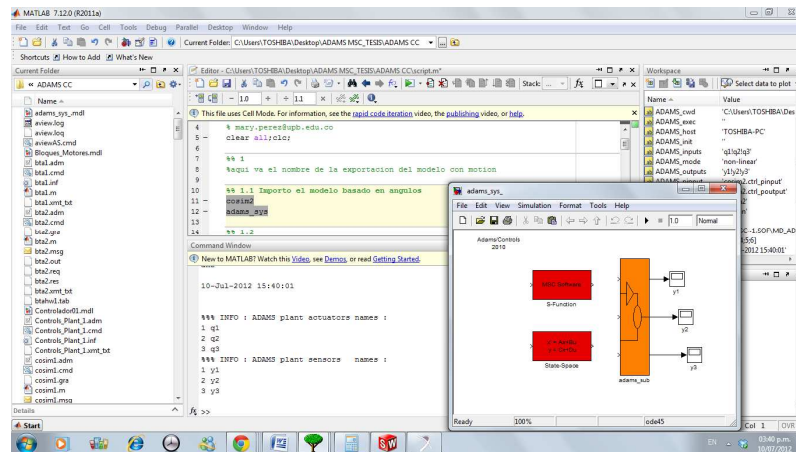


Figura 82. Workspace de MATLAB Adams_Sub.

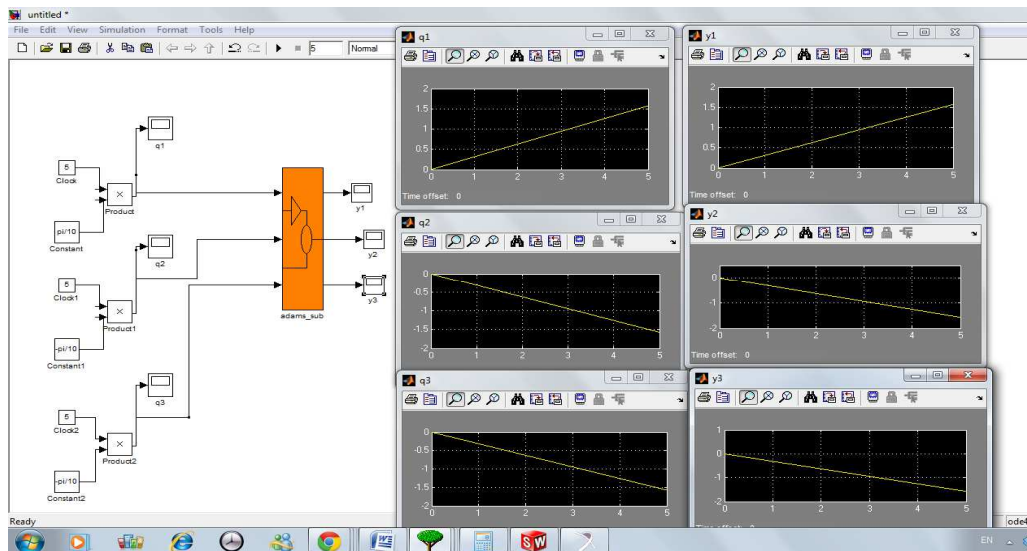


Figura 83. Diagrama de Bloques en Simulink.

Se importan los resultados aPostProcessor de ADAMS, para verificar que la Co-Simulación entre los dos programas informáticos (Ver Figura 84). Las graficas de

las posiciones angulares se muestran en la Figura 85. Demostrando que la Co-Simulación del Robot GRYPHON en la prueba 1. Adams ofrece al usuario una alta variedad de adquisición de datos, como ejemplo se halló la velocidad angular del sistema simulado. Ver Figura 85.

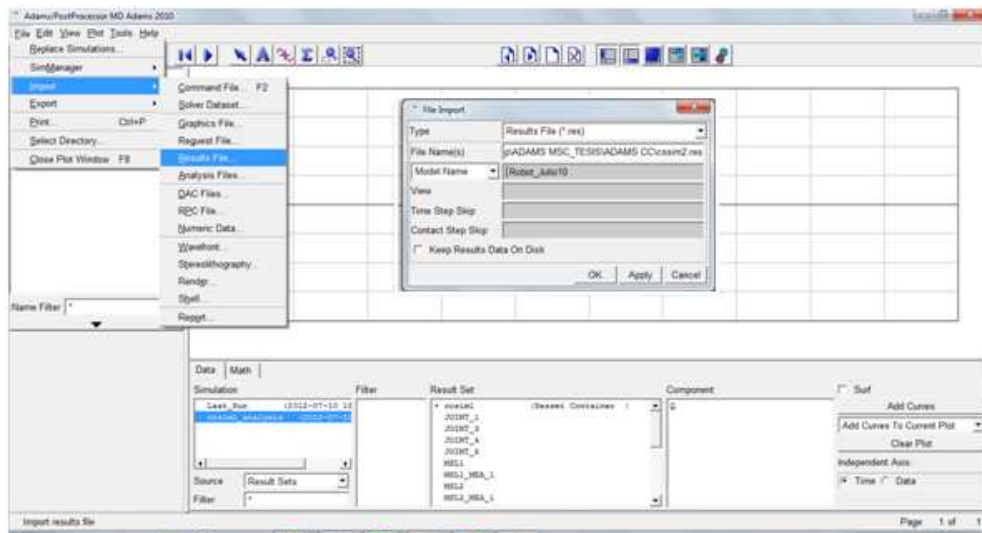


Figura 84. Importación de Resultados PostProcessor.

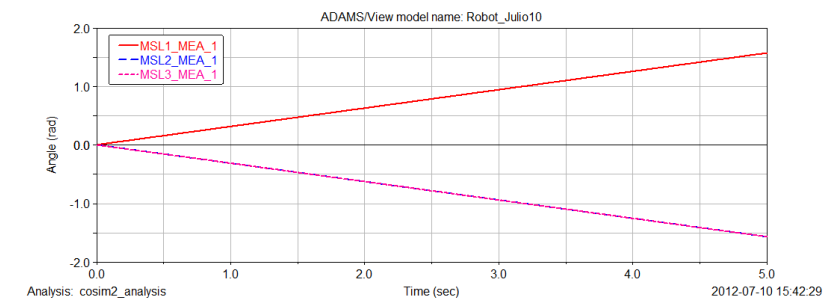


Figura 85. Posiciones Angulares Vs Tiempo.

En la Figura 86 se observa la velocidad angular de cada articulación. Como resultados de la prueba 1 se demostró la comunicación de los dos programas informáticos, llamada Co-Simulación. Y así finalmente comprobamos el funcionamiento de la planta, abriendo las posibilidades de implementar estrategias de control para el posicionamiento del robot Gryphon.

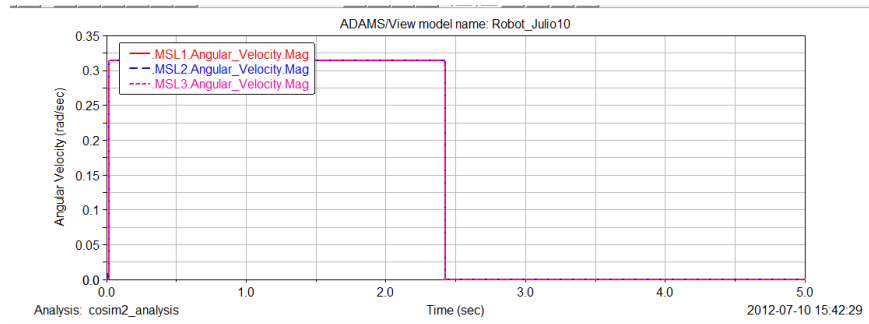


Figura 86. Velocidad Angular Vs Tiempo.

8 PRUEBAS Y RESULTADOS OBTENIDOS

El siguiente capítulo tratará la parte del análisis de los datos obtenidos, al ejecutar la Co-Simulación ADAMS/MATLAB y el desarrollo de estrategias de control de posición para el robot Gryphon. Se implemento un control proporcional derivativo con realimentación de velocidad (véase Figura 87), el cual se encarga de reducir el sobre pico y el tiempo de estabilización, incrementando la estabilidad del sistema mejorando la respuesta en algunos casos. El la figura 88 se describe mediante un diagrama de bloques el proceso de las pruebas.

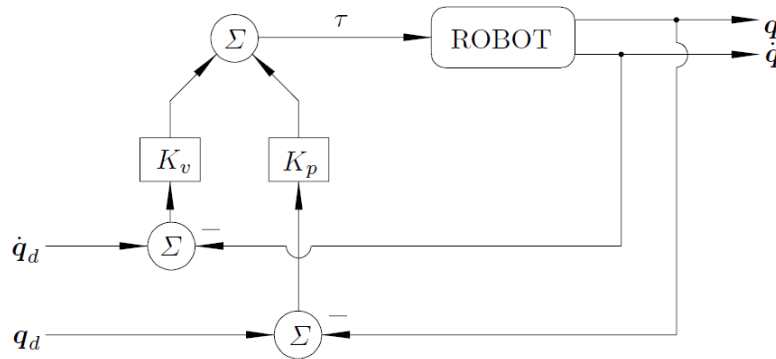


Figura 87. Control PD con Realimentación de Velocidad.

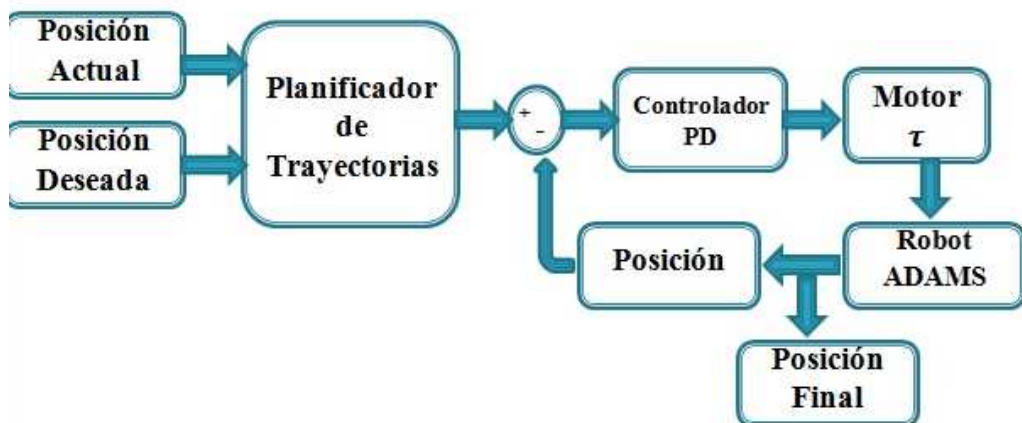


Figura 88. Proceso de Pruebas.

En cada articulación se implementará un control tipo PD independiente para cada motor, el cual permite obtener resultados adecuados para la aplicación desarrollada en este trabajo de grado. El objetivo de este controlador es que sea único para cualquier posición debido a su no linealidad. Dependiendo de la sintonización se logra un movimiento suave y muy parejo con la trayectoria deseada.

En el software ADAMS se modifican las entradas del sistema, es decir ahora el modelo se acciona con entradas par (Véase Figura 89). Debido a que el robot Gryphon cuenta con tres articulaciones, operadas por motores DC. La orientación de giro de los motores, es formada por el sentido de la corriente promedio que los alimenta, la velocidad y el torque son establecidos por el voltaje.

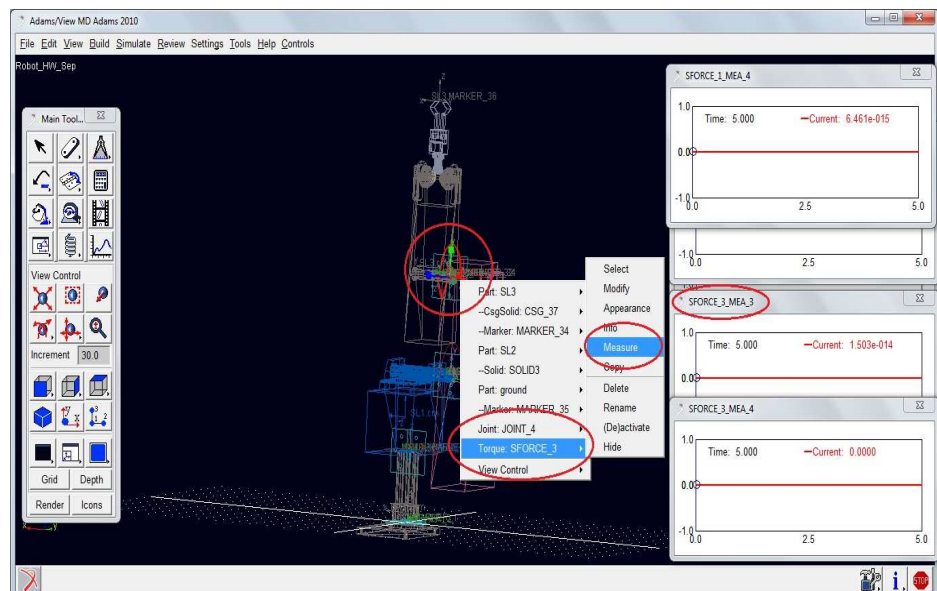


Figura 89. SFORCE en Cada Articulación.

Inicialmente se intentará sintonizar cada motor, seguidamente cuando el control del par se encuentre activado gracias a la Co-Simulación, se censará en todo momento las posiciones de articulaciones, teniendo en cuenta las limitaciones del espacio de trabajo. En la figura 89 se observa la sintonización para el eslabón 1. Para comprobar el funcionamiento del mismo, se ordeno al eslabón1 ir a la posición deseada 45° en 0.85 segundos como se muestra en la Figura 90.

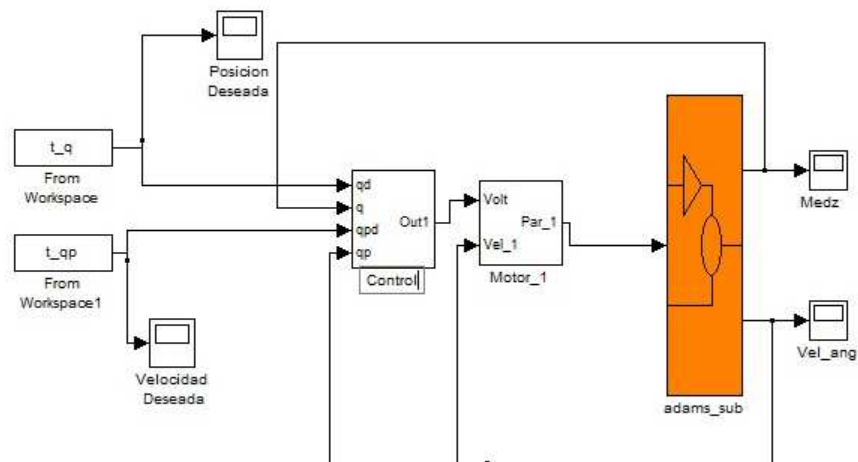


Figura 90. Sintonización del Controlador PD para la articulación 1.

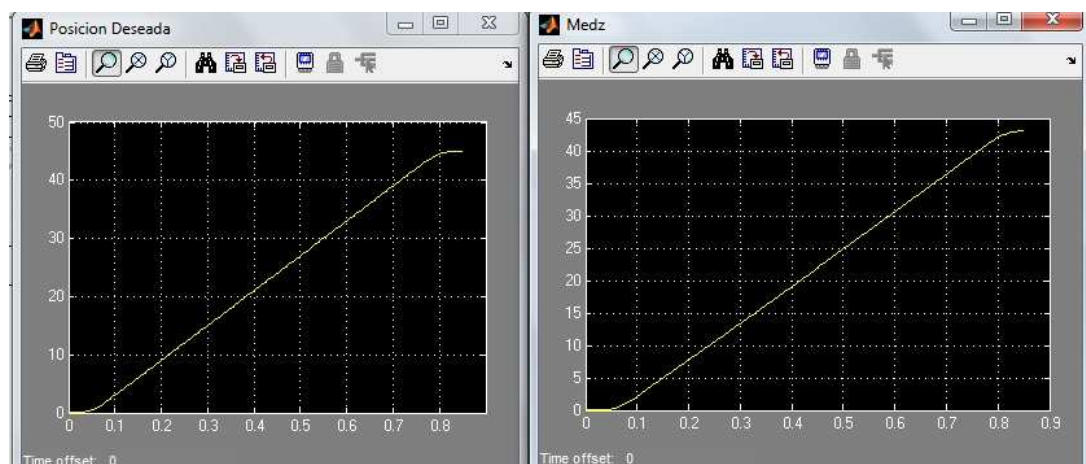


Figura 91. Prueba de Eslabon1 qd=45° en MATLAB.

En la Figura 92 se muestran el comportamiento del sistema, verificando la Co-Simulación ADMAS/MATLAB y el correcto funcionamiento del controlador. En el seguimiento de la grafica se observa su no linealidad, tiene forma de s, lo cual es debido a la función del planificador de trayectorias, ya que se pretende que el motor no arranque abruptamente.

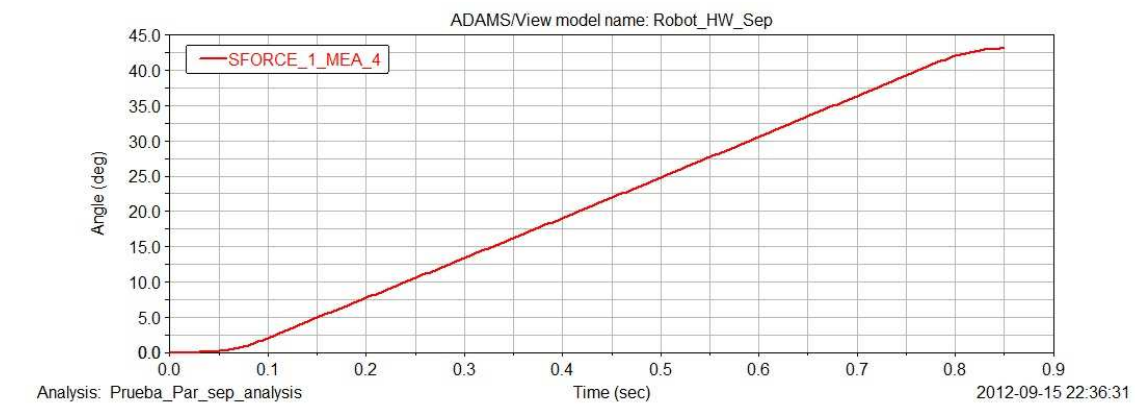


Figura 92. Posición q1 en ADAMS.

Gracias a la respuesta del sistema a continuación se establece el control para las tres articulaciones, como primera etapa se carga la planta del robot a MATLAB (Véase Figura 93) seguidamente de implementar el controlador. Véase Figura 94.

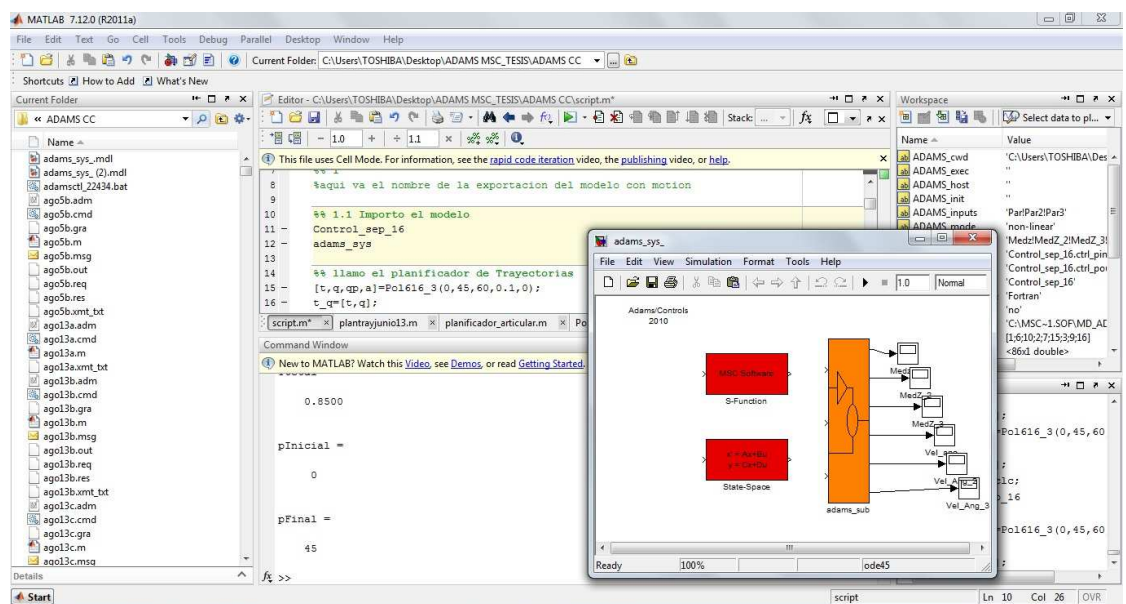


Figura 93. Planta del Robot en MATLAB

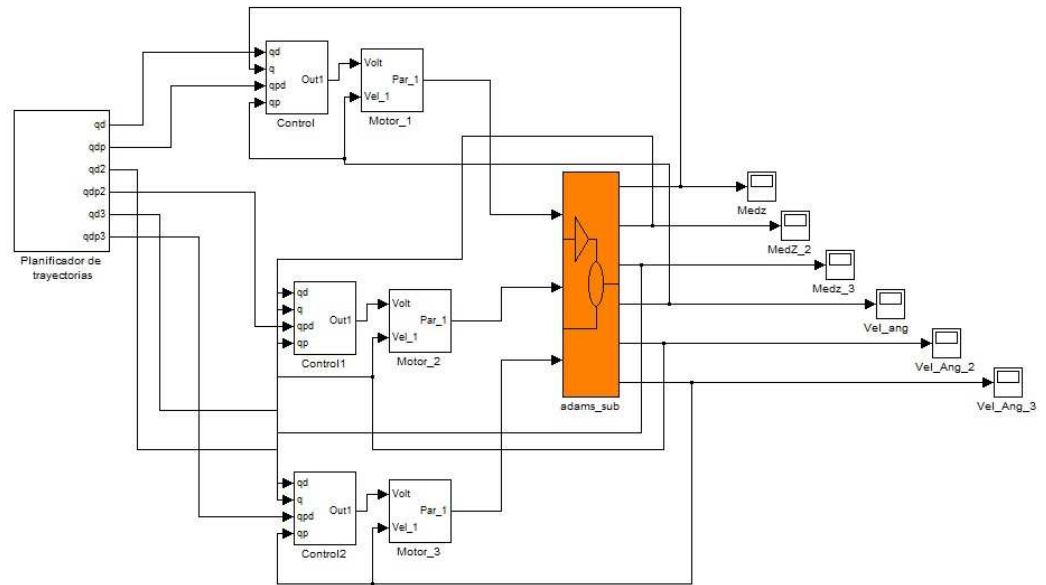


Figura 94. Controlador PD en MATLAB/Simulink.

8.1 Prueba 1

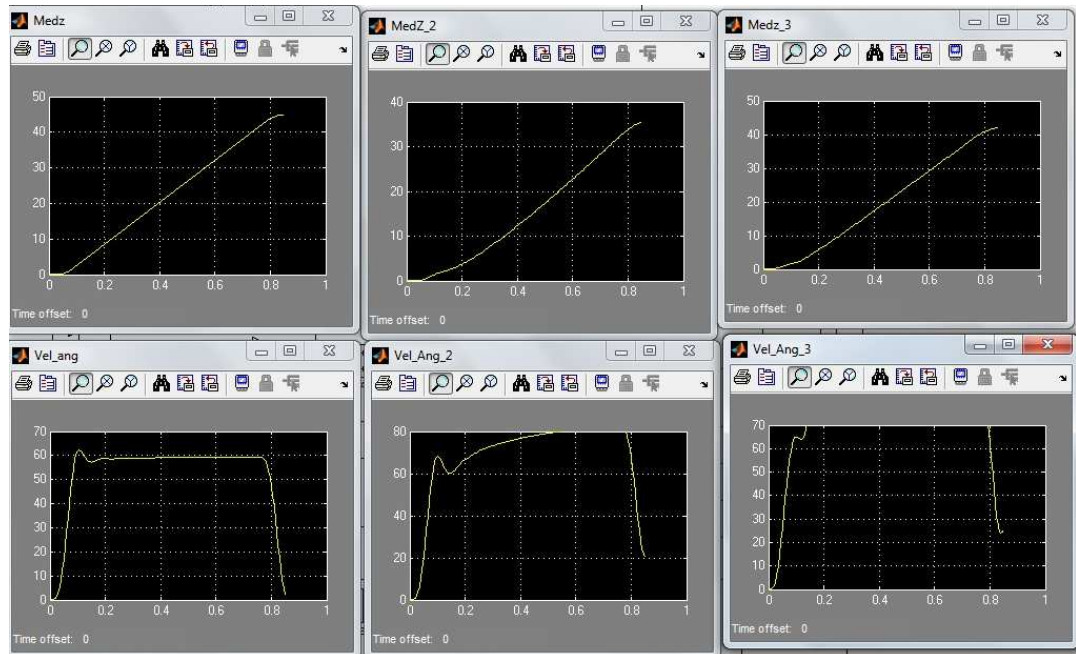


Figura 95. Prueba 1, Posicion deseada y Velocidad Angular Vs Tiempo MATLAB.

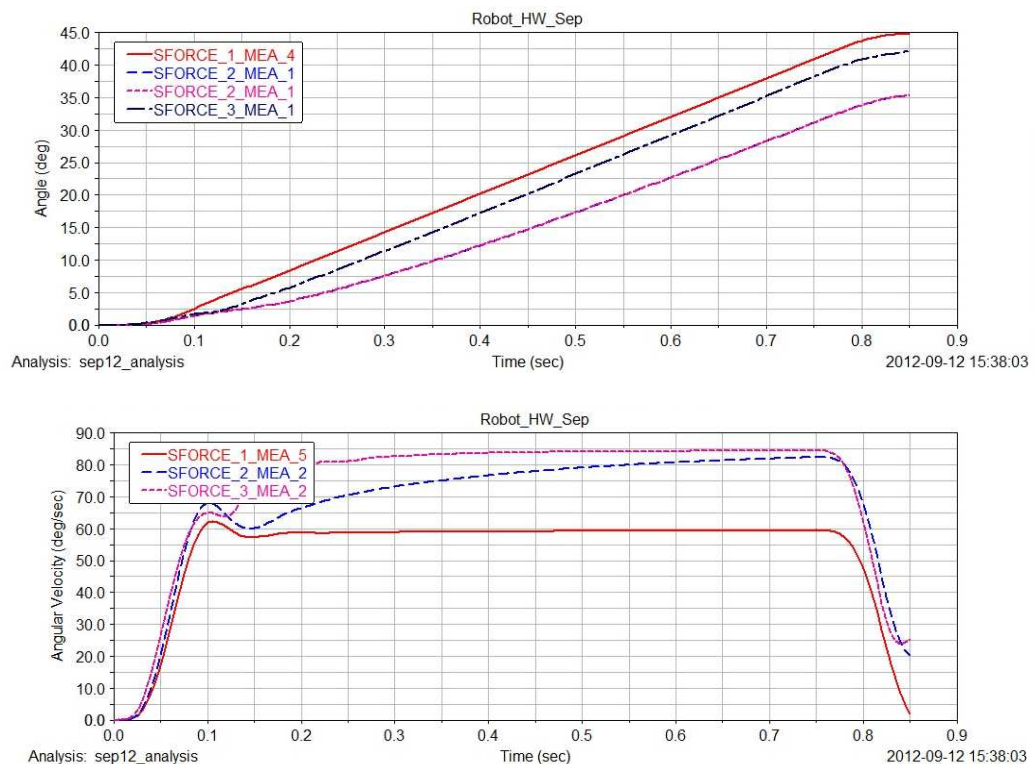


Figura 96. Posición y Velocidad Angular Vs Tiempo ADAMS.

En grafica anterior se puede apreciar, la respuesta obtenida de la velocidad presenta un sobre pico, menor al 10% por lo cual se pueden asumir los valores considerables.

ADAMS cuenta con una herramienta llamada LoadAnimation, la cual se encuentra en el PostProcessor de análisis de resultados, ésta animación muestra el movimiento ejercido por el robot durante la simulación. Además permite a través de un marker, visualizar el recorrido generado por el manipulador en cualquier punto deseado. En el robot Gryphon se colocó en el efector final ó también llamado pinza. La aplicación se muestra en la Figura 97.

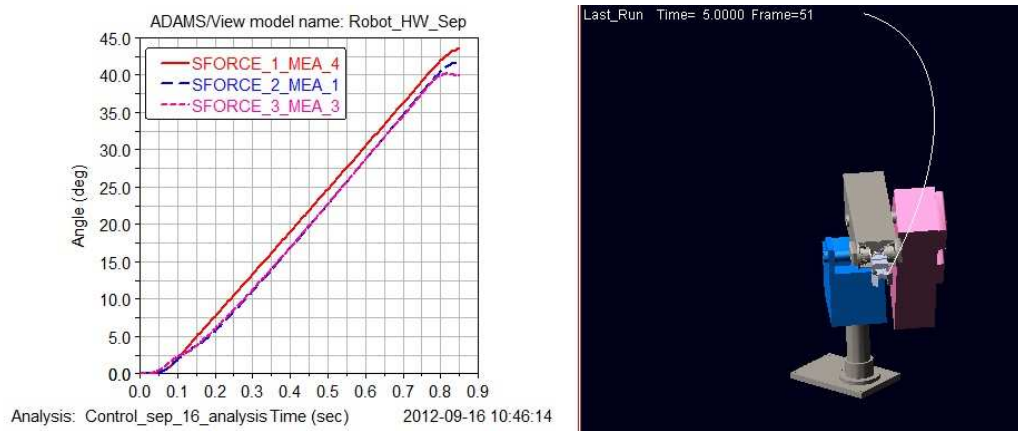


Figura 97. Recorrido de la Posición deseada ADAMS.

8.2 Prueba 2

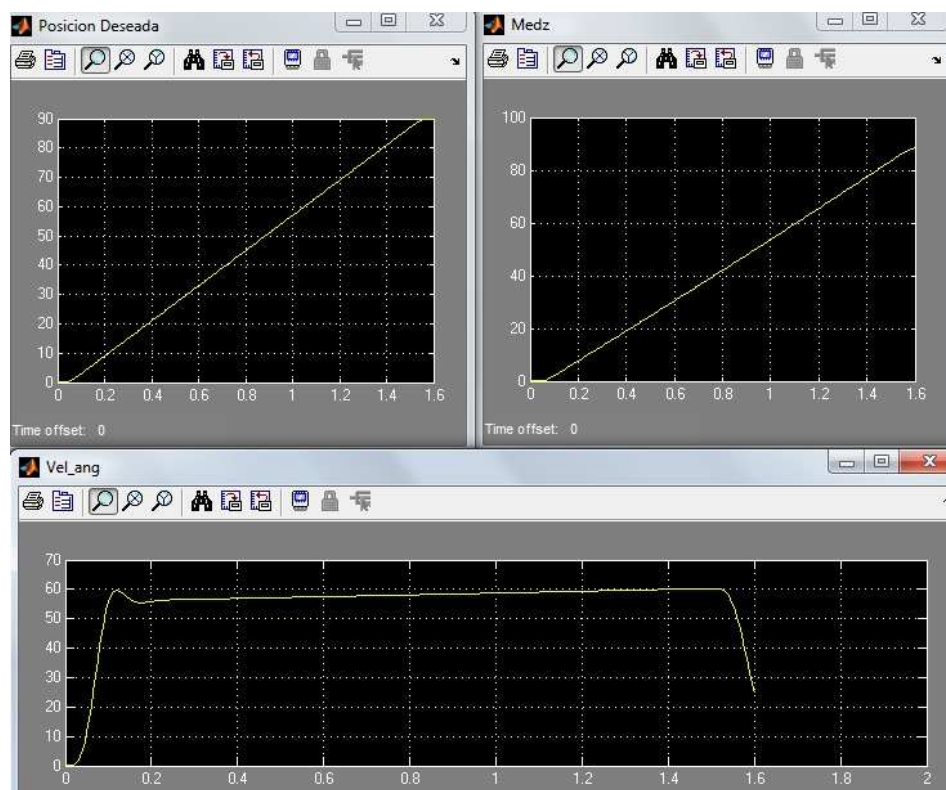


Figura 98. Prueba 2, Posicion deseada y Velocidad Angular Vs Tiempo MATLAB.

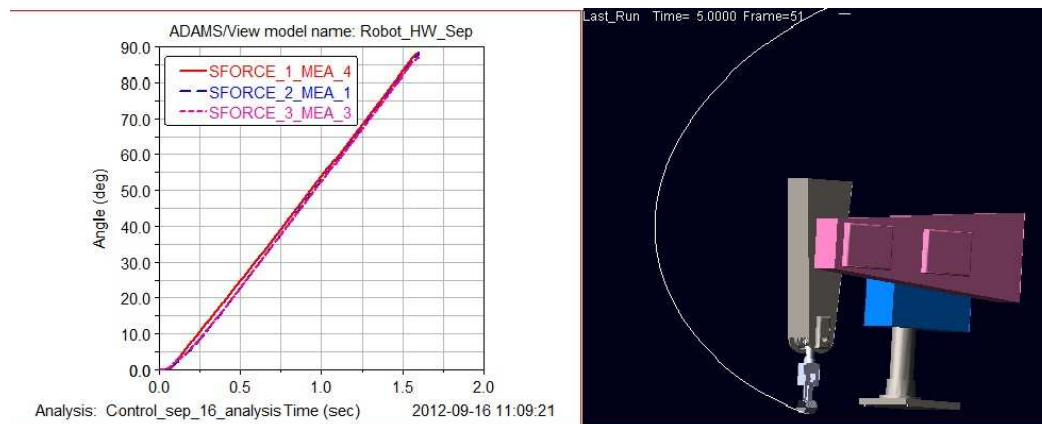


Figura 99. Prueba 2 Recorrido de la Posición deseada ADAMS.

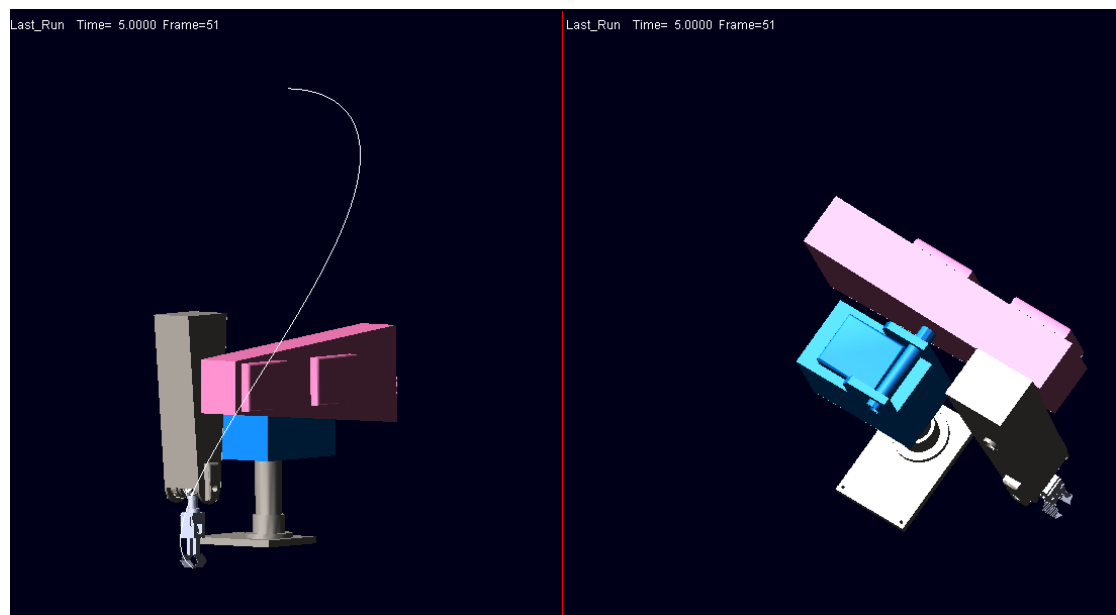


Figura 100. Prueba 2 Trayectoria efectuada.

Como se observa en las anteriores gráficas el comportamiento del sistema se mantiene equivalente para cualquier posición. Conserva el comportamiento esperado de los motores logrando su posición final. Se aprecia que la trayectoria recorrida por la pinza del manipulador.

9 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Se cumplió el objetivo planteado en el proyecto: el desarrollo de un modelo de Co-Simulación en ADAMS/MATLAB para control de posición del robot Gryphon.

Es importante mencionar que se logró el diseño de las piezas mecánicas del robot Gryphon en los programas informáticos de simulación CATIA y SOLIDWORKS. Para éste desarrollo fue necesario adquirirla información de la estructura física del modelo real del robot. Se comprobó que los softwares mencionados son una herramienta de alta gama en diseño y construcción de prototipos en 3D.

Se obtuvo el modelo del robot Gryphon teniendo en cuenta las características del modelo real, el cual se exportó al software de simulación ADAMS, donde se realizó el análisis dinámico del manipulador.

Se logró un correcto enlace entre los software de simulación MSC ADAMS y MATLAB satisfaciendo los requerimientos planteados, suministrando información que se ajustan a condiciones reales de un robot manipulador de dos grados de libertad y así comportándose satisfactoriamente a lo esperado teóricamente.

Se desarrolló un planificador de trayectoria, se calculó modelo matemático de la cinemática del robot. Se implementó una estrategia de control PD, el cual se encargó de reducir el sobre pico y el tiempo de estabilización, incrementando la estabilidad del sistema. Las constantes de sintonización se encuentran de manera empírica debido a que no existe una metodología establecida para su cálculo, observando que el error en el estado estacionario no es cero, debido a que se implementa solo un control PD, este puede ser reducido si se usa un control con parte integral.

Este proyecto da una visión general acerca del software de simulación ADAMS, como una de las herramientas apropiadas para el diseño de prototipos dinámicos y a su vez ser implementados en la Co-Simulación con el Software MATLAB para el desarrollo de estrategias de control.

La Co-Simulación es empleada en recientes estudios y de gran importancia. Abre puertas a nuevos proyectos y mejoras, tanto en la investigación como en la academia. Puede ser usada en ambientes virtuales de aprendizaje o como

complemento en áreas como: electrónica, mecánica, robótica, mecatrónica, entre otras.

Para trabajos futuros se propone, implementar experimentalmente técnicas de control presentadas en este documento, generando un reporte en cuanto a estabilidad del sistema y la reducción del error empleando las mismas condiciones de simulación. Desarrollar nuevos prototipos virtuales de manipuladores empleando estos controladores y estrategias de control alternativas realizando comparación entre ellas.

10 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Shu-Wen Zhou, Li-Xin Guo, Si-Qi Zhang. "Study on Automatic Spray of Distribution Boom System of Truck-Mounted Concrete Pump". The Open Mechanical Engineering Journal, 2008, 2, P.84-92
- [2] Shengqin- Li, Le-He. "Co-simulation Study of Vehicle ESP System Based on ADAMS and MATLAB" JOURNAL OF SOFTWARE, VOL. 6, NO. 5, MAY 2011
- [3] Zhao-Jinfu, Zhu-Chunxia, Liu-Yongxian "Research on co-simulation of rigid-flexible coupling system of parallel robot" Industrial Technology, 2009. ICIT 2009. IEEE International Conference on. Gippsland-Australia. 10-13 Feb. 2009. P.1-6 E-ISBN : 978-1-4244-3507-4
- [4] Hamed -Mesgari, Masoud -Vaezi, Farzad- Cheraghpour Samavati, S Ali A. Moosavian. "Comparison of Intelligent Algorithms for Determining Optimal Grasp Location for Object Manipulation". Proceedings of the ASME 2011 International Mechanical Engineering Congress & Exposition IMECE2011. Denver, Colorado, USA. November 2011. P. 11-17.
- [5] Yang -Yi, Fu- Mengyin, Zhu-Hao, Xiong-Guangming. "Applications of MATLAB in Science and Engineering". Tadeusz -Michałowski. InTech, September, 2011. P. 510. ISBN 978-953-307-708-6
- [6] Vilas Datar-Makarand. "Uncertainty Quantification In Ground Vehicle Dynamics Trough High Fidelity Co-Simulation". Dr. Dan Negrut. University of Wisconsin - Madison. 2008. P-125
- [7] Zhang-Ming, Nie-Hong, Wei-Xiao-hui, Qian-Xiaomei, Zhou-Enzhi. "Modeling and simulation of aircraft anti-skid braking and steering using co-simulation method". The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering. Emerald Group Publishing Limited. 2009. Vol. 28 No. 6. P. 1471-1488.
- [8] Sughosh Jagannatha Rao, B.S.M.E. "Vehicle Modeling and ADAMS-SIMULINK Co-Simulation With Integrated Continuously Controlled Electronic Suspension (CES) and Electronic Stability Control (ESC) Models". Prof. Dennis A. Guenther, Dr. Gary J. Heydinger. The Ohio State University. 2009. P. 91.

- [9] Montazeri-Gh, M.; Soleymani, M.; Mehrabi, N; Dept. of Mech. Eng., Iran Univ. of Sci. & Technol, Tehran. "Application of Virtual Prototyping for Optimization of Fuzzy-Based Active Suspension System". Mechatronics and Its Applications. ISMA 2008. 5th International Symposium on, Amman-Jordan. P.1-6. E-ISBN: 978-1-4244-2034-6
- [10] Faragalli, M.; Sharf, I.; Trentini, M; Center for Intell. Machines, McGill Univ, Montreal, QC "Velocity Control of a Hybrid Quadruped Bounding Robot". Intelligent Robots and Systems, 2008. IROS 2008. IEEE/RSJ International Conference on. Nice- California. P.1501-1506 E-ISBN : 978-1-4244-2058-2
- [11] Xiaoliang Xie; Long Cheng; Zengguang Hou; Cheng Ji; Lab. of Complex Syst. & Intell. Sci., Chinese Acad. of Sci., Beijing, China "Intelligent Control and Information Processing (ICICIP)", 2010 International Conference on. Dalián- Republica Popular China. 13-15 Aug. 2010. P.376 – 381. E-ISBN: 978-1-4244-7047-1
- [12] Mendoza- Carlos Iván, "Modelado, simulación y control de un manipulador robótico de 2 grados de libertad empleando Adams/MATLAB". Luis Angel-Silva. Universidad Pontificia Bolivariana. Bucaramanga-Colombia. 2012. P. 75.
- [13] Kelly-Rafael, Santibáñez. "Control de movimiento de robots manipuladores". Madrid. España. Pearson Education, 2003. XVI. P.321 ISBN:84-205-3831-0
- [14] Silva-Luis Ángel. "Control visual de robots paralelos análisis, desarrollo y aplicación a la plataforma robotenis". Universidad Politécnica de Madrid. Madrid-España. 2005. P.304
- [15] Vásquez-Jose Antonio. "Análisis y diseño de Piezas de maquinas con CATIA V5". Barcelona España. Marcombo, S.A., 2009. ISBN:978-84-267-1534-1
- [16] Gomez Gonzalez-Sergio. "El Gran Libro De Solidworks Office Professional". Madrid. España. Marcombo, S.A., 2008. ISBN:978-84-267-1458-9
- [17] Nakamura-Shoichiro. "Análisis Numérico y Visualización Gráfica con MATLAB". México. Prentice-Hall hispanoamericana, 1992. ISBN: 968-880-860-1
- [18] Garcia De Oteyza- Óscar. "Diseño y Análisis de un Nuevo Sistema de Estabilización para el robot Bípedo Pasibot ". Universidad Carlos III de Madrid. Madrid-España. 2010.

- [19] Bermudez-Jamith, Muñoz-Omar. "Fabricación y Construcción de un Robot Paralelo Tipo Delta con 3 Grados de Libertad". Universidad Pontificia Bolivariana. Bucaramanga-Colombia.2011.
- [20] Martínez-Edison, Peña-César, Yime-Eugenio. "Diseño Óptimo de un Robot Paralelo con Configuración Delta para Aplicaciones Educativas". Revista en Educación en Ingeniería, Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería – ACOFI. Colombia. 2010. ISSN: 1900-8260
- [21] Barrientos- Antonio, Peñín-Luis, Balaguer- Carlos, Aracil- Rafael. "Fundamentos de la Robótica". Universidad Politécnica de Madrid. Madrid-España. 2007. ISBN: 8448156366
- [22] Tristancho- Miguel, Peñín-Luis, Villa- Emerso. "Modelamiento Cinemático y Planteamiento Dinámico del Brazo Robótico GRYPHON y Modulo para Practicas de Laboratorio". Universidad Pontificia Bolivariana. Bucaramanga-Colombia.2005.
- [23] Ramírez-Sergio. "Síntesis Cinemática de un Cambiador de Paginas Semi-Automatico". Universidad Autónoma de Nuevo Leon. Monterrey-Mexico.1997.
- [24] Craig-John. "Robótica". Pearson Education. Mexico.2006. Tercera Edición. ISBN:970-26-0772-8
- [25] Arcadio-Casillas. "Máquinas Calculo de Taller". Madrid. 1981 ISBN: 84-4007-21-63
- [26] M. P. Pérez, C. Díaz-Quintero, C. Mendoza, L. Ángel. ADAMS/MATLAB CO-SIMULATION: Dynamic Systems Analysis and Control Tool, Applied Mechanics and Materials Vol. 232 (2012) pp 527-531. Trans Tech Publications, Switzerland.

11 ANEXOS