

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN ROBOT MANIPULADOR INDUSTRIAL TIPO PUMA CAPAZ DE LEVANTAR PESOS DE HASTA 20 kg.

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

SANTIAGO DAVID VACA JIMÉNEZ

santi.vaca@gmail.com

DIRECTOR: PhD. ÁLVARO AGUINAGA BARRAGÁN

alvaro.aguinaga@epn.edu.ec

Quito, Febrero 2012

DECLARACIÓN

Yo, Santiago David Vaca Jiménez declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad intelectual por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Santiago David Vaca Jiménez

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por el señor Santiago David Vaca Jiménez, bajo mi supervisión.

Ing. Álvaro Aguinaga Barragán, PhD.

DIRECTOR DE PROYECTO

AGRADECIMIENTOS

A Jesucristo, Salvador de mi ser, y quien guía mis pasos a diario por este arduo camino de la vida. Gracias por ser mi fuente de inspiración y darme las fuerzas necesarias para coger tus sueños y hacerlos míos.

A mi apreciada familia, que me han dado su cariño y apoyo durante todas las etapas de mi vida, y específicamente en esta área de carácter académica. Especialmente a mis padres que nunca me dejaron rendirme ni perder el horizonte de mi vida.

A mi amada Tatiana, gracias por ayudarme a sobrellevar las cargas que todo este proceso académico. Gracias por corregir la redacción y gramática de este trabajo también.

Al doctor Álvaro Aguinaga, quien además de brindarme una mano con toda su vasta experiencia en este campo de investigación, realmente ha llegado a mostrarse paciente y me ha inspirado alrededor de este trabajo.

DEDICATORIA

Todo este logro académico se lo dedico primeramente al que me permite cada día vivir, Jesús quién me dio todo lo que se necesitaba para concluir este ciclo en mi vida.

A mí amada Tatiana por todo su apoyo y cariño. Realmente me has dado tu mano en todo lo que he necesitado sin pedir nada a cambio y seguramente sin ti no hubiera acabado este proyecto.

A mis preciados padres, quienes me han guiado por la vida y se han vuelto en los mejores tutores que he podido tener.

Y a mis hermanas que fueron un pilar fundamental para mi crecimiento.

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN A LA ROBÓTICA INDUSTRIAL Y MANIPULADORES.....	1
1.1 GENERALIDADES DE LA ROBÓTICA:	1
1.1.1 BREVE HISTORIA DEL DESARROLLO DE LA ROBÓTICA:.....	1
1.1.2 DEFINICIÓN DE ROBOT:.....	3
1.1.3 DEFINICIÓN DE UN ROBOT INDUSTRIAL:	4
1.1.4 DEFINICIÓN DE MANIPULADOR:	5
1.1.5 DISCIPLINAS DE LA ROBÓTICA:.....	6
1.2 GRADOS DE LIBERTAD (GDL):.....	6
1.3 ESTRUCTURA DE ROBOTS MANIPULADORES:	7
1.3.1 SISTEMA MECÁNICO (ESLABONES Y ARTICULACIONES):	7
1.3.2 ACTUADORES Y REDUCTORES:.....	8
1.3.3 SISTEMA SENSORIAL:.....	10
1.3.4 SISTEMA DE CONTROL:.....	10
1.4 CARACTERÍSTICAS DE LOS ROBOTS MANIPULADORES:.....	11
1.4.1 CONFIGURACIÓN BÁSICA DE UN ROBOT MANIPULADOR:	11
1.4.2 VOLUMEN DE TRABAJO:.....	14
1.5 CLASIFICACIÓN DE LOS ROBOTS:.....	15
1.5.1 CLASIFICACIÓN POR SU CONFIGURACIÓN ESTRUCTURAL Y TIPO DE MOVIMIENTOS:	15
1.5.2 CLASIFICACIÓN BASADA EN EL TIPO DE ENERGÍA DEL ACTUADOR:	

CAPÍTULO 2

DISEÑO FUNCIONAL DEL MANIPULADOR.....	19
2.1 ASPECTOS PREVIOS AL DISEÑO FUNCIONAL:	19
2.2 DETERMINACIÓN DEL VOLUMEN DE TRABAJO:	20
2.2.1 DEFINICIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL VOLUMEN DE TRABAJO:	20
2.2.2 CONSIDERACIONES DE FUNCIONALIDAD:.....	21
2.2.3 CONSIDERACIONES DE ESPACIO:	22
2.2.4 ESTABLECIENDO EL VOLUMEN DE TRABAJO DESEADO:	22
2.3 DETERMINAR LA CONFIGURACIÓN DEL ROBOT:	25
2.3.1 CONFIGURACIÓN DEL CUERPO:	27
2.3.2 CONFIGURACIÓN DEL BRAZO:	28
2.3.3 CONFIGURACIÓN DEL ANTEBRAZO:.....	29
2.3.4 CONFIGURACIÓN DE LA MANO (EFECTOR FINAL):.....	31
2.4 GEOMETRÍA DEL ROBOT:	31
2.4.1 ESLABÓN TIERRA:.....	31
2.4.2 ESLABÓN CUERPO:.....	32
2.4.3 ESLABÓN BRAZO:.....	33
2.4.4 ESLABÓN ANTEBRAZO:	33
2.4.5 MUÑECA:	34
2.4.6 GEOMETRÍA FINAL DEL ROBOT MANIPULADOR:	35

CAPÍTULO 3

DISEÑO MECÁNICO ESTRUCTURAL DEL ROBOT.	36
3.1 GENERALIDADES:	36
3.2 DEFINICIONES INICIALES:.....	37

3.2.1	ALCANCE DEL DISEÑO MECÁNICO ESTRUCTURAL DEL ROBOT MANIPULADOR:.....	37
3.2.2	MODIFICACIONES ESTRUCTURALES DE LOS ESLABONES DEL ROBOT:	38
3.2.3	MATERIAL DE LOS ELEMENTOS DEL ROBOT:	38
3.2.4	POSICIÓN CRÍTICA DEL ROBOT:	39
3.3	APROXIMACIÓN DEL DISEÑO ESTRUCTURAL DE LOS ESLABONES EN FUNCIÓN A LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES.....	40
3.3.1	APROXIMACIÓN DE LA BASE O TIERRA.	41
3.3.2	APROXIMACIÓN DEL CUERPO.....	42
3.3.3	APROXIMACIÓN DEL BRAZO.....	44
3.3.4	APROXIMACIÓN DEL ANTEBRAZO.	46
3.3.5	APROXIMACIÓN DE LA MUÑECA.	47
3.4	ANÁLISIS ESTRUCTURAL DEL ROBOT.	49
3.4.1	CÁLCULO DE LAS FUERZAS, REACCIONES Y MOMENTOS EN LOS ESLABONES DEL ROBOT MANIPULADOR.	51
3.5	SIMULACIÓN DE LOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES.....	53
3.5.1	AMBIENTE DE SIMULACIÓN PARA EL ANÁLISIS DE ESFUERZOS DEL AUTODESK INVENTOR.....	54
3.5.2	SIMULACIÓN DE LA MUÑECA.....	56
3.5.3	SIMULACIÓN DEL ANTEBRAZO.....	59
3.5.4	SIMULACIÓN DEL BRAZO.	62
3.5.5	SIMULACIÓN DEL CUERPO.	64
3.5.6	SIMULACIÓN DE LA BASE O TIERRA.....	65

CAPÍTULO 4

INTERFAZ ENTRE EL DISEÑO ESTRUCTURAL DEL INVENTOR Y EL MODELO FÍSICO EN MATLAB	69
4.1 DEFINICIONES Y GENERALIDADES.	69
4.1.1 ASPECTOS PRINCIPALES DEL MATLAB®:	69
4.1.2 ASPECTOS PRINCIPALES DEL SIMULINK®:	70
4.1.3 ASPECTOS DEL SIMMECHANICS.....	72
4.2 TRADUCTOR CAD-SIMULINK	73
4.2.1 PASOS PARA LA CONEXIÓN DEL TRADUCTOR CON LA PLATAFORMA CAD.	74
4.2.2 PASOS PARA EL TRASPASO DE UN ENSAMBLE DE LA PLATAFORMA CAD HACIA EL SIMMECHANICS.	75
4.3 PREPARAR EL MODELO FÍSICO EN SIMULINK PARA LA SIMULACIÓN.	79
4.3.1 SIGNIFICADO Y FUNCIONAMIENTO DE LOS BLOQUES A UTILIZARSE EN EL DIAGRAMA DEL SIMMECHANICS.....	80
4.3.2 PROCESO DE PREPARACIÓN DEL MODELO EN SIMULINK.....	81

CAPÍTULO 5

ANÁLISIS DE LA CINEMÁTICA DEL MANIPULADOR UTILIZANDO ROBOTICS TOOLBOX DE MATLAB.....	83
5.1 GENERALIDADES:	83
5.2 CONVENCIONES PARA LOS EJES COORDENADOS:	85
5.3 MÉTODO DE RESOLUCIÓN POR MEDIO DE LA MATRIZ DE DENAVIT-HATENBERG:	86
5.3.1 MATRIZ DE DENAVIT-HARTENBERG:	87
5.3.2 PARÁMETROS DE DENAVIT-HARTENBERG:	87

5.3.3	RESOLUCIÓN POR MEDIO DE LA MATRIZ DE TRANSFORMACIÓN HOMOGÉNEA:	91
5.4	DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS D-H PARA EL ROBOT MANIPULADOR TIPO PUMA DE ESTUDIO:.....	92
5.4.1	NUMERACIÓN DE LOS ESLABONES Y DE LAS ARTICULACIONES:.....	92
5.4.2	SITUAR LOS EJES Z_s SOBRE LOS EJES DE ROTACIÓN:.....	93
5.4.3	ESTABLECER GRAFICAMENTE LOS EJES DE COORDENADAS DE CADA ARTICULACIÓN.	94
5.4.4	DETERMINAR LOS PARÁMETROS NECESARIOS PARA LLEVAR DE UN ESLABÓN A OTRO LOS EJES DE COORDENADAS:	95
5.5	ROBOTICS TOOLBOX PARA MATLAB®:.....	96
5.5.1	ASPECTOS PRINCIPALES DEL ROBOTICS TOOLBOX PARA MATLAB: 97	
5.6	CINEMÁTICA DIRECTA DEL ROBOT MANIPULADOR INDUSTRIAL TIPO PUMA MEDIANTE EL ROBOTICS TOOLBOX.	98
5.6.1	CREAR EL ROBOT EN EL ENTORNO:	98
5.6.2	LLAMAR A LA FUNCIÓN DE LA CINEMÁTICA DIRECTA UTILIZANDO EL ROBOT YA CREADO EN EL ENTORNO.	101
5.7	DETERMINACIÓN DE LA CINEMÁTICA INVERSA DEL ROBOT MANIPULADOR INDUSTRIAL TIPO PUMA MEDIANTE EL ROBOTICS TOOLBOX PARA MATLAB®.....	105
5.7.1	LLAMAR A LA FUNCIÓN DE LA CINEMÁTICA INVERSA UTILIZANDO EL ROBOT YA CREADO EN EL ENTORNO.	105
CAPÍTULO 6		
ANÁLISIS DE LA DINÁMICA DEL MANIPULADOR UTILIZANDO ROBOTICS TOOLBOX DE MATLAB.....		
		109
6.1	GENERALIDADES Y DEFINICIONES:	109

6.1.1	ANÁLISIS DINÁMICO PARA EL ANÁLISIS DEL CONJUNTO DE FUNCIONES DEL MOMENTO DE TORSIÓN:	109
6.1.2	ANÁLISIS DINÁMICO PARA SU USO EN LA SIMULACIÓN:	110
6.2	ENTORNO DE SIMULACIÓN DENTRO DEL ROBOTICS TOOLBOX DE MATLAB®:	111
6.2.1	GENERACIÓN DE TRAYECTORIAS:	112
6.2.2	ANÁLISIS DINÁMICO INVERSO.....	114
6.2.3	ANÁLISIS DINÁMICO DIRECTO.....	116
CAPÍTULO 7		
	SELECCIÓN DE ACTUADORES Y ELEMENTOS DE TRANSMISIÓN DE POTENCIA.....	117
7.1	DEFINICIONES.....	117
7.1.1	DEFINICIÓN DE PARÁMETROS Y CARACTERÍSTICAS DE LOS ACTUADORES A ESCOGER.....	118
7.1.2	DEFINICIÓN DE SERVOMOTOR.	118
7.1.3	ASPECTOS NECESARIOS PARA ESCOGER UN SERVOMOTOR.	119
7.2	MOMENTOS MÁXIMOS DE LOS EJES DEL ROBOT.....	120
7.2.1	CÁLCULO DE LOS MOMENTOS MÁXIMOS.....	120
7.3	SELECCIÓN DE LOS ACTUADORES.....	121
CAPÍTULO 8		
	SIMULACIÓN DEL ROBOT MANIPULADOR MEDIANTE EL USO DE SOFTWARE.	124
8.1	ALCANCE DE LA SIMULACIÓN.....	124
8.2	GENERACIÓN DE LA INTERFAZ GRÁFICA.....	124
8.2.1	DEFINICION DE LA INTERFAZ GRÁFICA DEL MATLAB®.....	125

8.2.2	PROCESO PARA GENERAR LA GUI EN MATLAB.....	126
8.3	SIMULACIÓN DE LAS FUNCIONES DEL ROBOT.....	129
8.3.1	FUNCIÓN 1: EL ROBOT MUEVE UN OBJETO DESDE UN PUNTO A HASTA UN PUNTO B.....	129
8.3.2	FUNCIÓN 2: REALIZAR UN CORDÓN DE SOLDADURA ENTRE DOS PLACAS PLANAS.....	131
8.3.3	FUNCIÓN 3: PINTAR UNA SUPERFICIE RECTANGULAR.....	132
CAPÍTULO 9		
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	135
9.1	CONCLUSIONES:.....	135
9.2	RECOMENDACIONES:	137
	BIBLIOGRAFÍA	139
ANEXO 1		
	REPORTES DE LA SIMULACIÓN POR ELEMENTOS FINITOS DE LOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES	142
ANEXO 2		
	DIAGRAMA DE BLOQUES FINAL DEL ROBOT MANIPULADOR EN EL SIMULINK	210
ANEXO 3		
	CODIGO DE PROGRAMACIÓN DE LA SIMULACIÓN EN MATLAB	212
ANEXO 4		
	SOLUCIÓN GRÁFICA DE ÁNGULOS PARA SIMULACIÓN	219
ANEXO 5		
	TABLA DE SELECCIÓN DE SERVOMOTORES Y SUS RESPECTIVOS REDUCTORES	221
ANEXO 6		
	PLANOS DE LA GEOMETRÍA DEL ROBOT MANIPULADOR	222

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1: Cadena Cinemática Abierta.	7
Figura 1-2: Algunos Tipos de Articulaciones para los Robots.	8
Figura 1-3: Analogía de un Robot Manipulador con el Ser Humano.	11
Figura 1-4: Dispositivos de Agarre y Sujeción para Manipuladores Industriales.	13
Figura 1-5: Herramienta para Soldadura en un robot Industrial.	13
Figura 1-6: Punto Centrado de la Herramienta.....	14
Figura 1-7: Volúmenes de Trabajo para Diferentes Estructuras.....	14
Figura 1-8: Robot Cartesiano.	15
Figura 1-9: Robot Cilíndrico.....	16
Figura 1-10: Robot Polar.	16
Figura 1-11: Robot SCARA.	17
Figura 1-12: Robot Angular.	17
Figura 2-1: Definición de los 6 ejes que posee el robot.....	19
Figura 2-2: Volumen de Espacio de un Manipulador Angular “Tipo Puma”	21
Figura 2-3: Tanque de 15kg de GLP.	23
Figura 2-4: Alcance del Robot Manipulador.	25
Figura 2-5: Robot con configuración de Paralelogramo.	26
Figura 2-6: Configuración del Robot angular tipo “Puma”.	26
Figura 2-7: Robot Unimate PUMA 500, con cuerpo de altura vertical en referencia a su base.....	27
Figura 2-8: Robot KUKA KR15 con cuerpo de menor altura y desplazado.	28
Figura 2-9: Antebrazo de un Unimate PUMA.	29
Figura 2-10: Robot Unimate PUMA 200, con configuración de brazo distante.	30

Figura 2-11: Robot Unimate PUMA 560, con configuración en línea.	30
Figura 2-12: Acople para efectores finales de un robot ABB IRB2600ID.	31
Figura 2-13: Geometría Eslabón Tierra del Robot Manipulador.	32
Figura 2-14: Geometría del Cuerpo del Robot Manipulador.	32
Figura 2-15: Geometría del Brazo del Robot Manipulador.	33
Figura 2-16: Geometría del Antebrazo del Robot Manipulador.	34
Figura 2-17: Geometría de la Muñeca del Robot Manipulador.	34
Figura 2-18: Geometría final del robot manipulador.	35
Figura 3-1: Aproximación del diseño estructural del eslabón base o tierra.	42
Figura 3-2: Aproximación del diseño estructural del eslabón cuerpo.	44
Figura 3-3: Aproximación del diseño estructural del eslabón brazo.	46
Figura 3-4: Aproximación del diseño estructural del eslabón antebrazo.	47
Figura 3-5: Aproximación del diseño estructural del eslabón muñeca.	49
Figura 3-6: Una de las posiciones Críticas del Robot Manipulador.	49
Figura 3-7: Viga en Voladizo. Aproximación de los eslabones.	51
Figura 3-8: Ventana de Propiedades del elemento en el Inventor 2012.	52
Figura 3-9: Ambiente de Análisis de Esfuerzos en el Inventor 2012.	55
Figura 3-10: Pestaña con todas las opciones para definir la simulación del análisis de esfuerzos.	55
Figura 3-11: Vista posterior de la distancia que se debe trasladar la fuerza existente entre el eslabón antebrazo y el brazo.	62
Figura 3-12: Ensamble estructural generado del robot manipulador.	67
Figura 4-1: Modelo de ejemplo de SimMechanics.	72

Figura 4-2: Proceso para pasar de un ensamblado CAD hacia un archivo de simulación en Simulink®.	73
Figura 4-3: Versión del traductor a escoger.	74
Figura 4-4: Menú del SimMechanics Link en el Autodesk Inventor 2012.	75
Figura 4-5: Posición Inicial del robot manipulador.....	76
Figura 4-6: Guardando copia del archivo con extensión .STL.....	76
Figura 4-7: Exportando el ensamblado a formato .XML.....	77
Figura 4-8: Importando el archivo .XML al SimMechanics de MATLAB.....	77
Figura 4-9: Diagrama de Bloques de los elementos del ensamblado del Robot Manipulador.....	78
Figura 4-10: Generación del archivo .MDL para la simulación con Simulink.....	79
Figura 4-11: Definir las condiciones del entorno de simulación.....	82
Figura 4-12: Cambiar la ubicación de la tierra al origen del eje coordenado.....	82
Figura 4-13: Actualizar las coordenadas de las conexiones que existen después del bloque tierra.	83
Figura 5-1: Características de la Cinemática Directa e Inversa.....	85
Figura 5-2: Convención de Colores para los ejes coordenados.	85
Figura 5-3: Parámetro a de un elemento cualquiera (también denominado como r).	88
Figura 5-4: Parámetro α de un elemento cualquiera.	89
Figura 5-5: Parámetro d de un elemento cualquiera.	89
Figura 5-6: Parámetro θ de un elemento cualquiera.....	90
Figura 5-7: Parámetros D-H para una Articulación Rotatoria.	90
Figura 5-8: Numeración de Eslabones y Articulaciones del Robot Manipulador Industrial tipo Puma.....	93
Figura 5-9: Ubicación de los ejes Zs de cada articulación del Robot Manipulador....	94

Figura 5-10: Ejes de Coordenadas de Cada Articulación.....	95
Figura 5-11: Distancias existentes entre los ejes de acción de las articulaciones del Robot (Fontal).	95
Figura 5-12: Distancias existentes entre los ejes de acción de las articulaciones del Robot (Vista Superior).....	96
Figura 5-13: Compilación del robot en el MATLAB usando el Robotics Toolbox. ...	100
Figura 5-14: Definición gráfica del Robot creado en el MATLAB®.....	101
Figura 5-15: Robot Manipulador en posición inicial p0.....	103
Figura 5-16: Robot Manipulador en posición p1.....	103
Figura 5-17: Robot Manipulador en posición p2.....	104
Figura 5-18: Robot Manipulador en posición p3.....	105
Figura 6-1: La relación entre los momentos de torsión aplicados por los actuadores y el movimiento resultante del manipulador.	111
Figura 6-2: Imagen del robot en movimiento siguiendo una trayectoria.....	114
Figura 6-3: Torques requeridos para realizar la 3ra trayectoria. Cada color significa un eje en específico.	115
Figura 7-1: Aproximación de los elementos para calcular el momento máximo requerido.....	121
Figura 7-2: Geometría del robot con los servomotores instalados.	123
Figura 8-1: Mensaje de inicio de la simulación.....	127
Figura 8-2: Interfaz gráfica de la Simulación Libre.	128
Figura 8-3: Interfaz gráfica para la simulación de las funciones preestablecidas.....	128
Figura 8-4: Dimensiones de un tanque de gas de 15kg.....	130
Figura 8-5: Torques requeridos para realizar una trayectoria definida, con una masa en el efector final de 20kg.	131

Figura 8-6: Trayectoria que realizará el robot manipulador al momento de pintar la placa rectangular.....	133
Figura 8-7: Entorno de la Simulación.	134
Figura 8-8: Torque Calculado de la Simulación, de la Primera Articulación del Robot.	134

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1: Características de los Reductores para la Robótica.....	9
Tabla 3-1: Masa, longitud y ubicación del centro de gravedad de cada eslabón.	53
Tabla 3-2: Valores de las fuerzas y reacciones que se ejercen sobre cada eslabón.	53
Tabla 3-3: Resultados de la simulación y cambios al diseño de la parte “B” de la muñeca.	56
Tabla 3-4: Resultados de la simulación y cambios al diseño de la parte “A” de la muñeca	57
Tabla 3-5: Resultados de la simulación y cambios al diseño del antebrazo.....	59
Tabla 3-6: Masa, longitud y ubicación del centro de gravedad de cada eslabón recalculados.	61
Tabla 3-7: Valores recalculados de las fuerzas y reacciones que se ejercen sobre cada eslabón.....	62
Tabla 3-8: Resultados de la simulación y cambios al diseño del brazo.....	63
Tabla 3-9: Resultados de la simulación y cambios al diseño del cuerpo.....	64
Tabla 3-10: Resultados de la simulación y cambios al diseño del cuerpo.....	65
Tabla 4-1: Bloques existentes en el diagrama de bloques del modelo físico en el Simulink.....	80
Tabla 4-2: Bloques a colocarse en el diagrama de bloques del modelo físico en el Simulink.....	81
Tabla 5-1: Parámetros D-H para el Robot Industrial Tipo Puma de estudio.....	96
Tabla 5-2: Parámetros D-H a utilizarse en el Robotics Toolbox para MATLAB®.....	98
Tabla 7-1: Momentos máximos para los ejes 2 y 3	121

RESUMEN

El presente proyecto tiene por objetivo desarrollar el modelo físico, el diseño funcional y mecánico, y el análisis cinemático y dinámico de un robot manipulador industrial tipo "PUMA", de seis grados de libertad. A este diseño se lo someterá a una simulación dentro de una plataforma informática para determinar su comportamiento. Se utilizará la plataforma MATLAB (con sus Toolbox SimMechanics y Robotics), el Traductor CAD-Simulink, y el software Autodesk Inventor de diseño en 3D.

Se inicia el proyecto con el estudio de los fundamentos de la robótica industrial y en especial sobre los manipuladores. Se determina la geometría del robot a partir del cumplimiento de sus características básicas y en función de unas tareas específicas que cumple, se estudia y selecciona la configuración del robot. Una vez obtenidos las características geométricas y la configuración se realiza el diseño funcional utilizando el Autodesk Inventor. A partir de este, se realizarán las aproximaciones necesarias para la determinación del diseño mecánico estructural.

Al disponer del diseño mecánico estructural se realizará el modelo físico del robot con ayuda del traductor CAD-Simulink de Matlab para su posterior simulación en el entorno del SimMechanics. Con este se procede a crear una interfaz para realizar el estudio cinemático y dinámico del manipulador utilizando el Toolbox Robotics de Matlab. Finalmente, con lo obtenido se realiza la selección de los diferentes actuadores, reductores y demás elementos.

De esta manera se obtienen los siguientes resultados: diseño funcional y mecánico de un robot manipulador industrial tipo "PUMA", modelo físico en diagrama de bloques, cinemática directa e inversa, dinámica directa e inversa y la simulación del modelo físico del robot manipulador.

Este proyecto de investigación es un aporte para el desarrollo de futuras investigaciones con respecto a la Robótica industrial en nuestra Facultad y en el País.

PRESENTACIÓN

En la actualidad todo tipo de industrias manufactureras, automotrices, constructoras, de servicios, entre otras, tienen la imperante necesidad de mejorar y aumentar su producción sin afectar el bienestar o la salud de sus trabajadores, operarios y obreros. Por esta razón la aplicación de robots industriales ha sido la mejor alternativa para estas industrias.

A través de los años, el desarrollo de la robótica ha sido muestra del avance tecnológico e industrial de la humanidad, por lo que el presente proyecto de titulación pretende colaborar y continuar con el desarrollo de la ciencia y la tecnología de la Facultad de Ingeniería Mecánica en el área de la Mecatrónica y de la Robótica, así como también de la industria Ecuatoriana.

El presente proyecto de titulación es una continuación y constituye una nueva base para el desarrollo y construcción de futuros proyectos en torno a la robótica industrial.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN A LA ROBÓTICA INDUSTRIAL Y MANIPULADORES.

1.1 GENERALIDADES DE LA ROBÓTICA:

La terminología “Robótica” es utilizada por primera vez por el escritor Isaac Asimov en 1942, en su cuento titulado como “Runaround”, cuando definió esta palabra como “el estudio sistemático de robots, su construcción, mantenimiento y comportamiento”¹.

Desde esa entonces se ha internacionalizado este concepto, siendo esta rama de la ciencia la que se ocupa de todo el desarrollo respectivo al tema de los robots.

1.1.1 BREVE HISTORIA DEL DESARROLLO DE LA ROBÓTICA:

Después de la aparición del nombre por primera vez en 1942, sucedieron un sinnúmero de hitos que sirvieron para el desarrollo de la robótica. A continuación se enumerarán algunos hechos en orden cronológico para a tener una mejor perspectiva del desarrollo de la robótica.

Este resumen comienza en 1948, cuando se publica el libro llamado Cybernetics, por Norbert Wiener, en el cual, por primera vez se incluyen conceptos para la operación de robots.

En 1954 se patenta, por primera vez en la historia, el diseño de un robot y fue por George C. Devol en Estados Unidos. Esto sirve como ejemplo y es seguido por otras personas en todo el mundo como es el caso de C.W. Kenward del Reino Unido.

¹ AGUINAGA, A. (2005); “Automatización en la Industria, Robótica”, Quito: EPN – FIM; Pagina 1-3.

En 1961 vuelve a aparecer George C. Devol quien con la ayuda de J.F. Engelberg, construyen el primer robot industrial denominado "Unimate-2000". Al año siguiente, este robot se instala en las fábricas de General Motors. Por esta razón se a estos dos investigadores se les considera como padres de la robótica industrial.

A partir del año 1967 aparecerían los primeros robots móviles. Primero con General Electric Corporation, que construiría el primer robot caminante de cuatro patas. Un año más tarde el Stanford Research Institute presenta un robot móvil con ruedas, pero a diferencia de sus antecesores, este disponía de sensores de visión, contacto y medidores de distancia.

El año 1970 será un gran año para la Robótica, primero porque la Universidad de Stanford presenta por primera vez un robot manipulador accionado con motores eléctricos (Stanford arm). En ese mismo año, el Cincinnati Milacron Corporation produce el T³ (The Tomorrow Tool Today), que sería el primer robot manipulador industrial controlado con un microcomputador.

En 1973 se funda la empresa ASEA, que sería la primera de muchas empresas dedicadas a la comercialización de robots industriales. Años después cambió su nombre por el que actualmente conocemos ABB.

En 1976 la robótica dejaría de ser utilizada únicamente para aplicaciones industriales o de investigación, sino para otras ramas de la sociedad. Por ejemplo, en ese mismo año la Nasa utilizó los primeros manipuladores situados en los artilugios Viking 1 y 2 para recoger muestras de la superficie de Marte.

En 1978, Unimation desarrolla el robot PUMA (Programmable Universal Machine for Assembly) con las especificaciones de General Motors. Este robot ha sido uno de los más populares en la industria por años y su modelo ha servido como base para muchos posteriores diseños. Además es el objeto de numerosos estudios teóricos.

El profesor Makino de la Universidad de Yamashi de Japón, presenta en 1982, el concepto del robot SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arm), que permite tener un perfecto manipulador para el ensamblado de piezas.

1.1.2 DEFINICIÓN DE ROBOT:

En la actualidad el término de “robot” es muy conocido entre la gente, inclusive aquellos que no tienen conocimiento de la automatización o disciplinas afines. Esta palabra está incluida en muchos de los diccionarios de todas las lenguas en el mundo. De todas maneras este término no existía hasta el año 1921, cuando aparece por primer vez en la obra teatral, del novelista y autor dramático checo Karel Capek, denominada R.U.R. (Rosum’s Universal Robots). En este idioma la palabra “robota” hace alusión al concepto de “fuerza de trabajo o servidumbre”.

Desde esa aparición, este término se generaliza tanto que se comienza a utilizar para denominar a los autómatas construidos en los años veinte y treinta. Además se utilizó para promociones de productos, películas y algunas otras aplicaciones comerciales.

A pesar de esto, el deseo humano por generar robots data de algunos siglos antes. Desde el inicio del pensamiento racional ya se veía la intención del hombre por recrear máquinas que imitaran la figura y los movimientos de seres animados. Esto se observa con los inventos griegos, los artesanos franceses y suizos del siglo XVII que ya incorporaban interesantes dispositivos mecánicos para el control automático de ciertos movimientos.²

Como se ha dicho, al principio de la historia de los robots, estos estaban diseñados con la finalidad de que se asemejen lo mayormente posible a los seres vivos, lo que cambia a principios de 1910 con pensadores como Leonardo Torres Quevedo, que en 1915 declaro:

² OLLERO, A. (2001). *“Robótica, Manipuladores y Robots Móviles”*. Madrid: Marcombo; Pagina 1.

“Los antiguos autómatas imitaban la apariencia y movimientos de los seres vivos, lo cual no tienen mucho interés práctico; lo que yo busco es una clase de aparatos que sin necesidad de reproducir los gestos más visibles del hombre, intentan obtener los mismos resultados que una persona.”³

Hay que aclarar que el término robot no puede considerarse ajeno a la asociación de la idea con el trabajo y producción. A pesar de que en la actualidad existen autómatas que tienen un fin de entretenimiento y diversión, su principal función es de realizar un trabajo específico.

1.1.3 DEFINICIÓN DE UN ROBOT INDUSTRIAL:

Aunque se puede llegar a tener una idea intuitiva sobre la definición de un robot industrial, este varía según el entorno social y cultural en el que se encuentra. De esta manera se hace pertinente realizar una definición previa al desarrollo de la investigación.

Se trato de realizar una definición única, pero no teniendo éxito en aquello, se destacaron tres definiciones de diferentes entidades, que son aceptadas a nivel mundial y que calzarían completamente con el objeto de esta investigación:

Definición de la British Robot Association:

Dispositivo reprogramable con un mínimo de cuatro grados de libertad diseñado para manipular y transportar piezas, herramientas o elementos especiales de fabricación a través de un programa variable de movimientos para realizar una tarea de manufactura específica.⁴

³ OLLERO, A. (2001). *“Robótica, Manipuladores y Robots Móviles”*. Madrid: Marcombo; Pagina 2.

⁴ GONZÁLEZ, P., & JIMÉNEZ, M. (s.f). *“Robótica Industrial”*. Madrid: Instituto de Automática Industrial; Pagina 1-2.

Definición del RIA (Robotics Institute of America):

Manipulador multifuncional y reprogramable diseñado para mover materiales, piezas, herramientas o dispositivos especializados a través de un programa variable de movimientos para realizar una tarea de manufactura específica.⁵

Definición de la ISO (International Organization for Standardization):

Manipulador multifuncional reprogramable con varios grados de libertad, capaz de manipular piezas, herramientas o dispositivos especiales según trayectorias variables programadas para realizar tareas diversas.⁶

De todas maneras se podría resumir estos tres conceptos en uno solo, al decir que un robot industrial es un dispositivo mecánico controlado por elementos electrónicos que son capaces de permitirle realizar tareas industriales previamente establecidas por un programador. A esto sería importante recalcar que en todos los conceptos, se define a un robot industrial como un manipulador de objetos.

1.1.4 DEFINICIÓN DE MANIPULADOR:

Un manipulador consiste en una serie de eslabones conectados a través de articulaciones rotatorias o prismáticas. El movimiento de una articulación supone el movimiento de todos los eslabones conectados a ella (a través de diferentes eslabones y articulaciones). El movimiento de la articulación se realiza con un mecanismo actuador. El actuador puede conectar dos eslabones directamente o a través de un reductor que generalmente proporciona una ganancia en el par o fuerza suministrada.⁷

⁵ GONZÁLEZ, P., & JIMÉNEZ, M. (s.f). "*Robótica Industrial*". Madrid: Instituto de Automática Industrial; Pagina 1-2.

⁶ MOYA, D. (2010). "*Modelo y Análisis cinemático de un robot manipulador industrial esférico aplicando el MATLAB*". Quito: Tesis EPN; Pagina 2.

⁷ GONZÁLEZ, P., & JIMÉNEZ, Op. Cit. Página 2-2.

1.1.5 DISCIPLINAS DE LA ROBÓTICA:

La robótica es la rama de la ciencia que aglutina algunos conocimientos de ciertas disciplinas tales como:

- a. **Mecánica:** El área mecánica se encarga del diseño y construcción de las estructuras físicas de los eslabones. Además conceptos mecánicos son utilizados para definir la cinemática y dinámica del robot manipulador.
- b. **Electrónica:** Esta área se encarga de todos los dispositivos electrónicos que servirán como herramientas para el robot manipulador. Entran aquí la teoría sobre los sensores, la Electrónica Analógica, la digital y su base de computadores.
- c. **Informática:** La informática se utiliza para los lenguajes de programación y sistemas operativos que utilizan los computadores encargados del control automático del robot.
- d. **Control:** Esta disciplina aplica la Teoría de Control Automático para los reguladores para motores y el control dinámico. Actualmente se está trabajando con énfasis en la Inteligencia Artificial.

Así es importante decir que al diseñar un robot manipulador por completo es indispensable realizar un estudio de cada una de estas disciplinas.

1.2 GRADOS DE LIBERTAD (GDL):

Por otro lado y aún más importante que la definición, es el grado de libertad, el cual define al número de movimientos independientes que puede realizar cada articulación con respecto a la anterior.

El número de grados de libertad total de un robot viene dado por la suma de los grados de libertad de las articulaciones que lo componen (cada uno de los movimientos independientes que puede realizar el extremo efectivo del manipulador en el espacio tridimensional). Dado que generalmente se utilizan únicamente pares

cinemáticos de un grado de libertad, entonces los GDL de un robot industrial suele ser igual al número de articulaciones que este posee.

1.3 ESTRUCTURA DE ROBOTS MANIPULADORES:

Un robot manipulador está compuesto en la actualidad por algunos elementos, los cuales serán nombrados a continuación:

- Sistema Mecánico (Eslabones y Articulaciones).
- Actuadores y Reductores.
- Sistema Sensorial.
- Sistema de Control.

1.3.1 SISTEMA MECÁNICO (ESLABONES Y ARTICULACIONES):

Un manipulador industrial convencional es una cadena cinemática abierta formada por un conjunto de elementos de la cadena interrelacionados mediante articulaciones. En la robótica los elementos se denominan “eslabones” y las articulaciones se los conoce como “pares cinemáticos”, estas últimas son las que permiten el movimiento relativo entre los sucesivos eslabones. Esto se puede observar en la Figura 1-1.

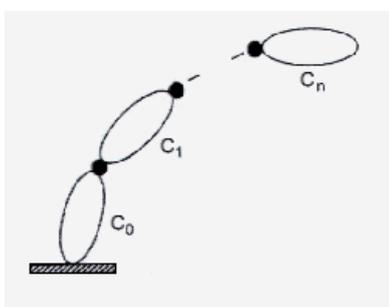


Figura 1-1: Cadena Cinemática Abierta.⁸

Existen algunos pares cinemáticos, que se diferencian básicamente por el tipo de movimiento relativo que permiten entre un eslabón y otro, así existen pares rotatorios, prismáticos, cilíndricos, entre otros como se muestra en la Figura 1-2.

⁸ OLLERO, A. (2001). “Robótica, Manipuladores y Robots Móviles”. Madrid: Marcombo; Pagina 17.

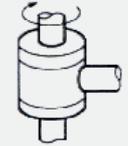
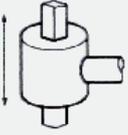
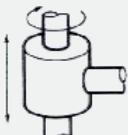
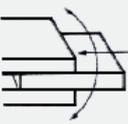
ESQUEMA	ARTICULACIÓN	GRADOS LIBERTAD
	ROTACIÓN	1
	PRISMÁTICA	1
	CILINDRICA	2
	PLANAR	2
	ESFÉRICA (RÓTULA)	3

Figura 1-2: Algunos Tipos de Articuciones para los Robots.⁹

1.3.2 ACTUADORES Y REDUCTORES:

Se denomina como actuadores a los dispositivos que generan las fuerzas o pares necesarios para “animar” la estructura mecánica, es decir que permiten el movimiento de los determinados pares o articulaciones.

Su naturaleza varía según el sistema que utilicen, por lo tanto existen actuadores hidráulicos, eléctricos y neumáticos. Independientemente del tipo de actuador, estos dispositivos reciben la señal desde el computador o micro-controlador del manipulador y de esta manera realizan un movimiento en particular.

Uno de los principales problemas que existe para los actuadores es la necesidad del empleo de elementos reductores que tienen el objeto de adaptar el par

⁹ OLLERO, A. (2001). “Robótica, Manipuladores y Robots Móviles”. Madrid: Marcombo; Pagina 17.

y la velocidad de salida del actuador para el correcto movimiento de los eslabones del robot.

Las características principales de los reductores son¹⁰:

- Bajo peso, tamaño y rozamiento.
- Capacidad de reducción elevada en un solo paso.
- Mínimo momento de inercia.
- Mínimo juego o “Backslash”.
- Alta rigidez torsional.

Tabla 1-1: Características de los Reductores para la Robótica.¹¹

Características	Valores Típicos
Relación de Reducción	50 - 300
Peso y Tamaño [kg]	0.1 – 30
Momento de Inercia [kg m ²]	10-4
Velocidad de Entrada Máxima [rpm]	6000 – 7000
Par de Salida Nominal [Nm]	5700
Par de Salida Máximo [Nm]	7900
Juego Angular [in]	0 – 2
Rigidez Torsional [Nm/rad]	100 - 2000
Rendimiento [%]	85 - 98

Actualmente se ha conseguido obtener actuadores que poseen un accionamiento directo, lo que les permite mover la estructura mecánica sin la necesidad del empleo de engranajes u otras transmisiones. Con esto se logró eliminar los problemas mecánicos inherentes a la aplicación de estos elementos, además el control es más sencillo y rápido.

¹⁰ MOYA, D. (2010). “Modelo y Análisis cinemático de un robot manipulador industrial esférico aplicando el MATLAB”. Quito: Tesis EPN; Pagina 6.

¹¹ MINCHALA, I. (2009). “Fundamentos de la Robótica Industrial (Seminario)”. Quito: EPN – FEPON.

1.3.3 SISTEMA SENSORIAL:

Son elementos electrónicos que permiten la interacción del robot con su entorno. De esta manera le es posible al manipulador tener la capacidad de manejarse en el espacio en el que está destinado. A continuación se realiza una enumeración de las diferentes formas de clasificar a los sensores:

- Directos / Indirectos.
- Activos (generadores) / Pasivos (Modulares).
- Resistivos, capacitivos, inductivos.
- Termoeléctricos, piezoeléctricos, fotoeléctricos.
- Locales / remotos.
- Analógicos / Digitales.
- Entre otros.

1.3.4 SISTEMA DE CONTROL:

Este sistema está encargado de controlar el movimiento del mecanismo a través del tiempo. De esta manera se logra realizar el trabajo para el que el robot está destinado. Este es un sistema de alta complejidad, ya que los modelos matemáticos para el control son complejos.

Existen algunas técnicas de control que se aplican a los robots, entre los que podemos diferenciar los principales:

- Control de Posición: Únicamente se busca controlar la posición del efector final del robot manipulador.
- Control Cinemático: Se controla la velocidad que tiene el conjunto.
- Control Dinámico: Se realiza un control sobre los motores, considerando las propiedades dinámicas del manipulador.
- Control Adaptativo: Es un sistema de control de forma continua y automática que determina la variación de los parámetros del manipulador con respecto a la posición.

1.4 CARACTERÍSTICAS DE LOS ROBOTS MANIPULADORES:

Para poder entender a cabalidad el tema que concierne este trabajo de investigación es necesario determinar algunas características básicas que poseen los robots manipuladores y que permitirá desarrollar el tema con una mejor noción del caso.

1.4.1 CONFIGURACIÓN BÁSICA DE UN ROBOT MANIPULADOR:

Hay que definir que un robot manipulador no es más que un dispositivo que trata de emular un brazo humano, no con la finalidad de parecerse a este, sino de imitar sus movimientos.

Por lo que para poder catalogar y definir la configuración básica de un manipulador se ha simplificado en tres elementos mecánicos, los cuales serán comparados con sus homólogos físicos humanos, como se puede ver a continuación en la Figura 1-3.

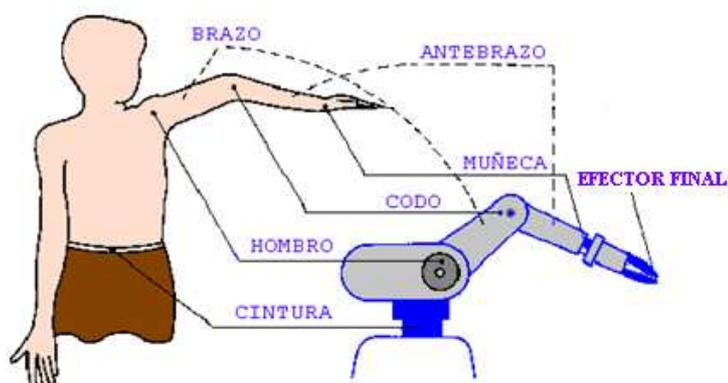


Figura 1-3: Analogía de un Robot Manipulador con el Ser Humano.¹²

Estructura:

La estructura de un robot manipulador, está compuesto generalmente por tres subestructuras que están conectadas una con otra hasta generar la parte más general del robot.

¹² Tomado de: http://cfievalladolid2.net/tecno/cyr_01/robotica/sistema/morfologia.htm

Esta parte contempla tres elementos, que al compararse con los humanos se puede observar lo siguiente:

- Cintura (armsweep): Por lo general este elemento se encuentra en la base del manipulador y permite tener movilidad similar a una cintura humana.
- Hombro (shoulder): Emula la movilidad de un hombro.
- Codo (elbow): Emula la movilidad de un codo.

Muñeca:

En las aplicaciones industriales existen algunos tipos de muñecas, de todas maneras la más común es la que se distingue por tener tres articulaciones independientes que se denominan en el campo de la robótica como:

- Balanceo (Roll).
- Cabeceo (Pitch).
- Guiñada (Yaw).

Efecto Final o Elemento Terminal:

Es el elemento análogo a la mano humana, y está determinada para proporcionar al robot varias posibilidades más de movimiento. Su objetivo es permitir la ejecución de la tarea específica del robot.

Para este elemento se pueden ubicar tenazas, garras o manos mecánicas, herramientas específicas y también sensores.

- Tenazas, garras o manos mecánicas: Estas funcionan con base en un sinnúmero de mecanismos que sirven para que el efecto final pueda manipular un objeto. Se realizan las siguientes acciones: recoger, sostener, mover, etc. Para ejemplos, observe la Figura 1-4.

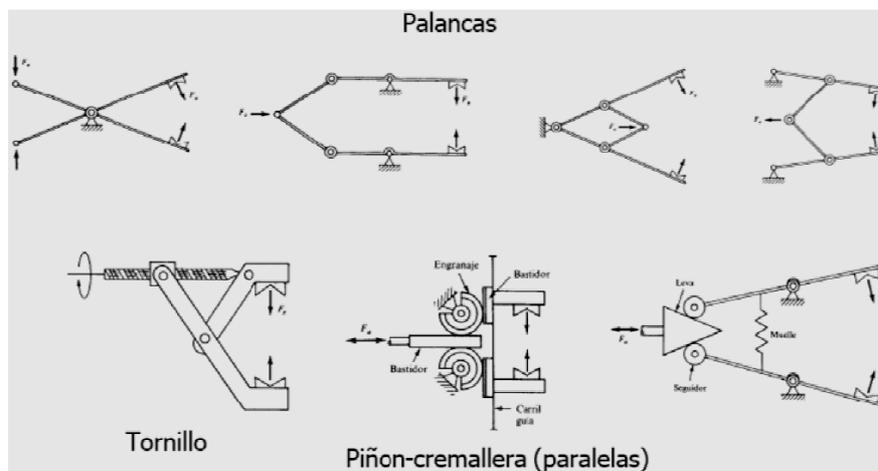


Figura 1-4: Dispositivos de Agarre y Sujeción para Manipuladores Industriales.¹³

- Para las herramientas que se utilizan como efector final se pueden encontrar: pistolas pulverizadoras para pintura y metalizado, equipos de soldadura (por puntos o por arco), taladros, pulidoras, etc. Como se mira en la Figura 1-5.

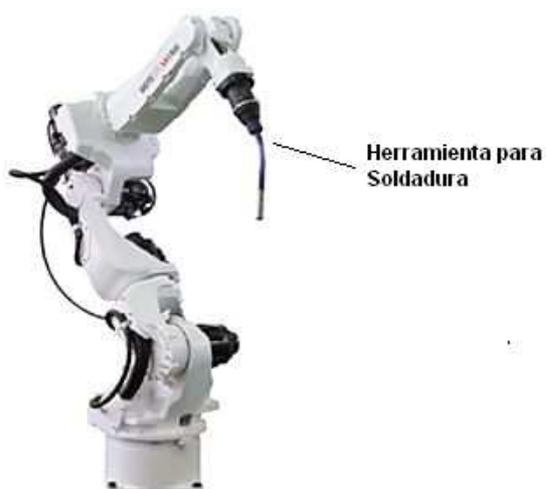


Figura 1-5: Herramienta para Soldadura en un robot Industrial.¹⁴

- Existen algunos robots industriales que están destinados únicamente a poseer en su efector final sensores que se utilizan para la inspección y control de calidad de piezas. De tal manera que se logre un mejor

¹³ AGUINAGA, A. (2005). "Automatización en la Industria, Robótica". Quito: EPN - FIM. Diap. 29

¹⁴ Tomado de: <http://www.directindustry.es/prod/motoman/robots-de-soldadura-al-arco-18302-566543.html>

control y llegar a lugares de difícil acceso. Además se aplican sensores para búsqueda e identificación de objetos.

1.4.2 VOLUMEN DE TRABAJO:

Se denomina volumen de trabajo al conjunto de puntos que pueden ser alcanzados por el punto efectivo del robot manipulador (En español se define como PCH: punto centrado de la herramienta). Observar Figura 1-6.

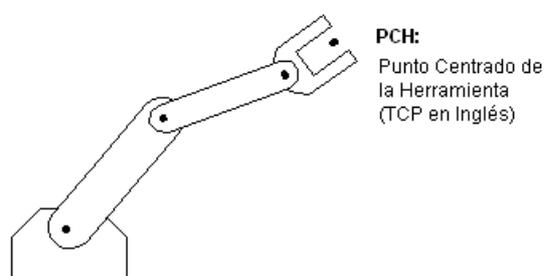


Figura 1-6: Punto Centrado de la Herramienta.¹⁵

Este volumen de trabajo depende del tipo de estructura del robot y de las dimensiones de los eslabones. Por esta razón es que los volúmenes de trabajo son característicos para cada tipo de robot manipulador [Véase la Figura 1-7] y las dimensiones de estos volúmenes serán características por las dimensiones del manipulador.

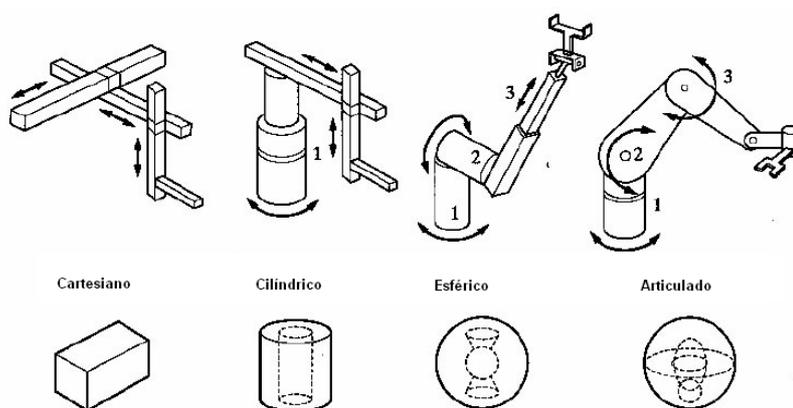


Figura 1-7: Volúmenes de Trabajo para Diferentes Estructuras.¹⁶

¹⁵ Tomado de: <http://tosad89.wordpress.com/>

Este concepto es básico para poder definir las propiedades y posibles aplicaciones del robot, y por ende los robots comerciales traen esta información en su documentación técnica por medio de una vista superior y lateral del volumen de trabajo. Cabe decirse que para este volumen, de las especificaciones, no consta la herramienta final, ya que está depende de la aplicación que se destine al robot.

1.5 CLASIFICACIÓN DE LOS ROBOTS:

Existen algunos tipos de clasificaciones para los robots de tal manera que se los pueda encasillar dentro de un grupo determinado, En este trabajo de investigación solamente se hablará de dos muy utilizadas para así poder establecer una correcta definición del robot que se va a diseñar.

1.5.1 CLASIFICACIÓN POR SU CONFIGURACIÓN ESTRUCTURAL Y TIPO DE MOVIMIENTOS:

Dependiendo del tipo de articulaciones que se utilizan en la estructura se realiza la siguiente clasificación (cabe resaltar que se estará hablando únicamente de la estructura del robot, no de su muñeca o efector final):¹⁶

Robot Cartesiano:

Este es un robot que consta de tres pares prismáticos (3D o PPP). Es muy utilizada en estructuras industriales como pórticos y se los emplea para transporte de cargas. Un bosquejo se observa en la Figura 1-8.

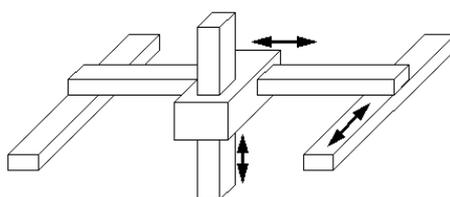


Figura 1-8: Robot Cartesiano.¹⁸

¹⁶ Tomado de: <http://mektronica.com/apuntes.html>

¹⁷ GONZÁLEZ, P., & JIMÉNEZ, M. (s.f.). "Robótica Industrial". Madrid: Instituto de Automática Industrial; Pagina 2-2.

Robot Cilíndrico:

Este caso trata de un robot manipulador que posee un par rotatorio y dos pares prismáticos (2D y 1G). Por lo general se presenta en una configuración RPP. Obsérvese la Figura 1-9.

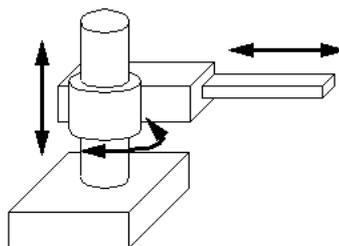


Figura 1-9: Robot Cilíndrico.¹⁹

Robot Polar o Esférico:

En este caso se trata de un robot que tiene dos pares rotatorios y el tercero es un prismático (2G, 1D o estructura RRP). Tiene un buen volumen de trabajo. (Ver Figura 1-10).

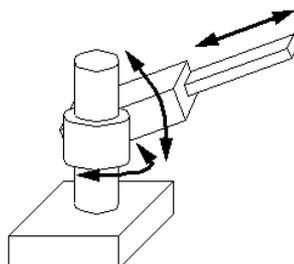


Figura 1-10: Robot Polar.²⁰

Robot SCARA:

Dentro de esta clasificación se encuentran los robots que constan de dos pares rotatorios con respecto a dos ejes paralelos y un prismático en sentido perpendicular al plano como se muestra en la Figura 1-11.

¹⁸ Tomado de: <http://proton.ucting.udg.mx/robotica/r166/r72/r72.htm>

¹⁹ Ibíd.

²⁰ Tomado de: <http://proton.ucting.udg.mx/robotica/r166/r72/r72.htm>

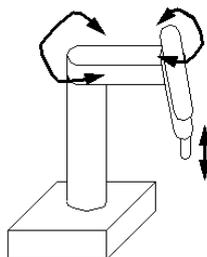


Figura 1-11: Robot SCARA.²¹

Robot Angular:

Se trata de un robot que tiene tres pares rotatorios (3G o RRR). Es muy empleada para robots manipuladores industriales debido a su inmejorable acceso a espacios cerrados y facilidad de construcción [Véase la Figura 1-12]. Además de esto, es la configuración más utilizada en educación y en actividades de investigación y desarrollo. Se le denomina también como “tipo Puma” al considerar sus orígenes en cuanto al Unimation P.U.M.A construido en 1978.

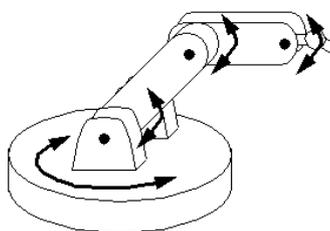


Figura 1-12: Robot Angular.²²

1.5.2 CLASIFICACIÓN BASADA EN EL TIPO DE ENERGÍA DEL ACTUADOR:

Esta forma de clasificar a los robots se basa en las características del actuador que utiliza para su movimiento, por esta razón existen básicamente tres:

Hidráulicos:

Estos actuadores tienen una gran relación par/peso, es decir que tienen pesos y tamaños relativamente pequeños en comparación a la capacidad que poseen para desplazar cargas muy pesadas. Además son rápidos, robustos y baratos.

²¹ Ibíd.

²² Tomado de: <http://proton.ucting.udg.mx/robotica/r166/r72/r72.htm>

Entre sus inconvenientes se encuentran que son propensos a fugas de aceite, lo que además de contaminación, presenta un problema para la actividad que ejerce el manipulador. También se encuentra el inconveniente de que su manutención es más difícil que los otros tipos de actuadores.

Neumáticos:

Estos actuadores utilizan aire comprimido como fluido de trabajo y tienen algunas características similares a los hidráulicos. No tienen una gran relación par/peso, pero funcionan correctamente para cargas medianas.

A diferencia con los hidráulicos, estos actuadores no tienen el grave problema de los neumáticos en cuanto a las fugas, pero es importante determinar que el sistema de compresión del aire resulta ser un punto de desventaja con otros actuadores.

Eléctricos:

Los actuadores eléctricos resultan ser los más fáciles de controlar y mantener de los vistos anteriormente, de todas maneras su relación par/peso no ha sido tan buena a lo largo de la historia. A pesar de esto, en la actualidad se han desarrollado buenas alternativas para suplir este hecho y se pueden encontrar actuadores eléctricos que suplen fácilmente el requerimiento de par/peso.

Existen algunos tipos de actuadores eléctricos dependiendo de las características eléctricas del mismo. Así se puede encontrar motores de corriente continua, motores de corriente alterna, motores tipo paso a paso, etc.

De lo anterior se puede ya definir el robot manipulador que será el objeto de este trabajo de investigación como un ***robot Angular con actuadores eléctricos.***

CAPÍTULO 2

DISEÑO FUNCIONAL DEL MANIPULADOR.

2.1 ASPECTOS PREVIOS AL DISEÑO FUNCIONAL:

El diseño funcional del manipulador comprende de un estudio para determinar la geometría del robot industrial de tal manera que cumpla con ciertas características, tanto del espacio que ocupa, pero fundamentalmente en cuanto a su funcionamiento.

El objeto del presente estudio es realizar un diseño de un robot manipulador angular “tipo PUMA” tomando en cuenta lo siguiente:

- Debe tener 6 grados de libertad (Utilizando sus 6 ejes como se muestra en la Figura 2-1).
- Debe tener una capacidad de levantar pesos de 20 kg.
- Debe utilizar actuadores eléctricos.

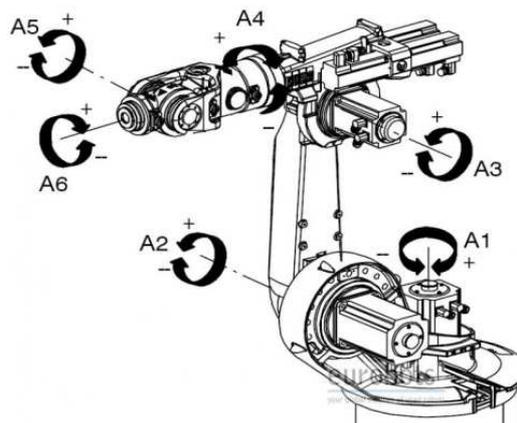


Figura 2-1: Definición de los 6 ejes que posee el robot.²³

²³ Tomado de: <http://www.eurobots.es/desc/id/19/KUKA-KR15-robots-es.html>

Además hay que considerar que este robot no estará destinado a realizar únicamente una función, sino que al estar destinado a la investigación de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la E.P.N., será sometido a varias aplicaciones.

Con estos datos se procederá a realizar la aproximación geométrica del diseño. Para lo cual, no se utilizará un planteamiento de un problema único, sino el de un volumen de trabajo que asegure que el manipulador sea capaz de realizar una gran variedad de acciones dentro de este espacio físico. Posterior a esto se comprobará que este volumen cumple con ciertas tareas típicas del robot.

2.2 DETERMINACIÓN DEL VOLUMEN DE TRABAJO:

Para poder realizar el volumen de trabajo deseado para el robot manipulador de este trabajo de investigación es necesario tomar en cuenta algunas consideraciones.

2.2.1 DEFINICIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL VOLUMEN DE TRABAJO:

Se vio en el capítulo anterior que los robots manipuladores industriales tienen la característica de poder trabajar dentro de un volumen, que es generado por la trayectoria posible del PCH. En el caso del robot angular tipo puma, el volumen ideal descrito es el de una esfera hueca, esto debido básicamente por la naturaleza de las articulaciones del robot (rotatorias).

Como era de esperarse este volumen se ve disminuido debido a condiciones constructivas que evita que el robot tenga tanta libertad de moverse y convertir el volumen en una perfecta esfera hueca. En la realidad el volumen dependerá de la capacidad de los actuadores y de las interferencias que existen entre eslabones. A continuación se puede observar el volumen de trabajo de un manipulador angular industrial "tipo PUMA" en la Figura 2-2.

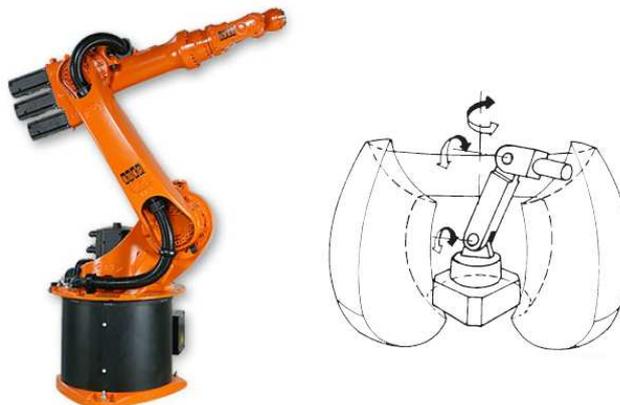


Figura 2-2: Volumen de Espacio de un Manipulador Angular “Tipo Puma”²⁴

2.2.2 CONSIDERACIONES DE FUNCIONALIDAD:

El volumen de trabajo debe proveernos la oportunidad de realizar una amplia gama de actividades, desde las simples cuestiones de movimiento de objetos, hasta tareas más específicas como la soldadura o pintura de una superficie.

Hay que considerar que otro objetivo de este trabajo de investigación es el de diseñar un manipulador que tenga las mismas capacidades de llevar a cabo las tareas que ya realizan los robots industriales que son similares y que existen en el mercado actual, por lo tanto al momento de considerar el volumen de trabajo es importante utilizar a estos como referencia.

Para realizar el diseño geométrico del robot y poder establecer el cumplimiento de la funcionalidad del manipulador, se realizarán tres actividades que deberán cumplirse a cabalidad dentro de este volumen por definirse (estas actividades serán las que se realizará en el ambiente de simulación que se hablará en el Capítulo 8).

Las actividades a realizar son:

²⁴ Tomado de: SMUTNÝ, V. (s.f). “*Kinematika*”.

<http://cmp.felk.cvut.cz/cmp/courses/ROB/roblec/kinematika-noteeng.pdf>. Diapositiva 14.

- Mover un peso muerto de 20 kg de un punto A hasta un punto B.
- Realizar un cordón de soldadura entre dos placas planas.
- Pintar una superficie rectangular.

2.2.3 CONSIDERACIONES DE ESPACIO:

Por obvias razones, el volumen de trabajo debe estar sujeto a las condiciones de espacio en el que se desenvolverá el manipulador. De esta manera se establece ciertas limitaciones en cuanto a la movilidad del robot para que pueda desenvolverse adecuadamente en el espacio que le rodea.

Generalmente estos robots poseen un espacio determinado por líneas de ensamblaje o estaciones de trabajo, por lo que su volumen de acción varía dependiendo de esto. Además por lo general estos robots están destinados a realizar una o máximo tres actividades en un periodo de tiempo pequeño, de lo cual se establece un uso muy restringido de su volumen total de trabajo.

Este no resulta ser es el caso descrito en el párrafo anterior, debido a que el objetivo de este trabajo de investigación es realizar un primer paso para la construcción de un manipulador industrial para la facultad de Ingeniería Mecánica de la E.P.N. De esta manera el robot seguramente será parte de un amplio campo de aplicaciones y pruebas, lo que requerirá una utilización más amplia de su volumen de trabajo.

2.2.4 ESTABLECIENDO EL VOLUMEN DE TRABAJO DESEADO:

Tomando en cuenta las consideraciones anteriores, se determinará el volumen de trabajo deseado y que servirá como base para la definición de la geometría del robot manipulador industrial.

Debido a que se desconoce el lugar que ocupará el robot industrial dentro de la infraestructura de la Facultad de Ingeniería Mecánica, entonces será difícil realizar

una aproximación del espacio según su ubicación. Por esta razón se asumirá un volumen basándose únicamente en la funcionalidad que tendrá.

Al clasificar las actividades a las que estaría destinado a realizar dentro de dos grupos encontramos lo siguiente:

Levantar pesos:

Al momento de mover un tanque de gas doméstico semivacío o vacío de un lugar a otro entonces se tiene que saber que:

- El agujero que se utiliza para mover el tanque está a una altura de 600 milímetros.
- El agujero tiene unas dimensiones de 60 milímetros y tiene un ancho de 100 milímetros, como se indica la Figura 2-3.

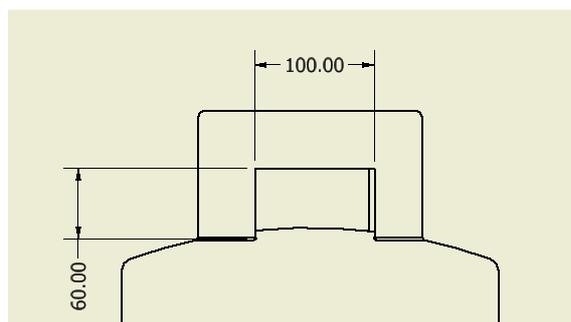


Figura 2-3: Tanque de 15kg de GLP.

Realizar actividades similares a un brazo humano:

Estas actividades incluyen a: Soldadura, pintura con rociador. Cuando se realicen estas actividades el robot deberá emular el trabajo similar al de un brazo humano en la misma actividad. De esta manera la longitud del brazo humano será un buen ejemplo de lo necesario en cuanto a la capacidad espacial del manipulador.

- De acuerdo al estudio del “*homo quadratus*” de Leonardo DaVinci, se estima que la longitud perfecta del brazo de un varón debe ser 13/40 de

la altura del mismo²⁵. Ahora según un estudio realizado por el Centro de Control de enfermedades de los EEUU (CDC siglas en inglés) un hombre promedio mide 176.2 cm²⁶, por lo que la longitud promedio del brazo es igual aproximadamente a 573 milímetros.

En lo que respecta a la altura vertical sería interesante indicar que las actividades serían realizadas a diferentes alturas. Por ejemplo la soldadura se realizaría encima de una mesa típica, por lo que:

- Una mesa promedio para soldar tiene una altura de entre 700 a 800 milímetros.²⁷

Por lo tanto para resumir y generalizar los aspectos previos:

- El robot manipulador debe tener un alcance horizontal que supere al ser humano. Al ser la longitud del brazo humano de aproximadamente 600 milímetros, entonces una longitud razonable para el manipulador sería de 1200 milímetros desde el origen que estará situado en el eje de la base, hasta el elemento porta-herramientas. Esto se muestra en la siguiente Figura 2-4.

²⁵ Santa Bárbara C.E.S. (s.f.). "El Arte y las Matemáticas". Recuperado el 13 de Septiembre de 2011, de Educa Madrid: http://www.educa.madrid.org/portal/c/portal/layout?p_l_id=34655.53

²⁶ Ogden, C. L., Fryar, C. D., Carroll, M. D., & Flegal, K. M. (2004). "Mean Body Weight, Height, and Body Mass Index", United States 1960-2002. CDC: Advanced Data.

²⁷ Ramis, M. (Septiembre de 2003). "La Ergonomía". Recuperado el 13 de Septiembre de 2011, de Artiflexbalear: <http://www.artiflexbalear.org/ergonomia.htm>

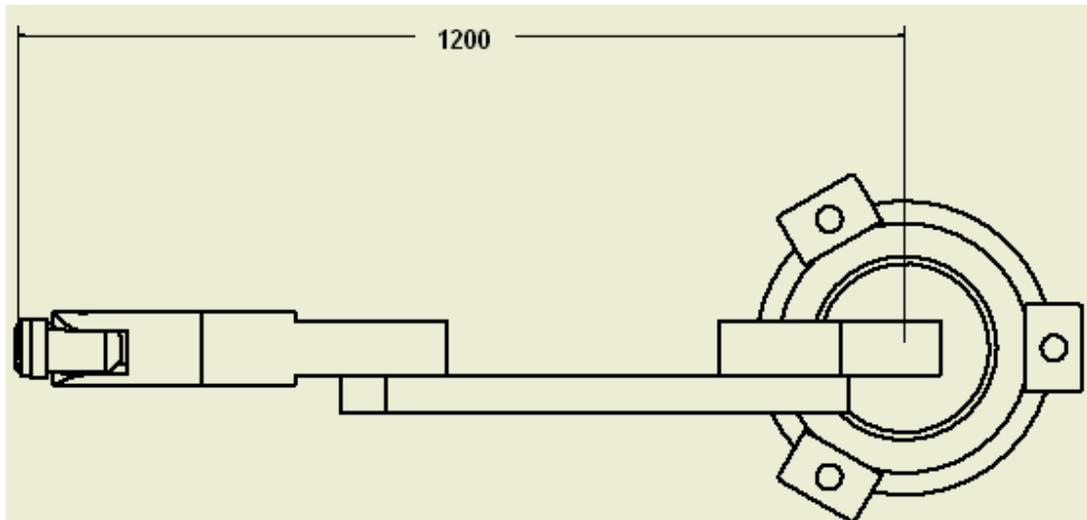


Figura 2-4: Alcance del Robot Manipulador.

- En cuanto a la magnitud de su alcance vertical, por lo visto anteriormente, sus aplicaciones no serán de mayor altura. Además considerando que su base se sujetará a una estructura o mesa promedio, entonces la altura máxima que se debería conseguir es de entre 700 milímetros.

2.3 DETERMINAR LA CONFIGURACIÓN DEL ROBOT:

Existen dos configuraciones que me permiten obtener tener el volumen de trabajo deseado y que además cumplan con la condición de tener pares cinemáticos rotatorios entre sus eslabones. La primera es la conocida como configuración de “paralelogramo”²⁸ y se muestra en la Figura 2-5.

Esta configuración se distingue por tener una misma línea perpendicular a los ejes de los pares rotatorios, es decir que sus eslabones están alineados a un mismo plano.

²⁸ GONZÁLEZ, P., & JIMÉNEZ, M. (s.f.). “Robótica Industrial”. Madrid: Instituto de Automática Industrial; Pagina 1-14.

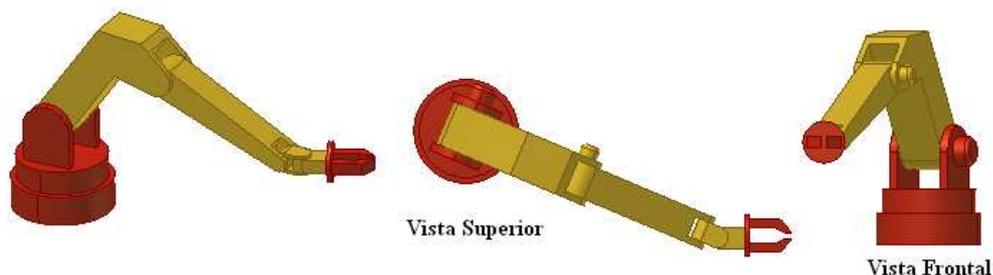


Figura 2-5: Robot con configuración de Paralelogramo.

Por otro lado se encuentra la configuración conocida como la angular o tipo “PUMA”, en la cual se observa cómo sus eslabones no se encuentran dentro de esta línea perpendicular a los ejes de rotación de sus pares giratorios, sino que están a una determinada distancia uno de otro [Véase la Figura 2-6]. Esto le proveyó de una capacidad formidable para aumentar su movilidad sin interferencias entre sus propios eslabones dándole mayor capacidad de espacio de trabajo.



Figura 2-6: Configuración del Robot angular tipo “Puma”.²⁹

Esta última será la escogida para este trabajo de investigación debido a sus innumerables aplicaciones y ventajas de movilidad.

Ahora bien, dentro de esta configuración específica del robot manipulador será necesario también determinar la configuración de cada uno de sus eslabones para así encontrar una apropiada geometría del robot.

²⁹ Tomado de: <http://robosure.blogspot.com/search/label/articulated%20robot>

2.3.1 CONFIGURACIÓN DEL CUERPO:

El cuerpo del robot manipulador para la configuración angular tipo PUMA, puede variar en cuanto a su forma según las necesidades del mismo. En un inicio este cuerpo se realizó bastante alto en referencia a su base o bastidor, de forma vertical, con el fin de obtener un volumen de trabajo de mayor altura (en referencia al piso) y además permitir que el robot pueda llegar a moverse sin interferencia entre la superficie en la que se asienta la base y la herramienta. Esto se puede observar en la Figura 2-7.



Figura 2-7: Robot Unimate PUMA 500, con cuerpo de altura vertical en referencia a su base.³⁰

Esta configuración fue muy utilizada y útil para muchas aplicaciones, no obstante tiene una gran desventaja y es el hecho de que para cargas grandes se requiere un cuerpo más robusto, de tal manera que el par que genera la carga en el extremo del robot no dañe la estructura del mismo.

Por esta razón, para aplicaciones de cargas mayores se ha utilizado un cuerpo más robusto y con menor altura. De esta manera se evitan problemas estructurales.

Esto trajo otro inconveniente, y es el hecho de que al ser de menor altura se genera interferencia con el antebrazo del robot, limitando ostensiblemente su movilidad para el espacio inferior al plano en el que se encuentra su base.

³⁰ Tomado de: <http://roucab.blogspot.com/2011/06/robots-que-han-marcado-la-historia-de.html>

Para esto se definió que el cuerpo debe estar “salido” del eje en el que rota con la base como se ve en la Figura 2-8. Así se evita que exista esta interferencia pero se mantiene el cuerpo de menor altura y se logra hacerlo robusto sin añadir mayor peso a la estructura.

La altura perdida por esta configuración del cuerpo se compensa con la longitud del antebrazo y del brazo en sí.



Figura 2-8: Robot KUKA KR15 con cuerpo de menor altura y desplazado.³¹

Debido a que la carga para la cual el robot se va diseñar es de un máximo de 20kg, entonces esta segunda configuración del cuerpo será la escogida.

2.3.2 CONFIGURACIÓN DEL BRAZO:

El brazo del robot es una pieza muy importante por lo que su geometría determinará muchas condiciones constructivas y de funcionalidad. Por esta razón se escogerá entre la configuración más adecuada.

Al igual que en el caso anterior, el robot precursor de esta clasificación de robots industriales (el Unimate PUMA) establece una configuración de brazo capaz de albergar en su interior a los mecanismos y servomotores que generan el movimiento tanto del brazo, como del antebrazo (como se observa en la Figura 2-9).

³¹ Tomado de: <http://www.eurobots.es/desc/id/19/KUKA-KR15-robots-es.html>

Así su geometría era completamente dependiente del tamaño de los elementos y cables que contenía.

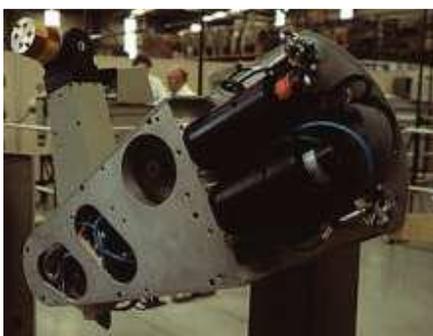


Figura 2-9: Antebrazo de un Unimate PUMA.³²

Ahora bien, en la actualidad para robots industriales modernos este uso del antebrazo está un poco relegado para manipuladores de baja capacidad de carga y de funcionalidad. Tomando en consideración lo dicho en el numeral anterior sobre la longitud del brazo, en la actualidad no se utiliza este para alojar estos mecanismos, sino simplemente como un elemento estructural (puede alojar unos pocos cables, pero nada más).

Esto simplifica en gran manera su geometría, y además hace que los servomotores se encuentren directamente acoplados a los ejes, lo que simplifica el control de los mismos. Por estas razones, esta será la configuración elegida para el objeto de este trabajo de investigación.

2.3.3 CONFIGURACIÓN DEL ANTEBRAZO:

Para la configuración general del robot “tipo PUMA” el antebrazo del robot históricamente ha tenido dos opciones constructivas. La primera trata de colocar el antebrazo aún más distante del eje de rotación del par de rotación entre el cuerpo y la base (como se observa en la siguiente Figura 2-10). Esto ha permitido obtener algunos beneficios. Por ejemplo la posibilidad de no tener interferencias entre el antebrazo y el resto de robot, y por lo tanto optimizar su espacio de trabajo.

³² Tomado de: <http://www.sciencephoto.com/media/344110/view>



Figura 2-10: Robot Unimate PUMA 200, con configuración de brazo distante.³³

La segunda configuración para el antebrazo lo sitúa en la misma línea que el eje número 1. Es decir que al contrario de la primera configuración, esta presenta un brazo sin mayor distancia existente entre el eje de rotación del cuerpo y su eje de acción, tal y como se ilustra en la Figura 2-11.



Figura 2-11: Robot Unimate PUMA 560, con configuración en línea.

Si bien esta configuración no tiene la ventaja espacial que la primera en cuanto a su espacio de trabajo, esta presenta ventajas estructurales al momento de minimizar la distancia que existe entre el eje número 1 y el efector que levanta la carga.

Por esta razón esta última configuración se acostumbra a usar para robots de mayor capacidad de carga y por lo tanto será la utilizada en este trabajo de investigación.

³³ Tomado de: <http://www.prsrobots.com/puma200.html>

2.3.4 CONFIGURACIÓN DE LA MANO (EFECTOR FINAL):

Como se ha dicho anteriormente el robot manipulador industrial estará destinado a varias tareas, las cuales requerirán de diferentes efectores finales. Debido a esto, la definición del efector final no será objeto de esta investigación.

De todas maneras, el robot tendrá una configuración en su eslabón previo al efector capaz de albergar cualquier tipo de herramienta que se encuentra en el mercado, como se puede observar en la Figura 2-12.



Figura 2-12: Acople para efectores finales de un robot ABB IRB2600ID.

2.4 GEOMETRÍA DEL ROBOT:

A continuación se propondrá la geometría de cada subsistema del brazo del robot manipulador para que cumpla con los requerimientos de solución de los problemas y que además sea capaz de generar el volumen de trabajo deseado.

Esta geometría tendrá que responder a las necesidades de los movimientos angulares que es capaz de realizar el robot manipulador tipo "PUMA".

2.4.1 ESLABÓN TIERRA:

El eslabón tierra corresponde a la base sobre el cual el robot estará asentado. Este será denominado como el eslabón número "0" o bastidor y no tiene movimiento alguno.

Este elemento será al que se le denomine como referencia y por lo tanto tendrá el origen de las coordenadas del robot $P_0 [0, 0, 0]$.

En este caso y al tomar en cuenta la mayoría de robots industriales de este tipo, deberá estar sujeto a otra superficie. Es decir que el eslabón tierra del manipulador tendrá que tener la capacidad de poder adherirse, a través de pernos de anclaje, a cualquier superficie de trabajo, ya sea esta una mesa, ménsula, pared, estructura, etc. Esta estructura está determinada en la Figura 2-13.

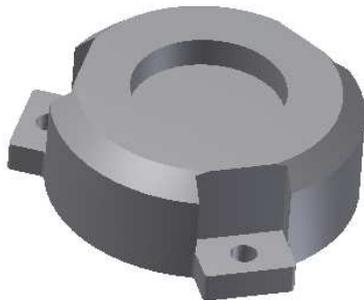


Figura 2-13: Geometría Eslabón Tierra del Robot Manipulador.

2.4.2 ESLABÓN CUERPO:

Este será denominado el elemento “1” o cuerpo del manipulador y tendrá la necesidad de formar un par rotatorio con el eslabón tierra. Este cuerpo tendrá una altura máxima de 250 milímetros.

Su geometría está definida en la siguiente Figura 2-14:

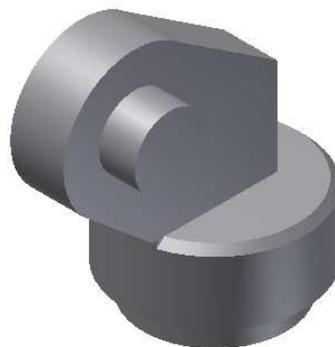


Figura 2-14: Geometría del Cuerpo del Robot Manipulador.

2.4.3 ESLABÓN BRAZO:

Elemento denominado con el número 2, es el que está destinado a formar otro par rotatorio entre el cuerpo y el antebrazo.

La geometría sugerida para este elemento se puede observar en la siguiente Figura 2-15

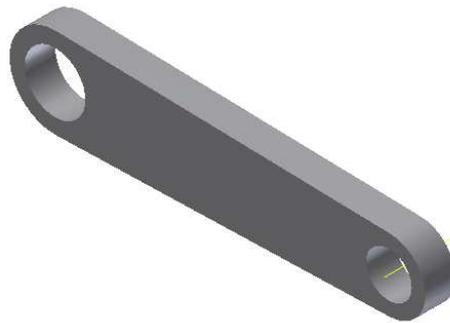


Figura 2-15: Geometría del Brazo del Robot Manipulador.

2.4.4 ESLABÓN ANTEBRAZO:

En este elemento estructural es importante reconocer que históricamente en los robots manipuladores han existido dos geometrías fundamentales. La primera consta de un antebrazo con geometría cilíndrica y la otra es la geometría de prisma recto de base rectangular, o similares.

En este caso se realizará un diseño en base a una geometría cilíndrica ya que, con respecto a la prismática, se podría decir que presenta unas amplias ventajas con relación a la construcción u obtención de un elemento de estas características en el mercado local.

De lo observado anteriormente se define la geometría de este elemento, denominado como el número "3". Su geometría se define como se observa en la Figura 2-16.

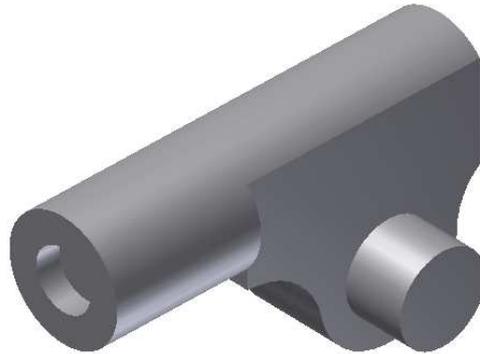


Figura 2-16: Geometría del Antebrazo del Robot Manipulador.

2.4.5 MUÑECA:

Este elemento deberá consistir de un subconjunto de pares de tal manera que se puedan obtener tres grados de libertad independientes. En este elemento se ubicará el portaherramientas que permitirá acoplar una gran variedad de instrumentos al robot manipulador.

Tomando en consideración que no debe perder el tono de los demás eslabones, este elemento será determinado considerando las facilidades posibles al momento de su construcción.

La geometría se la pueda observar en la Figura 2-17:



Figura 2-17: Geometría de la Muñeca del Robot Manipulador.

2.4.6 GEOMETRÍA FINAL DEL ROBOT MANIPULADOR:



Figura 2-18: Geometría final del robot manipulador.

CAPÍTULO 3

DISEÑO MECÁNICO ESTRUCTURAL DEL ROBOT.

3.1 GENERALIDADES:

El diseño mecánico del robot consta del estudio estructural del manipulador de tal manera que sus dimensiones, materiales, componentes y demás elementos del robot cumplan con las especificaciones constructivas.

Hay que entender que, según J.J. CRAIG, existen dos enfoques que se deben considerar al momento de diseñar un robot³⁴:

- La primera consiste en construir un robot especializado para una tarea específica, y por lo tanto en este caso es posible determinar las características mínimas necesarias para su funcionamiento y esto a su vez generará una menor dificultad de diseño.
- La segunda es el de construir un robot universal que pueda realizar una amplia variedad de tareas, para esto caso entonces se obvia esta determinación de las características mínimas de funcionamiento y entonces se busca englobar una gran variedad de parámetros y combinaciones funcionales, lo que a su vez dificulta el proceso de diseño.

El segundo es el caso que nos acaece en este trabajo de investigación, ya que como se observó en el primer y segundo capítulo, el robot manipulador será utilizado en la Facultad de Ingeniería Mecánica y por ende estará sujeto a un campo muy amplio de aplicaciones e investigaciones.

³⁴ CRAIG, J. J. (2006). *“Introducción a la Robótica”*. México: Pearson. Página 11

De todo esto se debe recalcar que en este capítulo, que engloba el diseño mecánico estructural del manipulador, solamente se tratarán temas de diseño de los elementos mecánicos que componen el sistema, dejando de lado para otro capítulo la realización del estudio de elección y ubicación de los actuadores, los sistemas de transmisión, la rigidez estructural y los sensores de posición interna.

Por último en estas generalidades sería importante decir que el enfoque a darse en este trabajo será el de aplicar herramientas computacionales actuales al diseño de este robot. Por lo que, además de utilizar métodos convencionales de diseño de los elementos, se aprovechará la gran herramienta que en la actualidad presenta el Autodesk Inventor® en su plataforma para la simulación de elementos y materiales ante los esfuerzos y reacciones que se puedan generar.

3.2 DEFINICIONES INICIALES:

Antes de comenzar a determinar el diseño mecánico del robot es importante realizar unas importantes definiciones, entre las cuales:

3.2.1 ALCANCE DEL DISEÑO MECÁNICO ESTRUCTURAL DEL ROBOT MANIPULADOR:

Es importante definir inicialmente el alcance que tendrá este capítulo dentro de este trabajo de investigación. De esta manera se podrá conocer ordenadamente como se debe proceder para la consecución de estos objetivos.

En este capítulo se realizará el diseño Mecánico estructural de los eslabones del robot, en el cual se verificará su geometría, características físicas, resistencia y su disponibilidad dentro del mercado o a su vez su capacidad de hacerlo a base de materias primas.

Siendo el uso de Software uno de los objetivos primordiales de este trabajo de investigación, en este capítulo se utilizará las herramientas existentes para el diseño dentro del Autodesk Inventor 2012, basándose en su ambiente de simulación por

elementos finitos y el generador de componentes. Hay que definir que no entra dentro de los alcances de este proyecto, el identificar y explicar el funcionamiento de estas herramientas de diseño (aunque si se hará una breve reseña de cada uno), sino que únicamente se lo utilizará como un medio para obtener la justificación de las características físicas de los elementos que conforman el robot manipulador.

3.2.2 MODIFICACIONES ESTRUCTURALES DE LOS ESLABONES DEL ROBOT:

Antes de comenzar a realizar el análisis estructural se debe definir que por facilidad de construcción y debido a las limitaciones que presenta la industria de nuestro país, se acomodará el diseño de este robot manipulador para que sus elementos y componentes sean fáciles de adquirir o construir.

Debido a lo dicho anteriormente, se procederá, en este trabajo de investigación, a tratar de acomodar el diseño funcional y las características geométricas del robot manipulador a los elementos estructurales disponibles en el mercado actual de nuestro país. De esta manera se buscará acoplar el diseño de ciertos elementos a perfiles estructurales normalizados.

Además, en los elementos del robot que no sea posible acomodar un elemento estructural normalizado, se buscará diseñarlo de tal manera que su construcción sea factible utilizando elementos comunes (como planchas, platinas, etc.) y procesos de construcción comunes (como rolado, corte, soldadura, etc.).

3.2.3 MATERIAL DE LOS ELEMENTOS DEL ROBOT:

En términos generales, los elementos de los robots manipuladores (eslabones), se construyen con materiales resistentes y livianos. Por esta razón se

acostumbra usar aleaciones de aluminio, siendo uno de los preferidos el duraluminio³⁵.

De todas maneras, por la realidad económica y de mercado de nuestro país, se realizará el diseño mecánico del robot para este trabajo de investigación, con un material bastante utilizado y conocido en el medio: el acero ASTM A36 (A menos que se indique lo contrario). Para esto es importante definir que el diseño se debe acomodar al aumento de peso que este material otorgaría a la estructura general.

Las características de este material a utilizarse³⁶, son:

- Densidad: 7850 g/cm³
- Módulo de Young: 210 GPa.
- Coeficiente de Poisson: 0,3
- Fluencia: 250 MPa.
- Última Resistencia: 410 MPa.

3.2.4 POSICIÓN CRÍTICA DEL ROBOT:

Para poder alcanzar los objetivos de este trabajo, y en particular de la definición del diseño mecánico estructural, es importante determinar la posición crítica del robot manipulador en funcionamiento.

La posición crítica se define como la configuración espacial del robot en la que se requiere el mayor torque en sus actuadores para poder moverlo, cuando está cargando la mayor carga para la que fue diseñada o para realizar la tarea a la que fue destinado.

³⁵ Confróntese con el estudio realizado por GARCÍA T., AGUILAR M. & PÉREZ V. (2008). *“Diseño Manipulador Robótico de cinco grados de libertad como herramienta para un sistema de Detección de Fallas mediante ultrasonido derivado del Proyecto de Investigación SIP 2008 2653”*. México D.F.: Unidad Azcapotzalco. Capítulo 3 página 62.

³⁶ Tomado de las normas de Acero que utiliza ACASA (Siderúrgica de Caldas): <http://www.acasa.com.co/acero-astm-36-ntc-1920-1>

En investigaciones como las de Iñigo³⁷ y las de García, Aguilar & Pérez³⁸ se puede observar cómo se utiliza este concepto para el diseño mecánico del robot manipulador. Citando a Iñigo:

“El caso peor con respecto a los actuadores ocurre cuando el brazo está totalmente extendido (o sea, α_2 y α_3 iguales a cero) y con carga máxima.”³⁹

3.3 APROXIMACIÓN DEL DISEÑO ESTRUCTURAL DE LOS ESLABONES EN FUNCIÓN A LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES.

Como ya se estableció previamente, este trabajo de investigación basará sus esfuerzos en generar una estructura del robot manipulador basada en perfiles estructurales y elementos de construcción comunes en el mercado local. Debido a esto se realizará una primera aproximación al análisis estructural del robot en base a la geometría ya definida en el capítulo anterior (por lo que se buscará conservar las dimensiones de los elementos, especialmente las longitudes), las características que presenta cada elemento y por supuesto a la naturaleza de las fuerzas y reacciones a las que estará sujeto. A continuación se realizará esta aproximación de cada eslabón.

Esta aproximación será la que se analizará mediante el ambiente de simulación de elementos finitos del Autodesk Inventor 2012 para hacerle mejoras, redefinirla o justificarla. Por esta razón será necesario definir que los parámetros de los materiales utilizados son escogidos empíricamente teniendo en consideración las condiciones de trabajo, la funcionalidad del elemento y la disponibilidad del mercado

³⁷ Confróntese con lo realizado por IÑIGO M., R. (2002). *“Robots Industriales Manipuladores”*. Barcelona: Ediciones UPC. Capítulo IX, páginas 135 - 144.

³⁸ Confróntese con el estudio realizado por GARCÍA T., AGUILAR M. & PÉREZ V. (2008). *“Diseño Manipulador Robótico de cinco grados de libertad como herramienta para un sistema de Detección de Fallas mediante ultrasonido derivado del Proyecto de Investigación SIP 2008 2653”*. México D.F.: Unidad Azcapotzalco. Capítulo 3 páginas 62 – 83.

³⁹ IÑIGO M., R. (2002). *“Robots Industriales Manipuladores”*. Barcelona: Ediciones UPC. Capítulo IX, página 136

local del material. Una vez realizado este diseño se lo someterá a la simulación para determinar si las asunciones fueron correctas o si se las debe corregir.

3.3.1 APROXIMACIÓN DE LA BASE O TIERRA.

Como se observó en el capítulo anterior [Véase página 31: Eslabón tierra:], este elemento está compuesto por un solo sólido. Primeramente intencionado para que sea un solo bloque generado por fundición.

Ahora bien, este elemento debe contener:

- **La Base de Soporte del robot:** A través de este elemento todo el conjunto se anclará a la superficie donde se colocará el manipulador. Por lo tanto requerirá tener las superficies donde se colocarán los pernos de anclaje.
- **El Eje Número 1:** Si bien este elemento es estático, debe alojar al eje número 1 que será el encargado de realizar el movimiento del cuerpo.

Así mismo, la base o tierra estará sujeta a un gran conjunto de esfuerzos y fuerzas que tendrán una gran magnitud (debido a que todo el peso de la estructura reposará sobre esta) por lo que su construcción debe permitir no solamente alojar los elementos dichos anteriormente, sino también soportar a estas fuerzas y esfuerzos.

Por esta razón se eligió las siguientes estructuras para su conformación:

- **Base:** Será una plancha de 10 mm de espesor de forma circular con tres “orejas” para los alojamientos de los pernos de anclaje.
- **Cuerpo:** Será una plancha de 6 mm de espesor que será rolada para formar un cilindro vacío encima de la base. Estos dos se unirán por soldadura.
- **Superior:** Se trata de una plancha de 10 mm de espesor de forma circular. Se la soldará al cuerpo.

La primera aproximación del elemento base o tierra quedará de la siguiente manera como se observa en la Figura 3-1:

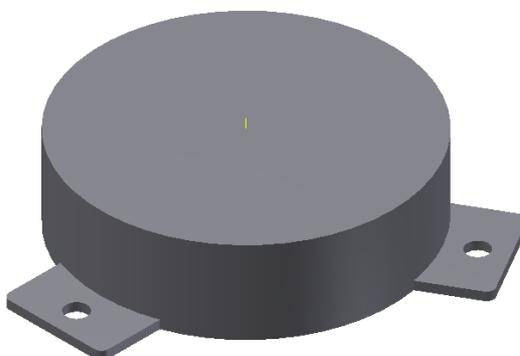


Figura 3-1: Aproximación del diseño estructural del eslabón base o tierra.

3.3.2 APROXIMACIÓN DEL CUERPO.

El eslabón cuerpo hace un trabajo fundamental dentro de la estructura y está ampliamente relacionada con muchos de los demás elementos del robot. Por esta razón la aproximación dada debe ser definida no solamente en base su funcionalidad y características, sino de otros eslabones como la base, el brazo y el antebrazo.

En el capítulo pasado se realizó una aproximación geométrica más atrás [Véase la página 32: Eslabón Cuerpo:], en la cual se trata de un sólido generado con las dimensiones especificadas, también por fundición.

Para poder realizar la aproximación hay que tomar en cuenta que este elemento contendrá:

- **El Eje 1:** Al igual que en el eslabón tierra, este elemento tendrá que alojar en su interior al eje 1. Además dentro de este eslabón será necesario colocar el mecanismo que hará funcionar al par rotatorio. (si es que existe alguna duda sobre la ubicación de los ejes y pares rotatorios diríjase a la Figura 2-1, página 19).
- **El Eje 2:** También alojará al eje 2 que será el que proporcione el movimiento entre el cuerpo y el brazo. Al igual que en el caso del eje 1,

el cuerpo será el elemento que tendrá en su interior los mecanismos que harán funcionar al par rotatorio.

- **Servomotor 1:** Hay que considerar que este elemento será el que debe soportar al servomotor 1 que será encargado de mover el par rotatorio 1 (entre el cuerpo y la base).
- **Servomotor 2:** Así mismo, este será el que debe soportar al servomotor 2 que será encargado de mover el par rotatorio 2 (entre el cuerpo y el brazo).

Ahora bien, en cuanto a los esfuerzos y fuerzas que este elemento debe soportar, podemos decir sin error que este eslabón tiene una característica similar al de la base. Es decir que para el cuerpo existe una gran cantidad de esfuerzos y fuerzas que ocurren en esta dependiendo de la actividad que esté realizando el robot, llegando a presentar simultáneamente en diferentes partes del mismo en ciertas ocasiones.

Por esta razón y considerando que alojará a los elementos antes mencionados para la aproximación del cuerpo se consideró lo siguiente:

- **Base:** Será una plancha de 4 mm de espesor de forma circular.
- **Cuerpo:** Será una plancha de 4 mm de espesor que será rolada para formar un cilindro vacío encima de la base. Estos dos se unirán por soldadura.
- **Superior:** Se trata de una plancha de 4 mm de espesor de forma circular. Se la soldará al cuerpo.
- **Soporte para el Brazo:** Es la composición de dos planchas de 4 mm de espesor con la figura determinada que serán soldados a una plancha de 4 mm rolada y doblada para que encaje correctamente.

Finalmente la aproximación de este elemento quedó como se observa en la Figura 3-2:

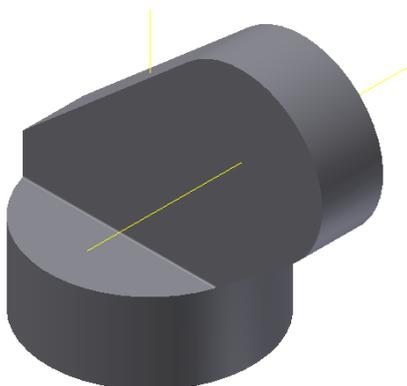


Figura 3-2: Aproximación del diseño estructural del eslabón cuerpo.

3.3.3 APROXIMACIÓN DEL BRAZO.

Al referirnos al diseño funcional que se realizó sobre este elemento es posible determinar que se trata únicamente de un elemento de transmisión o transición, ya que dentro de él no existirán ni mecanismos ni elementos que generen el movimiento.

Debido a esto se realizó una geometría en la que constaba un solo bloque sólido de una pieza que sería realizada por fundición y que presentaba dos extremos circulares, los cuales el primero era de mayor diámetro que el anterior más atrás [Véase la página 33: Eslabón brazo:].

A diferencia de los anteriores, este elemento no tendrá que alojar ni contener a ningún otro elemento, por lo que solamente tendrá que permitir el montaje y desmontaje de los Ejes 2 y 3.

De igual manera, este eslabón se encuentra bajo ciertas fuerzas y esfuerzos bastante definidos, los cuales serán enumerados a continuación:

- **Flexión:** Al igual que una viga este elemento estará sujeto a flexión, en especial cuando se encuentre en su posición completamente horizontal.
- **Compresión:** Cuando el robot esté realizando una actividad y este elemento se encuentre por encima del plano horizontal, llegando a su

punto máximo cuando el efector final esté en su posición completamente vertical.

- **Tracción:** Cuando el robot realice actividades en las que este elemento se encuentre por debajo del plano horizontal. Debido a limitaciones constructivas, éste nunca llegará a tener su valor máximo (ya que no puede estar completamente vertical con el efector final hacia abajo).
- **Torsión:** Debido a que este es el único elemento que se encuentra a una distancia determinada del plano vertical común del robot, se podrá encontrar un pequeño esfuerzo de torsión en él. De todas maneras se observará en la simulación si este es importante o si se lo puede despreciar.

Debido a todo lo dicho, es importante determinar que este elemento, en su primera aproximación, se lo realizará con los siguientes materiales:

- **Cuerpo:** El cuerpo principalmente será un perfil estructural tipo C o “canal”, ya que este resiste bien compresión, flexión y tracción. Hubiera sido ideal poder escoger un perfil tipo IPN o doble T pero debido a condiciones constructivas se escogió el canal. A este se le soldará una plancha de 3 mm de espesor para hacer como una tapa al canal. A esta plancha se le hará agujeros para poder montar y desmontar este elemento.
- **Bases:** Debido más que nada a consideraciones estéticas, se harán dos planchas de 3 mm de espesor las que serán soldadas a los extremos del perfil C para cerrar estos espacios.

Así que con todo lo anterior, el elemento queda en su primera aproximación de la siguiente manera [Véase la Figura 3-3]:



Figura 3-3: Aproximación del diseño estructural del eslabón brazo.

3.3.4 APROXIMACIÓN DEL ANTEBRAZO.

La aproximación del eslabón antebrazo resultó ser uno de los más complicados de determinar, debido a las consideraciones que se tomaron en el capítulo anterior en el que se le asignó una geometría definida según su funcionamiento [Véase la página 33: Eslabón anteBrazo:].

Al igual que en el caso anterior del eslabón brazo, este elemento estará sujeto a los mismos esfuerzos, sin contar la torsión, pero con la diferencia que esta vez el elemento sí lleva dentro de sí elementos y mecanismos indispensables para el movimiento y control del robot.

Entre los elementos y mecanismos que debe llevar se encuentran:

- **El Eje 3:** Este elemento alojará en su interior al eje 3 que está comprendido entre el brazo y el antebrazo. Además dentro de él será necesario colocar el mecanismo que hará funcionar al par rotatorio.
- **El Eje 4:** Así mismo, alojará al eje 4 que será el que proporcione el movimiento entre el antebrazo y la muñeca. También tendrá en su interior los mecanismos que harán funcionar al par rotatorio.
- **Servomotor 3:** En este elemento será necesario ubicar al servomotor 3 que será encargado de mover el par rotatorio 3.
- **Servomotor 4:** El eslabón debe soportar al servomotor 4 que será encargado de mover el par rotatorio 4.

Como ya se definió arriba cuales son los esfuerzos a los que está sometido este elemento simplemente se hará la especificación de los materiales utilizados para este eslabón.

- **Base:** Aunque no sería realmente una base, es la parte a la que irá conectado el eje 3 y está formado por la soldadura de planchas de 3 mm de espesor que conforman la geometría determinada las cuales están soldadas al cuerpo.
- **Cuerpo:** Se trata de una tubería estructural redonda de 3" de diámetro con un espesor de 3mm.

Por lo tanto, este elemento queda en su primera aproximación como se observa en la Figura 3-4:

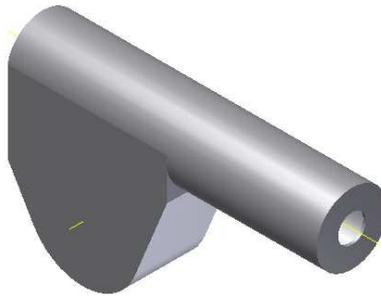


Figura 3-4: Aproximación del diseño estructural del eslabón antebrazo.

3.3.5 APROXIMACIÓN DE LA MUÑECA.

La muñeca es el elemento dentro del robot manipulador que resulta ser muy complejo por sus diferentes movimientos y solicitaciones. En este trabajo de investigación se buscó realizar este elemento de la forma más simplificada posible [Véase la página 34: Muñeca:] teniendo en cuenta que las características queden totalmente funcionales en comparación a una muñeca que se encuentra en el mercado.

Debido a esto se realizó una aproximación estructural bastante simple considerando que en la simulación se logrará observar si este elemento no solamente cumple con sus requerimientos estructurales sino también funcionales.

Para lograrlo se dividió a la muñeca en tres subelementos, cada uno con sus características físicas y constructivas bien definidas. Así también cada uno de estos subelementos responde a un grado de libertad independiente y definido lo que asegurará los 6 grados de libertad totales del robot.

El primer subelemento es el que está sujeto directamente al antebrazo y que contiene al eje 4 (de ahora en adelante se lo denominará parte "A"). Por lo tanto su movimiento será con respecto a ese eje. El segundo subelemento está sujeto al primero y es el que contiene al eje 5. Finalmente el último subelemento es el que está conectado al segundo y consta del portaherramientas. Este contiene al eje 6.

Para el primer subelemento se utilizaron los siguientes materiales:

- **Cuerpo:** Consta de un tubo estructural de 3" de diámetro con un espesor de 3mm.
- **Bases:** Las bases constan de planchas de 3mm de espesor que son soldadas al cuerpo.

Para el segundo subelemento (que de ahora en adelante se lo denominará parte "B") se utilizaron los siguientes materiales:

- **Cuerpo:** Consta de dos partes del cuerpo. La primera es una tubería de 2" con un espesor de 3mm, la cual es soldada a una plancha circular de 3mm de espesor y con un diámetro de 3". Seguida a esta, se encuentra la segunda parte que consta de una tubería de 3" y de 3mm de espesor.
- **Bases:** Se colocan dos planchas de 3mm de espesor a los extremos del cuerpo.

El tercer subelemento (denominado a partir de ahora como parte "C") será una plancha circular de 6 mm de espesor al cual estará sujeta una porta-herramienta estándar definida por los diseñadores de KUKA® Robotics. Con esto no se quiere decir que en el caso de ser requerido no se lo pueda construir usando materiales que se encuentran en el mercado local.

Definido todo esto solo basta mostrar en la Figura 3-5, la aproximación para la muñeca:

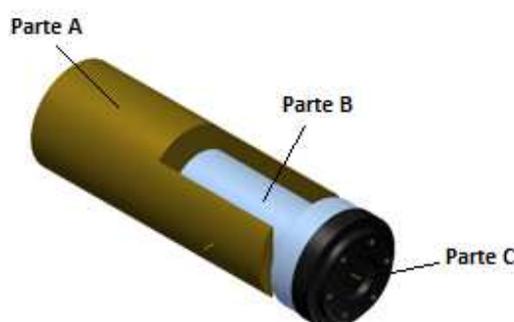


Figura 3-5: Aproximación del diseño estructural del eslabón muñeca.

3.4 ANÁLISIS ESTRUCTURAL DEL ROBOT.

Para poder realizar el análisis estructural del robot se utilizará la posición crítica del mismo cuando esté funcionando a su máxima capacidad de diseño. Esto se puede ejemplificar observando la siguiente Figura 3-6:

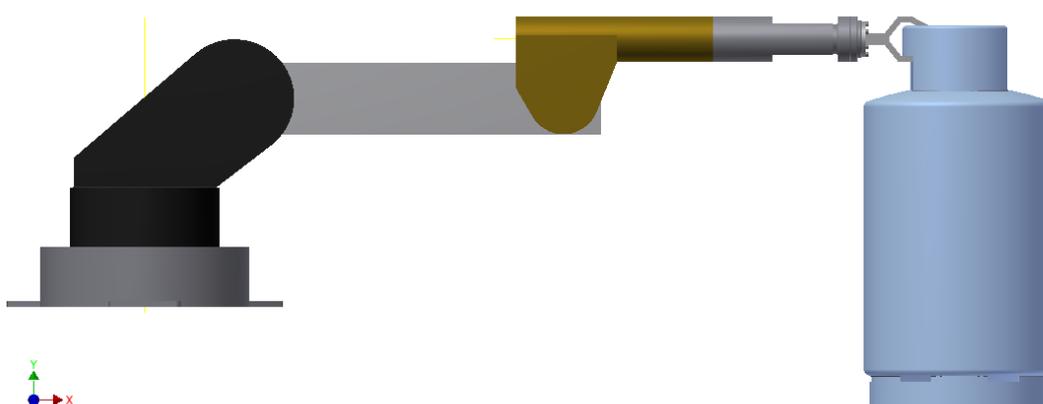


Figura 3-6: Una de las posiciones Críticas del Robot Manipulador.

La posición crítica establece a los eslabones del brazo, antebrazo y mano en posición completamente horizontal sosteniendo en su extremo la carga máxima de diseño de 20kg.

Este análisis nos permitirá poder determinar el mayor torque requerido en las articulaciones para mantener el equilibrio en esta posición. Además con esto se podrá establecer si los actuadores existentes en el mercado pueden suplir las necesidades del robot en cuanto a su movilidad.

Para determinar aproximadamente las cargas a las que estará sujeto cada eslabón de la estructura, este análisis requiere considerar a cada eslabón con el comportamiento de una viga en voladizo con respecto a cada uno de sus ejes de articulación (como se observa en la Figura 3-7), tal cual se lo realizó en el trabajo de investigación de García, Aguilar & Pérez⁴⁰.

Se comenzará desde el extremo, tomando a la carga, herramienta y portaherramientas igual como se realizó en el ejemplo de diseño de Iñigo⁴¹, en el que cita textualmente:

“El diseño de la mano (y la “muñeca”) es bastante más complicado. Existen fabricantes especializados y hasta los robots comerciales tienen manos de estos fabricantes. Aunque no consideraremos la dinámica de la mano misma, por los motivos ya indicados, la contribución de su masa y la de la carga, se incluye como una masa puntiforme de 13.61 kg en el extremo del eslabón 3.”⁴²

Por esta razón, en esta ocasión también se aproximará la masa de la herramienta “mano” mas no de la muñeca debido a que si incluye dentro del diseño realizado en este proyecto de investigación. De tal manera que la carga máxima que

⁴⁰ Confróntese con el estudio realizado por GARCÍA T., AGUILAR M. & PÉREZ V. (2008). *“Diseño Manipulador Robótico de cinco grados de libertad como herramienta para un sistema de Detección de Fallas mediante ultrasonido derivado del Proyecto de Investigación SIP 2008 2653”*. México D.F.: Unidad Azcapotzalco. Capítulo 3. páginas 62 – 83.

⁴¹ Confróntese con lo realizado por IÑIGO M., R. (2002). *“Robots Industriales Manipuladores”*. Barcelona: Ediciones UPC. Capítulo IX, páginas 135 - 144.

⁴² IÑIGO M., R. (2002). *“Robots Industriales Manipuladores”*. Barcelona: Ediciones UPC. Capítulo IX. página 136

soportará el robot será de 20 kg (196 N), al que se tendrá que aumentar la masa de la herramienta o mano que será alrededor de los 3,61 kg⁴³ (35,378 N) y además de esto habría también que sumarle el peso del portaherramienta que es de 0,474 kg (4,6452 N), lo que da un total de 24,084 kg (236,264 N).

3.4.1 CÁLCULO DE LAS FUERZAS, REACCIONES Y MOMENTOS EN LOS ESLABONES DEL ROBOT MANIPULADOR.

Con lo dicho anteriormente, se procede a realizar los cálculos pertinentes para conocer los valores de las fuerzas, reacciones y momentos que se encuentran en los eslabones del robot, en su máxima carga y en su posición crítica de funcionamiento. Además cabe decirse que para este cálculo no se incurre en error significativo al estimar al elemento como bidimensional.

Para esto se utilizan las ecuaciones de equilibrio estático de sumatorias de momentos y fuerzas en cada uno de los eslabones, considerando que en cada uno de estos se presenta el empotramiento en su lado izquierdo, que su peso se puede aproximar a que se encuentra ubicado puntualmente en la mitad de la longitud del mismo y que en su extremo derecho se ubicará la carga puntual y momento que se genera del eslabón precedente. Esta aproximación se puede observar en la Figura 3-7.

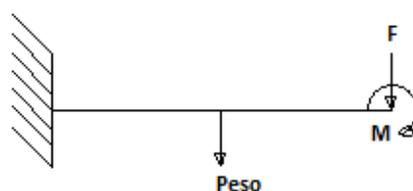


Figura 3-7: Viga en Voladizo. Aproximación de los eslabones.

Debido a que en esta aproximación únicamente se observa al robot en estado estático, se utilizarán las siguientes fórmulas matemáticas para encontrar los valores deseados:

⁴³ Ibíd.

$$\sum M = 0$$

$$\sum F_y = 0$$

Para realizar correctamente los cálculos necesitamos los valores de la masa de cada eslabón y su respectivo centro de gravedad. Estos datos se los obtiene al observar los valores que el Autodesk Inventor calcula en la ventana de propiedades del elemento [Véase la Figura 3-8].

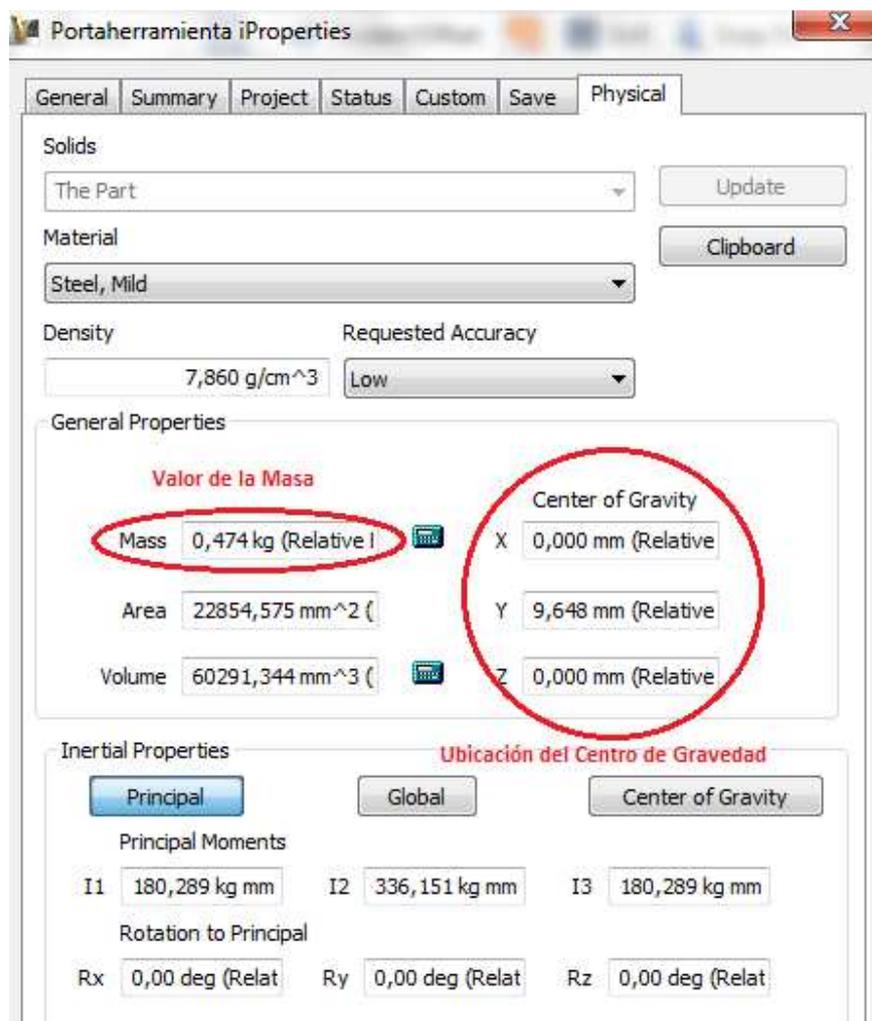


Figura 3-8: Ventana de Propiedades del elemento en el Inventor 2012

Los valores se encuentran resumidos en la siguiente tabla:

Tabla 3-1: Masa, longitud y ubicación del centro de gravedad de cada eslabón.

Eslabón	Masa [N]	Longitud desde el punto A hasta B [mm]	Centro de Gravedad (desde el punto A de empotramiento) [mm]
Portaherramienta	0,474	18	9,648
Muñeca Parte 2	0,694	72	23,516
Muñeca Parte 1	0,997	160	80,837
Antebrazo	3,122	250	53,506
Brazo	11,14	550	275
Cuerpo	11,153	150	41,945
Base ⁴⁴	20,876	NA	NA

A continuación se colocará la tabla de los valores y en el ANEXO 1 se encontrarán los informes de los cálculos como también las imágenes de cada eslabón.

Tabla 3-2: Valores de las fuerzas y reacciones que se ejercen sobre cada eslabón.

Eslabón	Fuerzas Externas		Peso [N]	Reacciones	
	Fuerza [N]	Momento [Nm]		Fuerza [N]	Momento [Nm]
Portaherramienta	-231,378	0	-4,6452	236,023	4,2096
Muñeca Parte 2	-236,023	-4,2096	-6,8012	242,824	21,3632
Muñeca Parte 1	-242,824	-21,3632	-9,7706	252,595	61,005
Antebrazo	-252,595	-61,005	-30,5956	283,191	125,7908
Brazo	-283,191	-125,7908	-109,172	392,363	311,5679
Cuerpo	-392,363	-311,5679	-109,2994	501,662	375,0068
Base	-501,662	-375,0068	-204,5848	NA	NA

3.5 SIMULACIÓN DE LOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES.

Como ya se dijo anteriormente, el objetivo de este trabajo de investigación es el de utilizar las herramientas que poseen los diferentes software para la ayuda y apoyo en el proceso de diseño mecánico. Por esta razón se definió que los

⁴⁴ Debido a que este es el último elemento de la cadena cinemática, no se requiere determinar las reacciones ya que éstas se las observará en la simulación. Por lo tanto tampoco se requieren sus valores de longitud y centro de gravedad.

elementos estructurales del robot manipulador iban a ser analizados en cuanto a su resistencia por medio del entorno de análisis de esfuerzos por elementos finitos que posee el Autodesk Inventor 2012.

Para esto se hará una breve introducción al entorno del programa y se realizará la simulación de cada uno de los elementos estructurales.

3.5.1 AMBIENTE DE SIMULACIÓN PARA EL ANÁLISIS DE ESFUERZOS DEL AUTODESK INVENTOR.

Autodesk en su afán de brindar mejor y mayor soporte para el proceso de diseño mecánico ha incorporado en las nuevas versiones de su software Inventor, un ambiente o módulo en el cual se puede hacer un análisis de esfuerzos por elementos finitos y de análisis de estructuras.

Esto representa una gran ayuda para el diseño ya que no es necesario pasar de un programa a otro o traducir un elemento para así simularlo una y otra vez hasta observar los resultados y por lo tanto cambiar los parámetros del diseño. Dentro del mismo archivo de diseño, el usuario puede realizar los cambios pertinentes al elemento y volver a realizarla simulación.

Dentro de este ambiente o módulo se puede llevar el sólido creado en Inventor hacia un entorno de simulación en donde se pueden definir las condiciones de la simulación como la gravedad y el rozamiento. Además se pueden definir las fuerzas que actúan en este elemento, como también es posible determinar las restricciones de movimiento dependiendo del funcionamiento del mismo.

Otra ventaja que presenta este ambiente de simulación es el hecho de que nos permite realizar el refinamiento de los elementos finitos hasta obtener automáticamente la curva de convergencia de la solución. Esto es muy beneficioso ya que nos asegura que la simulación da un resultado bastante confiable. Así mismo se observa como se puede manejar el uso de los parámetros de diseño del sólido, lo que nos permite hacer una sola simulación variando una dimensión con lo que se

ahorra tiempo al momento de determinar cual es la dimensión que se ajusta mejor a los requerimientos de diseño.

Para ingresar en este entorno simplemente abrimos la pestaña de ambientes “environments” y seleccionamos el análisis de esfuerzos “Stress Analysis”. Esto se lo puede observar en la Figura 3-9.

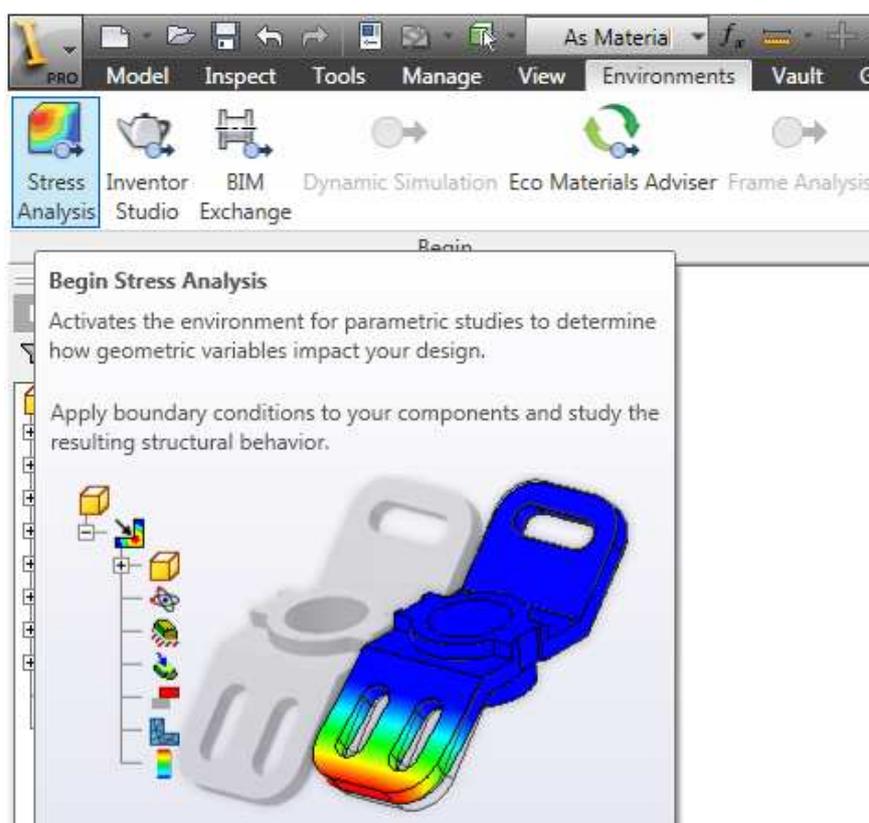


Figura 3-9: Ambiente de Análisis de Esfuerzos en el Inventor 2012.

Después de escoger crear una nueva simulación se abrirá una nueva pestaña (Véase la Figura 3-10) en la que intuitivamente el usuario puede llegar a definir paso por paso las condiciones y características de su proceso.

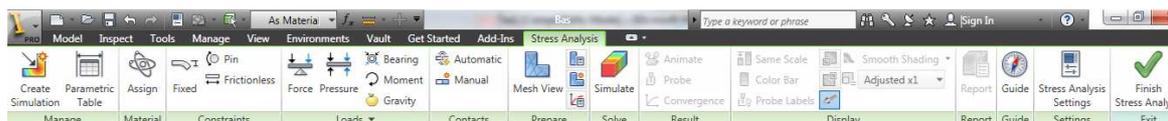


Figura 3-10: Pestaña con todas las opciones para definir la simulación del análisis de esfuerzos.

3.5.2 SIMULACIÓN DE LA MUÑECA.

Ya se dijo que la porta-herramienta corresponde a un diseño normalizado por la compañía alemana de KUKA Robotics, por lo que dentro de este trabajo de investigación no se lo considerará para el análisis de esfuerzos. Dicho esto comenzamos con la simulación dentro del ambiente del Autodesk Inventor 2012 considerando las restricciones pertinentes.

Comenzamos con la parte de la muñeca que va unida al porta-herramienta, o como se lo ha llamado dentro de esta investigación, parte “B” [Véase la Figura 3-5]. Los resultados se resumirán en la Tabla 3-3 con respecto al punto crítico siendo resumidos los máximos y los mínimos, dejando a los informes de la simulación para que puedan ser consultados en el ANEXO 1.

Tabla 3-3: Resultados de la simulación y cambios al diseño de la parte “B” de la muñeca.

#	Características	Esfuerzo Máximo Von Mises	Desplazamiento Máximo	Factor de Seguridad Mínimo	Observaciones y Cambios
1	Con las características de la primera aproximación realizada. Se establece la gravedad, las restricciones y las fuerzas obtenidas en el numeral anterior [Véase laTabla 3-2: Valores de las	73,98 MPa	0,01538 mm	2,8	Siendo que esta simulación arrojo datos favorables para el diseño, se podría dejar así, tal y como se lo definió en la primera aproximación. No obstante se realizará de nuevo variando el espesor del material para aligerar el peso del mismo.

	fuerzas y reacciones que se ejercen sobre cada eslabón. Tabla 3-2]				
2	Se rebajo el espesor del material de 3 mm a 2 mm y se realizó de nuevo la simulación.	97,19 MPa	0,02614 mm	2,13	Con esto se puede asegurar que continúa siendo seguro realizar este elemento de 2 mm de espesor. Se escoge este como el definitivo.

Seguimos con la primera parte de la muñeca (la que va unida al antebrazo). Los resultados se resumirán en la Tabla 3-4 y el informe de la simulación se lo puede encontrar en el ANEXO 1.

Tabla 3-4: Resultados de la simulación y cambios al diseño de la parte "A" de la muñeca

#	Características	Esfuerzo Máximo Von Mises	Desplazamiento Máximo	Factor de Seguridad Mínimo	Observaciones y Cambios
1	Con las características de la primera aproximación realizada. Se establece la gravedad, las restricciones y las fuerzas obtenidas en el	117,2 MPa	0,1587 mm	1,77	Se observa en la simulación que el espesor de la base de la parte "A" resulta ser suficiente ya que genera un factor de seguridad superior a 1,5. Por esta razón se

	numeral anterior [Véase la Tabla 3-2: Valores de las fuerzas y reacciones que se ejercen sobre cada eslabón. Tabla 3-2]				tratará de rebajar el espesor del material a 2mm.
2	Haciendo el espesor del material de 2mm.	268,7 MPa	0,2384 mm	0,77	El factor de seguridad es insuficiente, por lo que es imposible realizarlo de 2mm de espesor. Como una tercera prueba se realizará la simulación para un espesor de la base de 4mm
3	Se realiza la simulación con un espesor del tubo estructural de 3mm y un espesor de la base de 4mm.	63,21 MPa	0,1159 mm	3,27	Se observa que el factor de seguridad es muy elevado, por lo que se realizará la simulación con un espesor de tubo de 2mm.
4	Se realiza la simulación con un espesor de	108,7 MPa	0,2673 mm	1,9	De lo visto se puede asegurar que a pesar de

	tubo estructural de 2mm con un espesor de base de 4mm.				representar un desplazamiento mayor que en el caso de espesor de 3mm, esta opción presenta un menor esfuerzo y por ende un mayor factor de seguridad. Este será el escogido para este elemento.
--	--	--	--	--	---

3.5.3 SIMULACIÓN DEL ANTEBRAZO.

El eslabón antebrazo resulta ser bastante importante dentro de las características de funcionamiento del robot. Además resulta indispensable realizar un correcto diseño debido a su geometría compleja.

Los resultados de la simulación se encontrarán resumidos en la Tabla 3-5, pudiendo verse el informe de la simulación en el ANEXO 1.

Tabla 3-5: Resultados de la simulación y cambios al diseño del antebrazo.

#	Características	Esfuerzo Máximo Von Mises	Desp. Máximo	Factor de Seguridad Mínimo	Observaciones y Cambios
1	Con las características de la primera aproximación realizada. Se establece la	807,7 MPa	0,3233 mm	0,26	El factor de seguridad y el desplazamiento demuestran que este elemento no puede soportar las licitaciones a las que está

	<p>gravedad, las restricciones y las fuerzas obtenidas en el numeral anterior [Véase la Tabla 3-2: Valores de las fuerzas y reacciones que se ejercen sobre cada eslabón. Tabla 3-2]</p>				<p>sometida. Por lo tanto se propone aumentar el espesor de la placa donde estos están en su punto crítico en 4mm.</p>
2	<p>Se realiza la simulación tomando en consideración un aumento de espesor de la placa de 3mm a 4mm.</p>	443,7 MPa	0,3126 mm	0,47	<p>El factor de seguridad aún está por debajo de lo esperado y el desplazamiento no presentó una disminución significativa. Se propone aumentar aún más el espesor de la placa.</p>
3	<p>Se aumenta el espesor de la placa de 4mm a 6mm.</p>	211,3 MPa	0,3482 mm	0,98	<p>Al aumentar la dimensión de la placa se observa un incremento importante en el factor de seguridad, pero un aumento en el desplazamiento, el cual era de esperarse</p>

					debido al aumento de masa en ese lugar. Se propone realizar un aumento en la sección del tubo.
4	Se aumenta la sección del tubo a un diámetro de 101,60mm y además se aumentan también los espesores de las placas que conforman la estructura a 4mm.	158,3 MPa	0,2607 mm	1,31	Se observa una gran disminución del desplazamiento y además el factor de seguridad se encuentra más elevado que en los casos anteriores. Por esta razón se propone aumentar aún más la placa donde se encuentra el punto crítico.
5	Finalmente se aumenta el espesor de la placa donde se encuentra el punto crítico de 6mm a 8mm.	124,4 MPa	0,2523 mm	1,66	Si bien se trata de un espesor bastante alto para una placa asegura un factor de seguridad adecuado. Este será el escogido para continuar con la investigación.

Como se realizó este gran cambio en la estructura del robot a la primera aproximación, serán necesario recalculan las masas, centros de gravedad y por lo tanto también las fuerzas y momentos. Utilizando la hoja de cálculo utilizada anteriormente se actualiza los valores en la Tabla 3-6 y en la Tabla 3-7.

Tabla 3-6: Masa, longitud y ubicación del centro de gravedad de cada eslabón recalculados.

Eslabón	Masa [N]	Longitud desde el punto A hasta B [mm]	Centro de Gravedad (desde el punto A de empotramiento) [mm]
Antebrazo	5,423	250	67,322
Brazo	11,14	550	275
Cuerpo	11,153	150	41,945
Base	20,876	NA	NA

Tabla 3-7: Valores recalculados de las fuerzas y reacciones que se ejercen sobre cada eslabón.

Eslabón	Fuerzas Externas		Peso [N]	Reacciones	
	Fuerza [N]	Momento [Nm]		Fuerza [N]	Momento [Nm]
Antebrazo	-252,595	-61,0049583	-53,1454	305,7404	127,731563
Brazo	-305,7404	-127,7315629	-109,172	414,9124	325,911083
Cuerpo	-414,9124	-325,9110829	-109,2994	524,2118	392,732506
Base	-524,2118	-392,7325063	-204,5848	NA	NA

3.5.4 SIMULACIÓN DEL BRAZO.

Para este eslabón es fundamental simular las condiciones que presenta de esfuerzos, sobre todo lo relacionado con el funcionamiento en cuanto a la torsión para justificar el uso de ese perfil estructural. De tal manera que se debe considerar el brazo de palanca que ejerce la fuerza del antebrazo al ser trasladado, como se muestra la Figura 3-11.

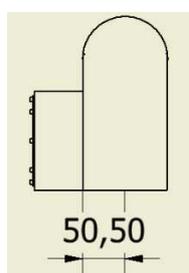


Figura 3-11: Vista posterior de la distancia que se debe trasladar la fuerza existente entre el eslabón antebrazo y el brazo.

Por lo tanto, para esta simulación se definirá que existen dos momentos y una fuerza en el soporte del brazo. Los resultados de la simulación se encontrarán

resumidos en la Tabla 3-8, pudiendo verse el informe de la simulación en el ANEXO 1.

Tabla 3-8: Resultados de la simulación y cambios al diseño del brazo.

#	Características	Esfuerzo Máximo Von Mises	Desp. Máximo	Factor de Seguridad Mínimo	Observaciones y Cambios
1	Con las características de la primera aproximación realizada. Se establece la gravedad, las restricciones y las fuerzas obtenidas en el numeral anterior [Véase la Tabla 3-2: Valores de las fuerzas y reacciones que se ejercen sobre cada eslabón. Tabla 3-7]	119,3 MPa	0,2775 mm	1,71	Los resultados de la simulación determina valores adecuados de esfuerzos, desplazamientos y sobre todo garantiza un factor de seguridad superior a 1,5. Por esta razón no se realizan más cambios a este elemento que permanecerá tal y como se lo estimó al principio.

Es importante también decir que al realizar el análisis con respecto a la torsión, que puede generarse en el elemento, se observa que los desplazamientos en esa dirección son mínimos (el máximo está alrededor de 0,0178) y que los

esfuerzos generadas de torsión no corresponden ni siquiera a un valor mayor de 10MPa. De todo esto se puede decir que el perfil resulta ser el adecuado.

3.5.5 SIMULACIÓN DEL CUERPO.

El cuerpo tal vez sea la pieza o elemento más crítico del diseño estructural, por esta razón es indispensable realizar correctamente la simulación, tomando en cuenta las características de las uniones entre brazo-cuerpo y cuerpo-base.

Los resultados de la simulación se encontrarán resumidos en la Tabla 3-9, pudiendo verse el informe de la simulación en el ANEXO 1.

Tabla 3-9: Resultados de la simulación y cambios al diseño del cuerpo.

#	Características	Esfuerzo Máximo Von Mises	Desp. Máximo	Factor de Seguridad Mínimo	Observaciones y Cambios
1	Con las características de la primera aproximación realizada. Se establece la gravedad, las restricciones y las fuerzas obtenidas en el numeral anterior [Véase la Tabla 3-2: Valores de las fuerzas y reacciones que se ejercen sobre cada	770 MPa	8,611 mm	0,27	Con las aproximaciones hechas en un inicio se observa claramente como estas características del material no cumplieron para nada con el cometido. El factor de seguridad y el desplazamiento son totalmente catastróficos. Se propone aumentar el espesor.

	eslabón.Tabla 3-7]				
2	Se aumentará el espesor de la parte superior de 4mm a 6mm y de la parte inferior de 4mm a 8mm.	220,9 MPa	1,135 mm	0,94	La reducción tanto en el esfuerzo como en el desplazamiento resulta ser increíblemente bueno, pero aún no se llega a obtener el resultado esperado. Se propone aumentar un poco más el espesor.
3	Se aumentará en la simulación el espesor de la parte inferior de 8mm a 10mm.	142,7	0,5964	1,45	Si bien bajo el desplazamiento aún existe un factor de seguridad que debe ser un poco más elevado.

3.5.6 SIMULACIÓN DE LA BASE O TIERRA.

Lo indispensable de determinar en este elemento es si el anclaje puede resistir todas las acciones de las fuerzas sin generar un mayor daño a toda la estructura. Por esta razón se dará una atención especial a este caso.

Los resultados de la simulación se encontrarán resumidos en la Tabla 3-10. El informe de la simulación puede verse en el ANEXO 1.

Tabla 3-10: Resultados de la simulación y cambios al diseño del cuerpo.

#	Características	Esfuerzo Máximo Von Mises	Desp. Máximo	Factor de Seguridad Mínimo	Observaciones y Cambios
---	-----------------	---------------------------------	-----------------	----------------------------------	----------------------------

1	<p>Con las características de la primera aproximación realizada. Se establece la gravedad, las restricciones y las fuerzas obtenidas en el numeral anterior [Véase la Tabla 3-2: Valores de las fuerzas y reacciones que se ejercen sobre cada eslabón. Tabla 3-2]</p>	34,38 MPa	0,0179 mm	6,02	<p>La simulación determina que el desplazamiento y el esfuerzo son muy pequeños y por lo tanto el factor de seguridad se encuentra muy elevado. Siendo que es así se propone realizar una disminución del material para bajar costos y peso de la estructura.</p>
2	<p>Se define una disminución del espesor de 10mm a 8mm.</p>	49,23 MPa	0,0293 mm	4,2	<p>Se observa todavía que el desplazamiento todavía no llega a su punto crítico ni en la placa superior, ni en los soportes para el anclaje y que el factor de seguridad aún continúa elevado. De esta manera se sigue bajando el espesor</p>

					del material.
3	Se disminuye el espesor de 8mm a 6 mm.	77,67 MPa	0,0545 mm	2,67	De la simulación se establece que este puede ser un buen límite considerando que se realiza únicamente una aproximación de la realidad.

Con esto se termina el análisis estructural que contemplan los objetivos de este trabajo de investigación. Para la construcción del robot manipulador se requerirá un estudio de las fuerzas y esfuerzos más exhaustivo que iría a la par de la ingeniería de detalle.

Al realizar el ensamble de estos elementos se puede observar al robot manipulador estructuralmente armado y listo para la simulación cinemática y dinámica del mismo en el entorno del MATLAB.

A continuación se observa el ensamble estructural generado del robot manipulador en la Figura 3-12:

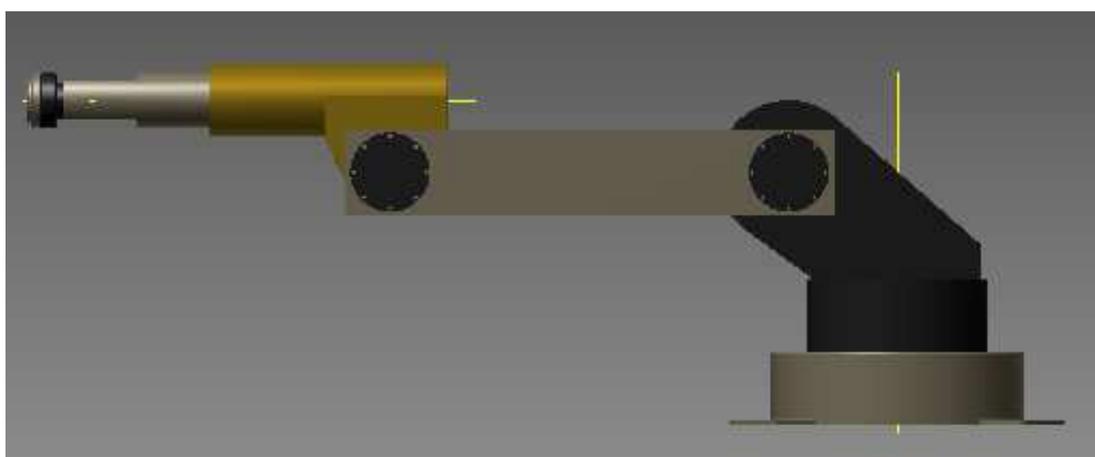


Figura 3-12: Ensamble estructural generado del robot manipulador.

En el siguiente capítulo se hará el traspaso de este ensamble generado en el Autodesk Inventor 2012 hacía el entorno del Simulink en MATLAB para la construcción del modelo físico en diagrama de bloques.

CAPÍTULO 4

INTERFAZ ENTRE EL DISEÑO ESTRUCTURAL DEL INVENTOR Y EL MODELO FÍSICO EN MATLAB

4.1 DEFINICIONES Y GENERALIDADES.

Resulta imprescindible definir ciertos aspectos y requisitos previos para la correcta realización de la interfaz a realizarse entre el diseño estructural del robot manipulador hecho en Inventor y el modelo físico que será sujeto a simulación en el Simulink de MATLAB®.

4.1.1 ASPECTOS PRINCIPALES DEL MATLAB®:

El programa MATLAB® es un software matemático que fue diseñado y desarrollado por MathWorks, quienes tuvieron en mente un programa capaz de simplificar el manejo matricial de forma no antes vista. De ahí es donde viene su nombre ya que “MATLAB” es la abreviación en inglés de “laboratorio de matrices” (MATrix LABoratory).

Actualmente este software ha avanzado tanto que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) y que posee su propio lenguaje de programación. Entre lo que puede realizar están: la manipulación de matrices, la representación de datos y funciones, la implementación de algoritmos, la creación de interfaces de usuario (GUI) y algunos tipos de comunicación con otros programas y lenguajes.

Además de esto, el MATLAB® cuenta con dos importantes herramientas que le permiten tener mayor cantidad de prestaciones. La primera es la plataforma de simulación multidominio SIMULINK y el editor de interfaces de usuario o GUIDE.

De esto es importante recalcar que como este programa está orientado al uso de las matrices, entonces será más eficiente si se diseñan algoritmos en términos de matrices y vectores.

4.1.2 ASPECTOS PRINCIPALES DEL SIMULINK®:

Primeramente habría que definir de que se trata el Simulink®, y para ello se hace referencia a sus creadores:

“Simulink es un entorno para simulación multidominio y diseño basado en modelos para sistemas dinámicos y embebidos. Proporciona un entorno gráfico interactivo y un conjunto de bibliotecas de bloques que le permiten diseñar, simular, implementar y probar una variedad de variables en el tiempo los sistemas, incluidas las comunicaciones, control, procesamiento de señales, procesamiento de vídeo y procesamiento de imágenes.”⁴⁵

Por lo tanto de su definición se pueden determinar sus principales características, que se las numerará a continuación⁴⁶:

- Simular Sistemas Dinámicos.
- Facilitar la simulación y generación de los sistemas mediante un entorno gráfico y sencillo.
- Las interacciones se logran interconectando los bloques elementales y definiendo su relación.
- Los bloques tienen ya definido su modelo matemático asociado y sus respectivas relaciones de entrada y salida.

Ante todo esto cabría decir que principalmente el Simulink®⁴⁷ está conformado por bloques, actuadores y visualizadores. Estos unidos y relacionados entre sí

⁴⁵ Tomado de: <http://www.mathworks.com/products/simulink/index.html?sec=apps>

⁴⁶ MOYA, D. (2010). “Modelo y Análisis cinemático de un robot manipulador industrial esférico aplicando el MATLAB”. Quito: Tesis EPN; Pagina 52.

⁴⁷ Para una mejor comprensión del funcionamiento de esta plataforma léase el capítulo 4 del trabajo de investigación de MOYA, D.

generarán un funcionamiento casi idéntico al real y permitirán conocer las características de operación de los sistemas.

Dentro de esta gran plataforma, se encuentran una serie de entornos predefinidos de simulación, los que pueden ser usados para un sinnúmero de aplicaciones. Entre estos cabría destacar los siguientes:

- **Fixed-Point Modeling:**
 - Simulink Fixed Point.
- **Event-Based Modeling:**
 - Stateflow.
 - SimEvents.
- **Modelado Físico:**
 - Simscape.
 - SimMechanics.
 - SimDriveline.
 - SimHydraulics.
 - SimRF.
 - SimElectronics.
 - SimPowerSystems.
- **Diseño de Sistemas de Control y Análisis:**
 - Simulink Control Design.
 - Simulink Design Optimization.
 - Aerospace Blockset.

Y la lista continúa con un gran repertorio de herramientas que pueden permitir o facilitar la simulación de los modelos físicos pertinentes.

De entre todos estos, solamente se utilizará dentro de este trabajo de investigación al SimMechanics por todas sus prestaciones y facilidades, que le permiten ser ideal para cumplir los objetivos impuestos.

4.1.3 ASPECTOS DEL SIMMECHANICS.

SimMechanics es un grupo de herramientas para el modelado tridimensional de los sistemas mecánicos. Se elimina la necesidad de derivar ecuaciones y programación mediante el uso de diagramas de bloques.

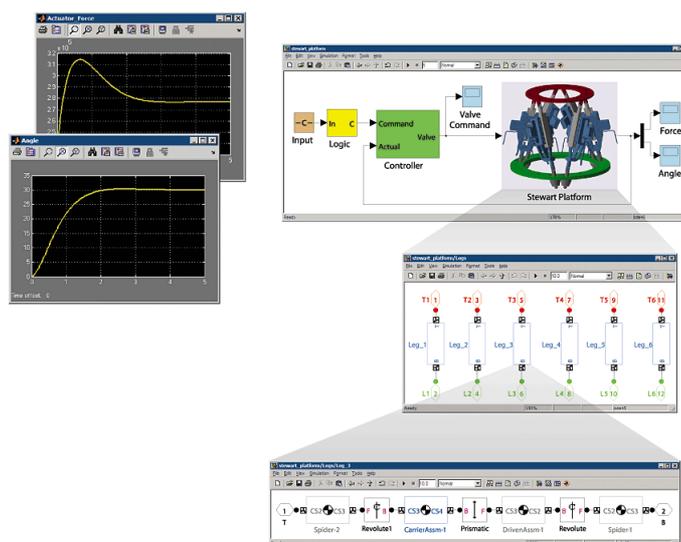


Figura 4-1: Modelo de ejemplo de SimMechanics⁴⁸.

Entre sus principales ventajas, está que se puede utilizar esta herramienta de simulación de sistemas multicuerpo, para construir un modelo compuesto de cuerpo, articulaciones, limitaciones, y los elementos de fuerza que refleja la estructura del sistema. También permite generar automáticamente una animación 3-D que ayuda a visualizar la dinámica del sistema.

Otra gran ventaja que tiene esta plataforma es el hecho que se pueden importar modelos completos con masa, la inercia, la restricción, y la geometría en 3D a partir de varios sistemas CAD. En este caso el sistema CAD a utilizarse es el Autodesk Inventor 2012.

⁴⁸ Tomado de: <http://www.mathworks.com/products/simmechanics/description2.html>

4.2 TRADUCTOR CAD-SIMULINK

Como se ha dicho con anterioridad, este trabajo de investigación tiene como objetivo el permitir la conexión entre el sistema CAD en el que se encuentra el diseño mecánico del manipulador hacia el entorno del Simulink para poder realizar las simulaciones pertinentes y poder realizar el estudio cinético y dinámico del robot. Este proceso consta de dos pasos fundamentales.

- **Primero:** pasa del CAD a un formato XML que puede ser leído por el SimMechanics® como diagrama de bloques.
- **Segundo:** generar un archivo con formato MDL que será el que se pueda leer y manipular en el Simulink®.

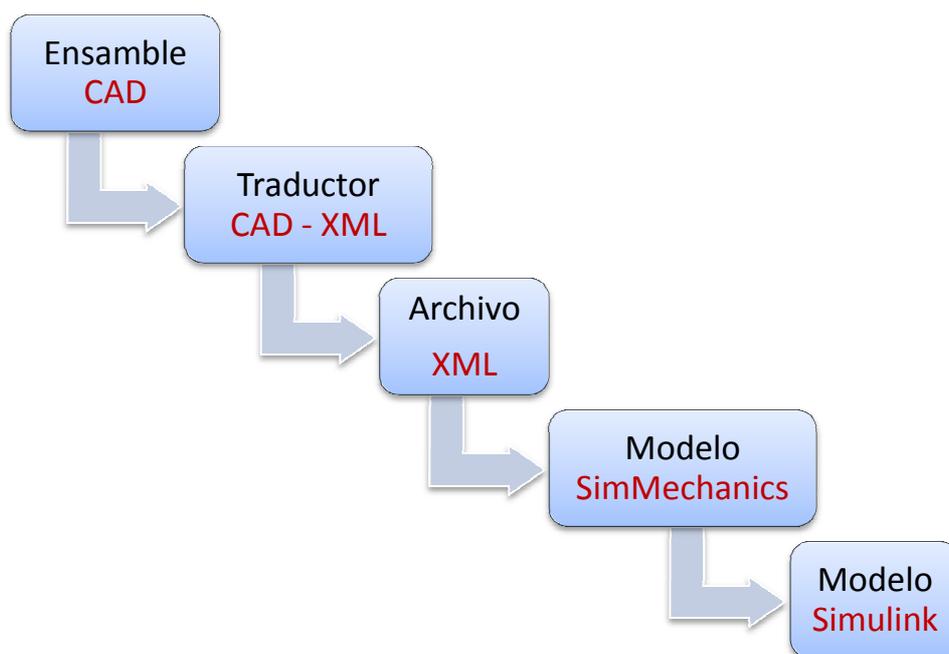


Figura 4-2: Proceso para pasar de un ensamblaje CAD hacia un archivo de simulación en Simulink®.

Como se ve en la Figura 4-2, existe una herramienta creada por Mathworks® que permite esta conexión mediante un traductor. Este transporta los parámetros y características del modelo CAD hacia un modelo físico en diagrama de bloques, que permitirá al final realizar el análisis en SimMechanics®.

4.2.1 PASOS PARA LA CONEXIÓN DEL TRADUCTOR CON LA PLATAFORMA CAD.

Sería muy conveniente tener el traductor ya preinstalado en los programas que serán utilizados para el trabajo, esto desgraciadamente no es así y por lo tanto se requiere de una cierta cantidad de pasos para lograr realizar esta conexión correctamente.

1. Identificar que versiones de los programas se tienen. En este caso se utiliza como plataforma CAD al Autodesk Inventor 2012 y la versión R2011b de MATLAB.
2. Descargar el traductor adecuado tomando en consideración las versiones de software que se disponen y que se observaron en el paso 1. En este caso se puede observar la Figura 4-3.

Este traductor puede ser descargado de <http://www.mathworks.com> en donde se deberá escoger la versión correspondiente. En este caso fue la versión SimMechanics Link 3.2.3

SimMechanics Link

SimMechanics Link works with SimMechanics 3.0 and higher (MATLAB R2008b and higher). Supported operating systems for your CAD platform are win32 and win64 except where noted below. Based on your MATLAB and CAD platform versions, select the SimMechanics Link version you wish to download:

SimMechanics Link	MATLAB	SolidWorks	PTC	Autodesk Inventor
3.2.3	R2011b	2001Plus through SolidWorks 2011	Wildfire 2.0 through Creo 1.0	2009-2011
3.2.2	R2011a	2001Plus through SolidWorks 2011	Wildfire 2.0 through Wildfire 5.0	2009-2011
3.2.1	R2010b	2001Plus through SolidWorks 2010	Wildfire 2.0 through Wildfire 5.0	2009-2011

Figura 4-3: Versión del traductor a escoger⁴⁹.

3. Copiar los archivos que contiene esta carpeta que tienen los nombres de “*install_addon.m*” y el “*smlink.r2011b.win64.zip*” en la carpeta donde se ubica el MATLAB.
4. Abrir como administrador la plataforma de MATLAB.

⁴⁹ Tomado de: http://www.mathworks.com/products/simmechanics/download_smlink.html

5. En la ventana de comandos ingresar el siguiente comando *“install_addon(‘Poner aquí entre las comillas la ubicación donde se encuentren los archivos copiados en el paso 3’)*”.
6. Escribir en la línea de comandos lo siguiente *“smlink_linkinv”* lo que asegura que exista la conexión entre el MATLAB y la versión de la plataforma CAD que se tenga.
7. Verificar si existió la conexión dirigiéndose a la plataforma CAD, abrir un archivo de ensamble y revisar que exista un nuevo menú que diga *“SimMechanics Link”*, como se mira en la Figura 4-4. Si no se ha generado, reiniciar el computador.

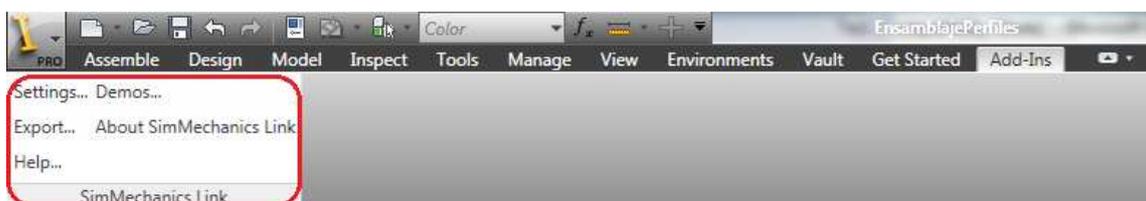


Figura 4-4: Menú del SimMechanics Link en el Autodesk Inventor 2012.

Con esto se realizó correctamente la conexión entre la plataforma CAD y el SimMechanics.

4.2.2 PASOS PARA EL TRASPASO DE UN ENSAMBLE DE LA PLATAFORMA CAD HACIA EL SIMMECHANICS.

Una vez obtenida la conexión correcta entre la plataforma CAD y el SimMechanics, entonces se puede llevar a cabo la migración del archivo hacia el formato XML. Para esto se deben seguir los siguientes pasos:

1. Realizar el ensamble en la plataforma CAD, en el caso de este trabajo de investigación se trata de un ensamble con nombre *“EnsamblajePerfiles.iam”*.
2. Revisar que las condiciones de movimiento y de pares cinemáticos sean los adecuados, observando cuidadosamente las restricciones

entre los elementos ya que estos serán los que se traducirán en las uniones en el SimMechanics.

3. Ubicar al equipo en posición inicial, es decir que se debe asegurar que en el ensamble, el robot manipulador se encuentre en su posición de partida. En este caso se trata de la posición del efector final de (1200, 0, 0), como se observa en la Figura 4-5.

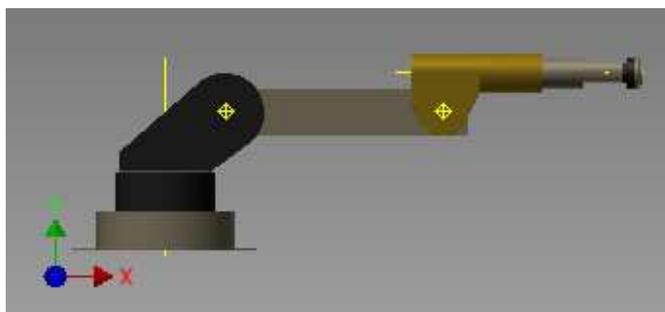


Figura 4-5: Posición Inicial del robot manipulador.

4. Una vez colocado el equipo en su posición inicial se procede a “guardar una copia como”, donde se escoge el formato .STL que será el que nos permita tener un entorno de simulación con los elementos reales del ensamble [Véase la Figura 4-6]. Es decir que copia en este formato las imágenes de los eslabones y esto permite que el SimMechanics use esta imagen dentro de la simulación.

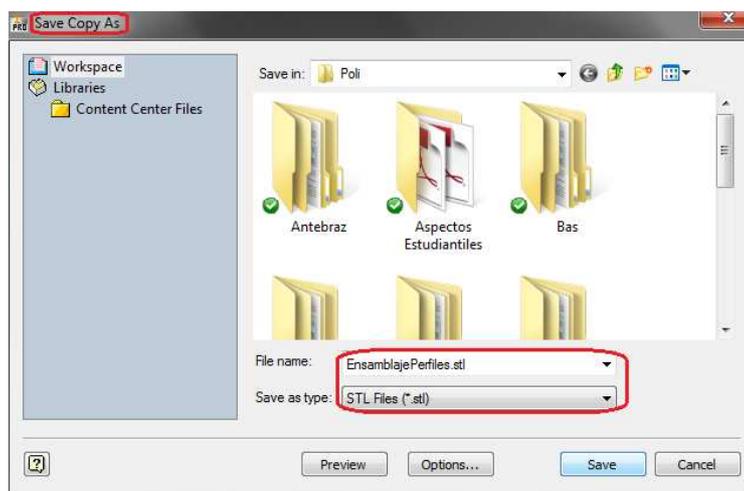


Figura 4-6: Guardando copia del archivo con extensión .STL

- Ir al menú de “SimMechanics Link”, donde se escoge la opción de “export”. El traductor inmediatamente revisa el ensamble y lo transforma a un archivo .XML, en este caso al observar la Figura 4-7, como “*EnsamblajePerfiles.xml*”. Ahora bien, en el caso de que exista errores dentro del ensamble, entonces aparecerá un mensaje en la pantalla, caso contrario solamente un mensaje que afirme la traducción.

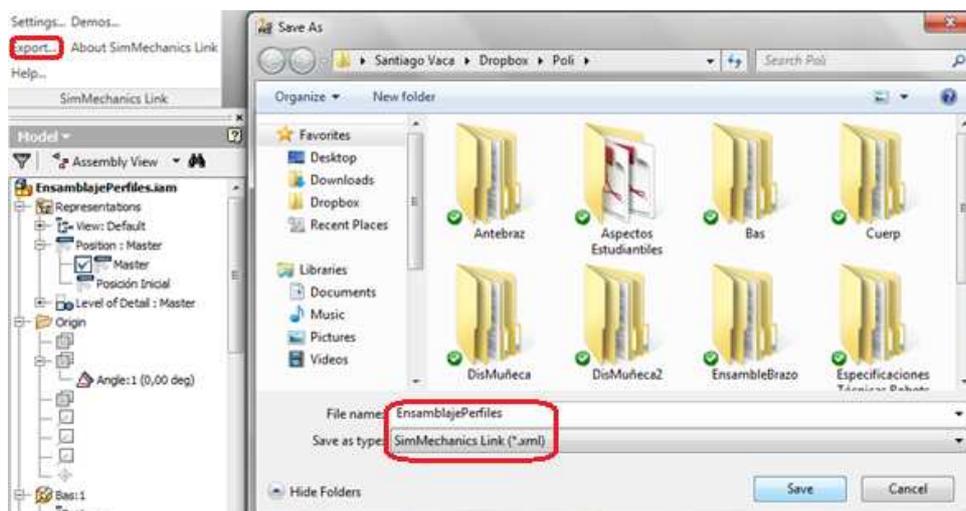


Figura 4-7: Exportando el ensamble a formato .XML

- Abrir el MATLAB y dentro de la línea de comando colocar la siguiente oración “*mech_import('Dirección donde se encuentre el archivo .xml')*”. Esto se puede observar en la Figura 4-8.

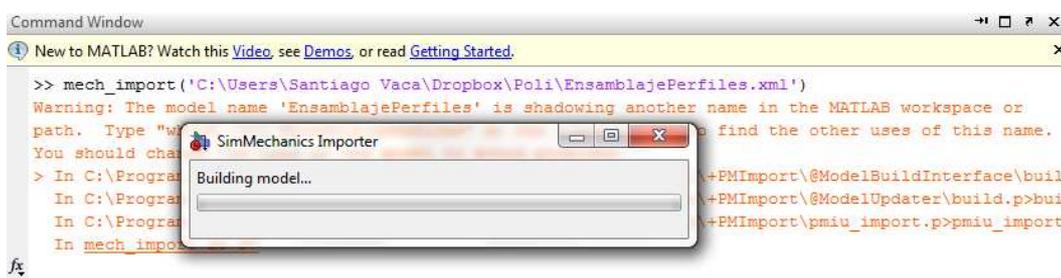


Figura 4-8: Importando el archivo .XML al SimMechanics de MATLAB.

- Revisar el diagrama de flujo que se construye a partir de este archivo de diseño. En este caso se lo puede determinar en la Figura 4-9.

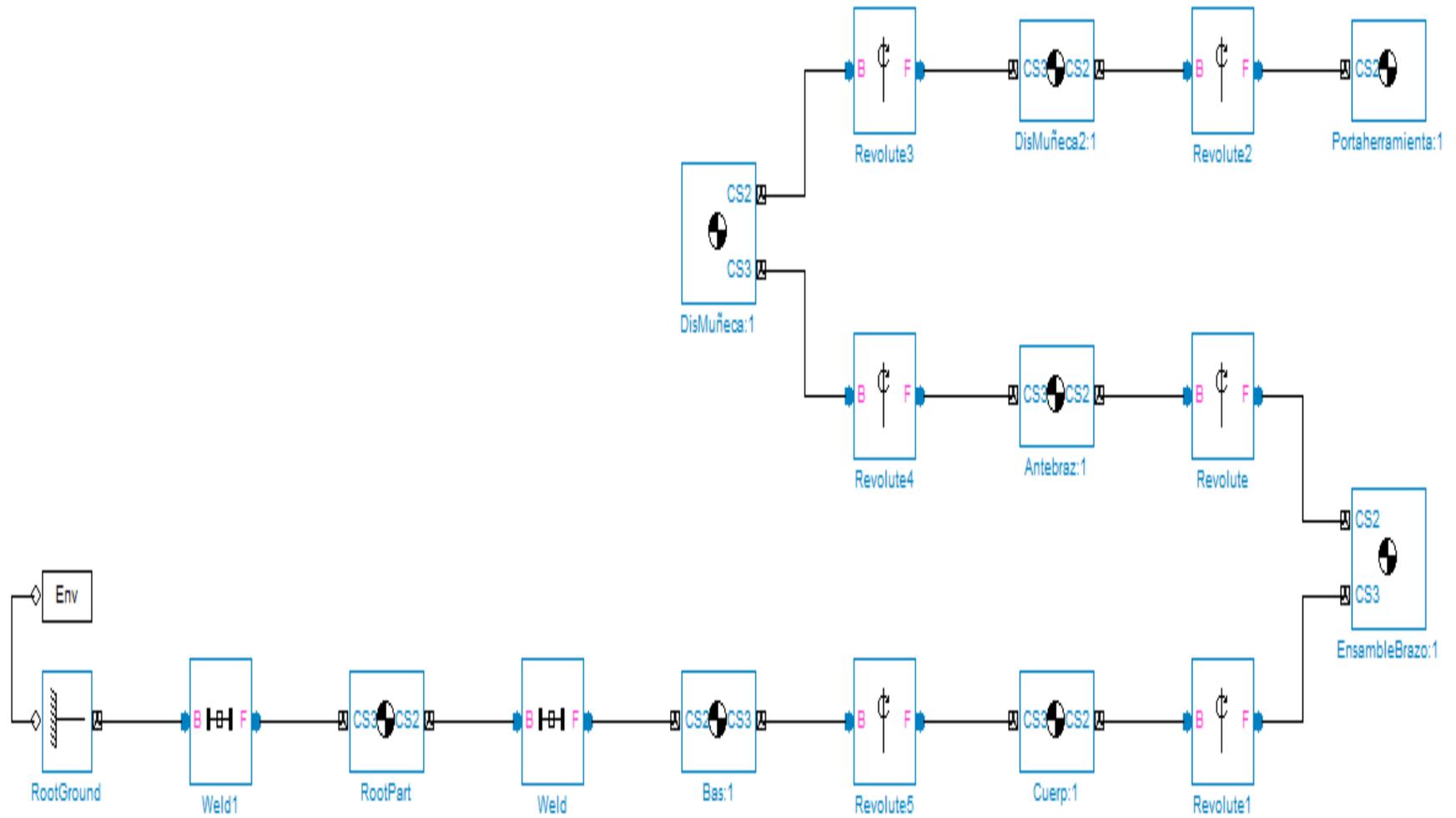


Figura 4-9: Diagrama de Bloques de los elementos del ensamble del Robot Manipulador.

8. Si todo está de acuerdo a lo establecido y no existieron errores entonces se guarda finalmente el archivo con la extensión .MDL que será reconocido por el Simulink, como se observa en la Figura 4-10.



Figura 4-10: Generación del archivo .MDL para la simulación con Simulink.

Ya finalizado esto, entonces se puede decir que se ha concluido con el proceso de traducción entre la plataforma CAD y el MATLAB. A continuación se deberá hacer una interfaz entre este diagrama de bloques que ejemplifica el modelo físico y la línea de comando del MATLAB para poder realizar el análisis cinético y dinámico.

4.3 PREPARAR EL MODELO FISICO EN SIMULINK PARA LA SIMULACIÓN.

Para poder llevar a cabo la correcta simulación del modelo del robot manipulador dentro del entorno del Simulink serán necesarias unas cuantas modificaciones en el archivo de diagrama de bloques con extensión .MDL.

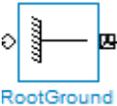
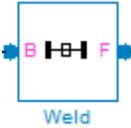
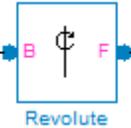
Además de generar una modelación dentro del entorno del SimMechanics también es necesario definir las condiciones necesarias para el análisis cinemático y

dinámico del robot manipulador que se realizará con la ayuda del Robotics Toolbox, por lo que todas estas contemplaciones se tomarán en cuenta al momento de realizar estas modificaciones.

4.3.1 SIGNIFICADO Y FUNCIONAMIENTO DE LOS BLOQUES A UTILIZARSE EN EL DIAGRAMA DEL SIMMECHANICS.

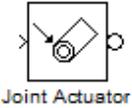
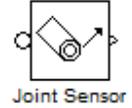
Cuando se generó el archivo del diagrama de bloques para la simulación en el Simulink se observan de antemano algunos bloques, los cuales serán definidos a continuación:

Tabla 4-1: Bloques existentes en el diagrama de bloques del modelo físico en el Simulink.

Bloque	Significado y Aplicación
	<p>Machine Environment: Entorno de la Máquina.</p> <p>En este bloque se definen las condiciones del entorno de simulación. Por ejemplo gravedad, tolerancias, etc.</p>
	<p>Ground: Tierra.</p> <p>Este bloque define la posición de la tierra a la que irá sujeta la base de la máquina. Es la conexión de la máquina y el entorno.</p>
	<p>Body: Cuerpo.</p> <p>Es la representación de cuerpo o un elemento sólido. Se definen la masa, el centro de gravedad y el momento de inercia.</p>
	<p>Weld: Soldadura.</p> <p>El bloque de soldadura define una unión entre dos cuerpos mediante una junta que tiene 0 grados de libertad. Cuando son cuerpos solitarios define que estos están soldados a tierra.</p>
	<p>Revolute: Junta de Revolución.</p> <p>Se determina una junta o par de revolución entre dos cuerpos conectados entre sí. En este bloque es posible definir actuadores y sensores</p>

Ahora bien, para poder seguir avanzando con la creación del correcto entrono para la simulación en Simulink es necesario definir los siguientes bloques que servirán para establecer los parámetros y poder observar los resultados obtenidos.

Tabla 4-2: Bloques a colocarse en el diagrama de bloques del modelo físico en el Simulink.

Bloque	Significado y Aplicación
 <p>Joint Actuator</p>	<p>Joint Actuator: Actuador de junta.</p> <p>Este bloque permite controlar el movimiento de la junta o articulación como si se tratase de un actuador real. El valor de entrada puede ser de diversas naturalezas.</p>
 <p>Joint Sensor</p>	<p>Joint Sensor: Sensor de Junta.</p> <p>Dependiendo del tipo de junta que se trate, este sensor tendrá la capacidad de medir los valores de posición, velocidad, aceleración, fuerza y torque, que surgen de la simulación.</p>
 <p>Scope</p>	<p>Scope: Visor.</p> <p>Este bloque crea una ventana por la cual es posible observar los valores determinados por el sensor de junta por medio de un gráfico a través del tiempo.</p>
 <p>simin From Workspace</p>	<p>From Workspace: Del Espacio de Trabajo.</p> <p>Este bloque del Simulink funciona como un traductor-lector entre el diagrama de bloques del Simulink y el espacio de trabajo actual del MATLAB. De esta manera es posible exportar valores para la simulación.</p>

4.3.2 PROCESO DE PREPARACIÓN DEL MODELO EN SIMULINK.

Ya definidos los bloques a utilizarse dentro de la simulación se procederá a realizar la preparación del modelo dentro del entorno de Simulink. Hay que considerar que de igual manera este modelo deberá servir para realizar el análisis cinemático y dinámico del robot manipulador.

1. Definir las condiciones del entorno mediante su definición en el bloque “environment”. Por lo tanto se observa que la gravedad se haya importado adecuadamente desde el ensamble CAD hacia el Simulink. Se deja lo demás por defecto como se mira en la Figura 4-11.

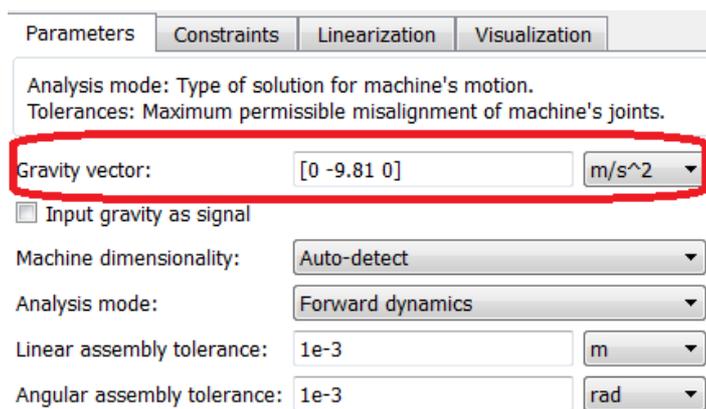


Figura 4-11: Definir las condiciones del entorno de simulación.

2. Siendo la posición del efector final del robot fundamental en esta simulación es fundamental, es importante cambiar la ubicación de la tierra “Ground” que, debido a la traducción del CAD-SimMechanics queda en una posición diferente al origen de coordenadas [0 0 0]. Esto se define en la Figura 4-12.

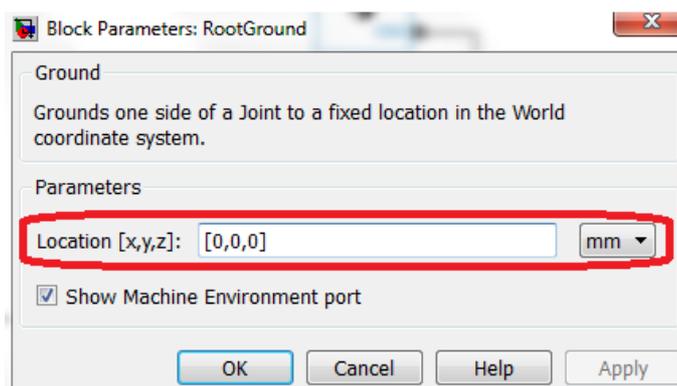


Figura 4-12: Cambiar la ubicación de la tierra al origen del eje coordenado.

3. Debido al cambio hecho en el paso 2, entonces es indispensable cambiar algunos parámetros de los dos cuerpos que preceden al bloque de tierra: RootPart y la Base. En estos se debe cambiar las

conexiones que tienen a su izquierda y derecha (en el caso del RootPart) para que los elementos se encuentren exactamente en el origen coordenado (Véase la Figura 4-13).

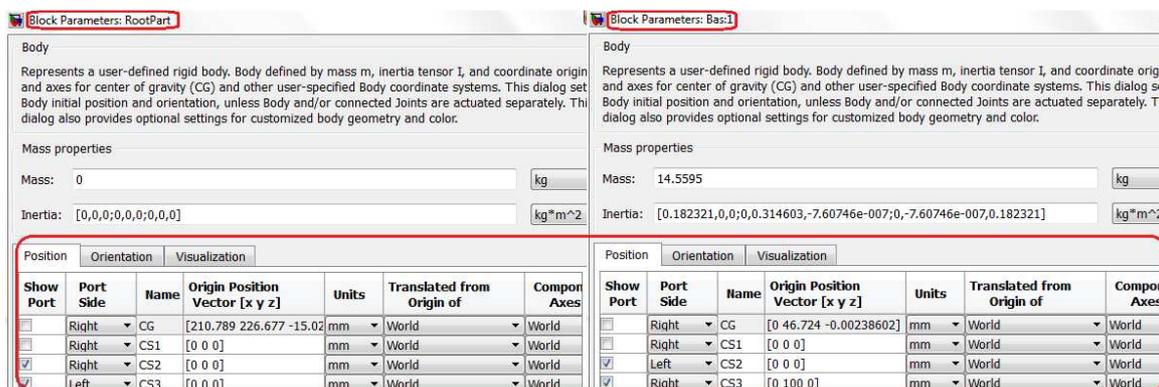


Figura 4-13: Actualizar las coordenadas de las conexiones que existen después del bloque tierra.

4. Finalmente, para establecer si se encuentra correctamente definido el sistema entonces se ejecuta la simulación y si está correcto se observará como el robot “colapsa” por la gravedad.
5. Se genera las funciones necesarias para la simulación con los bloques detallados en la Tabla 4-2. Esto se puede observar en el Anexo 2.

CAPÍTULO 5

ANÁLISIS DE LA CINEMÁTICA DEL MANIPULADOR UTILIZANDO ROBOTICS TOOLBOX DE MATLAB.

5.1 GENERALIDADES:

Se denomina análisis cinemático de un robot manipulador al estudio del movimiento del mismo con respecto a un sistema de referencia determinado. Como su nombre lo indica, este no considera las fuerzas que intervienen en el movimiento. Barrientos en su libro llamado “Fundamentos de la Robótica”, establecerá que el

estudio de la cinemática se *“interesa por la descripción analítica del movimiento espacial del robot como una función del tiempo, y en particular de las relaciones entre la posición y la orientación del extremo final del robot con los valores que toman sus coordenadas articulares”*⁵⁰.

También es importante recalcar que este estudio determina las relaciones existentes entre las velocidades de los movimientos de las articulaciones y las del extremo del robot. A esta relación se la denomina como Jacobiano y viene dada por un método diferencial expresada mediante una matriz.

Ahora hay que definir que existen dos tipos de estudios cinemáticos, el primero denominado como directo, el cual consta de un método por el cual es posible determinar la posición y orientación del extremo final del manipulador con respecto a un determinado sistema de referencia. Para este estudio es necesario tener los valores de movimientos de las articulaciones y los parámetros geométricos de los elementos del robot. Para efectos de lectura y procesamiento de datos es muy utilizado, debido a que mediante la lectura del sensor de posición de las articulaciones se vuelve posible encontrar la posición del efector final.

El segundo caso es el denominado inverso y se trata de resolver la configuración de los movimientos de los eslabones para así lograr una determinada posición y orientación del extremo conocidas. Es decir que se trata de establecer los valores que se deben mover los elementos del robot para que el extremo final esté en una determinada posición. Para efectos de la automatización del manipulador es más utilizado este último método de análisis.

Una explicación gráfica de los dos métodos, para una mejor comprensión, puede encontrarse en la Figura 5-1.

⁵⁰ BARRIENTOS, A (2009); *“Fundamentos de Robótica”*, Madrid: McGraw-Hill; 2da Edición; página 119

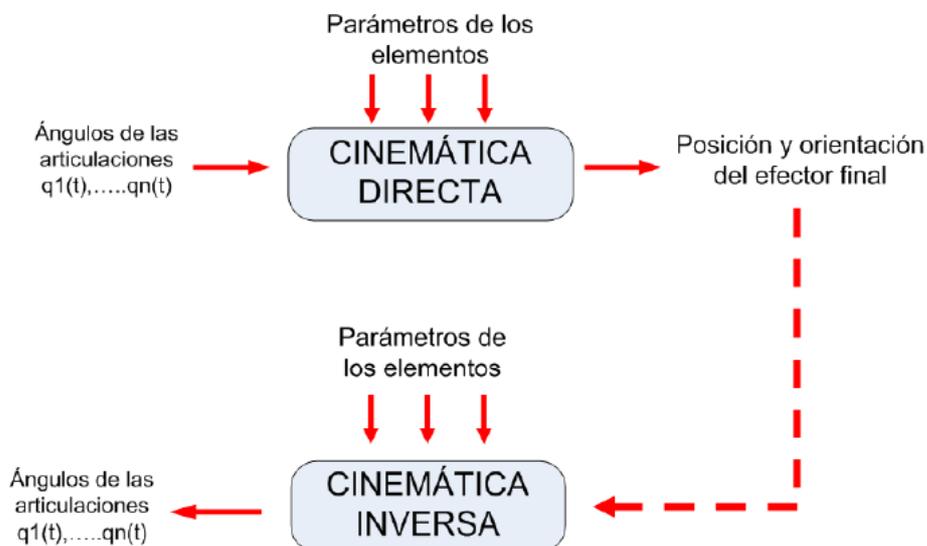


Figura 5-1: Características de la Cinemática Directa e Inversa⁵¹.

Para el presente proyecto de titulación, se realizarán estos dos métodos de análisis, tanto el directo e inverso, utilizando el Robotics Toolbox de MATLAB.

5.2 CONVENCIONES PARA LOS EJES COORDENADOS:

Debido a que para todo análisis cinemático (e incluso dinámico), es importantísimo manejar correctamente los ejes coordenados dentro del espacio, para este estudio se escogerá una convención en cuanto a la caracterización de los ejes coordenados relacionándolos con colores característicos como se observa en la Figura 5-2:

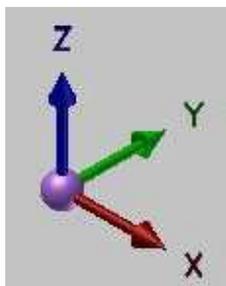


Figura 5-2: Convención de Colores para los ejes coordenados.

Por lo tanto:

⁵¹ MOYA, D. (2010). "Modelo y Análisis cinemático de un robot manipulador industrial esférico aplicando el MATLAB". Quito: Tesis EPN; Pagina 28.

- El eje z será de color azul.
- El eje x será de color rojo.
- El eje y será de color verde.

Así mismo se definirá a todo ángulo positivo a aquel que esté girando en sentido anti-horario, siendo negativo el que gira en sentido horario.

Por otra parte es importante decir que los valores a manejarse estarán siempre determinados en metros, las masas en kg y los ángulos en grados. Por lo tanto las demás dimensiones serán en las unidades correspondientes a la conjugación de estas.

5.3 MÉTODO DE RESOLUCIÓN POR MEDIO DE LA MATRIZ DE DENAVIT-HATENBERG:

Para la resolución del problema de la cinemática del robot manipulador existen varios métodos numéricos que permiten aproximarse a la solución. En este caso se utilizará el realizado por los investigadores Denavit y Hartenberg en 1955, los cuales propusieron una metodología para describir y representar la geometría espacial de los elementos de una cadena cinemática por medio de la utilización de una matriz de transformación homogénea. Así se logra describir la relación espacial existente entre dos elementos adyacentes.

Este método es actualmente el más conocido y utilizado por su característica matemática matricial, la cual le permite tener grandes aplicaciones, sobre todo en el software matemático (como es el caso del MATLAB).

Al aplicar este método se busca pasar de un eslabón al siguiente mediante cuatro transformaciones básicas [en el siguiente numeral se las explicará] que dependen exclusivamente de las características geométricas del elemento en cuestión.

5.3.1 MATRIZ DE DENAVIT-HARTENBERG:

La matriz homogénea que lleva el nombre de sus autores (Denavit-Hartenberg, o también conocido por sus siglas D-H), reduce el problema cinemático al encontrar una matriz de transformación 4x4 que relaciona la localización espacial del extremo del manipulador con respecto a la referencia (que usualmente son las coordenadas de la base del robot). Esta es la matriz resultante de la multiplicación, ya normalizada, de cuatro matrices de la siguiente manera:

1. Matriz de traslación a lo largo de \mathbf{z} y una distancia \mathbf{d} .
2. Matriz de rotación alrededor de \mathbf{z} y un ángulo θ .
3. Matriz de traslación a lo largo de \mathbf{x} y un valor de \mathbf{a} .
4. Matriz de rotación alrededor de \mathbf{x} y un ángulo α .

Por lo tanto la matriz de Denavit-Hartenberg viene dada por la siguiente expresión:

$$D - H = Tzd * Rz\theta * Txa * Rza$$

Esta ecuación expresada ya en términos matriciales nos dará un resultado como el siguiente:

$$D - H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C\theta_i & -S\theta_i & 0 & 0 \\ S\theta_i & C\theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C\alpha_i & -S\alpha_i & 0 \\ 0 & S\alpha_i & C\alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$D - H = \begin{bmatrix} C\theta_i & -S\theta_i C\alpha_i & S\theta_i S\alpha_i & aC\theta_i \\ S\theta_i & C\theta_i C\alpha_i & C\theta_i S\alpha_i & aS\theta_i \\ 0 & S\alpha_i & C\alpha_i & d \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

5.3.2 PARÁMETROS DE DENAVIT-HARTENBERG:

De la matriz anterior es posible determinar que existen únicamente cuatro parámetros que definirán la matriz D-H y que estos dependen únicamente de las características geométricas de cada eslabón y de la naturaleza de las articulaciones

que le unen con su predecesor y su respectivo sucesor. Por lo tanto es importante definirlos con claridad.

Para este efecto se los dividirá dentro de dos grupos, los cuales servirán como guía para entender sus características. Dentro del primer grupo se encuentran los que corresponden a los que están en relación con el tamaño y forma del eslabón. Estos son:

- **a**: Es la distancia entre los ejes i e $i+1$ de las articulaciones a lo largo de la normal común. Este parámetro define la longitud del eslabón. Para mejor comprensión mírese la Figura 5-3.

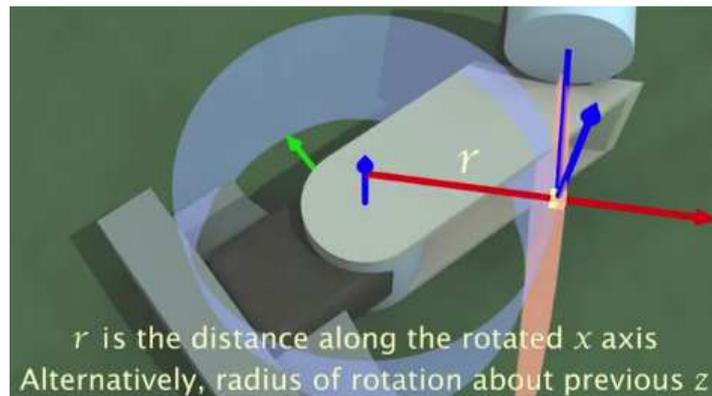


Figura 5-3: Parámetro a de un elemento cualquiera (también denominado como r).⁵²

- **α** : Es el ángulo que existiría entre los ejes i e $i+1$ de las articulaciones si estos se cortasen en los puntos de corte de la línea normal común. Se lo conoce como ángulo de torsión del eslabón ya que de cierta manera mide la forma del eslabón a través del ángulo que sobre el mismo se encuentra girado. Para mejor comprensión mírese la Figura 5-4.

⁵² Tomado del video "Denavit-Hartenberg Reference Frame Layout"
<http://www.youtube.com/watch?v=rA9tm0gTln8>.

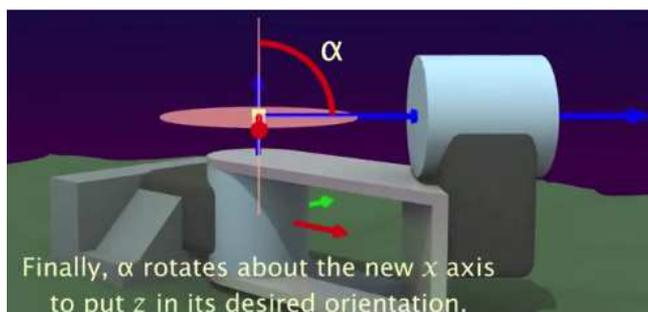


Figura 5-4: Parámetro α de un elemento cualquiera.⁵³

El segundo grupo viene determinado por aquellos parámetros que están relacionados a un eslabón y su predecesor. Estos son los siguientes:

- **d**: Es la distancia entre las intersecciones de las normales comunes al eje de la articulación i , medida a lo largo de dicho eje. Este parámetro se denomina longitud articular debido a que expresa la distancia entre los dos eslabones que se encuentran marcados por el tamaño y forma de la articulación. Para mejor comprensión mírese la Figura 5-5.

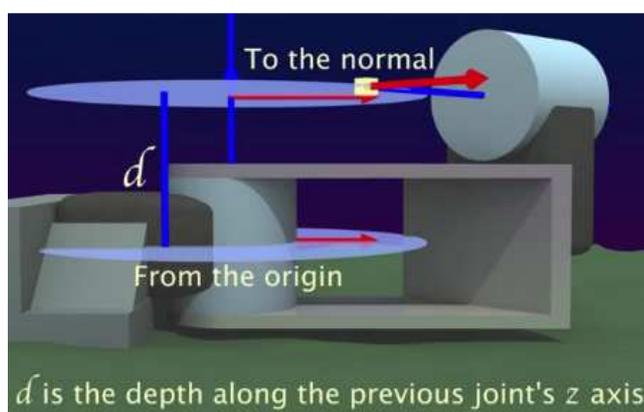


Figura 5-5: Parámetro d de un elemento cualquiera.⁵⁴

- θ : Este parámetro establece el ángulo que existiría entre las intersecciones de las normales comunes al eje de la articulación i si se cortasen en el mismo punto del eje de la articulación. Se denomina ángulo articular ya que expresa el ángulo que forman dos eslabones

⁵³ Ibíd.

⁵⁴ Tomado del video "Denavit-Hartenberg Reference Frame Layout".
<http://www.youtube.com/watch?v=rA9tm0gTln8>

marcados por la forma de la articulación. Para mejor comprensión mírese la Figura 5-6.

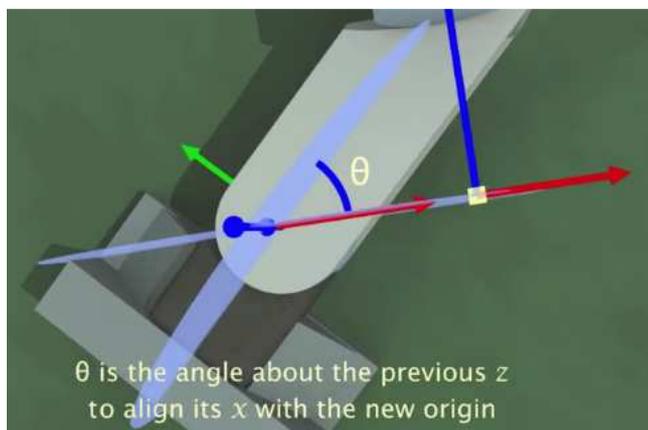


Figura 5-6: Parámetro θ de un elemento cualquiera.⁵⁵

Como se observó, estos dependen de la geometría y forma de la articulación, por lo que se utilizará una imagen que ejemplifique estos parámetros para una articulación rotatoria.

Los cuatro parámetros y sus definiciones quedarán mejor explicados en la Figura 5-7.

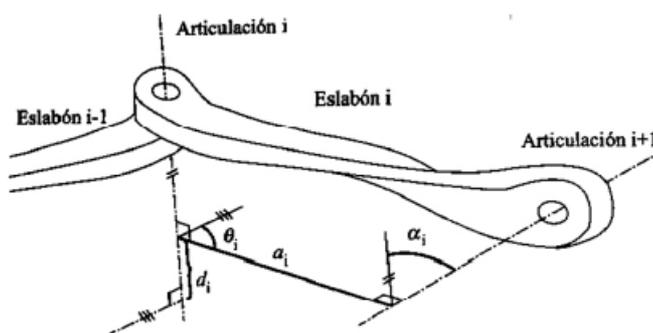


Figura 5-7: Parámetros D-H para una Articulación Rotatoria.⁵⁶

⁵⁵ Ibíd.

⁵⁶ MOYA, D. (2010). "Modelo y Análisis cinemático de un robot manipulador industrial esférico aplicando el MATLAB". Quito: Tesis EPN. Pagina 28.

5.3.3 RESOLUCIÓN POR MEDIO DE LA MATRIZ DE TRANSFORMACIÓN HOMOGÉNEA:

La resolución del problema cinemático del manipulador mediante este método utiliza el álgebra vectorial y matricial para describir la ubicación de un objeto en el espacio tridimensional con respecto a un sistema de referencia fijo. En este caso se trata de una cadena cinemática en donde los eslabones están unidos entre sí por articulaciones (pares cinemáticos).

Se acostumbra localizar a la referencia fija en la base del robot y a los diferentes eslabones con respecto a este sistema de referencia⁵⁷.

Para la resolución por este método, todo se reduce a encontrar una matriz de transformación homogénea que represente la posición y orientación relativa entre dos eslabones consecutivos del robot manipulador. A estas matrices se las conoce con la notación de ${}^{i-1}\mathbf{A}_i$. De donde i representa la posición y orientación del sistema de referencia solidario al eslabón i con respecto al sistema de referencia del eslabón predecesor $i-1$. Así de esta manera, cuando se encuentra una matriz ${}^0\mathbf{A}_1$ quiere decir que es la que describe la posición y orientación del sistema de referencia solidario al primer eslabón con respecto al sistema de referencia solidario a la base. Es importante recalcar que en este caso, debido a las características físicas del diseño del manipulador, existirán matrices de transformación homogéneas por cada grado de libertad que posea el robot.

Una vez considerados todos los grados de libertad de un robot, la matriz de transformación viene a denominarse ${}^0\mathbf{A}_n$ y se la conoce con la letra \mathbf{T} . Así, para el robot manipulador de este estudio que tiene 6 grados de libertad, la matriz \mathbf{T} será expresada de la siguiente manera:

$$\mathbf{T} = {}^0\mathbf{A}_n = {}^0\mathbf{A}_1 {}^1\mathbf{A}_2 {}^2\mathbf{A}_3 {}^3\mathbf{A}_4 {}^4\mathbf{A}_5 {}^5\mathbf{A}_6$$

⁵⁷ BARRIENTOS, A (2009); "Fundamentos de Robótica", McGraw-Hill: 2da Edición; página 76.

Con esto se logra obtener una matriz de transformación homogénea resultante que corresponde a la localización en la que se desea posicionar al robot manipulador y se la denomina **[n o a p]**.

5.4 DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS D-H PARA EL ROBOT MANIPULADOR TIPO PUMA DE ESTUDIO:

Para poder comenzar el estudio cinemático utilizando el Robotics Toolbox de MATLAB es necesario determinar los parámetros D-H, de tal manera que se pueda ensamblar el robot manipulador dentro del entorno del programa y así realizar el análisis.

Aunque existen varias metodologías para determinar fehacientemente los parámetros de D-H, será importante reconocer que la mejor y más rápida forma es mediante el método gráfico. A continuación se aplicará este método en una serie de pasos.

5.4.1 NUMERACIÓN DE LOS ESLABONES Y DE LAS ARTICULACIONES:

Este es el primer paso para poder determinar los parámetros que contiene el robot diseñado en el capítulo anterior y consiste en numerar todos los eslabones que se tienen, comenzando por la base (inmóvil) a la cual se le colocará el número 0. Después de esto se colocará el **1** el primer eslabón móvil de la cadena, **2** al segundo y así sucesivamente hasta acabar con **n** al último eslabón móvil.

Posteriormente a esto se llevará a cabo la numeración de cada una de las articulaciones en orden sucesivo, de tal manera que el número **1** sea utilizado para nombrar al primer grado de libertad (que por lo general está formado entre la tierra y el eslabón **1**), hasta acabar con el eslabón número **n**.

Hay que considerar que para evitar confusiones se ha establecido una normativa en la cual se utiliza una numeración que debe estar precedida por la letra

q , en el caso que sea una articulación rotatoria, y una d , cuando se trata de una articulación prismática. Esto se puede observar en la Figura 5-8.

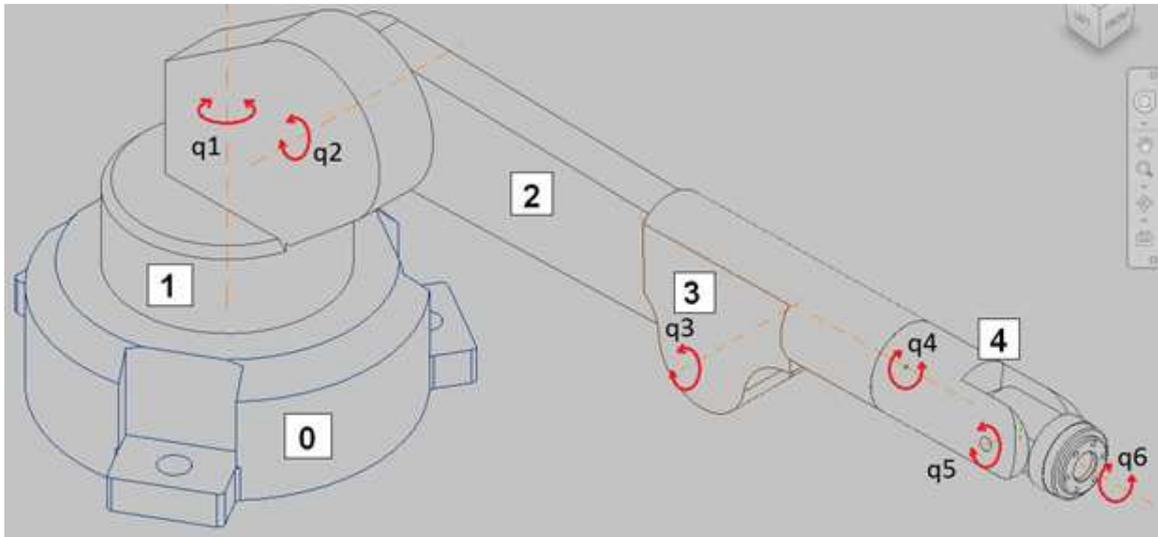


Figura 5-8: Numeración de Eslabones y Articulaciones del Robot Manipulador Industrial tipo Puma.

5.4.2 SITUAR LOS EJES Z_s SOBRE LOS EJES DE ROTACIÓN:

El paso siguiente a este es el de situar, para i de 0 a $n-1$, los ejes z_i sobre el eje de la articulación $i+1$. Tomando en cuenta que estos serán los que el servomotor moverán y por ende son la principal incógnita del análisis cinemático directo.

Esto se lo puede observar en la Figura 5-9.

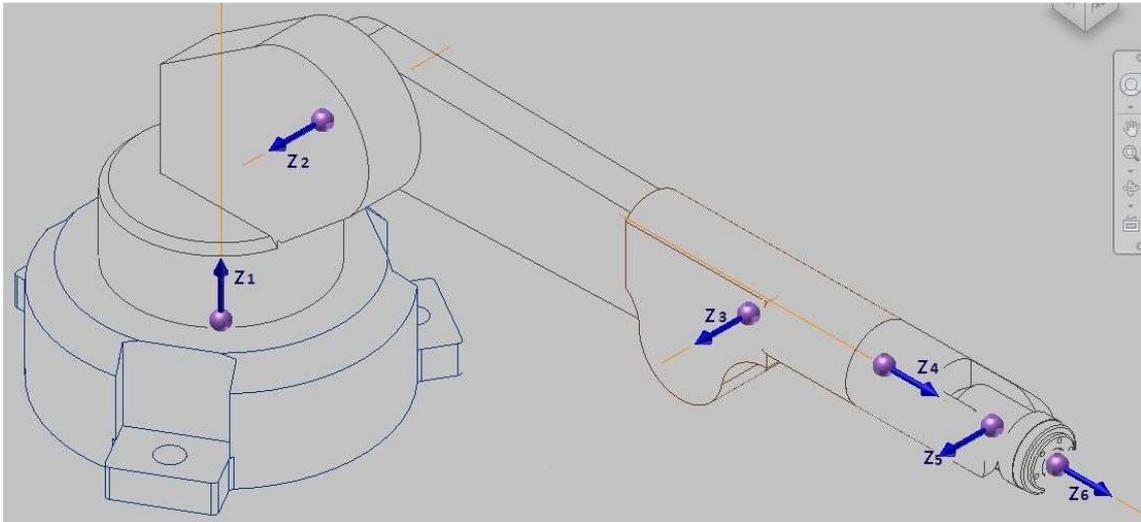


Figura 5-9: Ubicación de los ejes Zs de cada articulación del Robot Manipulador.

5.4.3 ESTABLECER GRAFICAMENTE LOS EJES DE COORDENADAS DE CADA ARTICULACIÓN.

Para este paso es necesario utilizar lo visto anteriormente en lo que respecta a la definición de los parámetros D-H, de tal manera que es fundamental establecer las normales comunes desde el origen que define la articulación hasta el siguiente, para así determinar los verdaderos puntos en los que, para los parámetros D-H, el movimiento se origina (***No necesariamente son los mismos puntos del centro de la articulación, ni las secciones de donde sucede la junta rotatoria.***)

Este paso terminado se lo puede encontrar en la Figura 5-10.

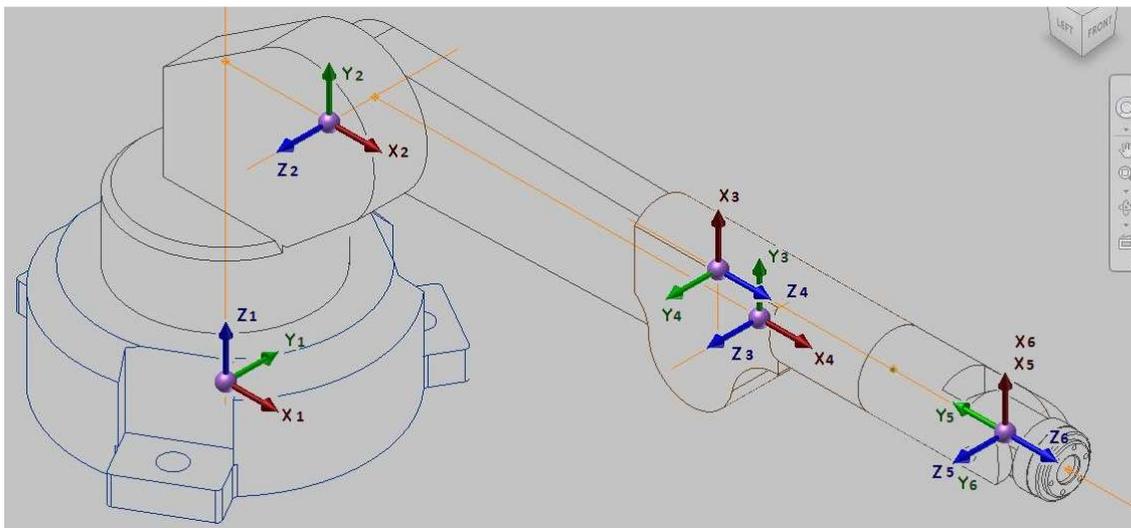


Figura 5-10: Ejes de Coordenadas de Cada Articulación.

5.4.4 DETERMINAR LOS PARÁMETROS NECESARIOS PARA LLEVAR DE UN ESLABÓN A OTRO LOS EJES DE COORDENADAS:

En este punto se determinan las distancias y ángulos “recorridos” por los ejes para pasar desde un eslabón hasta el siguiente, sucesivamente hasta determinar por completo todas las articulaciones. Por esta razón es necesario tener las distancias en las que se encuentran los ejes de las respectivas articulaciones (Figura 5-11 y Figura 5-12).

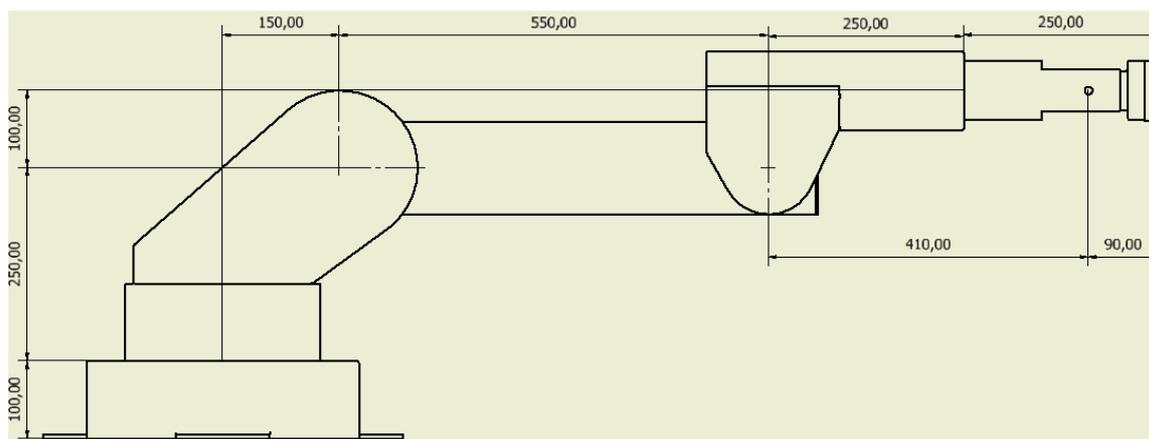


Figura 5-11: Distancias existentes entre los ejes de acción de las articulaciones del Robot (Fontal).

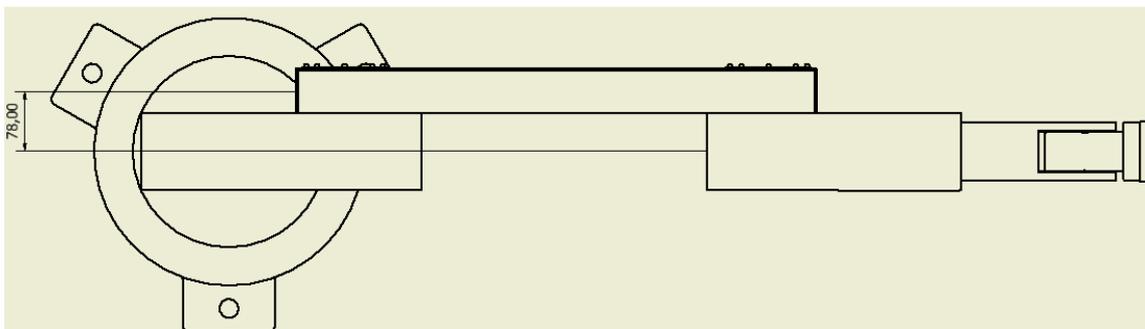


Figura 5-12: Distancias existentes entre los ejes de acción de las articulaciones del Robot (Vista Superior).

Finalmente con estos datos se llenarán los valores necesarios para determinar los parámetros D-H del robot y que se encuentran resumidos en la siguiente tabla.

Tabla 5-1: Parámetros D-H para el Robot Industrial Tipo Puma de estudio.

Articulación	d [m]	α [°]	a [m]	α [°]
1	0.350	q_1	0.150	$\pi/2$
2	0	q_2	0.550	0.0
3	0	$q_3 + \pi/2$	0.100	$\pi/2$
4	0.410	q_4	0.0	$-\pi/2$
5	0.0	q_5	0.0	$\pi/2$
6	0.090	q_6	0.0	0.0

En la Tabla 5-1 se encuentran resumidos los parámetros para el robot manipulador que es el objeto de estudio de este trabajo de investigación y el que será analizado mediante la herramienta informática de MATLAB®.

5.5 ROBOTICS TOOLBOX PARA MATLAB®:

Hay que definir primeramente que se conoce que dentro del SimMechanics es posible realizar el análisis cinemático y dinámico del robot manipulador, al igual que dentro del entorno de Simulación dinámica del Inventor 2012. No obstante el objetivo de este trabajo de investigación es realizar estos dos análisis mediante el Robotics Toolbox para MATLAB hecho por Peter Corke.

De tal manera que para poder utilizar esta herramienta adecuadamente y de manera correcta es necesario primero realizar una pequeña revisión sobre conceptos de funcionamiento Robotics Toolbox para MATLAB.

5.5.1 ASPECTOS PRINCIPALES DEL ROBOTICS TOOLBOX PARA MATLAB:

El Robotics Toolbox es una compilación de funciones, dentro de una dirección que puede leer el MATLAB®, fue realizado inicialmente por el PhD. Peter Corke por el año 1995 cuando realizaba sus estudios de doctorado y decidió reunir las funciones más comunes del estudio de robots.

Desde esa fecha, Corke ha realizado innumerables actualizaciones a su paquete informático, de tal manera que puede ir acorde a los cambios realizados en la plataforma de MATLAB®. Actualmente, las últimas versiones cubren funcionalidades de los robots modernos como por ejemplo el control, localización y navegación de robots terrestres móviles.

Este Toolbox provee muchas funciones que son muy útiles para el estudio y simulación de los robots manipuladores (análogos al brazo humano). Entre las funciones que se pueden encontrar son: Estudio de la cinemática y dinámica del robot, determinación del jacobiano y generadores de trayectorias.

Para esta herramienta, los parámetros están encapsulados en objetos reconocibles para el MATLAB®, lo que permite al usuario realizar cualquier objeto robótico que posea una cadena de eslabones en serie unidos por articulaciones.

En este trabajo de investigación se utilizará la revisión número 9 del Robotics Toolbox for Matlab, por lo que cualquier variación en la sintaxis del programa o del entorno en sí corresponde a esta versión.

El manual de uso, las especificaciones y características del Toolbox puede ser encontrado en la página web de su desarrollador en http://petercorke.com/Robotics_Toolbox.html.

5.6 CINEMÁTICA DIRECTA DEL ROBOT MANIPULADOR INDUSTRIAL TIPO PUMA MEDIANTE EL ROBOTICS TOOLBOX.

Para poder realizar el estudio de la cinemática directa del robot manipulador serán necesarios algunos pasos, que serán hechos a medida que se avanza, y para los cuales será necesario tomar los valores y datos obtenidos en los capítulos anteriores.

5.6.1 CREAR EL ROBOT EN EL ENTORNO:

El primer paso para la creación del robot en el entorno del programa es el de determinar los parámetros de la matriz D-H determinando cada una de los valores y colocándolos en el orden establecido. Esto se resumirá en la Tabla 5-2, tomando en consideración los datos obtenidos en la Tabla 5-1 y que los parámetros estarán definidos en su forma “standard”.

Tabla 5-2: Parámetros D-H a utilizarse en el Robotics Toolbox para MATLAB®.

Articulación	q [°]	d [m]	a [m]	α [°]	Sigma	Offset
1	q_1	0.350	0.150	$\pi/2$	0	0.0
2	q_2	0	0.550	0.0	0	0.0
3	q_3	0	0.100	$\pi/2$	0	$\pi/2$
4	q_4	0.410	0.0	$-\pi/2$	0	0.0
5	q_5	0.0	0.0	$\pi/2$	0	0.0
6	q_6	0.090	0.0	0.0	0	0.0

Una vez definido esto mediante el uso de los LINKS, se realizará cada uno de los eslabones con sus respectivas articulaciones según las dimensiones del robot manipulador obtenidos en el diseño funcional y de los parámetros D-H de la siguiente manera: *link* (q , d , a , α **Sigma**, **Offset**). De donde se entiende que, por convención, las variables desconocidas a los valores del ángulo q . Además es importante saber que **Sigma** es el valor que define si una articulación es de rotación (**0**) o de traslación

(1) y **Offset** define los desfases que existieron en la medida del parámetro correspondiente, con respecto al ángulo α .

Ahora sí, con todo esto definido se procede a realizar la creación de los eslabones con sus respectivos parámetros utilizando no solamente los datos obtenidos de la Tabla 5-2, sino los valores que se recopilieron de la traducción entre el CAD y el SimMechanics. Para hacerlo es necesario saber utilizar la función “`get_param`”, la cual busca el bloque indicado dentro del diagrama del Simulink y recupera el valor que se requiera. A continuación se podrá observar mejor como es su funcionamiento.

```
%Ejecutar la ruta de acceso del Robotics Toolbox Release 9
startup_rvc
%Abrir el archivo importado del CAD
open_system('EnsamblajePerfiles.mdl')

%Se generan los links con los parámetros DH
%L=link([theta d a alpha sigma offset])
L1=Link([0 0.350 0.150 pi/2 0 0]);
L2=Link([0 0 0.550 0 0 0]);
L3=Link([0 0 0.100 pi/2 0 pi/2]);
L4=Link([0 0.410 0 -pi/2 0 0]);
L5=Link([0 0 0 pi/2 0 0]);
L6=Link([0 0.090 0 0 0 0]);

%Se colocan las características dinámicas de los eslabones.
%Primero las masas
L1.m=str2num(get_param('EnsamblajePerfiles/Cuorp:1','mass'));
L2.m=str2num(get_param('EnsamblajePerfiles/EnsambleBrazo:1','mass'));
L3.m=str2num(get_param('EnsamblajePerfiles/Antebraz:1','mass'));
L4.m=str2num(get_param('EnsamblajePerfiles/DisMuñeca:1','mass'));
L5.m=str2num(get_param('EnsamblajePerfiles/DisMuñeca2:1','mass'));
L6.m=str2num(get_param('EnsamblajePerfiles/Portaherramienta:1','mass'));

%Segundo la matriz tensor de inercia.
L1.I=str2num(get_param('EnsamblajePerfiles/Cuorp:1','inertia'));
L2.I=str2num(get_param('EnsamblajePerfiles/EnsambleBrazo:1','inertia'));
L3.I=str2num(get_param('EnsamblajePerfiles/Antebraz:1','mass'));
L4.I=str2num(get_param('EnsamblajePerfiles/DisMuñeca:1','inertia'));
L5.I=str2num(get_param('EnsamblajePerfiles/DisMuñeca2:1','inertia'));
L6.I=str2num(get_param('EnsamblajePerfiles/Portaherramienta:1','inertia'));

%Tercero el centro de masa.
L1.r=[0.0354901 0.11888 0];
L2.r=[0.175 0 -0.073951];
L3.r=[0.067322 0.068282 0];
L4.r=[0.0814 0 0];
```

```
L5.r=[0.07521 0 0];
L6.r=[0.00765 0 0];
```

Ya definido esto, se compilan todos los “links” mediante la función denominada como “SerialLink” en el Toolbox de la siguiente manera:

```
%Se realiza la unión de los links
R=SerialLink([L1,L2,L3,L4,L5,L6]);
```

Se pueden definir los valores de la gravedad, de ser necesario, pero en este caso se dejará a esta aceleración en su valor por defecto en el eje z. Además se puede cambiar el nombre del robot.

```
R.name=('RobTes');
```

Como resultado de la compilación, el MATLAB debe entregar un resumen como se observa en la Figura 5-13:

```
R =

RobTes (6 axis, RRRRRR, stdDH)
+-----+-----+-----+-----+
| j |      theta |      d |      a |      alpha |
+-----+-----+-----+-----+
| 1 |      q1 |    0.35 |    0.15 |    1.571 |
| 2 |      q2 |      0 |    0.55 |      0 |
| 3 |      q3 |      0 |    0.1 |    1.571 |
| 4 |      q4 |    0.41 |      0 |   -1.571 |
| 5 |      q5 |      0 |      0 |    1.571 |
| 6 |      q6 |    0.09 |      0 |      0 |
+-----+-----+-----+-----+

grav =      0 base = 1 0 0 0 tool = 1 0 0 0
          0      0 1 0 0          0 1 0 0
          9.81      0 0 1 0          0 0 1 0
                   0 0 0 1          0 0 0 1
```

Figura 5-13: Compilación del robot en el MATLAB usando el Robotics Toolbox.

Por último para observar que los datos y la compilación estuvieron bien realizados, entonces se dibuja en el espacio al robot creado [Véase la Figura 5-14] mediante la función **plot** de la siguiente manera:

```
%Se grafica el robot compilado para la posición inicial
plot (R,[0 0 0 0 0 0])
```

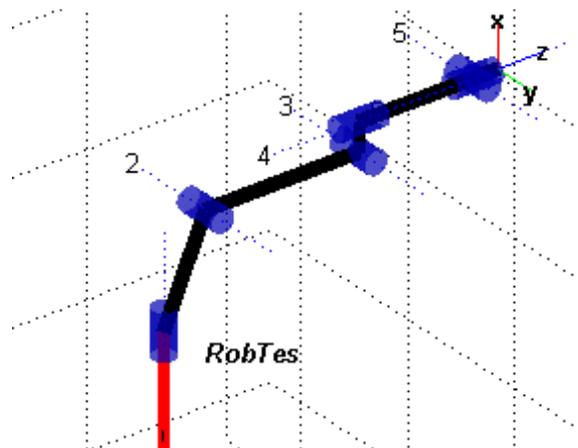


Figura 5-14: Definición gráfica del Robot creado en el MATLAB®.

5.6.2 LLAMAR A LA FUNCIÓN DE LA CINEMÁTICA DIRECTA UTILIZANDO EL ROBOT YA CREADO EN EL ENTORNO.

Cuando ya se encuentra definido el robot en el entorno se puede realizar el análisis mediante la utilización del método *fkine* que permite el estudio cinemático del robot para un caso en particular.

Con la ayuda de esta función es posible obtener la matriz de transformación homogénea que permite entonces localizar el extremo del robot en el espacio para una determinada combinación de movimientos realizados en las articulaciones.

Debido a esto se realizará en el ambiente del MATLAB® una serie de posiciones establecidas por la letra q seguida por un número, de tal manera que se pueda llamar a estas posiciones globales del efector final sin la necesidad de escribir todas las veces necesarias. Así se establece que:

- p_0 : Es la posición inicial ($x=1,200$, $y=0$, $z=0,450$) y corresponde a una nulidad en el movimiento angular de las articulaciones $[0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0]$.
- p_1 : Es la primera posición que se le pondrá en este análisis, estableciendo la posición del efector final de $x=0,600$, $y=0$, $z=0,850$ y

correspondiente a una rotación de 90° en la articulación q_3 [0 0 pi/2 0 0 0].

- p_2 : Es la segunda posición que se le pondrá en este análisis, y establece la posición del efector final de $x=0,050$, $y=0$, $z=1,400$ y correspondiente a una rotación de 90° en la articulación q_2 [0 pi/2 0 0 0 0].
- p_3 : Es la tercera y última posición que se le pondrá en este análisis, determinando la posición del efector final de $x=0$, $y=0,600$, $z=0,850$ y correspondiente a una rotación de 90° en la articulación q_1 y de -90° en la articulación de q_3 [pi/2 0 pi/2 0 0 0].

Con estas posiciones finales, entonces se llevará a cabo el análisis en la plataforma de manera que se pueda comprobar que se soluciona para estos puntos y por ende de cualquier problema de la cinemática directa.

Por lo tanto las soluciones son:

- **Para el punto p_0 :**

```
>> Cd0=R.fkine(p0)
```

```
Cd0 =
```

0.0000	-0.0000	1.0000	1.2000	Px
0.0000	-1.0000	-0.0000	-0.0000	Py
1.0000	0.0000	-0.0000	0.4500	Pz
0	0	0	1.0000	

Por lo que se logra demostrar que $P_x=1,200$, $P_y=0$, $P_z=0,450$; lo que se esperaba encontrar. Al graficarlo se observa en la Figura 5-15:

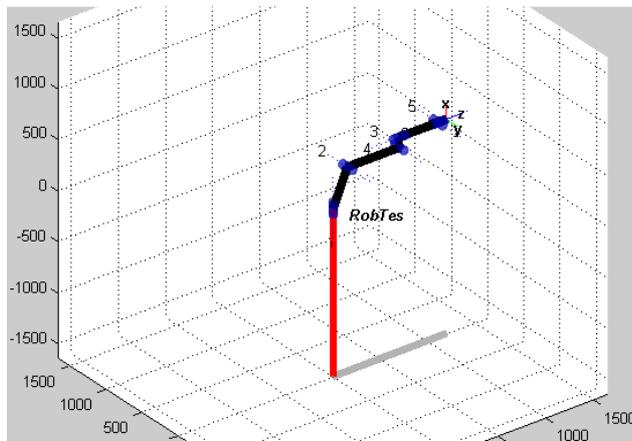


Figura 5-15: Robot Manipulador en posición p0.

- Para el punto p_1 :

```
>> Cd1=R.fkine(p1)
```

```
Cd1 =
```

-1.0000	-0.0000	0.0000	0.6000	Px
0.0000	-1.0000	0	0.0000	Py
0.0000	0	1.0000	0.8500	Pz
0	0	0	1.0000	

Por lo que se logra demostrar que $P_x=0,600$, $P_y=0$, $P_z=0,850$; lo que se esperaba encontrar. Al graficarlo se observa en la Figura 5-16:

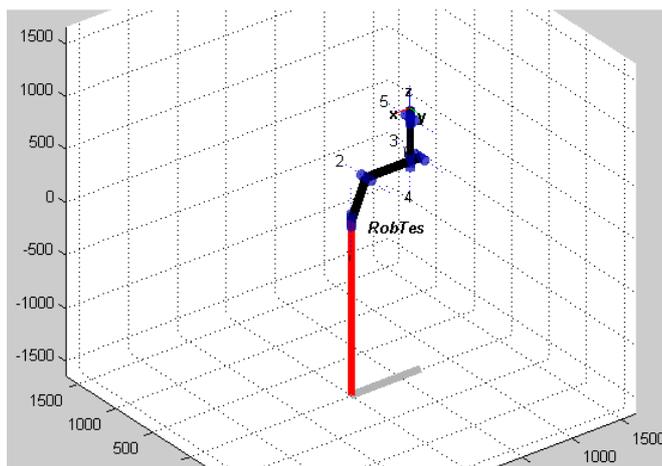


Figura 5-16: Robot Manipulador en posición p1.

- Para el punto p_2 :

```
>> Cd2=R.fkine(p2)
```

```
Cd2 =
```

-1.0000	-0.0000	0.0000	0.0500	Px
0.0000	-1.0000	0	0.0000	Py
0.0000	0	1.0000	1.4000	Pz
0	0	0	1.0000	

Por lo que se logra demostrar que $P_x=0,050$, $P_y=0$, $P_z=1,450$; lo que se esperaba encontrar. Al graficarlo se observa en la Figura 5-17:

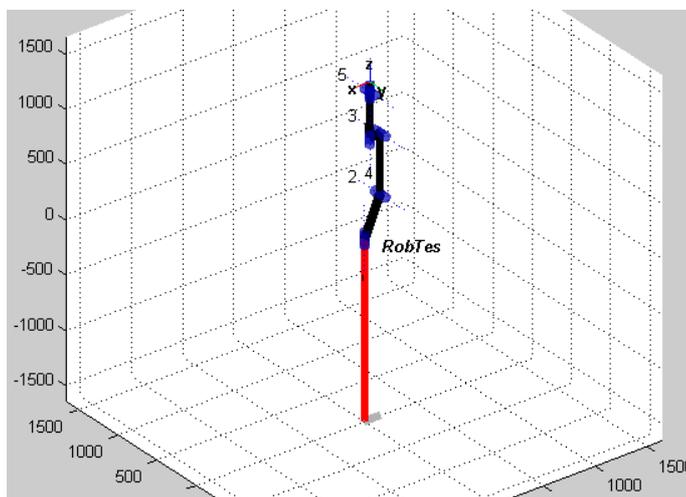


Figura 5-17: Robot Manipulador en posición p_2 .

- Para el punto p_3 :

```
>> Cd3=R.fkine(p3)
```

```
Cd3 =
```

-0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	Px
-1.0000	-0.0000	0.0000	0.6000	Py
0.0000	0	1.0000	0.8500	Pz
0	0	0	1.0000	

Por lo que se logra demostrar que $P_x=0$, $P_y=0,600$, $P_z=0,850$; lo que se esperaba encontrar. Al graficarlo se observa en la Figura 5-18:

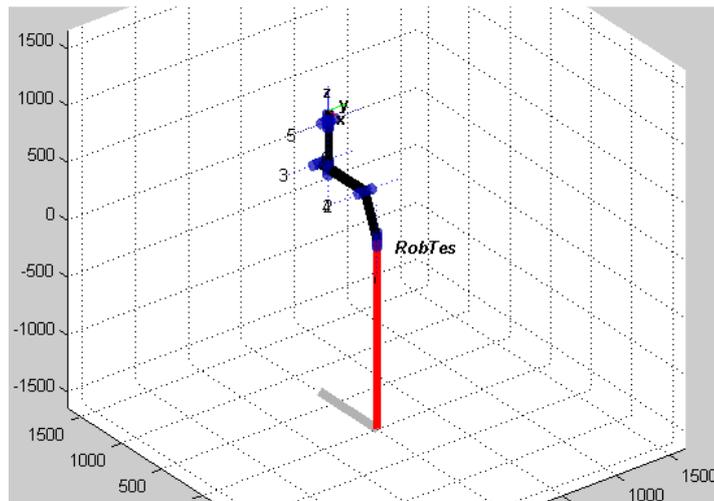


Figura 5-18: Robot Manipulador en posición p3.

De esta forma se podría ubicar la solución para todo problema con respecto a la cinemática directa.

5.7 DETERMINACIÓN DE LA CINEMÁTICA INVERSA DEL ROBOT MANIPULADOR INDUSTRIAL TIPO PUMA MEDIANTE EL ROBOTICS TOOLBOX PARA MATLAB®.

Debido a que en el estudio de la cinemática directa ya se realizó la creación del robot en el entorno del programa no habrá necesidad de realizarlo de nuevo (lo mismo que a todos los pasos anteriores a aquello), sino que únicamente será necesario llamar al método de la cinemática inversa para un caso particular.

5.7.1 LLAMAR A LA FUNCIÓN DE LA CINEMÁTICA INVERSA UTILIZANDO EL ROBOT YA CREADO EN EL ENTORNO.

Mediante la utilización de la revisión novena del Robotics Toolbox, el método *ikine* nos servirá para se realizará el estudio cinemático inverso del robot manipulador generado en el entorno del MATLAB® para un caso en particular.

Es importante definir que en el software este es un proceso iterativo, es decir que realiza muchas veces la misma operación hasta que encuentra la solución a partir de un valor inicial definido, por lo que habrá que entender que muchas de las

veces el programa se demorará en encontrar una solución o incluso podrá llegar a no converger.

Al igual que se hizo con el análisis cinemático directo, para comprobación del robot creado en el entorno, se utilizarán cuatro posiciones finales para que el programa determine los movimientos necesarios en las articulaciones. Así que aprovechando los valores obtenidos en el subcapítulo anterior, se utilizarán los valores de la posición final del efector final para obtener entonces los movimientos de las articulaciones.

Ahora bien, hay que tomar en cuenta que en la cinemática inversa pueden existir varias respuestas debido a las características de movilidad del robot, por lo que habrá que considerar esto al momento de observar los datos obtenidos. En lo que respecta al software, este al obtener varias respuestas muestra solamente una, siendo esta la primera en ser obtenida.

- T_0 : Es la posición inicial [1,200 0 0,450] y por lo tanto correspondería a una nulidad en el movimiento angular de las articulaciones [0 0 0 0 0 0].
- T_1 : La primera posición del efector final del análisis diferente a la posición inicial [0,600 0 0,850] y por lo tanto se obtendría con una rotación de 90° en la articulación q_3 [0 0 pi/2 0 0 0].
- T_2 : La segunda posición de este análisis. Establece la posición del efector final [0,050 0 1,450] y correspondería a una rotación de 90° en la articulación q_2 [0 pi/2 0 0 0 0].
- T_3 : Tercera y última posición para la cual se efectuará este análisis, con una posición del efector final de [0 0,600 0,850]. Esta se obtendría con una rotación de 90° en la articulación q_1 y de 90° en la articulación de q_3 [pi/2 0 pi/2 0 0 0].

Para poder realizar este estudio es necesario determinar que la función *ikine* tiene la siguiente característica: $ikine(R, NOAP, Q_0, M)$, de donde se entiende que R es la matriz homogénea que define la compilación del robot, $NOAP$ es la matriz

homogénea que contiene la posición del efector final. Q_0 establece la posición inicial en la que se encuentra el robot ([0 0 0 0 0 0]) y M establece la máscara que define el número de grados de libertad del robot, por cada grado se debe escribir un 1 ([1 1 1 1 1 1]).

Con lo visto anteriormente se realizará en el programa para observar los resultados:

- **Para el punto T_0 :**

```
>> NOAP1=R.fkine(p0);
Q1=R.ikine(NOAP1, p0, M)
```

Q1 =

```
0 0 0 0 0 0
```

Por lo que se logra demostrar que es la respuesta deseada por lo visto en el estudio cinemático directo.

- **Para el punto T_1 :**

```
>> NOAP2=R.fkine(p1);
Q2=R.ikine(NOAP2, p1, M)
```

Q2 =

```
0 0 1.5708 0 0 0
```

Por lo que se logra demostrar que es la respuesta deseada por lo visto en el estudio cinemático directo.

- **Para el punto T_2 :**

```
>> NOAP3=R.fkine(p2);
Q3=R.ikine(NOAP3, p2, M)
```

Q3 =

```
0 1.5708 0 0 0 0
```

Por lo que se logra demostrar que es la respuesta deseada por lo visto en el estudio cinemático directo.

- **Para el punto T₃:**

```
>> NOAP4=R.fkine(p3);  
Q4=R.ikine(NOAP4, p3, M)
```

```
Q4 =
```

```
1.5708      0      1.5708      0      0      0
```

Por lo que se logra demostrar que es la respuesta deseada por lo visto en el estudio cinemático directo.

Más adelante en este trabajo de investigación se utilizará la función que crea las trayectorias de estos puntos analizados, mediante Robotics Toolbox, para que se pueda simular el funcionamiento del robot en el Simulink con relación a lo hecho en este capítulo.

CAPÍTULO 6

ANÁLISIS DE LA DINÁMICA DEL MANIPULADOR UTILIZANDO ROBOTICS TOOLBOX DE MATLAB.

6.1 GENERALIDADES Y DEFINICIONES:

Para comenzar con este capítulo es importante determinar que la dinámica es un enorme campo dedicado al estudio de las fuerzas que se requieren para lograr generar el movimiento. Por esta razón es indispensable para este estudio poder hacer uso de las ecuaciones dinámicas del movimiento.

Hay que entender que la aplicación de este análisis nos servirá para dos usos en específico. La primera aplicación para el análisis del conjunto de funciones del momento de torsión responsable del movimiento de cada articulación. La segunda es para fines de simulación del robot en un entorno de software.

Ahora bien, para poder realizar este análisis es imprescindible tener establecidas las características geométricas definitivas de los elementos del robot. Por esta razón este capítulo (Capítulo 6) va conectado directamente con el Capítulo 4.

6.1.1 ANÁLISIS DINÁMICO PARA EL ANÁLISIS DEL CONJUNTO DE FUNCIONES DEL MOMENTO DE TORSIÓN:

Esta aplicación define el estudio de las funciones del momento de torsión del actuador utilizando las ecuaciones dinámicas de movimiento del manipulador. Es decir que por medio de este estudio se pueden definir las características dinámicas que existen cuando el robot pasa de un estado inerte a un movimiento con velocidad

constante (del efector final) y una posterior desaceleración hasta el final del movimiento.

Por lo cual para este caso en particular, este estudio ayudará a definir los parámetros dinámicos en concordancia con los atributos espaciales y temporales de la ruta tomada por el efector final y de las propiedades de masa de los vínculos y de la carga útil, la fricción en las articulaciones, entre otras cosas.⁵⁸

Esta parte es en extremo importante debido a varias razones, entre las cuales es posible citar las siguientes⁵⁹:

- Determinar la carga útil para evitar un movimiento desproporcionado e inusual en el robot.
- Definir un sistema de control de manipulación en función del conocimiento de la masa y de otros efectos dinámicos.
- Ayuda a construir los algoritmos de control del movimiento del robot, ya que estos deben tomar en cuenta la dinámica.

6.1.2 ANÁLISIS DINÁMICO PARA SU USO EN LA SIMULACIÓN:

En este caso se busca generar una reformulación de las ecuaciones dinámicas para así poder obtener relaciones entre las características dinámicas y el funcionamiento del robot.

Para poder lograr esto se debe reformular las ecuaciones dinámicas para que la aceleración de las articulaciones se calcule como función del momento de torsión de un actuador. Con esto será posible simular el funcionamiento y movimiento del manipulador bajo la aplicación de un conjunto de momentos de torsión de un actuador, así como se muestra en la Figura 6-1.

⁵⁸ CRAIG, J. J. (2006). *“Introducción a la Robótica”*. México: Pearson. páginas 9 y 10.

⁵⁹ *Ibíd.*

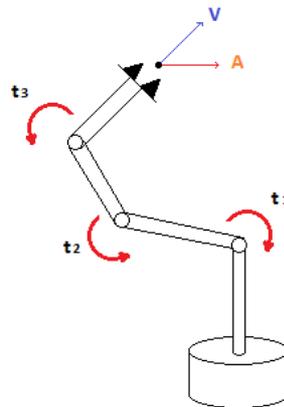


Figura 6-1: La relación entre los momentos de torsión aplicados por los actuadores y el movimiento resultante del manipulador.⁶⁰

6.2 ENTORNO DE SIMULACIÓN DENTRO DEL ROBOTICS TOOLBOX DE MATLAB®:

De la misma manera que funciona el Robotics Toolbox para el análisis cinemático, esta herramienta presenta una serie de métodos y funciones que permite realizar el análisis dinámico inverso y directo de un robot manipulador correctamente definido en el entorno del MATLAB.

Afortunadamente como ya se añadió en el ambiente de simulación el robot que es objeto de este estudio, entonces únicamente haría falta definir y agregar algunos datos para comenzar con la simulación.

Como se observó en los numerales anteriores, para poder ejecutar este análisis resulta fundamental tener a disposición las características dinámicas del robot (masa, momentos de inercia (matriz) y centro de gravedad). Incluso las herramientas que se encuentran en este toolbox, revisan previamente que existan las características necesarias de cada eslabón de la cadena cinemática, antes de realizar la simulación.

Al momento de realizar el análisis dinámico nos topamos con que, al igual que en el análisis cinemático, existen dos tipos: el inverso y el directo. Siendo los pares

⁶⁰ CRAIG, J. J. (2006). "Introducción a la Robótica". México: Pearson. Página 10. Figura 1.10

únicamente rotatorios, en los dos casos estarán involucrados el torque y la posición, velocidad y aceleración angular de la junta.

Ahora bien, se aclara que análisis dinámico inverso calcula un torque requerido para que cumpla con una cierta posición, velocidad y aceleración de la junta o par. Por lo tanto, el segundo análisis (el directo) se encargará de determinar la posición, velocidad y aceleración generadas cuando un torque definido se aplica en la articulación.

Es importante decir que, a diferencia del análisis cinemático, usualmente se inicia con el análisis dinámico inverso, especialmente por las facilidades que presenta el toolbox para generar trayectorias que además de calcular los valores de posición angular, también se determinan los datos de velocidad y aceleración.

Por esta razón, y tomando en cuenta que dentro de los objetivos de este trabajo de investigación, únicamente el análisis inverso es el que presenta los resultados requeridos para escoger los servomotores y trenes de reducción, se realizará a fondo este análisis. Si bien se va a hacer referencia al análisis dinámico directo, no se lo realizará tan a fondo como el inverso.

6.2.1 GENERACIÓN DE TRAYECTORIAS:

Antes de poder realizar el análisis dinámico se debe hablar un poco sobre la herramienta que permite la generación de trayectorias en el Robotics Toolbox. Como se dijo anteriormente, esta herramienta es fundamental para la correcta implementación del análisis dinámico inverso.

El toolbox presenta este método denominado ***jtraj***, que permite el cómputo de una trayectoria del espacio articular entre dos puntos diferentes. Para esto se debe definir vector de tiempo y un paso determinado. Con esto el ***jtraj*** realiza una curva de posición angular por cada paso computado. Así mismo, este método utiliza un método numérico para definir la velocidad y aceleración de los puntos calculados paso por paso.

Para poder utilizarlo se necesitan definir dos posiciones del robot manipulador, una de punto de partida y la otra de finalización. Estas posiciones deben ser expresadas en función de los ángulos en los que se encuentran las articulaciones, tal y como se lo expresó al hacer el análisis cinemático directo. El vector tiempo será necesario para especificar el número de puntos en la trayectoria.

Existen otras características que pueden ser usados al momento de realizar la generación de trayectorias, como es el caso de definir la velocidad inicial y final que se requieren y por lo tanto son fundamentales para la simulación.

Al usarlo en el robot ya definido anteriormente se puede observar la funcionalidad de esta herramienta. Para hacerlo se deben utilizar los vectores de posición de las articulaciones que se utilizaron para el análisis cinemático directo [Véase la página 101]. Donde p_0 es la posición inicial del robot.

```
%Se definen los movimientos de las articulaciones para el análisis
%cinemático directo.
p0=[0 0 0 0 0 0];
p1=[0 0 pi/2 0 0 0];
p2=[0 pi/2 0 0 0 0];
p3=[pi/2 0 pi/2 0 0 0];
```

Después se define el vector de tiempo para la generación de la trayectoria:

```
%Se generan las trayectorias de los puntos analizados.
%Primero se define un vector del tiempo para la trayectoria
t=(0:0.056:2);
```

Ahora si se pueden definir las trayectorias deseadas, considerando que se pueden especificar las variables de salida con una convención ya establecida dentro del programa: q =posición angular, q_d =velocidad angular, q_{dd} =aceleración angular. En este caso se generarán las tres trayectorias para los tres movimientos que se generarán (entre p_0 y p_1 , p_0 y p_2 , p_0 y p_3).

```
%Se generan la trayectorias
[q, qd, qdd]=jtraj(p0,p1,t);
[q1, qd1, qdd1]=jtraj(p0,p2,t);
[q2, qd2, qdd2]=jtraj(p0,p3,t);
```

Las variables q , q_d y q_{dd} serán una matriz que poseerán los valores de posición, velocidad y aceleración de todos los pares cinemáticos que tiene el robot. De esta manera es posible solamente ubicar estos valores de una junta separadamente de las otras.

Finalmente se puede llevar a graficar los resultados mediante la función **plot**, en donde, a diferencia de los resultados observados en el análisis cinemático, no solamente se observará la posición inicial y final, sino que será posible mirar una animación de la trayectoria que sigue el robot desde el punto inicial hasta el final. Esto se observa en la Figura 6-2.

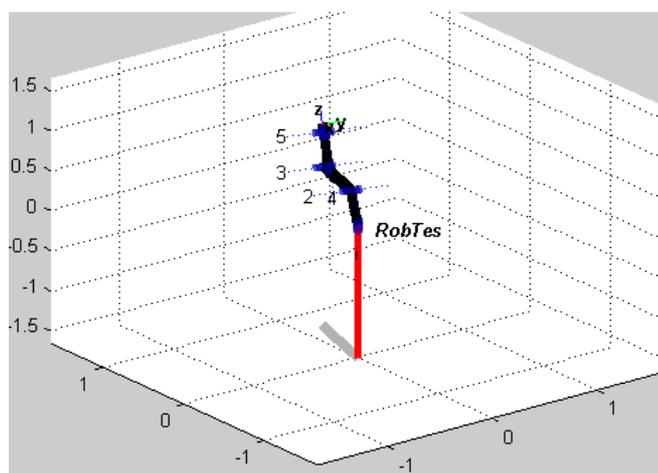


Figura 6-2: Imagen del robot en movimiento siguiendo una trayectoria.

6.2.2 ANÁLISIS DINÁMICO INVERSO.

Una vez definidas las trayectorias que se van a realizar únicamente queda por utilizar el método de análisis dinámico inverso **rne**. Este permite determinar el torque a aplicarse en las articulaciones que permita el movimiento de las mismas cumpliendo la posición, velocidad y aceleración angular durante la trayectoria en función del tiempo.

El **rne**, fue creado para poder determinar la fuerza de la junta. Está será una fuerza cuando el par sea prismático, y será un torque cuando el par sea de rotación.

Se lo puede definir únicamente mediante los valores de q , q_d y q_{dd} que se generaron en el numeral anterior, pero también permite describir la aceleración gravitacional de la simulación y la definición de un tensor de fuerzas al final del manipulador.

No obstante, para cumplir con los objetivos del trabajo de investigación, únicamente se realizará con los valores de q , q_d y q_{dd} , de las trayectorias antes definidas.

```
%Análisis Dinámico Inverso
tau=R.rne(q,qd,qdd);
tau1=R.rne(q1,qd1,qdd1);
tau2=R.rne(q2,qd2,qdd2);
```

Se graficarán estos resultados en la Figura 6-3, para que quede bien establecido como funciona esta herramienta.

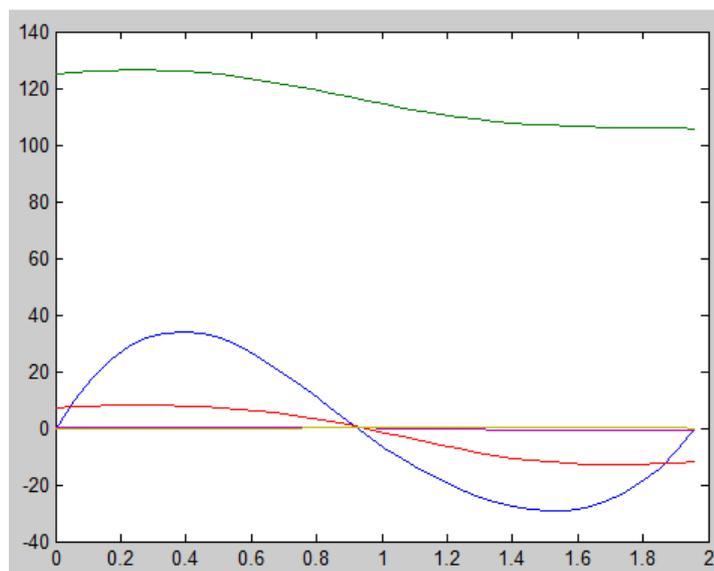


Figura 6-3: Torques requeridos para realizar la 3ra trayectoria. Cada color significa un eje en específico.

Estos valores obtenidos pueden ser utilizados para la determinación de torques críticos y al eje al que pertenecen, para así poder escoger los mejores actuadores que aseguren un funcionamiento adecuado del robot manipulador.

6.2.3 ANÁLISIS DINÁMICO DIRECTO.

Ya se ha dicho que el análisis dinámico directo busca determinar el tiempo, la posición y la velocidad angular de un robot cuando se hace emplea un determinado torque.

Para esto se recurre a utilizar el método ***fdyn*** que define como variables de salida al tiempo (T), posición (q) y velocidad (qd). Como variables de entrada se define al tiempo (T1), el valor del torque (torqfun), las condiciones iniciales de velocidad y posición (q0 y qd0).

Se especificó que no se realizará un estudio a fondo sobre este método, por lo que damos por terminada el análisis dinámico del robot manipulador.

CAPÍTULO 7

SELECCIÓN DE ACTUADORES Y ELEMENTOS DE TRANSMISIÓN DE POTENCIA

7.1 DEFINICIONES.

Dentro de la conceptualización y diseño de un robot es importante definir cuales serán los actuadores que ejercerán las fuerzas y torques para realizar las diferentes actividades a las que esté diseñado el manipulador. Por esta razón dentro de este trabajo de investigación se definirán estos para cada uno de los pares rotatorios.

En el caso de que los actuadores no traigan ya los reductores, en este trabajo de investigación también está contemplado el definir los ejes, pares de engranajes y demás elementos que servirán para transmitir la potencia que entrega el motor hacia los diferentes eslabones. Pero en el caso de que los servomotores ya incluyan estos reductores, entonces únicamente se los colocará en sus posiciones en el diseño.

Gracias a la ayuda de la simulación del MATLAB, y dependiendo del movimiento realizado, es posible determinar los torques máximos necesarios para cada articulación. A continuación se escogerán los motores mediante el uso de estos resultados y posterior a eso se verá como se resuelve la transmisión de potencia del mismo.

Si bien ya se definió lo que es un actuador en el Capítulo 1 [Véase la página 8: Actuadores y Reductores:], es importante citar a Iñigo, que enumera a los elementos

que componen un actuador: “Los actuadores consisten en la combinación del servomotor y el tren de engranajes.”⁶¹

7.1.1 DEFINICIÓN DE PARÁMETROS Y CARACTERÍSTICAS DE LOS ACTUADORES A ESCOGER.

Se estableció en el capítulo 1 de este proyecto, que los actuadores a utilizarse iban a tener unas características específicas [Véase la página 17: clasificación basada en el tipo de energía del actuador:], por lo que al recordarlo se puede definir lo siguiente.

- Los actuadores deben ser eléctricos.
- Los actuadores deben funcionar con corriente continua.
- Los actuadores deben tener un encoder diferencial para la retroalimentación de 760 pulsos/rev.

7.1.2 DEFINICIÓN DE SERVOMOTOR.

En términos generales un servomotor está formado por un motor eléctrico de corriente continua y un componente electrónico de control, es decir que un servomotor es un motor eléctrico que posee elementos electrónicos para su control.

Estos elementos tienen el objetivo de girar cierto ángulo el eje del motor cuando se haya indicado una señal de mando. Además, este debe mantener la posición angular aunque se aplique una fuerza contraria a su movimiento.

Entre sus principales características están:

- Gran precisión de posicionado.
- Estabilidad de velocidad.
- Alta estabilidad de par.
- Repetitividad del movimiento.

⁶¹ IÑIGO M., R. (2002). “*Robots Industriales Manipuladores*”. Barcelona: Ediciones UPC. Capítulo IX. Página 136.

- Elevada respuesta dinámica.
- Potencias pequeñas con pares de hasta 70Nm.
- Velocidades de hasta 600 rpm.

7.1.3 ASPECTOS NECESARIOS PARA ESCOGER UN SERVOMOTOR.

Según el catálogo para selección y aplicación de motores eléctricos de la WEG, se establece que:

“Al seleccionar un motor, lo primero que se debe considerar es cuál es la velocidad de rotación y cuál será el torque requerido del motor. Estos datos normalmente deben ser suministrados por el proyectista mecánico. La potencia del motor será entonces una consecuencia de los dos factores anteriores.”⁶²

No obstante, este criterio es siempre valido cuando se trata de un sistema en el que el motor solamente tiene que girar a una única velocidad. En el caso de los servomotores para los robots es importante identificar que existirá variación de cargas en sus extremos y por lo tanto también variación en sus velocidades.

Volviendo a citar a Iñigo en el estudio que realizó dentro de su libro, el determina que para escoger un actuador para el robot es necesario tomar en cuenta el siguiente criterio:

“El criterio básico es que el momento máximo proporcionado por el actuador debe vencer la gravedad más la carga y proporcionar una aceleración adecuada. La aceleración máxima depende no sólo de la selección del actuador, sino de las características mecánicas de la estructura.”⁶³

Por lo tanto, en definitiva, nuestro método de selección de los actuadores será primeramente por la determinación del momento máximo que deberá proporcionar el

⁶² WEG. (s.f.). Selección y Aplicación de Motores Eléctricos. <http://catalogo.weg.com.br/files/wegnet/WEG-seleccion-y-aplicacion-de-motores-electricos-articulo-tecnico-espanol.pdf>

⁶³ IÑIGO M., R. (2002). *“Robots Industriales Manipuladores”*. Barcelona: Ediciones UPC. Capítulo IX. Página 136.

actuador, se escogerá el servomotor dependiendo de sus prestaciones, geometría y buscando una potencia adecuada. Finalmente con el momento calculado se lo pasará al entorno del MATLAB para redefinir las características del robot como: inercia que otorga el motor, incremento de masa en los eslabones, etc. Con esto se logrará una simulación final con casi todos los términos definidos.

7.2 MOMENTOS MÁXIMOS DE LOS EJES DEL ROBOT.

Antes de realizar los cálculos del momento máximo, se debe definir que estos solamente se realizarán para articulaciones de los ejes 2 y 3. Esto debido a que los demás ejes no soportan la gravedad ya que giran alrededor del eje x (la gravedad se la definió en el eje y). Hay que definir que si bien el eje 5 podría resistir gravedad, no se lo debe definir como si lo hiciera todo el tiempo ya que generaría sobreprecios. Además cabría aclararse que los ejes 4, 5 y 6 corresponden a la muñeca del robot y este elemento está destinado a actividades de posicionamiento, control y precisión, mientras que los ejes 1, 2 y 3 están diseñados para soportar las cargas.

Por esta razón el parámetro del momento máximo para la determinación del actuador solamente se aplicará en estos dos ejes. A los demás se los escogerá de acuerdo otros parámetros como la velocidad y aceleración obtenidas. Obviamente estos actuadores deberán estar acordes al conjunto y a lo que se observa en robots industriales comerciales.

7.2.1 CÁLCULO DE LOS MOMENTOS MÁXIMOS.

Siguiendo la línea que establece Iñigo en su ejemplo de diseño y simulación de un robot manipulador, se realiza el cálculo de los momentos máximos mediante una simple sumatoria de momentos en el plano. Para esto se aproxima el diseño a un estudio estático simple como se observa en la Figura 7-1.

Los elementos serán representados como lo indica la figura, tomando en como positivo a los momentos antihorarios con respecto al punto A.



Figura 7-1: Aproximación de los elementos para calcular el momento máximo requerido.

Para realizar los cálculos nos referiremos a la Tabla 3-6, en donde se definen las masas, longitud y centro de gravedad de los elementos. Por lo tanto se recurre a la siguiente ecuación:

$$\tau = (\text{centro de gravedad} * \text{masa eslabón(es)} + \text{longitud eslabón(es)} * \text{masa de otros elementos}) * 9,81$$

Los resultados se tabulan a continuación:

Tabla 7-1: Momentos máximos para los ejes 2 y 3

Elemento	Momento
Brazo (eje 3)	66,79469299
Cuerpo (eje 2)	184,4019276

7.3 SELECCIÓN DE LOS ACTUADORES.

Debido a que los actuadores deben ser factibles de encontrar en el mercado local se va a referir al catálogo de servomotores sincrónicos que dispone la compañía SIEMENS.

Esta compañía posee una gran variedad de motores, pero restringiendo la búsqueda a los servomotores que trabajen en corriente continua, con el encoder establecido, que sean de un tamaño adecuado y sobre todo que puedan presentar un reductor desde la fábrica para obtener la potencia requerida se decide escoger la línea de servomotores 1FK7. [Véase Anexo 2]

Algunas características de estos tipos de servomotores:

- **Tipo de Motor:** Motor sincrónico con imán permanente.
- **Presión de Ruido:** Dependiendo del modelo se encuentran desde los 55dB hasta los 70dB.
- **Condiciones del Encoder sin DRIVE-CLiQ interface:**
 - Incremental encoder:
 - IC2058S/R: sin/cos 1 Vpp 2048 S/R.
 - Absolute encoder:
 - AM512S/R: 512 S/R, multi-turn.
 - AM2048S/R: 2048 S/R, multi-turn.
 - AM32S/R: 32 S/R, multi-turn.
 - AM16S/R: 16 S/R, multi-turn.

Por lo tanto, para el actuador del eje 3 se escoge el 1FK7034 que posee una velocidad de 6000 RPM (sin el reductor) y que tiene capacidad para conectarse al reductor SP 075S-MF2 con relación de transmisión de $N=28$, y al hacerlo entrega un torque de 110 Nm que está por encima de lo que se requería.

Para el actuador del eje 2 se escoge el mismo servomotor que el anterior, pero con la diferencia que siendo conectado a un reductor SP 100S-MF2 con una relación de transmisión de $N=50$ se llega a tener un torque de 300 Nm, lo cual resulta más que suficiente para mover el robot.

Siguiendo la misma de selección, se determina que para el actuador y reductor del eje 1 se elige el servomotor tipo 1FK7044 (que tiene velocidad máxima de 4000 RPM) conectado a un reductor tipo SP 140S-MF2, generando un torque de 600 Nm.

Para los actuadores de la muñeca se escoge:

- Para el eje 4: el servomotor 1FK7022 con capacidad de acoplarse al reductor SP 060S-MF2, con relación de transmisión de 28. Dejando una velocidad máxima de 6000 RPM y un torque de 40 Nm.

- Para el eje 5: el mismo servomotor y reductor que el anterior pero esta vez con una relación de reducción $N=10$, lo que entrega un torque de 32 Nm.
- Para el eje 6: Por espacio y configuración se elegirá el 1FK7011, el sin reductor.

El robot con los servomotores ya instalados en su geometría se encuentran definidos ya en la Figura 7-2.



Figura 7-2: Geometría del robot con los servomotores instalados.

De todas maneras, debido a los cambios de geometría y el peso agregado en los eslabones por los motores es indispensable realizar un restudio de cargas y fuerzas nuevamente, antes de construir este robot asegurando que funcione correctamente y sin peligro de que tenga problemas estructurales. No obstante eso no forma parte de este trabajo de investigación, por lo que se dejará el diseño así para su simulación en el siguiente capítulo.

Es importante también señalar que como se definió al principio de este capítulo, como los servomotores ya tienen incluido el reductor, entonces no es necesario realizar el estudio de los mecanismos de transmisión de potencia.

CAPÍTULO 8

SIMULACIÓN DEL ROBOT MANIPULADOR MEDIANTE EL USO DE SOFTWARE.

8.1 ALCANCE DE LA SIMULACIÓN.

Para poder desarrollar correctamente este capítulo es necesario establecer el alcance que tendrá la simulación final sobre el robot. Por esta razón y acorde a los objetivos de este trabajo de investigación, este capítulo constará de dos partes esenciales que llevarán a la conclusión de este proyecto.

Estas partes son:

- Generar una interfaz gráfica en el MATLAB, de tal manera que se pueda ejecutar la simulación del robot manipulador a través de ella.
- Simular el comportamiento del robot realizando las labores que se propusieron en el Capítulo 2: Diseño Funcional del Manipulador. [Véase la página 21: Consideraciones de funcionalidad:]

La simulación deberá permitir realizar el estudio cinemático y dinámico del robot para observar el funcionamiento del mismo. Además debe lograr generar una animación del robot realizando el proceso simulado.

Con los resultados que se obtengan de esta simulación se podrá sustentar el diseño del robot, o bien hacer sugerencias de cambios y mejoras previos a su construcción.

8.2 GENERACIÓN DE LA INTERFAZ GRÁFICA.

Al momento de utilizar software de simulación es importante reconocer que se debe tener cierta capacitación de por medio para poder realizarla adecuadamente.

Ya poniéndonos en el ámbito que nos ocupa, como se observó en los capítulos anteriores, la simulación requiere de un gran conocimiento de programación en el entorno del MATLAB, por lo que su aplicación o modificación puede resultar compleja.

Por esta razón es que dentro de los objetivos de este trabajo de investigación se definió el realizar una interfaz gráfica que facilite la manipulación y uso de la información de simulación sobre el robot manipulador diseñado. Esto además de presentar una ventaja mayor para su aplicación, significará un mayor aporte para el área de estudio.

De manera que, al definir la interfaz gráfica (GUI por sus siglas en inglés “Graphical User Interface”) es un entorno informático que actúa de interfaz entre el usuario y el software. Esta herramienta utiliza un conjunto de imágenes y objetos gráficos para representar la información y acciones disponibles en la simulación.

8.2.1 DEFINICION DE LA INTERFAZ GRÁFICA DEL MATLAB®.

La interfaz gráfica de usuario (GUI) que utiliza MATLAB se llama “GUIDE” (“Graphical User Interface Development Environment”). Este entorno ofrece un gran conjunto de herramientas para la generación de interfaces, que tienen como objetivo el simplificar enormemente el proceso de trazado y programación de GUI.

Este entorno presenta un editor de diseño bastante intuitivo y semejante a otras plataformas como Visual Basic, por lo que le permite rellenar una interfaz gráfica únicamente arrastrando los componentes del mismo en el área de diseño.

Los componentes como botones, campos de texto, deslizadores, ejes y otros, pueden ser manipulados para cambiar de tamaño, agruparlos y alinearlos según las necesidades del usuario.

Ante esto cabe resaltarse que entre otras herramientas accesibles desde el editor de diseño de GUIDE es posible:

- Crear menús y menús contextuales.
- Crear barras de herramientas.
- Modificar la apariencia de los componentes.
- Establecer el orden de tabulación.
- Ver una lista jerárquica de los objetos que componen el GUI.
- Configurar las opciones del GUI.

También es importante decir que el programa automáticamente genera un archivo de código de MATLAB para el control del funcionamiento del GUI una vez que este ha sido guardado. Dentro de este archivo está el código para inicializar la interfaz gráfica de usuario y además se organiza las respectivas “callbacks⁶⁴” de la GUI.

8.2.2 PROCESO PARA GENERAR LA GUI EN MATLAB.

Para poder generar correctamente la GUI se deben realizar los siguientes pasos:

- 1. Definir su funcionamiento:** antes de realizar cualquier cosa es necesario determinar cual es el alcance y cual es el funcionamiento que tendrá el GUI. En este caso se define lo siguiente:
 - a.** Ser una conexión de dos vías entre el diagrama de bloques del robot en el Simulink y el Robotics Toolbox de la línea de comando en el MATLAB.
 - b.** Permitir al usuario modificar los valores de simulación como por ejemplo: la posición final del efector, los ángulos que se moverán las articulaciones.
 - c.** Permitir observar la animación del robot realizando los movimientos pedidos en la simulación.

⁶⁴ Callbacks son funciones que se ejecutan en respuesta a eventos generados por el usuario, como por ejemplo dar clic sobre un botón.

- d. Permitir observar los resultados que salgan de la simulación como torque, fuerza, etc.
2. **Definir su apariencia:** Es importante realizar una idea general de la apariencia que tendrá el GUI para que así no se pierda valioso tiempo en aproximaciones que no serán de utilidad. En este caso será:
- a. Tener un mensaje de inicio que permita tres opciones: La simulación libre, la simulación de las funciones que se establecieron en este trabajo de investigación y la salida del programa. Esto se puede mirar en la Figura 8-1.

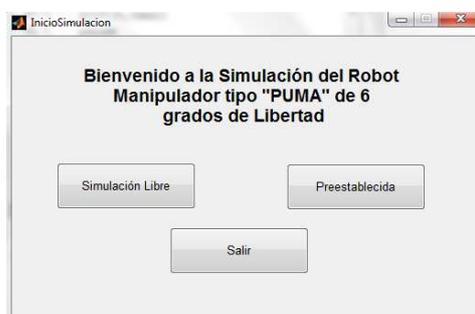


Figura 8-1: Mensaje de inicio de la simulación.

- b. Dentro de la simulación libre un entorno en donde se pueda colocar la posición requerida del efector final, o los ángulos que se quieren que se muevan las articulaciones. En este entorno deberán existir botones de regreso al menú inicial y salida del programa. Esto se puede mirar en la Figura 8-2.



Figura 8-2: Interfaz gráfica de la Simulación Libre.

- c. Dentro de la simulación de las funciones que se establecieron al inicio de este trabajo de investigación, se establece la existencia de los tres botones con las tres diferentes funciones. Esto se puede mirar en la Figura 8-3.



Figura 8-3: Interfaz gráfica para la simulación de las funciones preestablecidas.

3. **Generar el GUI:** Realizar la interfaz gráfica de la simulación mediante estos parámetros ya definidos.
4. **Probar el GUI:** Se debe probar todas las funciones que se establecieron dentro del GUI para ver su correcto funcionamiento.

Una vez realizados estos pasos y haber comprobado que funcione correctamente se da por terminado el proceso de creación del GUI.

8.3 SIMULACIÓN DE LAS FUNCIONES DEL ROBOT.

En el Capítulo 2 de este trabajo de investigación, para poder definir la geometría del robot se definieron tres funciones tipo que realizará el manipulador y que nos permitieron escoger las dimensiones y configuración del mismo [Véase la página 21:Consideraciones de funcionalidad:].

Para dar por terminado este proyecto, será necesario revisar si el diseño realizado cumple con las funciones a las que fue destinado desde su concepción. Por esta razón es fundamental realizar la simulación del manipulador haciendo estas actividades. No buscando, únicamente, observar como el robot las hace, sino saber si este es capaz de hacerlas correctamente y sin poner en peligro su integridad estructural.

Tomando en consideración que el entorno gráfico ya está realizado en el numeral anterior, en este numeral se irán definiendo los parámetros y funciones a realizar por cada función para su correcta simulación.

8.3.1 FUNCIÓN 1: EL ROBOT MUEVE UN OBJETO DESDE UN PUNTO A HASTA UN PUNTO B.

Primeramente será necesario determinar los puntos a los que se moverá el robot con la carga. Para esto se recurrirá a una imagen visual que demuestre desde donde y hacia donde se estaría moviendo la carga.

Se habló en el capítulo 2 sobre el funcionamiento del robot, y ahí se definió que este podría estar sujeto a una ménsula. Para esta animación se hará de cuenta, que de hecho se encuentra empotrada a esta ménsula que tiene una altura de 700 mm (no obstante el origen de coordenadas seguirá estando definida en la base del robot).

Ahora, también se habló que la carga de 20 kg bien podría ser un tanque de gas de peso nominal de 15kg, pero que se encuentra semilleno o casi vacío completando el peso nominal máximo que puede levantar el robot. Por esta razón se define que el efector final debe sujetar al tanque de gas desde su haladera que se encuentra a una altura de 600 mm. Las dimensiones se pueden observar en la Figura 8-4.

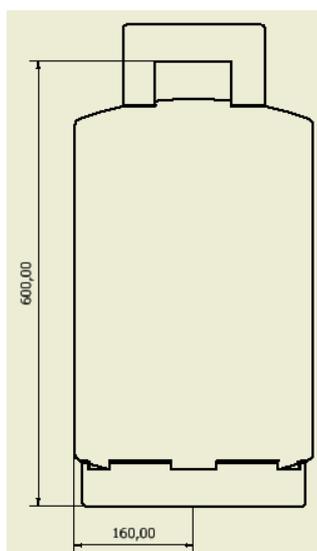


Figura 8-4: Dimensiones de un tanque de gas de 15kg.

Por lo tanto, se define una coordenada espacial para el punto A de [1000, -100, 500] y para el punto B [1000, 0, -500], lo que genera un desplazamiento de un metro en el eje z y subir una grada de 10cm en el eje y, entre el punto A y B.

Como segundo paso se debe definir que el robot está cargado, por lo que se recurre al Robotics toolbox con su método de ***payload***.

```
%Definiendo la carga en el extremo del robot
R.payload(20,[0,0,0])
```

Automáticamente el modelo del robot se actualiza y por ende se puede observar que los resultados de la simulación cambian por igual, tal y como se ve en la diferencia entre la Figura 6-3 y la Figura 8-5.

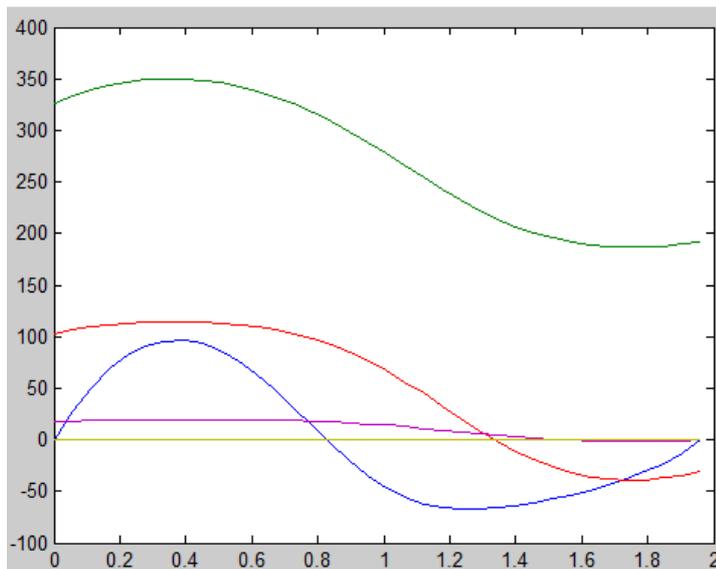


Figura 8-5: Torques requeridos para realizar una trayectoria definida, con una masa en el efector final de 20kg.

Una vez definida la carga deseada dentro de la simulación de la función 1, entonces se debe definir la trayectoria que realizará el robot desde el punto A y el punto B. Como se vio en el capítulo anterior para generar las trayectorias se requiere de unas coordenadas de posición angular de los ejes del robot. Es por esta razón que por facilidad se va a realizar un análisis gráfico de las posiciones que ocupan para luego determinar geoméricamente los ángulos que debe tener cada articulación.

Ya determinadas el vector de coordenadas del punto A y B mediante el método gráfico [Véase ANEXO 4], se lleva a calcular la trayectoria que hará el robot mediante el método de *jtraj*.

Finalmente realizamos la simulación para determinar el movimiento dentro del SimMechanics.

8.3.2 FUNCIÓN 2: REALIZAR UN CORDÓN DE SOLDADURA ENTRE DOS PLACAS PLANAS.

Al realizar la simulación de un cordón de soldadura se debe considerar igualmente una trayectoria rectilínea entre un punto A y un punto B que será la

longitud de soldadura. En este caso es importante que el efector final se quede en la posición indicada (ya sea vertical u horizontal) durante toda la trayectoria y así asegurar una posición perpendicular de la herramienta de soldadura sobre el plano de soldeo.

Por facilidad se determina un cordón de soldadura de 150mm que serán realizados en dos placas planas que se encuentran ubicadas en una mesa, que al igual que la ménsula donde se sujeta el robot, tiene una altura de 700mm.

De igual manera, es importante definir que la longitud de la soldadura se encontrará alineada con el eje z de la simulación para que no se encuentren dificultades en la determinación de la trayectoria.

De esta manera se define el punto A como [750, 0, -75] y para el punto B [750, 0, 75].

Al igual que en el caso anterior se resolverá gráficamente para determinar los ángulos de cada articulación [Véase ANEXO 4] y así poder establecer los valores de las posiciones angulares (considerando que el brazo debe estar todo el tiempo en posición vertical para simular correctamente el funcionamiento del robot).

Con esto ya listo, se aplica el método de trayectorias de posición de las articulaciones *jtraj*.

Los resultados se pasaran al entorno desarrollado del robot y se mostrarán en la animación.

8.3.3 FUNCIÓN 3: PINTAR UNA SUPERFICIE RECTANGULAR.

Al realizar esta función se asume que el robot dispone de un soplete para poder esparcir la pintura sobre la superficie del elemento a pintar. Por lo tanto el efector final dispondrá de una herramienta de sujeción de este soplete.

Para esto se requiere definir y utilizar una serie de trayectorias rectas, que ejemplifiquen el movimiento del brazo robótico pintando, por facilidad, el perímetro de la superficie rectangular. Una vez pintada la longitud, se procede a realizar la misma trayectoria pero un nivel más abajo y en dirección contraria. De esta manera el robot generará una trayectoria similar a la que se observa en la Figura 8-6.

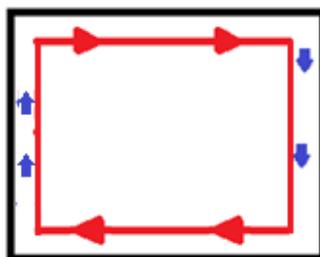


Figura 8-6: Trayectoria que realizará el robot manipulador al momento de pintar la placa rectangular

La placa tendrá una longitud de 20 centímetros y una altura de 10 centímetros. El rociador o soplete tendrá un área de pintado de un círculo de 2,5 cm de diámetro, lo cual significa que para pintar el perímetro de la placa se requerirá de 4 trayectorias del robot con estas dimensiones.

En este caso se variará en cuanto a la posición de funcionamiento y se definirá que la placa está paralela al plano YZ, por lo tanto las coordenadas espaciales para definir las trayectorias serán:

1. Posición Inicial [750, 150, -100]. Posición final [750, 150, 100].
2. Posición inicial [750, 150, 100]. Posición final [750, 250, 100].
3. Posición final [750, 250, 100]. Posición final [750, 250, -100].
4. Posición final [750, 250, -100]. Posición final [750, 150, -100].

Al igual que en los otros casos se debe considerar que los ángulos de las articulaciones fueron establecidos mediante el método gráfico que se observa en el ANEXO 4.

Con estos puntos se pueden definir las trayectorias mediante el método de trayectoria de junta *jtraj*.

Finalmente se animará el proceso de pintura para que sea visualizado en el entorno del MATLAB.

Con todo esto se da por terminado este proyecto de investigación y se abre el campo de estudio para que otros proyectos venideros sean capaces de realizar la ingeniería de detalle, construcción y finalmente el control del robot manipulador industrial tipo "PUMA" de 6 grados de libertad.

Todas las líneas de programación para estas simulaciones se encuentran en el ANEXO 3.

Al ejecutar la simulación se obtiene el movimiento del robot [Véase la Figura 8-7] y debido a su programación y la concepción del funcionamiento es posible determinar los torques requeridos para realizar los movimientos necesarios [Véase la Figura 8-8]

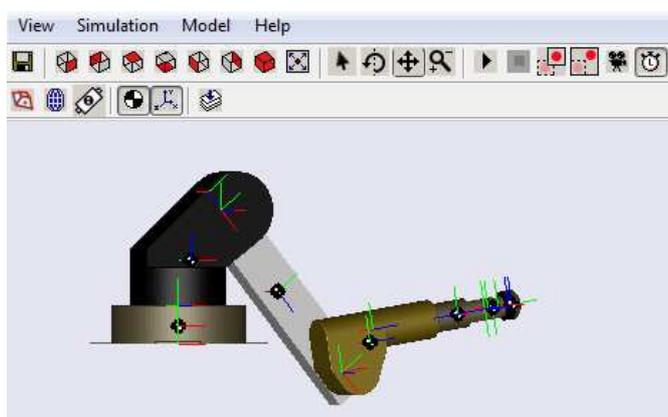


Figura 8-7: Entorno de la Simulación.

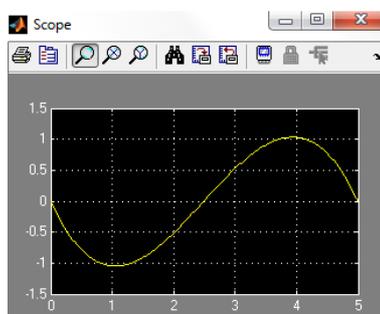


Figura 8-8: Torque Calculado de la Simulación, de la Primera Articulación del Robot.

CAPÍTULO 9

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

9.1 CONCLUSIONES:

- Se cumplieron a cabalidad los objetivos de este trabajo de investigación, ya que se logró diseñar y simular un robot manipulador industrial tipo puma que según la simulación, es capaz de levantar pesos de hasta 20kg. Para esto se definieron las dimensiones que iba a tener el robot manipulador, se presentaron simulaciones (estructurales y de movimiento) por medio del uso de software y por medio de estas se realizaron mejoras al diseño propuesto en un principio.
- En este proyecto se logró realizar varias etapas del proceso de diseño y construcción de un robot manipulador industrial. Primero se realizó el diseño funcional, seguido del diseño mecánico estructural. Posteriormente se realizaron los análisis cinemáticos y directos, y se definieron simulaciones y animaciones del mismo mediante la utilización de lo realizado con la interfaz del MATLAB.
- Fue posible realizar la interfaz entre la plataforma CAD de diseño mecánico en 3D y el entorno del Simulink en MATLAB sin mayor problema, determinando que los valores que se importaron desde el uno al otro no sufrieron cambios significativos. Estos valores o parámetros de los elementos que fueron importados tuvieron gran importancia en el trabajo de investigación, ya que posteriormente se utilizaron para la simulación y animación del robot.
- El Robotics Toolbox realmente presenta una gran ayuda para el estudio de robots. En este trabajo de investigación se sacó mucho provecho de sus métodos, funciones y herramientas. El toolbox por sí es suficiente para

realizar un análisis concienzudo y apegado a la realidad sobre un sistema robótico o de inteligencia artificial.

- El Simulink con su diagrama de bloques puede llegar a ser muy utilizado para determinar el funcionamiento de sistemas dinámicos. A través de este proyecto fue posible ver la dinámica del mismo y sus posibles aplicaciones en el campo del análisis de elementos mecánicos por medio de SimMechanics.
- A través de este trabajo de investigación se genera y compila el conocimiento con respecto a la metodología de diseño mecánico mediante la utilización de software computacional que facilite y agilite el proceso de diseño.
- Es importante decir que en la actualidad existen un sinnúmero de programas para desarrollar la simulación y análisis cinemático y dinámico de cualquier robot manipulador. Sin embargo al realizar el proceso de diseño en diferente software computacional, es posible ser más leales a la realidad, ya que cada programa tiene su área específica de aplicación y así mismo tiene sus fallas. Por ejemplo, a pesar de ser un increíblemente completo programa, el Inventor tiene algunas deficiencias en el momento de la modelación de sistemas dinámicos-matemáticos, cosa que el MATLAB lo suple con facilidad. Al contrario, el MATLAB no puede definir con tanto detalle y realidad a un elemento sólido, cosa que el Inventor es perfecto para aplicar.
- El Inventor presenta una gran ventaja al momento de incluir este entorno en su software de diseño ya que simplifica y facilita aún más las labores que debe hacer el diseñador. No obstante se debe utilizar con criterio para evitar incurrir en errores de cálculo y en problemas en la construcción.
- Si bien los perfiles estructurales, láminas, planchas y demás elementos normalizados no son los ideales para este tipo de estructuras, mediante este trabajo de investigación se determinó que estos realmente pueden acomodarse para generar la estructura deseada.

- Debido a que el análisis estructural del robot por elementos finitos corresponde a una aproximación de la realidad, se debe revisar la convergencia del resultado para asegurar que los valores obtenidos estén lo más apegados al valor real. Gracias a las herramientas que posee el Inventor, este trabajo resulta más sencillo y fácil de ubicar.
- Mediante la simulación se pudo constatar que un robot de estas características y configuración puede realizar un sinnúmero de aplicaciones y actividades dentro de su volumen de trabajo.
- En la simulación se observó que el robot muchas veces no cumple con algunas condiciones de movilidad en cuanto a sus eslabones. Esto se debe a que el software determina la cinemática inversa mediante iteraciones, no llegando a conseguir una respuesta esperada.
- El eje que debe contener el motor que entregue mayor torque es el 1 debido al peso que debe mover, a pesar de que con su movimiento no tiene que resistir a la gravedad, se tiene que considerar una velocidad y aceleración adecuada al momento de realizarlo.
- La industria ecuatoriana podría hacer mucho uso de robots como el diseñado en este trabajo. Por lo visto en los resultados obtenidos en el mismo, es importante asegurar que la construcción de un robot industrial (en cuanto a la tecnología, conocimiento y materiales) no está muy lejano en la actualidad de nuestro país. Obviamente no será un robot comercial como los de otros países, pero seguramente suplirá muy bien la necesidad que existe en la actividad productiva de la nación.

9.2 RECOMENDACIONES:

- Continuar este proyecto de investigación, utilizando lo hecho como impulso hasta la construcción y control del robot manipulador para el uso dentro de la facultad. Las tareas que deberían realizarse en el futuro son:

- Revisar el diseño tomando en cuenta un análisis económico-financiero.
 - Realizar la Ingeniería del Detalle y definir elementos internos del robot como rodamientos, tornillos, tuercas, ejes, engranajes, entre otros.
 - Hacer los planos definitivos de construcción y montaje del robot.
 - Construir el robot.
 - Utilizar el programa de MATLAB generado en este proyecto, para introducir el control automático del robot.
- Se debe profundizar más en el uso del Simulink, y en especial para este campo, en el SimMechanics. Por lo que futuros trabajos de investigación deberían ser orientados hacia esto.
 - Al momento de la construcción, sería recomendable realizar una revisión general al diseño. Esto debido a que como se utilizó en su mayoría software computacional para establecer el comportamiento del mismo, es importante respaldar esas simulaciones antes de su construcción.
 - Es fundamental estar bien familiarizado con el entorno del Autodesk Inventor y el MATLAB al momento de utilizar sus herramientas que, al ser correctamente determinadas, resultan ser una gran ayuda.
 - Así como se realizó este proyecto, sería recomendable realizar otros análisis con otras configuraciones de robots industriales como por ejemplo el SCARA.
 - Como continuación de este trabajo de investigación sería interesante realizar el mismo análisis cinemático y dinámico sin utilizar el Toolbox de Robótica, sino utilizando únicamente el SimMechanics o el Inventor.

BIBLIOGRAFÍA

AGUINAGA, A. (2005). *Automatización en la Industria, Robótica*. Quito: EPN - FIM.

ANGULO, J. (2005). *Introducción a la Robótica*. Madrid.

BARRIENTOS, A. (2009). *Fundamentos de Robótica*. Madrid: McGraw-Hill: 2da Edición.

BUDYNAS, R. G., & NISBETT, J. K. (2011). *Shigley's Mechanical Engineering Design*. New York: McGraw-Hill.

CABRERA, M. G. (05 de Julio de 2011). *Curso TOOLBOX Robótica*. Recuperado el 23 de Enero de 2012, de Toolbox de Robótica para Matlab: <http://www.scribd.com/doc/77642098/Curso-TOOLBOX-Robotica>

Club de Informatica, Robótica y Electrónica. (16 de Agosto de 2009). *Jmnlab*. Recuperado el 23 de Enero de 2012, de Servomotor. Parte 1 de 2: <http://www.jmnlab.com/servomotor/servomotor.html>

CORKE, P. (Septiembre de 2011). *Robotics Toolbox for MATLAB*. Obtenido de Peter Corke: <http://petercorke.com/RVC/>

CRAIG, J. J. (2006). *Introducción a la Robótica*. México: Pearson Prentice Hall.

Eurobots. (s.f.). *KUKA - KR15*. Recuperado el Septiembre de 14 de 2011, de Industrial Machinery Export: <http://www.eurobots.es/desc/id/19/KUKA-KR15-robots-es.html>

GARCÍA T., E., AGUILAR M., I. R., & PÉREZ V., J. D. (2008). *Diseño de un Manipulador Robótico de cinco grados de libertad como herramienta para un sistema de Detección de Fallas mediante ultrasonido derivado del Proyecto de Investigación SIP 2008 2653*. México D.F.: Unidad Azcapotzalco.

GONZÁLEZ, P., & JIMÉNEZ, M. (s.f.). *Robótica Industrial*. Madrid: Instituto de Automática Industrial.

Grupo Robótica UCAB. (6 de Junio de 2011). *Robots que han marcado la historia de la evolución autónoma*. Recuperado el Septiembre de 14 de 2011, de Roucab: Robótica Ucabista: <http://roucab.blogspot.com/2011/06/robots-que-han-marcado-la-historia-de.html>

IÑIGO M., R. (2002). *Robots Industriales Manipuladores*. Barcelona: Ediciones UPC.

MINCHALA, I. (2009). *Fundamentos de la Robótica Industrial (Seminario)*. Quito: EPN - FEPEON.

MOYA, D. (2010). *Modelo y Análisis cinemático de un robot manipulador industrial esférico aplicando el MATLAB*. Quito: Tesis EPN.

OGDEN, C. L., FRYAR, C. D., CARROLLI, M. D., & FLEGAL, K. M. (2004). *Mean Body Weight, Height, and Body Mass Index, United States 1960-2002*. CDC: Advanced Data.

OLLERO, A. (2001). *Robótica, Manipuladores y Robots Móviles*. Madrid: Marcombo.

RAMIS, M. (Septiembre de 2003). *La Ergonomía*. Recuperado el 13 de Septiembre de 2011, de Artiflexbalear: <http://www.artiflexbalear.org/ergonomia.htm>

Recursos Multimedia da Universidade de Vigo. (s.f.). Recuperado el 23 de Enero de 2012, de Sensores y Actuadores Industriales: http://tv.uvigo.es/uploads/material/Video/1709/ISAD_Tema7_2.pdf

Santa Bárbara C.E.S. (s.f.). *El Arte y las Matemáticas*. Recuperado el 13 de Septiembre de 2011, de Educa Madrid: http://www.educa.madrid.org/portal/c/portal/layout?p_l_id=34655.53

SCLATER, N., & CHIRONIS, N. P. (2007). *Mechanisms and mechanical devices sourcebook*. New York: McGraw-Hill.

SEGUI, W. T. (1999). *Diseño de estructuras de acero con LRFD*. México: International Thomson Editores.

SMUTNÝ, V. (s.f.). *Kinematika*. Recuperado el 9 de Septiembre de 2011, de <http://cmp.felk.cvut.cz/cmp/courses/ROB/roblec/kinematika-noteeng.pdf>

WEG. (s.f.). *Selección y Aplicación de Motores Eléctricos*. Recuperado el 23 de Enero de 2012, de WEG: Artículos Técnicos en Español: <http://catalogo.weg.com.br/files/wegnet/WEG-seleccion-y-aplicacion-de-motores-electricos-articulo-tecnico-espanol.pdf>

ANEXO 1

REPORTES DE LA SIMULACIÓN POR ELEMENTOS FINITOS DE LOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES

Reporte de Análisis - Base

Analyzed File:	Bas.ipt
Autodesk Inventor Version:	2012 (Build 160160000, 160)
Creation Date:	23/01/2012, 16:23
Simulation Author:	Santiago Vaca
Summary:	

PROJECT INFO (IPROPERTIES)

Summary

Author	Santiago Vaca
--------	---------------

Project

Part Number	Bas
Designer	Santiago Vaca
Cost	\$ 0,00
Date Created	16/09/2011

Physical

Material	Steel, Mild
Density	7,86 g/cm ³

Mass	14,5595 kg
Area	620400 mm ²
Volume	1852350 mm ³
Center of Gravity	x=0 mm y=46,724 mm z=-0,00238602 mm

Note: Physical values could be different from Physical values used by FEA reported below.

SIMULATION:1

General objective and settings:

Design Objective	Parametric Dimension
Simulation Type	Static Analysis
Last Modification Date	23/01/2012, 16:20
Detect and Eliminate Rigid Body Modes	No

Advanced settings:

Avg. Element Size (fraction of model diameter)	0,1
Min. Element Size (fraction of avg. size)	0,2
Grading Factor	1,5
Max. Turn Angle	60 deg
Create Curved Mesh Elements	Yes

Parameter definition:

Component Name	Feature Name	Parameter Name	Values	Current Value	Unit
Bas	Extrusion1	d1	6,8,10	6	mm

☐ MATERIAL(S)

Name	Steel, Mild	
General	Mass Density	7,86 g/cm ³
	Yield Strength	207 MPa
	Ultimate Tensile Strength	345 MPa
Stress	Young's Modulus	220 GPa
	Poisson's Ratio	0,275
	Shear Modulus	86,2745 GPa
Stress Thermal	Expansion Coefficient	0,000012 ul/c
	Thermal Conductivity	56 W/(m K)
	Specific Heat	460 J/(kg c)
Part Name(s)	Bas	

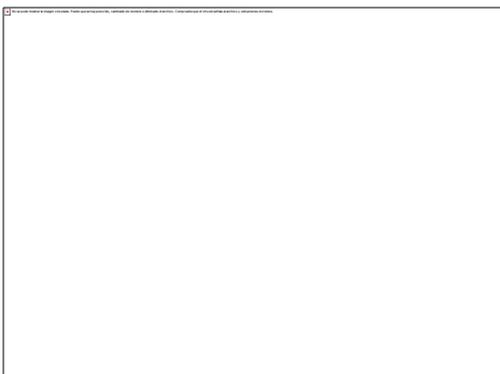
☐ OPERATING CONDITIONS

☐ Force:1

Load Type	Force
Magnitude	524.212 N
Vector X	0.000 N
Vector Y	-524.212 N
Vector Z	0.000 N

Selected Face(s)**Moment:1**

Load Type	Moment
Magnitude	392732.506 N mm
Vector X	0.000 N mm
Vector Y	0.000 N mm
Vector Z	392732.506 N mm

Selected Face(s)**Gravity**

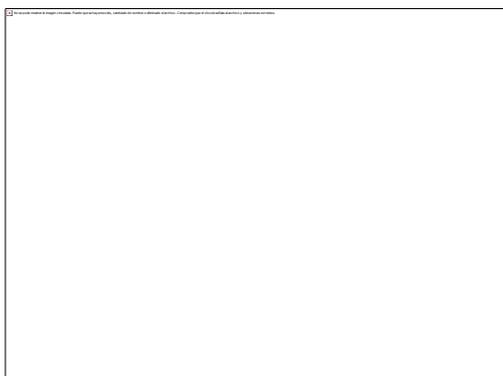
Load Type	Gravity
Magnitude	9810.000 mm/s ²
Vector X	0.000 mm/s ²

Vector Y	-9810.000 mm/s ²
Vector Z	0.000 mm/s ²

Fixed Constraint:1

Constraint Type	Fixed Constraint
------------------------	------------------

Selected Face(s)



RESULTS

PARAMETRIC CONFIGURATION:1

Parameter(s)

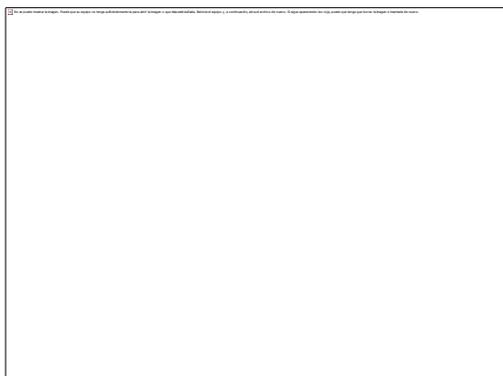
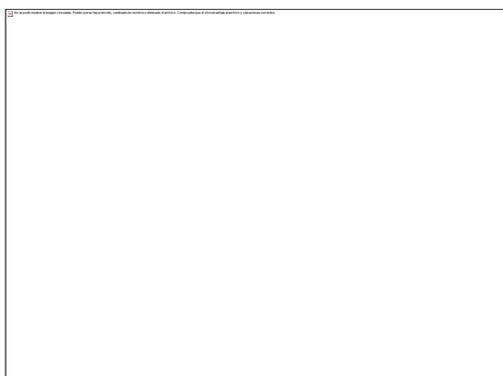
Component Name	Feature Name	Parameter Name	Current Value	Unit
Bas	Extrusion1	d1	6	mm

Reaction Force and Moment on Constraints

Constraint Name	Reaction Force		Reaction Moment	
	Magnitude	Component (X,Y,Z)	Magnitude	Component (X,Y,Z)
Fixed Constraint:1	667,043 N	0 N	392,872 N m	0 N m
		667,043 N		0 N m
		0 N		-392,872 N m

Result Summary

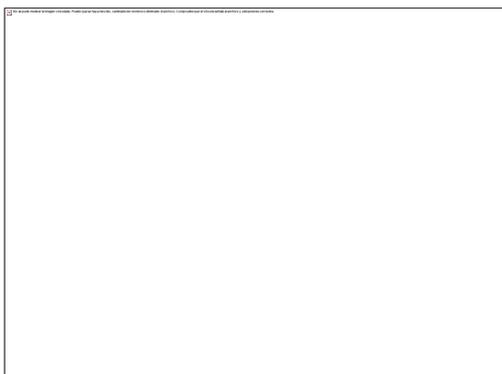
Name	Minimum	Maximum
Volume	1852350 mm ³	
Mass	14,5595 kg	
Von Mises Stress	0,0373334 MPa	77,2648 MPa
1st Principal Stress	-36,182 MPa	113,189 MPa
3rd Principal Stress	-116,142 MPa	35,5589 MPa
Displacement	0 mm	0,0602321 mm
Safety Factor	2,6791 ul	15 ul

Figures**Von Mises Stress****1st Principal Stress**

☐ Displacement



☐ Safety Factor



☐ **PARAMETRIC CONFIGURATION:2**

☐ *Parameter(s)*

Component Name	Feature Name	Parameter Name	Current Value	Unit
Bas	Extrusion1	d1	8	mm

☐ *Reaction Force and Moment on Constraints*

Constraint Name	Reaction Force		Reaction Moment	
	Magnitude	Component (X,Y,Z)	Magnitude	Component (X,Y,Z)
Fixed Constraint:1	697,996 N	0 N	392,734 N m	0 N m
		697,996 N		0 N m

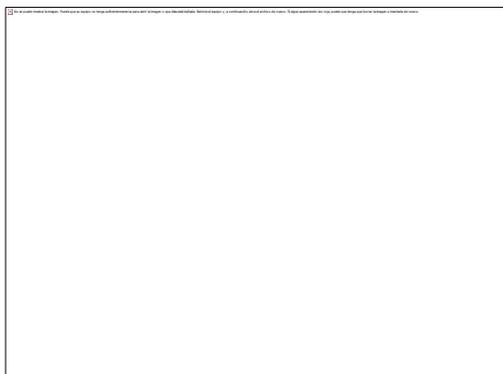
		0 N		-392,734 N m
--	--	-----	--	--------------

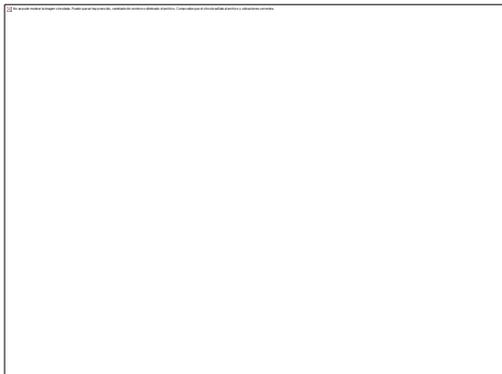
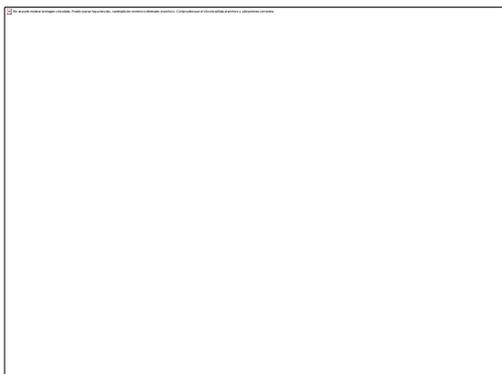
Result Summary

Name	Minimum	Maximum
Volume	2253870 mm ³	
Mass	17,7154 kg	
Von Mises Stress	0,0254187 MPa	47,488 MPa
1st Principal Stress	-13,1783 MPa	68,9674 MPa
3rd Principal Stress	-63,429 MPa	19,7845 MPa
Displacement	0 mm	0,0313588 mm
Safety Factor	4,359 ul	15 ul

Figures

Von Mises Stress



1st Principal Stress**Displacement****Safety Factor****PARAMETRIC CONFIGURATION:3****Parameter(s)**

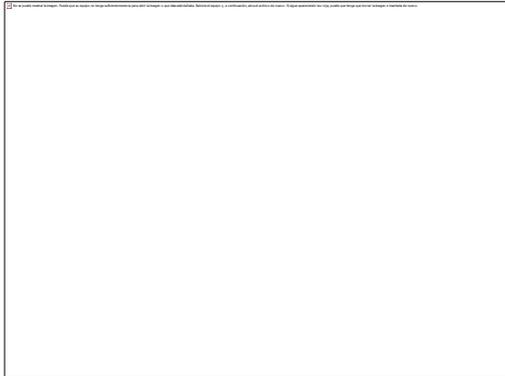
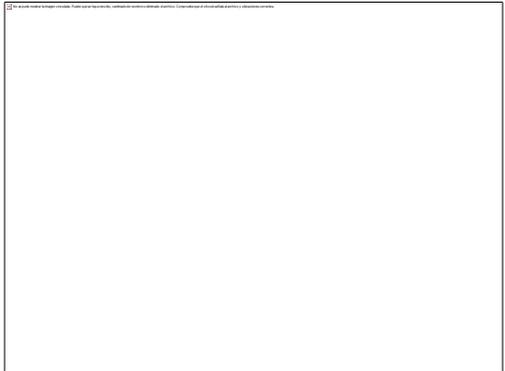
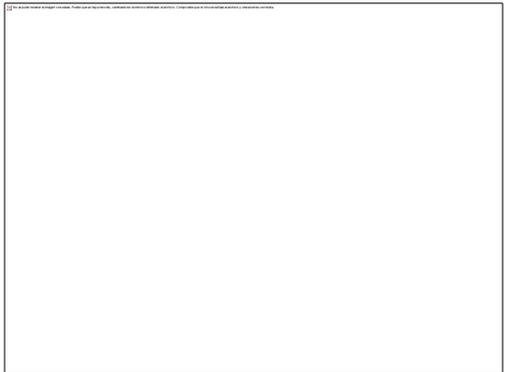
Component Name	Feature Name	Parameter Name	Current Value	Unit
Bas	Extrusion1	d1	10	mm

Reaction Force and Moment on Constraints

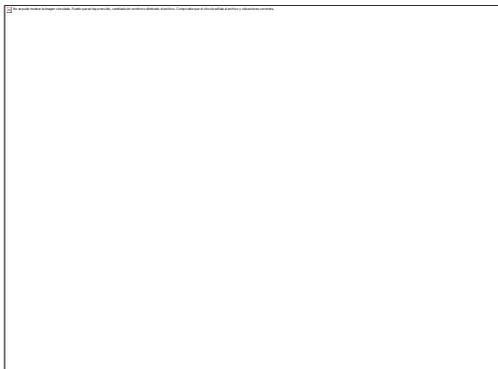
Constraint Name	Reaction Force		Reaction Moment	
	Magnitude	Component (X,Y,Z)	Magnitude	Component (X,Y,Z)
Fixed Constraint:1	728,958 N	0 N	392,681 N m	0 N m
		728,958 N		0 N m
		0 N		-392,681 N m

Result Summary

Name	Minimum	Maximum
Volume	2655380 mm ³	
Mass	20,8713 kg	
Von Mises Stress	0,0235643 MPa	34,1024 MPa
1st Principal Stress	-8,71543 MPa	41,7099 MPa
3rd Principal Stress	-44,6243 MPa	7,89615 MPa
Displacement	0 mm	0,0197545 mm
Safety Factor	6,06995 ul	15 ul

Figures**Von Mises Stress****1st Principal Stress****Displacement**

☐ Safety Factor



Reporte de Análisis - Cuerpo

Analyzed File:	Cuerp.ipt
Autodesk Inventor Version:	2012 (Build 160160000, 160)
Creation Date:	21/01/2012, 2:25
Simulation Author:	Santiago Vaca
Summary:	

☐ **PROJECT INFO (IPROPERTIES)**

☐ *Summary*

Author	Santiago Vaca
--------	---------------

☐ *Project*

Part Number	Cuerp
Designer	Marco Vaca
Cost	\$ 0,00
Date Created	16/09/2011

☐ *Physical*

Material	Steel, Mild
----------	-------------

Density	7,86 g/cm ³
Mass	19,7321 kg
Area	684421 mm ²
Volume	2510440 mm ³
Center of Gravity	x=39,6804 mm y=0,0276097 mm z=126,853 mm

Note: Physical values could be different from Physical values used by FEA reported below.

SIMULATION:1

General objective and settings:

Design Objective	Parametric Dimension
Simulation Type	Static Analysis
Last Modification Date	21/01/2012, 2:23
Detect and Eliminate Rigid Body Modes	No

Advanced settings:

Avg. Element Size (fraction of model diameter)	0,1
Min. Element Size (fraction of avg. size)	0,2
Grading Factor	1,5
Max. Turn Angle	60 deg
Create Curved Mesh Elements	Yes

Parameter definition:

Component Name	Feature Name	Parameter Name	Values	Current Value	Unit
Cuorp	Extrusion8	d62	4,6	6	mm

Cuerp	Extrusion10	d70	4,6,8,10	8	mm
-------	-------------	-----	----------	---	----

MATERIAL(S)

Name	Steel, Mild	
General	Mass Density	7,86 g/cm ³
	Yield Strength	207 MPa
	Ultimate Tensile Strength	345 MPa
Stress	Young's Modulus	220 GPa
	Poisson's Ratio	0,275 ul
	Shear Modulus	86,2745 GPa
Stress Thermal	Expansion Coefficient	0,000012 ul/c
	Thermal Conductivity	56 W/(m K)
	Specific Heat	460 J/(kg c)
Part Name(s)	Cuerp	

OPERATING CONDITIONS

Gravity

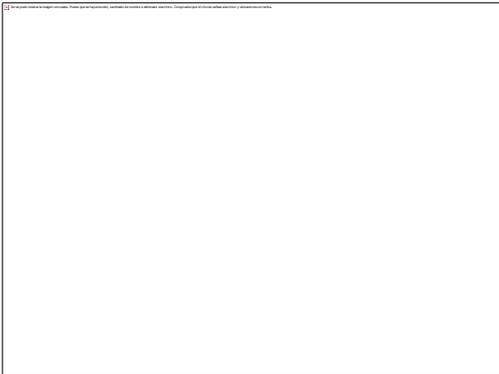
Load Type	Gravity
Magnitude	9810,000 mm/s ²
Vector X	0,000 mm/s ²
Vector Y	0,000 mm/s ²
Vector Z	-9810,000 mm/s ²

Force:1

Load Type	Force
-----------	-------

Magnitude	414,912 N
Vector X	0,000 N
Vector Y	0,000 N
Vector Z	-414,912 N

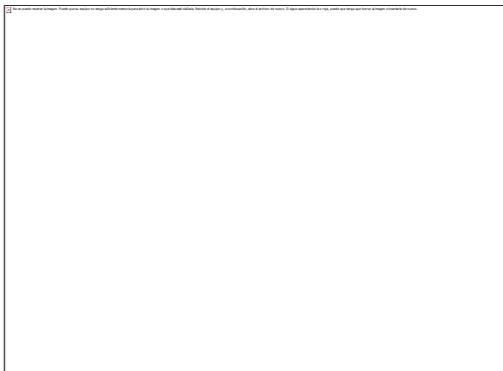
 Selected Face(s)



 **Moment:1**

Load Type	Moment
Magnitude	325911,083 N mm
Vector X	0,000 N mm
Vector Y	325911,083 N mm
Vector Z	0,000 N mm

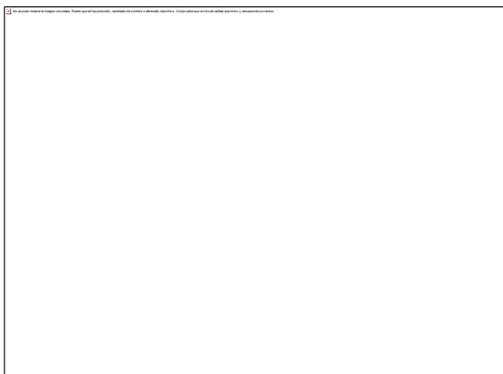
☐ Selected Face(s)



☐ **Fixed Constraint:1**

Constraint Type	Fixed Constraint
-----------------	------------------

☐ Selected Face(s)



☐ **RESULTS**

☐ **PARAMETRIC CONFIGURATION:1**

☐ **Parameter(s)**

Component Name	Feature Name	Parameter Name	Current Value	Unit
Cuorp	Extrusion8	d62	4	mm
Cuorp	Extrusion10	d70	4	mm

☐ **Reaction Force and Moment on Constraints**

Constraint Name	Reaction Force	Reaction Moment
-----------------	----------------	-----------------

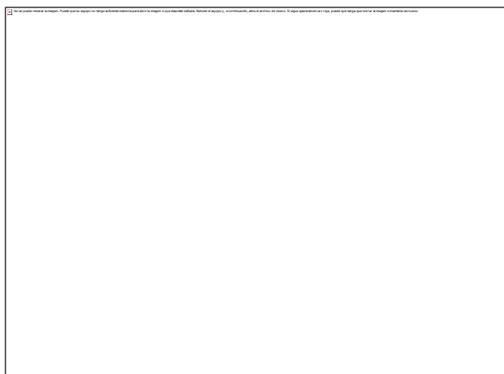
	Magnitude	Component (X,Y,Z)	Magnitude	Component (X,Y,Z)
Fixed Constraint:1	531,128 N	0 N	394,051 N m	20,9175 N m
		0 N		-393,495 N m
		531,128 N		0 N m

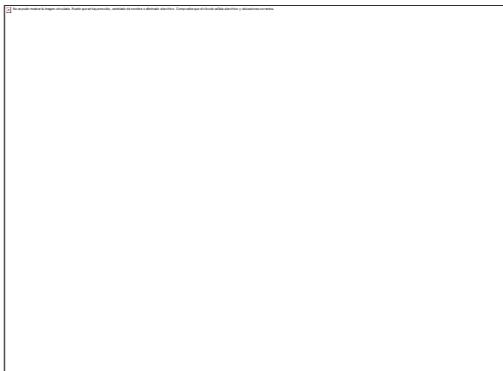
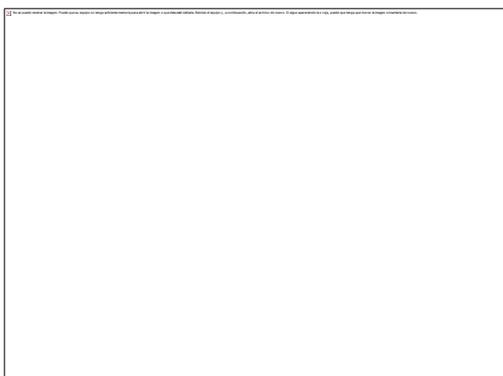
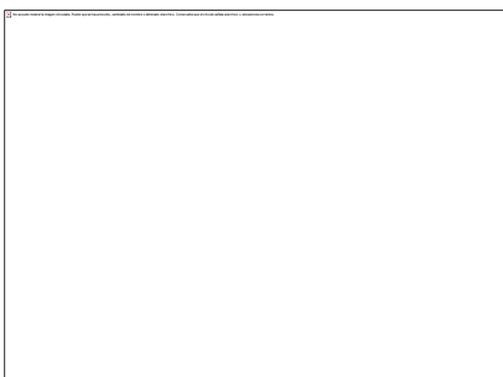
Result Summary

Name	Minimum	Maximum
Volume	1507290 mm ³	
Mass	11,8473 kg	
Von Mises Stress	0,0587328 MPa	770,036 MPa
1st Principal Stress	-448,103 MPa	1224,79 MPa
3rd Principal Stress	-1221,05 MPa	449,258 MPa
Displacement	0 mm	8,6112 mm
Safety Factor	0,268819 ul	15 ul

Figures

Von Mises Stress



1st Principal Stress**Displacement****Safety Factor****PARAMETRIC CONFIGURATION:2****Parameter(s)**

Component Name	Feature Name	Parameter Name	Current Value	Unit
Cuorp	Extrusion8	d62	4	mm

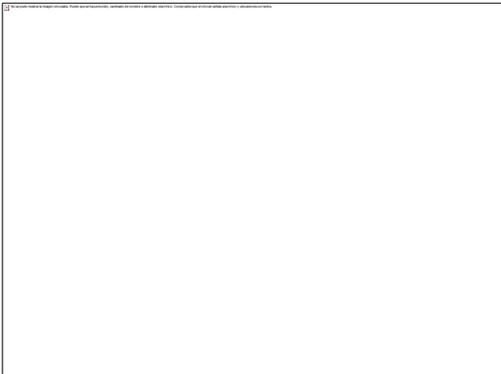
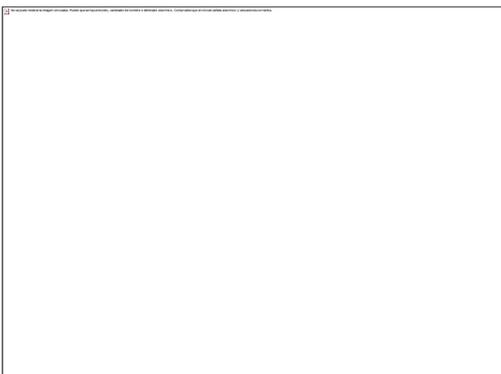
Cuerp	Extrusion10	d70	6	mm
-------	-------------	-----	---	----

Reaction Force and Moment on Constraints

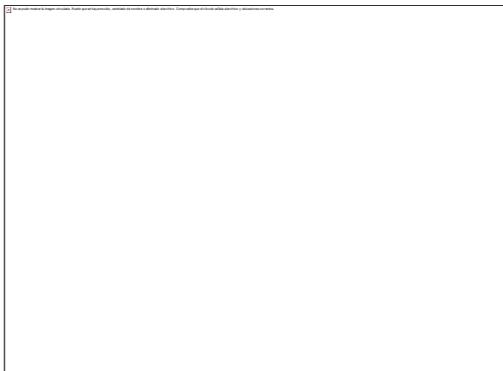
Constraint Name	Reaction Force		Reaction Moment	
	Magnitude	Component (X,Y,Z)	Magnitude	Component (X,Y,Z)
Fixed Constraint:1	555,353 N	0 N	393,906 N m	20,9953 N m
		0 N		-393,346 N m
		555,353 N		0 N m

Result Summary

Name	Minimum	Maximum
Volume	1821460 mm ³	
Mass	14,3167 kg	
Von Mises Stress	0,0539221 MPa	363,479 MPa
1st Principal Stress	-200,58 MPa	569,299 MPa
3rd Principal Stress	-569,53 MPa	200,469 MPa
Displacement	0 mm	2,62531 mm
Safety Factor	0,605762 ul	15 ul

Figures**Von Mises Stress****1st Principal Stress****Displacement**

☐ Safety Factor



☐ PARAMETRIC CONFIGURATION:3

☐ *Parameter(s)*

Component Name	Feature Name	Parameter Name	Current Value	Unit
Cuorp	Extrusion8	d62	4	mm
Cuorp	Extrusion10	d70	8	mm

☐ *Reaction Force and Moment on Constraints*

Constraint Name	Reaction Force		Reaction Moment	
	Magnitude	Component (X,Y,Z)	Magnitude	Component (X,Y,Z)
Fixed Constraint:1	578,482 N	0 N	393,898 N m	21,0078 N m
		0 N		-393,338 N m
		578,482 N		0 N m

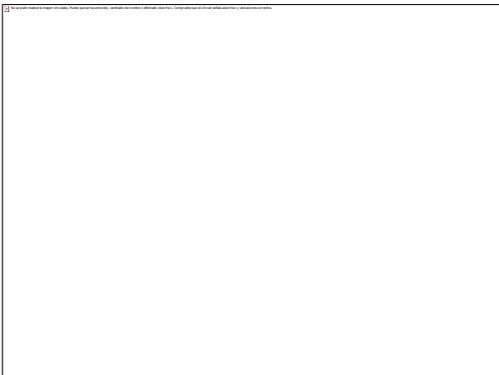
☐ *Result Summary*

Name	Minimum	Maximum
Volume	2121460 mm ³	
Mass	16,6747 kg	
Von Mises Stress	0,0532032 MPa	218,321 MPa

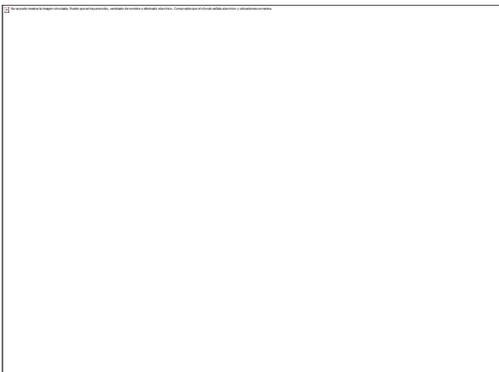
1st Principal Stress	-95,9028 MPa	338,18 MPa
3rd Principal Stress	-300,814 MPa	115,311 MPa
Displacement	0 mm	1,13173 mm
Safety Factor	0,948144 ul	15 ul

Figures

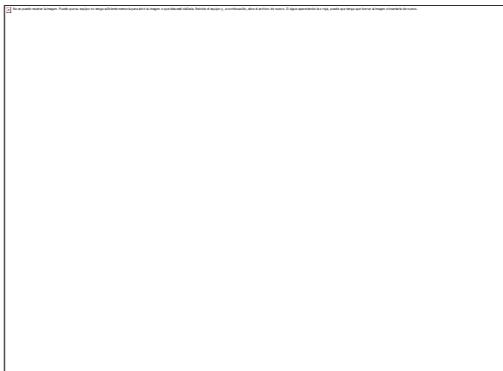
Von Mises Stress



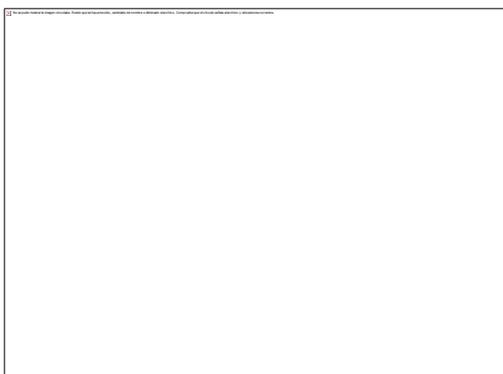
1st Principal Stress



☐ Displacement



☐ Safety Factor



☐ PARAMETRIC CONFIGURATION:4

☐ *Parameter(s)*

Component Name	Feature Name	Parameter Name	Current Value	Unit
Cuerp	Extrusion8	d62	4	mm
Cuerp	Extrusion10	d70	10	mm

☐ *Reaction Force and Moment on Constraints*

Constraint Name	Reaction Force		Reaction Moment	
	Magnitude	Component (X,Y,Z)	Magnitude	Component (X,Y,Z)
Fixed Constraint:1	600,545 N	0 N	393,936 N m	21,0472 N m
		0 N		-393,373 N m

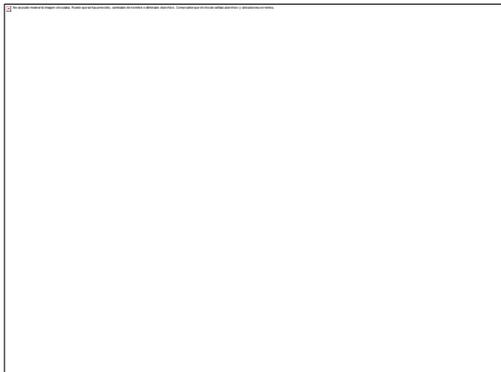
		600,545 N		0 N m
--	--	-----------	--	-------

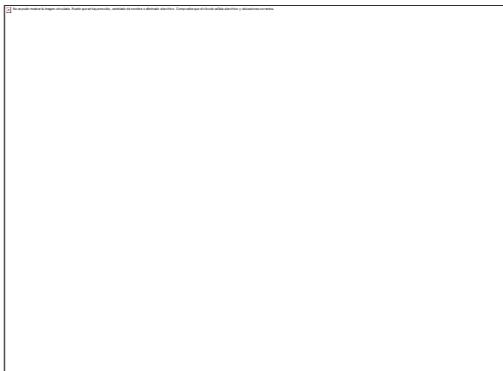
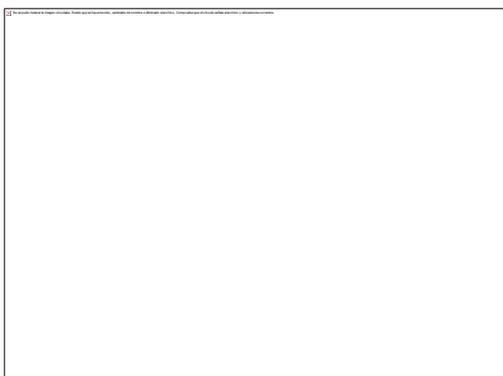
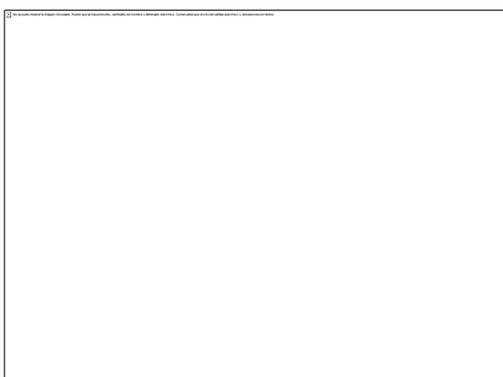
Result Summary

Name	Minimum	Maximum
Volume	2407580 mm ³	
Mass	18,9236 kg	
Von Mises Stress	0,0716959 MPa	141,505 MPa
1st Principal Stress	-71,9157 MPa	216,229 MPa
3rd Principal Stress	-216,565 MPa	70,8573 MPa
Displacement	0 mm	0,595694 mm
Safety Factor	1,59306 ul	15 ul

Figures

Von Mises Stress



1st Principal Stress**Displacement****Safety Factor****PARAMETRIC CONFIGURATION:5****Parameter(s)**

Component Name	Feature Name	Parameter Name	Current Value	Unit
Cuorp	Extrusion8	d62	6	mm

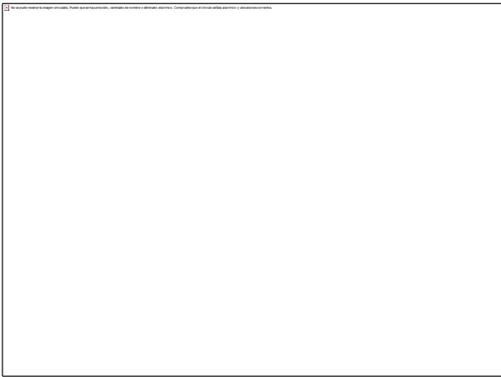
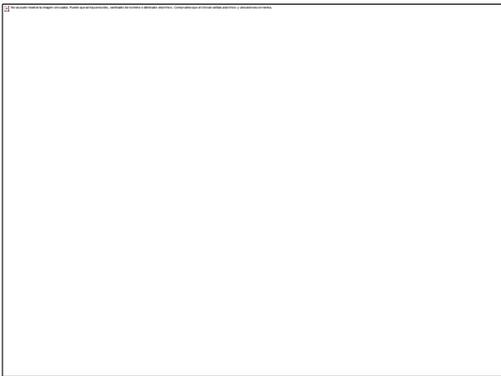
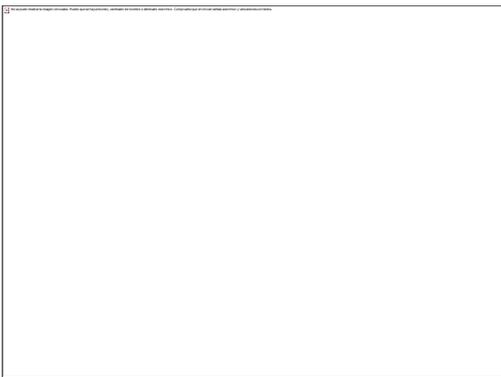
Cuerp	Extrusion10	d70	4	mm
-------	-------------	-----	---	----

Reaction Force and Moment on Constraints

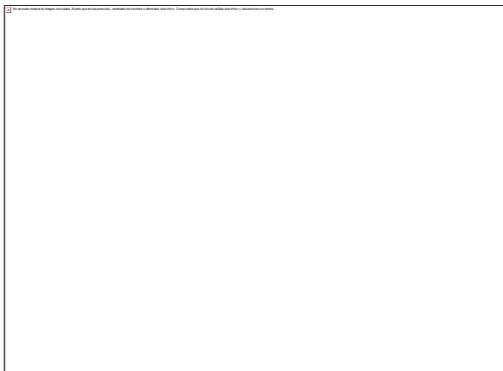
Constraint Name	Reaction Force		Reaction Moment	
	Magnitude	Component (X,Y,Z)	Magnitude	Component (X,Y,Z)
Fixed Constraint:1	561,115 N	0 N	396,446 N m	20,9479 N m
		0 N		-395,893 N m
		561,115 N		0 N m

Result Summary

Name	Minimum	Maximum
Volume	1896160 mm ³	
Mass	14,9038 kg	
Von Mises Stress	0,0312656 MPa	774,882 MPa
1st Principal Stress	-451,414 MPa	1231,76 MPa
3rd Principal Stress	-1230,3 MPa	452,205 MPa
Displacement	0 mm	8,69806 mm
Safety Factor	0,267138 ul	15 ul

Figures**Von Mises Stress****1st Principal Stress****Displacement**

☐ Safety Factor



☐ PARAMETRIC CONFIGURATION:6

☐ *Parameter(s)*

Component Name	Feature Name	Parameter Name	Current Value	Unit
Cuorp	Extrusion8	d62	6	mm
Cuorp	Extrusion10	d70	6	mm

☐ *Reaction Force and Moment on Constraints*

Constraint Name	Reaction Force		Reaction Moment	
	Magnitude	Component (X,Y,Z)	Magnitude	Component (X,Y,Z)
Fixed Constraint:1	585,338 N	0 N	396,367 N m	20,9884 N m
		0 N		-395,811 N m
		585,338 N		0 N m

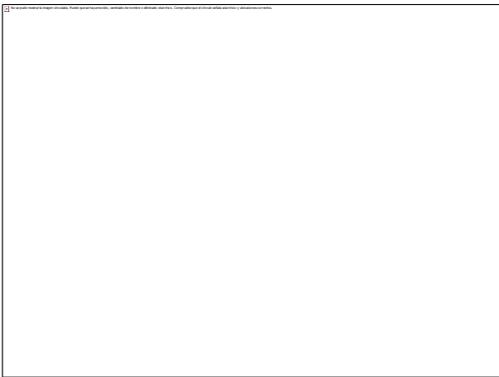
☐ *Result Summary*

Name	Minimum	Maximum
Volume	2210340 mm ³	
Mass	17,3732 kg	
Von Mises Stress	0,0272134 MPa	552,986 MPa

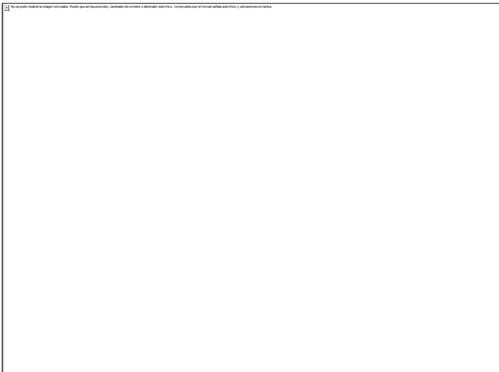
1st Principal Stress	-230,885 MPa	778,094 MPa
3rd Principal Stress	-809,398 MPa	220,65 MPa
Displacement	0 mm	2,66198 mm
Safety Factor	0,374331 ul	15 ul

Figures

Von Mises Stress



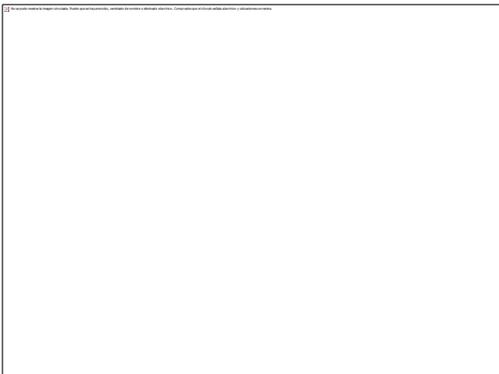
1st Principal Stress



 Displacement



 Safety Factor



 **PARAMETRIC CONFIGURATION:7**

 *Parameter(s)*

Component Name	Feature Name	Parameter Name	Current Value	Unit
Cuerp	Extrusion8	d62	6	mm
Cuerp	Extrusion10	d70	8	mm

 *Reaction Force and Moment on Constraints*

Constraint Name	Reaction Force		Reaction Moment	
	Magnitude	Component (X,Y,Z)	Magnitude	Component (X,Y,Z)
Fixed Constraint:1	608,511 N	0 N	396,395 N m	21,0041 N m
		0 N		-395,838 N m

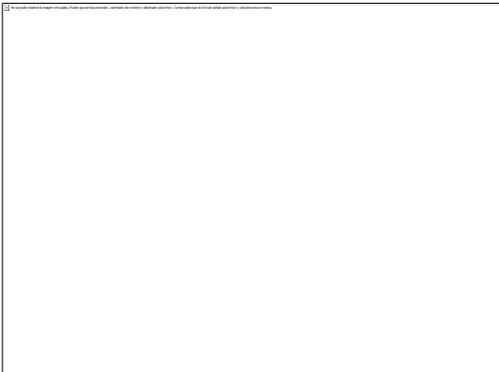
		608,511 N		0 N m
--	--	-----------	--	-------

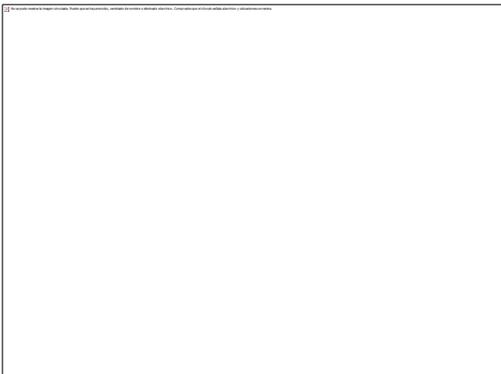
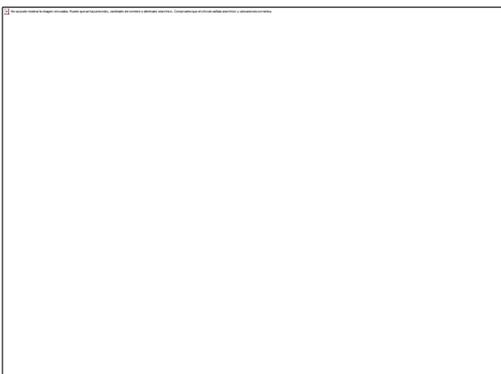
Result Summary

Name	Minimum	Maximum
Volume	2510330 mm ³	
Mass	19,7312 kg	
Von Mises Stress	0,0322976 MPa	336,596 MPa
1st Principal Stress	-135,776 MPa	448,406 MPa
3rd Principal Stress	-488,933 MPa	124,201 MPa
Displacement	0 mm	1,14851 mm
Safety Factor	0,61498 ul	15 ul

Figures

Von Mises Stress



1st Principal Stress**Displacement****Safety Factor****PARAMETRIC CONFIGURATION:8****Parameter(s)**

Component Name	Feature Name	Parameter Name	Current Value	Unit
Cuorp	Extrusion8	d62	6	mm

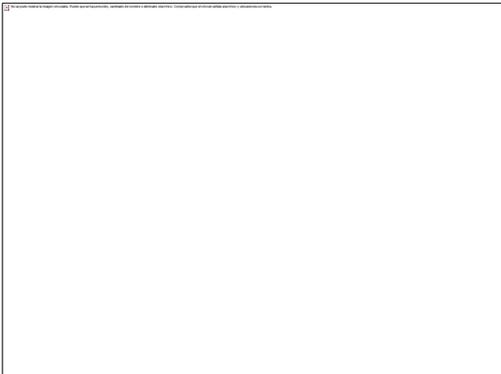
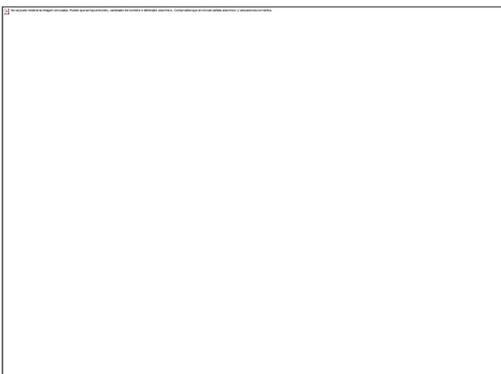
Cuerp	Extrusion10	d70	10	mm
-------	-------------	-----	----	----

Reaction Force and Moment on Constraints

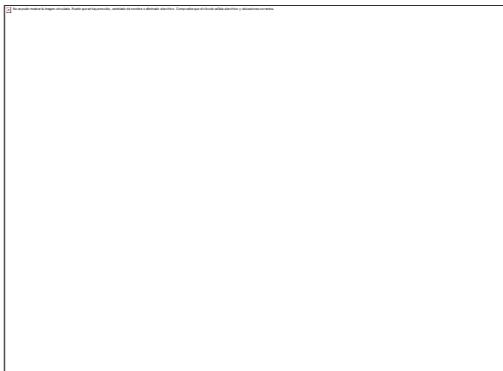
Constraint Name	Reaction Force		Reaction Moment	
	Magnitude	Component (X,Y,Z)	Magnitude	Component (X,Y,Z)
Fixed Constraint:1	630,531 N	0 N	396,372 N m	20,9928 N m
		0 N		-395,816 N m
		630,531 N		0 N m

Result Summary

Name	Minimum	Maximum
Volume	2796460 mm ³	
Mass	21,9801 kg	
Von Mises Stress	0,0235639 MPa	142,728 MPa
1st Principal Stress	-72,5196 MPa	217,921 MPa
3rd Principal Stress	-218,298 MPa	71,4399 MPa
Displacement	0 mm	0,59639 mm
Safety Factor	1,58041 ul	15 ul

Figures**Von Mises Stress****1st Principal Stress****Displacement**

☐ Safety Factor



REPORTE ANÁLISIS - BRAZO

Analyzed File:	EnsambleBrazo.iam
Autodesk Inventor Version:	2012 (Build 160160000, 160)
Creation Date:	27/01/2012, 14:00
Simulation Author:	Santiago Vaca
Summary:	

☐ PROJECT INFO (IPROPERTIES)

☐ *Summary*

Author	Santiago Vaca
--------	---------------

☐ *Project*

Part Number	EnsambleBrazo
Designer	Santiago Vaca
Cost	\$ 0,00
Date Created	17/01/2012

Physical

Mass	11,1404 kg
Area	504408 mm ²
Volume	1417350 mm ³
Center of Gravity	x=23,451 mm y=0 mm z=335 mm

Note: Physical values could be different from Physical values used by FEA reported below.

SIMULATION:1

General objective and settings:

Design Objective	Single Point
Simulation Type	Static Analysis
Last Modification Date	27/01/2012, 13:57
Detect and Eliminate Rigid Body Modes	No
Separate Stresses Across Contact Surfaces	No
Motion Loads Analysis	No

Advanced settings:

Avg. Element Size (fraction of model diameter)	0,1
Min. Element Size (fraction of avg. size)	0,2
Grading Factor	1,5
Max. Turn Angle	60 deg
Create Curved Mesh Elements	No

Use part based measure for Assembly mesh	Yes
--	-----

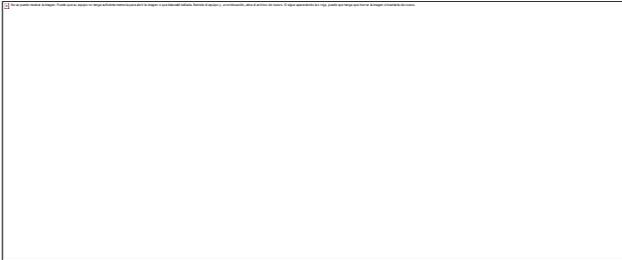
MATERIAL(S)

Name	Steel, Mild	
General	Mass Density	7,86 g/cm ³
	Yield Strength	207 MPa
	Ultimate Tensile Strength	345 MPa
Stress	Young's Modulus	220 GPa
	Poisson's Ratio	0,275
	Shear Modulus	86,2745 GPa
Stress Thermal	Expansion Coefficient	0,000012 1/c
	Thermal Conductivity	56 W/(m K)
	Specific Heat	460 J/(kg c)

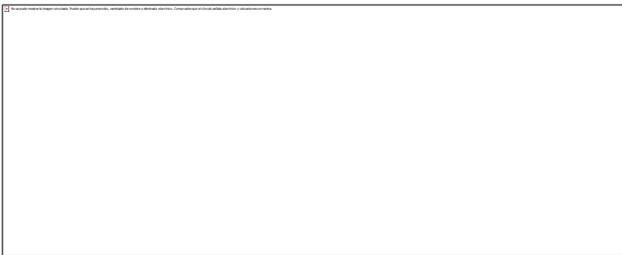
OPERATING CONDITIONS

Moment:1

Load Type	Moment
Magnitude	127731,563 N mm
Vector X	127731,563 N mm
Vector Y	0,000 N mm
Vector Z	0,000 N mm

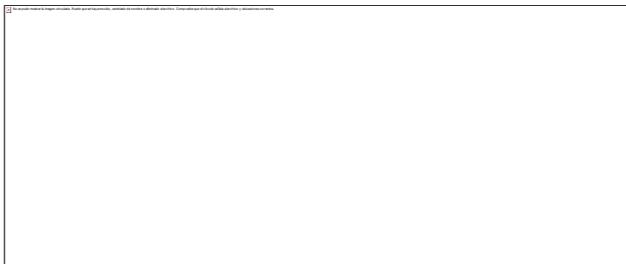
Selected Face(s)**Force:1**

Load Type	Force
Magnitude	305,740 N
Vector X	0,000 N
Vector Y	-305,740 N
Vector Z	0,000 N

Selected Face(s)**Moment:2**

Load Type	Moment
Magnitude	15439,890 N mm
Vector X	0,000 N mm
Vector Y	0,000 N mm
Vector Z	15439,890 N mm

☐ Selected Face(s)



☐ **Fixed Constraint:1**

Constraint Type	Fixed Constraint
-----------------	------------------

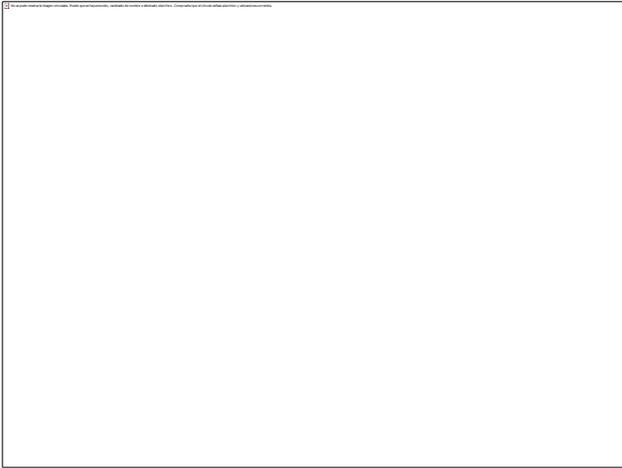
☐ Selected Face(s)



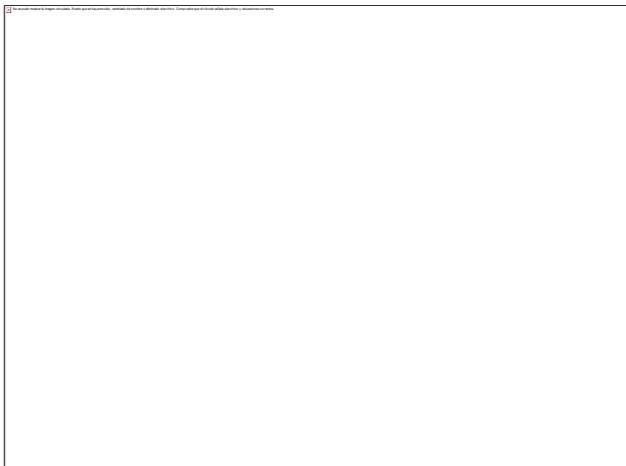
☐ **RESULTS**

☐ **Result Summary**

Name	Minimum	Maximum
Volume	1417350 mm ³	
Mass	11,1404 kg	
Von Mises Stress	0,000205195 MPa	119,283 MPa
1st Principal Stress	-4,48955 MPa	85,0247 MPa
3rd Principal Stress	-84,2181 MPa	3,29861 MPa
Displacement	0 mm	0,275467 mm
Safety Factor	1,73537 ul	15 ul

Figures**Von Mises Stress****1st Principal Stress**

☐ Displacement



☐ Safety Factor



Reporte de Análisis - Antebrazo

Analyzed File:	Antebraz.ipt
Autodesk Inventor Version:	2012 (Build 160160000, 160)
Creation Date:	20/01/2012, 22:33
Simulation Author:	Santiago Vaca
Summary:	

PROJECT INFO (IPROPERTIES)

Summary

Author	Santiago Vaca
--------	---------------

Project

Part Number	Antebraz
Designer	Santiago Vaca
Cost	\$ 0,00
Date Created	28/12/2011

Physical

Material	Steel, Mild
Density	7,86 g/cm ³
Mass	5,42315 kg
Area	330948 mm ²
Volume	689968 mm ³
Center of Gravity	x=-0,088788 mm y=-31,7183 mm z=-13,6783 mm

Note: Physical values could be different from Physical values used by FEA reported below.

SIMULATION:1

General objective and settings:

Design Objective	Parametric Dimension
Simulation Type	Static Analysis
Last Modification Date	20/01/2012, 22:32

Detect and Eliminate Rigid Body Modes	No
---------------------------------------	----

Advanced settings:

Avg. Element Size (fraction of model diameter)	0,1
Min. Element Size (fraction of avg. size)	0,2
Grading Factor	1,5
Max. Turn Angle	60 deg
Create Curved Mesh Elements	Yes

Parameter definition:

Component Name	Feature Name	Parameter Name	Values	Current Value	Unit
Antebraz	Extrusion8	d29	10,15,20	20	mm

MATERIAL(S)

Name	Steel, Mild	
General	Mass Density	7,86 g/cm ³
	Yield Strength	207 MPa
	Ultimate Tensile Strength	345 MPa
Stress	Young's Modulus	220 GPa
	Poisson's Ratio	0,275 ul
	Shear Modulus	86,2745 GPa
Stress Thermal	Expansion Coefficient	0,000012 ul/c
	Thermal Conductivity	56 W/(m K)
	Specific Heat	460 J/(kg c)

Part Name(s)	Antebraz
--------------	----------

OPERATING CONDITIONS

Force:1

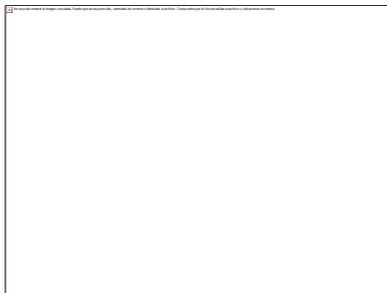
Load Type	Force
Magnitude	252,595 N
Vector X	0,000 N
Vector Y	-252,595 N
Vector Z	0,000 N

Selected Face(s)

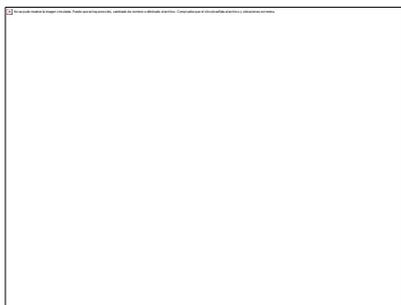


Moment:1

Load Type	Moment
Magnitude	61004,958 N mm
Vector X	61004,958 N mm
Vector Y	0,000 N mm
Vector Z	0,000 N mm

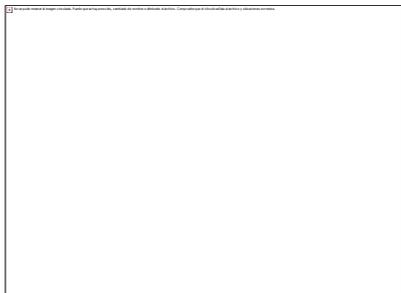
Selected Face(s)**Gravity**

Load Type	Gravity
Magnitude	9810,000 mm/s ²
Vector X	0,000 mm/s ²
Vector Y	-9810,000 mm/s ²
Vector Z	0,000 mm/s ²

Selected Face(s)**Fixed Constraint:1**

Constraint Type	Fixed Constraint
-----------------	------------------

Selected Face(s)



RESULTS

PARAMETRIC CONFIGURATION:1

Parameter(s)

Component Name	Feature Name	Parameter Name	Current Value	Unit
Antebraz	Extrusion8	d29	10	mm

Reaction Force and Moment on Constraints

Constraint Name	Reaction Force		Reaction Moment	
	Magnitude	Component (X,Y,Z)	Magnitude	Component (X,Y,Z)
Fixed Constraint:1	305,922 N	0 N	127,569 N m	-126,703 N m
		305,922 N		0 N m
		0 N		-14,8399 N m

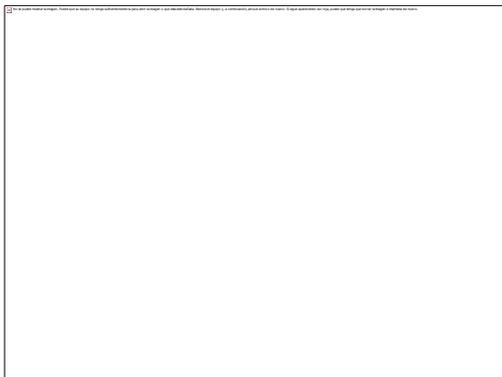
Result Summary

Name	Minimum	Maximum
Volume	691373 mm ³	
Mass	5,43419 kg	
Von Mises Stress	0,0133511 MPa	172,342 MPa
1st Principal Stress	-10,6504 MPa	156,541 MPa

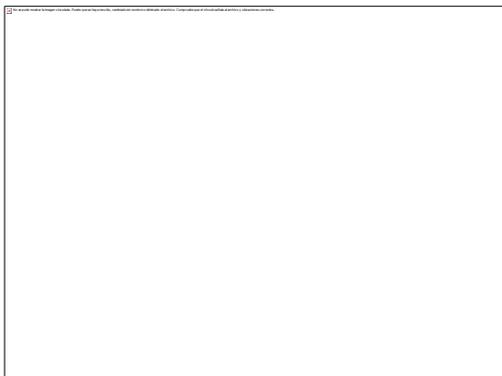
3rd Principal Stress	-160,03 MPa	9,06807 MPa
Displacement	0 mm	0,246297 mm
Safety Factor	1,2011 ul	15 ul

Figures

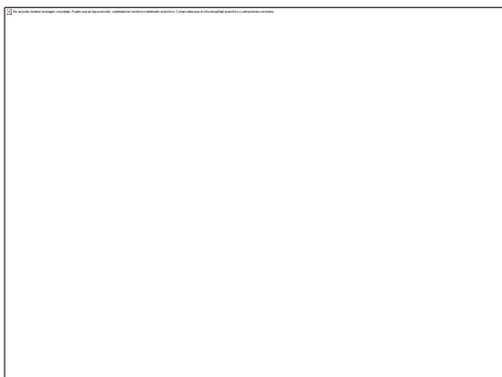
Von Mises Stress



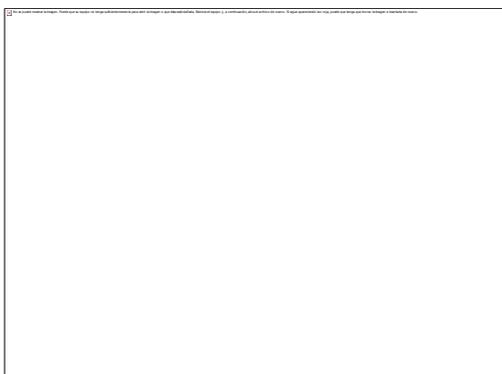
1st Principal Stress



Displacement



☐ Safety Factor



☐ PARAMETRIC CONFIGURATION:2

☐ *Parameter(s)*

Component Name	Feature Name	Parameter Name	Current Value	Unit
Antebraz	Extrusion8	d29	15	mm

☐ *Reaction Force and Moment on Constraints*

Constraint Name	Reaction Force		Reaction Moment	
	Magnitude	Component (X,Y,Z)	Magnitude	Component (X,Y,Z)
Fixed Constraint:1	305,87 N	0 N	127,55 N m	-126,684 N m
		305,87 N		0 N m
		0 N		-14,8377 N m

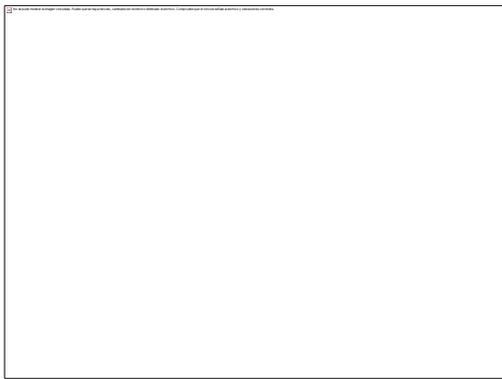
☐ *Result Summary*

Name	Minimum	Maximum
Volume	690588 mm ³	
Mass	5,42802 kg	
Von Mises Stress	0,0299822 MPa	121,19 MPa
1st Principal Stress	-10,5996 MPa	122,916 MPa

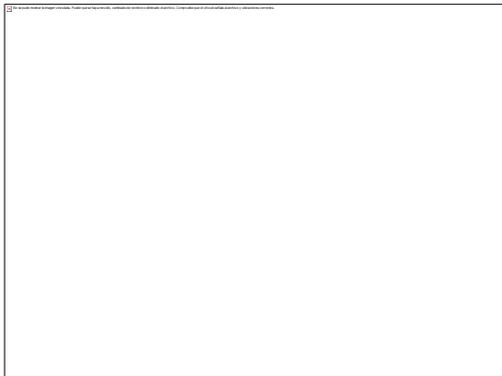
3rd Principal Stress	-127,615 MPa	9,08776 MPa
Displacement	0 mm	0,248002 mm
Safety Factor	1,70807 ul	15 ul

Figures

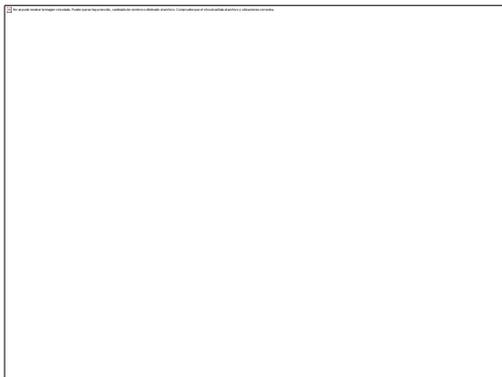
Von Mises Stress



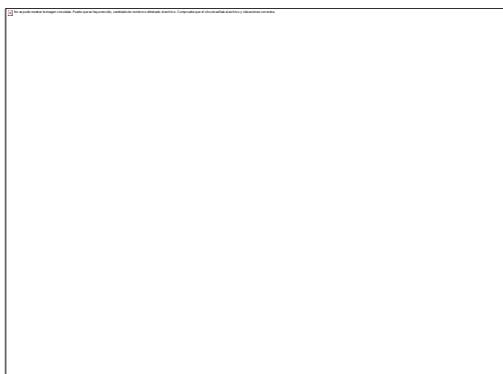
1st Principal Stress



Displacement



☐ Safety Factor



☐ PARAMETRIC CONFIGURATION:3

☐ *Parameter(s)*

Component Name	Feature Name	Parameter Name	Current Value	Unit
Antebraz	Extrusion8	d29	20	mm

☐ *Reaction Force and Moment on Constraints*

Constraint Name	Reaction Force		Reaction Moment	
	Magnitude	Component (X,Y,Z)	Magnitude	Component (X,Y,Z)
Fixed Constraint:1	305,791 N	0 N	127,592 N m	-126,726 N m
		305,791 N		0 N m
		0 N		-14,8361 N m

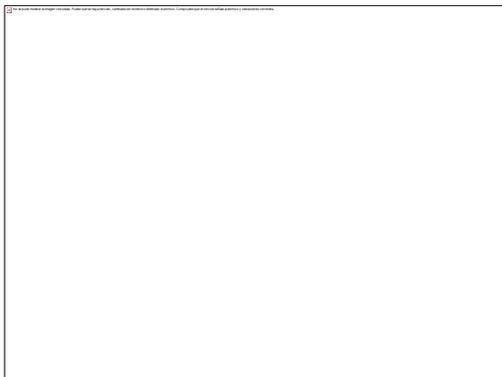
☐ *Result Summary*

Name	Minimum	Maximum
Volume	689488 mm ³	
Mass	5,41938 kg	
Von Mises Stress	0,031916 MPa	124,449 MPa
1st Principal Stress	-5,67412 MPa	126,228 MPa

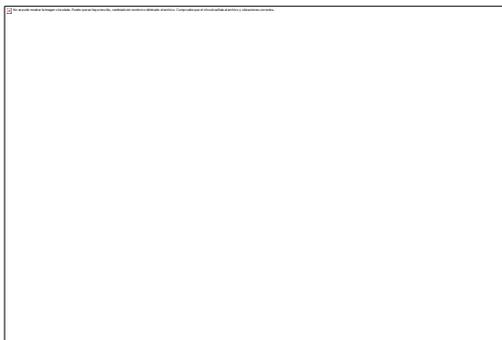
3rd Principal Stress	-122,169 MPa	5,00091 MPa
Displacement	0 mm	0,252259 mm
Safety Factor	1,66333 ul	15 ul

Figures

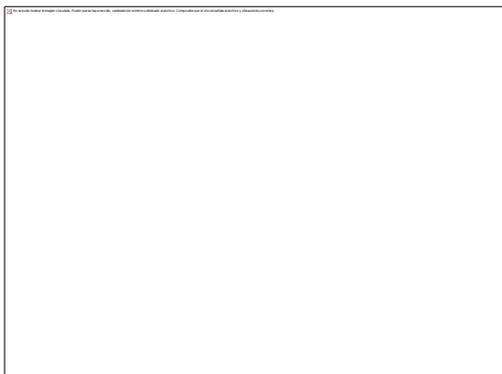
Von Mises Stress



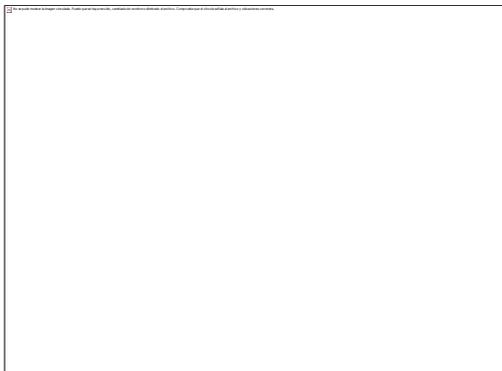
1st Principal Stress



Displacement



☐ Safety Factor



Reporte de Análisis – Muñeca Parte “A”.

Analyzed File:	DisMuñeca.ipt
Autodesk Inventor Version:	2012 (Build 160160000, 160)
Creation Date:	20/01/2012, 20:46
Simulation Author:	Santiago Vaca
Summary:	

☐ **PROJECT INFO (IPROPERTIES)**

☐ **Summary**

Author	Santiago Vaca
--------	---------------

☐ **Project**

Part Number	DisMuñeca
Designer	Santiago Vaca
Cost	\$ 0,00
Date Created	10/11/2011

Physical

Material	Steel, Mild
Density	7,86 g/cm ³
Mass	1,01752 kg
Area	102562 mm ²
Volume	129456 mm ³
Center of Gravity	x=0 mm y=0 mm z=119,611 mm

Note: Physical values could be different from Physical values used by FEA reported below.

SIMULATION:1

General objective and settings:

Design Objective	Parametric Dimension
Simulation Type	Static Analysis
Last Modification Date	20/01/2012, 20:40
Detect and Eliminate Rigid Body Modes	No

Advanced settings:

Avg. Element Size (fraction of model diameter)	0,1
Min. Element Size (fraction of avg. size)	0,2
Grading Factor	1,5
Max. Turn Angle	60 deg
Create Curved Mesh Elements	Yes

Parameter definition:

Component Name	Feature Name	Parameter Name	Values	Current Value	Unit
DisMuñeca	Shell2	d21	2,3	3	mm

☐ MATERIAL(S)

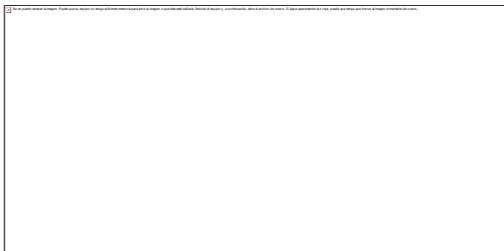
Name	Steel, Mild	
General	Mass Density	7,86 g/cm ³
	Yield Strength	207 MPa
	Ultimate Tensile Strength	345 MPa
Stress	Young's Modulus	220 GPa
	Poisson's Ratio	0,275 ul
	Shear Modulus	86,2745 GPa
Stress Thermal	Expansion Coefficient	0,000012 ul/c
	Thermal Conductivity	56 W/(m K)
	Specific Heat	460 J/(kg c)
Part Name(s)	DisMuñeca	

☐ OPERATING CONDITIONS

☐ *Force:1*

Load Type	Force
Magnitude	60,706 N
Vector X	0,000 N
Vector Y	-60,706 N
Vector Z	0,000 N

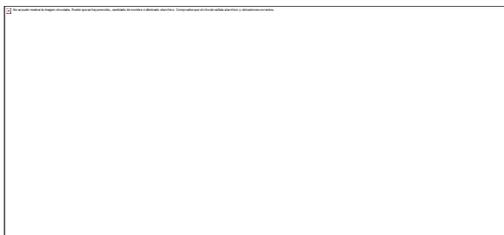
 Selected Face(s)



 **Gravity**

Load Type	Gravity
Magnitude	9810,000 mm/s ²
Vector X	0,000 mm/s ²
Vector Y	-9810,000 mm/s ²
Vector Z	0,000 mm/s ²

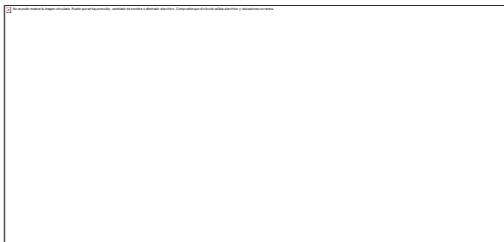
 Selected Face(s)



 **Moment:1**

Load Type	Moment
Magnitude	5340,807 N mm
Vector X	-5340,807 N mm
Vector Y	0,000 N mm
Vector Z	0,000 N mm

☐ Selected Face(s)



☐ **Fixed Constraint:1**

Constraint Type	Fixed Constraint
-----------------	------------------

☐ Selected Face(s)



☐ **RESULTS**

☐ **PARAMETRIC CONFIGURATION:1**

☐ **Parameter(s)**

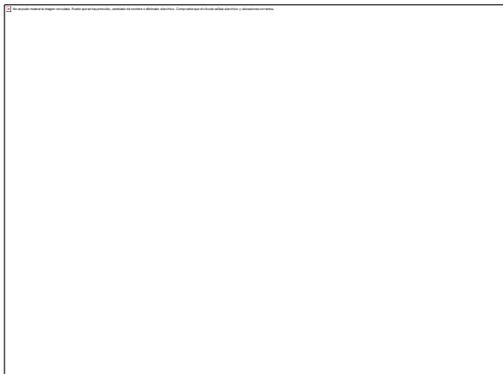
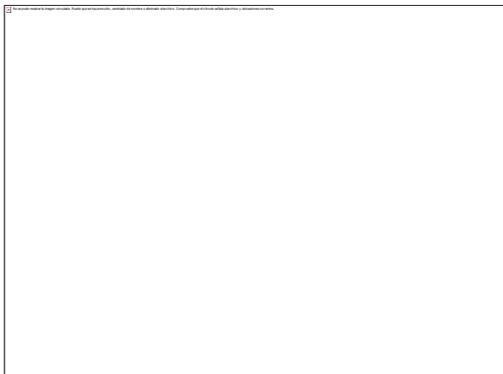
Component Name	Feature Name	Parameter Name	Current Value	Unit
DisMuñeca	Shell2	d21	2	mm

☐ **Reaction Force and Moment on Constraints**

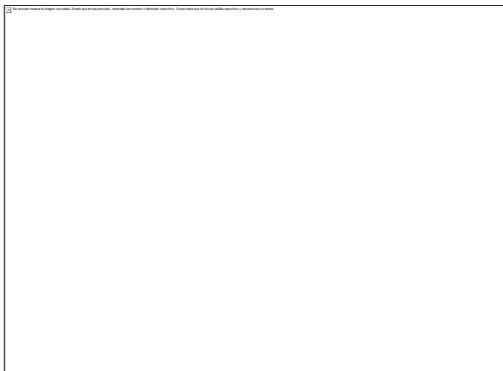
Constraint Name	Reaction Force		Reaction Moment	
	Magnitude	Component (X,Y,Z)	Magnitude	Component (X,Y,Z)
Fixed Constraint:1	67,9968 N	0 N	15,5999 N m	15,5999 N m
		67,9968 N		0 N m
		0 N		0 N m

☐ Result Summary

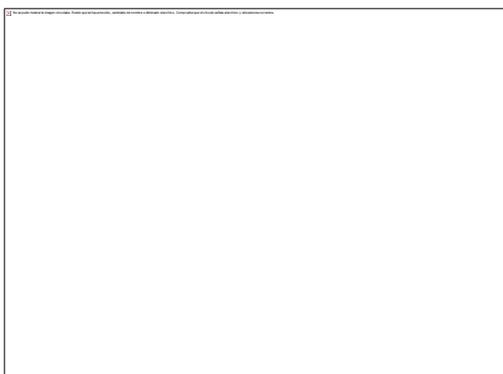
Name	Minimum	Maximum
Volume	94553,6 mm ³	
Mass	0,743191 kg	
Von Mises Stress	0,0192071 MPa	108,671 MPa
1st Principal Stress	-56,4673 MPa	161,912 MPa
3rd Principal Stress	-158,462 MPa	57,4652 MPa
Displacement	0 mm	0,267311 mm
Safety Factor	1,90482 ul	15 ul

☐ Figures**☐ Von Mises Stress****☐ 1st Principal Stress**

Displacement



Safety Factor



PARAMETRIC CONFIGURATION:2

Parameter(s)

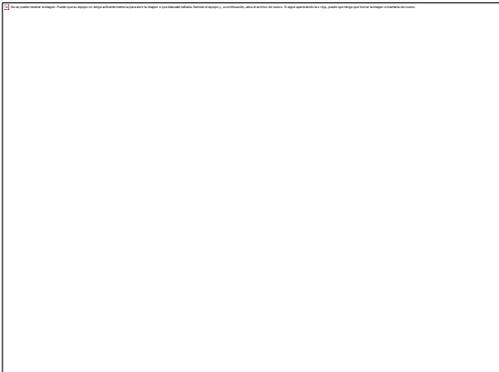
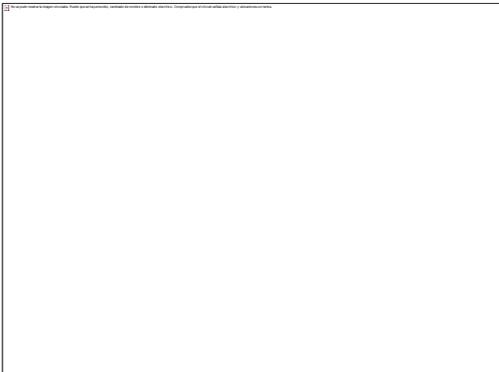
Component Name	Feature Name	Parameter Name	Current Value	Unit
DisMuñeca	Shell2	d21	3	mm

Reaction Force and Moment on Constraints

Constraint Name	Reaction Force		Reaction Moment	
	Magnitude	Component (X,Y,Z)	Magnitude	Component (X,Y,Z)
Fixed Constraint:1	70,6879 N	0 N	15,7585 N m	15,7585 N m
		70,6879 N		0 N m
		0 N		0 N m

☐☐ Result Summary

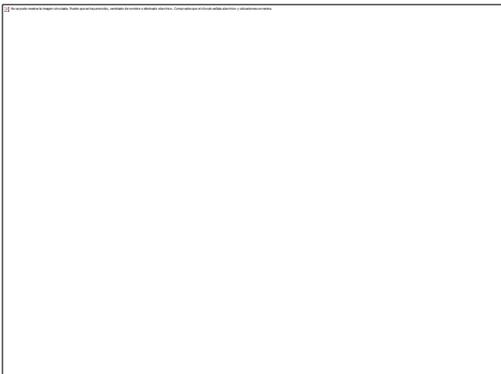
Name	Minimum	Maximum
Volume	129456 mm ³	
Mass	1,01752 kg	
Von Mises Stress	0,0128849 MPa	63,2127 MPa
1st Principal Stress	-27,586 MPa	94,5948 MPa
3rd Principal Stress	-84,2112 MPa	31,4651 MPa
Displacement	0 mm	0,115908 mm
Safety Factor	3,27466 ul	15 ul

☐☐ Figures**☐☐ Von Mises Stress****☐☐ 1st Principal Stress**

☐ Displacement



☐ Safety Factor



Reporte de Análisis – Diseño Muñeca “B”

Analyzed File:	DisMuñeca2.ipt
Autodesk Inventor Version:	2012 (Build 160160000, 160)
Creation Date:	20/01/2012, 17:32
Simulation Author:	Santiago Vaca
Summary:	

☐ **PROJECT INFO (IPROPERTIES)**

☐ *Summary*

Author	Santiago Vaca
--------	---------------

Project

Part Number	DisMuñeca2
Designer	Santiago Vaca
Cost	\$ 0,00
Date Created	16/01/2012

Physical

Material	Steel, Mild
Density	7,86 g/cm ³
Mass	0,476566 kg
Area	60215,1 mm ²
Volume	60631,8 mm ³
Center of Gravity	x=0 mm y=0 mm z=-23,2051 mm

Note: Physical values could be different from Physical values used by FEA reported below.

SIMULATION:1

General objective and settings:

Design Objective	Parametric Dimension
Simulation Type	Static Analysis
Last Modification Date	20/01/2012, 17:31
Detect and Eliminate Rigid Body Modes	No

Advanced settings:

Avg. Element Size (fraction of model diameter)	0,1
--	-----

Min. Element Size (fraction of avg. size)	0,2
Grading Factor	1,5
Max. Turn Angle	60 deg
Create Curved Mesh Elements	Yes

Parameter definition:

Component Name	Feature Name	Parameter Name	Values	Current Value	Unit
DisMuñeca2	Extrusion1	d1	2,3	2	mm

MATERIAL(S)

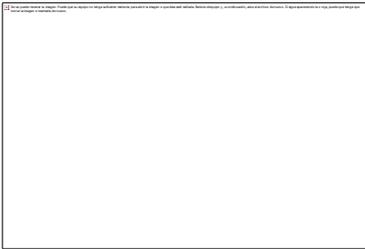
Name	Steel, Mild	
General	Mass Density	7,86 g/cm ³
	Yield Strength	207 MPa
	Ultimate Tensile Strength	345 MPa
Stress	Young's Modulus	220 GPa
	Poisson's Ratio	0,275 ul
	Shear Modulus	86,2745 GPa
Stress Thermal	Expansion Coefficient	0,000012 ul/c
	Thermal Conductivity	56 W/(m K)
	Specific Heat	460 J/(kg c)
Part Name(s)	DisMuñeca2	

OPERATING CONDITIONS**Gravity**

Load Type	Gravity
-----------	---------

Magnitude	9810,000 mm/s ²
Vector X	0,000 mm/s ²
Vector Y	-9810,000 mm/s ²
Vector Z	0,000 mm/s ²

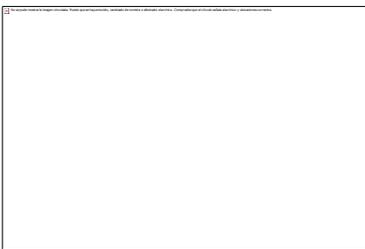
 Selected Face(s)



 **Force:1**

Load Type	Force
Magnitude	236,023 N
Vector X	0,000 N
Vector Y	-236,023 N
Vector Z	0,000 N

 Selected Face(s)

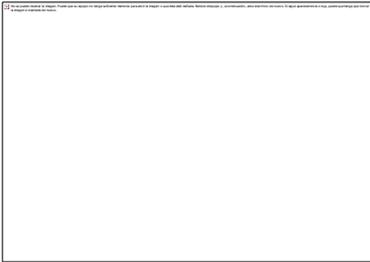


 **Moment:1**

Load Type	Moment
Magnitude	4209,621 N mm

Vector X	-4209,621 N mm
Vector Y	0,000 N mm
Vector Z	0,000 N mm

 Selected Face(s)



 **Fixed Constraint:1**

Constraint Type	Fixed Constraint
-----------------	------------------

 Selected Face(s)



 **RESULTS**

 **PARAMETRIC CONFIGURATION:1**

 **Parameter(s)**

Component Name	Feature Name	Parameter Name	Current Value	Unit
DisMuñeca2	Extrusion1	d1	2	mm

 **Reaction Force and Moment on Constraints**

Constraint Name	Reaction Force		Reaction Moment	
	Magnitude	Component (X,Y,Z)	Magnitude	Component (X,Y,Z)

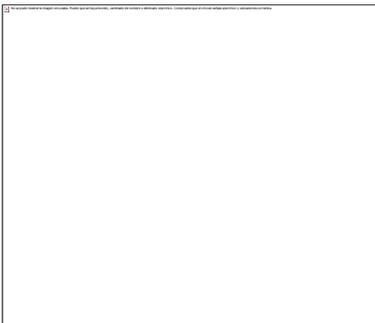
Fixed Constraint:1	240,698 N	0 N	21,3119 N m	21,3119 N m
		240,698 N		0 N m
		0 N		0 N m

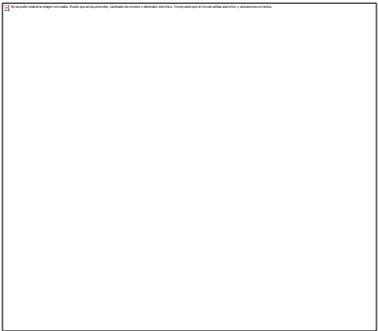
Result Summary

Name	Minimum	Maximum
Volume	60631,7 mm ³	
Mass	0,476565 kg	
Von Mises Stress	0,0176341 MPa	97,1938 MPa
1st Principal Stress	-5,99101 MPa	77,5604 MPa
3rd Principal Stress	-77,7049 MPa	5,80171 MPa
Displacement	0 mm	0,0261358 mm
Safety Factor	2,12976 ul	15 ul

Figures

Von Mises Stress



1st Principal Stress**Displacement****Safety Factor****PARAMETRIC CONFIGURATION:2****Parameter(s)**

Component Name	Feature Name	Parameter Name	Current Value	Unit
DisMuñeca2	Extrusion1	d1	3	mm

☐ *Reaction Force and Moment on Constraints*

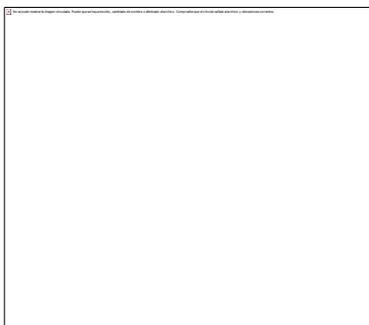
Constraint Name	Reaction Force		Reaction Moment	
	Magnitude	Component (X,Y,Z)	Magnitude	Component (X,Y,Z)
Fixed Constraint:1	242,826 N	0 N	21,3634 N m	21,3634 N m
		242,826 N		0 N m
		0 N		0 N m

☐ *Result Summary*

Name	Minimum	Maximum
Volume	88234 mm ³	
Mass	0,693519 kg	
Von Mises Stress	0,00835107 MPa	73,983 MPa
1st Principal Stress	-3,99938 MPa	49,0609 MPa
3rd Principal Stress	-49,7141 MPa	3,98516 MPa
Displacement	0 mm	0,0153828 mm
Safety Factor	2,79794 ul	15 ul

☐ *Figures*

☐ Von Mises Stress



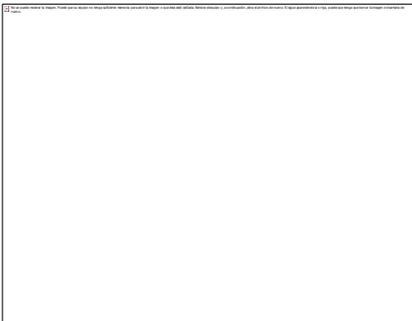
1st Principal Stress

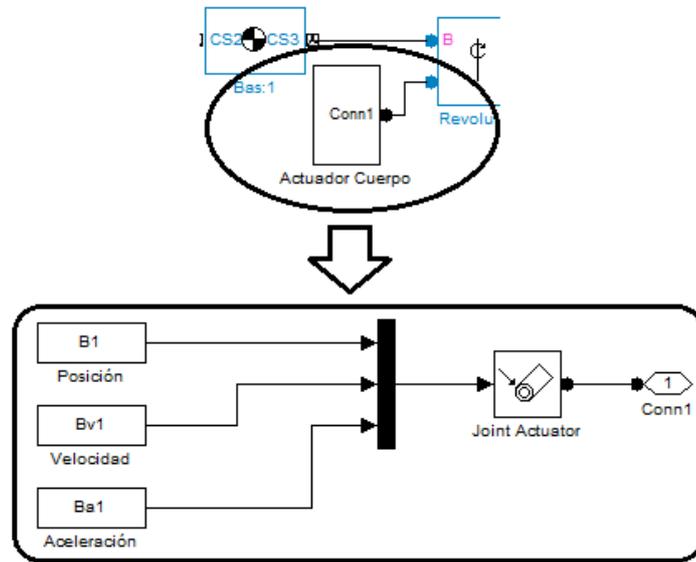


Displacement

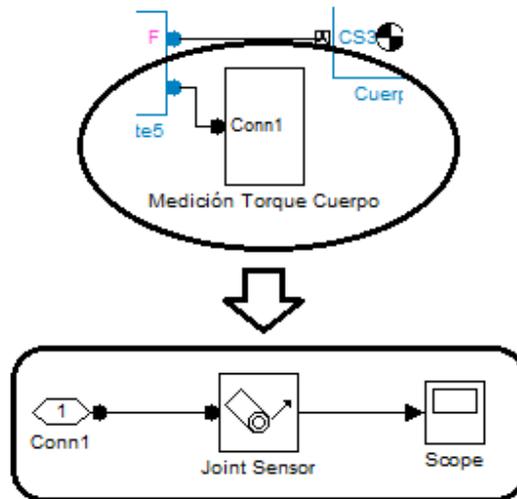


Safety Factor





Los bloques del sensor:



ANEXO 3

CODIGO DE PROGRAMACIÓN DE LA SIMULACIÓN EN MATLAB

Para la ventana de inicio de la simulación:

```
function varargout =
InicioSimulacion(varargin)
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',
mfilename, ...
                'gui_Singleton',
gui_Singleton, ...
                'gui_OpeningFcn',
@InicioSimulacion_OpeningFcn, ...
                'gui_OutputFcn',
@InicioSimulacion_OutputFcn, ...
                'gui_LayoutFcn', [] ,
...
                'gui_Callback', []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback =
str2func(varargin{1});
end
if nargout
    [varargout{1:nargout}] =
gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
```

```
function
InicioSimulacion_OpeningFcn(hObject,
eventdata, handles, varargin)
handles.output = hObject;
guidata(hObject, handles);
```

```
function varargout =
InicioSimulacion_OutputFcn(hObject,
eventdata, handles)
varargout{1} = handles.output;
```

```
function pushbutton1_Callback(hObject,
eventdata, handles)
close
run SimulacionLibre
```

```
function pushbutton2_Callback(hObject,
eventdata, handles)
close
run SimulacionPreestablecido
```

```
function pushbutton3_Callback(hObject,
eventdata, handles)
close
```

Para la ventana de Simulación Libre:

```
function varargout =
SimulacionLibre(varargin)
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',
mfilename, ...
                'gui_Singleton',
gui_Singleton, ...
                'gui_OpeningFcn',
@SimulacionLibre_OpeningFcn, ...
                'gui_OutputFcn',
@SimulacionLibre_OutputFcn, ...
                'gui_LayoutFcn', [] ,
...
                'gui_Callback', []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback =
str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] =
gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
```

```
end
function
SimulacionLibre_OpeningFcn(hObject,
eventdata, handles, varargin)
handles.output = hObject;
guidata(hObject, handles);
startup_rvc
open_system('EnsamblajePerfiles.mdl')
L1=Link([0 350 150 pi/2 0 0]);
L2=Link([0 0 550 0 0 0]);
L3=Link([0 0 100 pi/2 0 pi/2]);
L4=Link([0 410 0 -pi/2 0 0]);
L5=Link([0 0 0 pi/2 0 0]);
L6=Link([0 90 0 0 0 0]);
L1.m=str2num(get_param('EnsamblajePerfiles/
Cuerp:1','mass'));
L2.m=str2num(get_param('EnsamblajePerfiles/
EnsambleBrazo:1','mass'));
L3.m=str2num(get_param('EnsamblajePerfiles/
Antebraz:1','mass'));
L4.m=str2num(get_param('EnsamblajePerfiles/
DisMuñeca:1','mass'));
L5.m=str2num(get_param('EnsamblajePerfiles/
DisMuñeca2:1','mass'));
```

```

L6.m=str2num(get_param('EnsamblajePerfiles/
Portaherramienta:1','mass'));
L1.I=str2num(get_param('EnsamblajePerfiles/
Cuerp:1','inertia'));
L2.I=str2num(get_param('EnsamblajePerfiles/
EnsambleBrazo:1','inertia'));
L3.I=str2num(get_param('EnsamblajePerfiles/
Antebraz:1','inertia'));
L4.I=str2num(get_param('EnsamblajePerfiles/
DisMuñeca:1','inertia'));
L5.I=str2num(get_param('EnsamblajePerfiles/
DisMuñeca2:1','inertia'));
L6.I=str2num(get_param('EnsamblajePerfiles/
Portaherramienta:1','inertia'));
L1.r=[0.0354901,0.11888,0];
L2.r=[0.175,0,-0.073951];
L3.r=[0.067322,0.068282,0];
L4.r=[0.0814,0,0];
L5.r=[0.07521,0,0];
L6.r=[0.00765,0,0];
R=SerialLink([L1 L2 L3 L4 L5 L6]);
R.name=('RobTes');
A=imread('Ejes','bmp');
Img=image(A,'Parent',handles.axes1);
set(handles.axes1,'Visible','off','Ydir','r
everse','Xlim',...

get(Img,'Xdata'),'Ylim',get(Img,'YData'));
function varargout =
SimulacionLibre_OutputFcn(hObject,
eventdata, handles)
varargout{1} = handles.output;
function edit1_Callback(hObject, eventdata,
handles)
guidata(hObject,handles);
function edit1_CreateFcn(hObject,
eventdata, handles)
if ispc &&
isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
function edit2_Callback(hObject, eventdata,
handles)
guidata(hObject,handles);
function edit2_CreateFcn(hObject,
eventdata, handles)
if ispc &&
isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
function edit3_Callback(hObject, eventdata,
handles)
guidata(hObject,handles);
function edit3_CreateFcn(hObject,
eventdata, handles)
if ispc &&
isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
function edit4_Callback(hObject, eventdata,
handles)
guidata(hObject,handles);
function edit4_CreateFcn(hObject,
eventdata, handles)
if ispc &&
isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
function edit5_Callback(hObject, eventdata,
handles)
guidata(hObject,handles);
function edit5_CreateFcn(hObject,
eventdata, handles)
if ispc &&
isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
function edit6_Callback(hObject, eventdata,
handles)
guidata(hObject,handles);
function edit6_CreateFcn(hObject,
eventdata, handles)
if ispc &&
isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
function edit7_Callback(hObject, eventdata,
handles)
guidata(hObject,handles);
function edit7_CreateFcn(hObject,
eventdata, handles)
if ispc &&
isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
function edit8_Callback(hObject, eventdata,
handles)
guidata(hObject,handles);
function edit8_CreateFcn(hObject,
eventdata, handles)
if ispc &&
isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
function edit9_Callback(hObject, eventdata,
handles)
guidata(hObject,handles);
function edit9_CreateFcn(hObject,
eventdata, handles)
if ispc &&
isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
function pushbutton1_Callback(hObject,
eventdata, handles)
O1=deg2rad(str2num(get(handles.edit1,'strin
g')));
O2=deg2rad(str2num(get(handles.edit2,'strin
g')));
O3=deg2rad(str2num(get(handles.edit3,'strin
g')));
O4=deg2rad(str2num(get(handles.edit4,'strin
g')));
O5=deg2rad(str2num(get(handles.edit5,'strin
g')));
O6=deg2rad(str2num(get(handles.edit6,'strin
g')));
p0=[0 0 0 0 0 0];
p1=[O1,O2,O3,O4,O5,O6];
t=(0:0.02:5);
[q,qd,qdd]=jtraj(p0,p1,t);

```

```

B1(:,1)=(t);
B1(:,2)=q(:,1);
assignin('base','B1',B1)
Bv1(:,1)=(t);
Bv1(:,2)=qd(:,1);
assignin('base','Bv1',Bv1)
Ba1(:,1)=(t);
Ba1(:,2)=qdd(:,1);
assignin('base','Ba1',Ba1)
B2(:,1)=(t);
B2(:,2)=q(:,2);
assignin('base','B2',B2)
Bv2(:,1)=(t);
Bv2(:,2)=qd(:,2);
assignin('base','Bv2',Bv2)
Ba2(:,1)=(t);
Ba2(:,2)=qdd(:,2);
assignin('base','Ba2',Ba2)
B3(:,1)=(t);
B3(:,2)=q(:,3);
assignin('base','B3',B3)
Bv3(:,1)=(t);
Bv3(:,2)=qd(:,3);
assignin('base','Bv3',Bv3)
Ba3(:,1)=(t);
Ba3(:,2)=qdd(:,3);
assignin('base','Ba3',Ba3)
B4(:,1)=(t);
B4(:,2)=q(:,4);
assignin('base','B4',B4)
Bv4(:,1)=(t);
Bv4(:,2)=qd(:,4);
assignin('base','Bv4',Bv4)
Ba4(:,1)=(t);
Ba4(:,2)=qdd(:,4);
assignin('base','Ba4',Ba4)
B5(:,1)=(t);
B5(:,2)=q(:,5);
assignin('base','B5',B5)
Bv5(:,1)=(t);
Bv5(:,2)=qd(:,5);
assignin('base','Bv5',Bv5)
Ba5(:,1)=(t);
Ba5(:,2)=qdd(:,5);
assignin('base','Ba5',Ba5)
B6(:,1)=(t);
B6(:,2)=q(:,6);
assignin('base','B6',B6)
Bv6(:,1)=(t);
Bv6(:,2)=qd(:,6);
assignin('base','Bv6',Bv6)
Ba6(:,1)=(t);
Ba6(:,2)=qdd(:,6);
assignin('base','Ba6',Ba6)
sim('EnsamblajePerfiles.mdl')
function pushbutton2_Callback(hObject,
eventdata, handles)
startup_rvc
open_system('EnsamblajePerfiles.mdl')
L1=Link([0 0.350 0.150 pi/2 0 0]);
L2=Link([0 0 0.550 0 0 0]);
L3=Link([0 0 0.100 pi/2 0 pi/2]);
L4=Link([0 0 0.410 0 -pi/2 0 0]);
L5=Link([0 0 0 pi/2 0 0]);
L6=Link([0 0.090 0 0 0 0]);
L1.m=str2num(get_param('EnsamblajePerfiles/
Cuerp:1','mass'));
L2.m=str2num(get_param('EnsamblajePerfiles/
EnsambleBrazo:1','mass'));
L3.m=str2num(get_param('EnsamblajePerfiles/
Antebraz:1','mass'));
L4.m=str2num(get_param('EnsamblajePerfiles/
DisMuñeca:1','mass'));
L5.m=str2num(get_param('EnsamblajePerfiles/
DisMuñeca2:1','mass'));
L6.m=str2num(get_param('EnsamblajePerfiles/
Portaherramienta:1','mass'));
L1.I=str2num(get_param('EnsamblajePerfiles/
Cuerp:1','inertia'));
L2.I=str2num(get_param('EnsamblajePerfiles/
EnsambleBrazo:1','inertia'));
L3.I=str2num(get_param('EnsamblajePerfiles/
Antebraz:1','inertia'));
L4.I=str2num(get_param('EnsamblajePerfiles/
DisMuñeca:1','inertia'));
L5.I=str2num(get_param('EnsamblajePerfiles/
DisMuñeca2:1','inertia'));
L6.I=str2num(get_param('EnsamblajePerfiles/
Portaherramienta:1','inertia'));
L1.r=[0.0354901,0.11888,0];
L2.r=[0.175,0,-0.073951];
L3.r=[0.067322,0.068282,0];
L4.r=[0.0814,0,0];
L5.r=[0.07521,0,0];
L6.r=[0.00765,0,0];
R=SerialLink([L1 L2 L3 L4 L5 L6]);
R.name=('RobTes');
P1=str2num(get(handles.edit7,'string'));
P2=str2num(get(handles.edit8,'string'));
P3=str2num(get(handles.edit9,'string'));
ei=[1.200, .450, 0];
ef=[P1/1000,P3/1000,P2/1000];
t=0:.02:5;
T1=transl(ei);
T2=transl(ef);
q1=R.jtraj(T1,T2,t);
[q,qd,qdd]=jtraj(q1(1,:),q1(length(t),:),t)
;
B1(:,1)=(t);
B1(:,2)=q(:,1);
assignin('base','B1',B1)
Bv1(:,1)=(t);
Bv1(:,2)=qd(:,1);
assignin('base','Bv1',Bv1)
Ba1(:,1)=(t);
Ba1(:,2)=qdd(:,1);
assignin('base','Ba1',Ba1)
B2(:,1)=(t);
B2(:,2)=q(:,2);
assignin('base','B2',B2)
Bv2(:,1)=(t);
Bv2(:,2)=qd(:,2);
assignin('base','Bv2',Bv2)
Ba2(:,1)=(t);
Ba2(:,2)=qdd(:,2);
assignin('base','Ba2',Ba2)
B3(:,1)=(t);
B3(:,2)=q(:,3);
assignin('base','B3',B3)
Bv3(:,1)=(t);
Bv3(:,2)=qd(:,3);
assignin('base','Bv3',Bv3)
Ba3(:,1)=(t);
Ba3(:,2)=qdd(:,3);
assignin('base','Ba3',Ba3)
B4(:,1)=(t);
B4(:,2)=q(:,4);
assignin('base','B4',B4)
Bv4(:,1)=(t);

```

```

Bv4(:,2)=qd(:,4);
assignin('base','Bv4',Bv4)
Ba4(:,1)=(t);
Ba4(:,2)=qdd(:,4);
assignin('base','Ba4',Ba4)
B5(:,1)=(t);
B5(:,2)=q(:,5);
assignin('base','B5',B5)
Bv5(:,1)=(t);
Bv5(:,2)=qd(:,5);
assignin('base','Bv5',Bv5)
Ba5(:,1)=(t);
Ba5(:,2)=qdd(:,5);
assignin('base','Ba5',Ba5)
B6(:,1)=(t);
B6(:,2)=q(:,6);

assignin('base','B6',B6)
Bv6(:,1)=(t);
Bv6(:,2)=qd(:,6);
assignin('base','Bv6',Bv6)
Ba6(:,1)=(t);
Ba6(:,2)=qdd(:,6);
assignin('base','Ba6',Ba6)
sim('EnsamblajePerfiles.mdl')
function pushbutton4_Callback(hObject,
eventdata, handles)
close
function pushbutton5_Callback(hObject,
eventdata, handles)
close
run InicioSimulacion

```

Para la ventana de Simulación Preestablecida:

```

function varargout =
SimulacionPreestablecido(varargin)
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',
mfilename, ...
                'gui_Singleton',
gui_Singleton, ...
                'gui_OpeningFcn',
@SimulacionPreestablecido_OpeningFcn,
...
                'gui_OutputFcn',
@SimulacionPreestablecido_OutputFcn,
...
                'gui_LayoutFcn',
[] , ...
                'gui_Callback',
[]);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback =
str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] =
gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State,
varargin{:});
end
function
SimulacionPreestablecido_OpeningFcn(hO
bject, eventdata, handles, varargin)
handles.output = hObject;
guidata(hObject, handles);
startup_rvc
open_system('EnsamblajePerfiles.mdl')
L1=Link([0 0.350 0.150 pi/2 0 0]);
L2=Link([0 0 0.550 0 0 0]);
L3=Link([0 0 0.100 pi/2 0 pi/2]);
L4=Link([0 0.410 0 -pi/2 0 0]);
L5=Link([0 0 0 pi/2 0 0]);
L6=Link([0 0.090 0 0 0 0]);

L1.m=str2num(get_param('EnsamblajePerf
iles/Cuercp:1','mass'));
L2.m=str2num(get_param('EnsamblajePerf
iles/EnsambleBrazo:1','mass'));
L3.m=str2num(get_param('EnsamblajePerf
iles/Antebraz:1','mass'));
L4.m=str2num(get_param('EnsamblajePerf
iles/DisMuñeca:1','mass'));
L5.m=str2num(get_param('EnsamblajePerf
iles/DisMuñeca2:1','mass'));
L6.m=str2num(get_param('EnsamblajePerf
iles/Portaherramienta:1','mass'));
L1.I=str2num(get_param('EnsamblajePerf
iles/Cuercp:1','inertia'));
L2.I=str2num(get_param('EnsamblajePerf
iles/EnsambleBrazo:1','inertia'));
L3.I=str2num(get_param('EnsamblajePerf
iles/Antebraz:1','inertia'));
L4.I=str2num(get_param('EnsamblajePerf
iles/DisMuñeca:1','inertia'));
L5.I=str2num(get_param('EnsamblajePerf
iles/DisMuñeca2:1','inertia'));
L6.I=str2num(get_param('EnsamblajePerf
iles/Portaherramienta:1','inertia'));
L1.r=[0.0354901,0.11888,0];
L2.r=[0.175,0,-0.073951];
L3.r=[0.067322,0.068282,0];
L4.r=[0.0814,0,0];
L5.r=[0.07521,0,0];
L6.r=[0.00765,0,0];
R=SerialLink([L1 L2 L3 L4 L5 L6]);
R.name=('RobTes');
function varargout =
SimulacionPreestablecido_OutputFcn(hOb
ject, eventdata, handles)
varargout{1} = handles.output;
function pushbutton1_Callback(hObject,
eventdata, handles)
clear
t=0:.02:5;
Q1=deg2rad([26.57 -51.21 -49.57 0 0
0]);
Q2=deg2rad([-26.57 -50.37 -59.65 0 0
0]);

```

```

[q,qd,qdd]=jtraj(Q1,Q2,t);
B1(:,1)=(t);
B1(:,2)=q(:,1);
assignin('base','B1',B1)
Bv1(:,1)=(t);
Bv1(:,2)=qd(:,1);
assignin('base','Bv1',Bv1)
Ba1(:,1)=(t);
Ba1(:,2)=qdd(:,1);
assignin('base','Ba1',Ba1)
B2(:,1)=(t);
B2(:,2)=q(:,2);
assignin('base','B2',B2)
Bv2(:,1)=(t);
Bv2(:,2)=qd(:,2);
assignin('base','Bv2',Bv2)
Ba2(:,1)=(t);
Ba2(:,2)=qdd(:,2);
assignin('base','Ba2',Ba2)
B3(:,1)=(t);
B3(:,2)=q(:,3);
assignin('base','B3',B3)
Bv3(:,1)=(t);
Bv3(:,2)=qd(:,3);
assignin('base','Bv3',Bv3)
Ba3(:,1)=(t);
Ba3(:,2)=qdd(:,3);
assignin('base','Ba3',Ba3)
B4(:,1)=(t);
B4(:,2)=q(:,4);
assignin('base','B4',B4)
Bv4(:,1)=(t);
Bv4(:,2)=qd(:,4);
assignin('base','Bv4',Bv4)
Ba4(:,1)=(t);
Ba4(:,2)=qdd(:,4);
assignin('base','Ba4',Ba4)
B5(:,1)=(t);
B5(:,2)=q(:,5);
assignin('base','B5',B5)
Bv5(:,1)=(t);
Bv5(:,2)=qd(:,5);
assignin('base','Bv5',Bv5)
Ba5(:,1)=(t);
Ba5(:,2)=qdd(:,5);
assignin('base','Ba5',Ba5)
B6(:,1)=(t);
B6(:,2)=q(:,6);
assignin('base','B6',B6)
Bv6(:,1)=(t);
Bv6(:,2)=qd(:,6);
assignin('base','Bv6',Bv6)
Ba6(:,1)=(t);
Ba6(:,2)=qdd(:,6);
assignin('base','Ba6',Ba6)
sim('EnsamblajePerfiles.mdl')
function pushbutton5_Callback(hObject,
eventdata, handles)
clear
P1=deg2rad([5.71 15.17 98.23 0 0 0]);
P2=deg2rad([-5.71 15.17 98.23 0 0 0]);
t=0:.02:5;

```

```

[q,qd,qdd]=jtraj(P1,P2,t);
B1(:,1)=(t);
B1(:,2)=q(:,1);
assignin('base','B1',B1)
Bv1(:,1)=(t);
Bv1(:,2)=qd(:,1);
assignin('base','Bv1',Bv1)
Ba1(:,1)=(t);
Ba1(:,2)=qdd(:,1);
assignin('base','Ba1',Ba1)
B2(:,1)=(t);
B2(:,2)=q(:,2);
assignin('base','B2',B2)
Bv2(:,1)=(t);
Bv2(:,2)=qd(:,2);
assignin('base','Bv2',Bv2)
Ba2(:,1)=(t);
Ba2(:,2)=qdd(:,2);
assignin('base','Ba2',Ba2)
B3(:,1)=(t);
B3(:,2)=q(:,3);
assignin('base','B3',B3)
Bv3(:,1)=(t);
Bv3(:,2)=qd(:,3);
assignin('base','Bv3',Bv3)
Ba3(:,1)=(t);
Ba3(:,2)=qdd(:,3);
assignin('base','Ba3',Ba3)
B4(:,1)=(t);
B4(:,2)=q(:,4);
assignin('base','B4',B4)
Bv4(:,1)=(t);
Bv4(:,2)=qd(:,4);
assignin('base','Bv4',Bv4)
Ba4(:,1)=(t);
Ba4(:,2)=qdd(:,4);
assignin('base','Ba4',Ba4)
B5(:,1)=(t);
B5(:,2)=q(:,5);
assignin('base','B5',B5)
Bv5(:,1)=(t);
Bv5(:,2)=qd(:,5);
assignin('base','Bv5',Bv5)
Ba5(:,1)=(t);
Ba5(:,2)=qdd(:,5);
assignin('base','Ba5',Ba5)
B6(:,1)=(t);
B6(:,2)=q(:,6);
assignin('base','B6',B6)
Bv6(:,1)=(t);
Bv6(:,2)=qd(:,6);
assignin('base','Bv6',Bv6)
Ba6(:,1)=(t);
Ba6(:,2)=qdd(:,6);
assignin('base','Ba6',Ba6)
sim('EnsamblajePerfiles.mdl')
function pushbutton6_Callback(hObject,
eventdata, handles)
clear
P1=deg2rad([6.34 -64.88 -113.19 0 -
48.31 0]);

```

```

P2=deg2rad([-6.34 -64.88 -113.19 0 -
48.31 0]);
t=0:.02:5;
[q,qd,qdd]=jtraj(P1,P2,t);
B1(:,1)=(t);
B1(:,2)=q(:,1);
assignin('base','B1',B1)
Bv1(:,1)=(t);
Bv1(:,2)=qd(:,1);
assignin('base','Bv1',Bv1)
Ba1(:,1)=(t);
Ba1(:,2)=qdd(:,1);
assignin('base','Ba1',Ba1)
B2(:,1)=(t);
B2(:,2)=q(:,2);
assignin('base','B2',B2)
Bv2(:,1)=(t);
Bv2(:,2)=qd(:,2);
assignin('base','Bv2',Bv2)
Ba2(:,1)=(t);
Ba2(:,2)=qdd(:,2);
assignin('base','Ba2',Ba2)
B3(:,1)=(t);
B3(:,2)=q(:,3);
assignin('base','B3',B3)
Bv3(:,1)=(t);
Bv3(:,2)=qd(:,3);
assignin('base','Bv3',Bv3)
Ba3(:,1)=(t);
Ba3(:,2)=qdd(:,3);
assignin('base','Ba3',Ba3)
B4(:,1)=(t);
B4(:,2)=q(:,4);
assignin('base','B4',B4)
Bv4(:,1)=(t);
Bv4(:,2)=qd(:,4);
assignin('base','Bv4',Bv4)
Ba4(:,1)=(t);
Ba4(:,2)=qdd(:,4);
assignin('base','Ba4',Ba4)
B5(:,1)=(t);
B5(:,2)=q(:,5);
assignin('base','B5',B5)
Bv5(:,1)=(t);
Bv5(:,2)=qd(:,5);
assignin('base','Bv5',Bv5)
Ba5(:,1)=(t);
Ba5(:,2)=qdd(:,5);
assignin('base','Ba5',Ba5)
B6(:,1)=(t);
B6(:,2)=q(:,6);
assignin('base','B6',B6)
Bv6(:,1)=(t);
Bv6(:,2)=qd(:,6);
assignin('base','Bv6',Bv6)
Ba6(:,1)=(t);
Ba6(:,2)=qdd(:,6);
assignin('base','Ba6',Ba6)
sim('EnsamblajePerfiles.mdl')
pause
P1=P2;

```

```

P2=deg2rad([-6.34 -55.58 -117.34 0 -
61.75 0]);
[q,qd,qdd]=jtraj(P1,P2,t);
B1(:,1)=(t);
B1(:,2)=q(:,1);
assignin('base','B1',B1)
Bv1(:,1)=(t);
Bv1(:,2)=qd(:,1);
assignin('base','Bv1',Bv1)
Ba1(:,1)=(t);
Ba1(:,2)=qdd(:,1);
assignin('base','Ba1',Ba1)
B2(:,1)=(t);
B2(:,2)=q(:,2);
assignin('base','B2',B2)
Bv2(:,1)=(t);
Bv2(:,2)=qd(:,2);
assignin('base','Bv2',Bv2)
Ba2(:,1)=(t);
Ba2(:,2)=qdd(:,2);
assignin('base','Ba2',Ba2)
B3(:,1)=(t);
B3(:,2)=q(:,3);
assignin('base','B3',B3)
Bv3(:,1)=(t);
Bv3(:,2)=qd(:,3);
assignin('base','Bv3',Bv3)
Ba3(:,1)=(t);
Ba3(:,2)=qdd(:,3);
assignin('base','Ba3',Ba3)
B4(:,1)=(t);
B4(:,2)=q(:,4);
assignin('base','B4',B4)
Bv4(:,1)=(t);
Bv4(:,2)=qd(:,4);
assignin('base','Bv4',Bv4)
Ba4(:,1)=(t);
Ba4(:,2)=qdd(:,4);
assignin('base','Ba4',Ba4)
B5(:,1)=(t);
B5(:,2)=q(:,5);
assignin('base','B5',B5)
Bv5(:,1)=(t);
Bv5(:,2)=qd(:,5);
assignin('base','Bv5',Bv5)
Ba5(:,1)=(t);
Ba5(:,2)=qdd(:,5);
assignin('base','Ba5',Ba5)
B6(:,1)=(t);
B6(:,2)=q(:,6);
assignin('base','B6',B6)
Bv6(:,1)=(t);
Bv6(:,2)=qd(:,6);
assignin('base','Bv6',Bv6)
Ba6(:,1)=(t);
Ba6(:,2)=qdd(:,6);
assignin('base','Ba6',Ba6)
sim('EnsamblajePerfiles.mdl')
pause
P1=P2;
P2=deg2rad([6.34 -55.58 -117.34 0 -
61.75 0]);

```

```

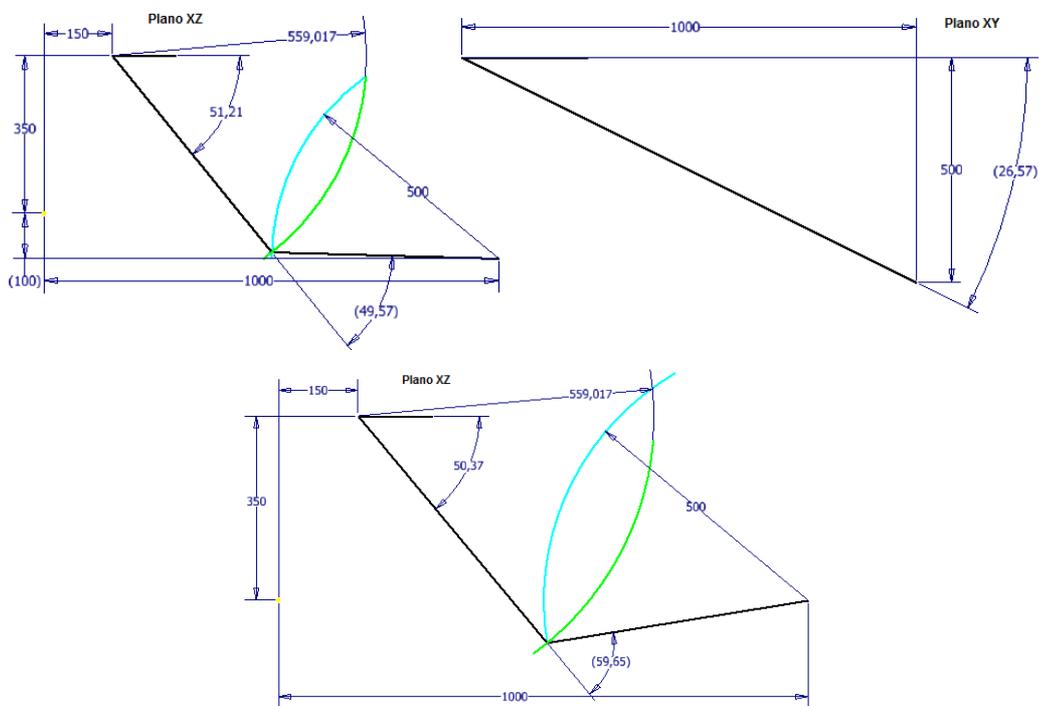
[q,qd,qdd]=jtraj(P1,P2,t);
B1(:,1)=(t);
B1(:,2)=q(:,1);
assignin('base','B1',B1)
Bv1(:,1)=(t);
Bv1(:,2)=qd(:,1);
assignin('base','Bv1',Bv1)
Ba1(:,1)=(t);
Ba1(:,2)=qdd(:,1);
assignin('base','Ba1',Ba1)
B2(:,1)=(t);
B2(:,2)=q(:,2);
assignin('base','B2',B2)
Bv2(:,1)=(t);
Bv2(:,2)=qd(:,2);
assignin('base','Bv2',Bv2)
Ba2(:,1)=(t);
Ba2(:,2)=qdd(:,2);
assignin('base','Ba2',Ba2)
B3(:,1)=(t);
B3(:,2)=q(:,3);
assignin('base','B3',B3)
Bv3(:,1)=(t);
Bv3(:,2)=qd(:,3);
assignin('base','Bv3',Bv3)
Ba3(:,1)=(t);
Ba3(:,2)=qdd(:,3);
assignin('base','Ba3',Ba3)
B4(:,1)=(t);
B4(:,2)=q(:,4);
assignin('base','B4',B4)
Bv4(:,1)=(t);
Bv4(:,2)=qd(:,4);
assignin('base','Bv4',Bv4)
Ba4(:,1)=(t);
Ba4(:,2)=qdd(:,4);
assignin('base','Ba4',Ba4)
B5(:,1)=(t);
B5(:,2)=q(:,5);
assignin('base','B5',B5)
Bv5(:,1)=(t);
Bv5(:,2)=qd(:,5);
assignin('base','Bv5',Bv5)
Ba5(:,1)=(t);
Ba5(:,2)=qdd(:,5);
assignin('base','Ba5',Ba5)
B6(:,1)=(t);
B6(:,2)=q(:,6);
assignin('base','B6',B6)
Bv6(:,1)=(t);
Bv6(:,2)=qd(:,6);
assignin('base','Bv6',Bv6)
Ba6(:,1)=(t);
Ba6(:,2)=qdd(:,6);
assignin('base','Ba6',Ba6)
sim('EnsamblajePerfiles.mdl')
function pushbutton8_Callback(hObject,
 eventdata, handles)
close
function pushbutton9_Callback(hObject,
 eventdata, handles)
close
open InicioSimulacion.fig

```

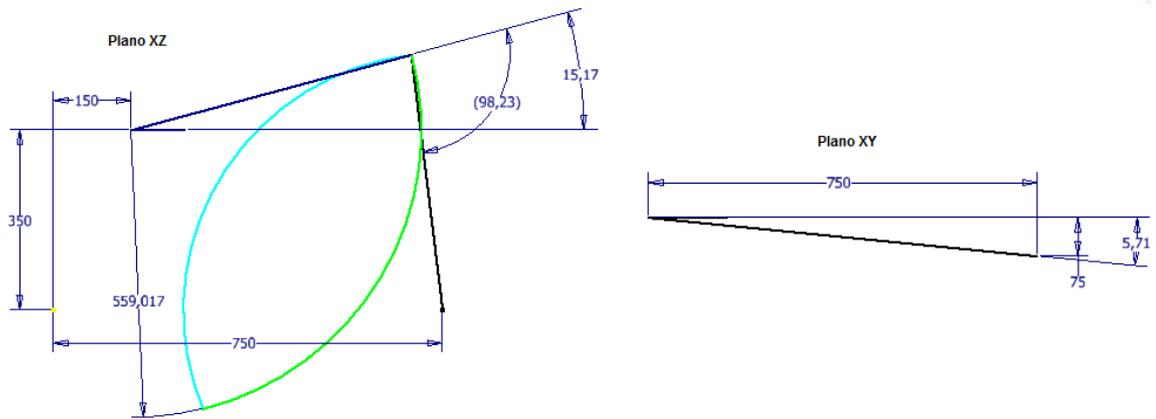
ANEXO 4

SOLUCIÓN GRÁFICA DE ÁNGULOS PARA SIMULACIÓN

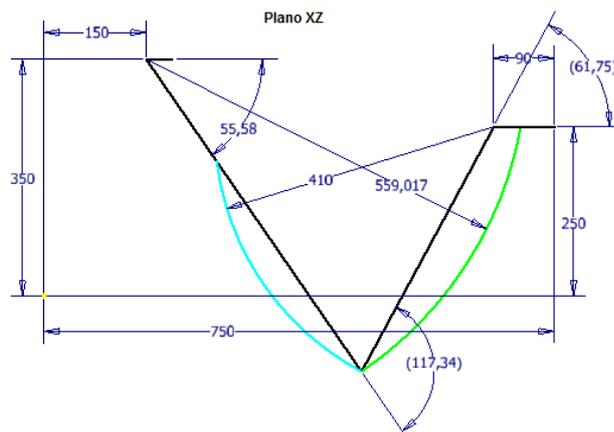
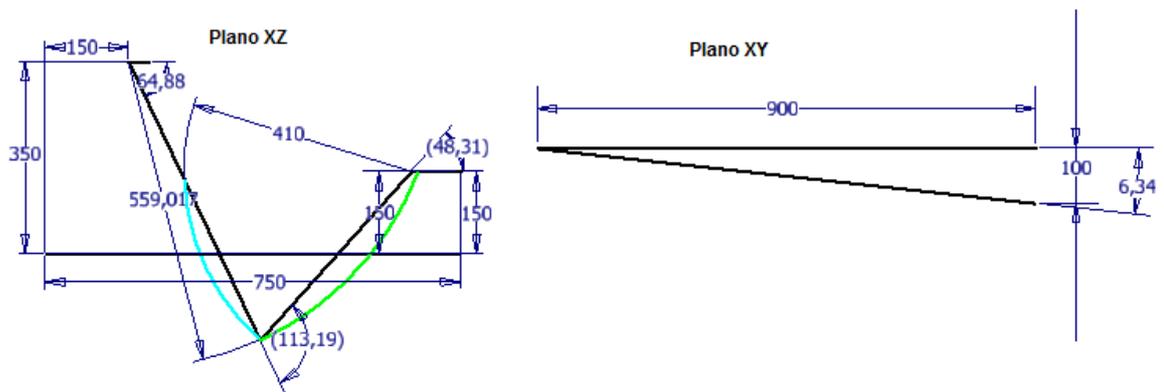
Para el movimiento de una masa:



Para la soldadura de una placa:



Para la pintura de una superficie rectangular:



ANEXO 5

TABLA DE SELECCIÓN DE SERVOMOTORES Y SUS RESPECTIVOS REDUCTORES

© Siemens AG 2010

Servomotors

Geared servomotors for SINAMICS S120

1FK7 motors with SP+ planetary gearbox

Selection and ordering data

Motor Type	Planetary gearbox two-stage		Available gear ratio $i =$					Motor speed, max. S3-60 % n_{G1} (n_1) rpm	Output torque, max. S3-60 % M_{G2} (T_{2B}) Nm (lb _f -ft)	Radial output shaft loading, max. ¹⁾ F_r (F_{2Rmax}) N (lb _f)	Axial output shaft loading, max. ¹⁾ F_a (F_{2Amax}) N (lb _f)	
			16	20	28	40	50					
1FK7022	SP 060S-MF2	≤ 6	2 (4.41)	✓	✓	✓	–	–	6000	40 (29.5)	2700 (607)	2400 (540)
1FK7032				✓	✓	–	–	–				
1FK7033				✓	✓	–	–	–				
1FK7022	SP 075S-MF2	≤ 6	3.6 (7.9)	–	–	–	✓	✓	6000	110 (81.1)	4000 (899)	3350 (753)
1FK7032				–	–	✓	✓	✓				
1FK7033				–	–	✓	✓	✓				
1FK7034				✓	✓	✓	–	–				
1FK7040				✓	✓	✓	–	–				
1FK7042				✓	✓	–	–	–				
1FK7043				✓	–	–	–	–				
1FK7034	SP 100S-MF2	≤ 5	7.9 (17.4)	–	–	–	✓	✓	4500	300 (221)	6300 (1416)	2400 (540)
1FK7040				–	–	–	✓	✓				
1FK7042				–	–	✓	✓	✓				
1FK7043				–	✓	✓	✓	✓				
1FK7044				✓	✓	✓	✓	–				
1FK7060				✓	✓	✓	–	–				
1FK7061	✓	✓	–	–	–							
1FK7062	✓	✓	–	–	–							
1FK7044	SP 140S-MF2	≤ 5	17 (37.5)	–	–	–	–	✓	4000	600 (442)	9450 (2124)	9870 (2219)

ANEXO 6

PLANOS DE LA GEOMETRÍA DEL ROBOT MANIPULADOR