

PROYECTO TERMINAL DE INGENIERÍA MECÁNICA



**UNIVERSIDAD
AUTÓNOMA
METROPOLITANA**

**DISEÑO, MANUFACTURA Y PROGRAMACIÓN
DE UN ROBOT ANTROPOMÓRFICO EN UN
ALCANCE DE PROTOTIPO DIDÁCTICO**

Alumnos:

**Soriano Colín Germán
Valencia Ramos Jhonatan**

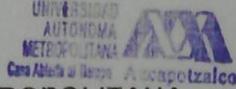
Asesor:

Ing. Romy Pérez Moreno

Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico



Casa Abierta al Tiempo
UNIVERSIDAD AUTONOMA METROPOLITANA



UNIVERSIDAD AUTONOMA METROPOLITANA
Casa Abierta al Tiempo Azcapotzalco

PT01
(Original y cuatro tantos)

SOLICITUD DE AUTORIZACION DE PROYECTO(S) TERMINAL(ES) **7010-BTC-7-PH-12-11** CLAVE(S): **113351 y 113352**

Soriano Colín Germán	206307038
NOMBRE DEL ALUMNO	MATRICULA

Ingeniería Mecánica	08/12/2010	Ing. Romy Pérez Moreno	Energía
Carrera	Fecha	Asesor	Departamento

Nombre del proyecto:

“Diseño, manufactura y programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico”

Objetivos del proyecto:

- Objetivo general:
 - Desarrollar la configuración para construir, controlar y programar un robot didáctico con estructura antropomórfica capaz de trasladar su extremo entre dos puntos definidos por el usuario.
- Objetivos específicos:
 - Realizar el diseño y optimización de una estructura antropomórfica cuyos eslabones puedan ser desplazados rotacionalmente por los servomotores disponibles para el proyecto.
 - Manufacturar la estructura con los materiales más idóneos que permitan reducir el peso sin perder rigidez en la estructura.
 - Desarrollar un programa gráfico en computadora que realice la solución de la cinemática inversa partiendo de la cinemática directa para controlar la movilidad del robot.
 - Diseñar las interfaces electrónicas necesarias para la comunicación del robot con el programa de la computadora mediante un puerto USB.

Antecedentes del proyecto:

En la actualidad en la UAM Azcapotzalco se han realizado proyectos terminales relacionados con este proyecto, algunos de ellos son: "Proyecto robot manipulador actuado hidráulicamente de 3 GDL", "Brazo mecánico automatizado por una computadora", etc., en los cuales se han enfocado los conocimientos tanto de la carrera de ingeniería mecánica como de electrónica respectivamente. Los proyectos de mecánica están enfocados al diseño, manufactura y a proporcionar movimiento a partir de un accionamiento mecánico y los proyectos de electrónica se enfocan más a la parte de programación.

A diferencia de los proyectos ya realizados en la UAM-A, éste proyecto combinará las disciplinas de Mecánica y Electrónica para tener un prototipo mejor diseñado en cuanto a estructura y programación del mismo.

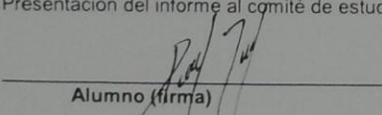
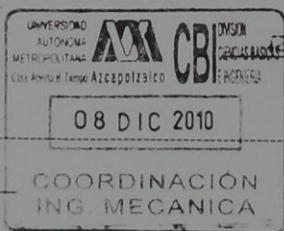
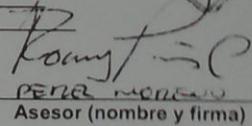
Descripción técnica:

Al finalizar el proyecto, contará con las siguientes características: podrá trasladar un objeto de peso no mayor a 100gr; tendrá una posición precisa de su extremo, que será definida por el usuario; el espacio de trabajo será de forma hemisférica; contará con 4 eslabones y 5 GDL (*Grado de libertad*); realizará trayectorias rectas u oblicuas al pasar su extremo de un punto a otro.

Fechas importantes

Entrega del informe parcial o final al asesor: 11ª semana del trimestre 11-P

Presentación del informe al comité de estudios: 11ª semana del trimestre 11-P

 Alumno (firma)		 Asesor (nombre y firma)
---	---	---

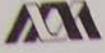
ANEXOS: Plan de trabajo

M. en C. Arturo Lizardi Ramos Coordinador de estudios	08/12/2010 Fecha
--	---------------------

Original: Coordinación de sistemas escolares
 Copia 1: Coordinador de estudios
 Copia 2: Departamento correspondiente
 Copia 3: Asesor
 Copia 4: Interesado

UNIDAD AZCAPOTZALCO
 DIVISIÓN DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA
 Av. San Pablo 180, Col. Reynosa Tamulipas. 02200 México, D.F. Apdo. Postal 16-306 02000 México, D.F. Tel: 5318 9060

Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico



Casa Abierta al Tiempo
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA
Casa Abierta al Tiempo Azcapotzalco

PT01
(Original y cuatro tantos)

SOLICITUD DE AUTORIZACION DE PROYECTO(S) TERMINAL(ES) I y II CLAVE(S): 113351 y 113352

VALENCIA RAMOS JHONATAN	207303435
NOMBRE DEL ALUMNO	MATRICULA

Ingeniería Mecánica	08/12/2010	Ing. Romy Pérez Moreno	Energía
Carrera	Fecha	Asesor	Departamento

Nombre del proyecto:
"Diseño, manufactura y programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico"

Objetivos del proyecto:

- Objetivo general:
 - Desarrollar la configuración para construir, controlar y programar un robot didáctico con estructura antropomórfica capaz de trasladar su extremo entre dos puntos definidos por el usuario.
- Objetivos específicos:
 - Realizar el diseño y optimización de una estructura antropomórfica cuyos eslabones puedan ser desplazados rotacionalmente por los servomotores disponibles para el proyecto.
 - Manufacturar la estructura con los materiales más idóneos que permitan reducir el peso sin perder rigidez en la estructura.
 - Desarrollar un programa gráfico en computadora que realice la solución de la cinemática inversa partiendo de la cinemática directa para controlar la movilidad del robot.
 - Diseñar las interfaces electrónicas necesarias para la comunicación del robot con el programa de la computadora mediante un puerto USB.

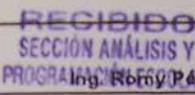
Antecedentes del proyecto:
En la actualidad en la UAM Azcapotzalco se han realizado proyectos terminales relacionados con este proyecto, algunos de ellos son: "Proyecto robot manipulador actuado hidráulicamente de 3 GDL", "Brazo mecánico automatizado por una computadora", etc., en los cuales se han enfocado los conocimientos tanto de la carrera de ingeniería mecánica como de electrónica respectivamente. Los proyectos de mecánica están enfocados al diseño, manufactura y a proporcionar movimiento a partir de un accionamiento mecánico y los proyectos de electrónica se enfocan más a la parte de programación.

A diferencia de los proyectos ya realizados en la UAM-A, éste proyecto combinará las disciplinas de Mecánica y Electrónica para tener un prototipo mejor diseñado en cuanto a estructura y programación del mismo.

Descripción técnica:
Al finalizar el proyecto, contará con las siguientes características: podrá trasladar un objeto de peso no mayor a 100gr; tendrá una posición precisa de su extremo, que será definida por el usuario; el espacio de trabajo será de forma semiesférica; contará con 4 eslabones y 5 GDL (Grado de libertad); realizará trayectorias rectas u oblicuas al pasar su extremo de un punto a otro.

Fechas importantes
Entrega del informe parcial o final al asesor: 11ª semana del trimestre 11-P
Presentación del informe al comité de estudios: 11ª semana del trimestre 11-P

Alumno (firma) _____



7010-DIC-07-PT01-1 y II

Asesor (nombre y firma) Romy Pérez Moreno

ANEXOS: Plan de trabajo

M. en C. Arturo Lizardi Ramos
Coordinador de estudios



08 DIC 2010

08/12/2010
Fecha

Original: Coordinación de sistemas escolares
Copia 1: Coordinador de estudios
Copia 4: Interesado
UNIDAD AZCAPOTZALCO
DIVISIÓN DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA
Av. San Pablo 180, Col. Reynosa Tamaulipas. 02200 México, D.F. Apdo. Postal 16-306 02000 México, D.F. Tel: 5318 9060

Copia 2: Departamento correspondiente
Copia 3: Asesor

Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

DEDICATORIAS Y AGRADECIMIENTOS

"Nunca consideres el estudio como una obligación, sino como una oportunidad para penetrar en el bello y maravilloso mundo del saber".

Albert Einstein

¡Estudia! No para saber una cosa más, sino para saberla mejor.

Lucio Anneo Séneca

"El conocimiento se aprende por medio del estudio. La sabiduría por medio de la observación".

F. López

"La paciencia surge de la comprensión"

Anónimo

Este gran logro está dedicado a las personas que incondicionalmente han estado conmigo en todo momento, por su amistad, ánimo y compañía en las diferentes etapas de mi vida. Algunas aún están aquí conmigo y otras sólo en mis recuerdos. Pero sin importar en donde estén, quiero decirles gracias por todo lo que me han brindado de manera incondicional.

A la mejor madre del mundo: Alicia, por cuidarme y apoyarme en todo, por la comprensión, paciencia y cariño que me has dado. Tú eres la inspiración para lograr mis metas.

A mi padre: Epifanio, por todo el apoyo que me ha entregado en cada momento. Por enseñarme a ser independiente en la vida.

A mi hermano Omar y a mi hermana Valeria, por estar siempre al pendiente de mí, por hacerme sonreír cuando lo necesito y por estar siempre a mi lado.

A mis grandes amigos, sin olvidar a alguno, por su compañía y apoyo sin esperar nada a cambio, en especial a mi amigo y colaborador Jhonatan, por la paciencia que me tuvo al realizar este proyecto.

A todos mis profesores no solo de la carrera, sino de toda la vida, por la confianza que han tenido en mí, por sus consejos y enseñanzas. Particularmente al profesor Romy por todo el apoyo brindado para hacer posible este proyecto.

A todos... Gracias!!!

Germán Soriano Colín

Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

Agradecimientos

Cuando intentamos hacer las cosas adecuadamente y no resultan como uno espera, la motivación y autoestima comienza a tomar un declive. Vasta con sentir el apoyo de las personas que nos rodean o con tan solo unas palabras de aliento para darte ánimos para continuar intentándolo.

Quiero agradecer a mis padres, quienes me han apoyado en mi formación académica y en cada etapa de mi vida, ese apoyo incondicional que me ha hecho llegar al término de mi carrera profesional, que es para mí la mejor herencia; sólo esperando que comprendan que mis ideales y esfuerzos son inspirados en ustedes.

Agradezco de todo corazón a mis abuelos y a toda mi familia que siempre me ha brindado su apoyo, sé que una palabra de aliento vale más que mil monedas, esas palabras que me han hecho reflexionar y seguir luchando por lograr mis objetivos y metas de mi vida.

Hoy culmina un triunfo más, otro objetivo más logrado, otra meta alcanzada, espero que Dios nos preste vida, a mí, a mis padres que son el tesoro más valioso me ha heredado y a todas las personas que creen en mí para que pueda entregarles más triunfos.

Gracias por guiar mi vida con energía, esto ha hecho que sea lo que soy.

Con amor, admiración y respeto.

¡¡GRACIAS!!

Dedicatorias

Cuando nací mi padre aplaudía mis últimos logros. Cuando me hacía mayor, me enseñaba la diferencia entre el bien y el mal. De adolescente era la autoridad que ponía límites a mis deseos.

Ahora que soy adulto, es el mejor consejero y amigo que tengo.

Gracias papá, por cuidarme siempre, por ser mi guía, mi horizonte, mi límite ante los excesos, mi amigo y mi mejor consejero, y sobretodo, por darme la oportunidad de ser tu hijo.

Me diste tus noches y también tu amor ¡cuán poco te he dado por tanto favor!

Si pudiera decirte lo que siente mi alma, tus lágrimas brotarían sin pena, pero con calma.

Me diste la vida sin nada a cambio, hoy quisiera darte el fruto de tu trabajo madre.

Jhonatan Valencia Ramos

Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

RESUMEN GENERAL

El presente proyecto combina las disciplinas de Ingeniería Mecánica e Ingeniería Electrónica que busca desarrollar el prototipo de una máquina industrial de uso didáctico.

Como objetivo principal se busca, manufacturar el modelo del diseño funcional de la estructura del robot; programar el análisis cinemático del robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico, que sea capaz de trasladar su extremo entre dos puntos definidos por el usuario.

La investigación inicia estudiando los fundamentos de la robótica y sus aplicaciones, con la finalidad de tener claros los conceptos de robótica y las características generales de los robots.

La determinación de la estructura mecánica y el diseño funcional se realiza con ayuda del software SolidWorks. De acuerdo a los diseños propuestos de la estructura, se manufacturaron con ayuda de las máquinas-herramienta y se ensamblaron los componentes que conforman a cada sistema. De las estructuras anteriores se eligió la que conservó mayor rigidez.

Por otra parte, se hace el análisis cinemático con ayuda del software de MATLAB, el toolbox de robótica y la matemática simbólica de MATLAB para encontrar la solución al problema cinemático inverso. A partir de esta solución se utilizó el lenguaje de programación C para verificar la solución de la cinemática inversa. Durante este análisis se aplicó el algoritmo de Denavit-Hartenberg.

Asimismo se utiliza el software de Visual Basic 6.0 para nuevamente programar la solución de la cinemática inversa, con la finalidad de tener una interfaz gráfica donde el usuario pueda interactuar con el robot.

Finalmente, se diseñó la interfaz electrónica de comunicación USB, computadora-robot utilizando como emisor de datos la interfaz gráfica diseñada en Visual Basic.

Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

OBJETIVOS

- Objetivo general:
 - Desarrollar la tecnología para construir, controlar y programar un robot didáctico con estructura antropomórfica capaz de trasladar su extremo entre dos puntos definidos por el usuario.
- Objetivos específicos:
 - Realizar el diseño y la optimización de una estructura antropomórfica que pueda ser desplazada con los servomotores disponibles en el proyecto.
 - Manufacturar la estructura con los materiales más idóneos que permitan reducir el peso sin perder rigidez de la estructura.
 - Desarrollar un programa gráfico en computadora que realice la solución de la cinemática inversa para controlar la movilidad del robot entre dos puntos dados.
 - Diseñar las interfaces electrónicas necesarias para la comunicación del robot con el programa de la computadora mediante un puerto USB.

Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

RESUMEN GENERAL	V
OBJETIVOS	VI

ÍNDICE GENERAL

CAPITULO 1. FUNDAMENTOS DE LA ROBÓTICA INDUSTRIAL	1
1.1 RESEÑA HISTÓRICA	1
1.2 ORIGEN Y DESARROLLO DE LA ROBÓTICA	2
1.3 DEFINICIÓN DE LA ROBÓTICA	5
1.4 OBJETIVOS DE LA ROBÓTICA INDUSTRIAL	5
1.5 DEFINICIÓN DE UN ROBOT INDUSTRIAL	6
1.6 CLASIFICACIÓN DE UN ROBOT INDUSTRIAL	8
1.7 GRADOS DE LIBERTAD DE UN ROBOT	16
1.8 APLICACIONES INDUSTRIALES DE LOS ROBOTS	17
CAPÍTULO 2. MORFOLOGÍA DE UN ROBOT INDUSTRIAL	26
2.1 ESTRUCTURA MECÁNICA	26
2.2 ARTICULACIONES Y ESLABONES	26
2.3 REDUCTORES	27
2.4 ACTUADORES	27
2.5 ELEMENTOS TERMINALES	28
CAPÍTULO 3. CONSTRUCCIÓN DEL ROBOT	30
3.1 DISEÑO DE LA ESTRUCTURA	30
3.2 PLANOS DEL ROBOT	40
3.3 ENSAMBLE DEL ROBOT	57
3.4 CARGA MAXIMA PARA EL ROBOT	61
CAPÍTULO 4. ALGORITMO DE DENAVIT-HARTENBERG	66
4.1 PARÁMETROS DE DENAVIT-HARTENBERG	66
4.1.1 DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE DENAVIT-HARTENBERG	68
4.2 CONVENCIONES UTILIZADAS	69
4.2.1 CONVENCIÓN DE DENAVIT-HARTENBERG	69
4.2.2 CONVENCIÓN DE CRAIG	71

Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

CAPÍTULO 5. CINEMÁTICA DEL ROBOT	74
5.1 PROBLEMA CINEMÁTICO DIRECTO	74
5.1.1 CINEMÁTICA DIRECTA	75
5.1.2 PROGRAMA GRÁFICO PARA LA SOLUCIÓN DE LA CINEMÁTICA DIRECTA	77
5.2 PROBLEMA CINEMÁTICO INVERSO	81
5.2.1 CINEMÁTICA INVERSA	82
5.2.2 RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA CINEMÁTICO INVERSO A PARTIR DE LA MATRIZ DE TRANSFORMACIÓN HOMOGÉNEA	84
5.2.3 DESACOPLO CINEMÁTICO	84
5.2.4 PROGRAMA GRÁFICO PARA LA SOLUCIÓN DE LA CINEMÁTICA INVERSA	85
CAPÍTULO 6. PROGRAMACIÓN EN VISUAL BASIC	94
6.1 CÓDIGO DE PROGRAMACIÓN	94
CAPÍTULO 7. INTERFACES ELECTRÓNICAS	108
7.1 COMUNICACIÓN ROBOT-PUERTO USB	108
7.2 CONSTRUCCIÓN DEL CIRCUITO IMPRESO	111
7.3 INTERACCIÓN HOMBRE-ROBOT	116
7.4 ALCANCE DEL ROBOT	117
CAPÍTULO 8. MANUALES DE INSTALACIÓN	120
8.1 INTERFAZ DE COMUNICACIÓN USB	120
8.2 INTERFAZ GRÁFICA	133
CAPÍTULO 9. RESULTADOS ALCANZADOS	137
CAPÍTULO 10. CONCLUSIONES	142
BIBLIOGRAFÍA	143

Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

CAPITULO 1. FUNDAMENTOS DE LA ROBÓTICA INDUSTRIAL

1.1 RESEÑA HISTÓRICA

Cuando se piensa en la palabra robot generalmente nos llega a la imaginación una máquina con forma humana, a veces malignos, maquiavélicos, otras veces simpáticos y serviciales, e incluso herramientas domésticas que nos liberan de los trabajos pesados y rutinarios del hogar o el trabajo.

Desde la antigüedad, el hombre ha sentido fascinación por máquinas que imitan movimientos, acciones, funciones o actos de los seres vivos. La realización de mecanismos a través de dispositivos hidráulicos o mediante poleas, palancas, tornillos, engranajes, levas y resortes ha sido constante desde tiempos antiguos, e incluso algunos fueron descritos en la mitología clásica y oriental.

En el siglo XVIII, el francés Jacques de Vaucanson construyó una serie de célebres autómatas como músicos de tamaño humano o el pato expuesto en París en 1738. Esencialmente se trataba de robots mecánicos diseñados para un propósito específico: la diversión, principalmente de la corte o eventualmente, motivo de atracción de las ferias.

En 1805, Henri Maillardert construyó una muñeca mecánica que era capaz de hacer dibujos. Una serie de levas se utilizaban como “el programa” para el dispositivo en el proceso de escribir y dibujar. Estas creaciones mecánicas de forma humana deben considerarse como inversiones aisladas que reflejan el genio de hombres que se anticiparon a su época. Hubo otras invenciones mecánicas durante la revolución industrial, creadas por mentes de igual genio, muchas de las cuales estaban dirigidas al sector de la producción textil. Entre ellas se puede citar la hiladora giratoria de Hargreaves (1770), la hiladora mecánica de Crompton (1779), el telar mecánico de Cartwright (1785), el telar de Jacquard (1801), y otros.

El uso de elementos mecánicos, eléctricos o electrónicos para controlar procesos industriales substituyendo el trabajo del ser humano, A esto se le conoce como automatización industrial. Provee a los operadores humanos de mecanismos autónomos o semiautónomos para ayudarlos a extender sus capacidades físicas al realizar tareas conocidas por él de una manera más eficiente y segura reduciendo ampliamente la necesidad sensorial y mental del hombre [1].

El desarrollo del brazo artificial multiarticulado o manipulador, llevó al moderno robot. El inventor estadounidense George Devol desarrolló en 1954 un brazo primitivo que se podía programar para realizar tareas específicas. En 1975, el ingeniero mecánico estadounidense Víctor Scheinman, cuando estudiaba la carrera en la Universidad de Stanford, en California, desarrolló un manipulador polivalente realmente flexible conocido como Brazo Manipulador Universal

Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

Programable (PUMA, siglas en inglés). El PUMA era capaz de mover un objeto y colocarlo en cualquier orientación en un lugar deseado que estuviera a su alcance. El concepto básico multiarticulado del PUMA es la base de la mayoría de los robots actuales.

1.2 ORIGEN Y DESARROLLO DE LA ROBÓTICA

Entre los escritores de ciencia ficción, Isaac Asimov contribuyó con varias narraciones relativas a robots, comenzó en 1939, a él se atribuye el acuñamiento del término Robótica.

Las leyes de la robótica son "formulaciones matemáticas impresas en los senderos positrónicos del cerebro" de los robots (líneas de código del programa de funcionamiento del robot guardadas en la ROM del mismo). Aparecidas por primera vez en el relato *Runaround* (1942).

Estos principios fueron denominados por Asimov como las **Tres Leyes de la Robótica**, y son:

1. Un robot no puede dañar a un ser humano, ni con su inacción permitir que un ser humano sufra daño.
2. Un robot ha de obedecer las órdenes de un ser humano, excepto si tales órdenes entran en conflicto con la primera ley.
3. Un robot puede proteger su propia existencia mientras tal protección no entre en conflicto con la primera y segunda ley [1].

Esta redacción es la forma en la que los humanos de las historias las enuncian; su forma real sería la de una serie de instrucciones equivalentes y mucho más complejas en el cerebro del robot.

Asimov atribuye las tres Leyes a John W. Campbell, que las habría redactado durante una conversación sostenida. Sin embargo, Campbell sostiene que Asimov ya las tenía pensadas, y que simplemente las expresaron entre los dos de una manera más formal.

Con el objetivo de diseñar una máquina flexible, adaptable al entorno y de fácil manejo, George Devol, pionero de la Robótica Industrial, patentó un manipulador programable que fue el inicio del robot industrial.

En 1948 R.C. Goertz del Argonne National Laboratory desarrolló, con el objetivo de manipular elementos radioactivos sin riesgo para el operador, el primer tele manipulador. Este consistía en un dispositivo mecánico maestro-esclavo. El manipulador maestro, reproducía fielmente los movimientos de éste.

Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

El operador además de poder observar a través de un grueso cristal el resultado de sus acciones, sentía a través del dispositivo maestro, las fuerzas que el esclavo ejercía sobre el entorno. Años más tarde, en 1954, Goertz hizo uso de la tecnología electrónica y del servocontrol sustituyendo la transmisión mecánica por eléctrica y desarrollando así el primer tele manipulador con servocontrol bilateral. Otro de los pioneros de la tele manipulación fue Ralph Moshier, ingeniero de la General Electric que en 1958 desarrolló un dispositivo denominado Handy-Man (figura 1), consistente en dos brazos mecánicos teleoperados mediante un maestro del tipo denominado exoesqueleto [1].

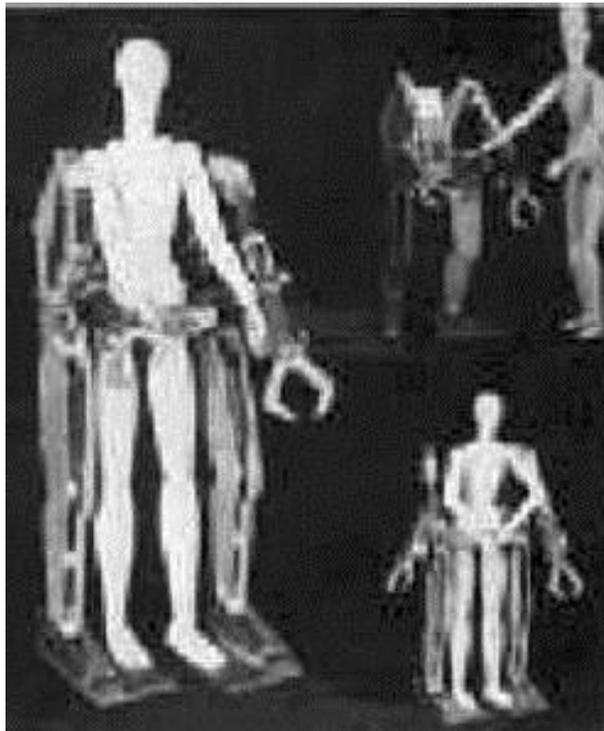


Figura 1. Handy-Man de Moshier (General Electric 1958)

La sustitución del operador por un programa de computadora que controlase los movimientos del manipulador dio paso al concepto de robot. La primera patente de un dispositivo robótico fue solicitada en marzo de 1954 por el inventor británico C.W. Kenward. Dicha patente fue emitida en el Reino Unido en 1957, sin embargo fue George C. Devol, ingeniero norteamericano, inventor y autor de varias patentes, él estableció las bases del robot industrial moderno. En 1954 Devol concibió la idea de un dispositivo de transferencia de artículos programada que se patentó en Estados Unidos en 1961.

En 1956 Devol y Joseph F. Engelberger director de ingeniería de la división aeroespacial de la empresa Manning Maxwell y Moore en Stanford, Connecticut comenzaron a trabajar en la utilización industrial de sus máquinas, fundando la Consolidated Controls Corporation, que más tarde se convierte en Unimation

Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

(Universal Automation), e instalando su primera máquina Unimate (figura 2) en 1960, en la fábrica de General Motors de Trenton, Nueva Jersey, en una aplicación de fundición por inyección.

Unimate



Figura 2. UNIMATE, Primer robot industrial (1960)

Otras grandes empresas como AMF, emprendieron la construcción de máquinas similares (Versatran- 1963).

En 1968 J.F. Engelberger visitó Japón y poco más tarde se firmaron acuerdos con Kawasaki para la construcción de robots tipo Unimate. El crecimiento de la robótica en Japón aventaja en breve a los Estados Unidos gracias a Nissan, que formó la primera asociación robótica del mundo, la Asociación de Robótica industrial de Japón (JIRA) en 1972. Dos años más tarde se formó el Instituto de Robótica de América (RIA), que en 1984 cambió su nombre por el de Asociación de Industrias Robóticas, manteniendo las mismas siglas (RIA).

Por su parte Europa tuvo un despertar más tardío. En 1973 la firma sueca ASEA construyó el primer robot con accionamiento totalmente eléctrico, en 1980 se fundó la Federación Internacional de Robótica con sede en Estocolmo Suecia. La configuración de los primeros robots respondía a las denominadas configuraciones esférica y antropomórfica, de uso especialmente válido para la manipulación. En 1982, el profesor Makino de la Universidad Yamanashi de Japón, desarrolla el concepto de robot SCARA (*Selective Compliance Assembly Robot Arm*) que busca un robot con un número reducido en grados de libertad (3 o 4), un coste limitado y una configuración orientada al ensamblado de piezas [1].

La evolución de los robots industriales desde sus principios ha sido vertiginosa. En poco más de 30 años las investigaciones y desarrollos sobre robótica industrial han permitido que los robots tomen posiciones en casi todas las áreas productivas y tipos de industria. En pequeñas o grandes fábricas, los robots pueden sustituir al hombre en aquellas áreas repetitivas y hostiles, adaptándose inmediatamente a los cambios de producción solicitados por la demanda variable.

Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

1.3 DEFINICIÓN DE LA ROBÓTICA

La **robótica** es la ciencia y la tecnología que se dedica al estudio, diseño, manufactura, programación, operación y aplicación de los robots capaces de desempeñar tareas realizadas por el ser humano.

De esta definición se concluye que en la robótica se combinan diversas disciplinas para un mismo fin como son: la mecánica, la electrónica, la automática, la informática, la inteligencia artificial y la ingeniería de control. Otras áreas importantes en robótica son el álgebra, los autómatas programables y las máquinas de estados.

Estas son algunas de las clasificaciones de la robótica:

Robótica Industrial: Es la parte de la Ingeniería que se dedica a la construcción de máquinas capaces de realizar tareas mecánicas y repetitivas de una manera muy eficiente y con costes reducidos.

Robótica de Servicio: Es la parte de la Ingeniería que se centra en el diseño y construcción de máquinas capaces de proporcionar servicios directamente a los miembros que forman sociedad.

Robótica Inteligente: Son robots capaces de desarrollar tareas que, desarrolladas en un ser humano, requieren el uso de su capacidad de razonamiento.

Robótica Humanoide: Es la parte de la ingeniería que se dedica al desarrollo de sistemas robotizados para imitar determinadas peculiaridades del ser humano.

1.4 OBJETIVOS DE LA ROBÓTICA INDUSTRIAL

Los procesos industriales de producción masiva requieren aumentar y mejorar la calidad de los productos fabricados; ya que la repetitividad y la precisión son dos características fundamentales de la robótica, esta permite mejorar el nivel de competitividad y productividad de las industrias y empresas manufactureras.

Las causas que ocasionan la mejora de la productividad se pueden resumir como sigue:

Aumento de la velocidad en los procesos productivos. La repetición automática de los movimientos del robot, con optimización de la velocidad, representa una reducción en el ciclo parcial controlado por el manipulador, así como un incremento del rendimiento total en la línea de producción y montaje.

Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

El elevado tiempo de funcionamiento sin fallos, que es previsible esperar de un robot industrial, repercute favorablemente en la consecución de un trabajo uniforme e ininterrumpido.

El robot puede permitir trabajar a la máxima velocidad a las máquinas a las que atiende (si es que no lo hacían), así como operar con las características más favorables de los equipos junto con los que trabaja.

Acoplamiento ideal para producciones de series cortas y medianas. La fácil programación, unida a la adaptabilidad de numerosas herramientas de trabajo, permite al robot constituirse como una célula flexible de fabricación.

Rápida amortización de la inversión. La sustitución de la mano de obra que el robot introduce va acompañada de una reducción importante de los costos directos e indirectos. Cabe destacar, un mejor uso de las herramientas, lo que implica su mayor duración y, por otra parte, un decrecimiento en los desperdicios de material [2].

1.5 DEFINICIÓN DE UN ROBOT INDUSTRIAL

No existe una definición ampliamente aceptada, está depende del país o del entorno social. Aunque en este apartado se presentan varias definiciones aceptadas a nivel mundial.

De manera frecuente un robot industrial, es un manipulador controlado generalmente por computadora que consiste en algunos elementos rígidos conectados en serie mediante articulaciones prismáticas o de revolución. El inicio de la cadena está fijo a una base soporte, mientras el extremo final está libre y equipado con una herramienta para manipular objetos o realizar otras tareas. El movimiento de las articulaciones resulta en, o produce, un movimiento relativo de los distintos elementos y por lo tanto en el desplazamiento de la herramienta o efector final.

Mecánicamente, un robot se compone de un brazo una muñeca más una herramienta.

Se diseña para trabajar una pieza localizada dentro de su volumen de trabajo. El volumen de trabajo es el rango de influencia de un robot compuesta por el conjunto de puntos que el brazo puede alcanzar.

Los movimientos posibles para estos robots dependen de los grados de libertad (GDL) que posean. El grado de libertad es el número de desplazamientos longitudinales ó rotacionales independientes que puede tener un mecanismo. La

Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

cantidad de grados de libertad, y por lo tanto la complejidad del robot, dependen de la labor o labores que se desean realizar con él (en el apartado 1.7 se da una explicación mas detallada acerca de los grados de libertas).

La mayoría de robots industriales de la actualidad, aunque están controlados por microcomputadores, son básicamente máquinas posicionales. Ejecutan una tarea dada mediante la grabación de secuencias pre programadas de movimiento previamente enseñadas por el usuario. Más aún, la mayoría de estos robots industriales poseen pocos o ningún sensor externo para poder obtener información de su entorno de trabajo. Como resultado de esto, los robots se utilizan principalmente en tareas repetitivas simples.

En la actualidad se ve a la robótica como un campo de trabajo muy amplio desarrollando nuevas tecnologías en una serie de áreas interdisciplinarias como la cinemática, la dinámica, la planificación de sistemas, el control, sensores, lenguajes de programación e inteligencia artificial [3].

La definición del robot industrial, como una máquina que puede efectuar un número diverso de trabajos, automáticamente, mediante la programación previa, no es válida, porque existen bastantes maquinas de control numérico que cumplen con estos requisitos. Una peculiaridad de los robots es su estructura de brazo mecánico y otra su adaptabilidad a diferentes aprehensores o herramientas. Otra característica específica del robot, es la posibilidad de llevar a cabo trabajos completamente diferentes e incluso, tomar decisiones según la información procedente del mundo exterior, mediante el adecuado programa operativo en su sistema informático.

La definición más comúnmente aceptada posiblemente sea la de la Asociación de Industrias Robóticas (RIA), según la cual:
“Un robot industrial es un manipulador multifuncional reprogramable, capaz de mover materias, piezas, herramientas, o dispositivos especiales, según trayectorias variables, programadas para realizar tareas diversas”.

Esta definición, ligeramente modificada, ha sido adoptada por la Organización Internacional de Estándares (ISO) que define al robot industrial como:
“Manipulador multifuncional reprogramable con varios grados de libertad, capaz de manipular materias, piezas, herramientas o dispositivos especiales según trayectorias variables programadas para realizar tareas diversas”.

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

Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

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

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

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

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

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

Común en todas las definiciones anteriores un robot industrial es un brazo mecánico con capacidad de manipulación y que incorpora un control más o menos complejo.

Una definición un poco más detallada de un robot industrial es:

Un robot industrial, es un manipulador de uso general controlado generalmente por computadora que consiste en algunos elementos rígidos conectados en serie mediante articulaciones prismáticas o de revolución. El inicio de la cadena está fijo a una base soporte, mientras el extremo final está libre y equipado con una herramienta para manipular objetos o realizar otras tareas. El movimiento de las articulaciones produce un movimiento relativo de los distintos elementos y por lo tanto en el desplazamiento de la herramienta o efector final.

1.6 CLASIFICACIÓN DE UN ROBOT INDUSTRIAL

La maquinaria para la automatización rígida dio paso al robot con el desarrollo de controladores rápidos, basados en el microprocesador, así como un empleo de servos en bucle cerrado, que permiten establecer con exactitud la posición real de los elementos del robot y establecer el error con la posición

Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

deseada. Esta evolución ha dado origen a una serie de tipos de robots, los cuales pueden clasificarse:

Clasificación según su cronología de sistemas de control:

1ra. Generación.

Manipuladores. Son sistemas mecánicos multifuncionales, con un sencillo sistema de control, que permite gobernar el movimiento de sus elementos de manera:

Manual: el operario controla directamente la tarea del manipulador.

De secuencia fija: cuando se repite, de forma invariable, el proceso de trabajo preparado previamente.

De secuencia variable: Se pueden alterar algunas características de los ciclos de trabajo.

2da. Generación.

Robots de repetición o aprendizaje. Son manipuladores que se limitan a repetir una secuencia de movimientos, previamente ejecutada por un operador humano, haciendo uso de un controlador manual o un dispositivo auxiliar. El operario, se vale de una pistola de programación con diversos pulsadores o teclas, de joysticks, o a veces, desplaza directamente la mano del robot, mientras que el robot le sigue y los memoriza. Los robots de aprendizaje son los más conocidos, hoy día, en los ambientes industriales y el tipo de programación que incorporan, recibe el nombre de "gestual".

3ra. Generación.

Robots con control sensorizado o por computador. Son manipuladores o sistemas mecánicos multifuncionales, controlados por una computadora, que habitualmente suele ser un microordenador. En este tipo de robots, el programador no necesita mover realmente el elemento de la maquina, cuando la prepara para realizar un trabajo. El control por computador dispone de un lenguaje específico, compuesto por varias instrucciones adaptadas al robot, con las que se puede confeccionar un programa de aplicación utilizando solo el terminal del computador, no el brazo. A esta programación se le denomina textual y se crea sin la intervención del manipulador.

4ta. Generación.

Robots inteligentes. Son similares a los del grupo anterior, pero, además, son capaces de relacionarse con el mundo que les rodea a través de sensores y tomar decisiones en tiempo real (auto programable). Son muy poco conocidos en el mercado y aun se encuentran en fase experimental. La visión artificial, el sonido de máquina y la inteligencia artificial, son las ciencias que más están estudiando para su aplicación en los robots inteligentes.

Micro-robots. Con fines educacionales, de entretenimiento o investigación, existen numerosos robots de formación o micro-robots a un precio muy asequible y, cuya estructura y funcionamiento son similares a los de aplicación industrial.

Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

Robots de servicio y teleoperador. En cuanto a los robots de servicio, se pueden definir como dispositivos electromecánicos móviles o estacionarios, dotados normalmente de uno o varios brazos mecánicos independientes, controlados por un programa ordenador y que realizan tareas no industriales de servicio. Los robots teleoperados son definidos por la NASA como:

“Dispositivos robóticos con brazos manipuladores y sensores con cierto grado de movilidad, controlados remotamente por un operador humano de manera directa o a través de una computadora”.

5ta. Generación.

La quinta generación, actualmente está en desarrollo esta nueva generación de robots, que pretende que el control emerja de la adecuada organización y distribución de módulos conductuales, esta nueva arquitectura es denominada arquitectura de subsunción (es la inclusión de un objeto o concepto en la extensión de otro), cuyo promotor es Rodney Brooks.

Clasificación de los robots según AFRI:

Con el fin de dar una visión del posible futuro, se presentan en forma clasificada, buena parte de los diversos tipos de robots que se puedan encontrar hoy en día. Todos los robots presentados existen en la actualidad, aunque los casos más futuristas están en estado de desarrollo en los centros de investigación de robótica [1].

Clasificación de los robots según la AFRI (Asociación Francesa de Robótica Industrial)	
Tipo A	Manipulador con control manual o telemando.
Tipo B	Manipulador automático con ciclos preajustados; regulación mediante fines de carrera o topes; control por PLC; accionamiento neumático, eléctrico o hidráulico.
Tipo C	Robot programable con trayectoria continua o punto a punto. Carece de conocimiento sobre su entorno.
Tipo D	Robot capaz de adquirir datos de su entorno, readaptando su tarea en función de estos.

Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

Clasificación de los robots según T.M. Knasel:

Clasificación de los robots según T. M. Knasel				
Generación	Nombre	Tipo de Control	Grado de movilidad	Usos más frecuentes
1 (1982)	<i>Pick & place</i>	Fines de carrera, aprendizaje.	Ninguno.	Manipulación, servicio de maquinas.
2 (1984)	Servo	Servocontrol, trayectoria continua, programación condicional.	Desplazamiento por vía.	Soldadura, pintura.
3 (1989)	Ensamblado	Servos de precisión, visión, tacto.	Guiado por vía.	Ensamblado, desbardado.
4 (2000)	Móvil	Sensores inteligentes.	Patas, ruedas.	Construcción, mantenimiento.
5 (2010)	Especiales	Controlados con técnicas de IA.	Andante, saltarín.	Militar, espacial.

Clasificación de los robots según su Arquitectura:

La arquitectura, es definida por el tipo de configuración general del Robot, puede ser metamórfica para incrementar la flexibilidad funcional del Robot a través del cambio de su configuración por el propio Robot. El metamorfismo admite diversos niveles, desde los más elementales (cambio de herramienta o de efecto terminal), hasta los más complejos como el cambio o alteración de algunos de sus elementos o subsistemas estructurales. Los dispositivos y mecanismos que pueden agruparse bajo la denominación genérica del Robot, tal como se ha indicado, son muy diversos y es por tanto difícil establecer una clasificación coherente de los mismos que resista un análisis crítico y riguroso.

La subdivisión de los Robots, con base en su arquitectura, se hace en los siguientes grupos: poliarticulados, móviles, androides, zoomórficos e híbridos.

- **1. Poliarticulados**

En este grupo están los Robots de muy diversa forma y configuración cuya característica común es la de ser básicamente sedentarios y estar estructurados para mover sus elementos terminales en un determinado espacio de trabajo según uno o más sistemas de coordenadas y con un número limitado de grados de libertad. Estos robots se emplean cuando es preciso abarcar una zona de trabajo

Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

relativamente amplia o alargada, actuar sobre objetos con un plano de simetría vertical o reducir el espacio ocupado en el suelo.

- **2. Móviles**

Son Robots con gran capacidad de desplazamiento, basados en carros o plataformas; además, están dotados de un sistema locomotor de tipo rodante. Siguen su camino por telemando o guiándose por la información recibida de su entorno a través de sus sensores. Estos Robots aseguran el transporte de piezas de un punto a otro de una cadena de fabricación. Guiados mediante pistas materializadas a través de la radiación electromagnética de circuitos empotrados en el suelo, o a través de bandas detectadas fotoeléctricamente, pueden incluso llegar a sortear obstáculos y están dotados de un nivel relativamente elevado de inteligencia.

- **3. Androides**

Son Robots que intentan reproducir total o parcialmente la forma y el comportamiento cinemática del ser humano. Actualmente los androides son todavía dispositivos muy poco evolucionados y sin utilidad práctica, y destinados, fundamentalmente, al estudio y experimentación. Uno de los aspectos más complejos de estos Robots, y sobre el que se centra la mayoría de los trabajos, es el de la locomoción bípeda. En este caso, el principal problema es controlar dinámicamente y coordinadamente en el tiempo real el proceso y mantener simultáneamente el equilibrio del Robot.

- **4. Zoomórficos**

Los Robots zoomórficos, que considerados en sentido no restrictivo podrían incluir también a los androides, constituyen una clase caracterizada principalmente por sus sistemas de locomoción que imitan a los diversos seres vivos. A pesar de la disparidad morfológica de sus posibles sistemas de locomoción es conveniente agrupar a los Robots zoomórficos en dos categorías principales: caminadores y no caminadores. El grupo de los Robots zoomórficos no caminadores está muy poco evolucionado. Los experimentados efectuados en Japón basados en segmentos cilíndricos biselados acoplados axialmente entre sí y dotados de un movimiento relativo de rotación. Los Robots zoomórficos caminadores múltipedos son muy numerosos y están siendo experimentados en diversos laboratorios con vistas al desarrollo posterior de verdaderos vehículos terrenos, piloteando o autónomos, capaces de evolucionar en superficies muy accidentadas. Las aplicaciones de estos Robots serán interesantes en el campo de la exploración espacial y en el estudio de los volcanes.

- **5. Híbridos**

Corresponden a aquellos de difícil clasificación cuya estructura se sitúa en combinación con alguna de las anteriores ya expuestas, bien sea por conjunción o por combinación o asociación entre robots. Por ejemplo, un dispositivo

Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

segmentado articulado y con ruedas, es al mismo tiempo uno de los atributos de los Robots móviles y de los Robots zoomórficos.

Clasificación de los robots según su configuración:

Los robots industriales que están disponibles comercialmente se pueden clasificar de acuerdo a distintos criterios como el área de aplicación o su propia esencia. La clasificación más común está basada en su configuración. Cuando se habla de la configuración de un robot, se habla de la forma física que se le ha dado al brazo del robot.

El brazo del manipulador puede presentar configuraciones clásicas y otras llamadas no clásicas.

De acuerdo a las configuraciones clásicas de un robot se puede clasificar en:

Configuración cartesiana: Este robot tiene capacidad de desplazamiento lineal, paralelo a los ejes coordenados, es decir, tiene tres grados de libertad, los cuales corresponden a los movimientos localizados en los ejes X, Y y Z, como se muestra en la figura 3.

Estos robots presentan un volumen de trabajo cúbico; los actuadores de posición y orientación son accionados por fuentes hidráulicas, neumáticas, o eléctricas.

Los movimientos que realiza este robot entre un punto y otro son con base en interpolaciones lineales (tipo de trayectoria que realiza el manipulador cuando se desplaza entre un punto y otro).

A la trayectoria realizada en línea recta se le conoce como interpolación lineal y a la trayectoria hecha de acuerdo con el tipo de movimientos que tienen sus articulaciones se le llama interpolación por articulación.

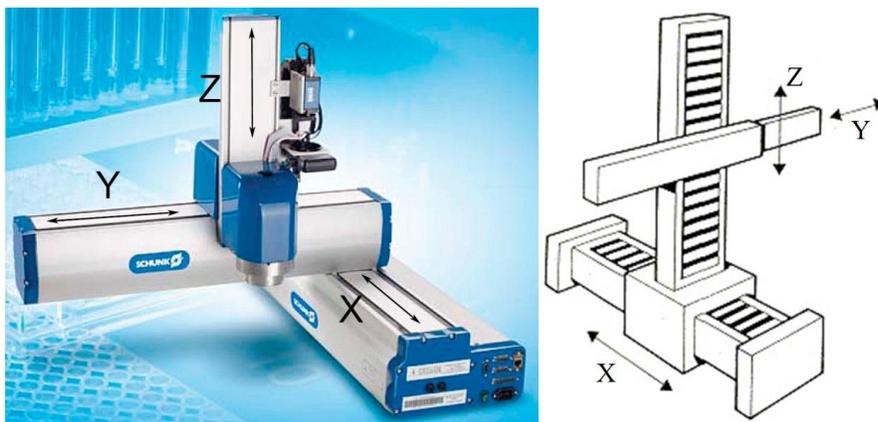


Figura 3. Configuración cartesiana.

Configuración cilíndrica: Este robot tiene capacidad de girar con respecto a un eje de referencia y además cuenta con dos desplazamientos lineales. Estos

Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

robots tienen un volumen de trabajo parecido a un cilindro, aunque casi nunca completan los 360° de una vuelta completa.

Presenta tres grados de libertad, puede realizar dos movimientos lineales (Z y γ) y uno rotacional (θ), como se observa en la figura 4.

El robot de configuración cilíndrica está diseñado para ejecutar los movimientos conocidos como interpolación lineal e interpolación por articulación.

La interpolación por articulación se lleva a cabo por medio de la primera articulación, ya que ésta puede realizar un movimiento rotacional.

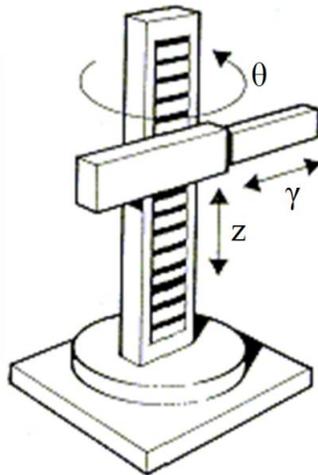


Figura 4. Configuración cilíndrica.

Configuración esférica: A este robot a veces se le llama polar. Tiene varias articulaciones y cada una de ellas puede realizar un movimiento distinto: rotacional (θ), angular (β) y lineal (γ), como se observa en la figura 5; que por lo general son impulsados eléctrica o hidráulicamente.

Este robot utiliza la interpolación por articulación para moverse en sus dos primeras articulaciones y la interpolación lineal para la extensión y retracción.

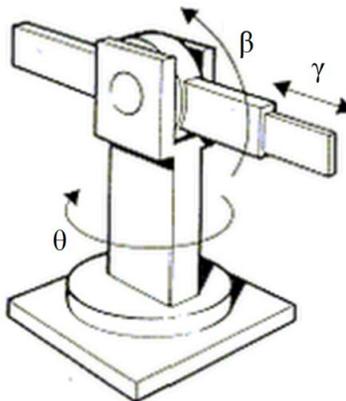


Figura 5. Configuración esférica.

Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

Configuración angular (o de brazo articulado): Varían la posición y orientación, gracias a su elevado número de grados de libertad (usualmente 5 o 6 GDL). Presenta una articulación con movimiento rotacional (θ) y dos angulares (β y α), esta configuración se muestra en la figura 6.

Aunque el brazo articulado puede realizar el movimiento llamado interpolación lineal (para lo cual requiere mover simultáneamente dos o tres de sus articulaciones), el movimiento natural es el de interpolación por articulación, tanto rotacional como angular.

Son ideales en aplicaciones industriales, desde la soldadura por puntos, hasta aplicaciones de pintado y sellado.

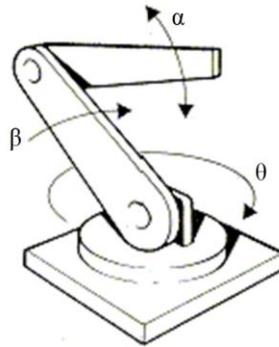


Figura 6. Configuración angular.

Configuraciones no clásicas de un robot:

Robot SCARA: El ejemplo más común de una configuración no clásica lo representa el robot tipo SCARA (“*Selective Compliant Assembly Robot Arm*”), el cual se ve en la figura 7.

Este brazo puede realizar movimientos horizontales de mayor alcance debido a sus dos articulaciones rotacionales (α y θ). El robot de configuración SCARA también puede hacer un movimiento lineal (Z, mediante su tercera articulación).

Debido a estas características se usan principalmente en la fabricación de electrónica de consumo y en la clasificación de artículos para su empaquetado.

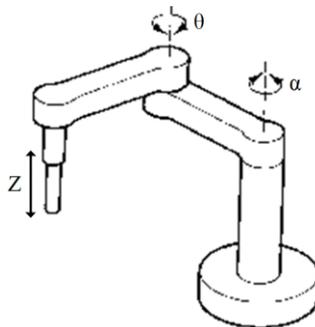


Figura 7. Configuración del robot SCARA.

Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

Robot paralelo o delta: Un robot paralelo es aquel cuya estructura mecánica está formada por un mecanismo de cadena cerrada en donde el efector final se une a la base por al menos dos cadenas cinemáticas independientes, esta configuración se observa en la figura 8.

Puesto que para definir totalmente la posición y orientación de un cuerpo en el espacio son necesarios seis parámetros, si se pretende que un robot posicione y oriente su extremo de cualquier modo en el espacio será necesario que el robot tenga por lo menos seis grados de libertad.

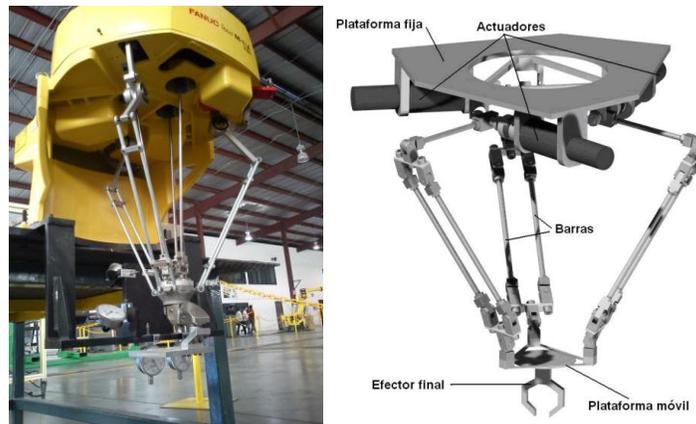


Figura 8. Configuración del robot delta.

En la práctica es muy común encontrar robots que aunque no tienen seis grados de libertad el contar con cuatro o cinco les resulta suficiente para realizar las labores para las cuales fueron diseñados. Existen también casos en los cuales seis grados de libertad no resultan suficientes, como los robots que trabajan en un entorno con obstáculos. Un ejemplo sería un robot usado en competencias de *soccer*, estos robots suelen tener más de veinte grados de libertad.

1.7 GRADOS DE LIBERTAD DE UN ROBOT

Cada uno de los movimientos independientes que puede realizar cada articulación con respecto a la anterior se denomina **grado de libertad (GDL)**. El número de grados de libertad del robot viene dado por la suma de los GDL de las articulaciones que lo componen. Puesto que mayoritariamente se utilizan las articulaciones de rotación y prismática, con un solo GDL cada una, el número de GDL del robot suele coincidir con el número de articulaciones de que se compone.

Los robots consisten de vínculos casi rígidos, los cuales están conectados por articulaciones que permiten el movimiento relativo de los vínculos adyacentes [2].

Estas articulaciones se instrumentan con sensores de posición, los cuales permiten medir la posición relativa de los vínculos adyacentes. En el caso de las articulaciones giratorias o angulares, estos desplazamientos se conocen como

Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

ángulos articulados. Algunos robots contienen articulaciones deslizantes (o prismáticas), en las que el desplazamiento relativo entre los vínculos es una traslación, algunas veces llamada desplazamiento de articulación.

1.8 APLICACIONES INDUSTRIALES DE LOS ROBOTS

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

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

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

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

- Manipulación en fundición
 - Moldes
 - Otros
- Manipulación en moldeo de plásticos
- Manipulación en tratamientos térmicos
- Manipulación en la forja y estampación
- Soldadura.
 - Por arco
 - Por puntos
 - Por gas
 - Por láser
 - Otros
- Aplicación de materiales
 - Pintura
 - Adhesivos y secantes
 - Otros

Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

- Mecanización
 - Carga y descarga de máquinas
 - Corte mecánico, rectificado, desbardado y pulido
 - Otros
- Otros procesos
 - Láser
 - Chorro de agua
 - Otros
- Montaje.
 - Montaje mecánico
 - Inserción
 - Unión por adhesivos
 - Unión por soldadura
 - Manipulación para montaje
 - Otros
- Paletización
- Medición, inspección, control de calidad
- Manipulación de materiales
- Formación, enseñanza e investigación
- Otros

Esta clasificación pretende englobar la mayor parte de los procesos robotizados en la actualidad aunque, se pueden encontrar aplicaciones particulares que no aparecen de manera explícita en esta clasificación.

La implantación de un robot industrial en un determinado proceso exige un detallado estudio previo del proceso en cuestión, examinando las ventajas e inconvenientes que conlleva la introducción del robot. Será preciso siempre estar dispuesto a admitir cambios en el desarrollo del proceso primitivo (modificaciones en el diseño de piezas, sustitución de unos sistemas por otros, etc.) que faciliten y hagan viable la aplicación del robot.

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

En cuanto al tipo de robot a utilizar, habrá que considerar aspectos de diversa índole como espacio de trabajo, velocidad de carga, capacidad de control, coste, etc.

Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

Trabajos en fundición

La fundición por inyección fue el primer proceso robotizado (1960). En la figura 9, se observa cómo se realiza un trabajo por fundición. En este proceso el material usado, en estado líquido, es inyectado a presión en el molde. Este último está formado por dos mitades que se mantienen unidas durante la inyección del metal mediante la presión ejercida por dos cilindros. La pieza solidificada se extrae del molde y se enfría para su posterior desbarrado. El molde, una vez limpio de residuos de restos de metal y adecuadamente lubricado, puede ser usado de nuevo.



Figura 9. Trabajo en fundición.

El robot se usa en:

- la fundición de las piezas del molde y transporte de éstas a un lugar de enfriado y posteriormente a otro proceso (desbarrado, corte, etc.).
- la limpieza y mantenimiento de los moldes, eliminando rebabas (por aplicación de aire comprimido) y aplicando el lubricante.
- la colocación de piezas en el interior de los moldes (embutidos).

Soldadura

La industria automovilística ha sido la gran impulsora de la robótica industrial, empleando la mayor parte de los robots instalados hoy día, en la figura 10, se observan algunos ejemplos de robots utilizados en la industria para la soldadura.

La tarea robotizada más frecuente dentro de la fabricación de automóviles ha sido, sin duda alguna, la soldadura de carrocerías. En este proceso, dos piezas metálicas se unen en un punto para la fusión conjunta de ambas partes, denominándose a este tipo de soldadura por puntos.



Figura 10. Robots utilizados en la aplicación de soldadura.

Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

Aplicación de materiales

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

Normalmente los robots de pintura son específicos para este fin. Suelen ser robots articulares, ligeros, con 6 o más grados de libertad que les permiten proyectar pintura en todos los huecos de la pieza; en la figura 11, se observa un robot aplicando pintura. Cuentan con protecciones especiales para defenderse de las partículas en suspensión dentro de la cabina de pintura y sus posibles consecuencias (explosiones, incendio, deterioro mecánico). Este mismo motivo origina que, en muchos casos, el accionamiento de los robots de pintura sea hidráulico o, de ser eléctrico, que los cables vayan por el interior de conductos a sobrepresión, evitándose así, el riesgo de explosión.



Figura 11. Robot recubriendo con pintura.

Aplicación de adhesivos y sellantes

Los robots son frecuentemente utilizados para la aplicación de cordones de material sellante o adhesivos en la industria del automóvil sellante de ventanas y parabrisas, material anticorrosión en los bajos del coche, etc. Un ejemplo de estos robots se muestra en la figura 12; del lado izquierdo se observa la punta con la que aplica el adhesivo.

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

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

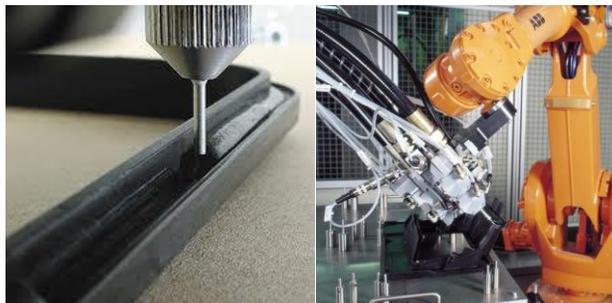


Figura 12. Robot para aplicar adhesivos.

Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

Alimentación de máquinas

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

Los robots usados en estas tareas son, por lo general, de baja complejidad, precisión media, número reducido de grados de libertad y de control sencillo, bastando en ocasiones con manipuladores secuenciales. Su campo de acción interesa que sea grande. En cuanto a la carga, varía mucho, pudiéndose necesitar robots con capacidad de carga de pocos kilogramos, hasta de algunos cientos (existen robots capaces de manipular hasta tonelada y media). Las estructuras más frecuentemente utilizadas son la cilíndrica, esférica y articular. También la cartesiana puede aportar en ocasiones la solución más adecuada.

En la figura 13 se muestra el ejemplo de un robot utilizado para este proceso.



Figura 13. Robot en el proceso de alimentación de máquinas.

Procesado

Dentro del procesado se incluyen operaciones en las que el robot se enfrenta a piezas y herramientas (transportando una u otra) para conseguir, en general, una modificación en la forma de la pieza, en la figura 14 se observa un robot que hace posible esta operación.



Figura 14. Robot delta en operación de procesado.

Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

Corte

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

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

En la figura 15 se observa un robot de 6 GDL, utilizado para corte con plasma definido previamente mediante AutoCAD.



Figura 15. Robot de 6 GDL para corte con plasma.

Montaje

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

Muchos procesos de ensamblado se han automatizado empleando máquinas especiales (figura 16) que funcionan con gran precisión y rapidez. Sin embargo, el mercado actual precisa de sistemas muy flexibles, que permitan introducir frecuentes modificaciones en los productos con unos costes mínimos. Por este motivo el robot industrial se ha convertido en muchos casos en la solución ideal para la automatización del ensamblaje.

El tipo SCARA ha alcanzado gran popularidad en este tipo de tareas por su bajo costo y buenas características. Éstas se consiguen por su adaptabilidad

Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

selectiva, presentando facilidad para desviarse, por una fuerza externa, en el plano horizontal y una gran rigidez para hacerlo en el eje vertical.



Figura 16. Robots utilizados en operaciones de montaje.

Paletización

La paletización es un proceso básicamente de manipulación, consistente en disponer piezas sobre una plataforma o bandeja (palet). Las piezas en un palet ocupan normalmente posiciones predeterminadas, procurando asegurar la estabilidad, facilitar su manipulación y optimizar su extensión. Los palets son transportados por diferentes sistemas (cintas transportadoras, carretillas, etc.) llevando su carga de piezas, bien a lo largo del proceso de fabricación, o bien hasta el almacén o punto de expedición.

En la figura 17 se muestran robots manipuladores en el proceso de paletización de cajas y sacos de azúcar.

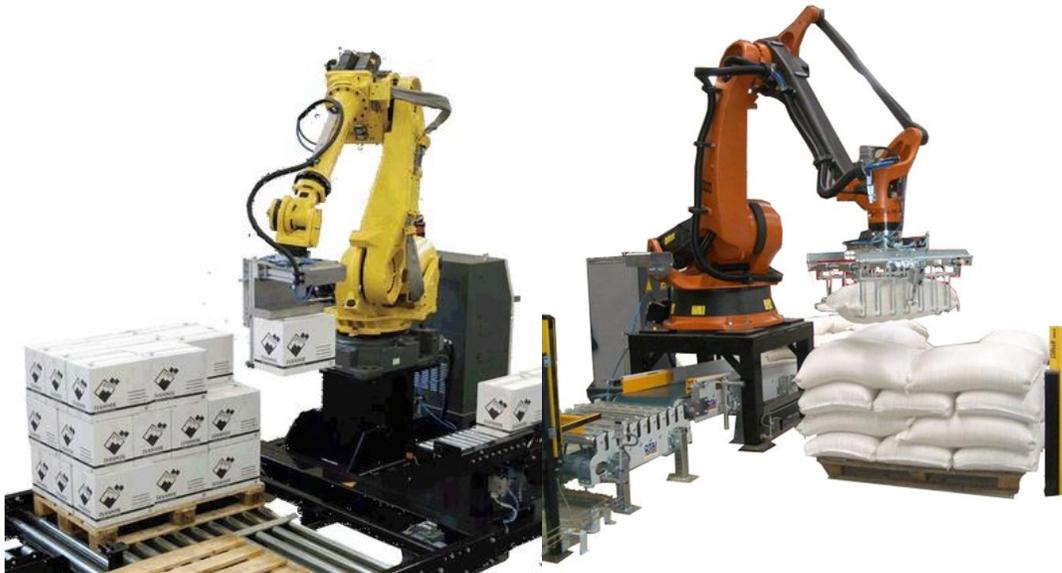


Figura 17. Robots en proceso de paletización.

Control de Calidad

La tendencia a conseguir una completa automatización de la producción abarca todas las etapas de ésta, inclusive el control de la calidad. El robot industrial puede participar en esta tarea usando su capacidad de posicionamiento y manipulación. Así, transportando en su extremo un palpador (figura 18), puede

Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

realizar el control dimensional de piezas ya fabricadas. Para ello el robot toca con el palpador varios puntos claves de la pieza.



Figura 18. Palpador para un robot.

A partir del conocimiento que en todo instante tiene la unidad de control del robot de la posición y orientación de su extremo, se obtienen los datos relativos a la posición espacial de los puntos determinados de la pieza. Estos datos son utilizados para registrar posibles desviaciones sobre los valores deseados. Otras posibles aplicaciones del robot en el control de calidad consisten en utilizar a éste para transportar el instrumental de medida (ultrasonidos, rayos X, etc.) a puntos concretos de la pieza a examinar. La situación de posibles defectos detectados puede registrarse y almacenarse a partir, como antes, de la propia unidad de control de robot.

Manipulación en salas blancas

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

Las denominadas salas blancas de la industria de los semiconductores o las de fabricación de algunos productos farmacéuticos, son ejemplos típicos, en los cuales se utilizan robots como los de la figura 19.



Figura 19. Robots usados en salas blancas.

Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

Nuevos sectores de aplicación

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

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

Este tipo de robots ha venido a llamarse robots de servicio y están siendo aplicados en sectores como:

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

En general, la aplicación de la robótica a estos sectores se caracteriza por la falta de estructuración tanto del entorno como de la tarea a realizar, y la menor importancia de criterios de rentabilidad económica frente a la de realizar tareas en entornos peligrosos o en los que no es posible el acceso de las personas. Estas características obligan a que los robots de servicio cuenten con un mayor grado de inteligencia, puesto que se traduce en el empleo de sensores y del *software* adecuado para la toma rápida de decisiones.

Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

CAPÍTULO 2. MORFOLOGÍA DE UN ROBOT INDUSTRIAL

Las características de un robot se clasifican en tres: morfológicas, cinemáticas y dinámicas.

A la construcción física del cuerpo, brazo y muñeca del robot, se le denomina **Anatomía o Morfología del Robot** [1].

2.1 ESTRUCTURA MECÁNICA

La particularidad de un robot manipulador es su similitud anatómica con el brazo humano. Se puede tener diferentes tipos de movimientos en las articulaciones: desplazamiento, giro o combinación de ambos.

Puesto que para posicionar y orientar un cuerpo de cualquier manera en el espacio son necesarios seis parámetros, tres para definir la posición y tres para la orientación (algunas veces basta con dos parámetros para definir la orientación), si se pretende que un robot posicione y oriente su extremo y con él la pieza o herramienta manipulada de cualquier modo en el espacio, se precisan al menos seis grados de libertad.

2.2 ARTICULACIONES Y ESLABONES

Mecánicamente un robot está formado por una serie de elementos o eslabones unidos mediante articulaciones que permitirán un movimiento de rotación entre cada dos eslabones consecutivos.

Particularmente en nuestro caso tenemos un robot de 5 articulaciones de rotación, por lo que la configuración de éste se denomina RRRRRR y es de 5 GDL.

Existen seis posibles articulaciones, las cuales se muestran en la figura 20.

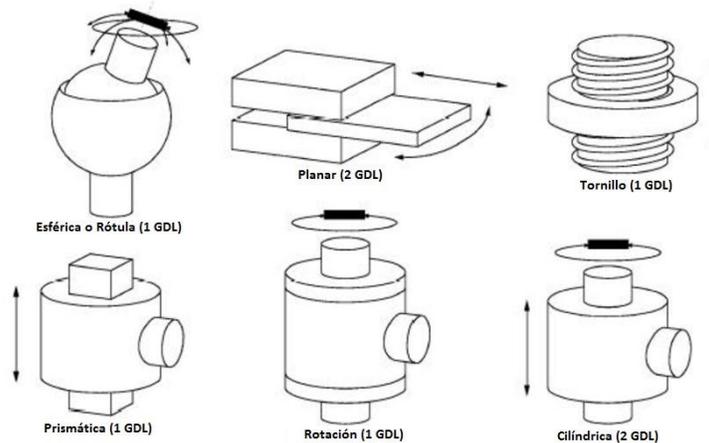


Figura 20. Seis posibles articulaciones de par menor.

Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

El movimiento de cada articulación puede ser de desplazamiento, de giro, o una combinación de ambos. De manera que son posibles seis tipos diferentes de articulaciones, aunque en la práctica, en los robots solo se emplean la de rotación y la prismática.

2.3 REDUCTORES

Son los encargados de adaptar el par y la velocidad de salida del actuador a los valores adecuados para el movimiento de los elementos del robot. A los reductores utilizados en robótica deben cumplir con ciertas condiciones de funcionamiento debido a las altas prestaciones que se exigen en cuanto a precisión y velocidad de posicionamiento.

Las características principales de los reductores son:

- Bajo peso y tamaño.
- Bajo rozamiento.
- Capacidad de reducción elevada de velocidad en un único paso.
- Mínimo momento de inercia.
- Tienen una velocidad máxima de entrada admisible
- Deben soportar elevados pares puntuales (continuos arranques y paradas)
- El juego angular o Backslash lo menor posible (giro del eje de salida sin que gire el eje de entrada)
- Alta rigidez torsional (para que hay que aplicar al eje de salida para que bloqueado el de entrada gire un ángulo unitario)

Accionamiento directo

En el accionamiento directo el eje del actuador se conecta directamente a la articulación, sin utilización de ejes intermedios, ya que éstos introducen defectos negativos como juego angular, rozamiento, etc. Que impiden alcanzar la precisión y velocidad requeridas.

Ventajas:

- Posicionamiento rápido y preciso pues evitan los rozamientos de transmisiones y reductores.
- Mayor control del sistema a costa de una mayor complejidad.
- Simplifican el sistema mecánico al eliminarse el reductor.

2.4 ACTUADORES

Los actuadores son dispositivos de salida que reciben la orden o señal desde el microcontrolador del robot manipulador, provocando una salida necesaria *para activar a un elemento final de control como lo son las válvulas*. Como consecuencia pueden *provocar un efecto sobre un proceso automatizado*.

Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

Los actuadores son *capaces de generar una fuerza a partir de líquidos, de energía eléctrica y gaseosa; por lo que existen diferentes tipos: de actuadores: Hidráulicos, eléctricos, neumáticos y electrónicos principalmente.*

2.5 ELEMENTOS TERMINALES

Son los encargados de interactuar directamente con el entorno del robot. Pueden ser tanto elementos de aprehensión como herramientas, en muchos casos diseñadas para cada tipo de trabajo. Para las aplicaciones industriales, las capacidades del robot básico deben aumentarse por medio de dispositivos adicionales. Podríamos denominar a estos dispositivos como los periféricos del robot, incluyen el instrumental que se une a la muñeca del robot y a los sistemas sensores que permiten al robot interactuar con su entorno.

En la figura 21 se observan algunos ejemplos de elementos terminales.



Figura 21. Elementos terminales.

Se pueden clasificar de acuerdo a su utilidad:

- Sujeción
- Operación
- Manipulación
- Montaje
- Especiales

Aunque también se caracterizan por el dispositivo de agarre, que puede ser mecánico, de ventosas, adhesivo o con ganchos.

Es la mano que le proporciona al robot más posibilidades de movimiento, en este tipo de herramientas pueden encontrarse tenazas o garras., pues son dispositivos de agarre y sujeción – gripping mechanisms, los cuales poseen capacidad de sujetar, orientar y operar sobre las piezas manipuladas, dependiendo de la aplicación específica del robot. En ocasiones se coloca una herramienta de soldadura, pintura, corte, etc. [2].

La flexibilidad en el trabajo del robot se potencia con la variedad de garras o dispositivos que se pueden acoplar a su muñeca.

Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

La capacidad de realizar un trabajo por las manos del robot está condicionada al número de grados de libertad del manipulador, ésta es una condición que se define al diseñar el robot.

A continuación, en la figura 22 se presentan varios esquemas de mecanismos típicos empleados como efector final.

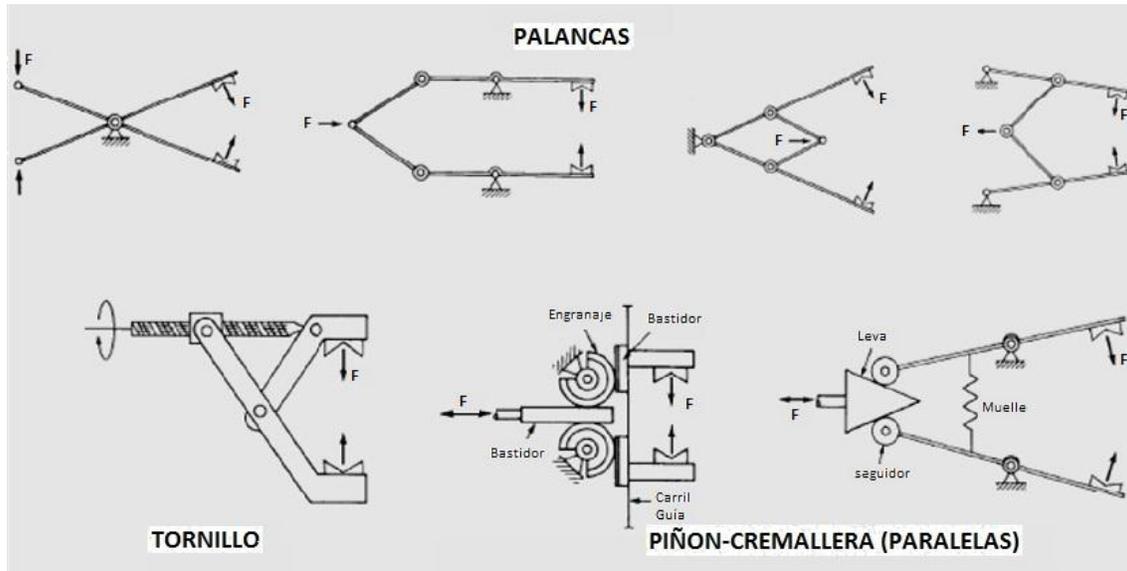


Figura 22. Esquemas de efectores finales.

Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

CAPÍTULO 3. CONSTRUCCIÓN DEL ROBOT

Para poder construir el robot, primero se debe diseñar, manufacturar y finalmente ensamblar las piezas.

3.1 DISEÑO DE LA ESTRUCTURA

El diseño de la estructura se hizo pensando en mantener un bajo peso, pero conservando la mayor rigidez posible en ella.

En este proyecto se hicieron dos diseños, uno de lamina de aluminio calibre 28, mientras que el otro diseño fue hecho de acrílico; el primer diseño fue descartado debido a que la rigidez en la estructura fue muy poco favorable; en el segundo diseño, a pesar de tener mayor peso, conservaba mejor rigidez.

En la figura 23 se muestra el primer diseño de la estructura del robot.

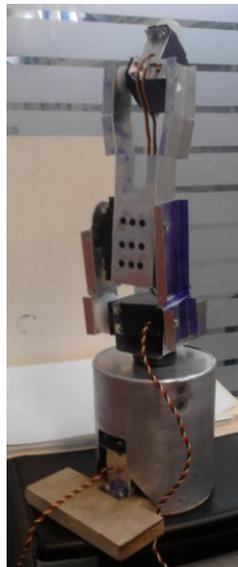
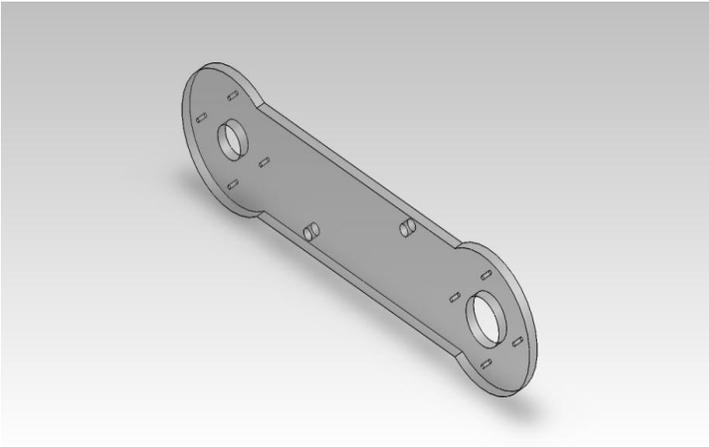


Figura 23. Robot de aluminio.

Para el diseño hecho en acrílico, se hizo un análisis de deformación en el software de Solid Works para tener mayor seguridad en la resistencia de las piezas.

Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico



Descripción

El eslabón 1 está conformado de dos piezas en forma de hueso, pero una de ellas (la que aparece en la figura de arriba) tiene dos agujeros que hacen que la resistencia de la pieza disminuya (comparada con la resistencia del otro hueso).

Por ello, el análisis de esfuerzos se hace sobre esta pieza, ya que tal vez presente puntos críticos debido a que sostendrá el peso de todo el brazo extendido y de una carga extra en su extremo.

Simulación de pieza en forma de Hueso

Diseñador: Solidworks
Nombre de estudio: SimulationXpress Study
Tipo de análisis: Estático

Tabla de contenido

- Descripción
- Suposiciones
- Información del modelo
- Propiedades del material
- Cargas y sujeciones
- Información de malla
- Resultados del estudio

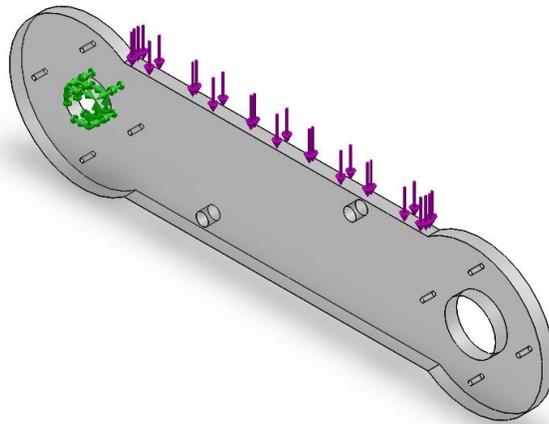
Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

Suposiciones

Se ha supuesto una sujeción en el agujero donde están las flechas de color verde, ya que es ahí en donde va atornillado el rotor del servomotor grande y porque ahí será el punto crítico ya que soportará todo el peso del brazo extendido.

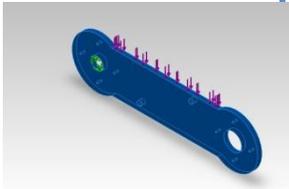
Las flechas de color violeta, simulan el peso total del brazo extendido, el cual actúa como carga distribuida a lo largo de toda la pieza.

Información de modelo



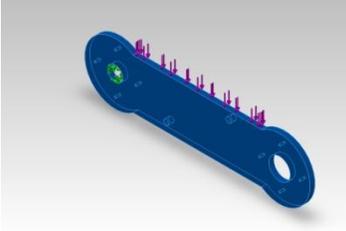
Nombre del modelo: Hueso 2
Configuración actual: Predeterminado

Sólidos

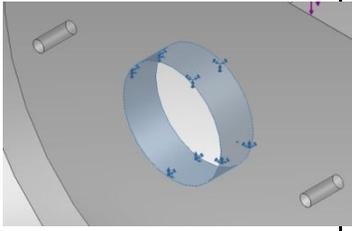
Nombre de documento y referencia	Tratado como	Propiedades volumétricas	Ruta al documento
Saliente-Extruir1 	Sólido	Masa:0.0312853 lb Volumen:0.721646 in ³ Densidad:0.0433528 lb/in ³ Peso:0.0312641 lbf	J:\Dibujos de robot 5GDL\Análisis de esfuerzos\Hueso 2.SLDPRT

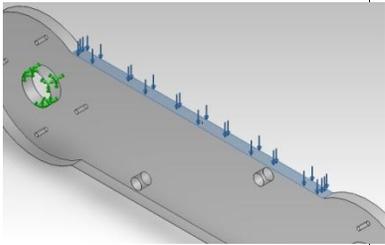
Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

Propiedades de material

Referencia de modelo	Propiedades	Componentes
	<p>Nombre: Acrílico (Impacto medio-alto)</p> <p>Tipo de modelo: Isotrópico elástico lineal</p> <p>Criterio de error predeterminado: Desconocido</p> <p>Límite elástico: 2.06807e+008 N/m²</p> <p>Límite de tracción: 5.17017e+008 N/m²</p>	<p>Sólido 1(Saliente-Extruir1)(Hueso 2)</p>

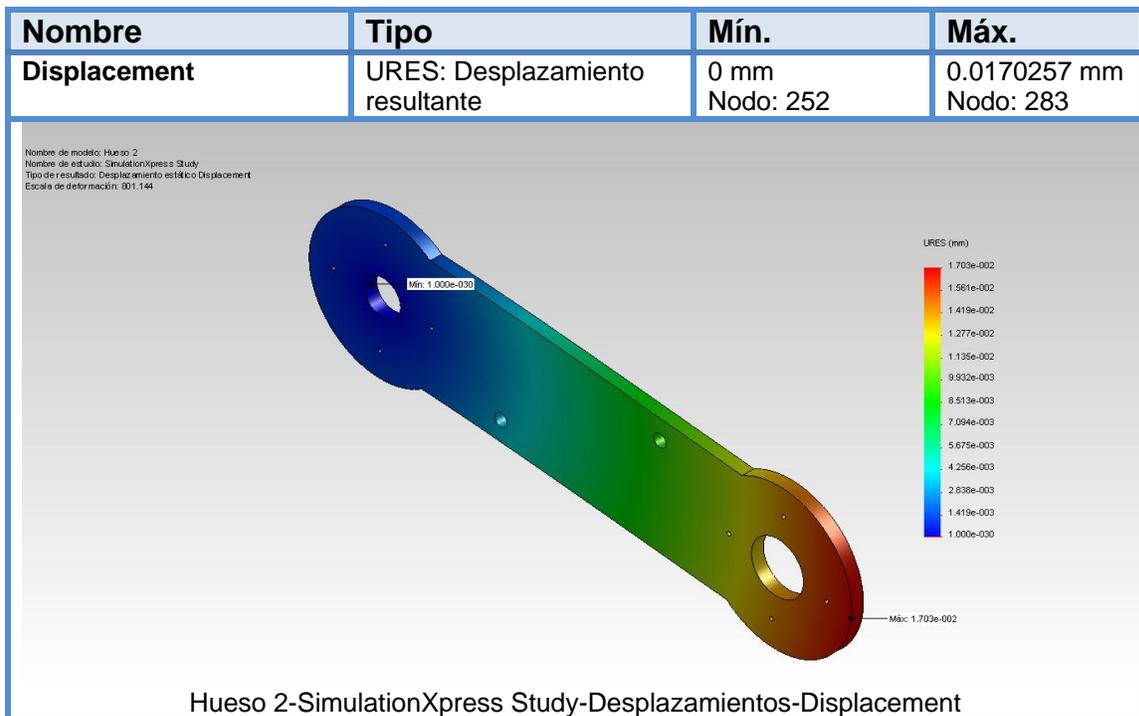
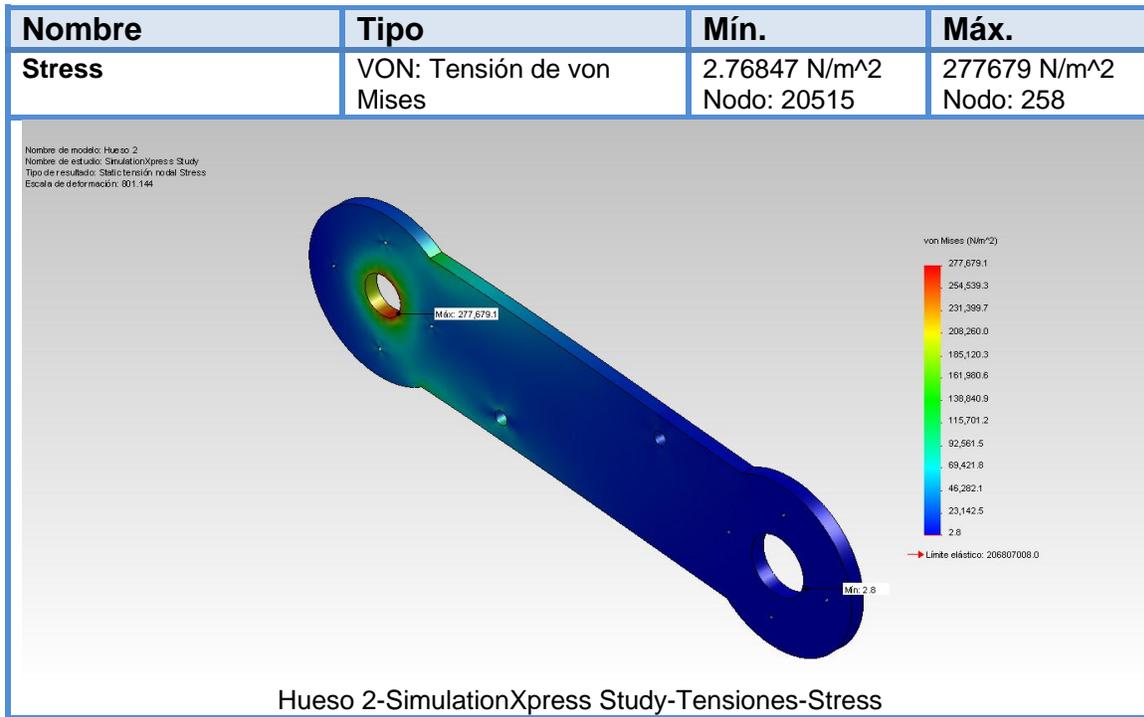
Cargas y sujeciones

Nombre de sujeción	Imagen de sujeción	Detalles de sujeción
Fijo-1		<p>Entidades: 1 cara(s)</p> <p>Tipo: Geometría fija</p>

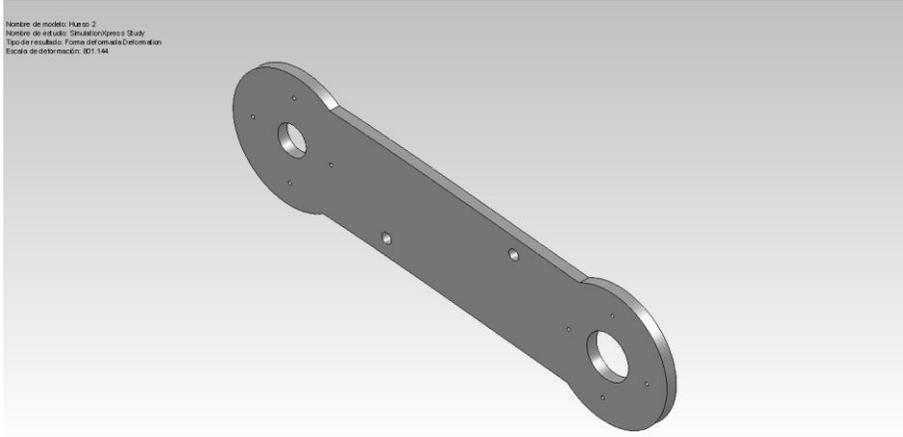
Nombre de carga	Cargar imagen	Detalles de carga
Fuerza-1		<p>Entidades: 1 cara(s)</p> <p>Tipo: Aplicar fuerza normal</p> <p>Valor: 1.0758 N</p>

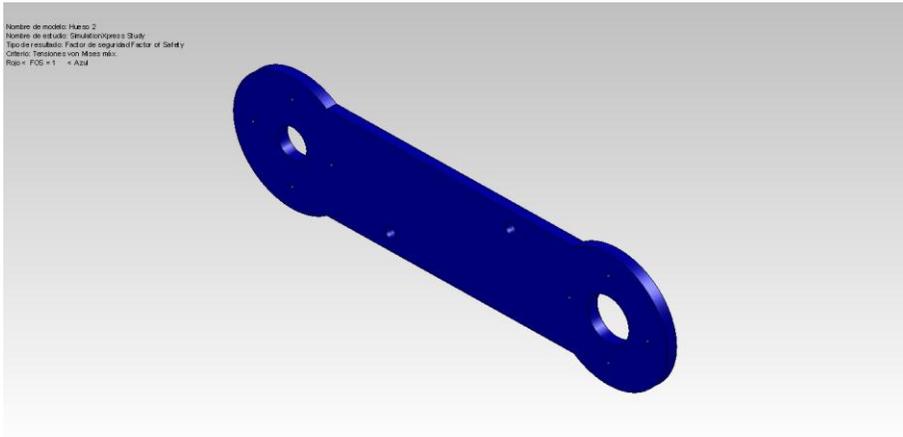
Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

Resultados del estudio

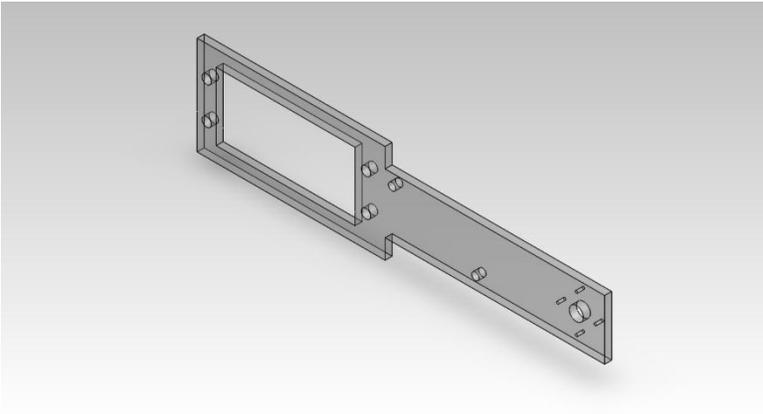


Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

Nombre	Tipo
Deformation	Forma deformada
 <p style="font-size: small; margin-top: 5px;"> Nombre de modelo: Hueso 2 Nombre de estudio: SimulationXpress Study Tipo de resultado: Forma del elemento Deformation Escala de deformación: 801.144 </p> <p style="margin-top: 10px;">Hueso 2-SimulationXpress Study-Desplazamientos-Deformation</p>	

Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
Factor of Safety	Tensión de von Mises máx.	744.77 Nodo: 258	7.47008e+007 Nodo: 20515
 <p style="font-size: small; margin-top: 5px;"> Nombre de modelo: Hueso 2 Nombre de estudio: SimulationXpress Study Tipo de resultado: Factor de seguridad/ Factor of Safety Criterio: Tensiones von Mises máx. Paso: FOS = 1 - Azul </p> <p style="margin-top: 10px;">Hueso 2-SimulationXpress Study-Factor de seguridad-Factor of Safety</p>			

Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico



Simulación de Pared para servo mediano

Diseñador: Solidworks
Nombre de estudio: SimulationXpress Study
Tipo de análisis: Estático

Tabla de contenidos

- Descripción
- Suposiciones
- Información del modelo
- Propiedades del material
- Cargas y sujeciones
- Información de malla
- Resultados del estudio

Descripción

El eslabón 2 se conforma de dos piezas de forma rectangular, pero una de ellas (la que aparece en la figura de arriba) tiene un agujero del tamaño del servomotor mediano, el cual disminuye la resistencia de la pieza (comparada con la resistencia de la otra pieza).

Por ello, el análisis de esfuerzos se hace sobre esta, ya que tal vez presente puntos críticos debido a que sostendrá el peso de los dos servomotores chicos y una carga extra en el extremo del brazo.

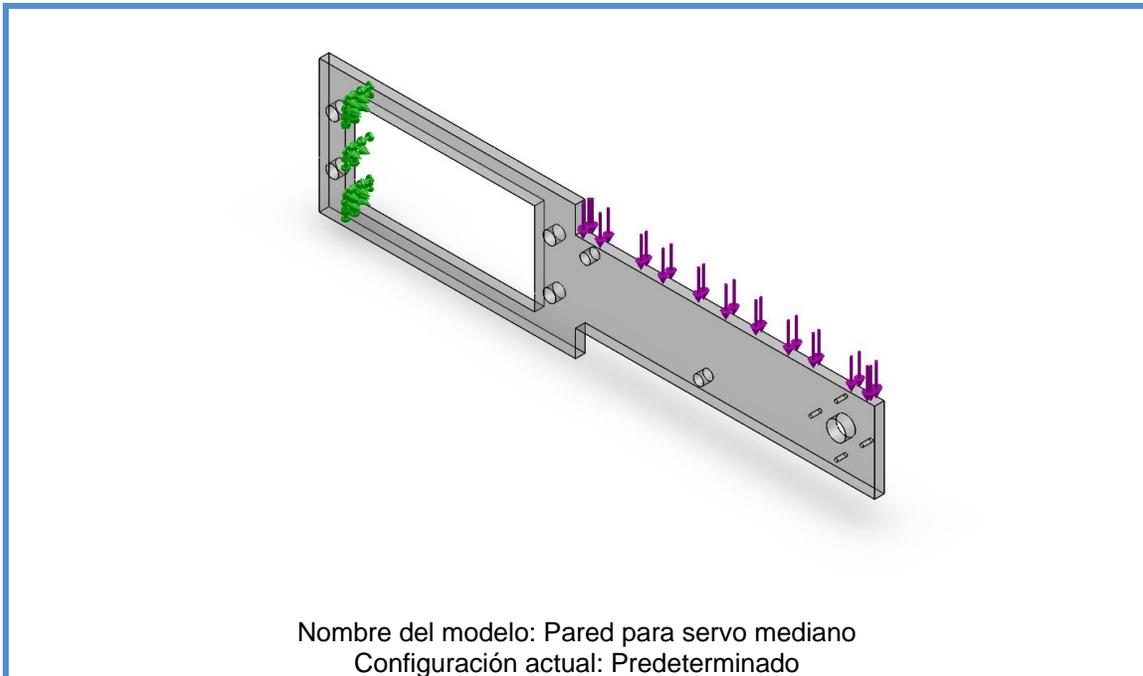
Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

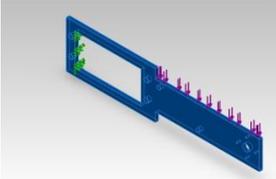
Suposiciones

Se ha supuesto una sujeción en uno de los lados interiores del agujero de forma rectangular (donde están las flechas de color verde), ya que el ancho de este lado es muy delgado, al igual que el espesor de las piezas, además ahí lleva dos barrenos donde se atornilla uno de los lados del servomotor mediano lo cual probablemente sea uno de los puntos críticos ya que soportará el peso de los dos servomotores chicos.

Por otro lado, las flechas de color violeta, simulan el peso de los dos servomotores, el cual actúa como carga distribuida a lo largo de la pieza.

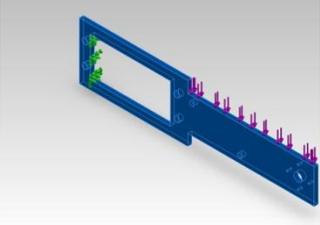
Información de modelo



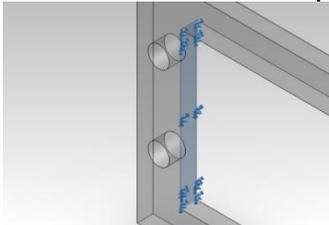
Sólidos			
Nombre de documento y referencia	Tratado como	Propiedades volumétricas	Ruta al documento/Fecha de modificación
 Saliente-Extruir1	Sólido	Masa:0.0311496 lb Volumen:0.718515 in ³ Densidad:0.0433528 lb/in ³ Peso:0.0311285 lbf	J:\Dibujos de robot 5GDL\Análisis de esfuerzos\Pared para servo mediano.SLDPRT

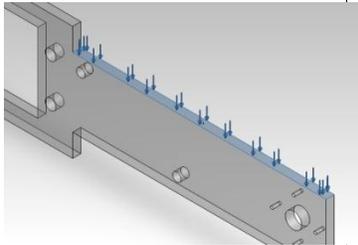
Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

Propiedades de material

Referencia de modelo	Propiedades	Componentes
	<p>Nombre: Acrílico (Impacto medio-alto)</p> <p>Tipo de modelo: Isotrópico elástico lineal</p> <p>Criterio de error predeterminado: Desconocido</p> <p>Límite elástico: 2.06807e+008 N/m²</p> <p>Límite de tracción: 5.17017e+008 N/m²</p>	<p>Sólido 1(Saliente-Extruir1)(Pared para servo mediano)</p>

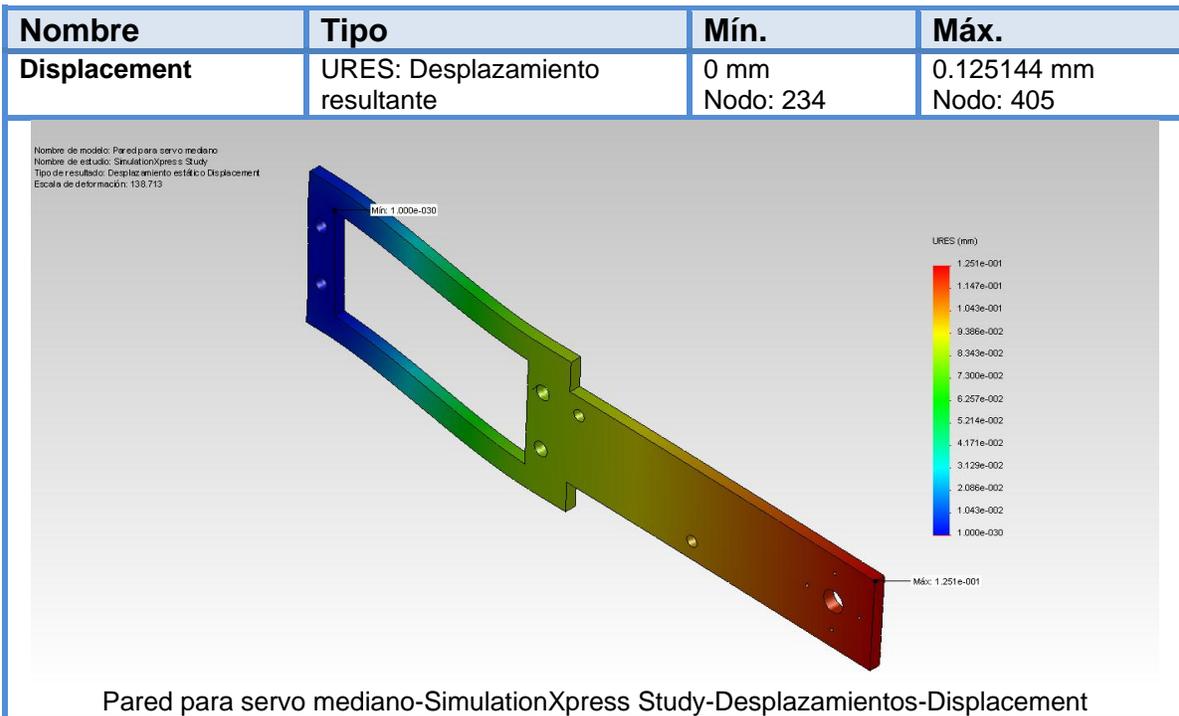
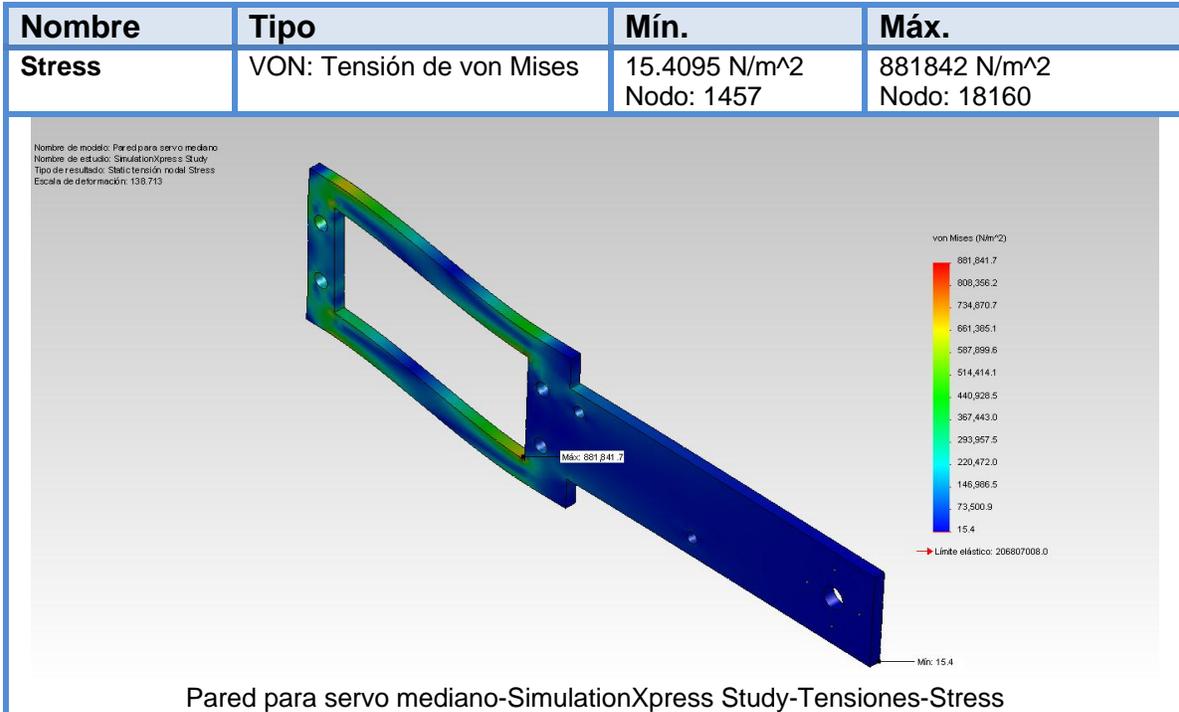
Cargas y sujeciones

Nombre de sujeción	Imagen de sujeción	Detalles de sujeción
Fijo-1		<p>Entidades: 1 cara(s)</p> <p>Tipo: Geometría fija</p>

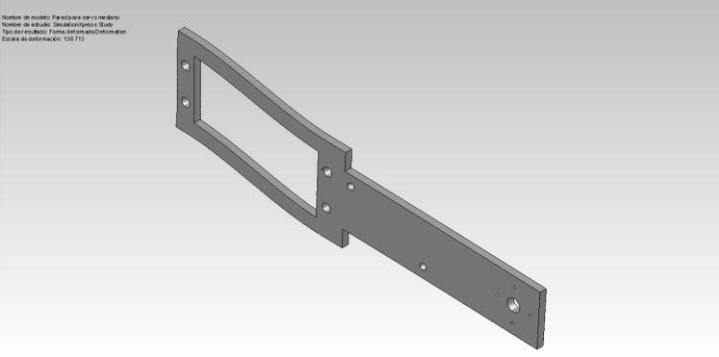
Nombre de carga	Cargar imagen	Detalles de carga
Fuerza-1		<p>Entidades: 1 cara(s)</p> <p>Tipo: Aplicar fuerza normal</p> <p>Valor: 0.8373 N</p>

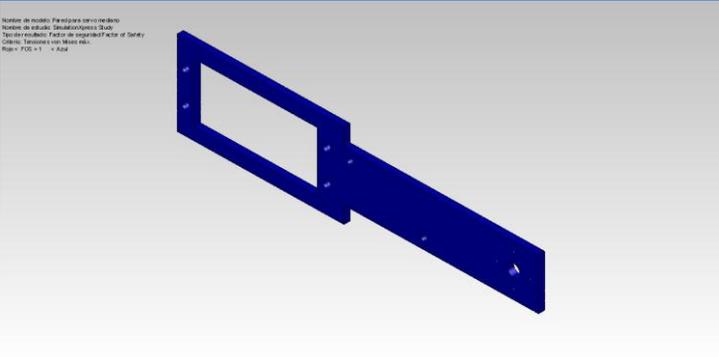
Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

Resultados del estudio



Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

Nombre	Tipo
Deformation	Forma deformada
	
Pared para servo mediano-SimulationXpress Study-Desplazamientos-Deformation	

Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
Factor of Safety	Tensión de von Mises máx.	234.517 Nodo: 18160	1.34208e+007 Nodo: 1457
			
Pared para servo mediano-SimulationXpress Study-Factor de seguridad-Factor of Safety			

Conclusión

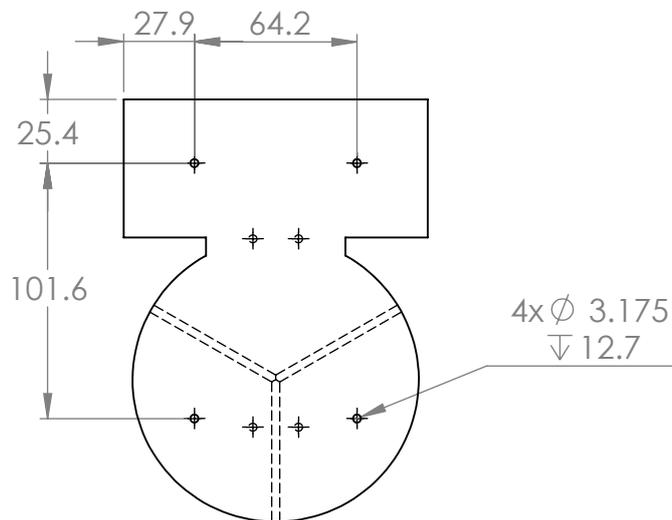
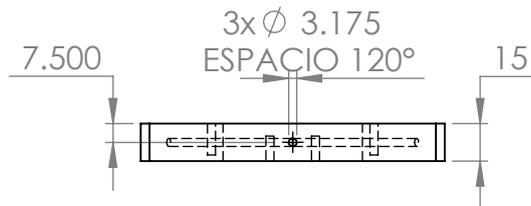
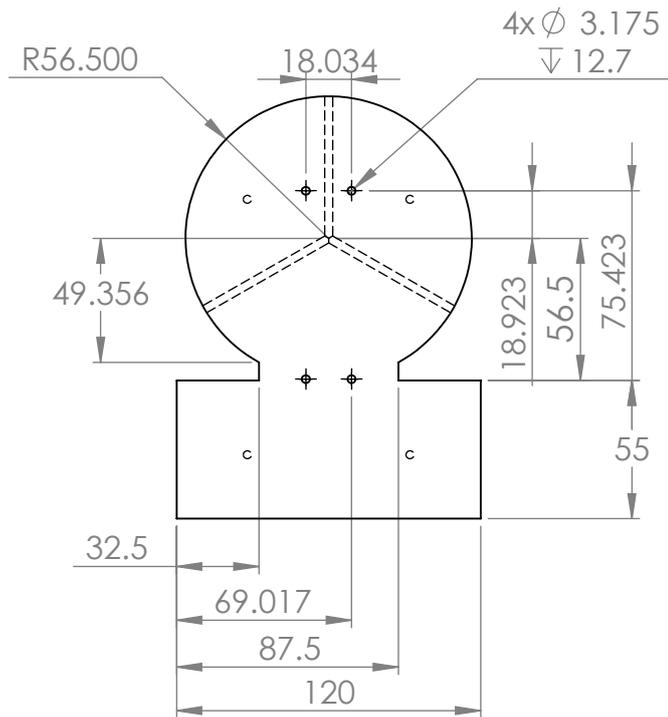
En el análisis de tensión de las piezas, se observó que al agregar las fuerzas correspondientes a los pesos, las piezas presentan poca deformación.

Haciendo una comparación entre las dos piezas, determinamos que la más crítica es la que lleva por nombre “Pared para servomotor mediano”, ya que presenta mayor deformación respecto a la otra; además, vemos que en su análisis de tensión solo tiene un punto en rojo casi imperceptible, lo cual indica que en ese punto se tiene el mayor esfuerzo, pero a pesar de ello, la pieza es bastante resistente, pues en el análisis de desplazamiento, solo se desplaza 0.1mm.

Gracias a este análisis, hemos determinado que las piezas son viables para la estructura del robot.

3.2 PLANOS DEL ROBOT

Los dibujos y planos del robot se hicieron en SolidWorks y en sistema Europeo.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

FECHA: Abril 2012

ELABORÓ:
Soriano Colín Germán
Valencia Ramos Jhonatan

ASESOR: Ing. Romy Pérez Moreno

COTAS EN MM

TÍTULO:

Base del robot

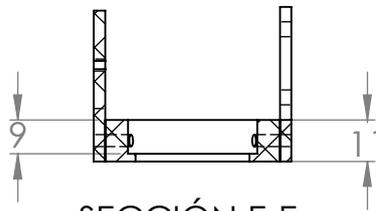
ESCALA: 1:3

ROBOT 5GDL

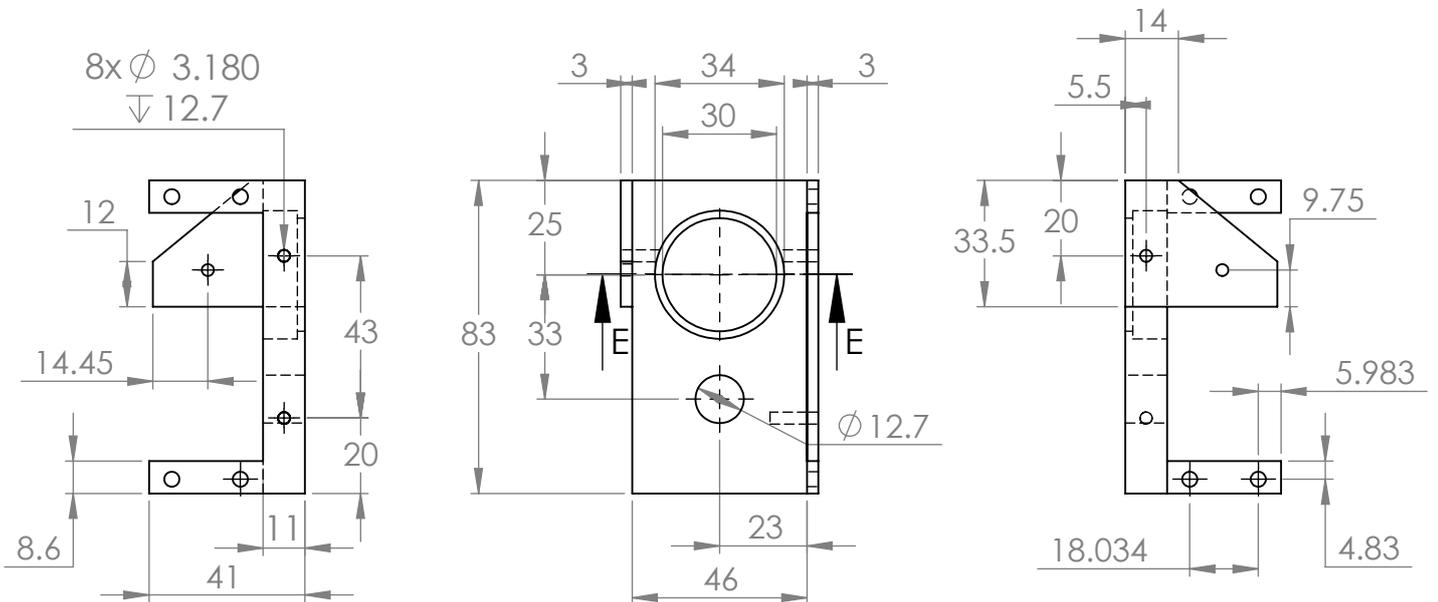


A4

HOJA 1 DE 16



SECCIÓN E-E
ESCALA 1 : 2



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

FECHA: Abril 2012

ELABORÓ:
Soriano Colín Germán
Valencia Ramos Jhonatan

ASESOR: Ing. Romy Pérez Moreno

COTAS EN MM

TÍTULO:

Base del servo grande

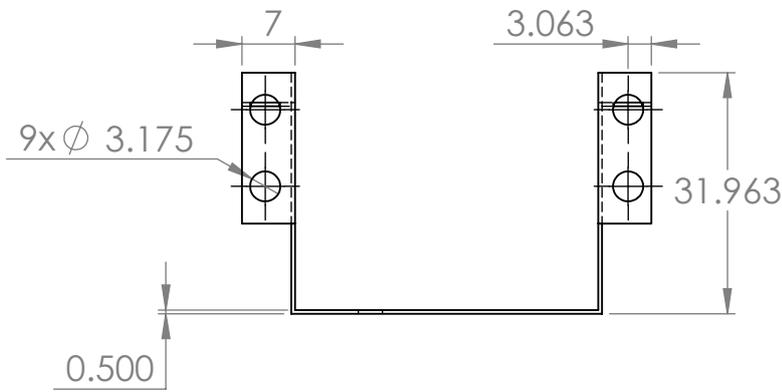
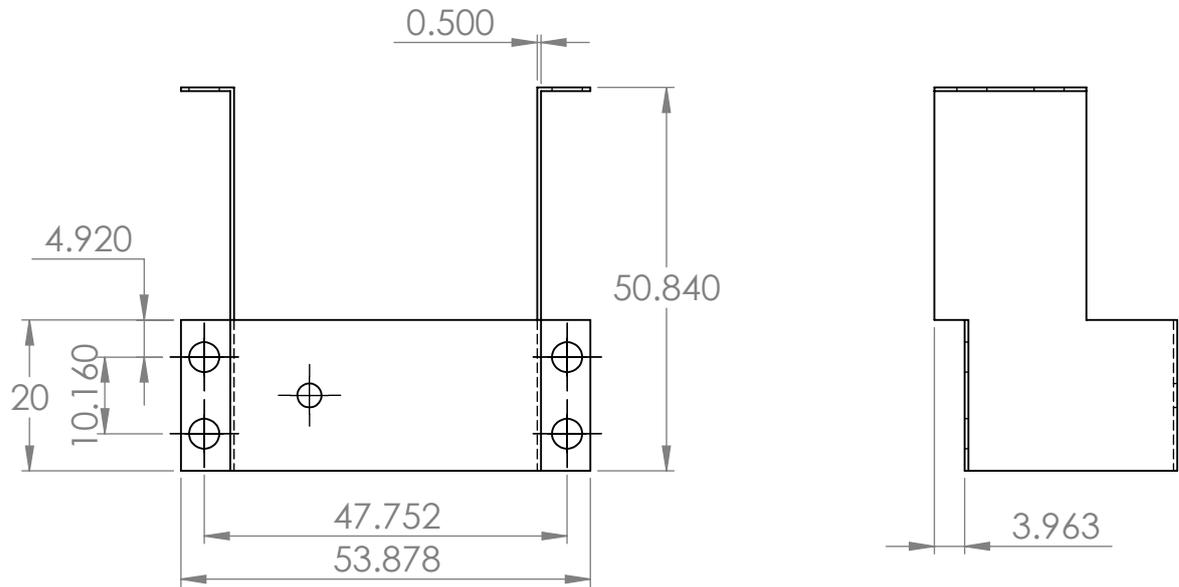
ESCALA: 1:2

ROBOT 5GDL



A4

HOJA 2 DE 16



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

FECHA : Abril 2012

ELABORÓ:
Soriano Colín Germán
Valencia Ramos Jhonatan

ASESOR: Ing. Romy Pérez Moreno

COTAS EN MM

TÍTULO:

Contenedor para
Servomotores
chicos

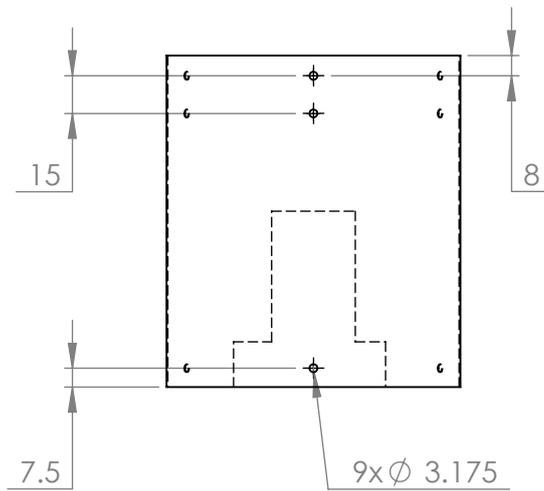
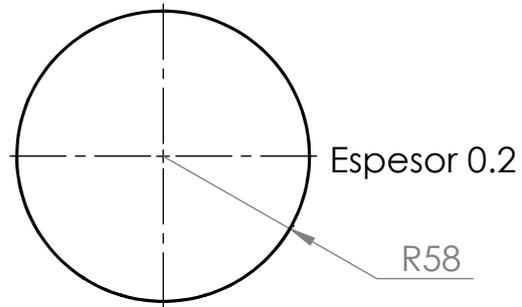
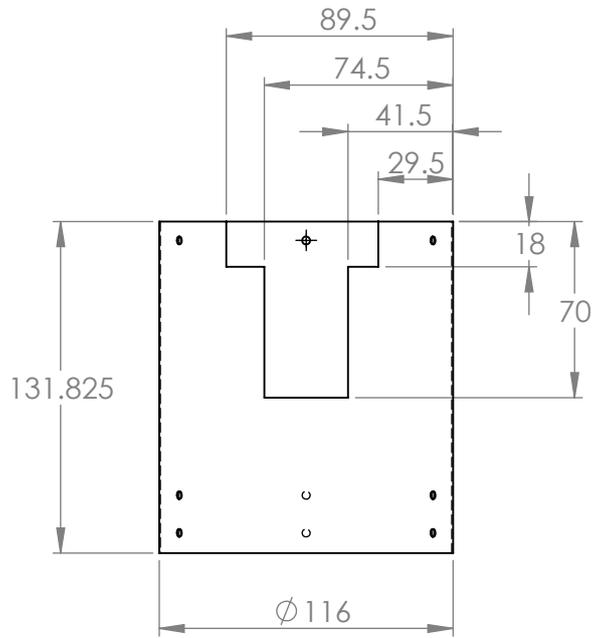
ESCALA:1:1

ROBOT 5GDL



A4

HOJA 3 DE 16



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

FECHA: Abril 2012

ELABORÓ:
Soriano Colín Germán
Valencia Ramos Jhonatan

ASESOR: Ing. Romy Pérez Moreno

COTAS EN MM

TÍTULO:

Cuerpo del robot

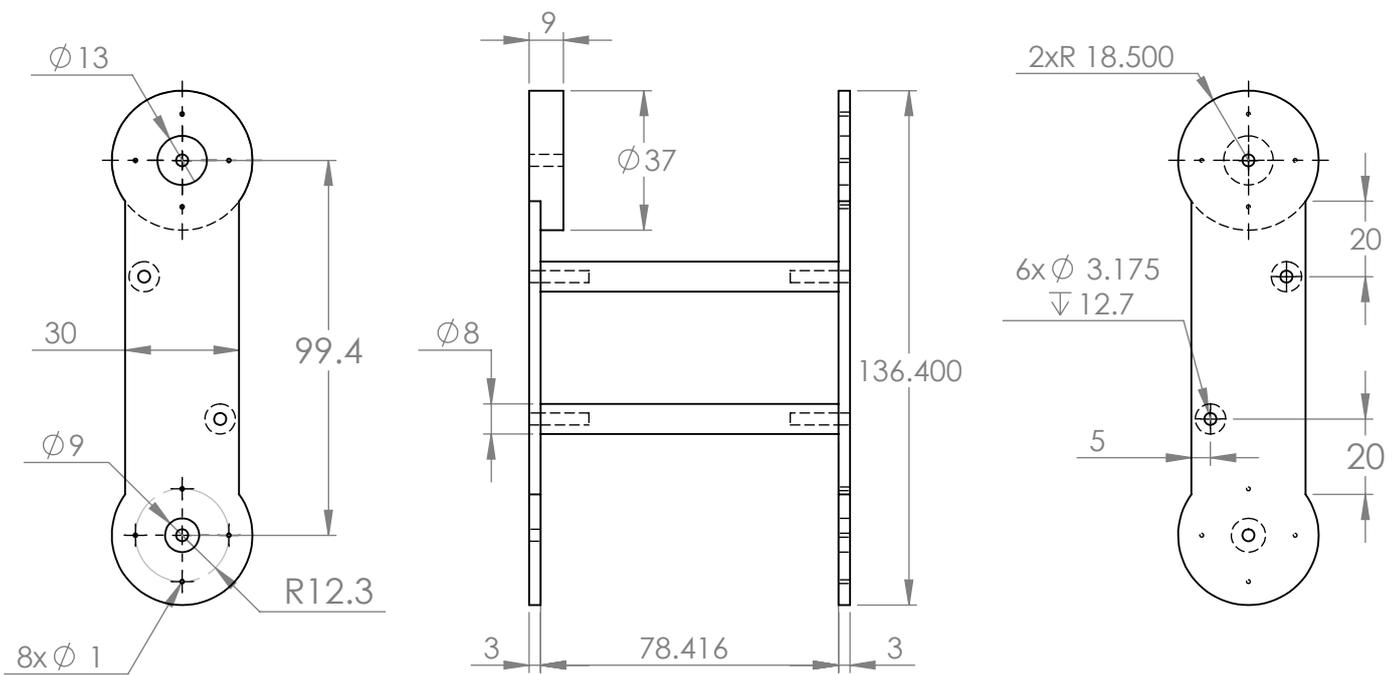
ESCALA: 1:3

ROBOT 5GDL



A4

HOJA 4 DE 16



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

FECHA: Abril 2012

TÍTULO:

ROBOT 5GDL

ELABORÓ:
Soriano Colín Germán
Valencia Ramos Jhonatan

Eslabón 1



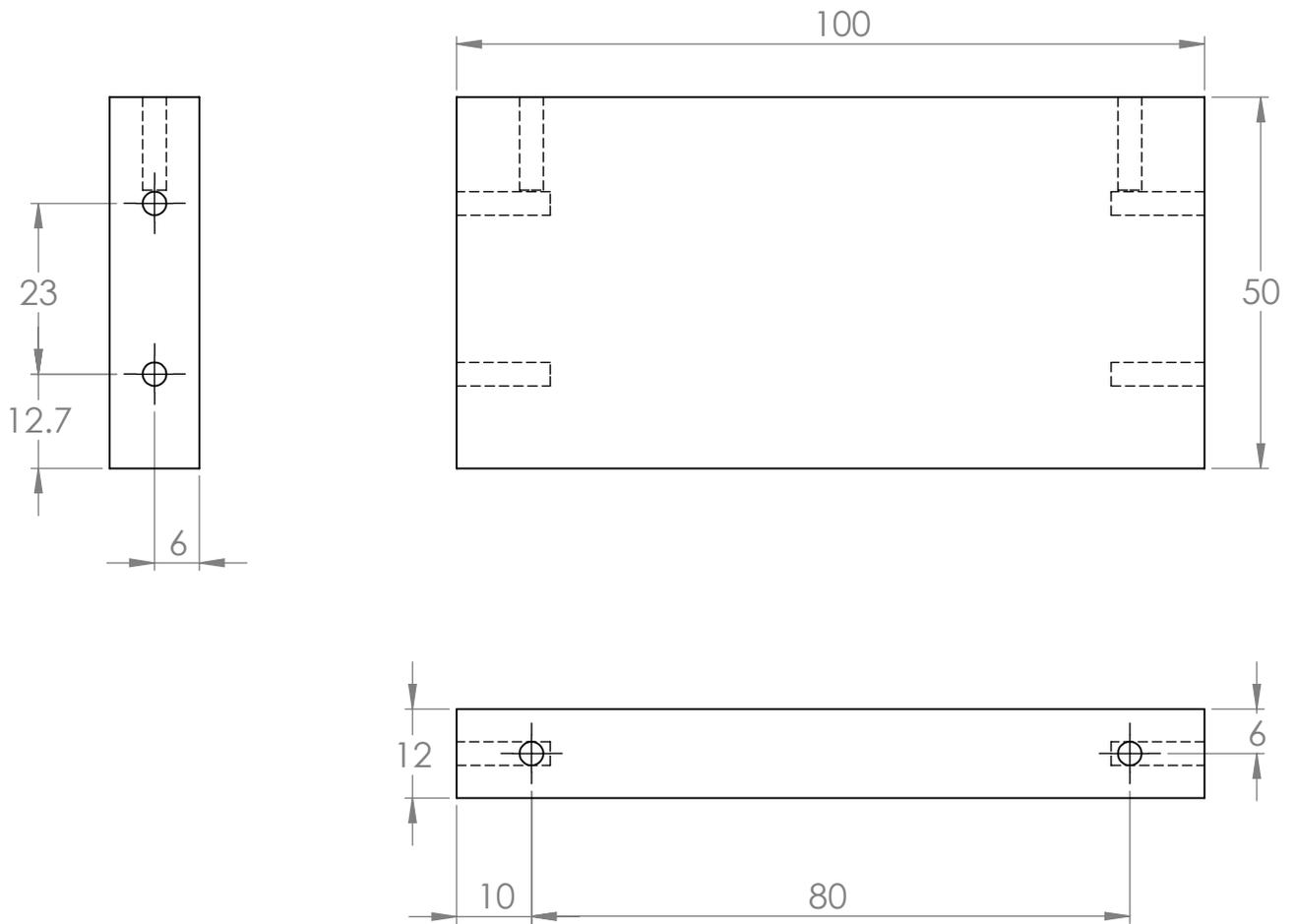
ASESOR: Ing. Romy Pérez Moreno

A4

COTAS EN MM

ESCALA: 1:2

HOJA 5 DE 16



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

FECHA: Abril 2012

ELABORÓ:
Soriano Colín Germán
Valencia Ramos Jhonatan

ASESOR: Ing. Romy Pérez Moreno

COTAS EN MM

TÍTULO:

Laterales para caja
de acrílico

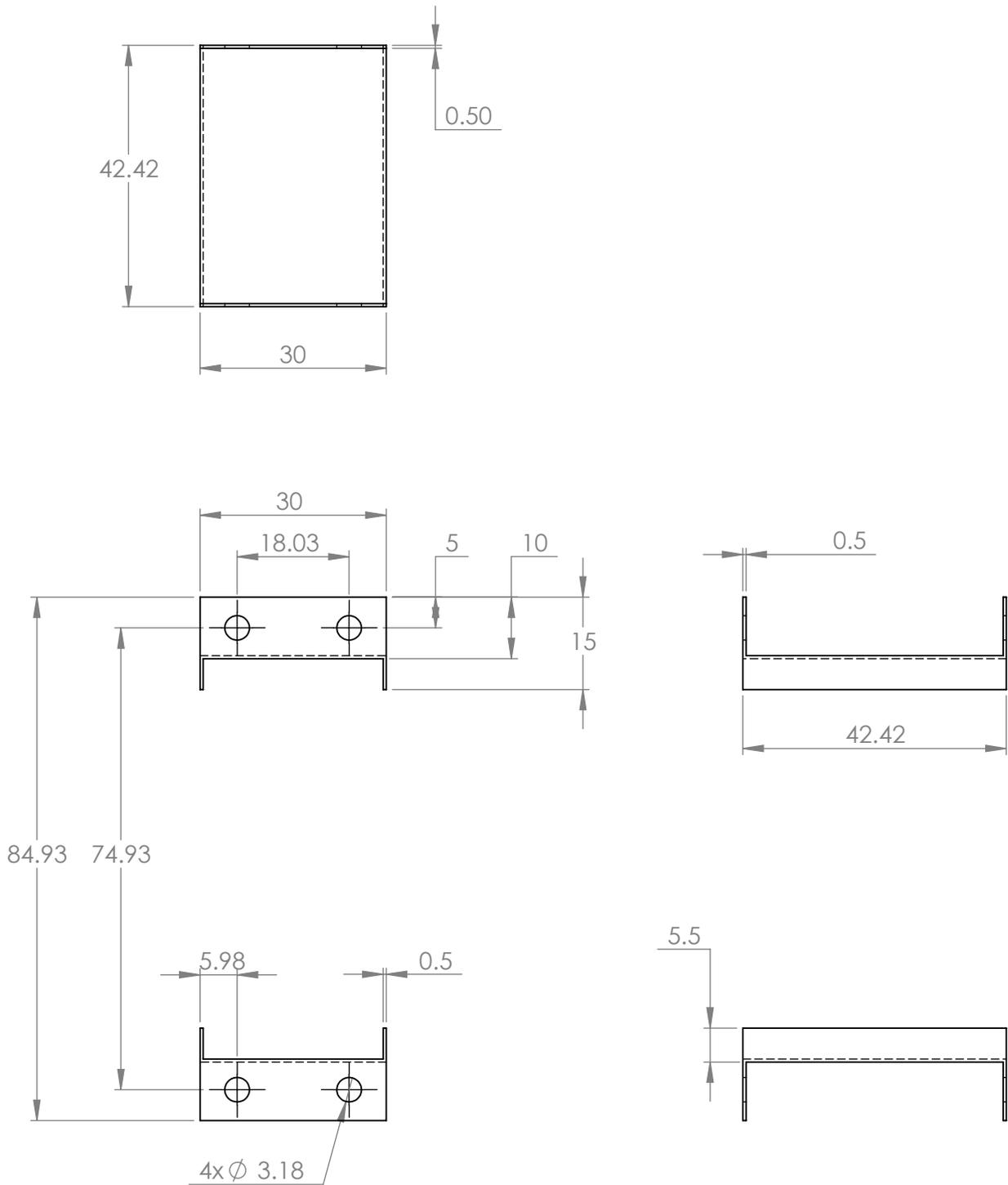
ROBOT 5GDL



A4

ESCALA: 1:1

HOJA 7 DE 16



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

FECHA: Abril 2012

ELABORÓ:
Soriano Colín Germán
Valencia Ramos Jhonatan

ASESOR: Ing. Romy Pérez Moreno

COTAS EN MM

TÍTULO:

Laterales para el
Servomotor
grande

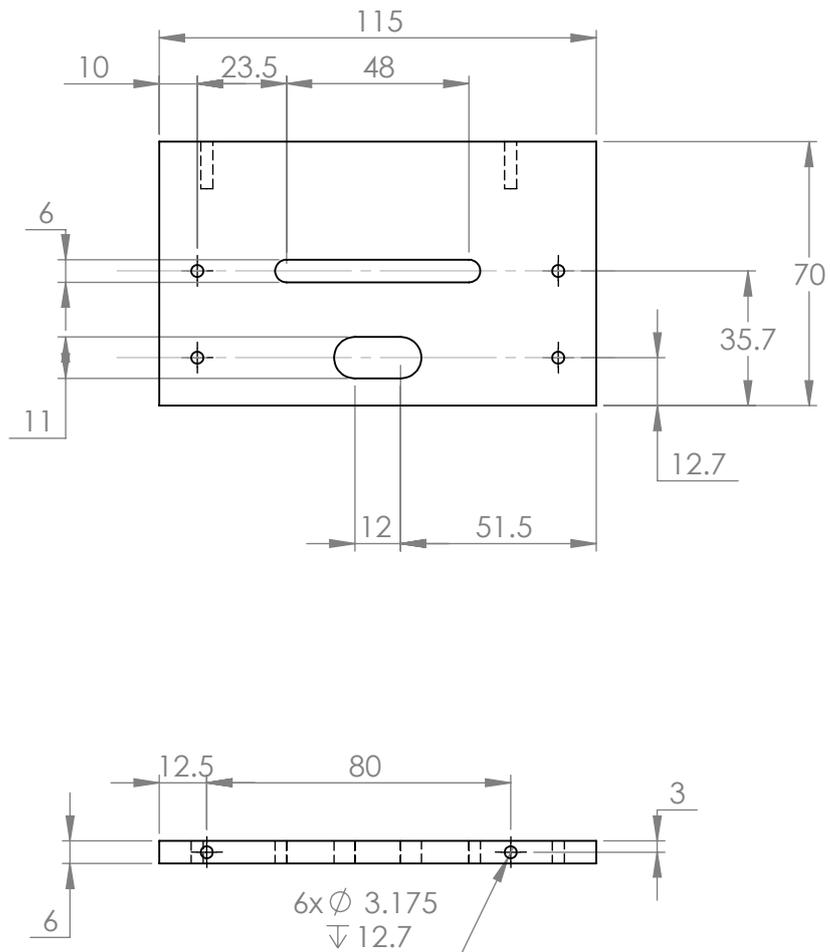
ROBOT 5GDL



A4

ESCALA: 1:1

HOJA 8 DE 16



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

FECHA: Abril 2012

ELABORÓ:
Soriano Colín Germán
Valencia Ramos Jhonatan

ASESOR: Ing. Romy Pérez Moreno

COTAS EN MM

TÍTULO:

Pared frontal de
caja de acrílico

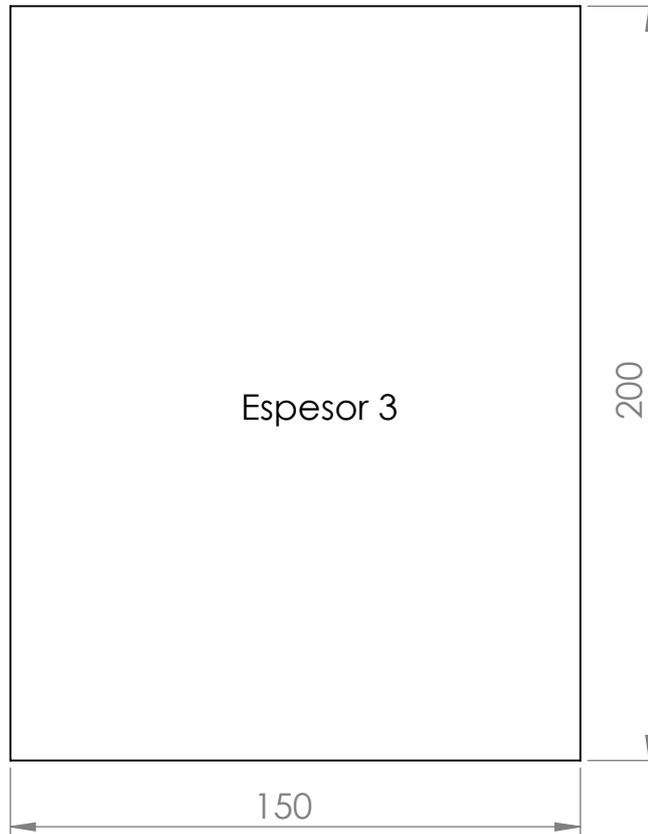
ESCALA: 1:2

ROBOT 5GDL



A4

HOJA 9 DE 16



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

FECHA: Abril 2012

ELABORÓ:
Soriano Colín Germán
Valencia Ramos Jhonatan

ASESOR: Ing. Romy Pérez Moreno

COTAS EN MM

TÍTULO:

Pared inferior de
caja de acrílico

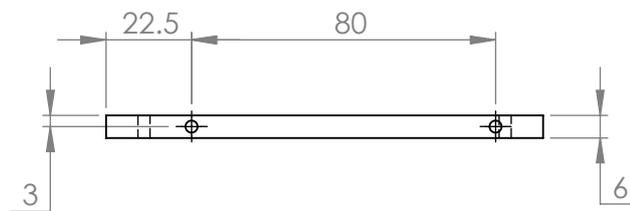
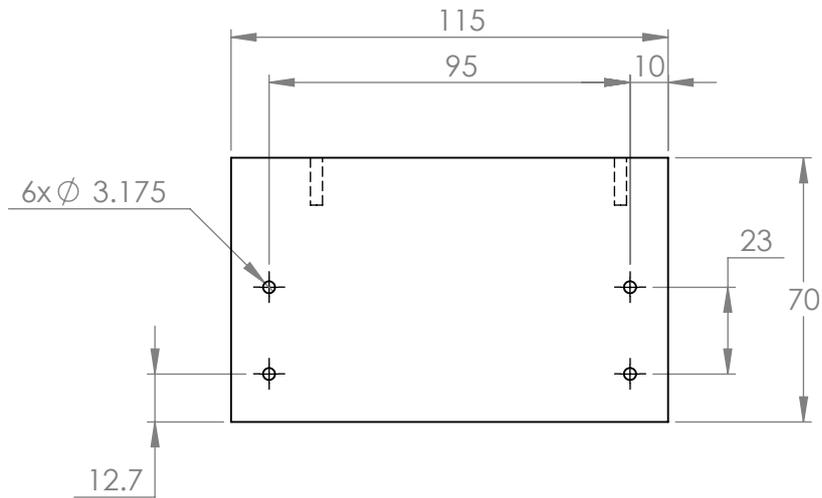
ESCALA: 1:2

ROBOT 5GDL



A4

HOJA 10 DE 16



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

FECHA: Abril 2012

ELABORÓ:
Soriano Colín Germán
Valencia Ramos Jhonatan

ASESOR: Ing. Romy Pérez Moreno

COTAS EN MM

TÍTULO:

Pared posterior de
caja de acrílico

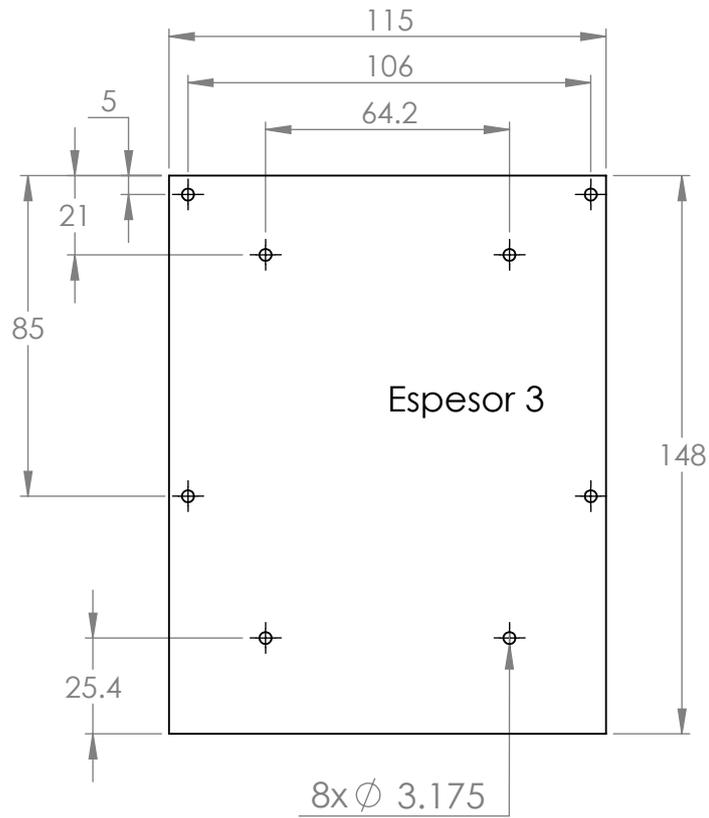
ESCALA: 1:2

ROBOT 5GDL



A4

HOJA 11 DE 16



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

FECHA: Abril 2012

ELABORÓ:
Soriano Colín Germán
Valencia Ramos Jhonatan

ASESOR: Ing. Romy Pérez Moreno

COTAS EN MM

TÍTULO:

Pared superior de
caja de acrílico

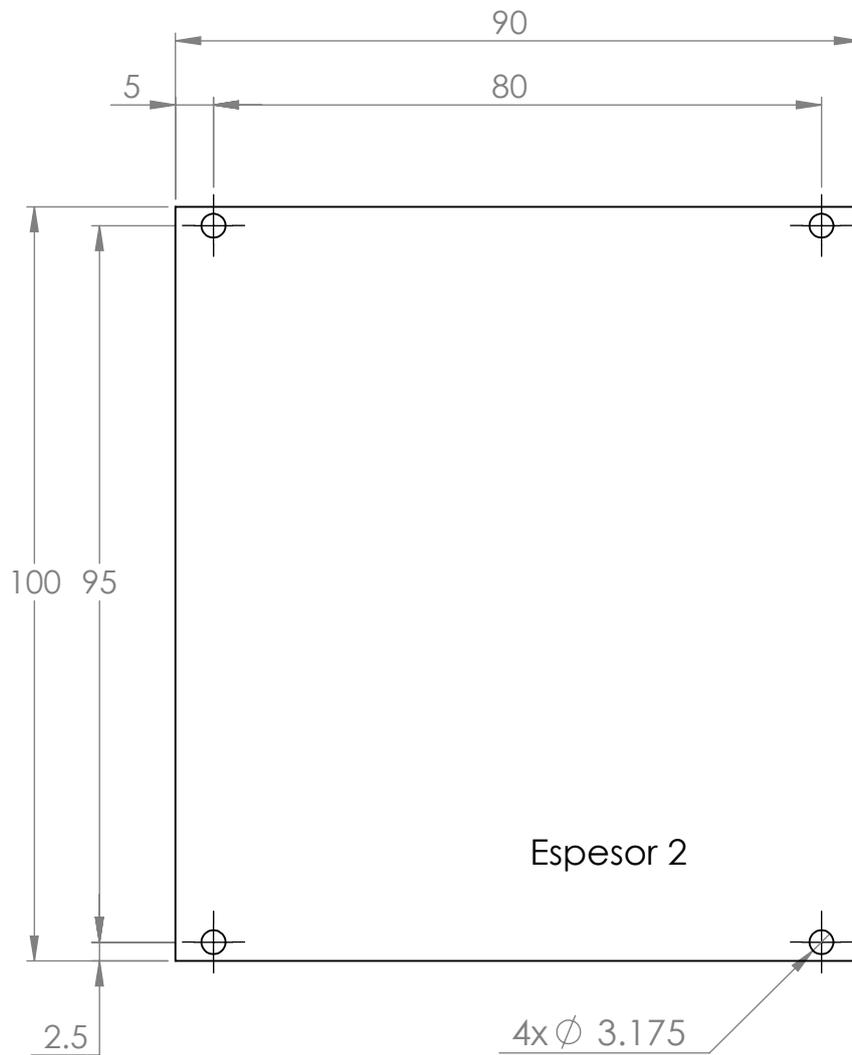
ESCALA: 1:2

ROBOT 5GDL



A4

HOJA 12 DE 16



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

FECHA: Abril 2012

ELABORÓ:
Soriano Colín Germán
Valencia Ramos Jhonatan

ASESOR: Ing. Romy Pérez Moreno

COTAS EN MM

TÍTULO:

Placa de cobre

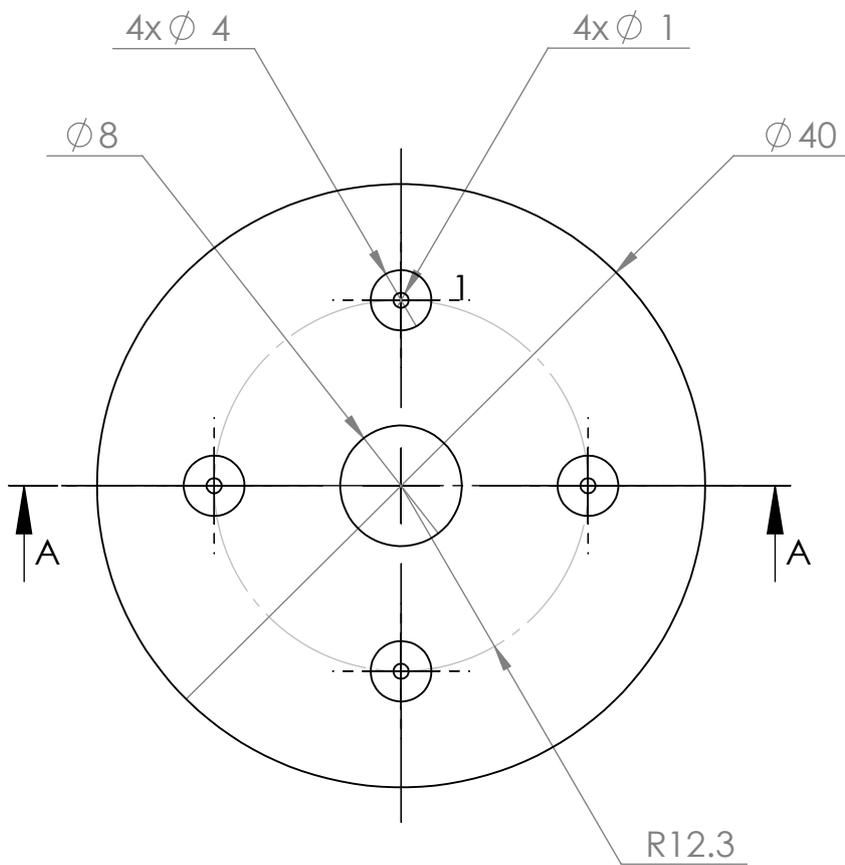
ESCALA: 1:1

ROBOT 5GDL



A4

HOJA 13 DE 16



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

FECHA: Abril 2012

ELABORÓ:
Soriano Colín Germán
Valencia Ramos Jhonatan

ASESOR: Ing. Romy Pérez Moreno

COTAS EN MM

TÍTULO:

Rotor de madera para
servomotor grande

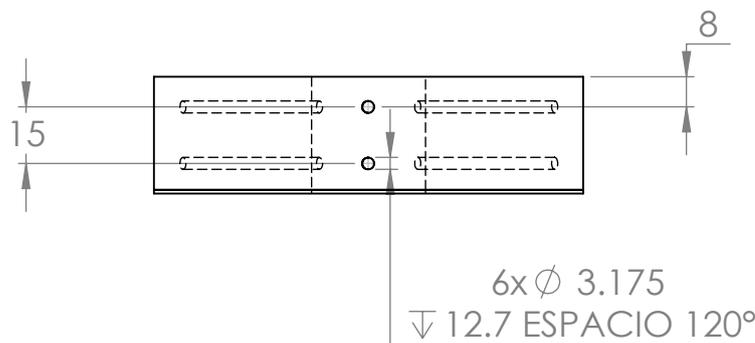
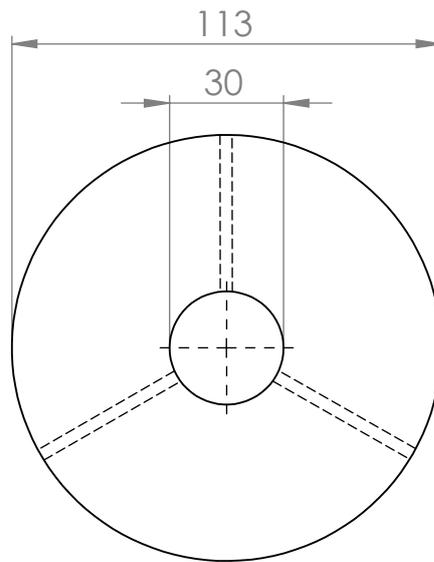
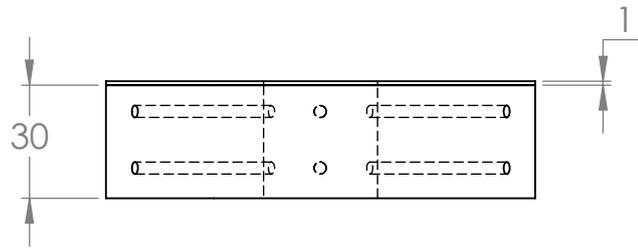
ESCALA:2:1

ROBOT 5GDL



A4

HOJA 14 DE 16



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

FECHA: Abril 2012

ELABORÓ:
 Soriano Colín Germán
 Valencia Ramos Jhonatan

ASESOR: Ing. Romy Pérez Moreno

COTAS EN MM

tÍTULO:

Tapa de aluminio y
 rueda de madera

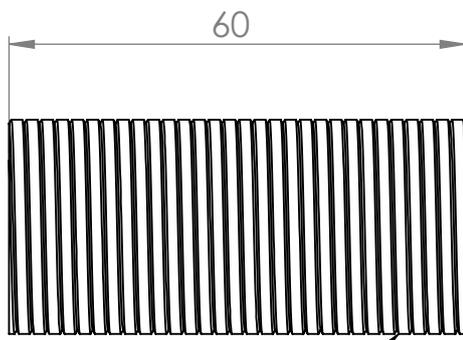
ESCALA: 1:2

ROBOT 5GDL

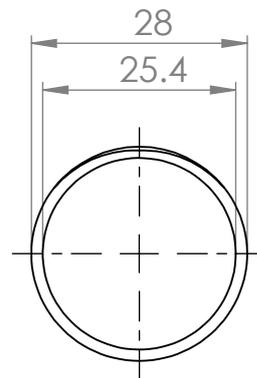


A4

HOJA 15 DE 16



M 28 x 1



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

FECHA: Abril 2012

ELABORÓ:
Soriano Colín Germán
Valencia Ramos Jhonatan

ASESOR: Ing. Romy Pérez Moreno

COTAS EN MM

TÍTULO:

Tubo de 1 in

ESCALA: 1:1

ROBOT 5GDL



A4

HOJA 16 DE 16

Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

3.3 ENSAMBLE DEL ROBOT

Para comenzar con el ensamble del robot, primero se debe de tener las piezas de acrílico, de madera y de aluminio con las medidas especificadas en los planos anteriores.

La precisión en la manufactura de estas piezas, se logra a través del uso de distintas maquinas herramienta de alta precisión, tales como la fresadora y el torno; pero muchas veces es necesario el uso de herramientas mas simples como la sierra cinta o el arco sierra para cortar las piezas, y de taladros para hacer los barrenos necesarios.

Una vez que se tienen las piezas con las dimensiones requeridas, comienza el ensamble:

NOTA: Todas las piezas van unidas con tornillos de 1/8"x1/2", a excepción de los rotores de los servomotores, pues estos se unen con tornillos de 1mm de diámetro.

- Primero se deben colocar los dos servomotores chicos en la pieza que se muestra en la figura 24a (lado izquierdo), este ensamble corresponde a la muñeca del robot.

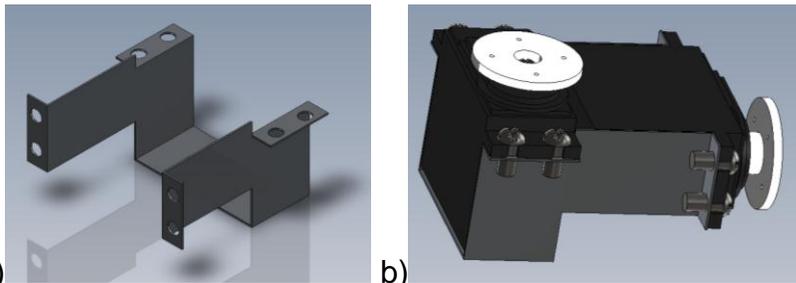


Figura 24. Ensamble de la muñeca del robot, a) Contenedor de los servomotores chicos, b) Servomotores chicos en el contenedor.

- Unir las piezas rectangulares, junto a los dos cilindros pequeños para formar el eslabón 2 como se muestra en la figura 25a. En uno de sus extremos lleva el servomotor mediano, mientras que en el otro extremo lleva el contenedor con los dos servomotores chicos.

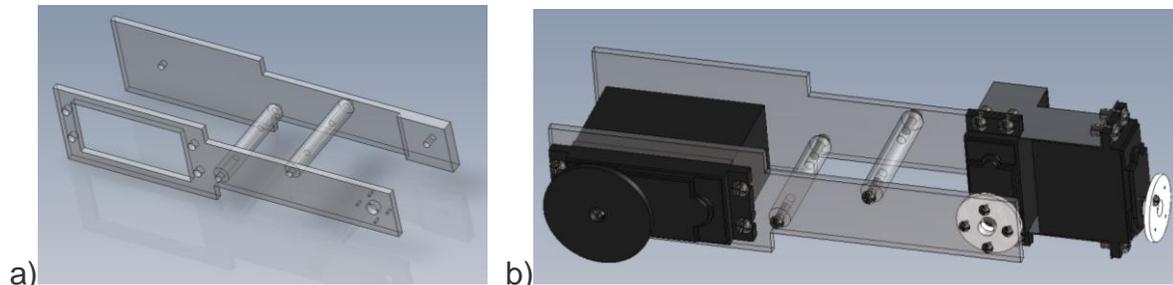


Figura 25. Ensamble del eslabón 2, a) Eslabón 2, b) Eslabón 2 con servomotores.

Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

- Unir las dos piezas que tienen forma de hueso mediante los dos cilindros de acrílico restantes (los más largos) para formar el eslabón 1 como se observa en la figura 26. Uno de los extremos estará unido al rotor del servomotor mediano, mientras que el otro extremo se unirá al rotor del servomotor más grande.

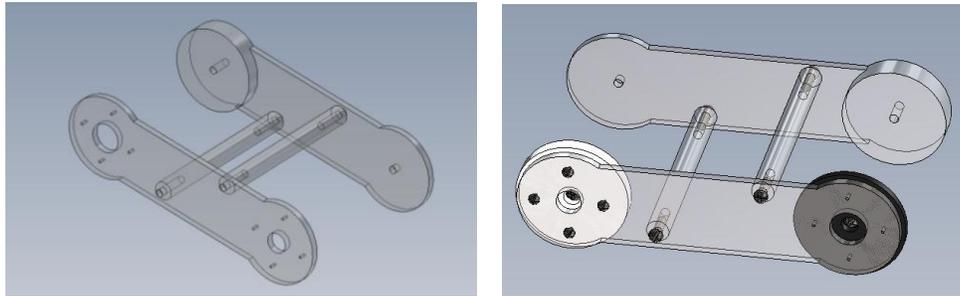


Figura 26. Ensamble del eslabón 1.

Con estos ensamblajes, se puede observar el brazo del robot como se muestra en la figura 27.

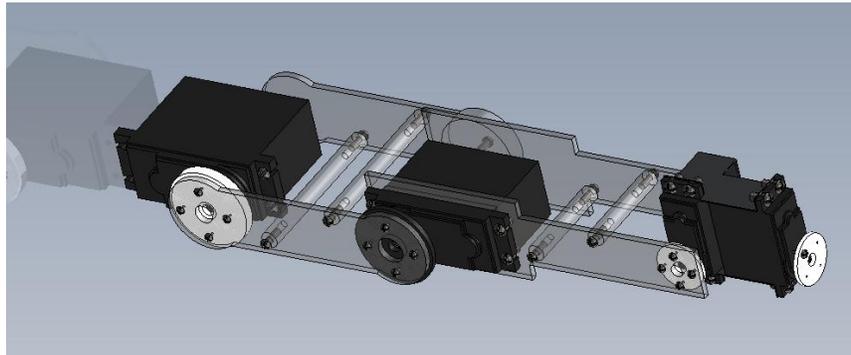


Figura 27. Ensamble del brazo del robot.

- La base del robot es una pieza de madera en la que van unidas dos piezas de aluminio que sostienen a uno de los servomotores mas grandes. Estas piezas se observan en las figura 28a y 28b.

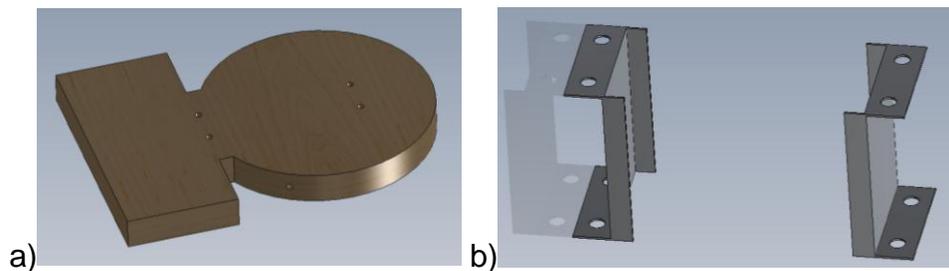


Figura 28. a) Base del robot, b) Laterales para servomotor grande.

Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

- La rueda pequeña de madera va atornillada al rotor del servomotor grande, que a su vez lleva sobre él, uno de los cojinetes de bicicleta. En la figura 29 se observa la rueda de madera y el ensamble hasta este punto.

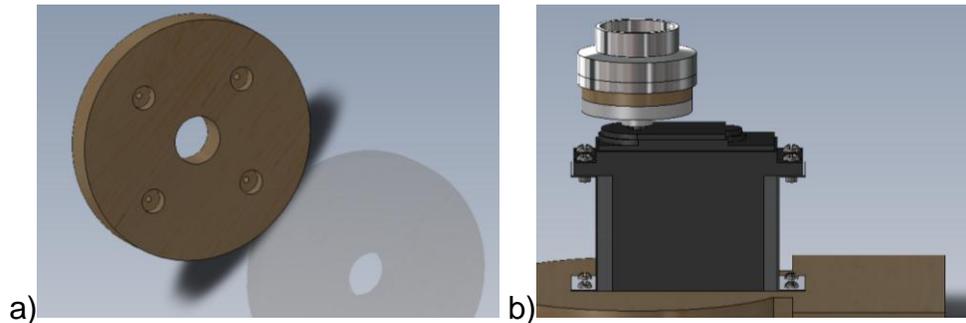


Figura 29. a) Rotor de madera, b) Ensamble de base – servomotor grande.

El cojinete que esta sobre la rueda de madera va roscado al tubo de 1" (figura 30a); además, va dentro de una rueda de madera que servirá de apoyo al cojinete superior e inferior (figura 30b).

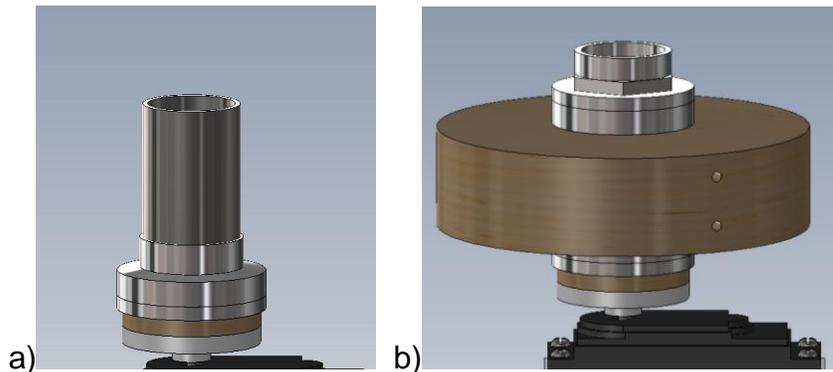


Figura 30. a) Tubo roscado en el cojinete inferior, b) Rueda de madera con los cojinetes.

- Atornillar el cilindro de aluminio que conforma el cuerpo del robot a la rueda de madera y a la base del robot (figura 31).

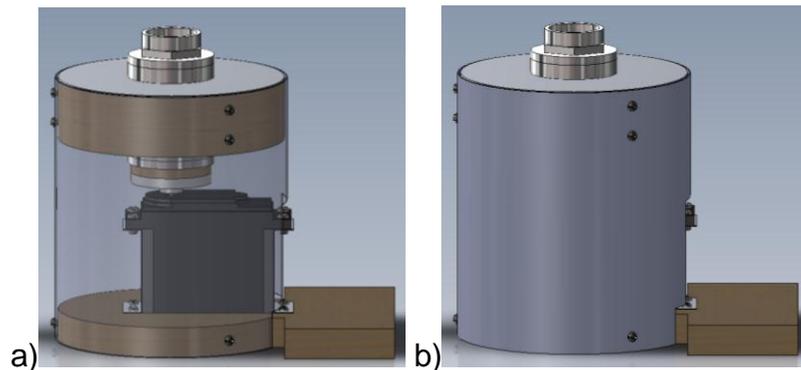


Figura 31. Cuerpo de aluminio del robot, a) Vista Transparente, b) Vista Sólida.

Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

- Unir la tuerca con la base para el siguiente servomotor grande. Esta base también va unida a una pieza de forma trapezoidal y otra en forma de C, como se muestra en la figura 32.

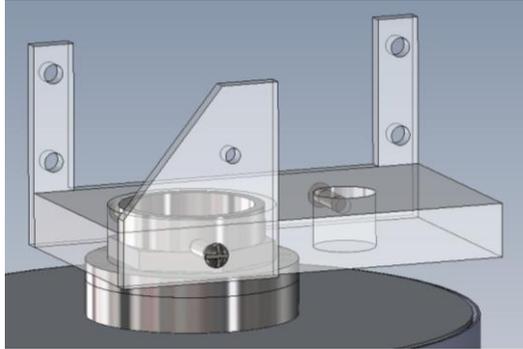


Figura 32. Ensamble tuerca- base de servomotor grande.

- Unir el ensamblaje del brazo al nuevo ensamblaje. La unión de los dos formará completamente al robot (figura 33).

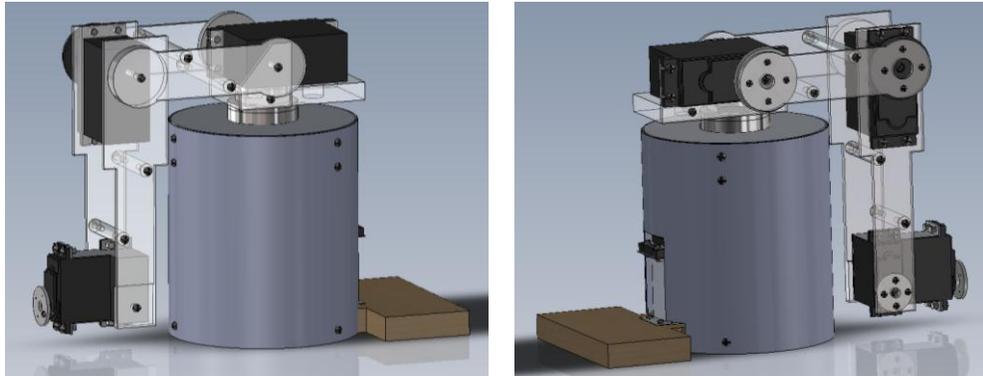


Figura 33. Ensamble del robot

- Ensamblar las piezas correspondientes para formar la caja de acrílico que protegerá los componentes electrónicos del robot (figura 34).

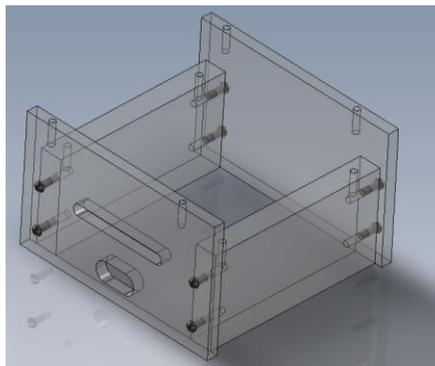


Figura 34. Ensamble de caja de acrílico.

Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

- Atornillar la tablilla de cobre que lleva los componentes electrónicos y colocar la tapa superior e inferior de acrílico como se muestra en la figura 35.

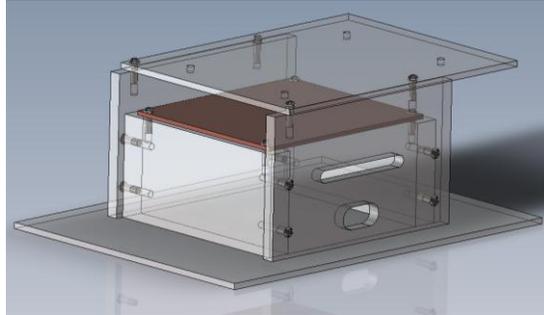


Figura 35. Caja de acrílico con tablilla de cobre.

- Finalmente, atornillar la tapa superior de acrílico a la base de madera del motor. El ensamble completo queda como se muestra en la figura 36.

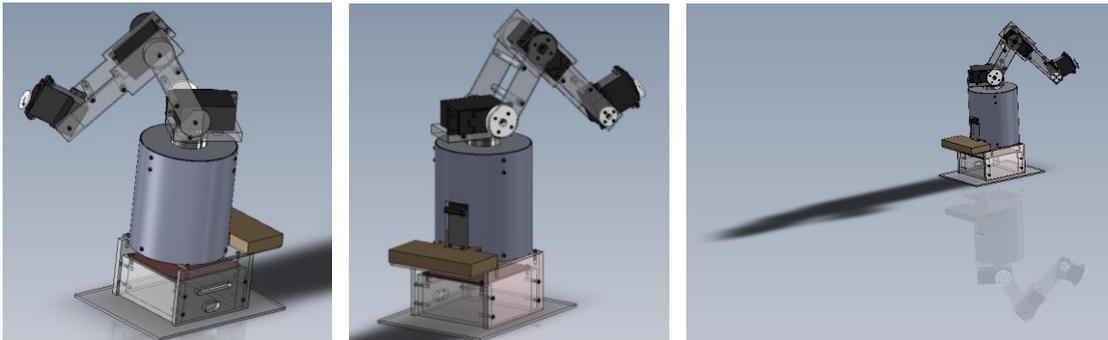


Figura 36. Ensamble completo del robot.

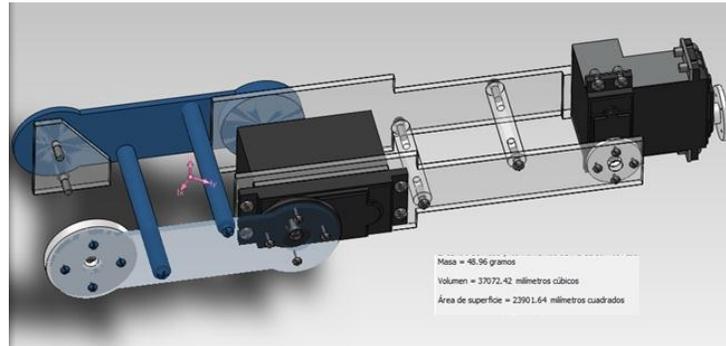
3.4 CARGA MAXIMA PARA EL ROBOT

El peso del brazo totalmente extendido, genera cierto torque sobre el servomotor más grande, por ello, se ha hecho un análisis para determinar cual es el máximo peso que puede soportar el servomotor más grande.

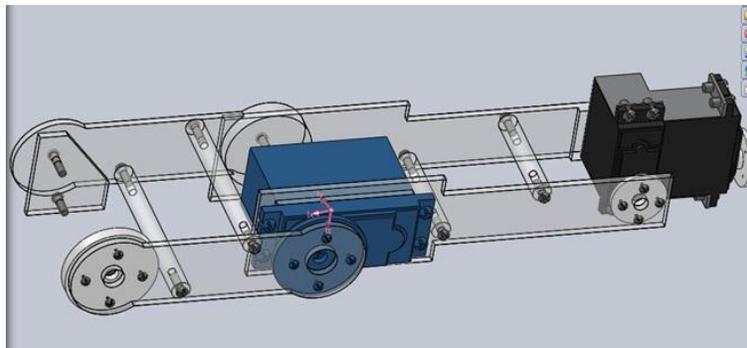
Para dicho análisis, se ha dividido el brazo del robot en cuatro partes, correspondientes a los pesos de los eslabones y de los servomotores.

Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

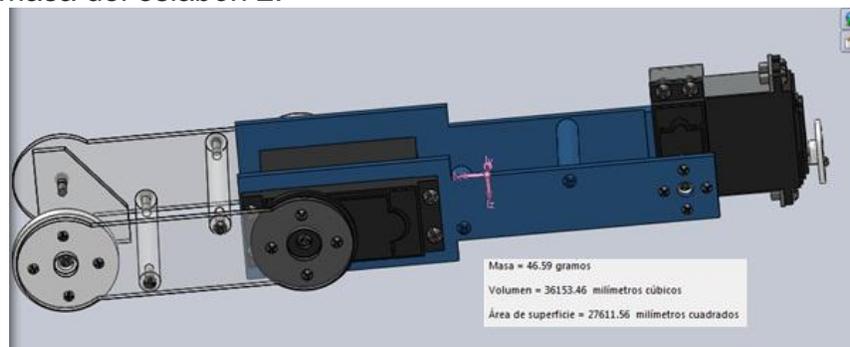
Centro de masa del eslabón 1.



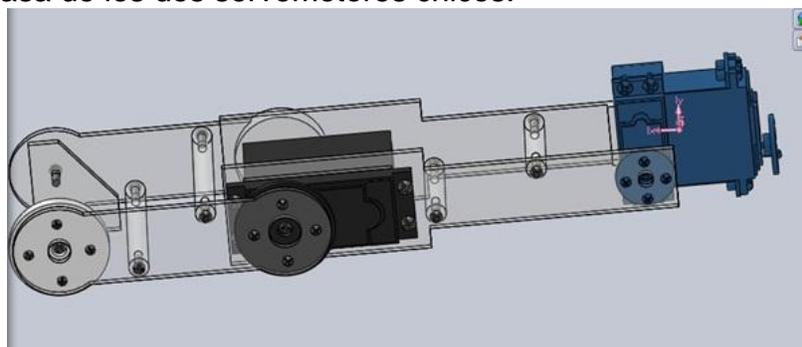
Centro de masa del servomotor mediano.



Centro de masa del eslabón 2.



Centro de masa de los dos servomotores chicos.



Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

Nota: La masa correspondiente a los servomotores aparece en la hoja de especificación.

De la masa de los eslabones y de los servomotores, se han realizado las siguientes conversiones:

Pieza	Masa (gr)	Peso (N)
Eslabón 1	48.96	0.4788
Servomotor mediano	110	1.0758
Eslabón 2	46.59	0.4557
2 Servomotores chicos	42.81 (c/u)	0.41865 (c/u)
	85.62 (x dos pzas)	0.8373 (x dos pzas)

Con estas conversiones, se ha podido hacer el siguiente análisis:

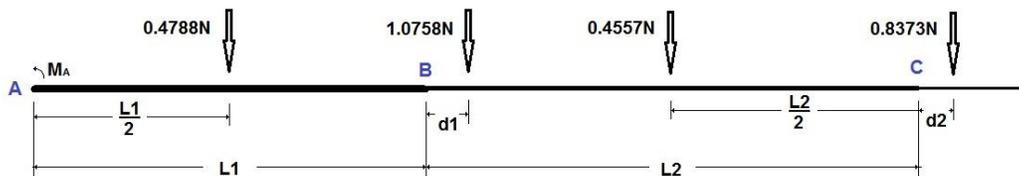


Figura 37. Fuerzas que actúan en el punto A.

De la figura 37, se obtienen las siguientes ecuaciones para determinar la carga que puede levantar el servomotor grande HS-805BB Mega Giant Scale Servo (MGSS):

$$T = T_{motor} - mgl - I\alpha$$

$$I = m(R^2 + d^2)$$

Servomotor Grande					
Vel. Ang =	5.5116	rad/s	Acel. Ang =	29.0084	rad/s ²
	Mgl	I(Acel. Ang)			
1.0000	0.0238	0.0070			
2.0000	0.1231	0.0445			
3.0000	0.0788	0.0477			
4.0000	0.2272	0.1857			
suma =	0.4529	0.2850			
			Tmotor =	1.9300 Nm	
			T =	1.1921 Nm	
			F =	3.9736 N	
			m =	406.3002 gr	

Donde:

$$L_1 = 0.0994m$$

$$L_2 = 0.147m$$

$$d1 = \left(\frac{0.0589}{2} - 0.0145 \right) = 0.015m \quad d2 = \left(\frac{0.03}{2} + 0.01 \right) = 0.025m$$

$$L_{T1} = \left[0.0994 + 0.147 + \frac{0.03}{2} + 0.01 \right] = 0.2714m$$

Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

Por seguridad para los servomotores, se ha considerado levantar 20% menos de lo que soporta el servomotor; es decir, el servomotor deberá levantar alrededor de 325.04g a 5V.

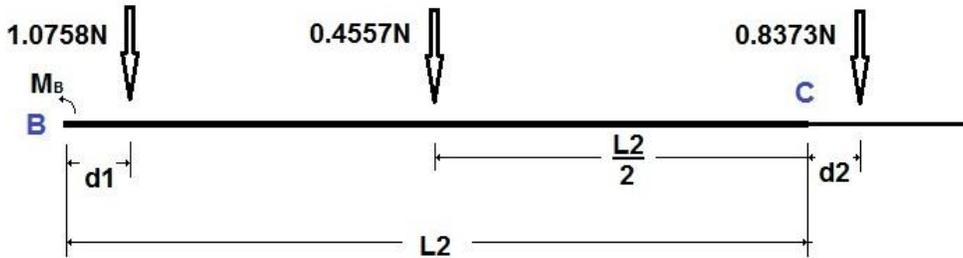


Figura 38. Fuerzas que actúan en el punto B.

De la figura 38, se obtienen las siguientes ecuaciones para determinar la carga que puede levantar el servomotor mediano HS-755HB Karbonite Giant Scale Servo (KGSS):

$$T = T_{motor} - mgl - I\alpha$$

$$I = m(R^2 + d^2)$$

Servomotor Mediano					
Vel. Ang =	3.7400	rad/s	Acel. Ang =	13.3571	rad/s ²
	Mgl	I(Acel. Ang.)			
	2.0000	0.0161	0.0016	Tmotor =	1.0800 Nm
	3.0000	0.0335	0.0034	T =	0.8463 Nm
	4.0000	0.1440	0.0351	F =	4.2187 N
suma =	0.1936	0.0401		m =	431.3568 gr

En donde:

$$L_2 = 0.147m$$

$$d1 = \left(\frac{0.0589}{2} - 0.0145 \right) = 0.015m \quad d2 = \left(\frac{0.03}{2} + 0.01 \right) = 0.025m$$

$$L_{T2} = \left[0.147 + \frac{0.03}{2} + 0.01 \right] = 0.172m$$

De la misma manera que el caso anterior, por seguridad en los servomotores, se ha considerado levantar 20% menos de lo que soporta el servomotor; entonces, deberá levantar alrededor de 345.08g a 5V.

Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

Conclusión

Tras algunas pruebas que se realizaron durante la operación del robot, se determinó que es conveniente que en el extremo del robot, solo tenga una masa máxima de 120g, debido a que se genera un mayor brazo de palanca por la masa agregada; además, como consecuencia de esta masa, existe una variabilidad en el momento de inercia (a mayor masa, mayor momento de inercia), ya que esta depende de la masa y de la geometría del objeto, disminuyendo la capacidad de soporte de los servomotores.

Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

CAPÍTULO 4. ALGORITMO DE DENAVIT-HARTENBERG

En 1955 Denavit – Hartenberg (D-H) proponen un método matricial que establece la localización que debe tomar cada sistema de coordenadas $\{S_i\}$ ligado a cada eslabón i de una cadena articulada, para poder sistematizar la obtención de las ecuaciones cinemáticas de la cadena completa.

Aplicando esta metodología será posible pasar de un eslabón al siguiente mediante cuatro transformaciones básicas que dependen exclusivamente de las características geométricas del eslabón.

La elección correcta de los sistemas de coordenadas de cada eslabón rígido permite reducir a los cuatro grados de libertad que comúnmente están definidos por seis de las matrices de transformación homogénea, y que dependen exclusivamente de las características geométricas del eslabón.

Las cuatro transformaciones básicas consisten en una sucesión de rotaciones y traslaciones que permiten relacionar el sistema de referencia del elemento $i-1$ con el sistema del elemento i .

Es importante recordar que el paso del sistema $\{S_{i-1}\}$ al $\{S_i\}$ mediante estas cuatro transformaciones está garantizado solo si los sistemas han sido definidos de acuerdo a normas que están bien definidas [2].

4.1 PARÁMETROS DE DENAVIT-HARTENBERG

Cualquier robot puede describirse en forma cinemática proporcionando los valores de cuatro entidades para cada vínculo. Dos describen el vínculo en sí, mientras que los otros dos describen la conexión del vínculo con un vínculo adyacente. En el caso de una articulación angular (de rotación), Θ_i se llama variable de articulación y las otras tres cantidades son parámetros de vínculo fijos. Para las articulaciones prismáticas, d_i es la variable de articulación y las otras tres cantidades son parámetros de vínculo fijos. La definición de mecanismos por medio de estas cantidades es una convención que generalmente se le conoce como nomenclatura Denavit-Hartenberg.

Los cuatro parámetros de D-H (Θ_i , d_i , a_i , α_i) dependen únicamente de las características geométricas de cada eslabón y de las articulaciones que le unen con el anterior y el siguiente.

PARÁMETROS RELATIVOS AL TAMAÑO Y FORMA DEL ESLABÓN

a_i 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.

Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

α_i 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. Este parámetro en cierto modo mide la forma del eslabón a través del ángulo que sobre el mismo se encuentra girado, por lo que se le conoce como ángulo de torsión del eslabón.

PARÁMETROS RELATIVOS A UN ESLABÓN Y SU PREDECESOR

d_i Es la distancia entre las intersecciones de las normales comunes al eje de articulación i , medida a lo largo de dicho eje. Esta medida expresa en cierto modo la distancia entre los eslabones, marcado por el tamaño y forma de la articulación, por lo que se denomina longitud articular.

θ_i Es el ángulo que existiría entre las intersecciones de las normales comunes al eje de articulación i si se cortasen en el mismo punto del eje de la articulación. De alguna forma expresa el ángulo que forma dos eslabones, marcado nuevamente por la forma de la articulación, por lo que se denomina ángulo articular [2].

En la figura 40 y 41, se muestran los parámetros de Denavit-Hartenberg para una articulación prismática y una articulación rotatoria.

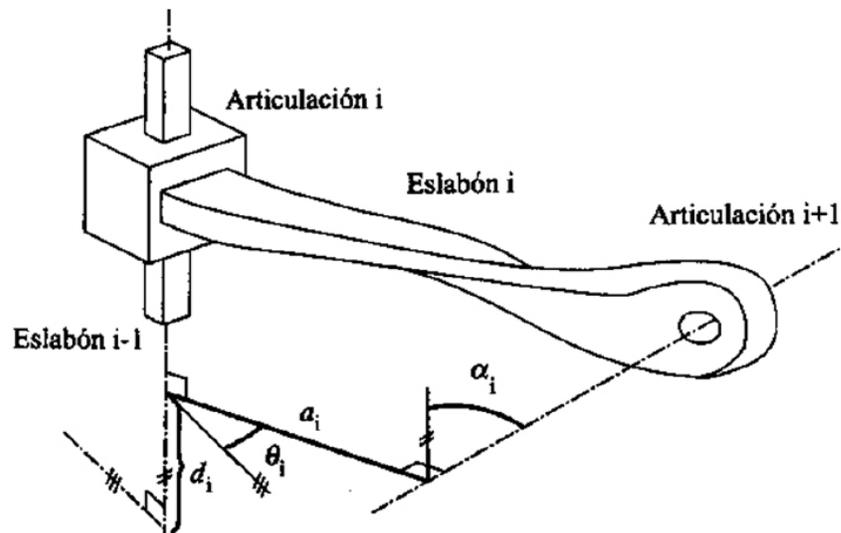


Figura 40. Parámetros de Denavit-Hartenberg para una articulación prismática.

Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

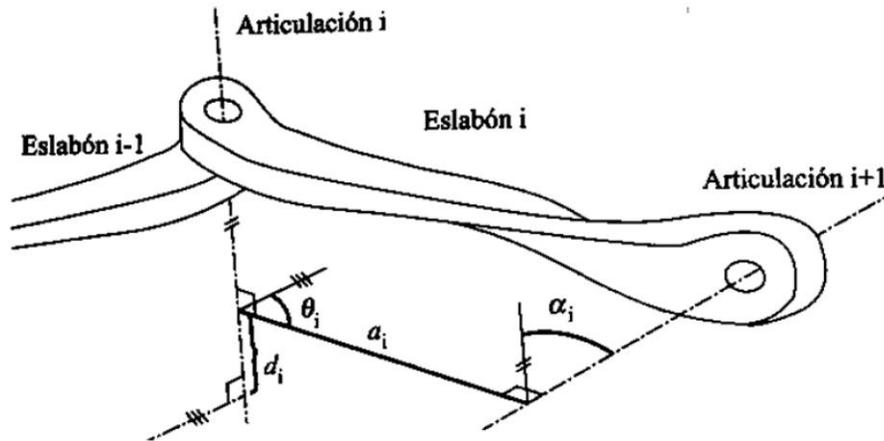


Figura 41. Parámetros de Denavit-Hartenberg para una articulación rotatoria.

En resumen:

RESUMEN DE LOS PARÁMETROS DE VÍNCULO		
Longitud del eslabón	a_i	Distancia del desplazamiento entre los ejes Z_{i-1} y Z_i a lo largo del eje X_i .
Giro del eslabón	α_i	El ángulo desde el eje Z_{i-1} al eje Z_i sobre el eje X_i .
Desplazamiento del eslabón	d_i	Distancia desde el origen del marco $i-1$ al eje X_i a lo largo del eje Z_{i-1} .
Angulo de la articulación	Θ_i	Angulo entre los ejes X_{i-1} y X_i sobre el eje Z_{i-1} .

4.1.1 DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE DENAVIT-HARTENBERG

El procedimiento a seguir cuando nos encontramos con un nuevo mecanismo para asignar correctamente las tramas de los vínculos es:

1. Identifique los ejes de articulación e imagine (o dibuje) las líneas infinitas sobre ellos. Para los pasos 2 al 5, considere dos de estas líneas adyacentes (en los ejes i e $i+1$).
2. Identifique la perpendicular común entre ellos, o el punto de intersección. En el punto de intersección, o en el punto en el que la perpendicularidad común se encuentra con el i -ésimo eje, asigne el origen de la trama asociada al vínculo.
3. Asigne el eje Z_i para que apunte sobre el i -ésimo eje de articulación.

Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

4. Asigne el eje X_i para que apunte sobre la perpendicular común o, si os ejes se intersecan, asigne X_i para que sea normal al plano que contiene los dos ejes.
5. Asigne el eje Y para completar un sistema de coordenadas con la regla de la mano derecha.
6. Asigne $\{0\}$ para que concuerde con $\{1\}$ cuando la primera variable de articulación sea cero. Para $\{N\}$ selecciones la ubicación del origen y la dirección de X_N libremente, pero generalmente de manera que haga que la mayor parte de los parámetros de los vínculos sean cero.

4.2 CONVENCIONES UTILIZADAS

Mucha gente no sabe que hay dos formas de diferentes de la representación de Denavit-Hartenberg para eslabones en serie en la cinemática de manipuladores:

La forma clásica como aparece en el artículo original de 1955 de Denavit y Hartenberg, que es usado en libros de texto como el Paul, Fu et al o Spong y Vidyasagar. La otra forma, es la convención modificada introducida por Craig en su libro de texto.

Ambas notaciones presentan una articulación como dos traslaciones (a y d) y dos ángulos de rotación (α y Θ). Sin embargo las expresiones para las matrices de transformación de eslabones son diferentes. Por tanto, debe saber cual convención cinemática conforman los parámetros de Denavit-Hartenberg. Desafortunadamente muchas fuentes en la literatura no especifican esta información, la cual es muy importante.

4.2.1 CONVENCIÓN DE DENAVIT-HARTENBERG

Primero se debe determinar cuántos parámetros son necesarios para definir una matriz de transformación. Si dos sistemas de coordenadas tienen el mismo origen pero uno está girado con respecto al otro, basta con efectuar dos rotaciones sobre dos de los ejes que queden en coincidencia. Esto se debe a que, para cualquier orientación de un sistema con respecto al otro, una rotación basta para hacer que un plano (x - y , y - z ó z - x) coincida con el plano respectivo del otro sistema. Una segunda rotación sobre otro eje hará que un segundo plano coincida con el respectivo del otro sistema (sin afectar la coincidencia de los anteriores). El tercer plano queda automáticamente en coincidencia, ya que los tres planos son perpendiculares.

Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

Para que los dos orígenes coincidan, si inicialmente están desplazados, basta con dos traslaciones. La distancia más corta entre dos líneas es perpendicular a ambas. Si trasladamos el origen de $\{1\}$ a lo largo de la línea perpendicular (por ejemplo) a Z_1 y Z_0 habremos logrado que el origen de $\{1\}$ se encuentre sobre Z_0 . Basta entonces una segunda traslación a lo largo de Z_0 para que los dos orígenes coincidan. Vemos entonces que dos traslaciones y dos rotaciones bastan, en cualquier caso, para que los dos sistemas queden en coincidencia. En otras palabras, solo cuatro parámetros son necesarios para definir una matriz de transformación entre dos articulaciones. Denavit-Hartenberg (DH) eligieron los sistemas de coordenadas para cada articulación en forma tal que cuatro parámetros eslabón definidos en la misma forma para cada articulación, basta para determinar ${}^{i-1}T_i$.

DH decidieron operar en el sistema "i-1" hasta llevarlo a coincidir con el sistema "i" para determinar ${}^{i-1}T_i$ aunque, como ya se menciona, es el sistema "i" el que se mueve con respecto a "i-1" en un caso real, empezando en la "mano" y terminando en la base. Las operaciones definidas por DH son con respecto al sistema en movimiento y por lo tanto las matrices parciales deben multiplicarse, empezando con la primera operación multiplicada por la segunda, etc.

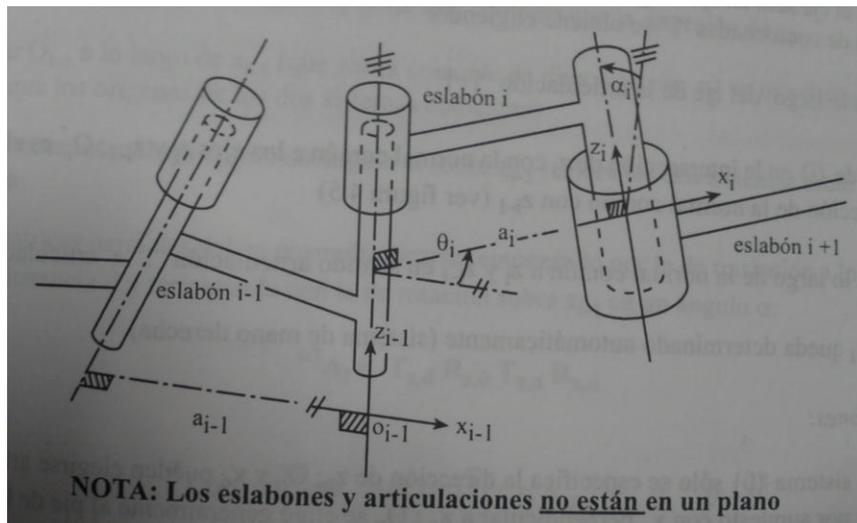


Figura 42. Definición de los parámetros eslabón de acuerdo a Denavit y Hartenberg [4].

Haciendo referencia a la figura 42, las siguientes operaciones colocaran a los dos sistemas en coincidencia, recordemos que DH definen la operación en el sistema "i-1" operando sobre sí mismo hasta que coincida con "i":

Desplazar O_{i-1} a lo largo de Z_{i-1} en una distancia d hasta que O_{i-1} coincida con O_i .

Rotar X_{i-1} sobre Z_{i-1} un ángulo Θ_i hasta que coincida con la dirección de X_i .

Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

Mover O_{i-1} a lo largo de X_{i-1} (que ahora coincide en dirección de X_i) en una distancia a ; esto hace que los orígenes de los dos sistemas coincidan). Finalmente rotar el eje Z_{i-1} en un ángulo α sobre X_{i-1} ; ahora los dos sistemas están en coincidencia.

Las matrices parciales deben posmultiplicarse, empezando por la traslación a lo largo de Z_{i-1} en una distancia d y terminando con la rotación sobre X_{i-1} en un ángulo α .

$${}^i T = T_{z,d} R_{z,\theta} T_{x,a} R_{x,\alpha}$$

Para tener una idea más clara del producto de traslaciones y rotaciones, esta multiplicación la hemos desarrollado en MATLAB:

```
% Nomenclatura adoptada para las variables en MATLAB:
% % a = distancia      a_i
% % f = torsión       alfa_i
% % d = desplazamiento d_i
% % O = rotación     theta_i

% Evaluación simbólica para obtener Ti_e (estándar):
disp(' Ti_e = ')
Ti_e=transl([0 0 d])*rotz(O)*transl([a 0 0])*rotx(f)

%Ti_e =

      %[   cos(O),   -sin(O)*cos(f),   sin(O)*sin(f),   a*cos(O)]
      %[   sin(O),   cos(O)*cos(f),   -cos(O)*sin(f),   a*sin(O)]
      %[         0,         sin(f),         cos(f),         d]
      %[         0,         0,         0,         1]
```

4.2.2 CONVENCION DE CRAIG

Para construir la transformada de Craig que define el sistema de coordenadas $[i]$ relativa al sistema de $[i-1]$, estará en función de los cuatro parámetros de vínculo.

Para cualquier robot dado, esta transformación será en función de una variable solamente, y los otros tres parámetros serán fijos por diseño mecánico. Al definir un sistema de coordenadas para cada vínculo, hemos descompuesto el problema de la cinemática en n subproblemas. Para poder resolver cada uno de estos subproblemas, específicamente ${}^{i-1}T$, los desglosaremos aún más en cuatro “subsubproblemas”. Cada una de estas transformaciones será una función de un parámetro de vínculo solamente, y será lo suficientemente simple como para que podamos anotar su forma por inspección. Empezamos definiendo tres sistemas de referencia intermedias para cada vínculo: $\{P\}$, $\{Q\}$ y $\{R\}$.

Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

En la figura 43 se muestran los sistemas de coordenadas {P}, {Q} y {R}. Además, solo se muestran los ejes X y Z de cada sistema de coordenadas. El sistema {R} difiere del sistema [i-1] solo por la rotación de α_{i-1} .

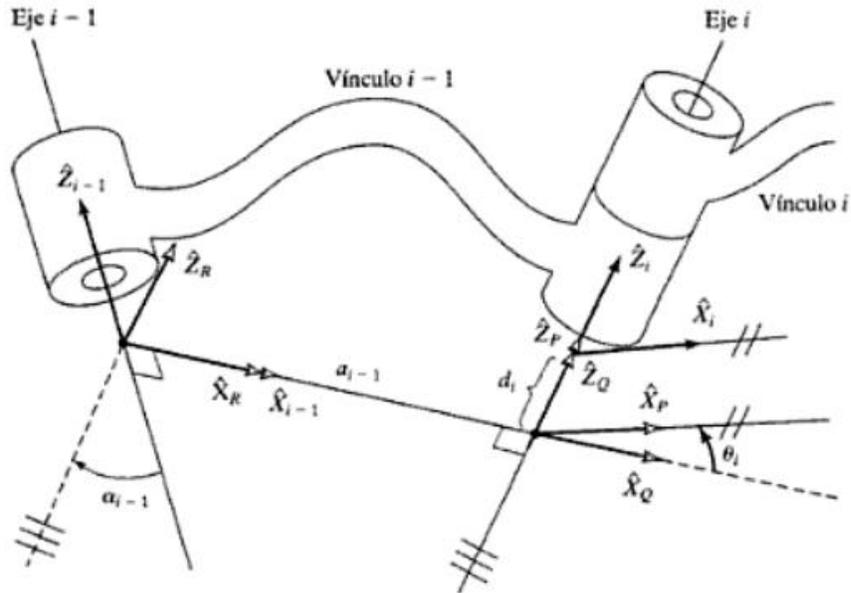


Figura 43. Ubicación de los sistemas de coordenadas intermedios {P}, {Q} y {R} [5].

El sistema {Q} difiere de {R} por una traslación a_{i-1} . Mientras que el sistema {P} difiere de {Q} por una rotación θ_i , y el sistema [i] difiere de {P} por una traslación d_i .

Si se escribe la transformación que modifica los vectores definidos en [i] a su descripción [i-1], se puede hacer de la siguiente manera:

$${}^{i-1}T = {}^{i-1}T_R^R T_Q^Q T_P^P T_i^i P,$$

ó ${}^{i-1}P = {}^{i-1}T_i^i P,$

En donde:

$${}^{i-1}T = {}^{i-1}T_R^R T_Q^Q T_P^P T_i^i .$$

Considerando cada una de estas transformaciones, podemos ver que la ecuación anterior puede escribirse como:

$${}^{i-1}T = Rx(\alpha_{i-1})Dx(a_{i-1})Rz(\theta_i)Dz(d_i),$$

ó ${}^{i-1}T = Ti = \text{Tornillo}_x(a_{i-1} * \alpha_{i-1})\text{Tornillo}_z(d_i * \theta_i),$

Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

En donde la notación de Tornillo $_Q(r, \varphi)$ representa la combinación de una traslación sobre un eje Q por una distancia r y una rotación sobre el mismo eje por un ángulo φ . Realizando la multiplicación en la ecuación anterior obtenemos la forma general de ${}^{i-1}T_i = Ti$; este producto nuevamente ha sido desarrollado en MATLAB:

```
% Nomenclatura adoptada para las variables en MATLAB:
% a = distancia      (a_i-1)
% f = torsión       (alfa_i-1)
% d = desplazamiento (d_i)
% O = rotación      (theta_i)

% Evaluación simbólica para obtener Ti:
disp(' Ti = rotx(f)*transl([a 0 0])*rotz(O)*transl([0 0 d])')
disp(' Ti = ')

Ti=rotx(f)*transl([a 0 0])*rotz(O)*transl([0 0 d])
%Ti =
%
%[      cos(O),      -sin(O),      0,      a]
%[ sin(O)*cos(f),  cos(O)*cos(f), -sin(f), -d*sin(f)]
%[ sin(O)*sin(f),  cos(O)*sin(f),  cos(f),  d*cos(f)]
%[      0,      0,      0,      1]
```

Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

CAPÍTULO 5. CINEMÁTICA DEL ROBOT

La cinemática del robot estudia el movimiento del mismo respecto a un sistema de referencia sin considerar las fuerzas que lo producen. Es decir, que se interesa por la descripción analítica del movimiento espacial del robot como una función del tiempo, y en particular por las relaciones entre la posición y la orientación del extremo final del robot con los valores angulares que toman las articulaciones [3].

Existen dos problemas fundamentales para resolver la cinemática del robot, el primero de ellos se conoce como el **problema cinemático directo o cinemática directa**, y consiste en determinar cuál es la posición y orientación del extremo final del robot, con respecto a un sistema de coordenadas que se toma como referencia, conocidos los valores de las articulaciones y los parámetros geométricos de los elementos del robot; el segundo, denominado **problema cinemático inverso o cinemática inversa**, resuelve la configuración que debe adoptar el robot para una posición y orientación del extremo conocidas [1].

Denavit y Hartenberg propusieron un método sistemático para descubrir y representar la geometría espacial de los elementos de una cadena cinemática, y en particular de un robot, con respecto a un sistema de referencia fijo. Este método utiliza una matriz de transformación homogénea para descubrir la relación espacial entre dos elementos rígidos adyacentes, reduciéndose el problema cinemático directo a encontrar una matriz de transformación homogénea 4x4 que relacione la localización del robot con respecto al sistema de coordenadas de su base.

Por otra parte, la cinemática del robot trata también de encontrar las relaciones entre las velocidades del movimiento de las articulaciones y las del extremo. Esta relación viene dada por el **modelo diferencial** expresado mediante la matriz Jacobiana.

En la mayoría de las aplicaciones de robótica, se está interesado en la descripción espacial del efector final del manipulador con respecto a un sistema de coordenadas de referencia fija.

5.1 PROBLEMA CINEMÁTICO DIRECTO

Algoritmo de Resolución del problema Cinemático Directo

- 1) Mover el manipulador a su posición cero.
- 2) Asignar un sistema de coordenadas a cada elemento.
- 3) Describir las posiciones y orientaciones entre elementos con los parámetros correspondientes.
- 4) Construir las matrices A que relacionen dichos elementos.

Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

5) Calcular la matriz asociada a la transformación del manipulador.

6) Plantear la ecuación:

$$T = \begin{vmatrix} \text{Rotación} & \text{Traslación} \\ \text{Perspectiva} & \text{Escalado} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} R_{3 \times 3} & P_{3 \times 1} \\ F_{1 \times 3} & W_{1 \times 1} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} x & y & z & P \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

5.1.1 CINEMÁTICA DIRECTA

Se utiliza fundamentalmente el álgebra vectorial y matricial para representar y describir la localización de un objeto en el espacio tridimensional con respecto a un sistema de referencia fijo.

Dado que un robot puede considerarse como una cadena cinemática formada por objetos rígidos o eslabones unidos entre sí mediante articulaciones, se puede establecer un sistema de referencia fijo situado en la base del robot y describir la localización de cada uno de los eslabones con respecto a dicho sistema de referencia. De esta forma, el problema cinemático directo se reduce a encontrar una matriz homogénea de transformación T que relacione la posición y orientación del extremo del robot respecto del sistema de referencia fijo situado en la base del mismo. Esta matriz T será función de las coordenadas articulares.

Conocer la cinemática directa del modelo permite relacionar las coordenadas generalizadas con las coordenadas cartesianas en la punta del brazo usando como datos los movimientos realizados en cada uno de los pares cinemáticos.

Para realizar este cálculo se proponen dos métodos, los cuales son:

Resolución por métodos geométricos:

Este es el método más sencillo que consiste en la resolución de la cinemática usando cálculos geométricos simples, hechos en software de fácil acceso, como son los CAD.

El análisis de la cinemática de este mecanismo se puede simplificar al analizar sólo el movimiento en un plano en vez del movimiento en el espacio. Basándonos en el sistema de coordenadas de referencia $X_0 Y_0 Z_0$ entonces el efector final tendrá su posición definida por un vector del tipo (x, y, z) . Es importante mencionar que cuando el robot se encuentra en su espacio de trabajo el vector final será del tipo $(0, Y, Z)$ porque no habría desplazamiento en el eje X_0 perpendicular al plano.

Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

Resolución mediante matrices de transformación:

El problema cinemático directo se basa en la búsqueda de una *matriz de transformación* que relacione la posición y orientación del extremo del manipulador representado por el sistema de coordenadas $X_n Y_n Z_n$ con respecto a un sistema de coordenadas de referencia $X_0 Y_0 Z_0$.

Así, si se han escogido coordenadas cartesianas y ángulos de Euler para representar la posición y orientación del extremo de un robot de seis grados de libertad, la solución al problema cinemático directo vendrá dada por las relaciones:

$$\begin{aligned}x &= F_x(q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6) \\y &= F_y(q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6) \\z &= F_z(q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6) \\ \alpha &= F_\alpha(q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6) \\ \beta &= F_\beta(q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6) \\ \gamma &= F_\gamma(q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6)\end{aligned}$$

La obtención de estas relaciones no es en general complicada, siendo incluso en ciertos casos (robots de 3 o menos grados de libertad) fácil de encontrar mediante simples consideraciones geométricas [1].

Para robots de más grados de libertad, puede plantearse un método sistemático basado en la utilización de las matrices de transformación homogénea. En general, un robot de n grados de libertad está formado por n eslabones unidos por n articulaciones, de forma que cada par articulación-eslabón constituye un grado de libertad. A cada eslabón se le puede asociar un sistema de referencia. Utilizando las transformaciones homogéneas, es posible representar las rotaciones y traslaciones relativas entre los distintos eslabones que componen el robot.

Normalmente, la matriz de transformación homogénea que representa la posición y orientación relativa entre los sistemas asociados a dos eslabones consecutivos del robot se le suele denominar ${}^{(i-1)}\mathbf{T}_i$. Así pues, ${}^0\mathbf{T}_1$ describe la posición y orientación del sistema de referencia solidario al primer eslabón con respecto al sistema de referencia solidario a la base, ${}^1\mathbf{T}_2$ describe la posición y orientación del segundo eslabón respecto del primero, etc. Del mismo modo, denominando ${}^0\mathbf{T}_n$ a las matrices resultantes del producto de las matrices ${}^{(i-1)}\mathbf{T}_i$ con i desde 1 hasta n , se puede representar de forma total o parcial la cadena cinemática que forma el robot.

Cuando se consideran todos los grados de libertad (n), a la matriz ${}^0\mathbf{T}_n$ se le suele denominar \mathbf{T} . Así, dado un robot de cinco grados de libertad, se tiene que la posición y orientación del eslabón final vendrá dada por la matriz \mathbf{T} :

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

Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

Aunque para descubrir la relación que existe entre dos elementos contiguos se puede hacer uso de cualquier sistema de referencia ligado a cada elemento, la forma habitual que se suele utilizar en robótica es la representación de Denavit-Hartenberg (D-H), pero también está la representación actual, propuesta por John J. Craig.

Según la representación D-H o Craig, escogiendo adecuadamente los sistemas de coordenadas asociados para cada eslabón, será posible pasar de uno al siguiente mediante 4 transformaciones básicas que dependen exclusivamente de las características geométricas del eslabón.

De manera general, las *matrices de transformación* T son relaciones existentes entre la posición y orientación del extremo de un robot respecto del sistema de referencia fijo situado en la base del mismo. Para un sistema de n grados de libertad sería el producto de las n matrices de transformación de cada articulación – eslabón.

5.1.2 PROGRAMA GRÁFICO PARA LA SOLUCIÓN DE LA CINEMÁTICA DIRECTA

Con los parámetros de D-H se construye la matriz T del robot de 5 GDL, esta expresará la orientación y posición del extremo del robot en función de sus coordenadas articulares, con lo que quedaría resuelto el problema de cinemática directa. Se ha utilizado el software MATLAB; además, se ha manejado la convención de Craig y el método de matrices de transformación para obtener la cinemática directa.

Se ha hecho mediante dos métodos:

a) Método convencional

La solución por el método convencional se puede realizar utilizando algún software que permita obtener la solución de matrices, tal es el caso del MATLAB o de algún software de lenguaje de programación en "C".

El método convencional es más prolongado que el otro, pero en este se muestra a detalle la solución.

A continuación se muestran el código de programación para obtener T mediante este método:

No olvidar que:

a_{i-1}	=	distancia
A_{i-1}	=	torsión
d_i	=	desplazamiento
q_i	=	rotación

Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

```

clc, clear all
syms T01 T12 T23 T34 T45 T13 T35 T03 T30 T351 T40 T451 T15 c12 s12 c1 c2 c3 c4 c5 s1 s2 s3
s4 s5 d1 d2 d3 d4 d5 a2 a3;
syms c23 s23 Px Py Pz VI VI2 q1 ro T35_1 T151 T10 T02 T20 T251 T25;

```

```

% Matriz transformada
%
%          [      cqi,      -sqi,      0,      ai-1]
%T(i-1) (i)= [sqi*cAi-1, cqi*cAi-1, -sAi-1, -sAi-1*di]
%          [sqi*sAi-1, cqi*sAi-1, cAi-1, cAi-1*di]
%          [      0,      0,      0,      1]
%
% Parámetros de Denavit-Hartenberg
%
%      | ai-1 | di | Ai-1 | qi |
%  0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
%  1 | 0 | 0 | 0 | q1 |
%  2 | 0 | 0 | -90 | q2 |
%  3 | a2 | d3 | 0 | q3 |
%  4 | a3 | d4 | 0 | q4 |
%  5 | 0 | d5 | -90 | q5 |

```

```

% Declaración de matrices
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%5
T01 = sym('[c1,-s1,0,0 ; s1,c1,0,0 ; 0,0,1,0 ; 0,0,0,1]');
T12 = sym('[c2,-s2,0,0 ; 0,0,-1,0 ; s2,c2,0,0 ; 0,0,0,1]');
T23 = sym('[c3,-s3,0,a2; s3,c3,0,0 ; 0,0,1,d3 ; 0,0,0,1]');
T34 = sym('[c4,-s4,0,a3; s4,c4,0,d4 ; 0,0,1,0 ; 0,0,0,1]');
T45 = sym('[c5,-s5,0,0 ; 0,0,-1,-d5 ; s5,c5,0,0 ; 0,0,0,1]');

```

```
T=T01*T12*T23*T34*T45
```

```
% El resultado de T esta dado por:
```

```
% Columna 1 de T
>> T=T01*T12*T23*T34*T45
```

```

T =
[
[
[
[
((c1*c2*c3-c1*s2*s3)*c4+(-c1*c2*s3-c1*s2*c3)*s4)*c5+s1*s5,
((s1*c2*c3-s1*s2*s3)*c4+(-s1*c2*s3-s1*s2*c3)*s4)*c5-c1*s5,
((s2*c3+c2*s3)*c4+(-s2*s3+c2*c3)*s4)*c5,
0,

```

```
% Columna 2 de T
```

```

-((c1*c2*c3-c1*s2*s3)*c4+(-c1*c2*s3-c1*s2*c3)*s4)*s5+s1*c5,
-((s1*c2*c3-s1*s2*s3)*c4+(-s1*c2*s3-s1*s2*c3)*s4)*s5-c1*c5,
-((s2*c3+c2*s3)*c4+(-s2*s3+c2*c3)*s4)*s5,
0,

```

```
% Columna 3 de T
```

```

(c1*c2*c3-c1*s2*s3)*s4-(-c1*c2*s3-c1*s2*c3)*c4,
(s1*c2*c3-s1*s2*s3)*s4-(-s1*c2*s3-s1*s2*c3)*c4,
(s2*c3+c2*s3)*s4-(-s2*s3+c2*c3)*c4,
0,

```

```
% Columna 4 de T
```

```

-(-(c1*c2*c3-c1*s2*s3)*s4+(-c1*c2*s3-c1*s2*c3)*c4)*d5+(c1*c2*c3-c1*s2*s3)*a3+(-c1*c2*s3-c1*s2*c3)*d4+c1*c2*a2+s1*d3]
-(-(s1*c2*c3-s1*s2*s3)*s4+(-s1*c2*s3-s1*s2*c3)*c4)*d5+(s1*c2*c3-s1*s2*s3)*a3+(-s1*c2*s3-s1*s2*c3)*d4+s1*c2*a2-c1*d3]
-(-(s2*c3+c2*s3)*s4+(-s2*s3+c2*c3)*c4)*d5+(s2*c3+c2*s3)*a3+(-s2*s3+c2*c3)*d4+s2*a2]

```

1]

Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

b) Utilizando el toolbox de Robótica de MATLAB

La solución mediante este método se realiza utilizando la convención de Craig, aplicando funciones especiales en MATLAB para la solución de la cinemática directa de cualquier robot que tenga a los mas 6 GDL y solo tenga articulaciones prismáticas o rotatorias.

MATLAB proporciona esta valiosa herramienta de apoyo para el desarrollo de cálculos y operaciones habituales en robótica. Su capacidad de manipular de manera natural matrices, facilita los cálculos en el modelado de robots.

La toolbox de robótica, dispone del comando “fkine” (forward kinematic), que con el cual, se obtiene la matriz de transformación del efector final con respecto a un inicio de coordenadas que se fija en un punto determinado.

A continuación se muestran las líneas hechas en MATLAB para obtener T:

En este caso cambian de símbolo algunas variables y se agrega una variable más para poder llegar a la solución:

a = distancia
alfa = torsión
d = desplazamiento
theta = rotación
Art = articulación

```
##### CINEMATICA DIRECTA #####
clear all; clc; format short
disp(' #####***** CINEMÁTICA DIRECTA *****#####')
syms t1 t2 t3 t4 t5 real;
syms a2 a3 d3 d4 d5 real;

%Parámetros de Denavit - Hartenberg
%   alfa   a   theta   d   Art
dh=[           0   0   t1   0   0;
    -pi/2   0   t2   0   0;
         0   a2  t3   d3  0;
         0   a3  t4   d4  0;
    -pi/2   0   t5   d5  0];

                                Articulación (Art)
                                % Prismática = 1
                                % Rotacional = 0

    t=[t1 t2 t3 t4 t5];

% Estas cinco líneas no son necesarias
T1 = linktrans(dh(1,:),t1)
T2 = linktrans(dh(2,:),t2)
T3 = linktrans(dh(3,:),t3)
T4 = linktrans(dh(4,:),t4)
T5 = linktrans(dh(5,:),t5)

%% En donde:
%T1 =
%[   cos(t1), -sin(t1),   0,   0]
%[   sin(t1),   cos(t1),   0,   0]
%[         0,         0,   1,   0]
%[         0,         0,   0,   1]
```

Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

```

%T2 =
%[ cos(t2), -sin(t2), 0, 0]
%[ 0, 0, 1, 0]
%[ -sin(t2), -cos(t2), 0, 0]
%[ 0, 0, 0, 1]

%T3 =
%[ cos(t3), -sin(t3), 0, a2]
%[ sin(t3), cos(t3), 0, 0]
%[ 0, 0, 1, d3]
%[ 0, 0, 0, 1]

%T4 =
%[ cos(t4), -sin(t4), 0, a3]
%[ sin(t4), cos(t4), 0, 0]
%[ 0, 0, 1, d4]
%[ 0, 0, 0, 1]

%T5 =
%[ cos(t5), -sin(t5), 0, 0]
%[ 0, 0, 1, d5]
%[ -sin(t5), -cos(t5), 0, 0]
%[ 0, 0, 0, 1]

T=simple (fkine (dh, t))

% Columna 1 de T
%T=
%[ 1/4*cos(-t5-t4-t3+t1-t2)+1/4*cos(t5-t4-t3+t1-t2)+1/4*cos(-t5+t4+t3+t1+t2)+1/4*cos(t5+t4+t3+t1+t2)+1/2*cos(t1-t5)-1/2*cos(t1+t5)
%[ 1/4*sin(t5+t4+t3+t1+t2)+1/4*sin(-t5+t4+t3+t1+t2)+1/4*sin(t5-t4-t3+t1-t2)+1/4*sin(-t5-t4-t3+t1-t2)-1/2*sin(t1+t5)+1/2*sin(t1-t5)
%[ -1/2*sin(t2+t3+t4+t5)-1/2*sin(t2+t3+t4-t5)
%[ 0

% Columna 2 de T
-1/4*sin(t5-t4-t3+t1-t2)+1/4*sin(-t5-t4-t3+t1-t2)-1/4*sin(t5+t4+t3+t1+t2)+1/4*sin(-t5+t4+t3+t1+t2)+1/2*sin(t1+t5)+1/2*sin(t1-t5)
-1/4*cos(-t5+t4+t3+t1+t2)+1/4*cos(t5+t4+t3+t1+t2)-1/4*cos(-t5-t4-t3+t1-t2)+1/4*cos(t5-t4-t3+t1-t2)-1/2*cos(t1-t5)-1/2*cos(t1+t5)
1/2*cos(t2+t3+t4-t5)-1/2*cos(t2+t3+t4+t5)
0

% Columna 3 de T
1/2*sin(-t4-t3+t1-t2)-1/2*sin(t4+t3+t1+t2)
1/2*cos(t4+t3+t1+t2)-1/2*cos(-t4-t3+t1-t2)
-cos(t2+t3+t4)
0

% Columna 4 de T
1/2*d5*sin(-t4-t3+t1-t2)-1/2*d5*sin(t4+t3+t1+t2)+1/2*a3*cos(-t3+t1-t2)+1/2*a3*cos(t3+t1+t2)-sin(t1)*d4+1/2*a2*cos(t1-t2)+1/2*a2*cos(t1+t2)-sin(t1)*d3]
1/2*d5*cos(t4+t3+t1+t2)-1/2*d5*cos(-t4-t3+t1-t2)+1/2*a3*sin(t3+t1+t2)+1/2*a3*sin(-t3+t1-t2)+cos(t1)*d4+1/2*a2*sin(t1+t2)+1/2*a2*sin(t1-t2)+cos(t1)*d3]
-cos(t2+t3+t4)*d5-sin(t2+t3)*a3-sin(t2)*a2]
1]

```

En cualquiera de los dos casos la matriz T indica la localización del sistema del efector final con respecto al sistema de referencia de la base del robot; es decir, la matriz T es la solución de la cinemática directa del robot.

Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

5.2 PROBLEMA CINEMÁTICO INVERSO

Se trata de resolver un sistema de ecuaciones no lineales, en donde se debe plantear:

- 1) La existencia o no de soluciones.
- 2) El que existan soluciones múltiples.
- 3) Un método general para buscar una solución.

- 1) Existencia o no de soluciones.

Se encuentra directamente relacionada con el espacio de trabajo del manipulador.

Se puede distinguir entre:

- Espacio de trabajo diestro. Volumen del espacio que el robot puede alcanzar con su elemento terminal en cualquier orientación.
- Espacio de trabajo alcanzable. Volumen del espacio que el robot puede alcanzar con su elemento terminal en al menos una orientación.

Esto implica que el Espacio de trabajo diestro es un subconjunto del espacio de trabajo alcanzable.

- 2) Soluciones múltiples.

El hecho de que un manipulador posea múltiples soluciones puede causar problemas debido a que el sistema tiene que ser capaz de elegir solo una solución. Sin embargo, se utilizan criterios para darle una solución óptima.

El número de soluciones depende del número de articulaciones del manipulador, pero teniendo en cuenta que es función de los parámetros de D-H asociados (d_i , a_i , y α_i para una articulación de revolución), y del rango permitido de movimiento de las articulaciones.

- 3) Método para buscar una solución.

No existe algoritmo general que pueda emplearse para resolver un sistema de ecuaciones no lineales. Lo primero será definir ¿Qué constituye la solución de un manipulador dado?

Un manipulador se considerara resoluble si las variables de articulación pueden determinarse mediante un algoritmo que permite obtener todos los conjuntos de variables de articulación asociados a una posición y orientación dadas.

Dividiremos todas las estrategias de solución de manipuladores propuestos en dos clases amplias: soluciones de forma cerrada (analíticas) y soluciones numéricas. Debido a su naturaleza iterativa, las soluciones numéricas son mucho más lentas que la solución de forma

Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

cerrada, de hecho estas soluciones son tan lentas que para casi todos los fines no estaremos enfocados en el enfoque numérico para la solución del problema cinemático.

En este contexto, “forma cerrada” significa un método de solución basado en expresiones analíticas o en la solución de un polinomio de grado 4 o menor de forma que basta con los cálculos no iterativos para llegar a una solución. Dentro de la clase de solución de forma cerrada se encuentran dos métodos para obtener la solución: el método algebraico y el método geométrico. Estas distinciones son algo confusas, pues cualquier método geométrico a considerar se aplica por medio de expresiones algebraicas, por lo que los dos métodos son similares. Los métodos tal vez solo difieren en el enfoque.

5.2.1 CINEMÁTICA INVERSA

El objetivo de la solución de la cinemática inversa consiste en encontrar los valores que debe adoptar las coordenadas articulares del robot para que su extremo se posicione y oriente según una determinada localización espacial.

Dada la posición y orientación del efector final del robot, el problema cinemático inverso consiste en calcular todos los posibles conjuntos de ángulos entre articulaciones que podrían usarse para obtener la posición y orientación deseada. La obtención de las ecuaciones que rigen la cinemática inversa son dependientes de la configuración del robot.

A diferencia del problema cinemático directo, en este caso no existe una manera sistemática de obtener una solución, siendo el procedimiento de obtención fuertemente dependiente de la configuración del robot.

La ausencia de una solución significa que el robot no puede alcanzar la posición y orientación deseada porque se encuentra fuera del espacio de trabajo del robot o fuera de los rangos permisibles de cada una de sus articulaciones. A la hora de resolver el problema cinemático inverso es mucho más adecuado encontrar una solución cerrada; esto es, encontrar una relación matemática explícita de la forma:

$$q = f_x(x, y, z, \alpha, \beta, \gamma)$$

Este tipo de solución presenta, entre otras, las siguientes ventajas:

1. En muchas aplicaciones, el problema cinemático inverso ha de resolverse en tiempo real (por ejemplo, en el seguimiento de una determinada trayectoria). Una solución de tipo iterativo no garantiza tener la solución en el momento adecuado.
2. Al contrario de lo que ocurría en el problema cinemático directo, con cierta frecuencia la solución del problema cinemático inverso no es única;

Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

existiendo diferentes que posicionan y orientan el extremo del robot de mismo modo. En estos casos una solución cerrada permite incluir determinadas reglas o restricciones que aseguren que la solución obtenida sea la más adecuada posible.

No obstante, a pesar de las dificultades comentadas, la mayor parte de los robots poseen cinemáticas relativamente simples que facilitan en cierta medida la resolución de su problema cinemático inverso.

Por ejemplo si se consideran solo tres primeros grados de libertad de muchos robots, estos tienen una estructura planar, esto es, los tres primeros elementos quedan contenidos en un plano. Esta circunstancia facilita la resolución del problema. Asimismo, en muchos robots se da la circunstancia de que los tres grados de libertad últimos, dedicados fundamentalmente a orientar el extremo del robot, correspondan a giros sobre los ejes que se cortan en un punto.

De nuevo esta situación facilita el cálculo correspondiente a la posición y orientación deseadas. Por lo tanto, para los casos citados y otros, es posible establecer ciertas pautas generales que permitan plantear y resolver el problema cinemático inverso de una manera sistemática.

Los métodos geométricos permiten tener normalmente los valores de las primeras variables articulares, que son las que consiguen posicionar el robot. Para ello utilizan relaciones trigonométricas y geométricas sobre los elementos del robot. Se suele recurrir a la resolución de triángulos formados por los elementos y articulaciones del robot [1].

Como alternativa para resolver el mismo problema se puede recurrir a manipular directamente las ecuaciones correspondientes al problema cinemático directo.

Es decir, puesto que este establece la relación:

$$T = \begin{vmatrix} x & y & z & P \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

Donde los elementos T son funciones de las coordenadas articulares, es posible pensar que mediante ciertas combinaciones de las ecuaciones planteadas se puedan despejar las n variables articulares q_i en función de las componentes de los vectores “ x ”, “ y ”, “ z ” y “ P ”.

Por último, si se consideran robots con capacidad de posicionar y orientar su extremo en el espacio, esto es, robots con 5 ó 6 grados de libertad, el método de desacoplamiento cinemático permite, para determinados tipos de robots, resolver los primeros grados de libertad, dedicados al posicionamiento, de una manera independiente a la resolución de los últimos grados de libertad, dedicados

Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

a la orientación. Cada uno de estos dos problemas simples podrá ser tratado y resuelto por cualquier procedimiento.

5.2.2 RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA CINEMÁTICO INVERSO A PARTIR DE LA MATRIZ DE TRANSFORMACIÓN HOMOGÉNEA

En principio es posible tratar de obtener el modelo cinemático inverso de un robot a partir del conocimiento de su modelo directo. Es decir, suponiendo conocidas las relaciones que expresan el valor de la posición y orientación del extremo del robot en función de sus coordenadas articulares, obtener por manipulación de aquellas las relaciones inversas.

Sin embargo, en la práctica esta tarea no es trivial siendo en muchas ocasiones tan compleja que obliga a desecharla. Además, puesto que el problema cinemático directo, resuelto a través de T contiene varias ecuaciones buscando solo las relaciones necesarias (una por cada grado de libertad), existirá, necesariamente ciertas dependencias entre las expresiones de partida con lo cual la elección de las ecuaciones debe hacerse con sumo cuidado.

5.2.3 DESACOPLO CINEMÁTICO

Los procedimientos vistos anteriormente permiten obtener los valores de las 3 primeras variables articulares del robot, aquellas que posicionan su extremo en las coordenadas (P_x , P_y , P_z) determinadas, aunque pueden ser igualmente utilizadas para la obtención de las 5 variables articulares a pesar de mayor complejidad.

Ahora bien, como es sabido, en general no basta con posicionar el extremo del robot en un punto del espacio, sino que casi siempre es preciso también conseguir que la herramienta que aquel porta se oriente de una manera determinada. Para ello, de manera general, los robots cuentan con dos o tres grados de libertad adicionales, situados al final de la cadena cinemática y cuyos ejes, habitualmente, se cortan en un punto, que informalmente se denomina muñeca del robot. Si bien la variación de estos últimos grados de libertad origina un cambio en la posición final del extremo real del robot, su verdadero objetivo es poder orientar la herramienta del robot libremente en el espacio.

El método de desacoplo cinemático saca partido de este hecho, separando ambos problemas: Posición y orientación. Para ello, dada una posición y orientación final deseadas, establece las coordenadas del punto de corte de los últimos ejes (muñeca del robot) calculándose los valores de las tres primeras variables articulares (q_1 , q_2 , q_3) que consiguen posicionar este punto. A partir de

Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

los datos de orientación y de los ya calculados (q_1 , q_2 , q_3) obtiene los valores del resto de las variables articulares [1].

5.2.4 PROGRAMA GRÁFICO PARA LA SOLUCIÓN DE LA CINEMÁTICA INVERSA

La simulación es el proceso de diseñar un modelo de un sistema real y llevar a término experiencias con él, con la finalidad de comprender el comportamiento del sistema o evaluar nuevas estrategias dentro de los límites impuestos por un cierto criterio o un conjunto de ellos para el funcionamiento del sistema. El objetivo de la simulación es la mejor comprensión del movimiento del mecanismo y para la predicción del movimiento del sistema sin necesidad de usar un prototipo físico.

Para poder lograr este objetivo se hizo uso de un Toolbox de Robótica implementado en MATLAB [CORKE, 1996] que fue desarrollado con el fin de trabajar fácilmente con la notación usada en el algoritmo dado por Denavit Hartenberg. En este caso solamente se analizará la respuesta del mecanismo seleccionado ante posiciones articulares definidas.

Con los parámetros de D-H que se utilizaron para la cinemática directa, se puede encontrar la solución de la cinemática inversa; es decir, la relación existente entre las coordenadas articulares y la ubicación del robot.

Se ha hecho mediante dos métodos:

a) Método convencional

La solución por el método convencional se puede realizar, utilizando algún software que permita obtener la solución de matrices, tal es el caso del MATLAB o de algún software de lenguaje de programación en "C".

El método convencional es más prolongado que el otro método, pero en este se muestra a detalle la solución, pues se observa paso a paso como se obtienen los ángulos para cada articulación.

A continuación se muestran el código de programación que genera el resultado de nuestras incógnitas (ángulos q) en función de nuestras variables:

No olvidar que:

a_{i-1}	=	distancia
A_{i-1}	=	torsión
d_i	=	desplazamiento
q_i	=	rotación

Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

```

clc, clear all
syms T01 T12 T23 T34 T45 T13 T35 T03 T30 T351 T40 T451 T15 c12 s12 c1 c2 c3 c4 c5 s1 s2 s3
s4 s5 d1 d2 d3 d4 d5 a2 a3;
syms c23 s23 Px Py Pz VI VI2 q1 ro T35_1 T151 T10 T02 T20 T251 T25;

% Matriz transformada
%
%
%      [      cqi,      -sqi,      0,      ai-1]
%T(i-1) (i)= [sqi*cAi-1,  cqi*cAi-1, -sAi-1, -sAi-1*di]
%      [sqi*sAi-1,  cqi*sAi-1,  cAi-1,  cAi-1*di]
%      [      0,      0,      0,      1]
%
% Parámetros de Denavit-Hartenberg
%
%      | ai-1 | di | Ai-1 | qi |
%  0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
%  1 | 0 | 0 | 0 | q1 |
%  2 | 0 | 0 | -90 | q2 |
%  3 | a2 | d3 | 0 | q3 |
%  4 | a3 | d4 | 0 | q4 |
%  5 | 0 | d5 | -90 | q5 |

% Declaración de matrices
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%5
T01 = sym('c1,-s1,0,0 ; s1,c1,0,0 ; 0,0,1,0 ; 0,0,0,1');
T12 = sym('c2,-s2,0,0 ; 0,0,-1,0 ; s2,c2,0,0 ; 0,0,0,1');
T23 = sym('c3,-s3,0,a2; s3,c3,0,0 ; 0,0,1,d3 ; 0,0,0,1');
T34 = sym('c4,-s4,0,a3; s4,c4,0,d4 ; 0,0,1,0 ; 0,0,0,1');
T45 = sym('c5,-s5,0,0 ; 0,0,-1,-d5 ; s5,c5,0,0 ; 0,0,0,1');
% Multiplicando las matrices T12 y T23
T13 = T12*T23;
% SUSTITUCIÓN DE VARIABLES
% c23= c2*c3 - s2*s3;
% s23= c2*s3 + s2*c3;
T13 =subs(T13,[c2*c3-s2*s3],['c23']);
T13 =subs(T13,[-c2*c3+s2*s3],['-c23']);
T13 =subs(T13,[c2*s3+s2*c3],['s23']);
T13 =subs(T13,[-c2*s3-s2*c3],['-s23']);

% Resultado de la T13
% T13 =
% [ c23, -s23, 0, a2*c2]
% [ 0, 0, -1, -d3]
% [ s23, c23, 0, a2*s2]
% [ 0, 0, 0, 1]

% Multiplicando las matrices T34 y T45
T35 = T34*T45;

% Resulta
% T35 =
% [ c4*c5, -c4*s5, s4, a3 + d5*s4]
% [ c5*s4, -s4*s5, -c4, d4 - c4*d5]
% [ s5, c5, 0, 0]
% [ 0, 0, 0, 1]

% Multiplicando las matrices T13 y T35
T15 = T13*T35;

```

Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

```

% Resulta
% T15 =
% [ c23*c4*c5 - c5*s23*s4,    s23*s4*s5 - c23*c4*s5, c23*s4 + c4*s23, a2*c2 + c23*(a3 + d5*s4) - s23*(d4 - c4*d5)]
% [          -s5,          -c5,          0,          -d3]
% [ c23*c5*s4 + c4*c5*s23, - c23*s4*s5 - c4*s23*s5, s23*s4 - c23*c4, a2*s2 + c23*(d4 - c4*d5) + s23*(a3 + d5*s4)]
% [          0,          0,          0,          1]

% Multiplicando las matrices T01 y T15
T05 = T01*T15;
T05=factor(T05);    % "factor" sirve para descomponer las expresiones

% Resulta
%T05 =
% [ s1*s5 - c1*c5*s23*s4 + c1*c23*c4*c5, c5*s1 + c1*s23*s4*s5 - c1*c23*c4*s5, c1*(c23*s4 + c4*s23), d3*s1 + a2*c1*c2 + a3*c1*c23 - c1*d4*s23 + c1*c23*d5*s4 + c1*c4*d5*s23]
% [ c23*c4*c5*s1 - c5*s1*s23*s4 - c1*s5, s1*s23*s4*s5 - c23*c4*s1*s5 - c1*c5, s1*(c23*s4 + c4*s23), a2*c2*s1 - c1*d3 + a3*c23*s1 - d4*s1*s23 + c23*d5*s1*s4 + c4*d5*s1*s23]
% [          c5*(c23*s4 + c4*s23),          -s5*(c23*s4 + c4*s23),          s23*s4 - c23*c4,          c23*d4 + a2*s2 + a3*s23 - c23*c4*d5 + d5*s23*s4]
% [          0,          0,          0,          1]

% La matriz T05 es equivalente a tener cada término en función de variables
% Como sigue:
T05_1 = sym(' [r11,r12,r13,Px ; r21,r22,r23,Py ; r31,r32,r33,Pz ; 0,0,0,1] ');

%T05_1 =
% [ r11, r12, r13, Px]
% [ r21, r22, r23, Py]
% [ r31, r32, r33, Pz]
% [ 0, 0, 0, 1]
% Donde la última columna se refiere al vector posición

% Para dar solución al ángulo q1 se toma la inversa de T01 y se multiplica por T05_1, de
este producto se obtiene la columna 4,4:

T10 = inv(T01);
T151 = T10*T05_1;

% T15=(T05)*(T01_inversa)    Dónde T01_inversa = T10 = inv(T01)

T151 (1:3,4)
%=
% (Px*c1) + (Py*s1)
% (Py*c1) - (Px*s1)
% Pz
% Estos términos son igual a los términos en la columna 4 de la matriz T15

T15(1:3,4)
%=
% a2*c2 + c23*(a3 + d5*s4) - s23*(d4 - c4*d5)
% -d3
% a2*s2 + c23*(d4 - c4*d5) + s23*(a3 + d5*s4)

% Igualando los términos
%1' (Px*c1) + (Py*s1) = a2*c2 + c23*(a3 + d5*s4) - s23*(d4 - c4*d5)
%2' (Py*c1) - (Px*s1) = -d3
%3' -Pz = -a2*s2 - c23*(d4 - c4*d5) - s23*(a3 + d5*s4)

% De la ecuación 2'
% con Px=roCos(fi) y Py=roSeno(fi) resulta :
ro=sqrt(Px^2+Py^2);

% Sustituyendo en la 2'
% (roSin(fi)*c1) - (roCos(fi)*s1) = -d3
% (S(fi)*c1) - (C(fi)*s1) = -d3/ro
% sin(fi-q) = -d3/ro ----> cos(fi-q) = sqrt(1-(d3^2/ro^2))
% fi = atan (Px,Py)
% fi-q1 = atan (-d3/ro , sqrt(1-(d3^2/ro^2)))

% -----
% Por lo tanto
% q1 = atan2(Py,Px) - atan2((- d3)/ro,+-sqrt(1-(( d3^2)/(ro^2)))
% -----

```

Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

```

% Para encontrar q3, elevamos a la segunda potencia a la 1, la 2 y la 3, resultando:
% Las operaciones en un ambiente SYM son generalmente más lentas que
% en el STRING, pero hay algunas que solo se pueden hacer con SYM,
% por ejemplo el cálculo algebraico:
% expand((x+3*y)*(-2*x+7*y))
% ans = -2*x^2+x*y+21*y^2

% Línea 1 de T151
e1=expand(sym(((Px*c1) + (Py*s1))*((Px*c1) + (Py*s1))))
% e1 = Px^2*c1^2+2*Px*c1*Py*s1+Py^2*s1^2

% Línea 1 de T15
e2=expand(sym((a2*c2 + c23*(a3 + d5*s4) - s23*(d4 - c4*d5))^2))
% e2 = s23^2*c4^2*d5^2+c23^2*s4^2*d5^2+2*c23*s4*d5^2*s23*c4-
2*c23*s4*d5*s23*d4+2*c23*s4*d5*c2*a2+2*c23*a3*s23*c4*d5+2*s23*c4*d5*c2*a2+c23
^2*a3^2+s23^2*d4^2+c2^2*a2^2+2*c23^2*s4*d5*a3-2*c23*a3*s23*d4+2*c23*a3*c2*a2-
2*s23^2*c4*d5*d4-2*s23*d4*c2*a2

%Igualando e1 y e2 queda:
%4' Px^2*c1^2 + 2*Px*Py*c1*s1 + Py^2*s1^2 = a2^2*c2^2 + 2*a2*a3*c2*c23 +
2*a2*c2*c23*d5*s4 + 2*a2*c2*c4*d5*s23 - 2*a2*c2*d4*s23 + a3^2*c23^2 +
2*a3*c23^2*d5*s4 + 2*a3*c23*c4*d5*s23 - 2*a3*c23*d4*s23 + c23^2*d5^2*s4^2 +
2*c23*c4*d5^2*s23*s4 - 2*c23*d4*d5*s23*s4 + c4^2*d5^2*s23^2 -
2*c4*d4*d5*s23^2 + d4^2*s23^2
% Correspondiente solo a la primer línea de T151 y T15

%Línea 2 de T151
e3=expand(sym(((Px*c1) + (Py*s1))*((Px*c1) + (Py*s1))))
%5' Px^2*c1^2 - 2*Px*Py*c1*s1 + Py^2*s1^2 = d3^2

% El resultado es el mismo que:
%% e33=expand(sym(((Py*c1) + (-Px*s1))*((Py*c1) + (-Px*s1))))
%e33 = Py^2*c1^2-2*Px*c1*Py*s1+Px^2*s1^2 = d3^2
% Debido a la identidad trigonométrica:
% (cosX)^2 + (senX)^2 = 1

% Línea 3 de T15
e5=expand(sym((-a2*s2 - c23*(d4 - c4*d5) - s23*(a3 + d5*s4))^2))
%6' Pz^2 = a2^2*s2^2 + 2*a2*a3*s2*s23 - 2*a2*c23*c4*d5*s2 + 2*a2*c23*d4*s2
+ 2*a2*d5*s2*s23*s4 + a3^2*s23^2 - 2*a3*c23*c4*d5*s23 + 2*a3*c23*d4*s23 +
2*a3*d5*s23^2*s4 + c23^2*c4^2*d5^2 - 2*c23^2*c4*d4*d5 + c23^2*d4^2 -
2*c23*c4*d5^2*s23*s4 + 2*c23*d4*d5*s23*s4 + d5^2*s23^2*s4^2

% Es lo mismo que (Con signo positivo):
% e55=expand(sym((a2*s2 + c23*(d4 - c4*d5) + s23*(a3 + d5*s4))^2))

% Sumando las tres ecuaciones y reduciendo términos resulta:
%7' (Px^2 + Py^2 + Pz^2 - (d3^2 + a2^2 + a3^2 + d4^2 + d5^2) + 2*c4*d4*d5 -
2*a3*d5*s4)/(2*a2) = (a3 + d5*s4)*c3 - (d4 - c4*d5)*s3

% El primer miembro se iguala a ki como sigue:
%ki = sym((Px^2 + Py^2 + Pz^2 - (d3^2 + a2^2 + a3^2 + d4^2 + d5^2) +
2*c4*d4*d5 - 2*a3*d5*s4)/(2*a2));

% Y la 7' se reduce a:
% ki = (a3 + d5*s4)*c3 - (d4 - c4*d5)*s3 %--- de donde:
% fi2 = atan2((a3 + d5*s4), (d4 - c4*d5))
% fi2 - q3 = atan2(k, sqrt((a3 + d5*s4)^2 + (d4 - c4*d5)^2 - ki^2))

% -----
% La solución para q3 se da por:
%%%% q3 = atan2((a3 + d5*s4), (d4 - c4*d5)) - atan2(ki, (+sqrt((a3
+ d5*s4)^2 + (d4 - c4*d5)^2 - ki^2)));

```

Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

```

% -----
% Obteniendo la inversa de la matriz T03
T03=T01*T13;
T30 = inv(T03);           %inversa de T03
T30=factor(T30);

% Multiplicando por la T05_1 se obtiene:
T351 = T30*T05_1;
T351=factor(T351);

% Columna 1 de T351
%T351 =
% [ (r31*s23*c1^2 + c23*r11*c1 + r31*s23*s1^2 + c23*r21*s1)/((c23^2 + s23^2)*(c1^2 + s1^2)),
% [ (c23*r31*c1^2 - r11*s23*c1 + c23*r31*s1^2 - r21*s23*s1)/((c23^2 + s23^2)*(c1^2 + s1^2)),
% [
% [
% Columna 2 de T351
% [
% [ (r32*s23*c1^2 + c23*r12*c1 + r32*s23*s1^2 + c23*r22*s1)/((c23^2 + s23^2)*(c1^2 + s1^2)),
% [ (c23*r32*c1^2 - r12*s23*c1 + c23*r32*s1^2 - r22*s23*s1)/((c23^2 + s23^2)*(c1^2 + s1^2)),
% [
% [
% Columna 3 de T351
% [
% [ (r33*s23*c1^2 + c23*r13*c1 + r33*s23*s1^2 + c23*r23*s1)/((c23^2 + s23^2)*(c1^2 + s1^2)),
% [ (c23*r33*c1^2 - r13*s23*c1 + c23*r33*s1^2 - r23*s23*s1)/((c23^2 + s23^2)*(c1^2 + s1^2)),
% [
% [
% Columna 4 de T351
% [
% [ (Px*c1*c23 + Py*c23*s1 + Pz*c1^2*s23 + Pz*s1^2*s23 - a2*c1^2*c2*c23 - a2*c1^2*s2*s23 - a2*s1^2*s2*s23)/((c23^2 + s23^2)*(c1^2 + s1^2)),
% [ (-Px*c1*s23 + Py*s1*s23 - Pz*c1^2*c23 - Pz*c23*s1^2 - a2*c1^2*c2*s23 + a2*c1^2*c23*s2 - a2*c2*s1^2*s23 + a2*c23*s1^2*s2)/((c23^2 + s23^2)*(c1^2 + s1^2)),
% [
% [
% Se utiliza sólo la columna 4
T351(1:2,4) %=
%8' (Px*c1*c23 + Py*c23*s1 + Pz*c1^2*s23 + Pz*s1^2*s23 - a2*c1^2*c2*c23 -
a2*c2*c23*s1^2 - a2*c1^2*s2*s23 - a2*s1^2*s2*s23)
%9' -(Px*c1*s23 + Py*s1*s23 - Pz*c1^2*c23 - Pz*c23*s1^2 - a2*c1^2*c2*s23 +
a2*c1^2*c23*s2 - a2*c2*s1^2*s23 + a2*c23*s1^2*s2)

% Las ecuaciones 8' y 9' se igualan a la columna 4 de la matriz T35 antes mencionada:
T35(1:2,4)
%=
%8.1' a3 + d5*s4
%9.1' d4 - c4*d5

% Igualando las ecuaciones, reduciendo términos y despejando a s4 y c4 se obtiene:
%10' s4 = (Px*c1*c23 + Py*c23*s1 + Pz*s23 - a2*c3 - a3)/d5;
%11' c4 = - (c23*Pz - s23*Px*c1 + s3*a2 - s23*Py*s1 - d4)/d5;

% -----
% La solución para q4 es:
% % % % q4 = atan2(s4 , c4)
% -----

% De la 10' y la 11' se despeja ahora a s23 y c23 respectivamente y se obtiene:
%12' s23 = (s4*d5 - Px*c1*c23 - Py*c23*s1 + a2*c3 + a3)/Pz ;
%13' c23 = (-c4*d5 + s23*Px*c1 - s3*a2 + s23*Py*s1 + d4)/Pz;

% Sustituyendo entre sí, reduciendo términos y resolviendo se obtiene:
% s23 = ((a3 + a2*c3 + d5*s4)*Pz + (Px*c1 + Py*s1)*(c4*d5 - d4 + a2*s3))/(Pz^2
+ (Px*c1 + Py*s1)^2)

```

Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

```
%c23 = ((Px*c1 + Py*s1)*(a3 + a2*c3 + d5*s4) - Pz*(c4*d5 - d4 +
a2*s3))/(Px^2*c1^2 + 2*Px*Py*c1*s1 + Py^2*s1^2 + Pz^2)

% Solución para q23 =q2 +q3, y como los denominadores son iguales:
%s23 = ((a3 + a2*c3 + d5*s4)*Pz + (Px*c1 + Py*s1)*(c4*d5 - d4 + a2*s3))
%c23 = ((Px*c1 + Py*s1)*(a3 + a2*c3 + d5*s4) - Pz*(c4*d5 - d4 + a2*s3))

% q23= atan2(s23 , c23)

% -----
% La solución para q2 está dada por:
% q2 = q23 - q3
% -----

% Obteniendo la primera columna de la matriz T05:
T05(1:3,1)
% =
%14' 1 = s1*s5 - c1*c5*s23*s4 + c1*c23*c4*c5
%15' 0 = c23*c4*c5*s1 - c5*s1*s23*s4 - c1*s5
%16' 0 = c5*(c23*s4 + c4*s23)

% Despejando en la 14' y 15' a s5 y c5
%s5 = (1 - (- c1*s23*s4 + c1*c23*c4)*c5)/s1
%c5 = c1*s5/(c23*c4*s1 - s1*s23*s4)

% Resolviendo entre sí resulta:
%24.' c5= c1/((s1*(c23*c4*s1 - s1*s23*s4)) + (c1^2*c23*c4 - c1^2*s23*s4))
%26.' s5 = (c23*c4*s1 - s1*s23*s4)/(s1*(c23*c4*s1 - s1*s23*s4) +
(c1*(c1*c23*c4 - c1*s23*s4)))

% -----
% q5 = atan2(s5 , c5)
% -----
```

a) Utilizando el toolbox de Robótica de MATLAB

De igual forma que en la cinemática directa, se ha utilizado el software MATLAB para encontrar la solución de la cinemática inversa, el cual nos permite realizar operaciones que a lápiz serían tardadas y engorrosas, de una manera rápida y sencilla.

La solución mediante este método se realiza utilizando la convención de Craig, aplicando funciones especiales para la solución de la cinemática directa de cualquier robot que tenga a los mas 6 GDL y solo tenga articulación prismáticas o rotatorias.

La toolbox de robótica dispone de la función “ikine” (inverse kinematics) que mediante métodos iterativos, resuelve el problema cinemático inverso de un robot. Debe considerarse que por utilizar un algoritmo iterativo y no una solución cerrada puede en ocasiones tardar en converger y en el caso de haber soluciones múltiples proporcionara una de ellas, sin poder seleccionar cual. La convergencia o no convergencia del método depende únicamente del punto inicial elegido para las iteraciones.

A continuación se muestran un ejemplo con líneas hechas en MATLAB para obtener la solución (ángulos t) de la cinemática inversa:

Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

No olvidar que cambian de símbolo algunas variables y se agrega una variable más para poder llegar a la solución:

a = distancia
alfa = torsión
d = desplazamiento
theta = rotación
Art = articulación

Ejemplo con el punto final (Pf): (10, 10, 10)

```
clear all; clc; format short
disp('##### CINEMÁTICA INVERSA CON 5 GDL #####')
disp('% Coordenadas del punto final de la herramienta %')
                                % Coordenadas del punto final
                                % de la herramienta (Pf)
                                x=10
                                y=10
                                z=10
                                %Generación de los valores de:
                                a2=9.94;
                                a3=14.694;
                                d3=0.728;
                                d4=0;
                                d5=5.481;

t1=0; t2=0; t3=0; t4=0; t5=0; % Los valores de theta son irrelevantes

disp('-----')
disp('##### Parámetros de Denavit - Hartenberg #####')
%Parámetros de Denavit - Hartenberg
%   alfa   a   theta   d   Art           Articulación (Art)
dh=[ 0      0      t1    0    0;           % Prismática = 1
    -pi/2  0      t2    0    0;           % Rotacional = 0
      0     a2     t3    d3   0;
      0     a3     t4    d4   0;
    -pi/2  0      t5    d5   0]
phi=zeros(1,length(x));

% Se crea la trayectoria de transformaciones
for k=1:length(x)
    TG(:, :, k) = [cos(phi(k)) -sin(phi(k)) 0 x(k);
                  sin(phi(k))  cos(phi(k)) 0 y(k);
                  0            0           1 z(k);
                  0            0           0  1];
end

ilimit=1000;
stol=1e-6;

disp('-----')
t=ikine(dh, stol, ilimit, TG, [0 0 0 0 0], [1 1 1 1 1 0])

% Grafica representativa del robot
plotbot(dh, t, 'lfdw')

##### ***** VALORES DE THETA (radianes): ***** #####
disp('*****')
disp(' *** Valores de theta en radianes ***')
    t1=t(1)
    t2=t(2)
    t3=t(3)
    t4=t(4)
    t5=t(5)
```

Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

```

##### COMPROBACIÓN CON CINEMÁTICA DIRECTA #####
disp('*****')
disp(' Comprobación de los valores de theta')
dhn=[0      0 t1 0 0;
     -pi/2 0 t2 0 0;
      0     a2 t3 d3 0;
      0     a3 t4 d4 0;
     -pi/2 0 t5 d5 0]

q=[t1 t2 t3 t4 t5];
disp('-----')
disp(' No olvidar que:')
Pf=[x, y, z]
T=fkine(dhn,q)
    
```

El resultado de este código muestra:

```

#####
##### ***** CINEMÁTICA INVERSA CON 5 GDL ***** #####
% Coordinadas del punto final de la herramienta %

x =

    10

y =

    10

z =

    10

-----
##### Parámetros de Denavit - Hartenberg #####

dh =

     0         0         0         0         0
-1.5708         0         0         0         0
     0     9.9400         0     0.7280         0
     0    14.6940         0         0         0
-1.5708         0         0     5.4810         0

-----

t =

    0.7339   -1.5243    1.9014    2.7645    0.4708
-----
*** Valores de theta en radianes ***

t1 =

    0.7339

t2 =

|
-1.5243

t3 =

    1.9014

t4 =

    2.7645

t5 =

    0.4708

-----
Comprobación de los valores de theta

dhn =

     0         0     0.7339         0         0
-1.5708         0   -1.5243         0         0
     0     9.9400    1.9014     0.7280         0
     0    14.6940    2.7645         0         0
-1.5708         0     0.4708     5.4810         0
    
```

Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

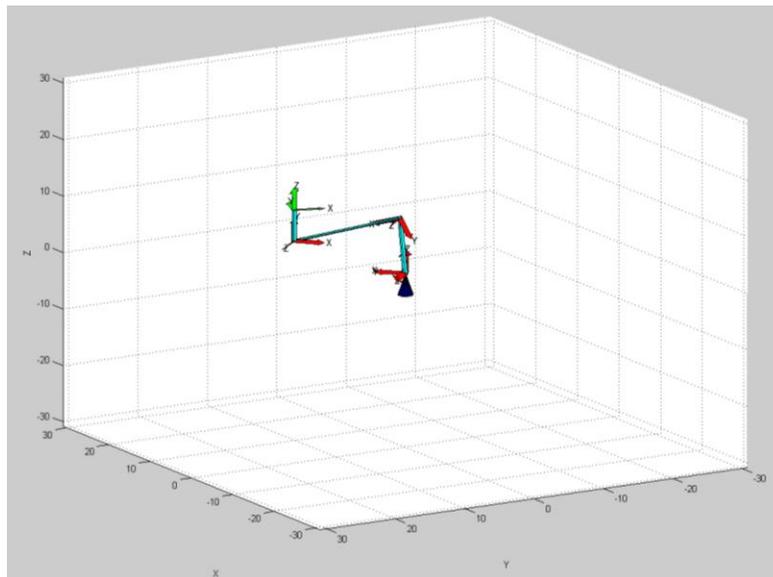
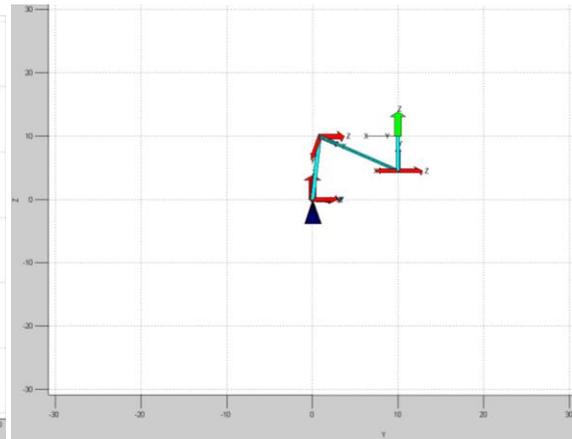
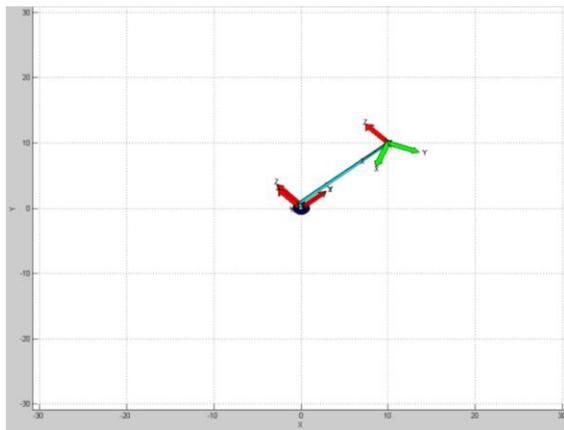
No olvidar que:

Pf =

10 10 10

T =

-0.3579	0.9337	-0.0000	10.0000
-0.9337	-0.3579	-0.0000	10.0000
-0.0000	0.0000	1.0000	10.0000
0	0	0	1.0000



Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

CAPÍTULO 6. PROGRAMACIÓN EN VISUAL BASIC

6.1 CÓDIGO DE PROGRAMACIÓN

```
Private Sub cmdStop_Click()
```

```
    x = Val(txtPx.Text)
    y = Val(txtPy.Text)
    z = Val(txtPz.Text)
```

```
    q1 = Val(Lbq1.Caption)
    q2 = Val(Lbq2.Caption)
    q3 = Val(Lbq3.Caption)
    q4 = Val(Lbq4.Caption)
    q5 = Val(Lbq5.Caption)
```

```
    q1rd1 = Val(txtq1rd1.Text)
    q2rd2 = Val(txtq2rd2.Text)
    q3rd3 = Val(txtq3rd3.Text)
    q4rd4 = Val(txtq4rd4.Text)
    q5rd5 = Val(txtq5rd5.Text)
```

```
    xe = Val(LbX_e.Caption)
    ye = Val(LbY_e.Caption)
    ze = Val(LbZ_e.Caption)
```

```
    If (xe = x) And (ye = x) And (ze = x) Then
        s1 = MsgBox("Debe estar en movimiento para poder detener su trayectoria", vbCritical,
"Cancelación")
        Exit Sub
    ElseIf (q1 = q1rd1) And (q2 = q2rd2) And (q2 = q2rd2) And (q2 = q2rd2) And (q2 = q2rd2) Then
        s1 = MsgBox("Debe estar en movimiento para poder detener su trayectoria", vbCritical,
"Cancelación")
        Exit Sub
    Else
        serv_q1 = Round((q1rd1 / 0.0075), 0) + 6000 'otro oscilador, cambiar denominador
        serv_q2 = Round(((126 - q2rd2) / 0.0075), 0) + 6000
        serv_q3 = Round((q3rd3 / 0.0075), 0) + 6000
        serv_q4 = Round(((90 + q4rd4) / 0.0075), 0) + 6000
        serv_q5 = Round(((180 - q5rd5) / 0.0075), 0) + 6000

        Mult1 = serv_q1 \ 255
        resid1 = serv_q1 Mod 255
        Mult2 = serv_q2 \ 255
        resid2 = serv_q2 Mod 255
        Mult3 = serv_q3 \ 255
```

Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

```
resid3 = serv_q3 Mod 255
Mult4 = serv_q4 \ 255
resid4 = serv_q4 Mod 255
Mult5 = serv_q5 \ 255
resid5 = serv_q5 Mod 255
```

```
MSComm1.Output = Chr$(Mult1)
MSComm1.Output = Chr$(resid1)
MSComm1.Output = Chr$(Mult2)
MSComm1.Output = Chr$(resid2)
MSComm1.Output = Chr$(Mult3)
MSComm1.Output = Chr$(resid3)
MSComm1.Output = Chr$(Mult4)
MSComm1.Output = Chr$(resid4)
MSComm1.Output = Chr$(Mult5)
MSComm1.Output = Chr$(resid5)
```

```
retardo = 0.3 + Timer
While retardo >= Timer
    DoEvents
Wend
MsgBox "El usuario pulsó 'Detener' la trayectoria, " & _
    "el programa puede seguir ejecutandose normalmente", vbCritical, "Error"
End If
End Sub
```

```
Private Sub Form_KeyDown(KeyCode As Integer, Shift As Integer)
    Enter = 13
    If KeyCode = Enter Then
        cmdEnviar = True
    End If
End Sub
```

```
Private Sub cmdEnd_Click()
    q1rd1 = Val(txtq1rd1.Text)
    q2rd2 = Val(txtq2rd2.Text)
    q3rd3 = Val(txtq3rd3.Text)
    q4rd4 = Val(txtq4rd4.Text)
    q5rd5 = Val(txtq5rd5.Text)
```

```
xe = LbX_e.Caption
ye = LbY_e.Caption
ze = LbZ_e.Caption
```

```
If ((xe = 9.94) And (ye = -0.728) And (ze = -14.694)) Or ((q1rd1 = 0) And (q2rd2 = 0) And (q3rd3 = 0) And (q4rd4 = 0) And (q5rd5 = 0)) Then
    End
```

Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

```
Else
  MsgBox ("Asegurese de haber apagado el programa correctamente")
End If
End Sub

Private Sub cmdEnviar_Click()

  Dim Mult1, Mult2, Mult3, Mult4, Mult5 As Byte
  Dim resid1, resid2, resid3, resid4, resid5 As Byte

  x = Val(txtPx.Text)
  y = Val(txtPy.Text)
  z = Val(txtPz.Text)
  pi = 3.14159265358979
  a2 = 9.94
  d4 = -14.694
  d1 = 17.575
  d3 = 0.728
  ' zf-> -20.175
  d5 = 5.481
  a3 = 0
  l = 1
  dentro = True
  Dent = True
  menor = False

  q1 = -1
  q31 = -1
  q32 = -1

  ri = ((x ^ 2) + (y ^ 2) + (z ^ 2)) ^ (1 / 2)
  fi = (-1 * (d4 - a2)) + d5
  rt0 = Sqr((a2 - 4.5) ^ 2 + (d4) ^ 2 + d3 ^ 2)

  xe = LbX_e.Caption
  ye = LbY_e.Caption
  ze = LbZ_e.Caption

  If ((x < 0) And (y > 0) And (z < 0)) Or ((x > 0) And (y >= -d3) And (z < 0)) Then
    qr1 = Atn(z / (Sqr(x ^ 2 + y ^ 2)))
    R1 = Sqr(x ^ 2 + y ^ 2 + z ^ 2)

    alfa = (a2 * Sin(qr1)) / (d5 - d4)
    beta = pi - alfa - qr1
    Cr = a2 ^ 2 + (d5 - d4) ^ 2 - (2 * a2 * (d5 - d4) * Cos(beta))

    If (qr1 < (-11 * pi / 30)) Then
```

Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

```
menor = True
Elseif (Cr > R1) Then
Dent = True
Elseif (beta <= -pi / 2) Then
Dent = False
Else
Dent = False
End If
End If

If ((x < 0) And (y <= -d3)) Or ((x > 0) And (y < -d3)) Then
r = Sqr(x ^ 2 + y ^ 2 + z ^ 2)
qr = Atn(z / (Sqr(x ^ 2 + y ^ 2)))

If (qr < (pi / 4)) Then
alf = (pi / 4) - qr
bet = (a2 * Sin(alf) / (d5 - d4))
bet = (Atn(bet / Sqr(-bet * bet + 1)))
gam = pi - alf - bet
c = ((d5 - d4) * Sin(gam) / Sin(alf)) - 0.2

If (c > r) Then
dentro = True
Elseif (gam <= pi / 2) Then
dentro = False
Else
dentro = False
End If
End If

If (xe = 0) And (ye = 0) And (ze = 0) Then
s1 = MsgBox("Inicie primero el programa, cambie el estado del boton 'OFF' a 'ON'",
vbExclamation, "Atención")
Elseif (x = 0) And (y = 0) And (z = 0) Then
s1 = MsgBox("Aun no ha introducido un punto", vbExclamation, "Fallo")
Elseif (x = xe) And (y = ye) And (z = ze) Then
MsgBox "Ingrese otro punto diferente"
Elseif (ri < rt0) Then
MsgBox "Punto fuera de alcance, incremente el punto"
Elseif (ri > fi) Then
s1 = MsgBox("Punto fuera de alcance por longitud del brazo, disminuya el punto",
vbExclamation, "Fallo")
Elseif (y = 0) And (x < 0) Then
MsgBox "Punto fuera de alcance, mientras que 'Xo' sea negativo, se debe cumplir y>0.728 o
y<-0.728"
Elseif (x < 0) And ((y < d3) And (y > -d3)) Then
```

Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

```
MsgBox "Punto fuera de alcance, mientras que 'Xo' sea negativo, se debe cumplir  $y > 0.728$  o  $y < -0.728$ "
```

```
Elseif (y < -d3) And (z < -7.23) Then
```

```
MsgBox "Punto fuera de alcance, mientras que 'Yo' sea negativo, 'z' debe ser mayor a -7.23"
```

```
Elseif (y = -d3) And (x < 0) And (z < -7.23) Then
```

```
MsgBox "Punto fuera de alcance, mientras 'Yo' sea negativo, 'z' debe ser mayor a -7.23"
```

```
Elseif (dentro = False) Then
```

```
MsgBox "Punto fuera de alcance, disminuya el punto"
```

```
Elseif (Dent = False) Or (menor = True) Then
```

```
If (menor = True) Then
```

```
MsgBox "Punto fuera de alcance, incremente el punto"
```

```
Elseif (Dent = False) Then
```

```
MsgBox "Punto fuera de alcance, disminuta el punto"
```

```
End If
```

```
Elseif (z < (d4 - d3)) Then
```

```
MsgBox "Punto fuera de alcance, Z no puede ser menor a -20.175"
```

```
Else
```

```
ri = ((x ^ 2) + (y ^ 2) + (z ^ 2)) ^ (1 / 2)
```

```
fi = (-1 * (d4 - a2)) + 5
```

```
Do While ((q1 < -0.00000021) Or (q1 > 180) Or (q3 < -0.0000002) Or (q3 > 180) Or (q2 < -0.000000003) Or (q2 > 135) Or (q4 < -90) Or (q4 > 90) Or (q5 < -0.00000015) Or (q5 > 180))
```

```
If (x <> a2) Or (z <> (d4 - d3)) Or (y <> -d3) Then
```

```
Dim Minimo As Single, Maximo As Single
```

```
Randomize
```

```
Minimo = -pi / 2
```

```
Maximo = pi / 2
```

```
q4 = ((Minimo - Maximo) * Rnd + Maximo)
```

```
Else
```

```
q4 = 0
```

```
End If
```

```
c4 = Cos(q4)
```

```
s4 = Sin(q4)
```

```
If (q4 = pi / 2) Then
```

```
c4 = 0
```

```
s4 = 1
```

```
Elseif (q4 = 0) Then
```

```
c4 = 1
```

```
s4 = 0
```

```
End If
```

```
~~~~~ para teta 1 ~~~~~
```

```
ro = Sqr((x ^ 2) + (y ^ 2))
```

```
If (x = 0) Then
```

Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

```
Ti = (Sqr(1 - ((d3 ^ 2) / (ro ^ 2))))
q1 = pi / 2 - Atn(((d3) / ro) / Ti)
Else
  Ti = (Sqr(1 - ((d3 ^ 2) / (ro ^ 2))))
  q1 = Atn(y / x) - Atn(((d3) / ro) / Ti)
End If

c1 = Cos(q1)
s1 = Sin(q1)
q1 = q1 * 180 / pi
q10 = Round(q1, 6)
Lbq1.Caption = Format(q10, "0.0000")

'~~~~~ para teta 3 ~~~~~
j = 1
Do While (j > -2)
  ki = (x ^ 2 + y ^ 2 + z ^ 2 - (d3 ^ 2 + a2 ^ 2 + a3 ^ 2 + d4 ^ 2 + d5 ^ 2) + 2 * c4 * d4 * d5 - 2
* a3 * d5 * s4) / (2 * a2)
  op = (a3 + d5 * s4) ^ 2 + (d4 - c4 * d5) ^ 2
  kip = ki ^ 2
  If (op < kip) Then
    ta4 = (j * (Sqr(kip - op)))
  Else
    ta4 = (j * (Sqr(op - kip)))
  End If
  xq3 = (d4 - c4 * d5)
  yq3 = (a3 + d5 * s4)

  If (ki > 0) Then
    If ta4 > 0 Then
      at3 = -Atn(ki / ta4)
    ElseIf ta4 < 0 Then
      at3 = -(pi + Atn(ki / ta4))
    ElseIf ta4 = 0 Then
      at3 = pi / 2
    End If
  ElseIf (ki < 0) Then
    If (ta4 > 0) Then
      at3 = -Atn(ki / ta4)
    ElseIf (ta4 < 0) Then
      at3 = -(pi + Atn(ki / ta4))
    ElseIf ta4 = 0 Then
      at3 = pi / 2
    End If
  Else
    at3 = Atn(ki / ta4)
  End If
End While
```

Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

```
If (yq3 > 0) Then
  If xq3 > 0 Then
    atq3 = Atn(yq3 / xq3)
  ElseIf xq3 < 0 Then
    atq3 = pi + Atn(yq3 / xq3)
  ElseIf xq3 = 0 Then
    atq3 = pi / 2
  End If
ElseIf (yq3 < 0) Then
  If xq3 > 0 Then
    atq3 = 2 * pi + Atn(yq3 / xq3)
  ElseIf xq3 < 0 Then
    atq3 = pi + Atn(yq3 / xq3)
  ElseIf xq3 = 0 Then
    atq3 = pi / 2
  End If
Else
  atq3 = Atn(yq3 / xq3)
End If
```

```
q3 = atq3 + at3
```

```
If (j = 1) Then
  q31 = q3
ElseIf (j = -1) Then
  q32 = q3
End If
```

```
j = j - 2
```

Loop

```
If ((q31 > -0.000002) And (q31 < pi)) And ((q32 > -0.000002) And (q32 < pi)) Then
  If (q31 > q32) Then
    q3 = q32
  ElseIf (q31 < q32) Then
    q3 = q31
  End If
ElseIf q31 > pi And (q32 > pi) Then
  If (q31 > q32) Then
    q3 = q31
  ElseIf (q31 < q32) Then
    q3 = q32
  End If
ElseIf (q31 > -0.000002) And (q31 < pi) Then
  q3 = q31
```

Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

```
Elseif (q32 > -0.000002) And (q32 < pi) Then
```

```
    q3 = q32
```

```
Else
```

```
    If (q31 < q32) Then
```

```
        q3 = q32
```

```
    Elseif (q31 > q32) Then
```

```
        q3 = q31
```

```
    End If
```

```
End If
```

```
s3 = Sin(q3)
```

```
c3 = Cos(q3)
```

```
If (q3 > 2 * pi) Then
```

```
    q3 = q3 - (2 * pi)
```

```
End If
```

```
q3 = q3 * 180 / pi
```

```
q30 = Round(q3, 6)
```

```
Lbq3.Caption = Format(q30, "0.0000")
```

```
'^^^^ para teta 2 ^^^^^
```

```
s23 = ((a3 + a2 * c3 + d5 * s4) * z + (x * c1 + y * s1) * (c4 * d5 - d4 + a2 * s3))
```

```
c23 = ((x * c1 + y * s1) * (a3 + a2 * c3 + d5 * s4) - z * (c4 * d5 - d4 + a2 * s3))
```

```
q23 = Atn(s23 / c23)
```

```
s23 = Sin(q23)
```

```
c23 = Cos(q23)
```

```
q23 = q23 * 180 / pi
```

```
q2 = q23 - q3
```

```
q2 = Round(q2, 6)
```

```
Lbq2.Caption = Format(q2, "0.0000")
```

```
^^^^ condicional para q2 ^^^^^
```

```
If ((x < 0) And (y <= -d3)) Or ((x > 0) And (y < -d3)) Then
```

```
    Do While (q2 > 126) Or (x <> px) Or (y <> py) Or (z <> pz)
```

```
        If (x <> a2) And (z <> (d4 - d3)) Then
```

```
            Dim Min As Single, Max As Single
```

```
            Randomize
```

```
            Min = -pi / 2
```

```
            Max = pi / 2
```

```
            q4 = ((Min - Max) * Rnd + Max)
```

```
        Else
```

```
            q4 = 0
```

```
        End If
```

```
        c4 = Cos(q4)
```

Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

s4 = Sin(q4)

If (q4 = -pi / 2) Then

 c4 = 0

 s4 = -1

Elseif (q4 = pi / 2) Then

 c4 = 0

 s4 = 1

Elseif (q4 = 0) Then

 c4 = 1

 s4 = 0

End If

j = 1

ki = (x ^ 2 + y ^ 2 + z ^ 2 - (d3 ^ 2 + a2 ^ 2 + a3 ^ 2 + d4 ^ 2 + d5 ^ 2) + 2 * c4 * d4 * d5 - 2 * a3 * d5 * s4) / (2 * a2)

op = (a3 + d5 * s4) ^ 2 + (d4 - c4 * d5) ^ 2

kip = ki ^ 2

If op < kip Then

 ta4 = (j * (Sqr(kip - op)))

Else

 ta4 = (j * (Sqr(op - kip)))

End If

xq3 = (d4 - c4 * d5)

yq3 = (a3 + d5 * s4)

If (ki > 0) Then

 If ta4 > 0 Then

 at3 = -Atn(ki / ta4)

 Elseif ta4 < 0 Then

 at3 = -(pi + Atn(ki / ta4))

 Elseif ta4 = 0 Then

 at3 = pi / 2

 End If

Elseif (ki < 0) Then

 If ta4 > 0 Then

 at3 = -Atn(ki / ta4)

 Elseif ta4 < 0 Then

 at3 = pi + Atn(ki / ta4)

 Elseif ta4 = 0 Then

 at3 = pi / 2

 End If

Else

 at3 = Atn(ki / ta4)

End If

If (yq3 > 0) Then

Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

```
If xq3 > 0 Then
  atq3 = Atn(yq3 / xq3)
Elseif xq3 < 0 Then
  atq3 = pi + Atn(yq3 / xq3)
Elseif xq3 = 0 Then
  atq3 = pi / 2
End If
Elseif (yq3 < 0) Then
  If xq3 > 0 Then
    atq3 = 2 * pi + Atn(yq3 / xq3)
  Elseif xq3 < 0 Then
    atq3 = pi + Atn(yq3 / xq3)
  Elseif xq3 = 0 Then
    atq3 = pi / 2
  End If
Else
  atq3 = Atn(yq3 / xq3)
End If

q3 = atq3 + at3

c3 = Cos(q3)
s3 = Sin(q3)

q3 = q3 * 180 / pi
q30 = Round(q3, 6)
Lbq3.Caption = Format(q30, "0.0000")

s23 = ((a3 + a2 * c3 + d5 * s4) * z + (x * c1 + y * s1) * (c4 * d5 - d4 + a2 * s3))
c23 = ((x * c1 + y * s1) * (a3 + a2 * c3 + d5 * s4) - z * (c4 * d5 - d4 + a2 * s3))

q23 = Atn(s23 / c23)
s23 = Sin(q23)
c23 = Cos(q23)

q23 = q23 * 180 / pi
q2 = q23 - q3
q2 = Round(q2, 6)
Lbq2.Caption = Format(q2, "0.0000")
contadorX = Len(txtPx.Text)
contadorY = Len(txtPy.Text)
contadorZ = Len(txtPz.Text)

q2 = q2 * pi / 180
s2 = Sin(q2)
c2 = Cos(q2)
```

Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

$$q2 = q2 * 180 / \pi$$

$$d5 * s23 \quad px = d3 * s1 + a2 * c1 * c2 + a3 * c1 * c23 - c1 * d4 * s23 + c1 * c23 * d5 * s4 + c1 * c4 *$$

$$- c1 * d3 \quad py = s1 * c23 * s4 * d5 + s1 * c23 * a3 + s1 * s23 * c4 * d5 - s1 * s23 * d4 + s1 * c2 * a2$$

$$pz = c23 * d4 + a2 * s2 + a3 * s23 - c23 * c4 * d5 + d5 * s23 * s4$$

$$px = \text{Round}(px, \text{contadorX})$$

$$py = \text{Round}(py, \text{contadorY})$$

$$pz = \text{Round}(pz, \text{contadorZ})$$

Loop

Else

$$s4 = (x * c1 * c23 + y * c23 * s1 + z * s23 - a2 * c3 - a3) / d5$$

$$c4 = \text{Round}((-c23 * z - s23 * x * c1 + s3 * a2 - s23 * y * s1 - d4) / d5, 6)$$

End If

If (s4 <= -1) And (c4 = 0) Then

$$q4 = -\pi / 2$$

Elseif (s4 >= 1) And (c4 = 0) Then

$$q4 = \pi / 2$$

Else

$$q4 = \text{Atn}(s4 / c4)$$

End If

$$q4 = q4 * 180 / \pi$$

$$q4 = \text{Round}(q4, 6)$$

$$\text{Lbq4.Caption} = \text{Format}(q4, "0.0000")$$

~~~~~Para teta 5~~~~~

$$s5 = (c23 * c4 * s1 - s1 * s23 * s4) / (s1 * (c23 * c4 * s1 - s1 * s23 * s4) + (c1 * (c1 * c23 * c4 - c1 * s23 * s4)))$$

$$c5 = c1 / ((s1 * (c23 * c4 * s1 - s1 * s23 * s4)) + (c1 * c1 * c23 * c4 - c1 * c1 * s23 * s4))$$

If (s5 > 0) Then

If c5 > 0 Then

$$q5 = \text{Atn}(s5 / c5)$$

Elseif c5 < 0 Then

$$q5 = \pi + \text{Atn}(s5 / c5)$$

Elseif c5 = 0 Then

$$q5 = \pi / 2$$

End If

Elseif (s5 < 0) Then

If c5 > 0 Then

$$q5 = \text{Atn}(s5 / c5)$$

Elseif c5 < 0 Then

# Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

---

```
q5 = pi + Atn(s5 / c5)
Elseif c5 = 0 Then
q5 = pi / 2
End If
End If
q5 = q5 * 180 / pi
Lbq5.Caption = Format(q5, "0.0000")
Loop

q1 = Val(Lbq1.Caption)
q2 = Val(Lbq2.Caption)
q3 = Val(Lbq3.Caption)
q4 = Val(Lbq4.Caption)
q5 = Val(Lbq5.Caption)

'inicia el programa para enviar
serv_q1 = Round((((q1) / 0.0075) + 6000), 0)
serv_q2 = Round((((126 - q2) / 0.0075) + 6000), 0)
serv_q3 = Round((((q3) / 0.0075) + 6000), 0)
serv_q4 = Round((((90 + q4) / 0.0075) + 6000), 0)
serv_q5 = Round((((180 - q5) / 0.0075) + 6000), 0)

'ticks de hom{6015,24050,6015,18000,30000,0,0,0};

Mult1 = serv_q1 \ 255
resid1 = serv_q1 Mod 255
Mult2 = serv_q2 \ 255
resid2 = serv_q2 Mod 255
Mult3 = serv_q3 \ 255
resid3 = serv_q3 Mod 255
Mult4 = serv_q4 \ 255
resid4 = serv_q4 Mod 255
Mult5 = serv_q5 \ 255
resid5 = serv_q5 Mod 255

MSComm1.Output = Chr$(1)
MSComm1.Output = Chr$(Mult1)
MSComm1.Output = Chr$(resid1)
MSComm1.Output = Chr$(Mult2)
MSComm1.Output = Chr$(resid2)
MSComm1.Output = Chr$(Mult3)
MSComm1.Output = Chr$(resid3)
MSComm1.Output = Chr$(Mult4)
MSComm1.Output = Chr$(resid4)
MSComm1.Output = Chr$(Mult5)
MSComm1.Output = Chr$(resid5) 'pegado
```

# Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

---

```
Form2.Visible = True
Form2.cmdCargando = True

End If

End Sub

Private Sub cmdInf_Click()
    Form1.Visible = True
End Sub

Private Sub cmdON1_Click()
    I = 0
    Dim prende, apaga As Boolean
    prende = True
    apaga = True
    'condicion de encendido
    If (txtValua.Text = 0) Then
        On Error GoTo manejar_errores
        MSComm1.CommPort = 1
        MSComm1.Settings = "9600,N,8,1"
        MSComm1.PortOpen = True
        GoTo salir

manejar_errores:
        MsgBox ("Error al intentar abrir COM" + Str$(1))
        prende = False
        MsgBox ("Error detectado por Visual Basic: " + Err.Description)
        Exit Sub
        Resume salir

salir:
        'condicion de apagado
    ElseIf (txtValua.Text = 1) Then
        MSComm1.Output = "h"
        On Error GoTo manejar_errores

        MSComm1.PortOpen = False
        GoTo salir

        MsgBox ("Error al intentar cerrar COM" + Str$(1))
        apaga = False
        MsgBox ("Visual basic detectó: " + Err.Description)
        Resume salir
    End If
'fin de condiciones de encendido y apagado

    If (prende = True) And (txtValua.Text = 0) Then
```

## Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

---

```
cmdON1.BackColor = &HC000&
txtValua.Text = 1
cmdON1.Caption = "&ON"

'envia posicion de hom verificar la posicion no deve moverse
MSComm1.Output = "h"
'++++
Elseif ((txtValua.Text = 1) And (apaga = True)) Then
txtValua.Text = 0
cmdON1.BackColor = &HFF&
cmdON1.Caption = "OFF"
End If
End Sub

Private Sub Form_Load()
Picture1.Picture = LoadPicture("C:\Archivos de programa\Project1\RA5_1.jpg")
End Sub
```

# Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

---

## CAPÍTULO 7. INTERFACES ELECTRÓNICAS

### 7.1 COMUNICACIÓN ROBOT-PUERTO USB

*Código de programación en C para Pic18F2550*

```
#include <18F2550.h>
#Fuses HSPLL,NOWDT,NOPROTECT,NODEBUG,USBDIV,CPUDIV1,VREGEN
#use delay(clock=48000000)

#use standard_io(B)
#include <usb_cdc.h>

#define Servo1 PIN_B7
#define Servo2 PIN_B6
#define Servo3 PIN_B5
#define Servo4 PIN_B4
#define Servo5 PIN_B3

#define LED1 PIN_B0
#define LED2 PIN_B1

//oscilador 48 MHz
const int16 TicksVentana = 48000; // PWM ventana 5 servos, servo = 4 ms x 5 = 20 ms
//const int16 TicksMinimo = 6000; // PWM High for Minimum Position = 0.5 ms
//const int16 TicksMaximo = 30000; // PWM High for Maximum Position = 2.5 ms

int16 Servo_PWM[8]={29990,22800,6000,18000,6000,0,0,0};
static int8 Nu_servo=0;

int1 Servo1_ON=1;
int1 Servo2_ON=1;
int1 Servo3_ON=1;
int1 Servo4_ON=1;
int1 Servo5_ON=1;

int1 Nivel_alto=0;
int16 TicksInterrupcion=17535;

#int_timer1
void intTimer(void)
{
    if(Nivel_alto==1){
        if(Nu_servo==0 && Servo1_ON) output_high(Servo1);
        if(Nu_servo==1 && Servo2_ON) output_high(Servo2);
        if(Nu_servo==2 && Servo3_ON) output_high(Servo3);
        if(Nu_servo==3 && Servo4_ON) output_high(Servo4);
        if(Nu_servo==4 && Servo5_ON) output_high(Servo5);
```

# Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

---

```
    TicksInterrupcion = 65536 - Servo_PWM[Nu_servo];
    set_timer1(TicksInterrupcion);
}
if(Nivel_alto==0){
    if(Nu_servo==0 && Servo1_ON) output_low(Servo1);
    if(Nu_servo==1 && Servo2_ON) output_low(Servo2);
    if(Nu_servo==2 && Servo3_ON) output_low(Servo3);
    if(Nu_servo==3 && Servo4_ON) output_low(Servo4);
    if(Nu_servo==4 && Servo5_ON) output_low(Servo5);

    TicksInterrupcion = 65536 - TicksVentana + Servo_PWM[Nu_servo];
    set_timer1(TicksInterrupcion);
    if(++Nu_servo>4) Nu_servo=0;
}
++Nivel_alto;
}

void main(){

    float En1,En2,En3,En4,En5,En6,En7,En8,En9,En10;

    disable_interrupts(global);
    setup_adc_ports(NO_ANALOGS);
    setup_adc(ADC_OFF);

    usb_cdc_init();
    usb_init();

    setup_counters(RTCC_INTERNAL,RTCC_DIV_2);
    setup_timer_1(T1_INTERNAL | T1_DIV_BY_1);
    setup_timer_2(T2_DISABLED,0,1);

    set_tris_b(0x00);

    output_low(Servo1);
    output_low(Servo2);
    output_low(Servo3);
    output_low(Servo4);
    output_low(Servo5);

    delay_ms(1000);
    enable_interrupts(int_rda);
    set_timer1(TicksInterrupcion);
    enable_interrupts(int_timer1);
    enable_interrupts(global);
```

# Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

---

```
output_low(LED1);
output_low(LED2);

output_high(LED1);
delay_ms(500);
output_low(LED1);
delay_ms(500);
output_high(LED1);
delay_ms(500);
output_low(LED1);
delay_ms(500);
output_high(LED1);
delay_ms(1000);
output_low(LED1);

do{
    if(usb_enumerated())
    {
        output_high(LED2);    //enciende led2

        if(usb_cdc_kbhit())    // Si el EndPoint de salida contiene datos PC
        {
            En1 = usb_cdc_getc();
            En2 = usb_cdc_getc();
            En3 = usb_cdc_getc();
            En4 = usb_cdc_getc();
            En5 = usb_cdc_getc();
            En6 = usb_cdc_getc();
            En7 = usb_cdc_getc();
            En8 = usb_cdc_getc();
            En9 = usb_cdc_getc();
            En10 = usb_cdc_getc();

            En2 = En1*256 + En2;
            Servo_PWM[0] = En2;
            En4 = En3*256 + En4;
            Servo_PWM[1] = En4;
            En6 = En5*256 + En6;
            Servo_PWM[2] = En6;
            En8 = En7*256 + En8;
            Servo_PWM[3] = En8;
            En10 = En9*256 + En10;
            Servo_PWM[4] = En10;
        }
    }
}while(true);
}
```

# Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

## 7.2 CONSTRUCCIÓN DEL CIRCUITO IMPRESO

Para la fabricación del circuito con los componentes electrónicos, es necesario del diagrama electrónico, del programa PCB y Adobe PDF, además del material necesario para su construcción.

- a) Con el siguiente diagrama electrónico de la figura 44 se ha logrado comunicar el PIC a la PC.

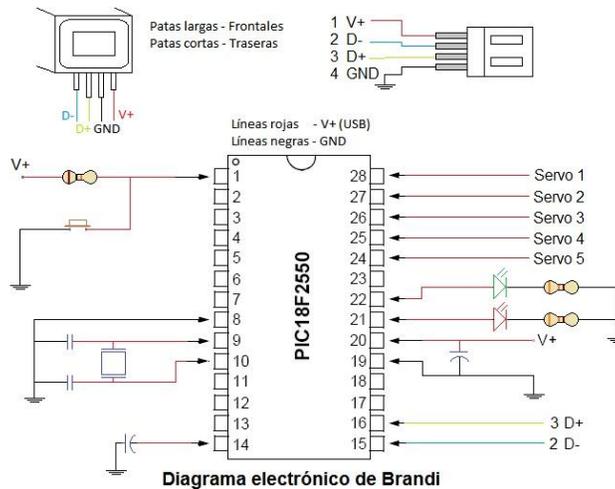


Figura 44. Diagrama electrónico del robot.

- b) Dicho diagrama será copiado en el software de PCB, componente a componente para su construcción, como se observa en la figura 45.

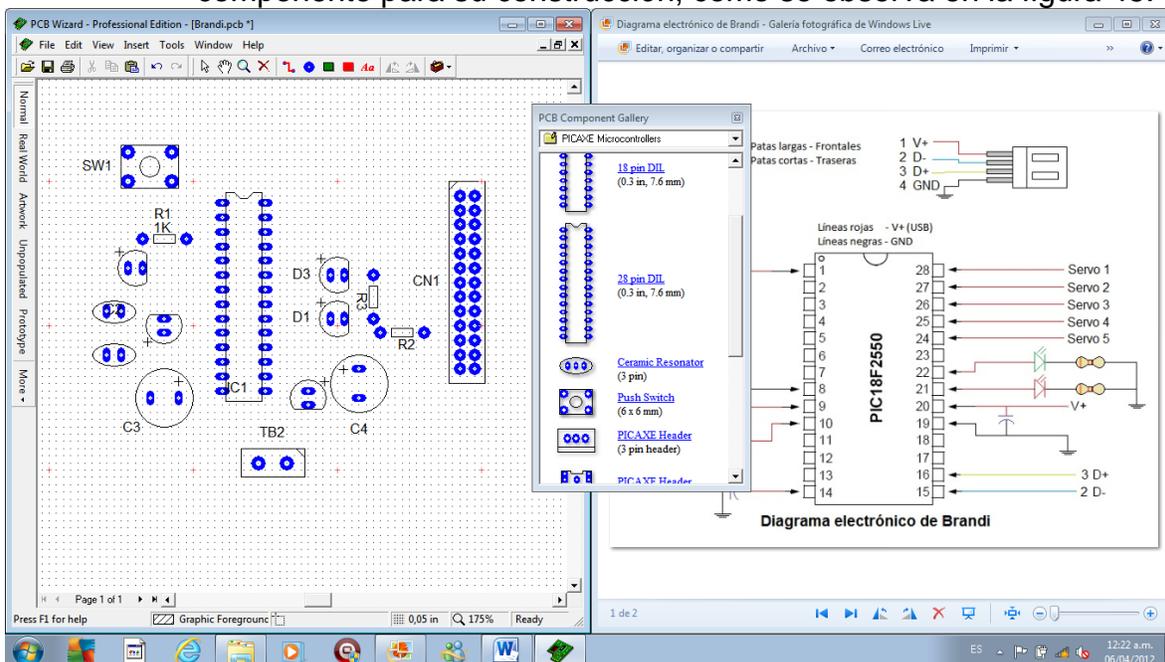


Figura 45. Diagrama electrónico en PCB.

# Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

- c) Buscar la manera de unir las pistas (líneas rojas) de tal forma que no se ocasione corto circuito (figura 46).

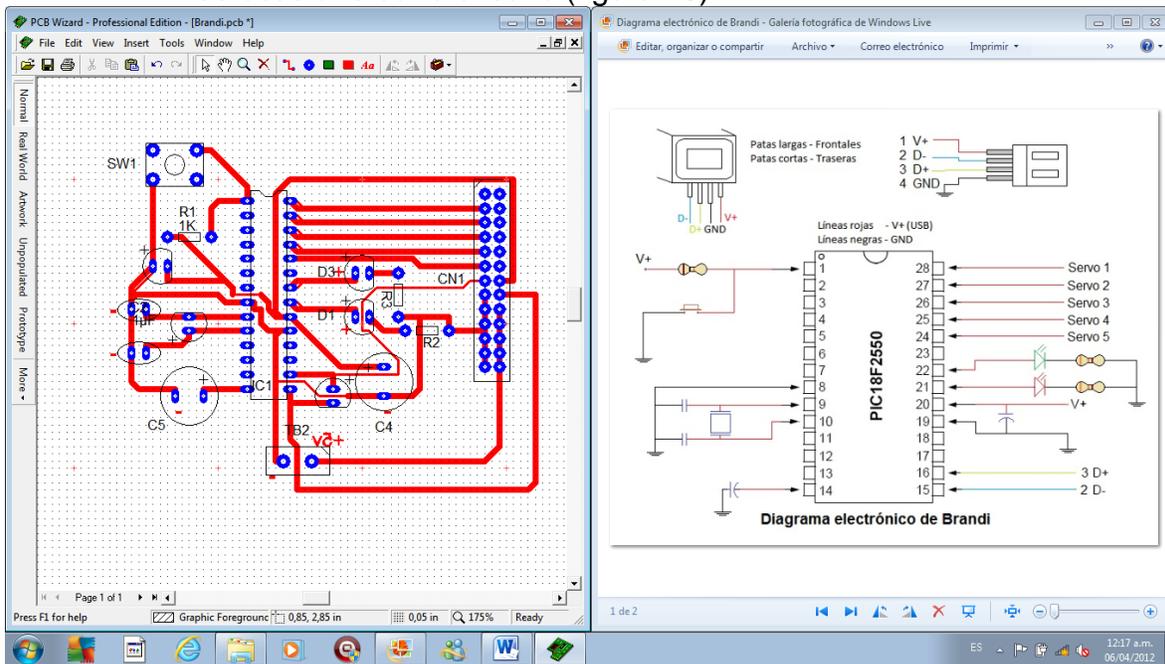


Figura 46. Creación de pistas del circuito en PCB.

- d) Limitar el tamaño del circuito con el icono de **Copper Area** (Cuadro de color rojo), como se ve en la figura 47.

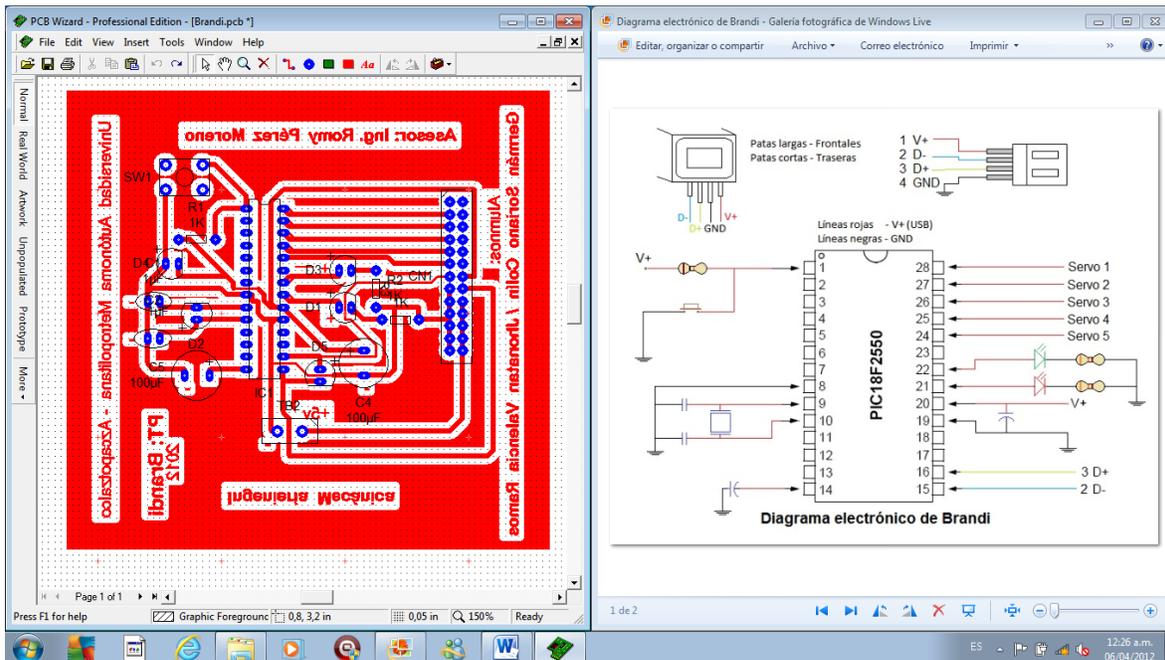


Figura 47. Límite del diagrama electrónico.

# Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

- e) Pasar a la vista **Artwork** con el icono que aparece en la lateral izquierda del PCB (figura 48).

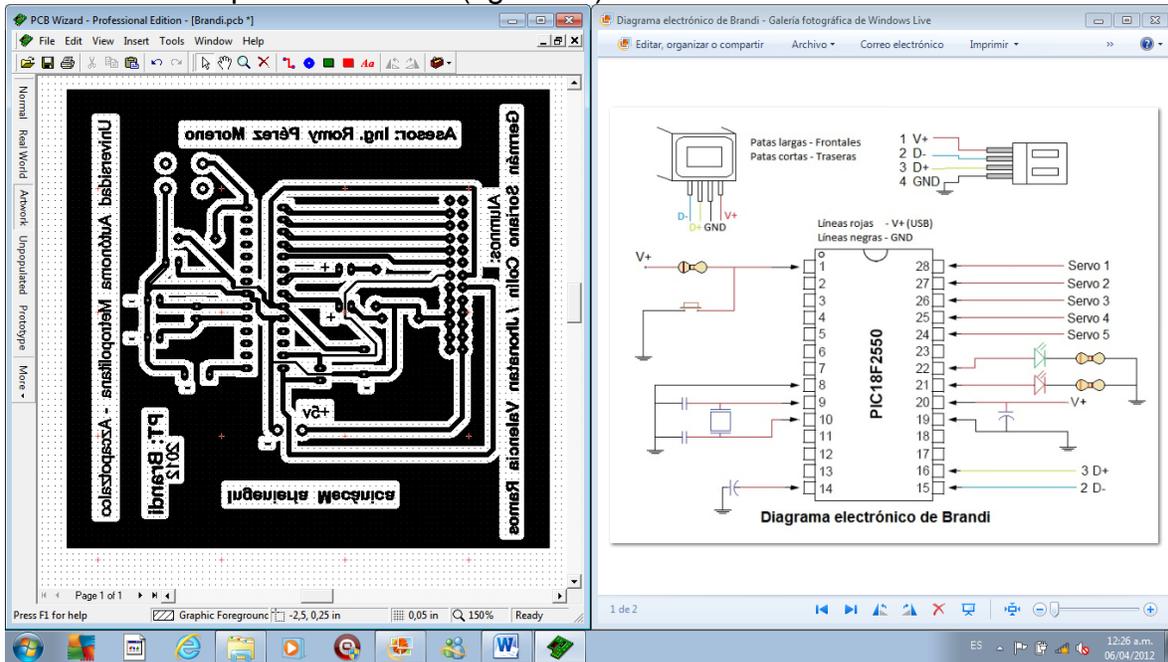


Figura 48. Vista en Artwork del PCB.

- f) Crear una copia del circuito como se observa en la figura 49, con el fin de escoger entre la mejor impresora.

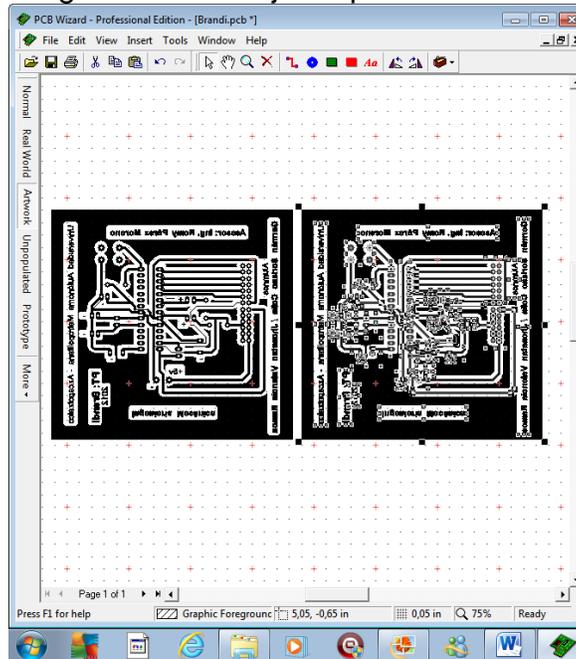


Figura 49. Copia del diagrama en PCB.

# Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

- g) Guardar el archivo en formato PDF (figura 50).  
File – Printf – En donde se elige la impresora escoger **Adobe PDF**.

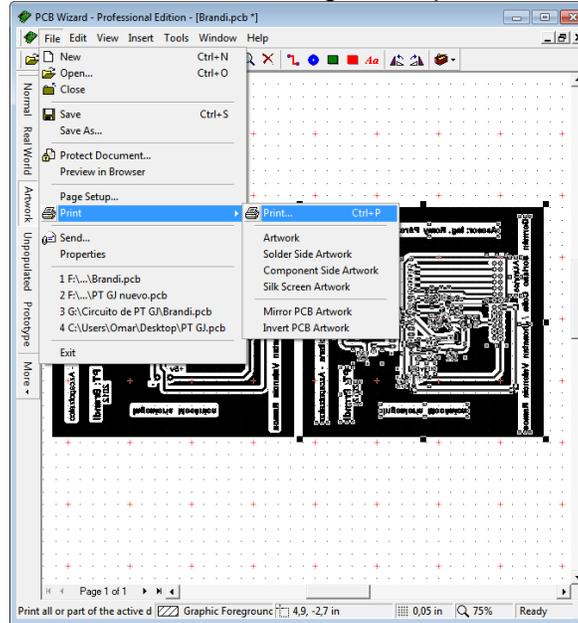


Figura 50. Diagrama guardado en PDF

- h) Del lado izquierdo se encuentra el diagrama en PCB, mientras que del lado derecho el diagrama está en PDF (figura 51).

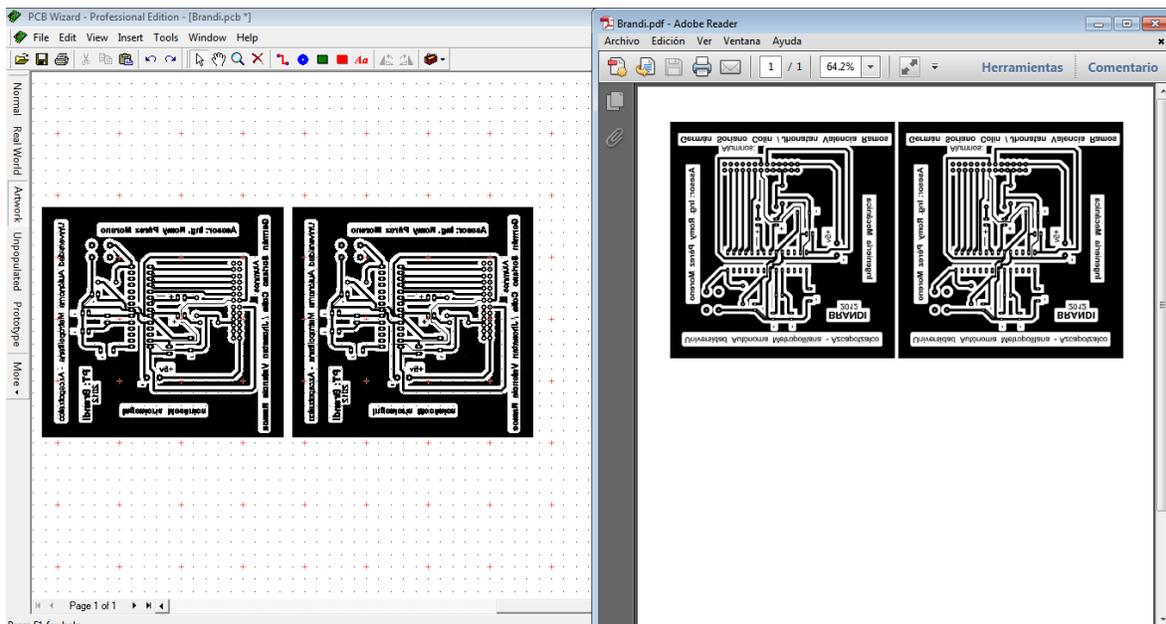


Figura 51. Diagrama electrónico en PCB y PDF.

## Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

---

- i) Imprimir el archivo PDF en una impresora láser sobre una hoja de acetato.
- j) La tablilla de cobre debe de recortarse al mismo tamaño del impreso en acetato.
- k) Lavar perfectamente la tablilla de cobre, esperar a que se seque y evitar tocarla después de ello, ya que la grasa en los dedos evitará que se adhiera la tinta.
- l) Colocar el acetato sobre la tablilla de cobre, de tal forma que la tinta toque el cobre de la tablilla.
- m) Con la temperatura más alta de la plancha, planchar sobre el acetato procurando no correr la tinta sobre el cobre.
- n) Quitar con mucho cuidado el acetato. Se observara como la tinta se ha adherido al cobre.
- o) Colocar esta tablilla en un recipiente y agregar el cloruro férrico para retirar el cobre de la tablilla, esto tardara unos minutos.
- p) Lavar perfectamente la tablilla. Notar que lo único que quedo con cobre, ha sido lo que estaba impreso sobre el acetato.
- q) Perforar la tablilla con una broca de 1/16"en donde sea necesario.
- r) Colocar los componentes electrónicos sobre la tablilla y soldarlos.
- s) Antes de conectar el circuito a la fuente de voltaje, probar continuidad sobre las pistas de la tablilla con ayuda de un multímetro.

# Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

---

## 7.3 INTERACCIÓN HOMBRE-ROBOT

### Forma de ejecución:

1. Conectar el cable USB al puerto de BRANDI y de la computadora. Antes se debió haber instalado correctamente la *interfaz de comunicación USB de BRANDI*.
2. Al instante, un led de color rojo parpadeará indicando que la computadora ha detectado al robot. Cuando BRANDI sea configurado por la computadora encenderá un led de color verde. Si no ocurre esto desconectar y volver a conectar el USB.
3. Abrir el programa BRANDI para poder interactuar con éste. Antes debió haber instalado correctamente la *interfaz gráfica de BRANDI*.
4. Oprimir el botón de color rojo **OFF** (con el cursor o con Alt + O).
5. Si el programa arroja un error al oprimir **OFF**, pulsar **Salir** (con el cursor o con Alt + S) para abordar el programa y repita desde el paso 1.
6. Si el programa no arroja ningún error quiere decir que hasta el momento ha ejecutado bien el programa. El botón rojo **OFF** ahora se colocó en estado de **ON** y de color verde. Ya puede ingresar el punto (**Xo, Yo, Zo**).
7. Después de ingresar el punto (**Xo, Yo, Zo**), oprimir el botón **Enviar** (o con un Enter o Alt + E). Si el punto se encuentra dentro del alcance del robot<sup>1</sup>, el brazo colocará su extremo en el punto indicado, en caso contrario, el programa indicará que el punto está fuera de alcance y se tendrá que colocar otro punto según lo indique el programa.
8. Si durante el desplazamiento de la extremidad del brazo, de un punto a otro, existe alguna razón por la cual se deba detener el movimiento del robot, pulsar la tecla Escape (**Esc**) del teclado para ejecutar el botón **Detener**. La extremidad del brazo regresará a la posición de donde partió.
9. Para poder abordar el programa, cambiar el estado del botón **ON** a **OFF** y automáticamente BRANDI se colocará en su posición de “casa”. Finalmente pulsar **Salir**.

<sup>1</sup>Ver capítulo 7, apartado 7.4.

# Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

## 7.4 ALCANCE DEL ROBOT

El alcance del robot está limitado por el giro de los servomotores, el cual es alrededor de  $0^\circ$  a  $180^\circ$ .

El radio mínimo se logra cuando la articulación 3 y 4 se colocan a  $0^\circ$  ó  $180^\circ$ . Mientras que el radio máximo se logra cuando las mismas articulaciones se encuentran a  $90^\circ$ . Como se observa en la figura 52 y 53.

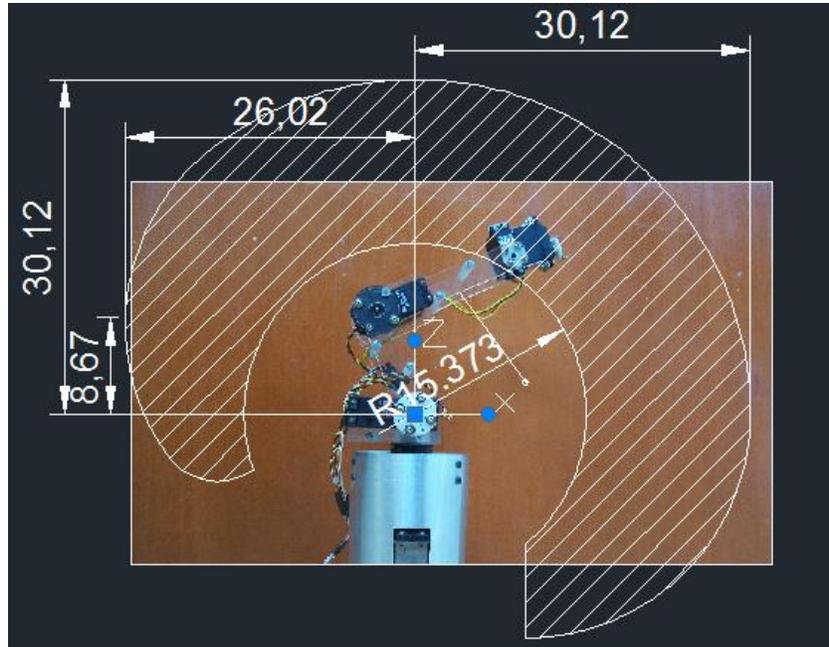


Figura 52. Vista lateral del alcance del robot.

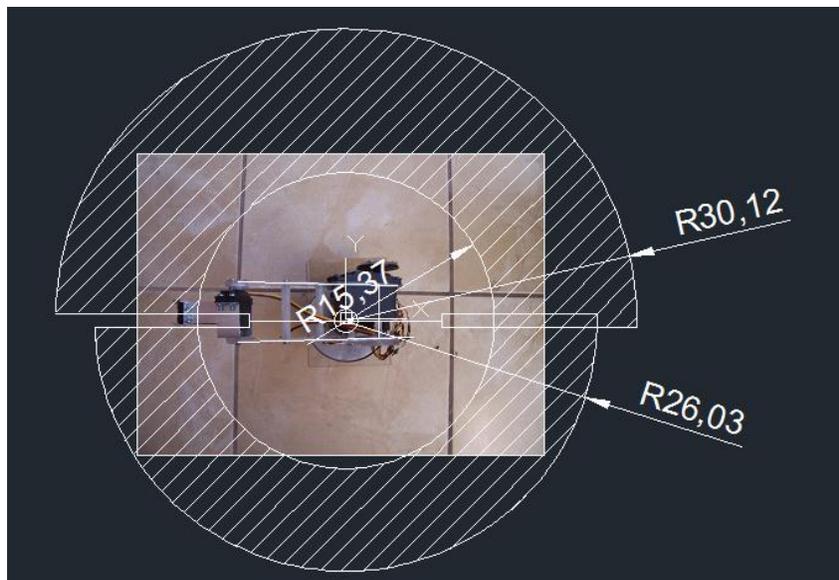


Figura 53. Vista superior del alcance del robot.

## Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

---

Cuando **X** y **Z** toman cualquier valor (positivo o negativo), y **Y** solo toma valores positivos, el volumen de trabajo queda como se muestra en la figura 54.

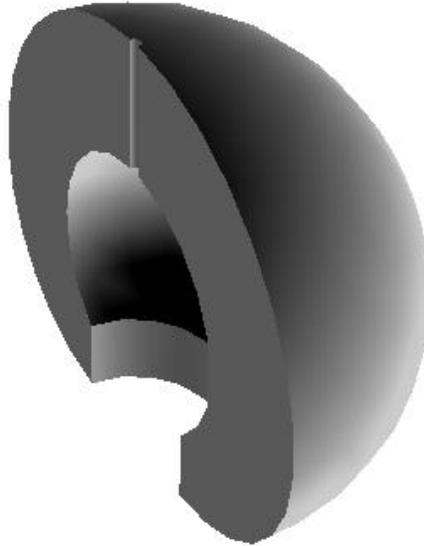


Figura 54. Volumen de trabajo cuando **Y** es positivo.

Cuando **X** y **Z** toman cualquier valor (positivo o negativo), y **Y** solo toma valores negativos, el volumen de trabajo queda como se muestra en la figura 55.



Figura 55. Volumen de trabajo cuando **Y** es negativo.

## Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

---

El espacio dentro del cual puede desplazarse el extremo de la muñeca es lo que conforma el volumen de trabajo total, el cual se representa en la figura 56.

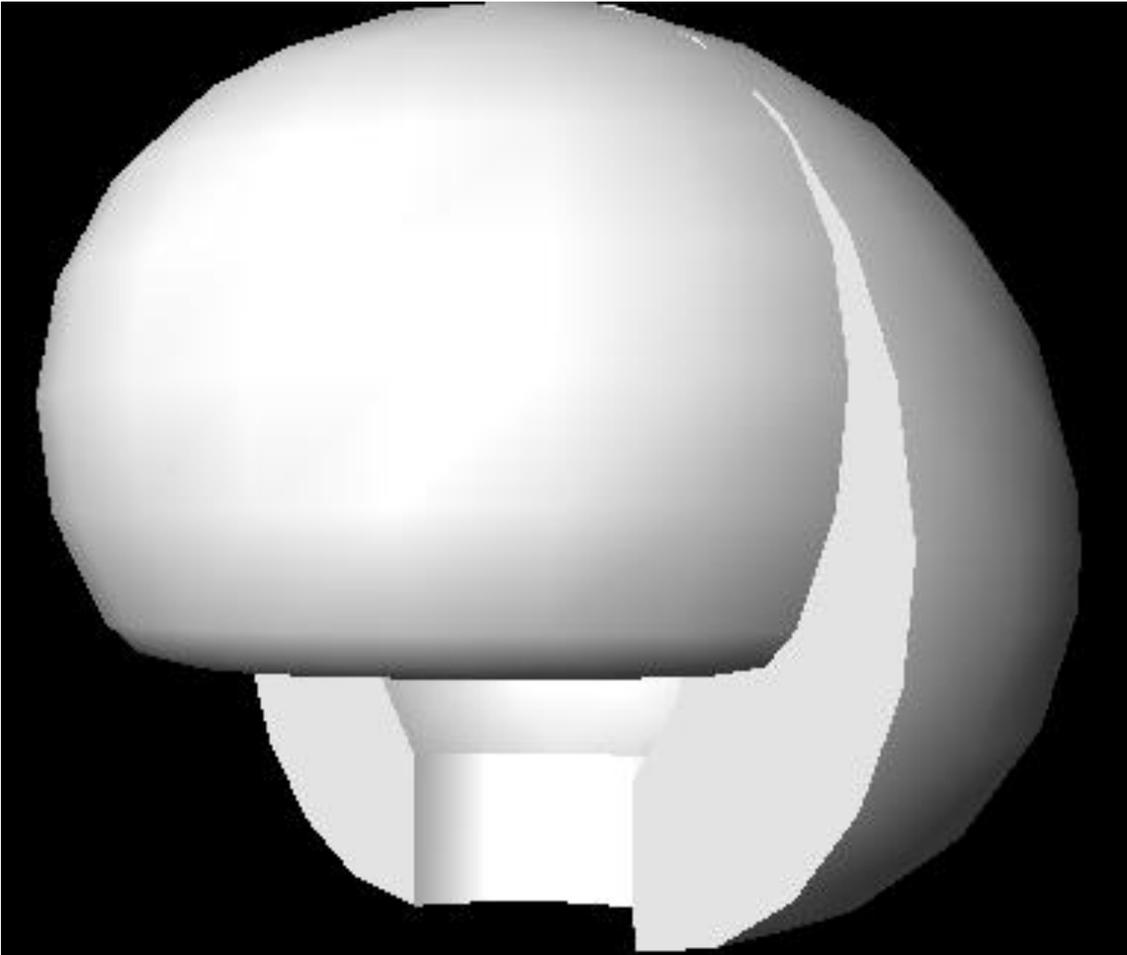


Figura 56. Volumen de trabajo completo.

# Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

## CAPÍTULO 8. MANUALES DE INSTALACIÓN

### 8.1 INTERFAZ DE COMUNICACIÓN USB

#### INSTALADOR DE INTERFAZ DE COMUNICACIÓN USB DE BRANDI

1. Copiar del CD de instalación los controladores: *usbser.sys*, *ccport.sys* y *mchpcdc.inf* y pegarlos en la carpeta del disco duro del equipo **C:\Windows\System32\drivers**. La elección de los controladores depende del sistema operativo del equipo donde se instalará. La interfaz de comunicación; si se trabaja con Windows7, copiar los controladores ubicados en la carpeta **BRANDI\drivers\Win7** del CD de instalación (ir al punto dos de este manual); si se trabaja con Windows XP, copiar los controladores ubicados en la carpeta **BRANDI\drivers\WinXP** del disco de instalación (ir al punto 16 de este manual). En la figura 57 se muestran las carpetas con los controladores para Windows 7 y Windows XP.

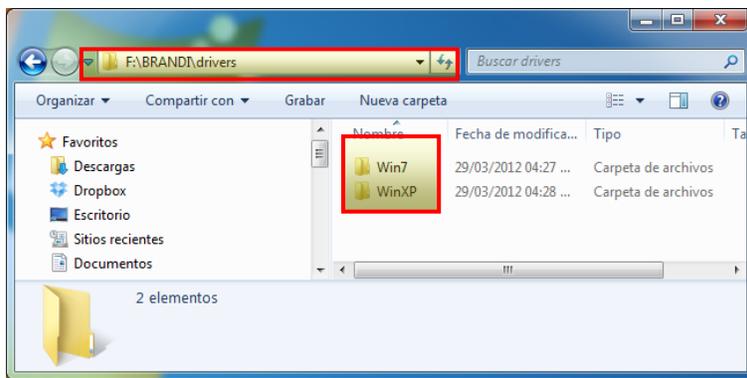


Figura 57. Controladores.

2. Para instalar los controladores en **Windows7** realizar lo siguiente: si al pegar los controladores aparece la ventana mostrada en la figura 58, dar clic en **Continuar**.

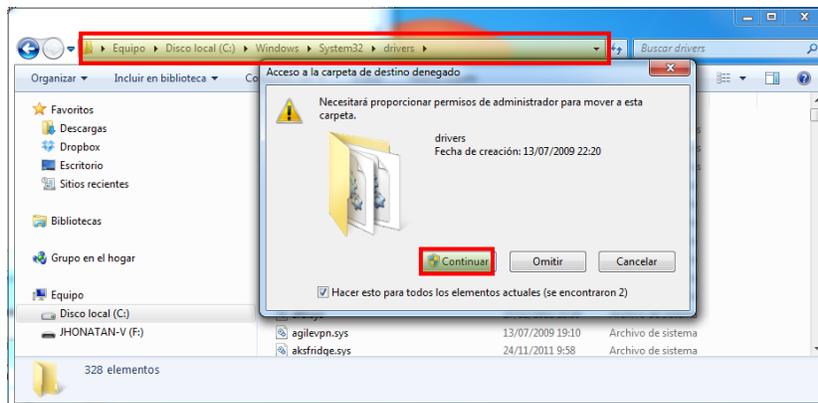


Figura 58. Controlador para Windows 7.

## Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

3. Conectar el cable USB al puerto del robot y a un puerto USB del CPU de la computadora como lo indica la figura 59; puede seleccionar el puerto de la computadora como mejor le convenga.

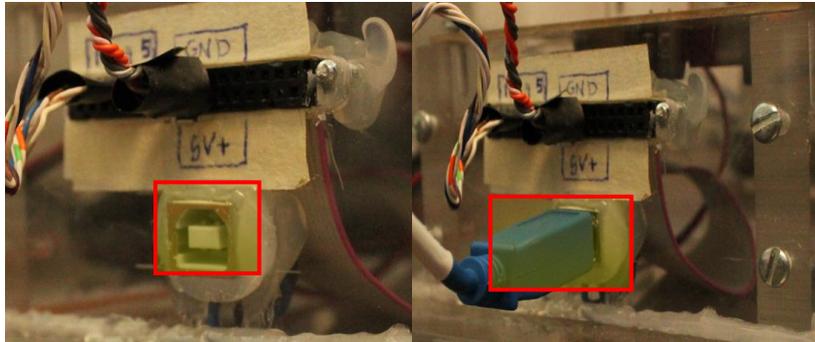


Figura 59. Conexión al puerto USB.

4. Al instante aparecerá en la parte inferior derecha de la pantalla lo que muestra la figura 60 a); en la caja del robot se encenderá y apagará un led de color rojo como lo muestra la figura 60 b).

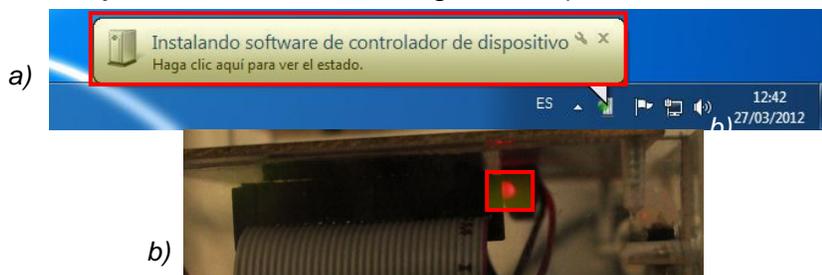


Figura 60. Indicadores del dispositivo USB

5. Como es la primera vez que se ha conectado el robot, aún no tiene instalados los controladores; en la misma parte de la pantalla lo indicará el sistema. También se puede ver en la caja del robot que los led's se encuentran apagados (figura 61).

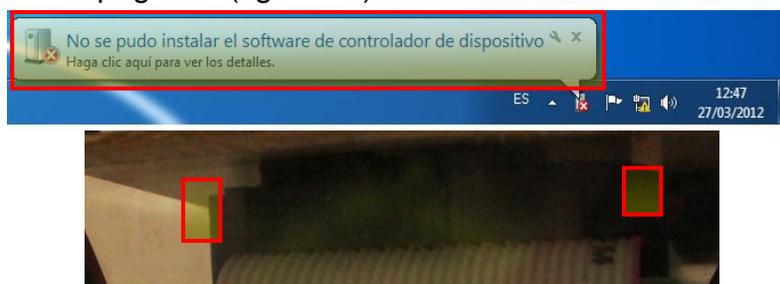


Figura 61. Indicadores apagados.

# Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

6. Abrir el **Administrador de dispositivos**. El sistema detectó al robot en **Otros dispositivos** como **CCS RS232 Demos** como lo muestra la figura 62.

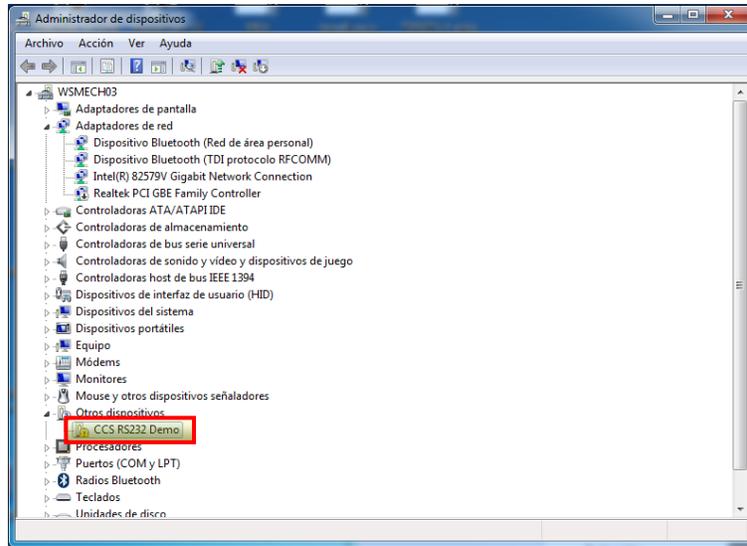


Figura 62. Administrador de dispositivos.

7. Para entrar a las propiedades dar doble clic sobre el icono con el signo de admiración con el nombre de **CCS RS232 Demos** y dar clic en **Actualizar controlador** (figura 63).

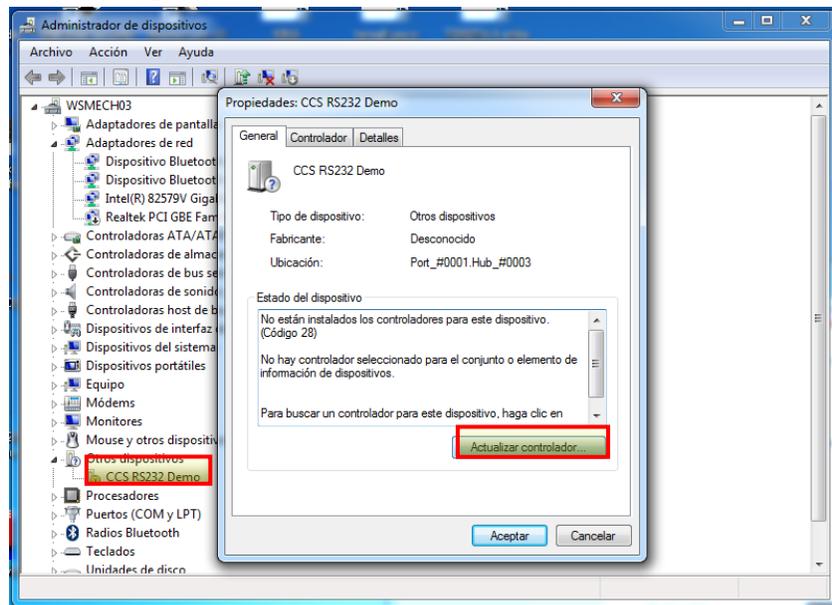


Figura 63. Actualizar controlador.

# Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

8. Aparecerá el cuadro de diálogo de **Actualizar software de controlador** (figura 64): **CCS RS232 Demo**; dar clic en **Buscar software de controlador en el equipo**.

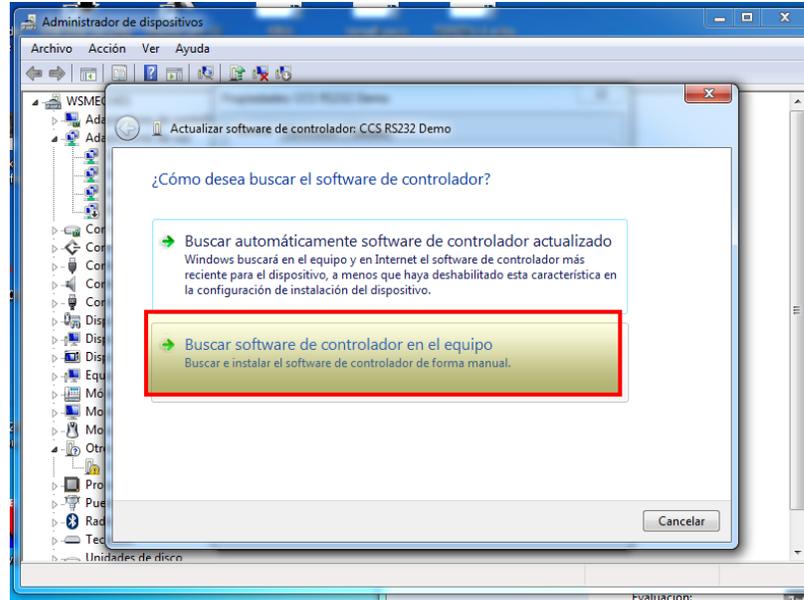


Figura 64. Actualizar software de controlador.

9. Dar clic en **Examinar** y seleccionar la carpeta **C:\Windows\System32\drivers**; dar clic en siguiente (figura 65).

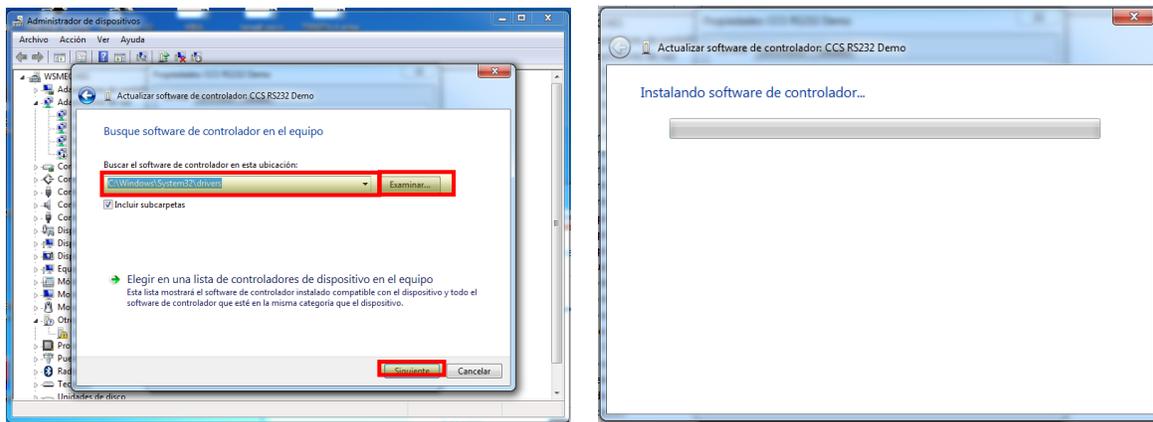


Figura 65. Actualizar software controlador.

# Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

10. Aparecerá un cuadro de diálogo preventivo, dar clic en **Instalar este software de controlador** (figura 66).

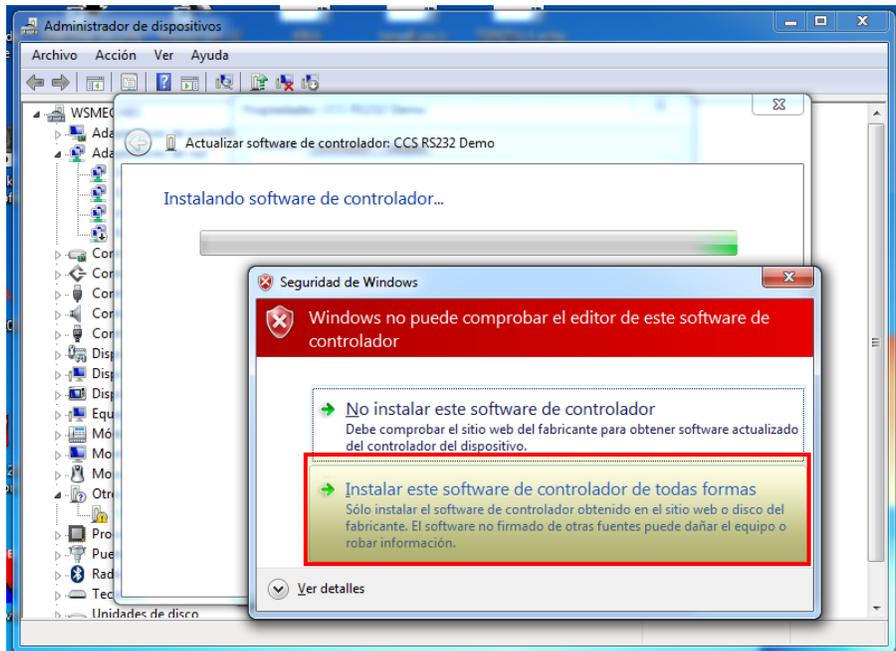


Figura 66. Instalar software.

11. Después de unos segundos se mostrará un cuadro de diálogo (figura 67) donde indica que Windows ha finalizado la instalación. Observar detrás del cuadro de diálogo que desapareció el nombre **CCS RS232 Demo**, ahora se ha detectado el robot en **Puertos (COM y LPT)**. Dar clic en cerrar el cuadro de diálogo de **Actualizar software de controlador**.

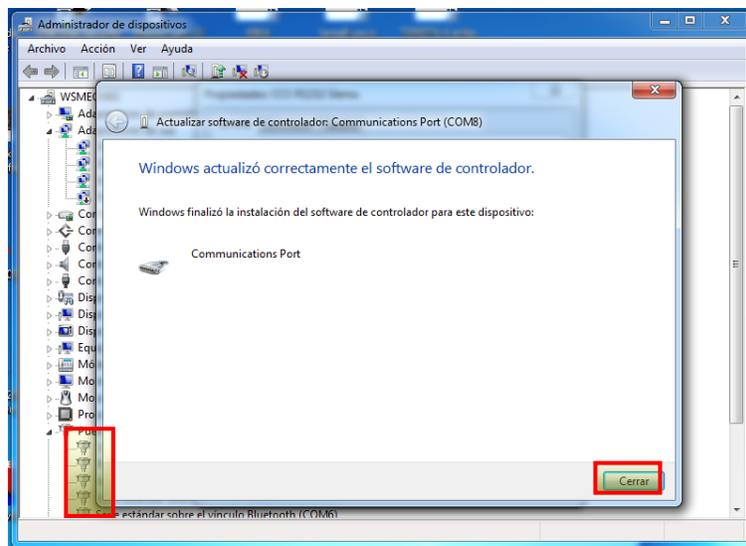


Figura 67. Fin de la instalación.

# Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

12. Ahora el dispositivo ha sido configurado correctamente por el sistema; en la parte superior del cuadro de diálogo de **Propiedades** aparecerá el número de puerto que le fue asignado, en este caso **COM8**; en la caja del robot encenderá el led de color verde (figura 68).

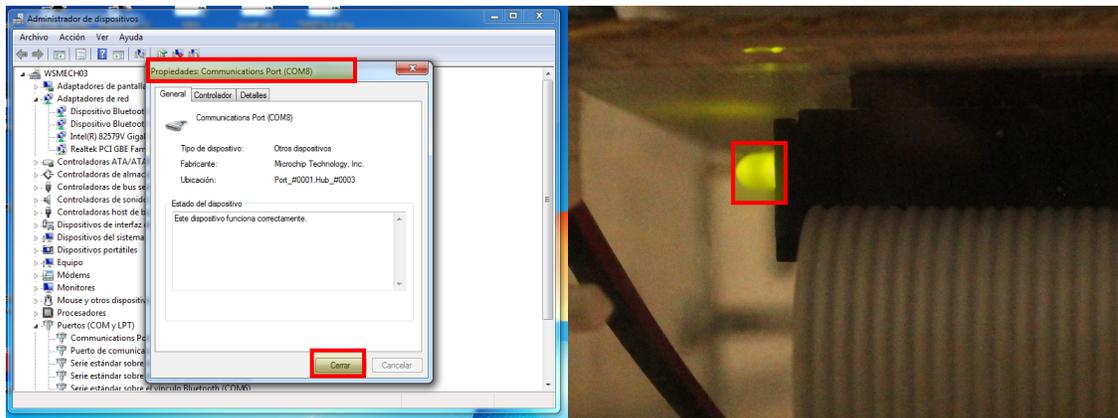


Figura 68. Software instalado.

13. Dar clic en **Cerrar** y dar doble clic sobre **Port (COM8)**. Ir a la pestaña de Configuración de puerto y dar clic en el botón llamado **Opciones avanzadas** (figura 69).

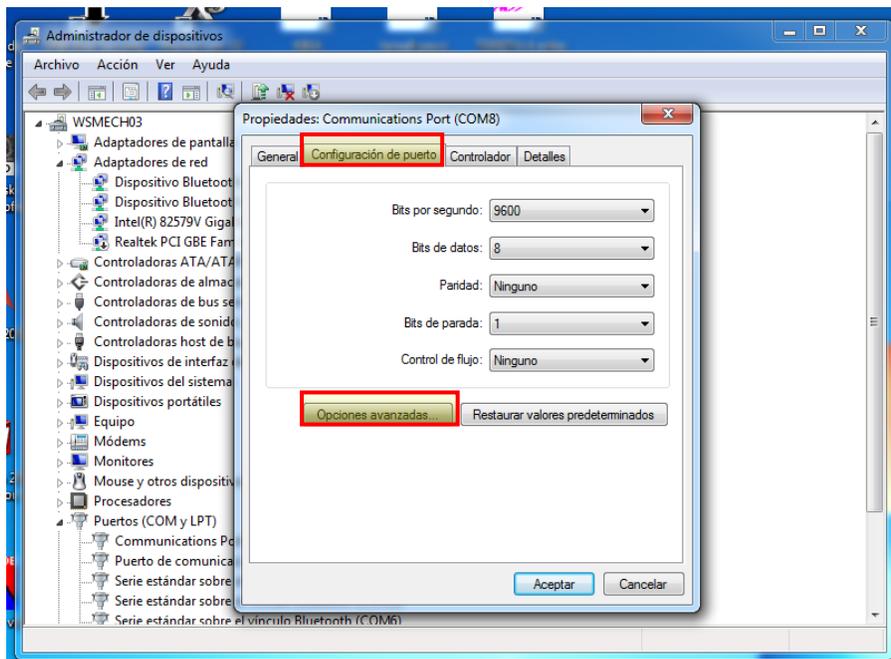


Figura 69. Configuración de puerto.

# Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

14. En la parte inferior del cuadro de dialogo cambiar el número de puerto **COM8** a **COM1** y dar clic en aceptar (figura 70).

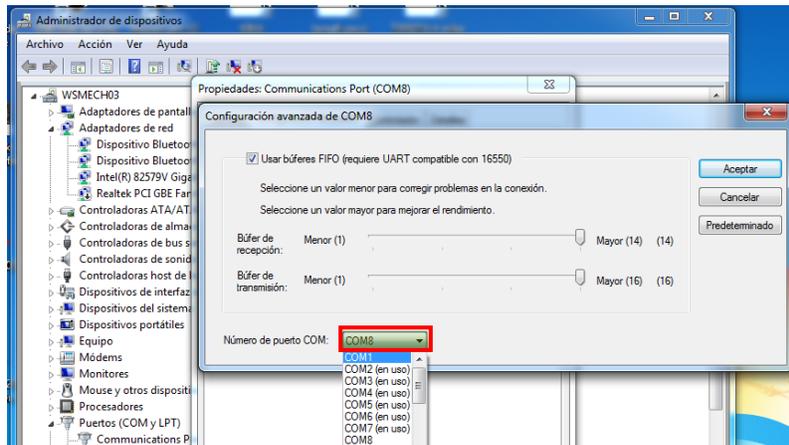


Figura 70. Cambiar puerto.

15. Si el **COM1** está ocupado, realizar el paso 13 y 14 para liberarlo. Dar clic **Aceptar** en el cuadro de diálogo y **Cerrar** el **Administrador de dispositivos** (figura 71).

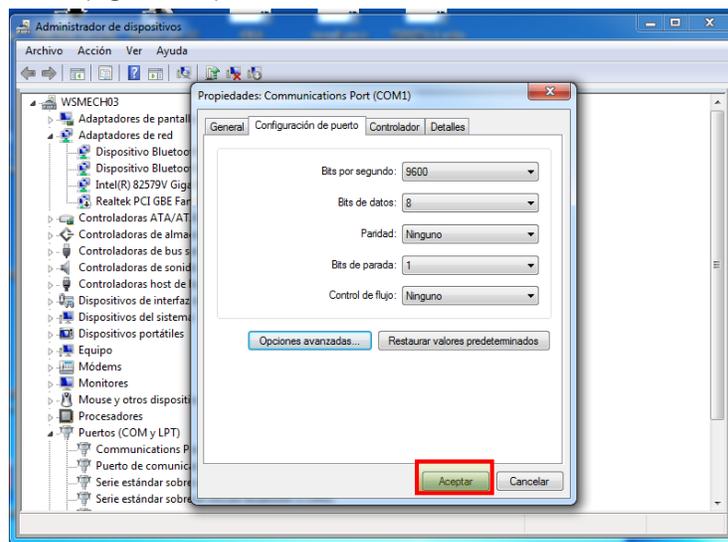


Figura 71. Liberar un puerto.

**La instalación de la interfaz de comunicación USB de BRANDI ha sido exitosa!!!!**

# Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

16. Para la instalación de la interfaz de comunicación USB de BRANDI en Windows XP, copiar el archivo `ccport.sys` ubicado en la carpeta **BRANDI\drivers\WinXP** del disco de instalación y pegarlo en la carpeta del disco duro del equipo **C:\Windows\System32\drivers** (figura 72).

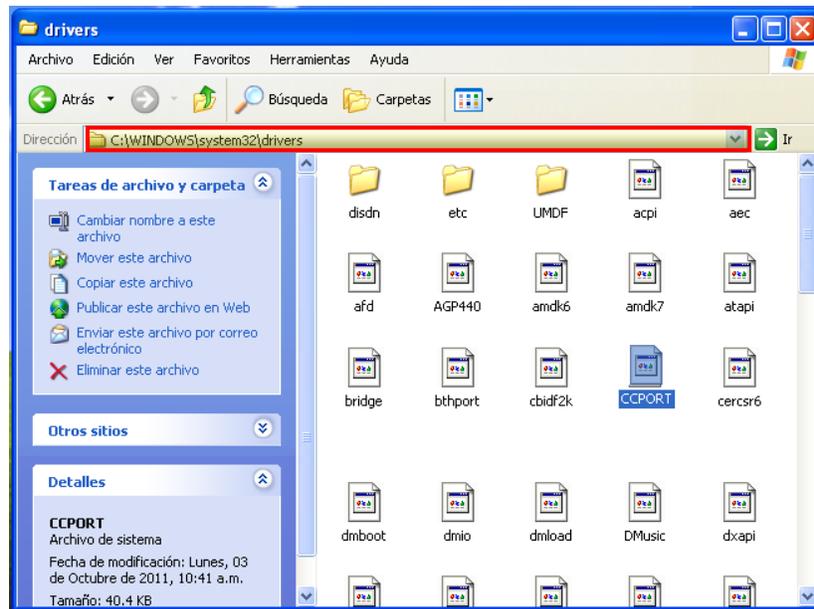


Figura 72. Archivo `ccport.sys`.

17. Conectar el cable USB al puerto del robot y a un puerto USB del CPU de la computadora como lo indica la figura 73; puede seleccionar el puerto de la computadora como mejor le convenga.

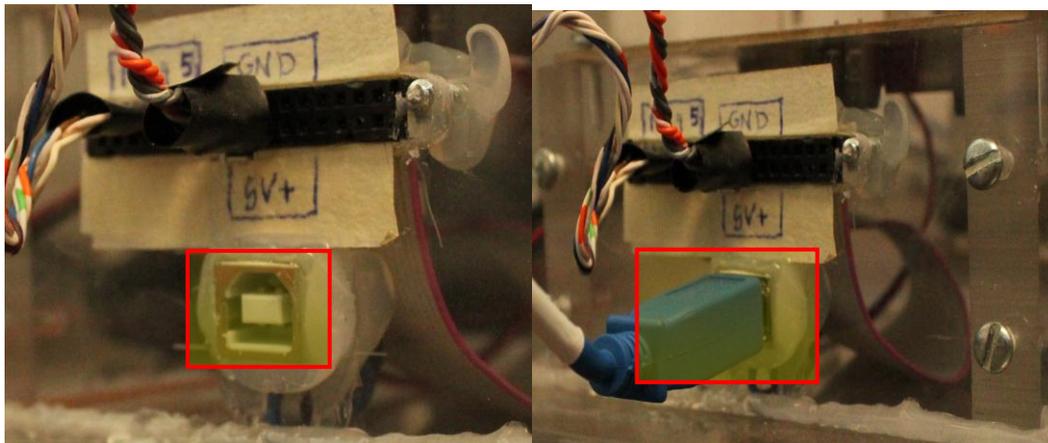


Figura 73. Conexión al puerto USB.

## Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

18. Al instante aparecerá en la parte inferior derecha de la pantalla lo que muestra la figura 74 a); en la caja del robot se encenderá y apagará un led de color rojo como lo muestra la figura 74 b).



Figura 74. Indicadores del dispositivo USB.

19. Después de unos segundos aparecerá el cuadro de diálogo mostrado en la figura 75; seleccionar **Sí, sólo esta vez** y después clic en **Siguiente**.

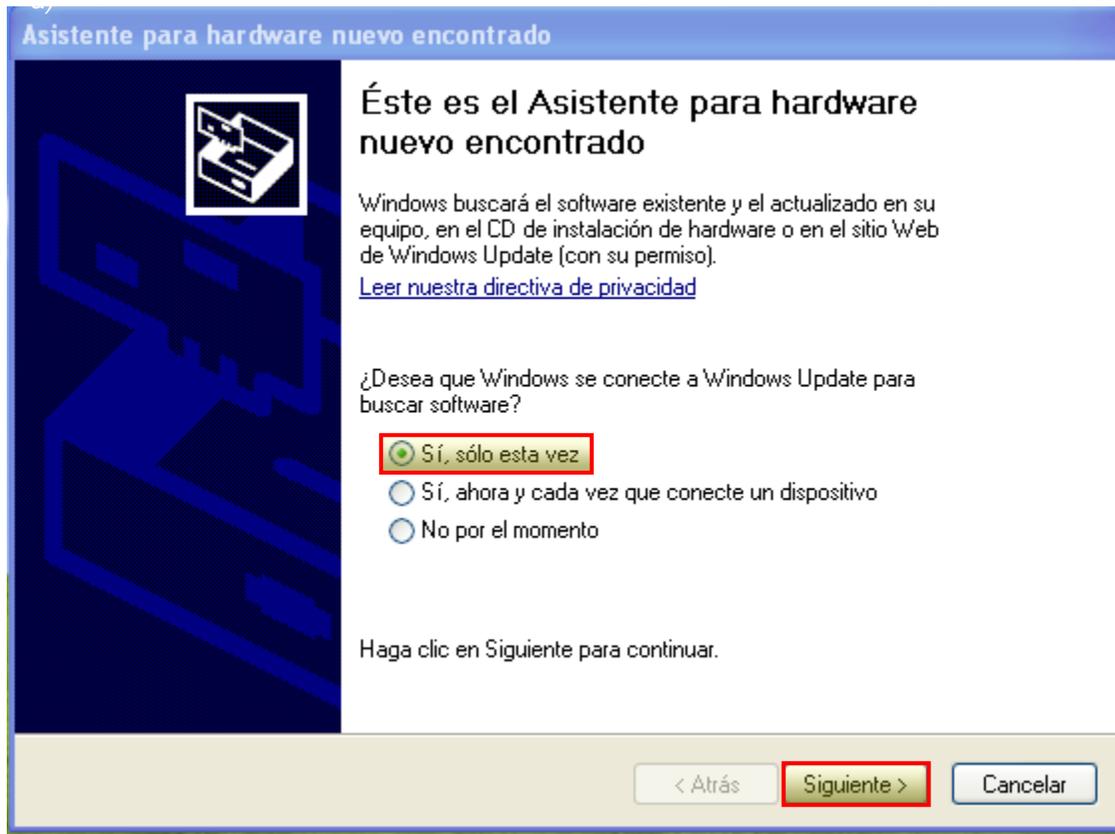


Figura 75. Asistente de hardware.

# Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

20. Dar clic en **Instalar desde una lista o ubicación específica (avanzado)** y luego en **Siguiente** (figura 76).

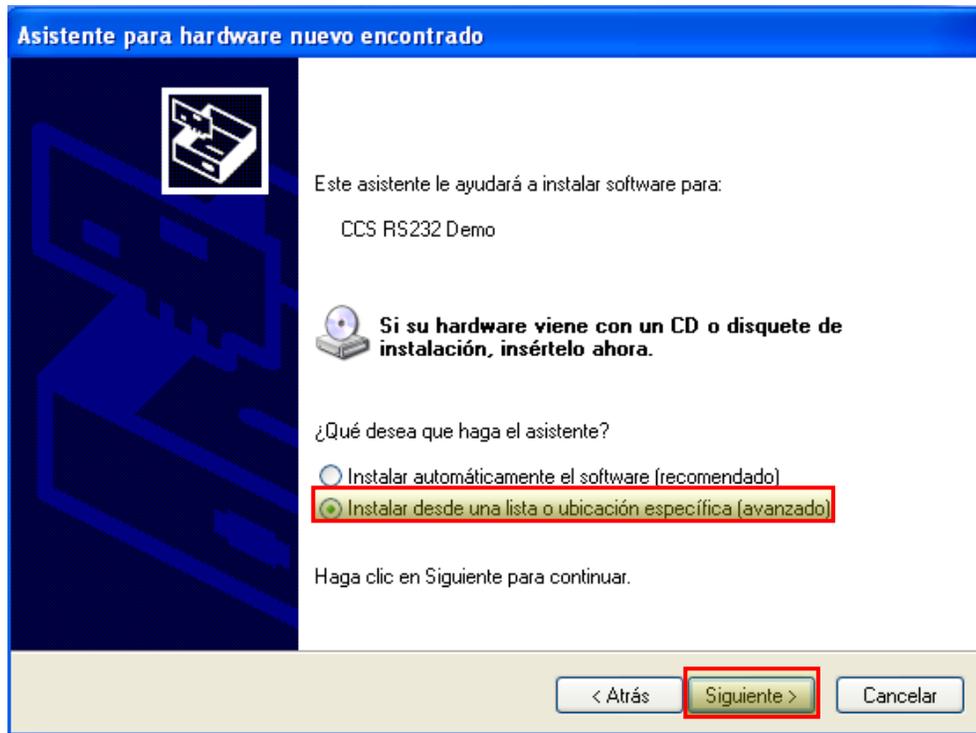


Figura 76. Instalar nuevo software.

21. Dar clic en **Examinar**; seleccionar la carpeta **WinXP** ubicada en el CD de instalación y clic en **Aceptar** (figura 77).

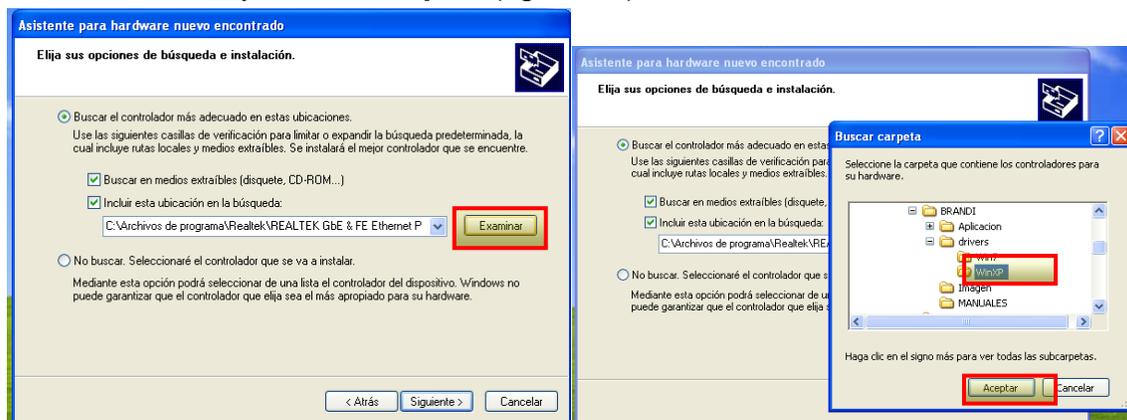


Figura 77. Ubicación de la carpeta Win XP.

# Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

22. Dar clic en **Siguiente** (figura 78).

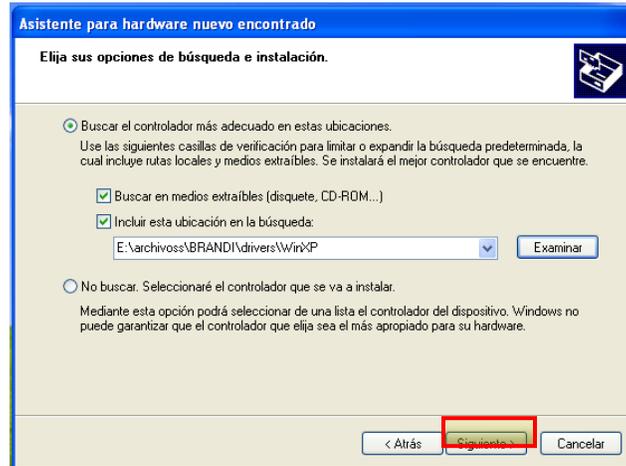


Figura 78. Asistente para hardware.

23. Se iniciará la búsqueda de software (figura 79).



Figura 79. Buscando nuevo hardware.

24. Después de unos segundos se mostrará un cuadro de diálogo como lo muestra la figura 80; dar clic en **Continuar**.

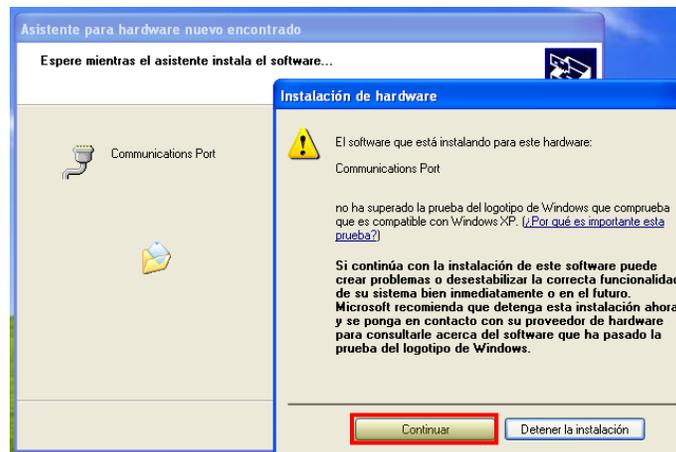


Figura 80. Instalación de software.

# Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

25. Enseguida se cargarán los controladores (figura 81).

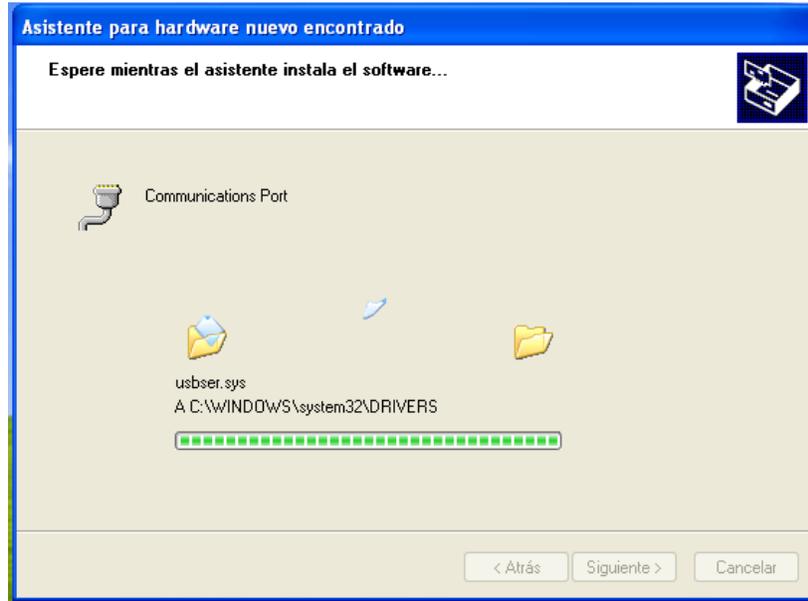


Figura 81. Cargando controladores.

26. Por ultimo se mostrará el cuadro de diálogo de la figura 82; dar clic en **Finalizar**.

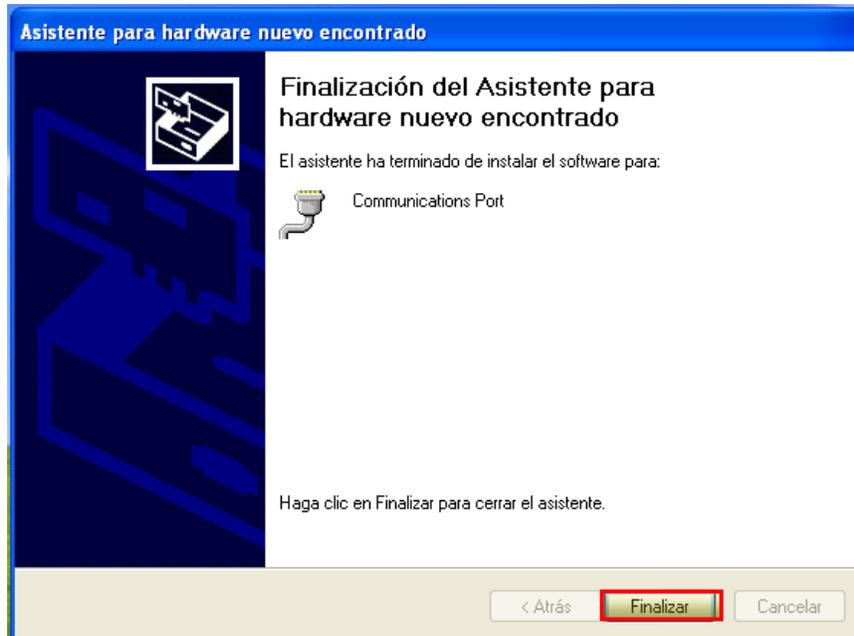


Figura 82. Software instalado.

## Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

---

27. En la parte inferior derecha de la pantalla se mostrará un recuadro que dice que **Su nuevo hardware está instalado y listo para usarse**. En la caja de BRANDI se visualizará el led de color verde encendido (figura 83).

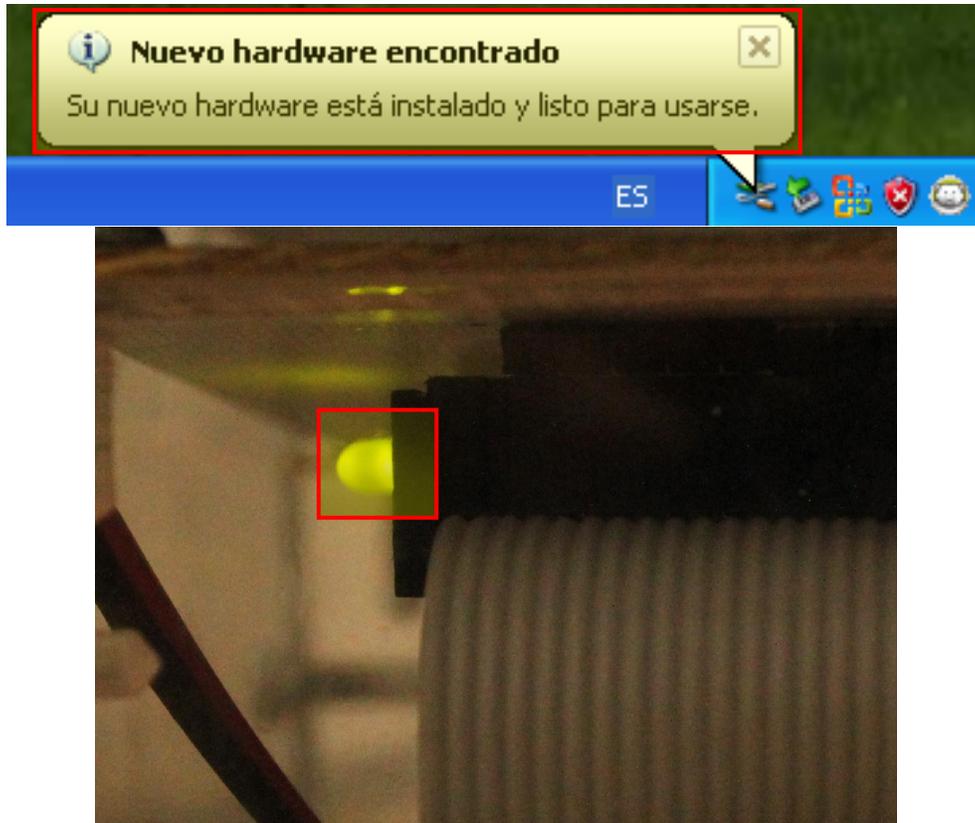


Figura 83. Hardware encontrado.

**La instalación de la interfaz de comunicación USB de BRANDI ha sido exitosa!!!!**

**Nota:** Si falló en la instalación de la interfaz de comunicación USB de BRANDI o no puede instalar adecuadamente, consulte al diseñador Ing. Jhonatan Valencia Ramos ([jvr12im@hotmail.com](mailto:jvr12im@hotmail.com)).

# Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

## 8.2 INTERFAZ GRÁFICA

### INSTALACIÓN DE INTERFAZ GRÁFICA DE BRANDI

1. Ejecutar la aplicación **Setup.exe** que se encuentra en la carpeta **BRANDI:\Aplicacion**. Se mostrará la ventana mostrada en la figura 84; pulsar **OK**.

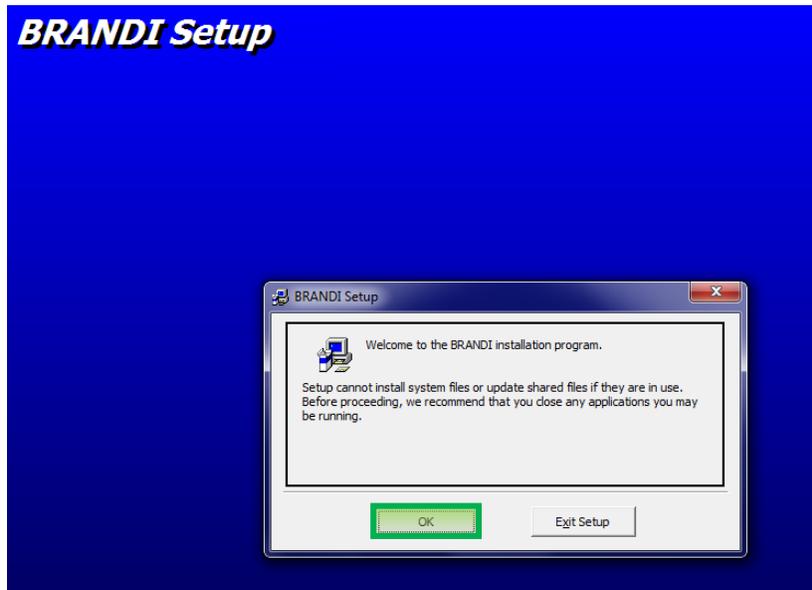


Figura 84. Setup ejecutado.

2. Dar clic en el simbolo de computadora para comenzar con la instalación (figura 85).

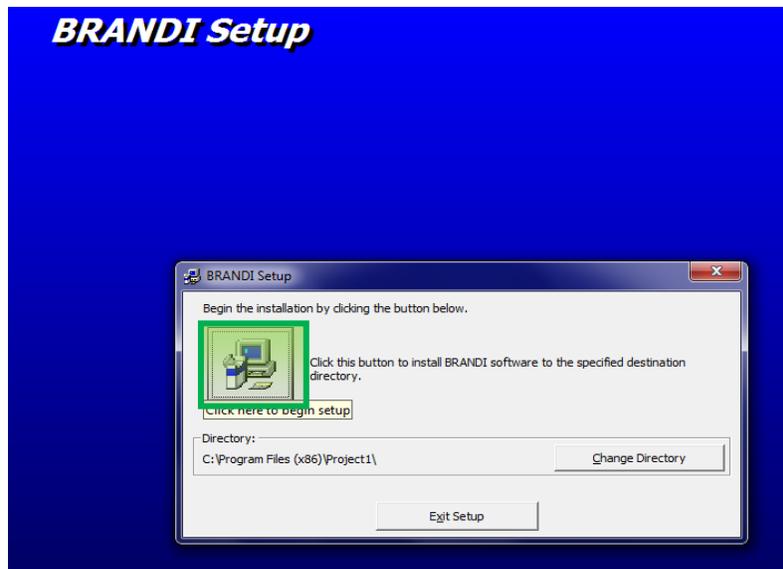


Figura 85. Comenzar instalación.

# Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

3. Pulsar **C**ontinue (figura 86).

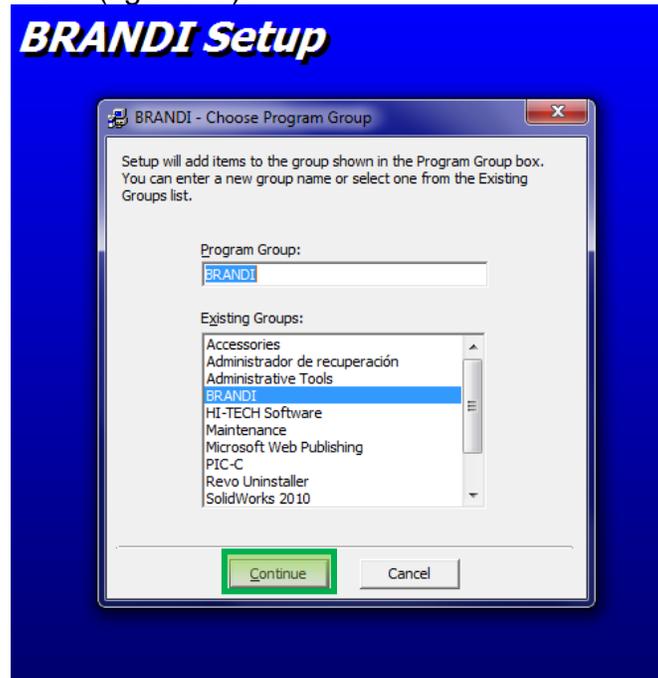


Figura 86. Continuar instalación.

4. Al instante se iniciará a cargar los controladores en el sistema de Windows (figura 87).

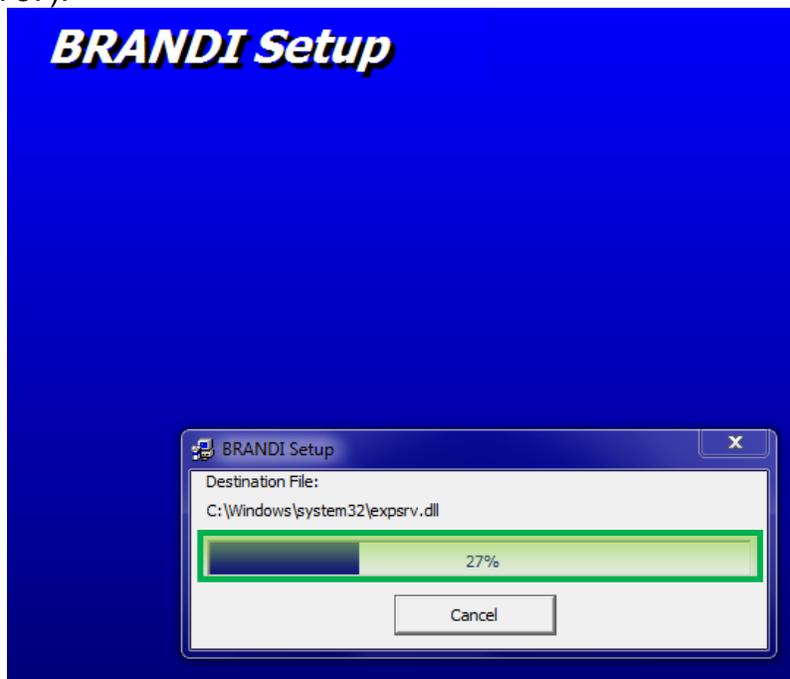


Figura 87. Cargando controladores.

# Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

5. Saldrá un mensaje como el que se muestra en la figura 88 a), pulsar **Omitir**; luego saldrá otro cuadro de diálogo como el que muestra la figura 88 b), pulsar **NO**. A los cuadros de diálogo siguientes sólo pulsar **Omitir**.

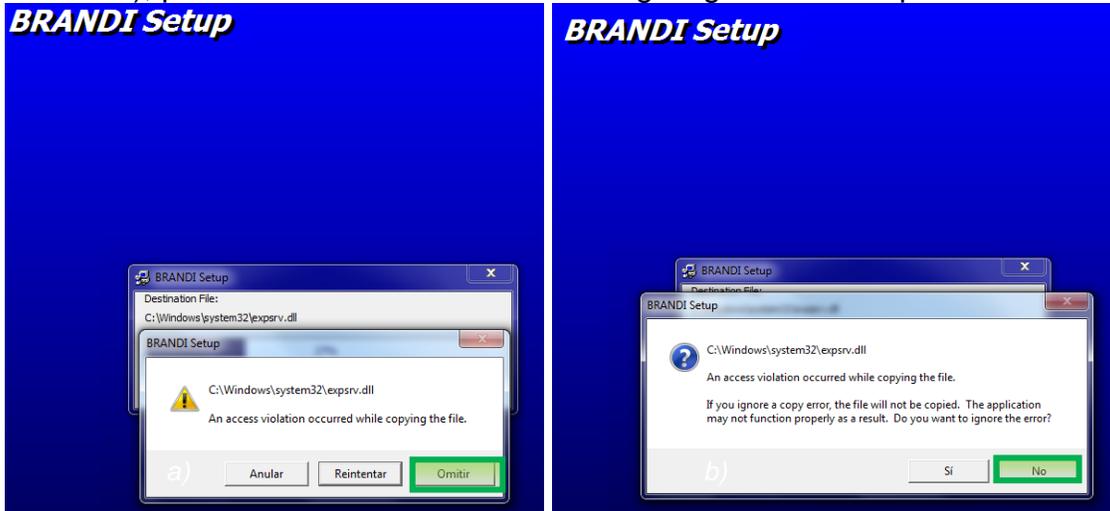


Figura 88. Indicaciones para instalación.

6. Por último aparecerá un cuadro de diálogo donde dice que la instalación de "BRANDI" fue completada exitosamente, pulsar **Aceptar** (figura 89).

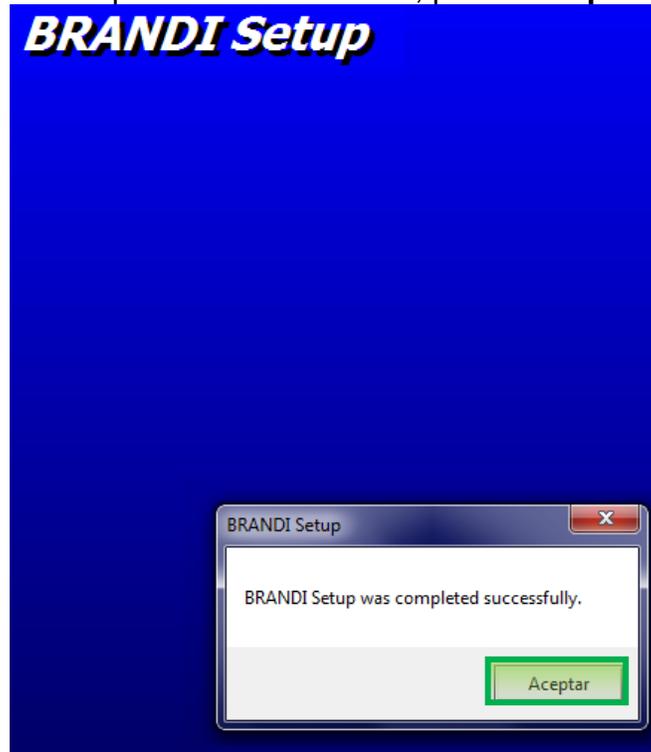


Figura 89. Instalación completa.

# Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

7. Antes de iniciar a trabajar con el programa, copiar las imágenes que se encuentran en la carpeta **BRANDI:\Imagen** del CD de instalación y pegarlas en la carpeta del disco duro de la PC **C:\Program Files (x86)\Project1**.
8. Después de haber completado la instalación ya se puede visualizar el icono ejecutable de **BRANDI** en la barra de inicio. Además, al pulsar en **Todos los programas** aparecerá una carpeta nombrada **BRANDI** (figura 90).

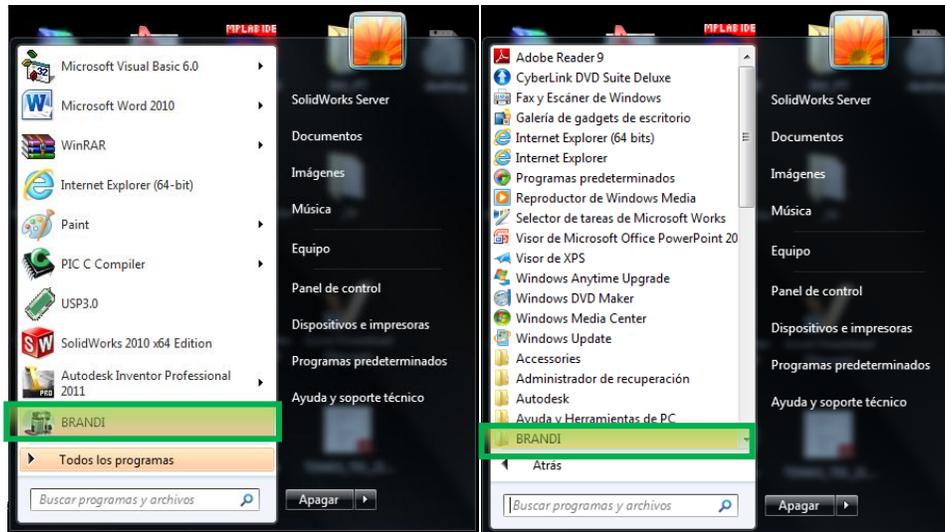


Figura 90. Icono de BRANDI.

**!!!El programa esta listo para ser utilizado (figura 91)!!!**



Figura 91. Programa BRANDI.

**NOTA:** Si falló en la instalación de la interfaz Gráfica de BRANDI o no puede instalar adecuadamente, consultar al diseñador Ing. Jhonatan Valencia Ramos ([jvr12im12@hotmail.com](mailto:jvr12im12@hotmail.com)).

# Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

---

## CAPÍTULO 9. RESULTADOS ALCANZADOS

La comunicación del robot a la computadora se hizo vía USB (figura 92 y 93).

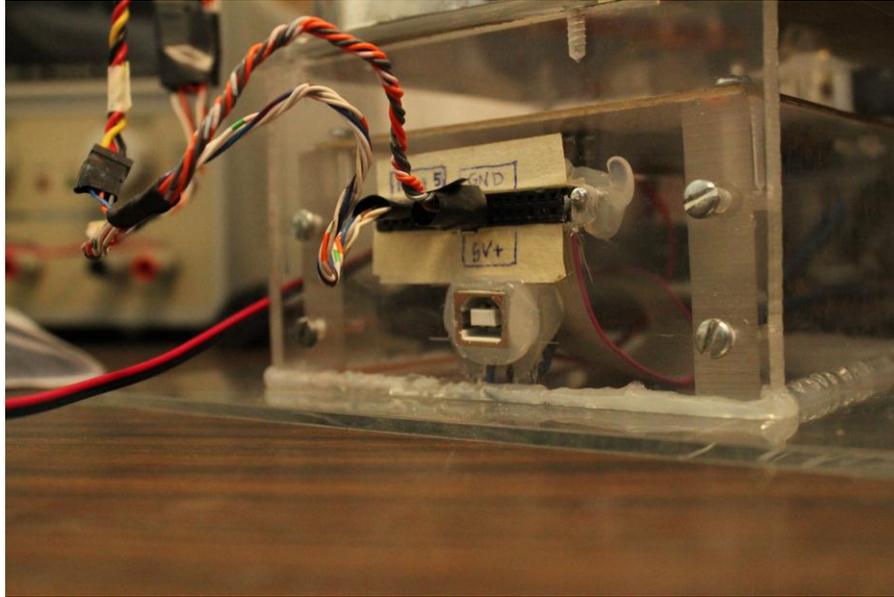


Figura 92. Conector USB.

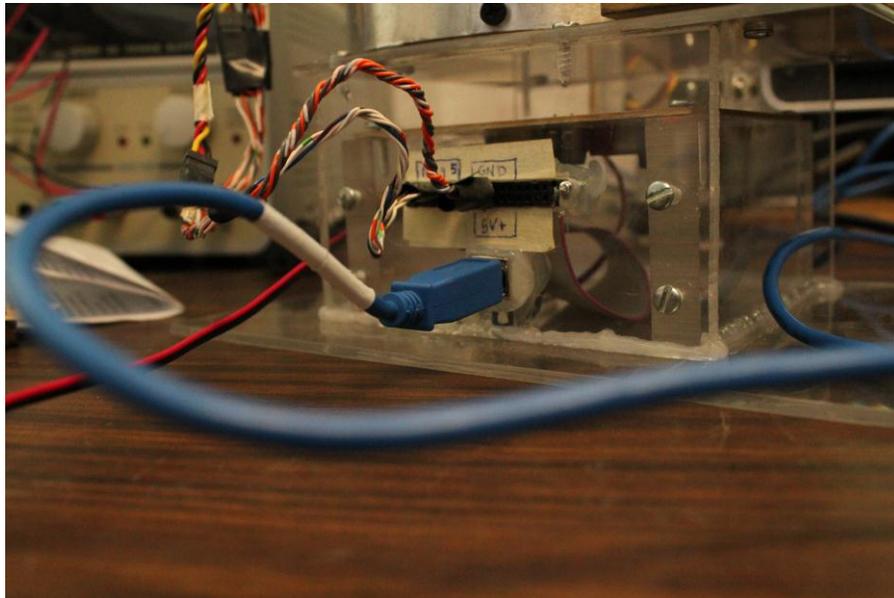


Figura 93. Forma de conexión USB.

## Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

---

La computadora comienza a detectar un nuevo hardware, mientras un foco de color rojo que se encuentra en la caja de acrílico del robot nos indica la conectividad (figura 94).

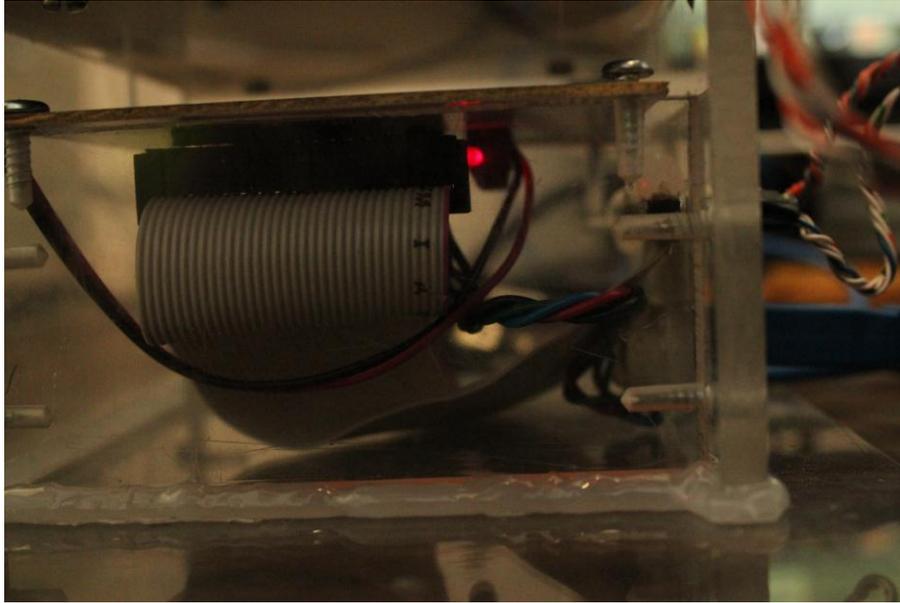


Figura 94. Foco indicador de conectividad.

Cuando la computadora ha instalado el hardware, un foco de color verde que se encuentra en la caja de acrílico del robot se enciende (figura 95).

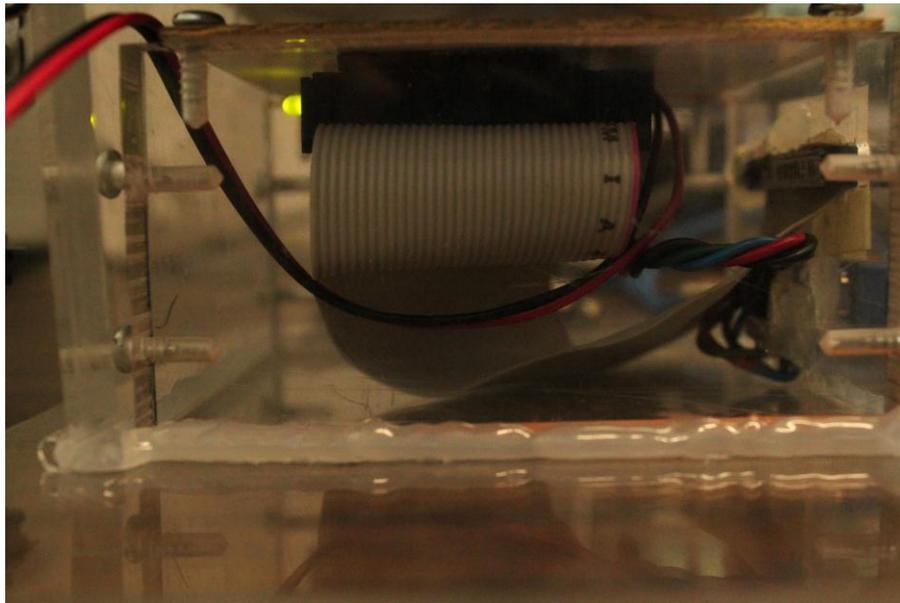


Figura 95. Foco indicador de detección exitosa.

## Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

Además del USB, el robot debe de estar conectado a una fuente de voltaje de 5V para alimentar a los servomotores. Una vez que la fuente de voltaje y el USB están conectados, el robot toma su posición de inicio (posición de **Home**), como se observa la figura 96.

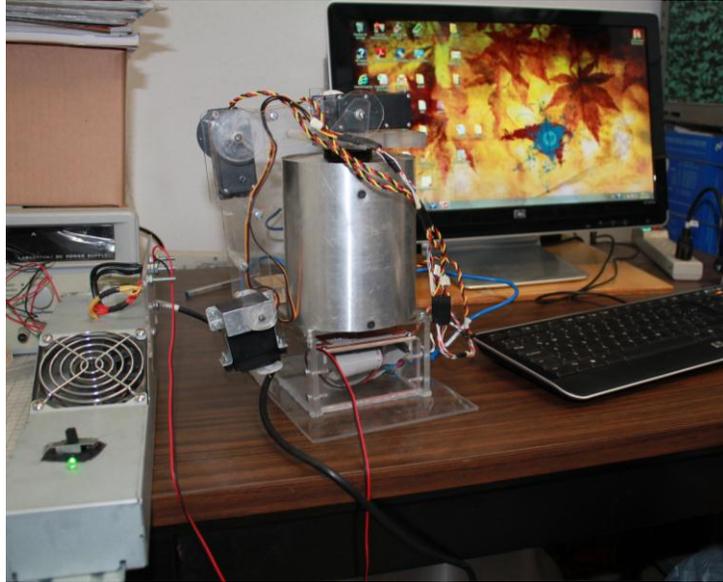


Figura 96. Robot en posición de Home.

Se habrá el programa hecho en Visual Basic que controla al robot, como se muestra en la figura 97.

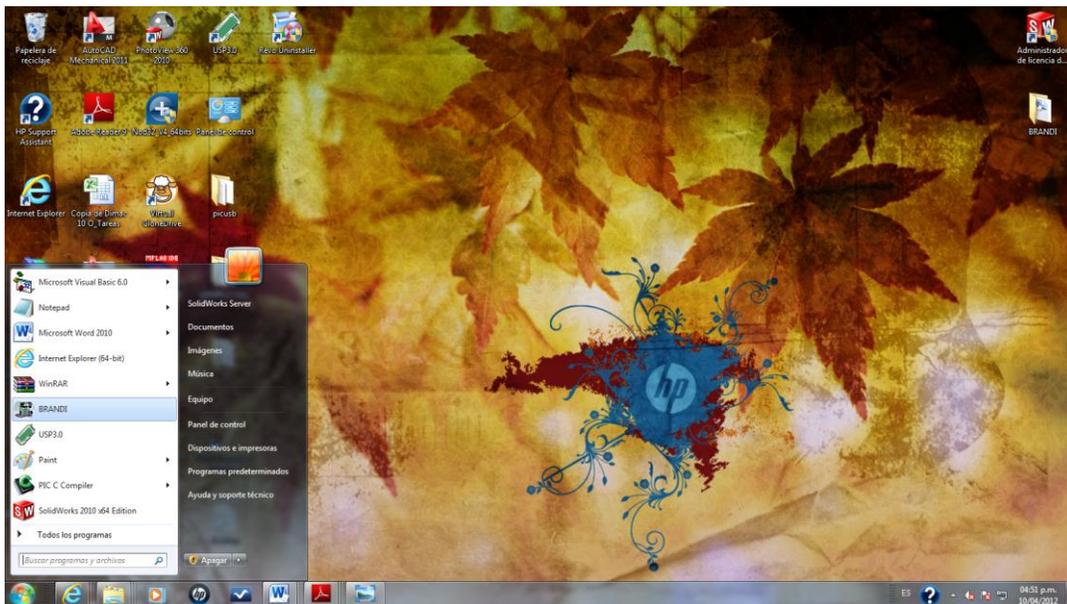


Figura 97. Ejecución del programa en Visual Basic.

# Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

Se enciende el programa con el botón **OFF** (botón en rojo), se ingresan las coordenadas del punto final y se envían los datos al robot con el botón **Enviar** para posicionar su extremo en el punto indicado (figura 98).

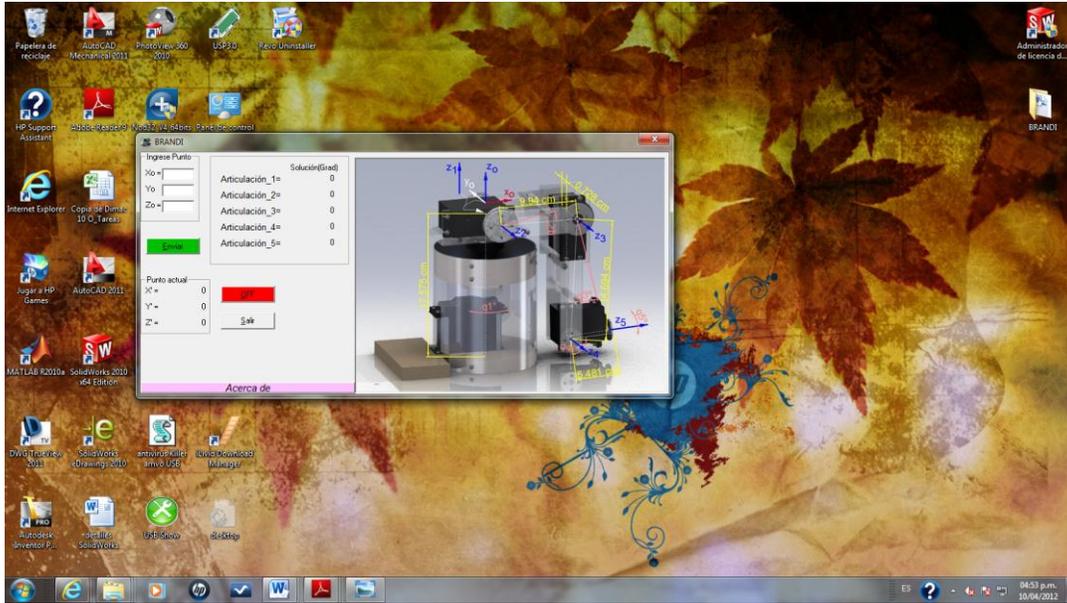


Figura 98. Ventana de control del robot.

Cuando se envían los datos, el robot toma su nueva posición, pero aún se puede cancelar la ejecución si se da clic en el botón **Detener** de la nueva ventana que aparece cuando se envían los datos (figura 99).

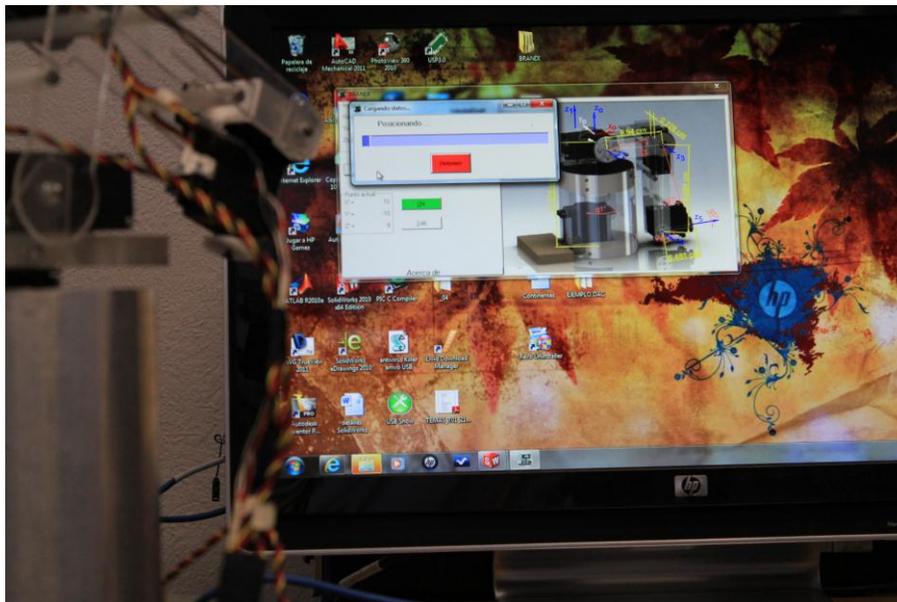


Figura 99. Ventana de cancelación de posición.

## Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

---

Si no se cancela la ejecución, el extremo del robot se ubica en las coordenadas dadas por el usuario, como se muestra en la figura 100.

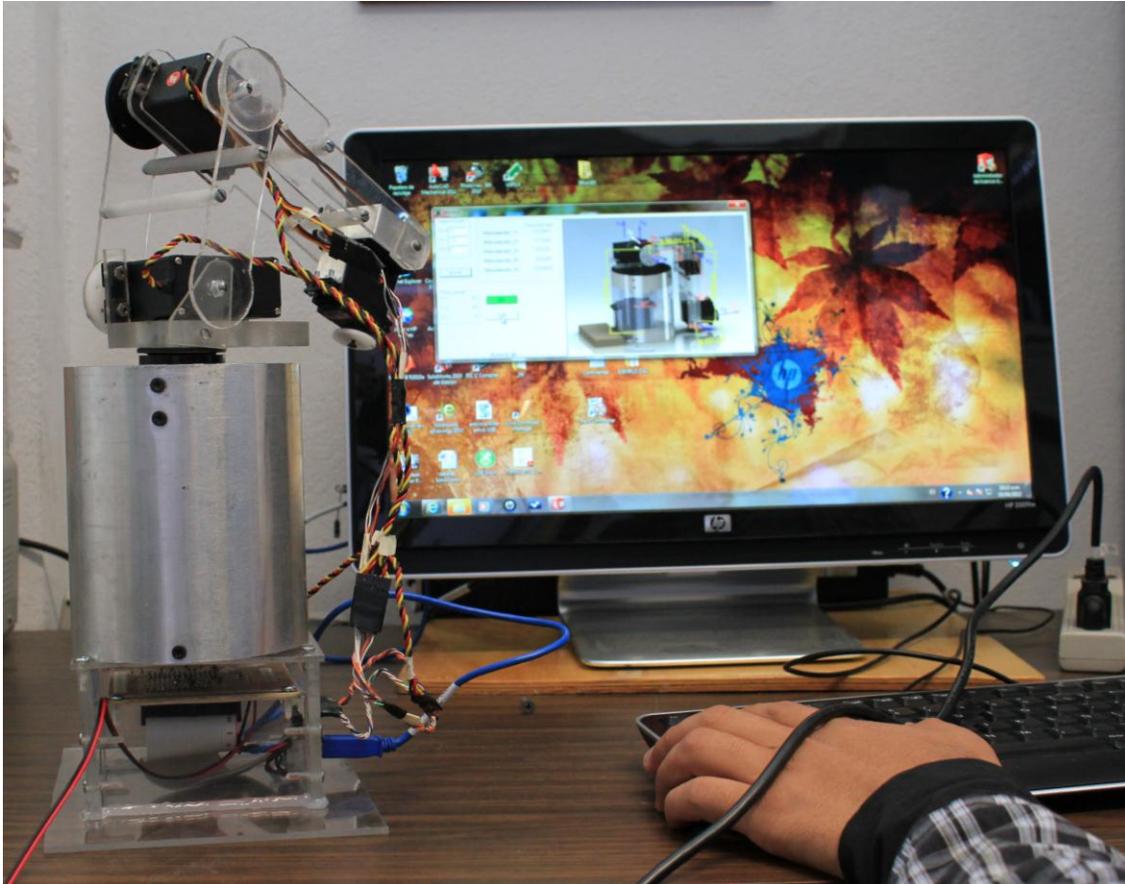


Figura 100. Posición final del robot.

Si se requiere de un nuevo punto, solo se ingresan las coordenadas y se vuelven a enviar.

# Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

---

## **CAPÍTULO 10. CONCLUSIONES**

El diseño de la estructura es funcional, debido a que mantiene rigidez entre sus componentes, cuando se encuentra estático y cuando se encuentra en movimiento.

Aunque la cinemática inversa se obtuvo de distintas maneras en MATLAB, solo una de ellas se ocupó para realizar el programa gráfico.

Mediante la interfaz electrónica se pudo realizar la comunicación entre la computadora y el robot vía USB.

Cuando se envían los datos desde el programa gráfico utilizando puerto USB, el robot los recibe y se posiciona en las coordenadas indicadas; no obstante, se nota un ligero error de posicionamiento, lo cual no se discutió por el hecho de que no es un objetivo, buscar exactitud en el posicionamiento del robot.

Con todo esto, se deduce que los objetivos establecidos han sido alcanzados exitosamente.

# Diseño, Manufactura y Programación de un robot antropomórfico en un alcance de prototipo didáctico

---

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Sampedro Vega Irma, “Diseño de un robot manipulador de 6 *GDL* con mordazas intercambiables”, Tesis UAM-A, México D. F., Septiembre 2005.
- [2] Moya Pinta Diego Armando, “Modelo y análisis cinemático de un robot manipulador esférico industrial aplicando MATLAB”, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Agosto 2010.
- [3] López Apostolovich Luis Felipe, “Modelación y simulación dinámica de un brazo robótico de 4 grados de libertad para tareas sobre un plano horizontal”, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Agosto 2009.
- [4] Iñigo Madrigal, R. y Vidal Idiarte, E. (2004). "Robots industriales manipuladores (1ra Ed.)", México D.F, México: Alfa omega.
- [5] Craig J. (2006), “Robótica (3ra Ed.)”, México D.F., México: Pearson educación.
- [6] Ollero Baturone, Aníbal, (2001), "Robótica: manipuladores y robots móviles" México: Alfaomega.