



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DEL ESTADO DE HIDALGO**



INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA

ÁREA ACADÉMICA DE COMPUTACIÓN Y ELECTRÓNICA

INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

**REPRESENTACIÓN VIRTUAL DE MANIPULADORES EN
CONFIGURACIÓN COOPERATIVA**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO EN
ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**

PRESENTA:

MIGUEL GUZMÁN ALVARADO

ASESOR:

MTRO. JUAN CARLOS GONZÁLEZ ISLAS

MINERAL DE LA REFORMA, HIDALGO, 25 DE NOVIEMBRE DE 2014

MÉXICO



Miguel Guzmán Alvarado

**Representación virtual de
manipuladores en
configuración cooperativa**



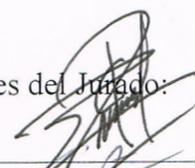
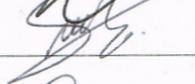
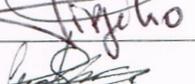
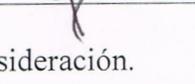
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO
INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA
ÁREA ACADÉMICA DE COMPUTACIÓN Y ELECTRÓNICA
 Licenciatura en Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones

OFICIO EYT/296/14

P.D.I.E.T MIGUEL GUZMÁN ALVARADO
P R E S E N T E

Por este conducto le comunico que el Jurado asignado al trabajo de titulación **“Representación Virtual de Manipuladores en Configuración Cooperativa”** y que después de revisarlo en reunión de sinodales, han decidido autorizar la impresión del mismo, hechas las correcciones que fueron acordadas.

A continuación se anotan las firmas de conformidad de los integrantes del Jurado:

PRESIDENTE:	Ing. Emmanuel Gutiérrez Rojas.	
PRIMER VOCAL:	M. en C. Juan Carlos González Islas	
SEGUNDO VOCAL:	M. en C. Elías Varela Paz	
TERCER VOCAL:	Dr. Virgilio López Morales.	
SECRETARIO:	Ing. Claudio Iván Durán Marroquín.	
PRIMER SUPLENTE:	Ing. Mauricio Hernández Castillo	
SEGUNDO SUPLENTE:	Ing. Claudia Gama Ocampo.	

Sin otro particular, le reitero a usted la seguridad y mi atenta consideración.

ATENTAMENTE,
“AMOR, ORDEN Y PROGRESO”
 Mineral de la Reforma, Hidalgo, a 13 de Noviembre de 2014.



Ing. Emmanuel Gutiérrez Rojas
 Coordinador de la Licenciatura en Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones

C.c.p. Archivo



Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería,
 Carretera Pachuca - Tulancingo Km. 4.5, Ciudad del Conocimiento,
 Colonia Carboneras, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México, C.P. 42184
 Tel. +52 771 7172000 ext. 6320
 grojas@uaeh.edu.mx



*El presente trabajo,
está dedicado a mis padres,
quienes me han educado y enseñado,
y me han brindado los medios para concluir
de manera exitosa todos mis proyectos.
Por todo eso y mucho más, gracias.*

Agradecimientos

A la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo por permitirme concluir con mis estudios de nivel superior y por ser mi alma mater.

En agradecimiento entero a la persona que me motivó en todo momento a mejorar día a día como persona y como alumno; a mi madre, la persona que amo y admiro, la sra. María Edith Alvarado Moreno, gracias por confiar en mí, por apoyar cada una de mis decisiones y por aportar todo lo necesario de ti y de tu vida en los diferentes proyectos que he emprendido.

A mi padre, que bien o mal, aportó muchos conocimientos a mi vida, con las lecciones de vida y su apoyo en cada actividad que desempeñé en mi vida, al sr. Jacobo Miguel Guzmán Márquez.

A mi hermana Nataly quien con gran empeño se esmeró en siempre ofrecerme los mejores consejos y su incondicional apoyo para la realización de cualquier proyecto en mi vida; de igual forma, a mi hermano Alain, quien siendo aún pequeño me brindó esa motivación que siempre hace falta en cualquier momento.

A mi novia, Mitzi Yolitzín, una persona maravillosa que apareció en mi vida para mostrarme una nueva forma de vivir y de actuar, quien con su apoyo, amor y paciencia aportó ese granito de arena que crea cosas maravillosas.

Al Ing. Jaime Alvarado Moreno, sin ti, muchas de las cosas que he aprendido de la vida, del trabajo y de una vida profesional no habrían sido posibles, por tu paciencia y apoyo en los momentos necesarios, así como los consejos de vida que sin duda alguna me han formado como ingeniero y como persona, por eso y por ser un segundo padre en mi vida, gracias.

Al sr. Alberto Hernández Jacinto, por su apoyo y consejos a lo largo de mi formación media superior y superior, así como laboral; por todas aquellas experiencias enseñadas y por su amistad incondicional, gracias.

A mis amigos y compañeros en la universidad, a quienes agradezco su presencia en los diferentes momentos, buenos y malos, en especial a Aldo y Jorge, gracias.

Al Mtro. Juan Carlos González, al Dr. Virgilio López Morales y al M.C. Elías Varela Paz por la revisión al presente documento de investigación, por sus consejos y por el apoyo que me brindaron en la culminación de mi educación superior.

Resumen

Representación virtual de manipuladores en configuración cooperativa

El presente documento de investigación se centra en el contexto de los manipuladores industriales en configuración cooperativa simulados en un ambiente industrial virtual. Se analizan los conceptos y el estado actual de la robótica colectiva y se hace uso de un programa de diseño asistido por computadora con el fin de modelar mecánicamente los robots a emplear; así mismo, mediante un instrumento virtual se vinculan las diferentes partes que conforman el ambiente industrial simulado, es decir, mediante el empleo de herramientas matemáticas, mecánicas y de control se lleva a cabo la manipulación de los robots elegidos. De esta forma se pueden visualizar en el ambiente simulado los movimientos involucrados en una actividad predeterminada para observar la importancia de la cinemática inversa en el movimiento articulado de los manipuladores y la forma en la que el programador se acerca al ambiente simulado para la generación de sistemas estables y el desempeño de los robots cooperativos.

Índice general

Agradecimientos	IV
Resumen	V
Índice de figuras	VIII
Lista de tablas	X
1. Introducción	1
1.1. Planteamiento del problema	2
1.2. Aportes del trabajo	5
1.3. Objetivo general	5
1.4. Objetivos específicos	5
1.5. Hipótesis	5
1.6. Metodología de la investigación	6
1.7. Estructura de la tesis	6
1.8. Estado del Arte	7
1.8.1. Trabajos relacionados	7
2. Conceptos relacionados a la robótica cooperativa	9
2.1. Introducción	9
2.2. Conceptos relacionados a los manipuladores	9
2.2.1. Inspiraciones biológicas	10
2.2.2. Comunicación	10
2.2.3. Arquitectura, planeación de tareas y control	11
2.2.4. Localización, mapeo y exploración	11
2.2.5. Transporte de objetos y manipulación	12
2.2.6. Coordinación de movimiento	12
2.2.7. Robots reconfigurables	12
2.2.8. Aprendizaje	13
2.3. Trabajo cooperativo	14
2.4. Tipos de control utilizados en robots cooperativos	14
2.4.1. Control centralizado	15
2.4.2. Control distribuido	15

2.5.	Tipos de sistemas colaborativos	15
2.5.1.	Sistemas altamente acoplados	15
2.5.2.	Sistemas pobremente acoplados	16
2.6.	Ventajas de los sistemas colaborativos	16
2.7.	Desventajas de los sistemas colaborativos	16
2.8.	Control de Robots Manipuladores	17
2.8.1.	Control PID	17
2.8.2.	Método de control adaptivo	19
2.8.3.	Control adaptivo mediante programación de ganancias (<i>Gain Scheduling</i>)	20
2.8.4.	Control mediante visión artificial	21
2.9.	Conclusiones	22
3.	Simulación y análisis	23
3.1.	Introducción	23
3.2.	Diseños CAD empleados	23
3.3.	Cinemática de los manipuladores	25
3.4.	Asignación de ejes a articulaciones	25
3.5.	Asignación de ejes a cada articulación	27
3.6.	Cinemática directa	28
3.7.	Cinemática inversa	33
3.8.	Características en simulación	38
3.9.	Características del ordenador empleado para la simulación	44
3.10.	Conclusiones	44
4.	Gráficas y resultados	45
5.	Conclusiones y trabajos futuros	59
5.1.	Conclusiones	59
5.2.	Trabajos a futuro	59
	Bibliografía	61
	A. Programa utilizado para cálculos matemáticos	66
	B. Especificaciones Técnicas del Manipulador Fanuc 50iC/5L	70
	C. Especificaciones Técnicas del Manipulador Kawasaki FS10E	73

Índice de figuras

1.1. Metodología de investigación utilizada en esta tesis.	6
2.1. Diagrama estructural de la adaptación mediante programación de ganancias.	20
3.1. Robot de 6 grados de libertad del tipo rotacional - Kawasaki FS10E .	24
3.2. Robot de 6 grados de libertad del tipo rotacional - FANUC 50iC/5L .	24
3.3. Robot de 6 grados de libertad del tipo rotacional - FANUC 50iC/5L .	24
3.4. Asignación de articulaciones - Kawasaki FS10E	26
3.5. Asignación de articulaciones - FANUC 50iC	26
3.6. Asignación de articulaciones- FANUC 50iC/5L	27
3.7. Asignación de ejes a las diferentes articulaciones. Aplica para los 3 manipuladores	28
3.8. Parámetros de Denavit-Hartenberg	29
3.9. Modelo geométrico de los manipuladores	31
3.10. Resultante debido a coordenadas XZ	32
3.11. Resultante debido a las coordenadas $P(X, Y)$	33
3.12. Asignación de parámetros para obtención de cinemática inversa . . .	34
3.13. Codo abajo del manipulador	35
3.14. Codo arriba del manipulador	35
3.15. Simulación mediante CAD	39
3.16. Proceso centralizado de movimiento de manipuladores	40
3.17. Panel de coordenadas (Principal)	41
3.18. Panel de visualización	41
3.19. Control centralizado empleado: algoritmo de movimiento cinemático.	43
4.1. Desplazamiento en el eje Y de la plancha para robot Kawasaki.	47
4.2. Desplazamiento con respecto al eje Y de la plancha para robot Fanuc.	48
4.3. Desplazamiento en el eje Y de la plancha para el producto terminado.	49
4.4. Desplazamiento en el eje X del manipulador Kawasaki.	50
4.5. Desplazamiento en el eje Y del manipulador Kawasaki.	51

4.6. Desplazamiento en el eje Z del manipulador Kawasaki.	52
4.7. Desplazamiento en el eje X del manipulador Fanuc 1.	53
4.8. Desplazamiento en el eje Y del manipulador Fanuc 1.	54
4.9. Desplazamiento en el eje Z del manipulador Fanuc 1.	55
4.10. Desplazamiento en el eje X del manipulador Fanuc 2.	56
4.11. Desplazamiento en el eje Y del manipulador Fanuc 2.	57
4.12. Desplazamiento en el eje Z del manipulador Fanuc 2.	58

Lista de tablas

3.1. Parámetros; * Articulación Variable	29
4.1. Matriz de coordenadas empleada en simulación	46
4.2. Coordenadas para Plancha Kawasaki	47
4.3. Coordenadas para Plancha Fanuc	48
4.4. Coordenadas para Producto Terminado	49
4.5. Coordenadas en el eje X para Robot Kawasaki	50
4.6. Coordenadas en el eje Y para Robot Kawasaki	51
4.7. Coordenadas en el eje Z para Robot Kawasaki	52
4.8. Coordenadas en el eje X para Robot Fanuc 1	53
4.9. Coordenadas en eje el Y para Robot Fanuc 1	54
4.10. Coordenadas en el eje Z para Robot Fanuc 1	55
4.11. Coordenadas en el eje X para Robot Fanuc 2	56
4.12. Coordenadas en el eje Y para Robot Fanuc 2	57
4.13. Coordenadas en el eje Z para Robot Fanuc 2	58

Capítulo 1

Introducción

La robótica es una rama de la tecnología, que estudia el diseño y construcción de máquinas capaces de desempeñar tareas repetitivas realizadas por el ser humano o que requieren algoritmos de inteligencia artificial. Hay que remarcar que la finalidad de la robótica industrial actual no es reemplazar al ser humano, sino la de mejorar la productividad, calidad, seguridad y flexibilidad en los procesos industriales. El término robot está tomado de la palabra checa “robota”, que significa servidumbre o trabajo forzado. Es así como surge el manipulador o brazo robótico, similar a un brazo humano [1].

Un sistema robótico puede describirse, como “aquel que es capaz de recibir información, comprender su entorno a través del empleo de modelos, formular y ejecutar planes, controlar o supervisar su operación”. La robótica es esencialmente pluridisciplinaria y se apoya en gran medida en los progresos de la microelectrónica y de la informática, así como en los de nuevas disciplinas tales como el reconocimiento de patrones y de la inteligencia artificial [2].

Los primeros robots construidos, eran modelos poco avanzados. Desde los primeros autómatas hasta las sondas espaciales han pasado varios siglos, pero hablar de la aplicación de inteligencia artificial en la robótica solamente sería unos treinta años atrás.

Se puede contemplar la robótica como una ciencia que, aunque en ella se han conseguido grandes avances, ofrece aún un amplio campo para el desarrollo y la innovación tecnológica y es precisamente este aspecto el que motiva a muchos investigadores y aficionados a los robots a seguir adelante planteando robots cada vez más evolucionados y complejos.

Los aficionados a los robots también juegan un papel muy importante en el desarrollo de la robótica, ya que son éstos los que, partiendo de una afición firme, con sus particulares ideas y al cabo de un cierto tiempo de pruebas y progresos, han podido desarrollar nuevas teorías y aplicaciones para con ello, crear precedentes o mejorar aspectos olvidados, así como solucionar problemas no previstos inicialmente.

Actualmente los manipuladores robóticos industriales realizan, entre otras tareas, el ensamblado, soldado y pintado de automóviles. Tareas que requieren de alta precisión, sobre todo en la tarea de ensamblado [3].

Hoy en día, en el arte de la robótica, se está produciendo un gran desarrollo en el ámbito de los robots cooperativos. Algunos problemas son demasiado difíciles de resolver para un único robot: empujar una caja, explorar un campo, etc...

La robótica colectiva busca diseñar sistemas compuestos de varios robots capaces de resolver problemas conjuntamente. Los robots que forman parte de un sistema multi-robot son simples en términos de diseño y control, y menos costosos que los sistemas de un sólo robot especializado. Los sistemas multi-robot están orientados a resolver problemas en los cuales la participación de un solo robot no es suficiente o resulta muy costosa (en términos de diseño y tiempo), por ejemplo el transporte de objetos voluminosos, el manejo de material peligroso, la exploración y cobertura de terreno, por mencionar algunos [4].

1.1. Planteamiento del problema

Con el nacimiento de la Robótica, también se inicia el proceso por el cual el ser humano necesita desempeñar tareas más difíciles y peligrosas que indudablemente podría realizar sin la ayuda de un robot. Al desarrollar procesos industriales más complejos, con métodos de control más robustos, es necesario poder contar con una herramienta computacional capaz de aportar al programador una idea general de cómo se comportará el sistema modelado en un medio virtual, logrando así una idea general del equipo (robot) que es idónea para la realización de la tarea en el medio físico.

En la actualidad los robots cumplen una tarea fundamental en la eficiencia de los procesos productivos en las industrias, es por esto que se han convertido en una necesidad en donde se requieran grandes volúmenes de producción y por ende, las exigencias a las que se someten son cada vez más elevadas, lo que hace aumentar su costo y complejidad [3].

Como se mencionó anteriormente la robótica cooperativa busca que por medio de varios robots, se puedan resolver problemas conjuntamente, es decir, que se puedan realizar tareas que son imposibles de realizar por un robot único. Esto aunado a la complejidad o las limitaciones espaciales del problema, hace que sea necesario que dos o más robots intervengan para efectuarla.

El uso de varios robots permite un aumento de la eficiencia y efectividad del sistema, dado que la creación de muchos robots simples es más barata y fácil. Por otro lado el uso de múltiples robots permite enfrentar fallas de mejor forma, ya que aunque fallen y se reemplacen del sistema algunos robots, el objetivo final es aún posible de lograr [5].

Sin embargo, de acuerdo al actual estado del arte, la implementación de robots cooperativos, requiere de una programación compleja, sincronización, experimentación y una revisión cuidadosa de los algoritmos implementados. Mientras se requiera tal nivel de esfuerzo, es poco probable que los robots cooperativos tengan una masiva inserción en los procesos productivos industriales [6].

Debido a lo anterior, surge la necesidad de ahondar en el tema, dar curso a un estudio acabado de un sistema cooperativo de robots que realice una tarea específica de manera eficiente y que su programación y sincronización no sean tan complicadas.

El contar con un medio virtual da una buena aproximación a los eventos reales de la mejor forma posible, es decir, sin contratiempos, peligros o daños al equipo a utilizar, y lo mejor es que, proporciona los medios necesarios y las condiciones similares a los cuales el equipo puede trabajar de la mejor manera, sin desperdiciar recursos o quedar mal equipados al desempeñar la tarea.

Como es de suponerse, al iniciarse en el ámbito de la robótica, el hecho de tener poca experiencia con robots de distintas configuraciones hace al usuario un elemento poco eficiente por el hecho de desconocer ciertas características propias de cada manipulador, según sea el medio en el cuál se interactúa con el proceso.

Al programar los distintos tipos de manipuladores en ciertos procesos, el usuario se ve en la necesidad de sólo poder realizar una tarea programada a la vez, dejando al manipulador inservible si alguno de sus eslabones o articulaciones se ve dañado. Así, la interacción del manipulador con medios de uso rudo en el equipo, hacen que el tema de corrección de fallas sea necesario para que el sistema siga en funcionamiento aún y cuando el manipulador se encuentre limitado en movimientos. Al no contar

con una herramienta capaz de demostrar el desempeño del controlador, el acceso a un simulador proporciona al usuario una idea parecida de cómo se comportaría el manipulador con un programa capaz de tolerar fallas en alguna parte del proceso, en donde se presente algún daño ocasionado.

Es por eso que el estudio de este tema da respuestas generales a los aspectos abordados en este capítulo, proporcionando los conocimientos básicos para ahondar el tema de la robótica cooperativa en manipuladores con tareas definidas.

1.2. Aportes del trabajo

Se realiza una simulación del sistema de robots industriales elegidos. Esto implica un modelado mecánico y de control de posiciones de los robots, así como la programación de un instrumento virtual.

Se implementa un instrumento virtual de fácil uso y comprensión, para la realización de diversas tareas según sea necesario para el programador.

Se proporciona la información suficiente para la comprensión del algoritmo usado en el movimiento de los manipuladores virtuales, así como el modelo de cinemática utilizado para lograr el movimiento articulado de los robots implementados.

1.3. Objetivo general

Modelar un sistema de robots manipuladores mediante programas de diseño asistido por computadora, instrumentación virtual y análisis matemático, con el fin de evaluar los movimientos efectuados mediante el control de posiciones y su relación directa con el modelo de cinemática inversa previamente analizado.

1.4. Objetivos específicos

- Seleccionar tres robots de configuración similar así como un ambiente de interacción.
- Modelar la cinemática inversa de los manipuladores.
- Simular el accionamiento de los robots mediante un ambiente virtual.
- Controlar las posiciones de los manipuladores para generar una actividad programada (unicamente control posicional).
- Analizar y sintetizar los resultados de los movimientos de los manipuladores con base a las gráficas de desplazamiento obtenidas.

1.5. Hipótesis

El control de posiciones en un sistema de robots de similar configuración que realizan una tarea cooperativa, mediante un ambiente virtual, proporciona al programador un panorama de cómo se comportará dicho sistema en un ambiente real (industrial).

1.6. Metodología de la investigación

La metodología empleada en este trabajo de tesis se ilustra en la Figura 1.1

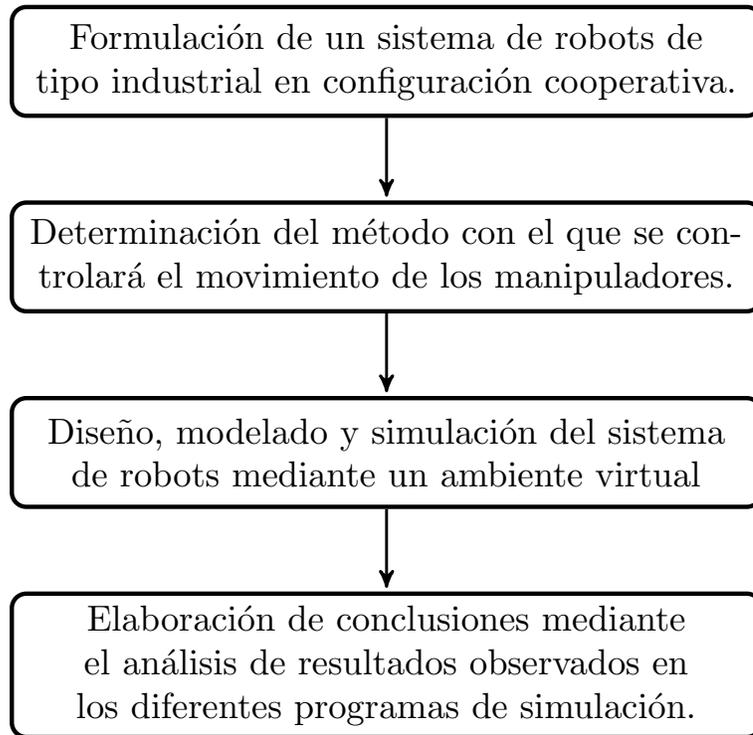


Figura 1.1: Metodología de investigación utilizada en esta tesis.

1.7. Estructura de la tesis

Mediante la metodología presentada en la sección anterior, ahora se describe brevemente el contenido de cada uno de los capítulos por los cuales se conforma este trabajo de investigación.

En el Capítulo 1 se resume el contenido de forma general, se establecen los aspectos del trabajo de tesis, así como el objetivo y la metodología empleados.

En el Capítulo 2 se describen los conceptos necesarios para tener criterios de análisis en el tema de estudio, así como las bases necesarias para poder comprender

la importancia actual de los robots en los ambientes industriales de alta complejidad en cuanto a sus sistemas y control. De igual forma se revisa el panorama actual de la robótica cooperativa en ambientes industrializados con el fin de analizar los distintos escenarios en los cuales pueden trabajar los robots y sus aplicaciones.

En el Capítulo 3 se presentan las características del sistema elegido, sus bases teóricas y los algoritmos utilizados para el análisis matemático del sistema robótico. Se definen cada una de las ecuaciones que involucran la cinemática (directa e inversa) para el posicionamiento de los manipuladores en el espacio de trabajo. De igual manera se mencionan las características del equipo físico con el que se trabajó para la simulación (aspectos de *hardware* y *software*).

En el Capítulo 4 se muestran los resultados de la simulación planteada, así como los parámetros involucrados para el desarrollo de la misma y un breve esquema de trabajo del control de los manipuladores.

En el Capítulo 5 se presentan las conclusiones a las cuales se llegó con los estudios realizados hasta el momento y los resultados que se observaron en el ambiente virtual. Se mencionan los trabajos futuros con los cuales se puede enriquecer el presente documento de investigación.

1.8. Estado del Arte

1.8.1. Trabajos relacionados

Existen documentos de tesis y publicaciones referentes al tema de estudio abordado en este documento de investigación, a continuación se presenta un resumen de los trabajos relacionados y las herramientas empleadas para la visualización de resultados.

Seguimiento Adaptativo de Trayectorias con Convergencia en Tiempo Finito de un Robot Antropomórfico Virtual de Tres Grados de Libertad[7].

En este documento de tesis, se realiza un análisis completo de las propiedades de un robot antropomórfico que deben ser tomadas en cuenta para trabajar con este actuador, considerando aspectos de cinemática posicional y diferencial, las fuerzas involucradas en el movimiento articulado de los actuadores, así como el medio dinámico virtual sobre el cual se somete el robot a técnicas de control para de esta forma determinar cuál de éstas es la más estable, versátil y segura con base al análisis de resultados al comparar los graficos ideales y los obtenidos de forma experimental.

Scorbot ER-VII virtual: modelado matemático y control de movimiento[8].

En este documento de tesis, se describe la virtualización de objetos y el correcto uso de interfaces hápticas para su comprobación. También se establecen los conceptos relacionados al control de manipuladores industriales y se proporciona un análisis de la cinemática posicional y diferencial del manipulador, así como las fuerzas dinámicas involucradas en el movimiento del robot. Se considera al robot en su forma no lineal, con lo que los movimientos son considerados con técnicas clásicas de control, evaluando cada una de ellas y demostrando la eficiencia individual de las mismas, mediante comparación de los resultados obtenidos.

Diseño e Implementación de un Prototipo Virtual de una Mesa de Coordenadas[9]. En este trabajo de investigación, se plantea un modelo tridimensional ya establecido de una mesa automatizada para uso general en un ambiente de diseño asistido por computadora. El análisis de la cinemática que maneja el autor sólo es posicional, por lo que no emplea la dinámica del manipulador en el ambiente. Se hace uso de un control PID establecido en un instrumento virtual, variando solo los valores de las constantes, K_i , K_p y K_d y obteniendo resultados diversos de la manipulación de dichos valores, concluyendo con la versatilidad de los procesos industriales y la forma en como deben ser tratados los ambientes virtuales para contrarrestar el impacto industrial en la vida natural de los seres vivos.

Plataforma virtual para el mando local y remoto de un brazo robótico de apoyo para la educación en ingeniería[10]. En este artículo, se mencionan los aspectos fundamentales a los cuales se enfrenta un programador de robots mediante técnicas *off line*, empleando un algoritmo básico de movimiento y un robot de 2 grados de libertad de tipo rotacional. Concluye con la importancia del conocimiento de la cinemática posicional en un manipulador con el fin de proporcionar parámetros precisos para el control dinámico de los actuadores sin incurrir a singularidades en el diseño del control.

Capítulo 2

Conceptos relacionados a la robótica cooperativa

2.1. Introducción

En este capítulo, se abordan los temas relacionados a los robots manipuladores, conceptos y propiedades de dichos sistemas, así como los tipos de control empleados para dar movimiento a cada articulación. Se enlistan las ventajas y desventajas de un sistema cooperativo, y se describen brevemente las áreas donde se usan actualmente algoritmos de control colectivo.

2.2. Conceptos relacionados a los manipuladores

El robot como tal es un manipulador multifuncional, reprogramable, destinado a realizar actividades como mover materiales, piezas, herramientas, etc., mediante movimientos programados y variables que permiten llevar a cabo diversas tareas. En la actualidad se observa que la robótica se ha desarrollado a pasos agigantados de tal manera que cumple con las demandas del mercado actual. La robótica cooperativa es una de las áreas más nuevas en la robótica moderna. Cada vez los sistemas son más complejos y están siendo explorados muchos aspectos de los sistemas de multi-robots. De forma general se han identificado ocho tópicos de investigación primarios con multi-robots: inspiraciones biológicas, comunicación, arquitecturas, localización/mapeo/exploración, transporte de objetos y manipulación, coordinación de movimiento, robots reconfigurables y aprendizaje. El campo de la robótica cooperativa tiene sus orígenes a finales de los 80's, cuando varios investigadores comenzaron a trabajar en los sistemas de robots móviles múltiples. Previamente, la investigación se había concentrado en robots simples o sistemas de solución de problemas distribuidos que

no involucraran componentes de robótica. Los tópicos de interés particular en este trabajo de robótica cooperativa incluyen:

- Robots celulares (o reconfigurables).
- Planeación de movimientos de multi-robots.
- Arquitecturas para cooperación de multi-robots.

A partir de esta investigación en robótica móvil cooperativa, el área ha crecido dramáticamente, con una amplia variedad de tópicos abordados. A continuación se detallan los principales tópicos de investigación primarios mencionados.

2.2.1. Inspiraciones biológicas

La robótica móvil cooperativa se convirtió en un tema de investigación y desarrollo después de la introducción de un nuevo paradigma de control basado en el comportamiento [11]. Este paradigma está apoyado en inspiraciones biológicas y muchos investigadores en robótica cooperativa lo han encontrado también instructivo para examinar las características sociales de insectos y animales, para de esta forma aplicar estos hallazgos al diseño de sistemas de multi-robots. La aplicación más común de este paradigma está en el uso de reglas de control locales simples de varias sociedades biológicas, particularmente hormigas, abejas y pájaros, al desarrollo de comportamientos similares en sistemas de robots cooperativos. Este tipo de trabajo ha demostrado la habilidad de grupos de multi-robots para acudir en masa, dispersarse, agregarse, buscar y seguir huellas. Estas áreas de inspiración biológica y su aplicabilidad a grupos multi-robots parecen ser muy bien comprendidas. Los tópicos biológicos de relevancia incluyen el uso de la imitación en animales superiores para aprender nuevos comportamientos, y la interconectividad física demostrada por los insectos tales como hormigas para permitir la navegación colectiva sobre terrenos diferentes.

2.2.2. Comunicación

El tema de comunicación en grupos multi-robots ha sido extensamente estudiado desde el inicio de la investigación de la robótica cooperativa. Se hacen distinciones entre comunicación implícita y explícita, en las cuales la comunicación implícita ocurre como un efecto lateral de otras acciones, mientras que la comunicación explícita es un acto específico diseñado solamente para conducir información a otros robots en el equipo. Varios investigadores han estudiado el efecto de comunicación en el rendimiento de grupos de multi-robots en una variedad de tareas, y han concluido que la comunicación provee ciertos beneficios para tipos particulares de tareas [12].

Adicionalmente, se ha encontrado que, en muchos casos, la comunicación de una pequeña cantidad de información puede tener un gran beneficio [12]. El trabajo más reciente en la comunicación de multi-robots se ha enfocado en lenguajes de representación y su establecimiento en el mundo físico [13]. Adicionalmente, este trabajo se ha extendido a conseguir tolerancia a fallas en comunicación de multi-robots, tales como actualización y mantenimiento de redes de comunicación distribuidas [14] y asegurar la confiabilidad en la comunicación de multi-robots [15]. Aún así, queda mucho trabajo por realizar para lograr que grupos de multi-robots operen confiablemente en ambientes con defectos en la comunicación.

2.2.3. Arquitectura, planeación de tareas y control

Un gran esfuerzo de investigación en robótica cooperativa se ha enfocado en el desarrollo de arquitecturas, capacidades de planeación de tareas y control. Esta área de investigación aborda los temas de selección de acción, delegación de autoridad y control, la estructura de comunicación, heterogeneidad contra homogeneidad de robots, conseguir coherencia entre acciones locales, solución de conflictos y otros temas relacionados. Cada arquitectura que ha sido desarrollada para los grupos de multi-robots provee un tipo específico de capacidad a los equipos de robots distribuidos.

Una pregunta de investigación aún abierta es si las arquitecturas especializadas para cada tipo de equipo de robots y/o dominio de aplicación son necesarias o si una arquitectura más general puede ser desarrollada de tal forma que pueda ser fácilmente hecha a la medida de un rango amplio de sistemas de multi-robots. Relativamente poco trabajo ha sido realizado para unificar estas arquitecturas.

2.2.4. Localización, mapeo y exploración

Un gran trabajo de investigación ha sido realizado en el área de localización, mapeo y exploración para robots autónomos sencillos. Esto ha sido aplicado principalmente a grupos multi-robots y dirigido a ambientes 2D. Adicionalmente, la mayoría de los trabajos toman un algoritmos existentes desarrollados para robots sencillos: con mapeo, localización o explicación y lo extiende a múltiples robots, en lugar de desarrollar un nuevo algoritmo distribuido.

Como en el caso de la utilización de un algoritmo para un robot sencillo en localización, mapeo y exploración, la versión para multi-robots puede describirse usando técnicas basadas en el uso de puntos de referencia [16] y/o grados [17], los cuales usan sensores de rango (tales como sonar o láser) o sensores de visión. Mientras la visión de un robot sencillo es muy bien comprendida, queda mucho por ser estudiado en

la versión de multi-robots. Por ejemplo, una pregunta es la efectividad de grupos de multi-robots sobre versiones de robot sencillos. Este tema ha comenzado a ser estudiado, pero queda mucho por ser determinado por la variedad de enfoques disponibles para localización, mapeo y exploración.

2.2.5. Transporte de objetos y manipulación

La activación de múltiples robots para cargar, empujar o manipular objetos comunes cooperativamente, ha sido una meta antigua de los sistemas de multi-robots. Muchos proyectos de investigación han tratado con esta área; pocos de éstos han sido demostrados en sistemas de robot físicos. Esta área de investigación tiene un número de aplicaciones prácticas que lo hacen de interés particular para la realización de un trabajo de investigación.

Numerosas variaciones en este tema, incluyendo movimientos restringidos y no restringidos, equipo de dos robots contra grupos tipo “enjambre”, mecanismos de agarre dóciles contra no dóciles, ambientes revueltos contra no revueltos, modelos de sistema globales contra distribuidos han sido estudiados, entre otros. Quizá la tarea más abordada involucrando transporte cooperativo es el empuje de objetos por grupos de multi-robots. Esta tarea parece más fácil que la tarea de cargar, en la cual múltiples robots deben sujetar objetos comunes y navegar a un destino en un modo coordinado.

Casi todos los trabajos en esta área involucran mover robots a través de una superficie plana. Un tema que es un reto, es el transporte cooperativo sobre superficies irregulares.

2.2.6. Coordinación de movimiento

Un tópico popular de estudio en grupos de multi-robots es la coordinación de movimiento. Los temas de investigación estudiados incluyen planeación de trayectorias de multi-robots, control de tráfico y generación de formaciones. La mayoría de estos temas son ahora bien comprendidos, aunque la demostración de estas técnicas en grupos de multi-robots físicos (más que en simulación) ha sido limitada.

2.2.7. Robots reconfigurables

Aunque algunas de las investigaciones en robótica cooperativa se enfocaron en conceptos para sistemas distribuidos reconfigurables, relativamente poco trabajo ha continuado en esta área hasta ahora. El trabajo más reciente ha resultado en un número de sistemas de robot físicos que se pueden reconfigurar. Técnicamente estos

sistemas tienen la capacidad de mostrar una gran robustez, versatilidad y autoseparación.

La mayoría de los trabajos involucran módulos idénticos con mecanismos de interconexión que permiten la reconfiguración manual o automática. Estos sistemas pueden tener varias configuraciones de navegación, incluyendo, movimiento de lombriz o víbora y movimiento de araña o hexápodo. Algunos de ellos emplean un arreglo tipo cubo con módulos para conectarse de varias maneras, para formar matrices o latices para funciones específicas.

Estos trabajos de investigación son muy recientes y la mayoría de los sistemas desarrollados no están todavía aptos para ejecutar más allá de simples experimentos de laboratorio. Mientras que el potencial de un gran número de módulos de robots ha sido demostrado en simulación, no es aún común tener desarrollos que involucran más de una docena de módulos físicos. La aplicación práctica de estos sistemas está todavía por ser demostrada, aunque hay avances en esta dirección. Claramente, esta es un área rica para continuar avanzando en ella.

2.2.8. Aprendizaje

Muchos investigadores creen que un enfoque con más potencial para el desarrollo de mecanismos de control cooperativos es el aprendizaje autónomo. Una cantidad considerable de trabajo se ha realizado en el aprendizaje de multiagentes, y un poco menos ha sido realizado en el aprendizaje de multi-robots. Los tipos de aplicaciones que son típicamente estudiadas en esta área varían considerablemente en sus características.

Particularmente, los retos para el aprendizaje de multi-robots son aquellas tareas inherentemente cooperativas, esto es, tareas en las cuales la utilidad de la acción de un robot es dependiente de las acciones actuales de otro de los miembros del grupo. Inherentemente, las tareas cooperativas no pueden ser descompuestas en subtarear independientes que han de ser resueltas por un grupo de robot distribuidos. En su lugar, el éxito del grupo a través de su ejecución es medido por las acciones combinadas de los robots, más que las acciones individuales. Un reto particular del aprendizaje de multi-robots, es debido a la dificultad de asignar crédito a las acciones individuales dentro del conjunto de movimientos del grupo.

Es claro que desde la creación del campo de la robótica móvil autónoma cooperativa, hace menos de dos décadas, se han hecho avances significativos en un número

importante de temas. Este campo es bien comprendido en los aspectos de las aspiraciones biológicas, en el uso de comunicación en grupos de multi-robots y en el diseño de arquitecturas para control de multi-robots. También se ha progresado considerablemente en localización/mapeo/exploración, transporte cooperativo de objetivos y coordinación de movimientos. Recientemente se está comenzando a avanzar en las áreas de reconfiguración de robots y aprendizaje de multi-robots. Naturalmente todas estas áreas no han sido completamente estudiadas, y se han identificado retos de investigación para cada una de ellas en las selecciones anteriores [18].

2.3. Trabajo cooperativo

Los ambientes industriales hoy en día se caracterizan por su hostilidad. Por lo tanto, se espera que en el futuro, los robots que operan en esta condición sean parcial o totalmente autónomos. Esto incluye no sólo efectuar eficientemente una tarea asignada, sino además, que exista una alta tolerancia a fallas y, en el mejor de los casos, que los robots sean capaces de reconfigurarse y cooperar unos con otros [19].

En un sentido amplio, la robótica colaborativa trata del problema en que varios robots interactúan y colaboran entre sí para llevar a cabo una tarea en común.

Se pueden mencionar distintas formas de encontrar la robótica colaborativa y de entre éstas podemos mencionar:

- Robots móviles que colaboran para realizar una tarea,
- Robos manipuladores que se coordinan,
- Esquemas competitivos como el de persecución-evasión,
- Colaboración entre robots y personas.

2.4. Tipos de control utilizados en robots cooperativos

Una clasificación inicial es la de los sistemas de robots cooperativos en función del tipo de control.

2.4.1. Control centralizado

Como su nombre lo indica, existe una unidad central de la cual dependen varios robots. Dicha unidad se encarga de recibir los datos recogidos por los robots a través de sus sensores y con todo este conjunto de información la unidad central se encarga de tomar las decisiones que son nuevamente enviadas a los robots quienes acatan las órdenes y realizan la acción. La gran ventaja de este tipo de control es que al necesitar de sólo una unidad central, esta puede almacenar una gran cantidad de datos lo que resulta en una mayor eficiencia a la hora de tomar decisiones. Sin embargo, una de sus desventajas es que debido a esta misma capacidad de adquirir grandes cantidades de datos, se puede congestionar el sistema y consecuentemente volverlo lento. Otra desventaja es que si la unidad central falla, el sistema completo dejará de funcionar ya que se pierde la comunicación de envío y recepción de datos y por ende la capacidad de tomar decisiones.

2.4.2. Control distribuido

En este tipo de control cada robot tiene poder de decisión sobre lo que realiza, es decir, no recibe orden alguna de otro robot o unidad central. Captura información del medio y de otros robots con los que interactúa y con esta información genera sus propias decisiones. Este sistema es muy dinámico y rápido debido a que no se necesita el almacenamiento de información. Por otra parte es más robusto y tolerante a fallas ya que si deja de funcionar algún robot, los demás pueden continuar de manera independiente. La principal desventaja de este tipo de control es el diseño de algoritmos complejos para la coordinación entre los robots.

2.5. Tipos de sistemas colaborativos

Se puede hacer una segunda clasificación de los robots colaborativos en función del nivel de comunicación e interacción de los distintos robots que conforman el sistema.

2.5.1. Sistemas altamente acoplados

Estos se definen como sistemas donde cada robot tiene un nivel de inteligencia propio y que además poseen la capacidad de comunicarse entre sí; por lo tanto, son capaces de cooperar y coordinar tareas mutuas. Para esto es esencial que cada robot tenga la capacidad de transferir información hacia un compañero o tener la suficiente capacidad como para pedir ayuda y coordinar tareas conjuntas con los demás individuos. Un ejemplo de lo anterior podría ser el movimiento de una caja entre varios

robots, donde cada robot debe coordinar su velocidad y por ello este sistema puede no ser lo suficientemente robusto, ya que la falla de un robot provocaría la falla total del sistema.

2.5.2. Sistemas pobremente acoplados

Estos son sistemas donde cada individuo funciona de manera independiente del resto de los robots, es decir, no necesitan conocer la posición, la velocidad, o las decisiones que estos hayan tomado. Para su funcionamiento sólo siguen una serie de reglas que permiten que logren su objetivo. Estos sistemas tratan de imitar sistemas biológicos por ejemplo como el de las hormigas, en los que su función es buscar alimento y trasladarlo al hormiguero, y cada hormiga tendrá que ir en busca del alimento y una vez encontrado llevarlo a destino. Para esta tarea no es necesario que se comuniquen entre sí.

2.6. Ventajas de los sistemas colaborativos

Una gran ventaja es que las acciones tomadas por los robots son mucho más rápidas que al tener un sólo robot, ya que este tendría que procesar toda la información y realizar las tareas necesarias para lograr el objetivo, mientras que con la cooperación las tareas se dividen y el trabajo se hace más rápido y de forma eficiente.

La tolerancia a fallos o redundancia, antes mencionada, es un aspecto destacable ya que una falla de uno de los robots puede ser subsanada por otro robot lográndose de igual forma el objetivo en común.

2.7. Desventajas de los sistemas colaborativos

Existen muchos problemas a solucionar, dentro de los cuales podemos mencionar el problema de interferencia entre robots, esto puede suceder si el sistema de control está mal diseñado o la programación es deficiente, es probable que existan interferencias que podrían generar choques entre robots y caos.

La comunicación entre robots o entre los robots y el sistema centralizado, debe ser fluida y rápida, es decir, se debe de contar con sistemas de comunicación rápidos y confiables.

Si el sistema contempla una misión específica para cada robot, el que uno de ellos deje de hacer su trabajo o falle, hace que la eficacia del sistema disminuya o se pierda [3].

2.8. Control de Robots Manipuladores

El control de robots manipuladores es una de las materias más complejas, tanto en ámbitos académicos como de aplicación práctica en la industria. De acuerdo con varios estudios, los métodos de control industriales convencionales han demostrado ser muy efectivos en sistemas que pueden ser modelados en forma precisa, mediante ecuaciones matemáticas. Sin embargo, lo anterior presenta variados problemas en situaciones en que el modelado es vago, demasiado complejo o cuando existen factores tales como: inercia, momentos, fricción, amortiguamientos, retardos de tiempo, oscilaciones, no linealidades, etc..

El control de robots es una de las aplicaciones industriales típicas en la que estas situaciones están presentes, por lo tanto, exige estrategias de control más flexibles.

2.8.1. Control PID

La mayoría de los robots empleados en operaciones industriales son controlados por algoritmos PIDs lineales que actúan independientemente en cada eslabón del manipulador [1]. Mientras la práctica industrial da fe de la efectividad del control PID lineal, para sistemas no lineales complejos tales como los robots, algunas investigaciones concluyen que este no es adecuado para enfrentarse a severas no linealidades, ya que, el diseño de la estrategia de control se basa tan sólo en la linealización del sistema.

En esencia, el PID lineal es un controlador retroalimentado cuyo propósito es hacer que el error en estado estacionario, entre la señal de referencia y la señal de salida de la planta, tienda a cero de manera asintótica en el tiempo [20]. Consiste en aplicar, sobre el error entre la salida del sistema bajo control, una compensación proporcional (P), una integral (I) y una derivativa (D) [17]. Estas tres compensaciones son moduladas por su respectiva ganancia, las cuales constituyen los parámetros K_p , T_i y T_d respectivamente del controlador. La ecuación (2.1) define su comportamiento.

$$u(t) = K_p(e(t)) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_d \frac{d}{dt}(e(t)). \quad (2.1)$$

Las constantes K_p , T_i y T_d corresponden a las ganancias proporcional, integral y derivativa, correspondientemente, y $e(t)$, a la señal de error.

El controlador PID está diseñado para generar un torque correctivo en cada eslabón del manipulador frente a un torque perturbador en la carga. Intuitivamente se deduce que el par correctivo debe tener sentido contrario al de la carga.

Cada una de las componentes (proporcional, integral y derivativa) del controlador PID tiene su propia razón de ser. La primera es la encargada de producir un torque correctivo proporcional al valor del error, la segunda reduce el error en estado estacionario u *offset* y la última realiza una corrección predictiva en el estado transitorio [20].

Gracias a la acción proporcional, se logra que en un instante dado el error sea cero, pero, por efecto de la inercia, su acción individual produce un torque que sobrepasa el deseado. Este sobre impulso, como se suele denominar, provoca que el error cambie de signo, y por consecuencia, se genera un torque en el sentido contrario. Este mismo fenómeno, ocurre varias veces produciendo oscilaciones que, eventualmente, podrían desestabilizar al sistema [1].

Para prevenir lo anterior, entra en acción la componente derivativa. En los tramos en que el error es decreciente su derivada alcanza el máximo en el punto de inflexión de este. Se puede comprobar que la suma del error y su derivada cambian de signo antes de que lo haga el error por si solo, por lo tanto, el torque aplicado se invierte antes, reduciendo así su inercia y, a su vez, su sobre impulso [1].

Una vez que el sistema se ha estabilizado, el error tiende a cero, pero la acción integral del controlador ha acumulado todos los valores que ha tomado el error en su proceso transitorio y lo mantiene durante el estado estacionario. Esto permite que el torque aplicado se mantenga en el valor necesario para contrarrestar el de la carga [1].

Es común encontrar proyectos publicados en los que se emplean variaciones del control PID tales como el P, en el que sólo la constante K_p es distinta de cero; el PI, en el cual T_d es igual a cero; y PD, cuyo T_i tiende al infinito.

Como ya se ha mencionado hasta el momento, el controlador PID lineal funciona bajo condiciones de linealidad. La mayoría de los procesos industriales necesitan ser linealizados en torno a un punto de operación para que esta técnica de control pueda ser aplicada. Esto, además, implica que el controlador debe ser sintonizado apropiadamente de acuerdo a este punto, es decir, las ganancias deben ser ajustadas para que el control se lleve a cabo en forma óptima.

Sin embargo, ya se ha recalado que tratándose de controlar un manipulador, la dinámica es muy variable, por lo tanto, este punto de operación está siempre sometido a cambios. Varios autores han resuelto esta dificultad recurriendo a sistemas PID

autosintonizados mediante algoritmos basados en lógica difusa [21] y redes neuronales. Estos métodos pretenden que el PID sea capaz de autoajustar sus ganancias de acuerdo al punto de operación actual. Este tipo de control es conocido como control adaptable.

2.8.2. Método de control adaptivo

Idealmente, el fin último de la tecnología robótica es lograr un comportamiento complejo y adaptivo, el cual se da naturalmente en los seres humanos. Éstos poseen una sofisticada motricidad mediante la hábil y eficiente coordinación de múltiples grados de libertad. La tecnología actual aún sufre dificultades para emular estos comportamientos. Por tanto, los dos grandes desafíos en esta materia son: lograr una forma eficiente y autónoma de controlar actuadores redundantes, y desarrollar un mecanismo de control adaptivo para permitir que el sistema motor interactúe y se ajuste al medio [22].

Así surge el control adaptivo, como una necesidad de complementar los métodos clásicos de control, y así desarrollar controladores más robustos de manera que su desempeño no sea sensible tanto a errores de modelado como a perturbaciones. Esta técnica consiste en actualizar continuamente los valores de los parámetros de control para ajustarse a las variaciones los valores de los parámetros del sistema que está siendo controlado [1].

Así que los manipuladores robotizados son sistemas complejos y difíciles de controlar, ya que éstos tienen una dinámica altamente no lineal, variante en el tiempo. Además, siempre existe una incertidumbre en el modelo del sistema, lo que, eventualmente, provoca inestabilidades.

Entre los métodos adaptivos para este propósito, el control basado en el modelo es el usado más ampliamente, ya que es relativamente simple de usar. Este concepto se refiere a seleccionar un modelo de referencia apropiado y un algoritmo de adaptación tal que permita modificar las ganancias de realimentación a los actuadores del sistema.

Sin embargo, en el momento del diseño, se requiere tener conciencia absoluta de la aplicación en que se trabaja, ya que los métodos de control adaptivos requieren ser aplicados en situaciones específicas, ya que suponen que los parámetros del sistema bajo control no cambian tan rápidamente en comparación con las constantes de tiempo del sistema [1].

2.8.3. Control adaptivo mediante programación de ganancias (*Gain Scheduling*)

La programación de ganancias es un método de control adaptivo el cual consiste en desarrollar un criterio de sintonización de un PID con base a variables externas. De modo que estas variables deberían ser tales que permitan definir las condiciones dinámicas del sistema, es decir, que influyan en su función de transferencia, y así, generar una ley de adaptación de las ganancias del controlador según éstas. La modificación de los parámetros del algoritmo de control en función de la variación de estas variables es un proceso en lazo abierto [23].

La Figura 2.1 ilustra que el concepto estructural de la programación de ganancias, donde las variables externas que influyen en la dinámica del proceso controlado, son medidas y asociadas a un algoritmo de ajuste de los parámetros del controlador de realimentación.

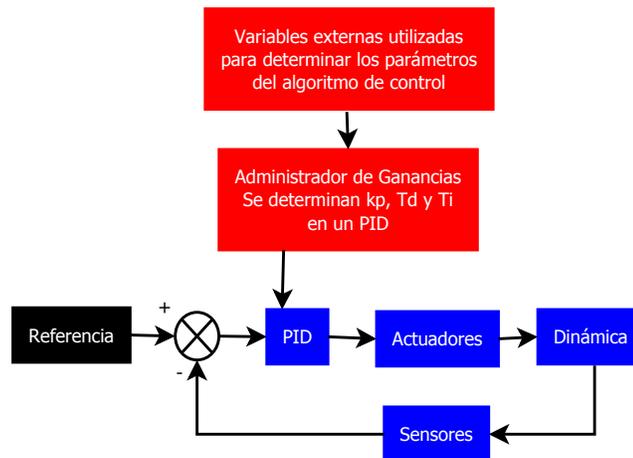


Figura 2.1: Diagrama estructural de la adaptación mediante programación de ganancias.

La utilidad de la técnica de programación de ganancias es que puede emplearse como complemento de otras técnicas de control. El aporte de la programación de ganancias, en este caso, es que hace que el tiempo que se demora en adaptarse el algoritmo es irrelevante.

Habitualmente, el método de programación de ganancias hace uso de herramientas de inteligencia artificial para adaptar las ganancias de los controladores.

2.8.4. Control mediante visión artificial

Actualmente, el desempeño de los robots industriales depende, en un elevado porcentaje, del previo conocimiento del espacio de trabajo y de la localización de los objetos a manipular. Esta limitación es debida a que los robots industriales comerciales no integran sistemas sensoriales, que les permitan adaptarse a su entorno [24].

La información visual es sin duda una de las herramientas más simples, y por tanto, que más se utiliza actualmente para analizar entornos desconocidos. El control basado en visión de sistemas robotizados ha despertado mucho interés desde hace varios años, debido a la reducción de costos de las cámaras de visión y de todo el sistema de procesamiento asociado [25].

Ya en 1973 se hace referencia al control visual de un manipulador describiendo cómo se puede utilizar la retroalimentación visual (*visual feedback*) para corregir la posición de un robot, incrementando con ello la exactitud en tareas de ensamblado. A finales de los 70's se realizaron algunas aplicaciones en las cuales se utiliza retroalimentación visual para la inserción de tornillos y recoger piezas de una cinta transportadora [24].

En la actualidad se disponen de robots comerciales con controladores donde se integra la información proveniente de un sistema de visión formando una arquitectura en lazo abierto denominada mirar-mover (*look and move*) [24]. Este sistema dinámico es aquel donde la arquitectura de control es jerárquica y se usa el sistema de visión para proveer las entradas de referencia al controlador de las articulaciones que utiliza la retroalimentación de las variables articulares de posición y velocidad para controlar internamente el manipulador. Es decir, las operaciones son ejecutadas en forma secuencial; primero se obtiene la imagen y luego se accionan los actuadores. En estos esquemas el lazo de control de posición protagoniza la dinámica total del sistema [25].

En 1979 cuando se introdujo el concepto de controlar la posición de un robot en lazo cerrado mediante información visual, apareciendo por primera vez el tér-

mino servocontrol visual (*visual servoing*) [24]. Los sistemas visual servoing eliminan completamente el controlador de las articulaciones del robot reemplazándolo con un controlador servo visual que directamente calcula los valores de las coordenadas articulares usando solamente la información visual.

Por último, los sistemas se pueden clasificar de acuerdo a la posición que ocupe el sensor de visión en: “sistemas con cámara fija”, o “sistemas *hand-eye*”.

El objetivo de control de un sistema visual de seguimiento con *hand-eye* es controlar el movimiento de la cámara, y por lo tanto del robot, para colocar las coordenadas de las características del plano de la imagen en algún valor deseado, independientemente del movimiento del objeto. Se han propuesto numerosos controladores servovisuales basados en distintas teorías, como la de Lyapunov.

Recientemente se han desarrollado controladores basados en las propiedades de pasividad del sistema del robot y la visión [25][6].

2.9. Conclusiones

En este capítulo se analizaron los conceptos relacionados a la robótica cooperativa de robots manipuladores, móviles, entre otros. Se describen los ambientes en los cuales la lógica colectiva es necesaria, además de las ventajas que se tienen al usar un sistema multi-robot, pues entre más complejas son las tareas a realizar por parte de los robots, el uso de un sistema de control estable rige el buen comportamiento de todo el conjunto de robots requeridos para la tarea.

Así mismo, se mencionaron los temas referidos al control dinámico que se emplean para dar movimiento a los actuadores en la vida real, dando así un antecedente conceptual para establecer el por qué se eligió alguna de esas técnicas de control en este trabajo de investigación.

En el siguiente capítulo se mencionarán los aspectos fundamentales del presente documento de investigación, las cinemática posicional (directa e inversa) con la cual se desarrollará todo el ambiente de simulación.

Capítulo 3

Simulación y análisis

3.1. Introducción

En este capítulo se describen los modelos empleados en el trabajo de investigación, sus características cinemáticas que modelan el comportamiento articulado de cada manipulador. Se emplean técnicas geométricas y matriciales que relacionan a la base y el efector final para lograr una cadena cinemática cerrada, esto con el fin de poder ubicar el manipulador en un espacio de coordenadas X, Y, Z.

También se mencionan las características del software empleado y las características del ordenador utilizado, así mismo se visualizan los diferentes paneles del instrumento virtual con el cual se sigue la lógica de control centralizado para la coordinación de los movimientos previamente planeados.

3.2. Diseños CAD empleados

En el ambiente de los robots industriales existen muchas configuraciones y morfologías de acuerdo al tipo de articulaciones que los conforma. Para este caso de estudio se implementaron 3 robots con articulaciones de tipo rotacional, que en total sumarán 6 grados de libertad cada uno.

1) Un robot Kawasaki como se muestra en la Figura 3.1 con 6 articulaciones rotacionales.

2) Se implementó un segundo manipulador como el mostrado en la Figura 3.2 del mismo tipo que el anterior (Figura 3.1), teniendo como diferencia un efector terminal distinto que será el responsable de realizar una tarea predeterminada.

3) Un tercer robot como el mostrado en la Figura 3.3 con un efector final encargado de soldar piezas.

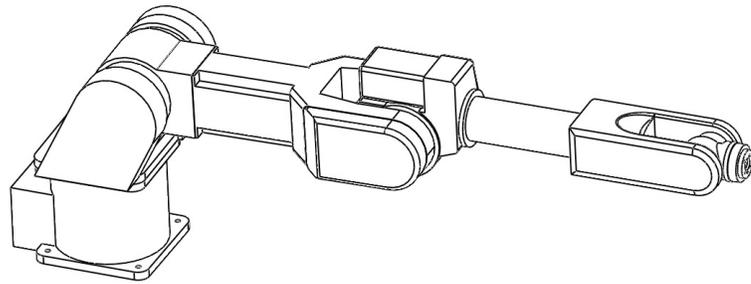


Figura 3.1: Robot de 6 grados de libertad del tipo rotacional - Kawasaki FS10E

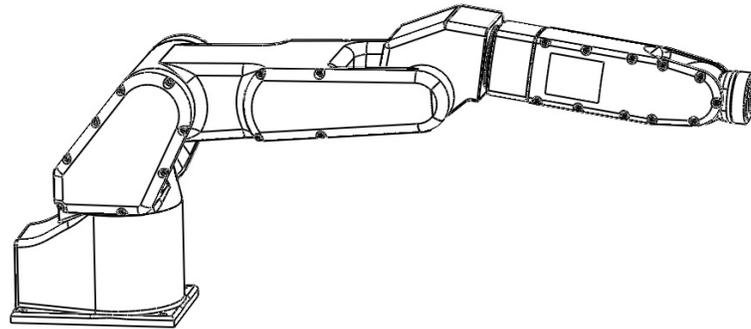


Figura 3.2: Robot de 6 grados de libertad del tipo rotacional - FANUC 50iC/5L

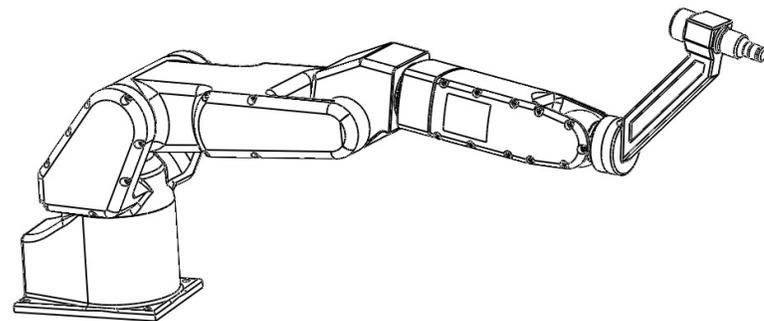


Figura 3.3: Robot de 6 grados de libertad del tipo rotacional - FANUC 50iC/5L

3.3. Cinemática de los manipuladores

La cinemática de un manipulador estudia su movimiento sin considerar las fuerzas que lo producen y tiene en cuenta las propiedades geométricas y temporales del movimiento. Para la realización de la cinemática de los manipuladores empelados, se consideran los siguientes conceptos:

Articulación: Conexión de dos cuerpos rígidos caracterizados por el movimiento de un sólido sobre otro. Las articulaciones pueden ser de dos tipos:

- *Lineal o prismático:* articulación en la que el eslabón se apoya en un deslizador lineal. Actúa linealmente mediante los tornillos sinfín de los motores, o los cilindros.
- *Rotacional:* articulación giratoria a menudo manejada por los motores eléctricos y las transmisiones, o por los cilindros hidráulicos y palancas.

Eslabón: Cuerpo rígido que une dos ejes articulares adyacentes del manipulador.

Existen dos tipos de cinemática, los cuales se describen a continuación:

Cinemática Directa: Estudia la posición, velocidad, aceleración, y todas las derivadas de grado mayor de las variables de posición, con respecto al tiempo o cualquier otra variable.

Cinemática Inversa: Su estudio abroda un problema fundamental en el uso práctico de los manipuladores, que contempla el cálculo de todas las posibles combinaciones de ángulos de articulación que podrían ser usadas para lograr una determinada posición y orientación del efector terminal del manipulador.

3.4. Asignación de ejes a articulaciones

Para definir la ubicación de las articulaciones se definen los eslabones que se ven involucrados en el movimiento de dicha articulación, como se observa en la Figura 3.4, Figura 3.5 y la Figura 3.6 respectivamente del robot utilizado (en el cual se puede observar que sólo hay articulaciones rotacionales).

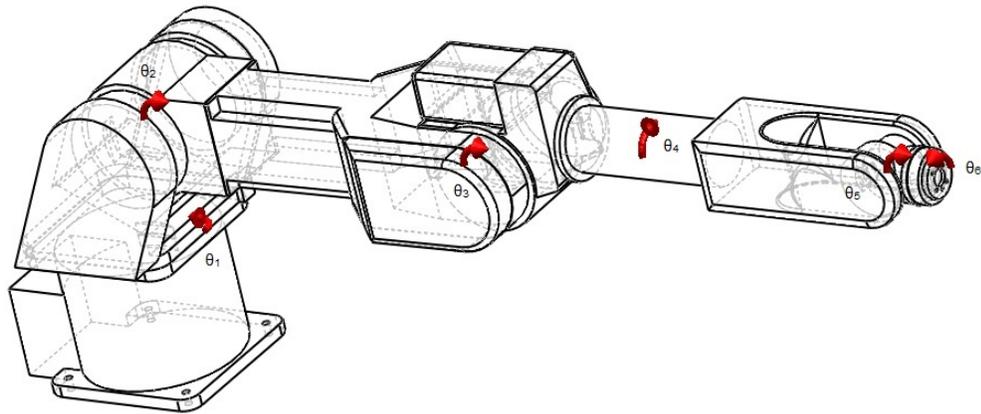


Figura 3.4: Asignación de articulaciones - Kawasaki FS10E

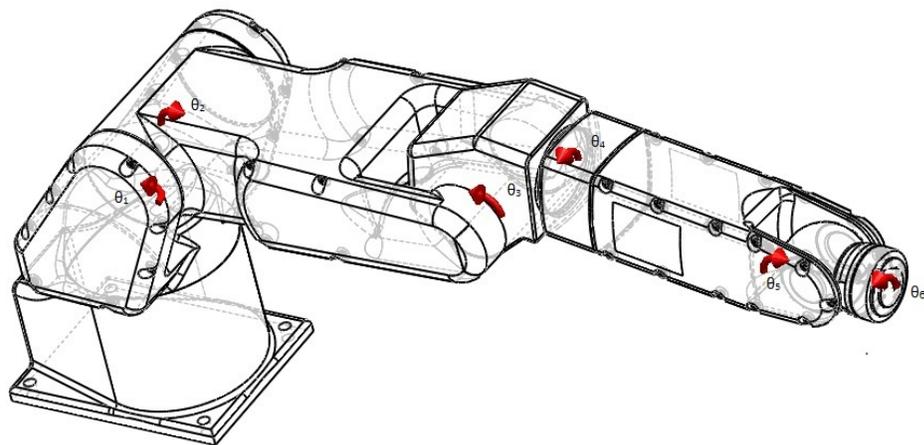


Figura 3.5: Asignación de articulaciones - FANUC 50iC

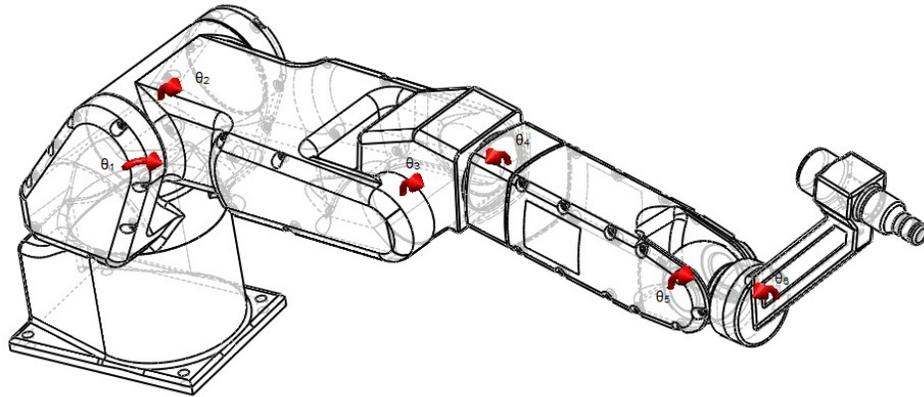


Figura 3.6: Asignación de articulaciones- FANUC 50iC/5L

3.5. Asignación de ejes a cada articulación

Para tener en cuenta el movimiento de los eslabones del manipulador a través de las diferentes articulaciones es necesario contar con ejes que nos permitan denotar de movimiento a dichas articulaciones, logrando así orientar y posicionar al robot (Figura 3.7).

Representación Denavit-Hartenberg: este tipo de notación es un método sistemático para describir la relación cinemática entre un par de eslabones adyacentes, que forman parte de una cadena cinemática abierta. Este método está basado en la representación de la posición y orientación de un cuerpo rígido, a través de una matriz de 4×4 ; en la cual se usa un mínimo número de parámetros para describir completamente la relación cinemática.

Definidos los ejes y la referencia al origen del manipulador en cuestión, se procedió a conformar la matriz de transformación homogénea con base al algoritmo de Denavit-Hartenberg por medio de la Ecuación 3.1. Lo anterior da origen a la Tabla 3.1, que contiene los parámetros de articulación.

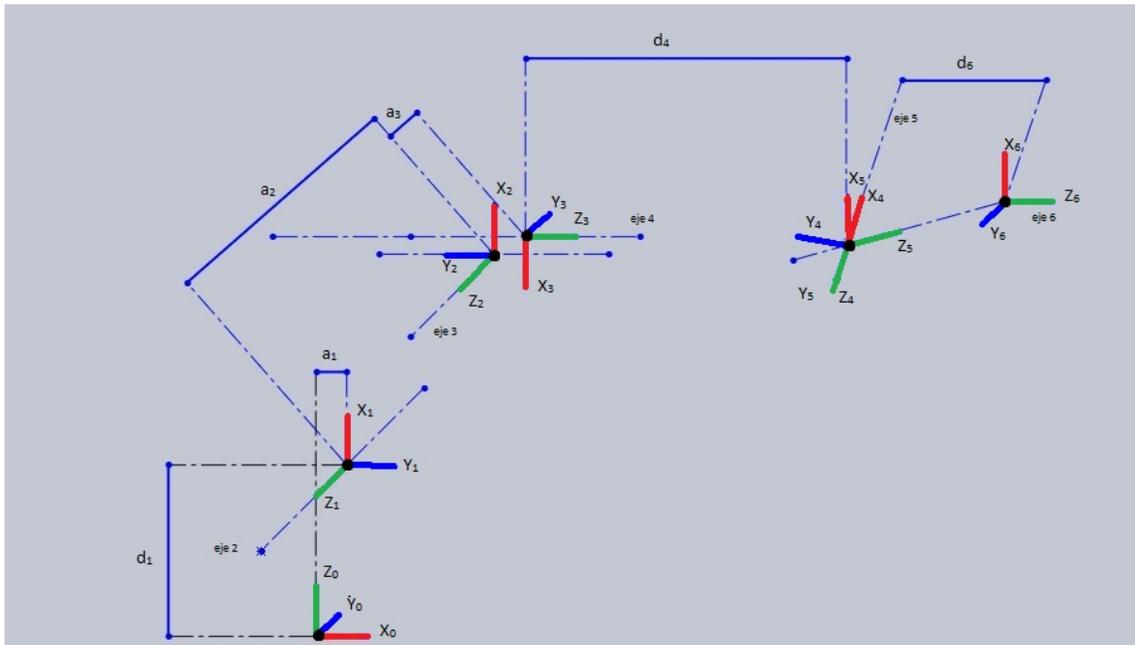


Figura 3.7: Asignación de ejes a las diferentes articulaciones. Aplica para los 3 manipuladores

La ubicación relativa de los dos sistemas de coordenadas puede ser completamente determinada por los siguientes cuatro parámetros (Observados en la Figura 3.8):

- θ_i : Es el ángulo comprendido entre los ejes X_{i-1} y X_i , medido en torno al eje Z_{i-1} , en el sentido de la regla de la mano derecha.
- d_i : Es la distancia comprendida entre el origen O_{i-1} y el punto H_i .
- a_i : Es la longitud de la normal común H_iO_i .
- α_i :Es el ángulo comprendido entre los ejes Z_{i-1} y Z_i , medido en torno al eje X_i , en sentido de la regla de la mano derecha.

3.6. Cinemática directa

Mediante un *software* de cálculos matemáticos se aproximan los valores de las coordenadas en las cuales se ubicará al efector final. Posteriormente mediante métodos geométricos se establece la relación directa entre las dos aproximaciones para dar movimiento al manipulador (Posición y Orientación).

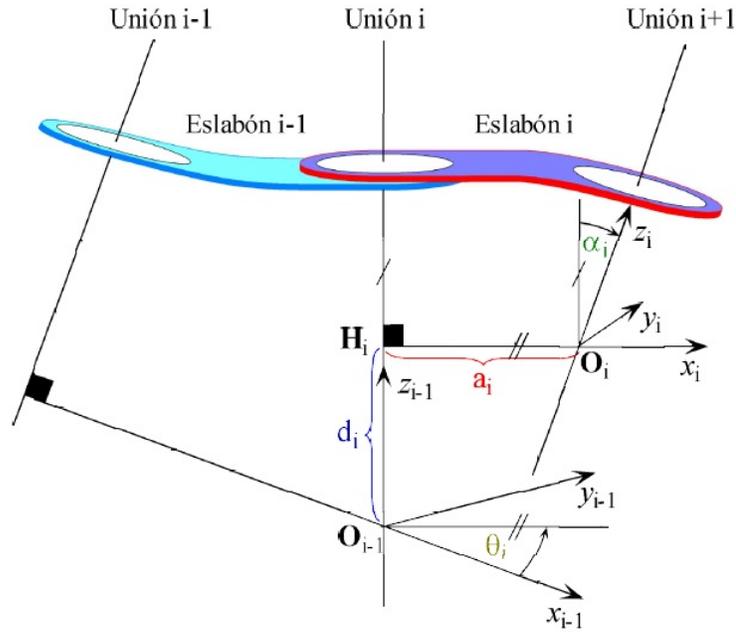


Figura 3.8: Parámetros de Denavit-Hartenberg

$$[{}^{i-1}A_i] = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3.1)$$

i	θ_i	d_i	a_i	α_i
1	* θ_1	d_1	a_1	90
2	* θ_2	0	a_2	0
3	* θ_3	0	a_3	-90
4	* θ_4	0	d_4	-90
5	* θ_5	0	0	90
6	* θ_6	0	d_6	0

Tabla 3.1: Parámetros; * Articulación Variable

$$[{}^0A_1] = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & 0 & \sin \theta_1 & a_1 \cos \theta_1 \\ \sin \theta_1 & 0 & -\cos \theta_1 & a_1 \sin \theta_1 \\ 0 & 1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3.2)$$

$$[{}^1A_2] = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & a_2 \cos \theta_2 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & a_2 \sin \theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3.3)$$

$$[{}^2A_3] = \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & 0 & -\sin \theta_3 & a_3 \cos \theta_3 \\ \sin \theta_3 & 0 & \cos \theta_3 & a_3 \sin \theta_3 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3.4)$$

$$[{}^3A_4] = \begin{bmatrix} \cos \theta_4 & 0 & -\sin \theta_4 & d_4 \cos \theta_4 \\ \sin \theta_4 & 0 & \cos \theta_4 & d_4 \sin \theta_4 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3.5)$$

$$[{}^4A_5] = \begin{bmatrix} \cos \theta_5 & 0 & \sin \theta_5 & 0 \\ \sin \theta_5 & 0 & -\cos \theta_5 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3.6)$$

$$[{}^5A_6] = \begin{bmatrix} \cos \theta_6 & -\sin \theta_6 & 0 & d_6 \cos \theta_6 \\ \sin \theta_6 & \cos \theta_6 & 0 & d_6 \sin \theta_6 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3.7)$$

$${}^0A_6 = {}^0A_1 + {}^1A_2 + {}^2A_3 + {}^3A_4 + {}^4A_5 + {}^5A_6, \quad (3.8)$$

$$X = \cos \theta_1 [a_1 + a_2 \cos \theta_2 + (a_3 + d_4) \cos(\theta_2 + \theta_3) + d_6 \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_5)], \quad (3.9)$$

$$Y = \sin \theta_1 [a_1 + a_2 \cos \theta_2 + (a_3 + d_4) \cos(\theta_2 + \theta_3) + d_6 \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_5)], \quad (3.10)$$

$$Z = d_1 + a_2 \sin \theta_2 + (a_3 + d_4) \sin(\theta_2 + \theta_3) + d_6 \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_5). \quad (3.11)$$

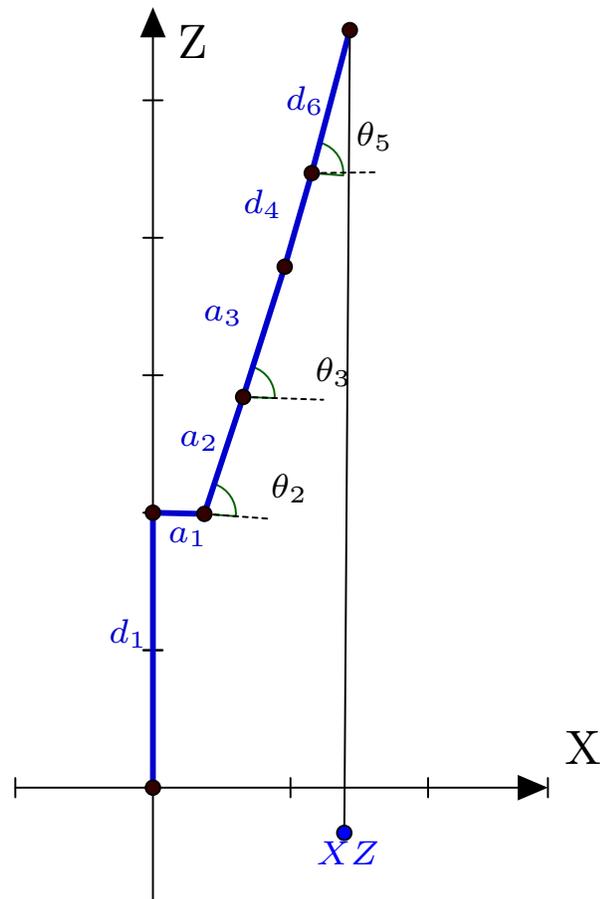


Figura 3.9: Modelo geométrico de los manipuladores

Demostración mediante método geométrico.

$$Z = d_1 + a_2 \sin \theta_2 + (a_3 + d_4) \sin(\theta_2 + \theta_3) + d_6 \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_5),$$

$$XZ = a_1 + a_2 \cos \theta_2 + (a_3 + d_4) \cos(\theta_2 + \theta_3) + d_6 \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_5). \quad (3.12)$$

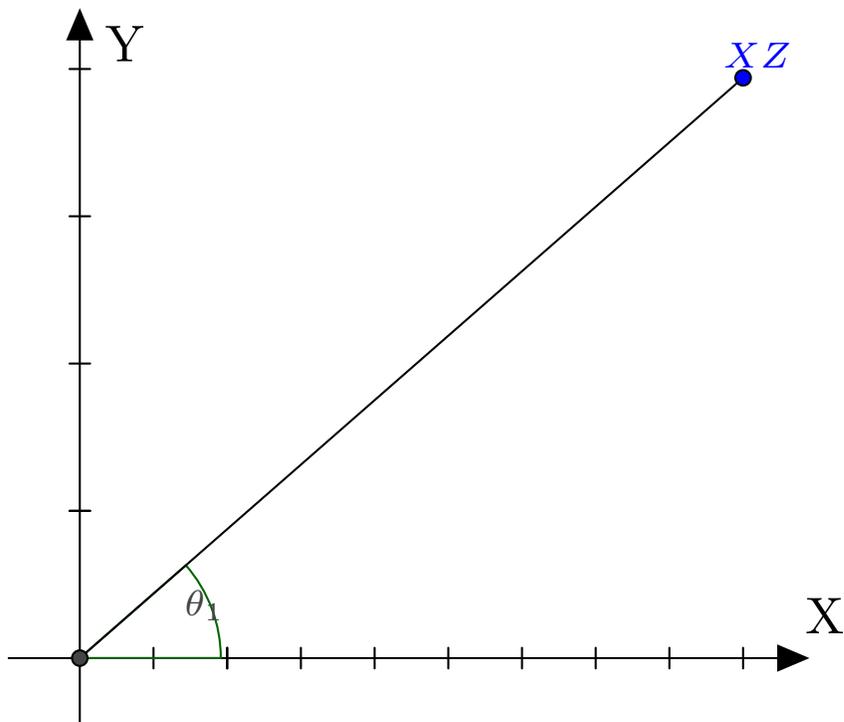


Figura 3.10: Resultante debido a coordenadas XZ

$$X = XZ \cos \theta_1, \quad (3.13)$$

$$Y = XZ \sin \theta_1, \quad (3.14)$$

Sustituyendo la ecuación (3.12) en (3.13) y en (3.14), se tiene:

$$X = \cos \theta_1 [a_1 + a_2 \cos \theta_2 + (a_3 + d_4) \cos(\theta_2 + \theta_3) + d_6 \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_5)],$$

$$Y = \sin \theta_1 [a_1 + a_2 \cos \theta_2 + (a_3 + d_4) \cos(\theta_2 + \theta_3) + d_6 \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_5)].$$

3.7. Cinemática inversa

Para posicionar el efector final de cada uno de los manipuladores empleados, se hace uso de la cinemática inversa para así, poder evaluar la posición deseada y obtener los valores de los ángulos involucrados para lograrlo.

Empleando la Figura 3.11 se obtiene:

$$\theta_1 = \arctan \frac{y}{x}. \quad (3.15)$$

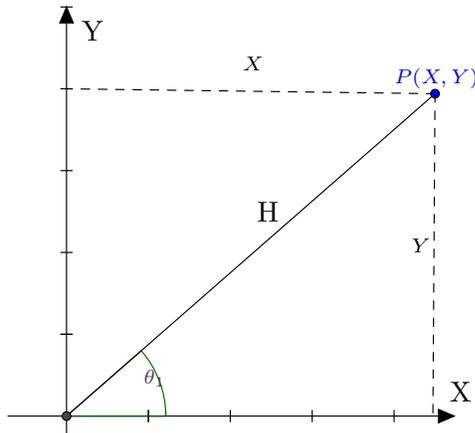


Figura 3.11: Resultante debido a las coordenadas $P(X, Y)$

Mediante el uso de la Figura 3.9 se obtienen los valores de θ_2 y θ_3 con la condición de que el ángulo θ_5 se utiliza sólo para acercar y alejar el efector final a la posición deseada, esto es, dejando el ángulo θ_5 fuera, como se muestra en la Figura 3.12.

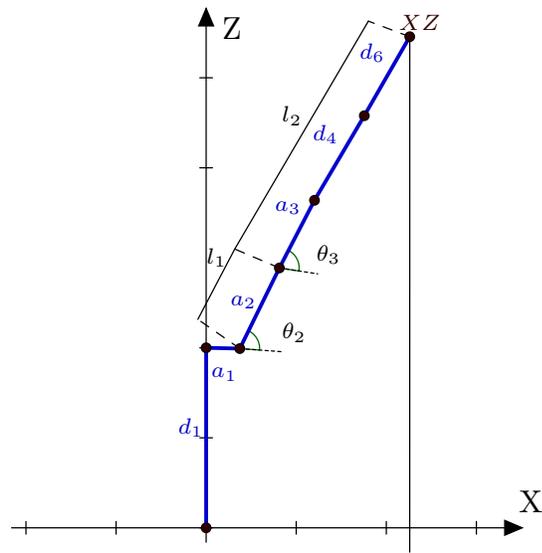


Figura 3.12: Asignación de parámetros para obtención de cinemática inversa

Se consideran las dos posiciones del codo para lograr la posición deseada en el efector final, como se indica en la Figura 3.13 y la Figura 3.14.

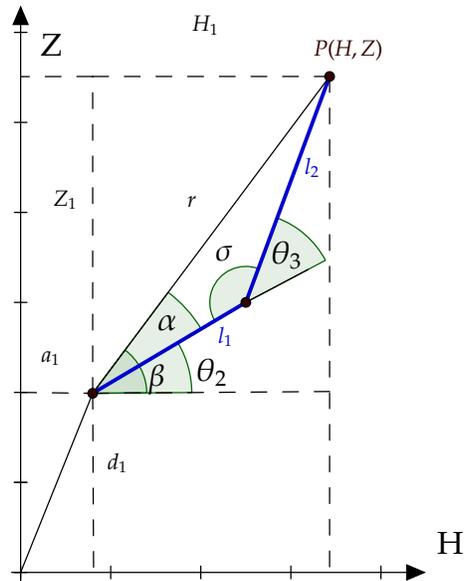


Figura 3.13: Codo abajo del manipulador

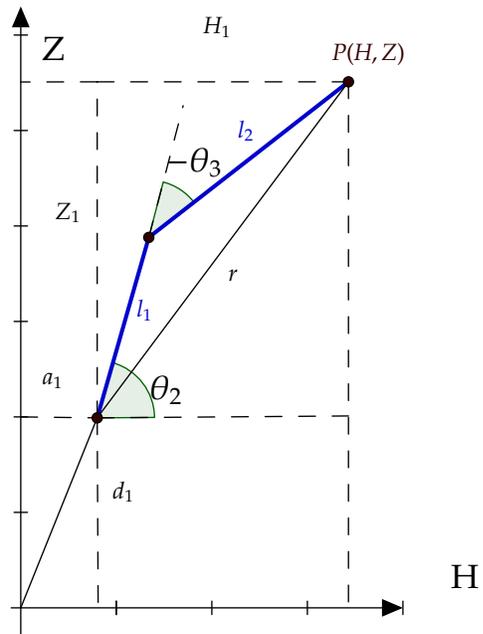


Figura 3.14: Codo arriba del manipulador

De la Figura 3.11 y la Figura 3.13 se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$\sigma = 180 - \theta_3, \quad (3.16)$$

$$Z_1 = Z - d_1, \quad (3.17)$$

$$H_1 = H - a_1, \quad (3.18)$$

$$r = \sqrt{Z_1^2 + H_1^2}, \quad (3.19)$$

$$l_1 = a_2, \quad (3.20)$$

$$l_2 = a_3 + d_4 + d_6. \quad (3.21)$$

Mediante la ley de cosenos se obtiene:

$$\begin{aligned} c^2 &= a^2 + b^2 - 2ab \cos \sigma, \\ r^2 &= l_1^2 + l_2^2 - 2l_1l_2 \cos(180 - \theta_3), \\ r^2 - (l_1^2 + l_2^2) &= -2l_1l_2 \cos(180 - \theta_3), \\ \frac{r^2 - (l_1^2 + l_2^2)}{-2l_1l_2} &= \cos(180 - \theta_3), \\ \frac{-(-r^2 + (l_1^2 + l_2^2))}{-(2l_1l_2)} &= \cos(180 - \theta_3), \\ \cos(180 - \theta_3) &= \frac{l_1^2 + l_2^2 - r^2}{2l_1l_2}, \\ \cos(180 + \theta_3) &= \frac{l_1^2 + l_2^2 - r^2}{2l_1l_2}. \end{aligned} \quad (3.22)$$

Aplicando la identidad de la Ecuación (3.23) a la Ecuación (3.22) se obtiene:

$$\cos(\alpha \pm \beta) \cos \alpha \cos \beta \pm \sin \alpha \sin \beta, \quad (3.23)$$

$$\begin{aligned} \cos 180 \cos \theta_3 - \sin 180 \sin \theta_3 &= \frac{l_1^2 + l_2^2 - r^2}{2l_1l_2}, \\ -\cos \theta_3 &= \frac{l_1^2 + l_2^2 - r^2}{2l_1l_2}, \\ \cos \theta_3 &= \frac{r^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1l_2}, \end{aligned}$$

$$\cos \theta_3 = \frac{r^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1l_2} = C. \quad (3.24)$$

Sin embargo se puede encontrar θ_3 notando que $\cos \theta_3$ está dado por la identidad de la Ecuación (3.24), por lo que $\sin \theta_3$ queda:

$$\sin \theta_3 = \pm\sqrt{1 - C^2}. \quad (3.25)$$

De aquí que θ_3 se obtiene de:

$$\theta_3 = \tan\left(\frac{\sin \theta_3}{\cos \theta_3}\right), \quad (3.26)$$

$$\theta_3 = \tan\left(\frac{\pm\sqrt{1 - C^2}}{C}\right).$$

A partir del valor de θ_3 , el ángulo θ_2 obtendrá un valor en específico, dado por:

$$\theta_2 = \beta - \alpha, \quad (3.27)$$

$$\beta = \arctan\left(\frac{Z_1}{H_1}\right). \quad (3.28)$$

Por tanto:

$$\theta_2 = \arctan\left(\frac{Z_1}{H_1}\right) - \arctan\left(\frac{l_2 \sin \theta_3}{l_1 + l_2 \cos \theta_3}\right). \quad (3.29)$$

3.8. Características en simulación

Una vez conocidos los valores de los ángulos mediante la relación a la posición deseada conforme al uso de coordenadas geométricas, se establecen los casos en los cuales debe comportarse el ángulo θ_1 , pues es generado a partir de una función trigonométrica con asíntotas para ciertas posiciones en X y valores nulos para Y. Dichas restricciones se establecen en el análisis matemático mediante la siguiente estructura condicional:

```

1
2   if (X1>=0)&&(Y1==0)
3   FT1=0;
4       elseif (X1==0)&&(Y1>0)
5       FT1=90;
6           elseif (X1<0)&&(Y1==0)
7           FT1=180;
8               elseif (X1==0)&&(Y1<0)
9               FT1=270;
10      else
11      FTT1=atand (Y1/X1) ;
12  end
13
14  if (X1>0)&&(Y1>0)
15  FT1=FTT1;
16      elseif (X1<0)&&(Y1>0)
17      FT1=180+FTT1;
18          elseif (X1<0)&&(Y1<0)
19          FT1=180+FTT1;
20              elseif (X1>0)&&(Y1<0)
21              FT1=360+FTT1;
22  end

```

Donde $FT1 = \theta_1$; Y_1 y X_1 son las posiciones deseadas para el efector final de cada robot. Nótese que los casos restringidos son para valores de X_1 iguales a 0 (pues generan una cantidad infinita) y para valores nulos generados por Y_1 . Así mismo, se evalúan los cambios de signo de cada posición deseada con el fin de obtener el ángulo necesario para la correcta ubicación del efector en el sistema de coordenadas X, Y .

El ambiente en el cual se desenvuelven los manipuladores virtuales es el que muestra la Figura 3.15. Se observan 3 planchas o bases donde se obtendrán piezas a soldar, así como el transporte del producto terminado.

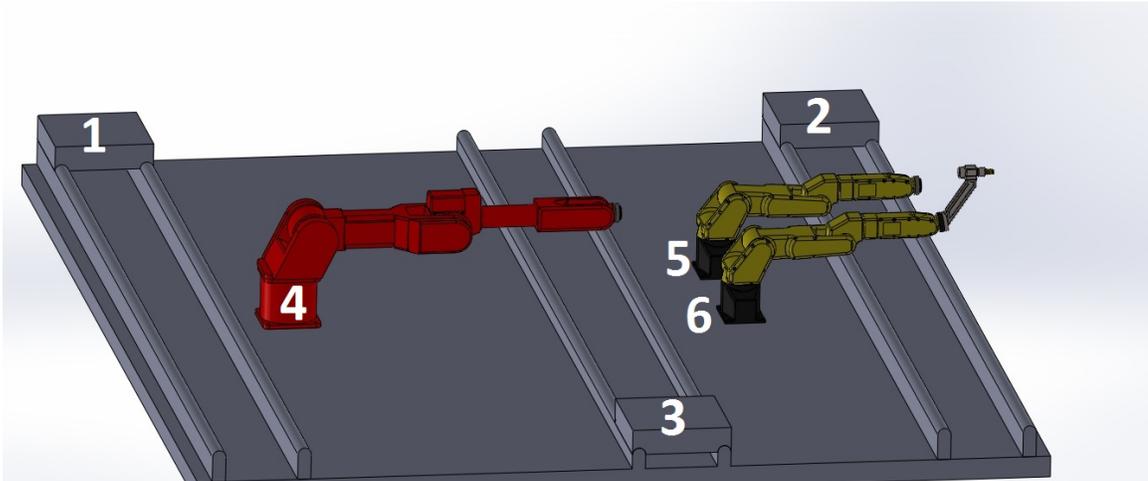


Figura 3.15: Simulación mediante CAD

1. Plancha 1 donde se obtiene la pieza a soldar (recomendable la de mayor peso).
2. Plancha 2 donde se obtiene la pieza a soldar (preferentemente de menor masa).
3. Plancha donde 4 deposita el producto terminado.
4. Robot Kawasaki, 6 articulaciones rotacionales.
5. Robot Fanuc 1, 6 articulaciones rotacionales.
6. Robot Fanuc 2, 6 articulaciones rotacionales (encargado de soldar piezas).

El proceso mediante el cual se seguirá la lógica de programación se muestra mediante la Figura 3.16.

Proceso de movimiento de manipuladores.

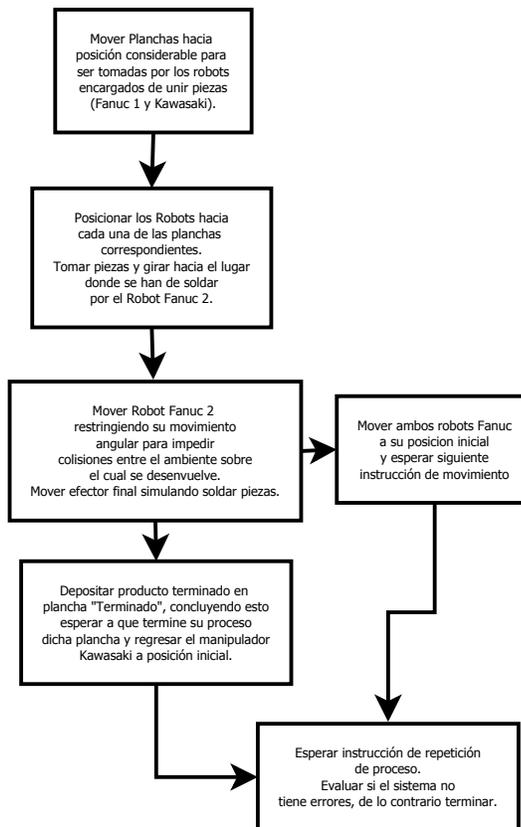


Figura 3.16: Proceso centralizado de movimiento de manipuladores

Los parámetros y variables externas, las proporcionará el instrumento virtual, que consta de dos partes, la principal donde se establecen las coordenadas en las cuales se deben posicionar cada uno de los elementos que conforman el sistema cooperativo (Figura: 3.17), y un panel de visualización de eventos, donde se proporciona el estado de los manipuladores (Figura: 3.18).

	Estado										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
X1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Y1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Z1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
X2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Y2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Z2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
X3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Y3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Z3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PF1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PF2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PK	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Efectro Fanuc	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Efector Fanuc 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Efector Kawasaki	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Plancha Fanuc	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Plancha Kawasaki	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Terminado	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 3.17: Panel de coordenadas (Principal)

Columna	Proximo Valor	Estado		Proximo valor		Estado		Proximo valor		Estado		Proximo valor		
		FT0	FT1	F2T0	F2T1	KT0	KT1	F2T2	F2T3	KT2	KT3	F2T4	F2T5	KT4
X1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Y1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Z1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
X2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Y2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Z2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
X3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Y3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Z3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PF1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PF2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PK	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Efectro Fanuc	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Efector Fanuc 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Efector Kawasaki	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Plancha Fanuc	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Plancha Kawasaki	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Terminado	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Pausa Terminado Error

Iteraciones Faltantes Realizado

Iteraciones

Columnas a considerar

Figura 3.18: Panel de visualización

De la misma forma, antes de asignar las coordenadas de trabajo al manipulador es necesario revisar los límites dados por las restricciones de movimiento impuestas por su composición mecánica articulada.

```
1      % Parámetros Robot Fanuc 6-R1 para colocación de pieza
2      d1=331;
3      a1=75;
4      a2=400;
5      a3=88;
6      d4=308;
7      d6=78;
8
9      % Parámetros Robot Fanuc 6-R2 para soldado de piezas
10     fd1=566;
11     fa1=100;
12     fa2=378;
13     fa3=78;
14     fd4=312;
15     fd6=305;
16
17     % Parámetros Robot Kawasaki 6-R para colocación de piezas
18     kd1=474;
19     ka1=134;
20     ka2=605;
21     ka3=97;
22     kd4=568;
23     kd6=100;
```

El conocimiento de los parámetros propios del sistema empleado, eliminan el error producido por el usuario al elegir una coordenada cartesiana donde el diseño entra en algún tipo de singularidad o donde no existe una solución debido a la restricción espacial del propio modelo.

El modelo del control que se empleó en la simulación es del tipo centralizado, mediante la manipulación de cada articulación en forma simultánea, para lograr un movimiento cinemático de alta velocidad. Esto se logra gracias al control ideal empleado que es un PID de ganancias tabuladas con retroalimentación ideal como el que se muestra en la Figura 3.19:

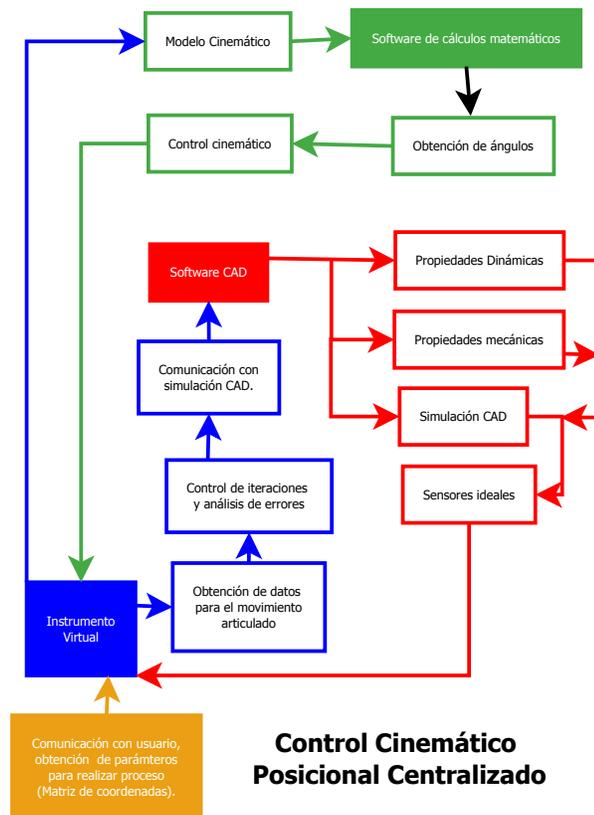


Figura 3.19: Control centralizado empleado: algoritmo de movimiento cinemático.

3.9. Características del ordenador empleado para la simulación

Para efectuar la simulación, se implementó en una computadora portatil con las siguientes especificaciones:

- Memoria instalada (RAM): 4,00 GB (3,68 GB utilizable).
- Tipo de Sistema: Sistema Operativo de 64 bits.
- Procesador: Intel(R)Core(TM)i3 CPU M380@2.53 GHz.
- Software matemático a 32 bits.
- Software de instrumentación virtual a 32 bits.
- Software simulación CAD a 64 bits.

3.10. Conclusiones

En este capítulo se establecen las ecuaciones que definen la ubicación de los efectores finales de cada uno de los robots empleados, de la misma forma en que se mencionan los algoritmos computacionales con los que se aproximaron los ángulos de cada actuador para lograr la posición deseada con base a las coordenadas establecidas.

Capítulo 4

Gráficas y resultados

Con base a las coordenadas descritas por la Tabla 4.1, se obtuvieron los siguientes resultados mediante la aplicación de las ecuaciones descritas en la sección anterior. Debido a que el sistema se encuentra en un mismo medio, sólo es posible analizar el desplazamiento del efector final, esto es debido a la interacción de los manipuladores y las planchas en el medio virtual.

Hay que tener en cuenta que el eje Z es donde tomará sentido el ángulo θ_1 , por lo que las distancias tomadas en Z serán la elevación que tendrá el efector final. La posición del manipulador la darán el eje Y y X , y los ángulos sobrantes servirán para acercar y orientar al efector final.

Las columnas de la Tabla 4.1 simbolizan el número de iteración y el valor deseado a cada manipulador.

Para el desplazamiento lineal los valores se muestran en mm. Las oscilaciones que aparecen y que provocan una posición diferente a la establecida en coordenadas (X, Y) son provocadas por el valor requerido para los ángulos θ_4 , θ_5 y θ_6 .

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
X1	949	949	671	-500	-500	-500	-500	949	949	949	949
Y1	0	0	671	-17	-17	-17	-17	0	0	0	0
Z1	331	331	331	700	700	700	700	331	331	331	331
X2	1173	1173	781	-584	-600	-600	-579	-584	781	1173	1173
Y2	0	0	0	400	600	600	630	400	0	0	0
Z2	566	566	1395	1395	800	800	800	1395	1395	566	566
X3	1504	1504	-700	1000	1000	1000	1000	1200	950	1504	1504
Y3	0	0	1200	600	600	600	600	859	1000	0	0
Z3	474	474	300	700	700	700	700	200	1000	474	474
PF1	0	0	-130	0	0	0	0	0	0	0	0
PF2	0	0	0	0	40	0	-40	0	0	0	0
PK	0	0	130	130	130	130	130	90	0	0	0
E1	0	0	-90	0	-90	-90	-90	0	0	0	0
E2	0	0	0	30	-40	30	-40	30	0	0	0
E3	0	0	-90	-90	-40	-40	-40	40	-30	0	0
PF	0	830	830	0	0	0	0	0	0	0	0
PK	0	800	800	0	0	0	0	0	0	0	0
PT	0	500	1000	2000	2000	2000	2000	3000	4000	0	0

Tabla 4.1: Matriz de coordenadas empleada en simulación

Iteración	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Plancha Kawasaki	0	800	800	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 4.2: Coordenadas para Plancha Kawasaki

Para dar movimiento a la plancha del robot Kawasaki, se emplearon las coordenadas mostradas en la Tabla 4.2 en donde se tomó en cuenta la posición inicial y la final del efector final en cada iteración. Se puede apreciar el mismo desplazamiento tanto en la forma requerida como en la forma generada. En el caso de 800 mm para el eje Y, es en este eje de coordenadas donde las planchas se desplazan con base en un riel fijo establecido.

$$5000 - 4200 = 800\text{mm}$$

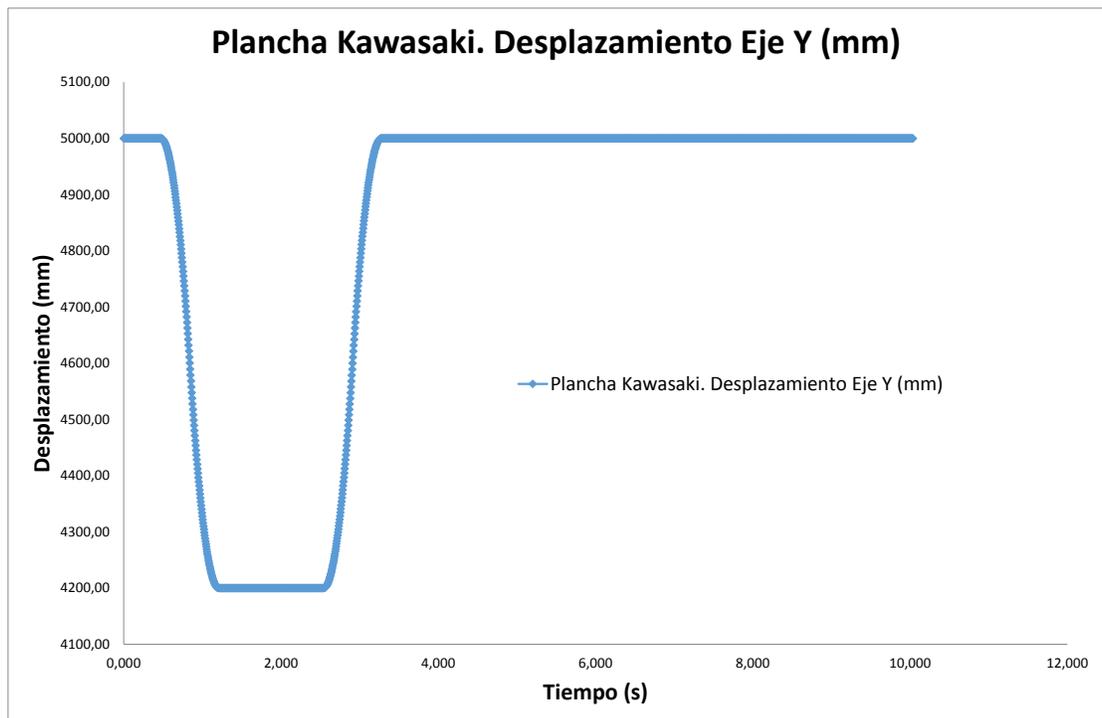


Figura 4.1: Desplazamiento en el eje Y de la plancha para robot Kawasaki.

Iteración	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Plancha Fanuc	0	830	830	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 4.3: Coordenadas para Plancha Fanuc

Para dar movimiento a la plancha del robot Fanuc 1, se emplearon las coordenadas mostradas en la Tabla 4.3 en donde se tomó en cuenta la posición inicial y la final del efector final en cada iteración. Se puede apreciar el mismo desplazamiento tanto en la forma requerida como en la forma generada. En el caso de 830 mm para el eje Y.

$$4500 - 3670 = 830mm$$

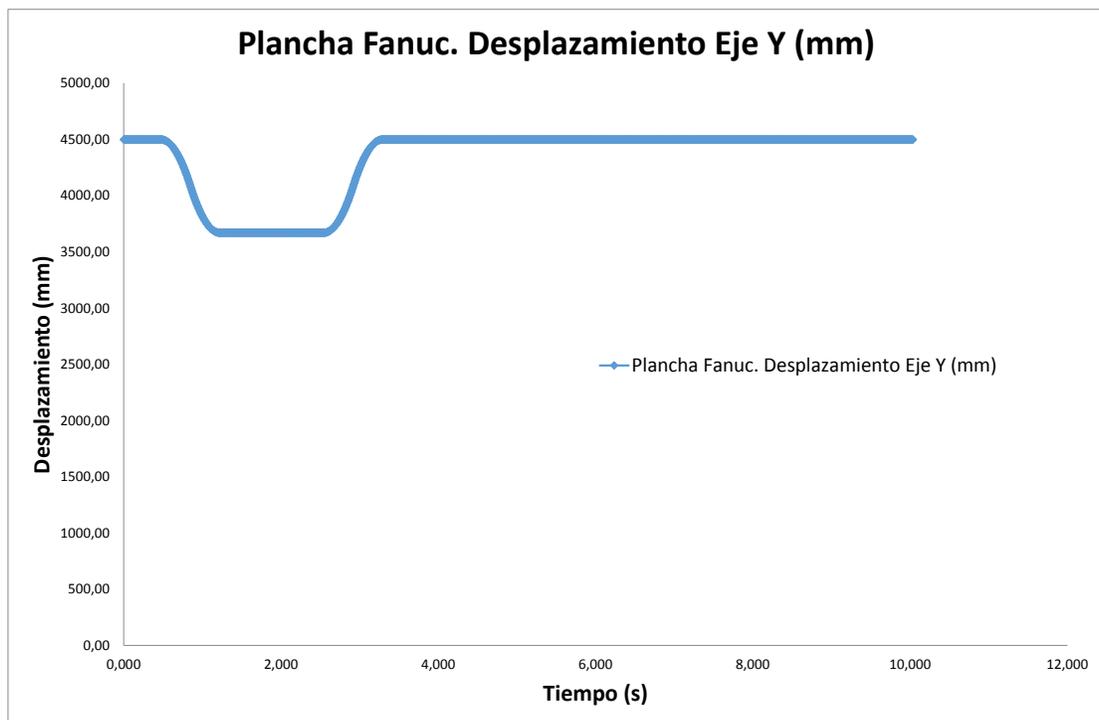


Figura 4.2: Desplazamiento con respecto al eje Y de la plancha para robot Fanuc.

Iteración	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Plancha Terminado	0	500	1000	2000	2000	2000	2000	3000	4000	0	0

Tabla 4.4: Coordenadas para Producto Terminado

Puesto que la plancha de Producto Terminado se centra en el origen del sistema de coordenadas, los resultados pueden mostrarse en la Figura 4.4 de forma directa, esto es con base al desplazamiento en el eje Y expresado en mm.

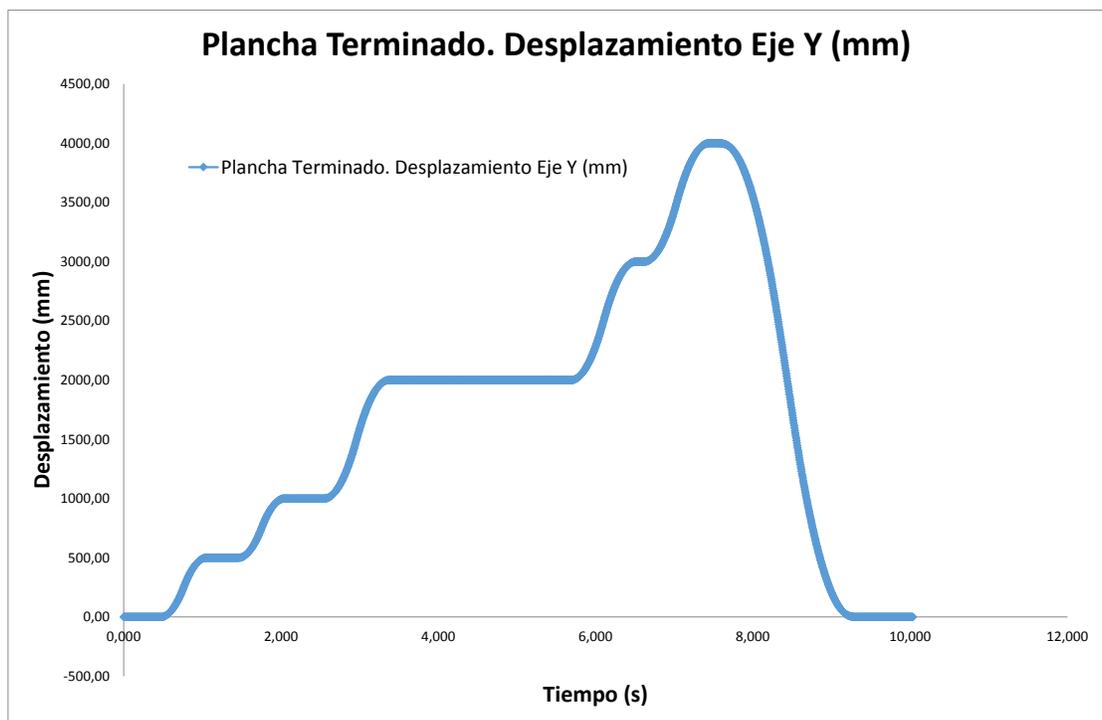


Figura 4.3: Desplazamiento en el eje Y de la plancha para el producto terminado.

Iteración	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
X3	1504	1504	-700	1000	1000	1000	1000	1200	950	1504	1504
PK	0	0	130	130	130	130	130	90	0	0	0
E3	0	0	-90	-90	-40	-40	-40	40	-30	0	0

Tabla 4.5: Coordenadas en el eje X para Robot Kawasaki

Debido a que en el sistema virtual los manipuladores se encuentran en un único sistema de referencia, los puntos mostrados en donde se ubica el efector final muestran la coordenada real y mediante una comparación de desplazamientos es como se obtienen los resultados al concluir el experimento.

Desplazamientos Requeridos:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	-2204	1700	0	0	0	200	-250	554	0

Desplazamientos obtenidos expresados en la Figura 4.4.

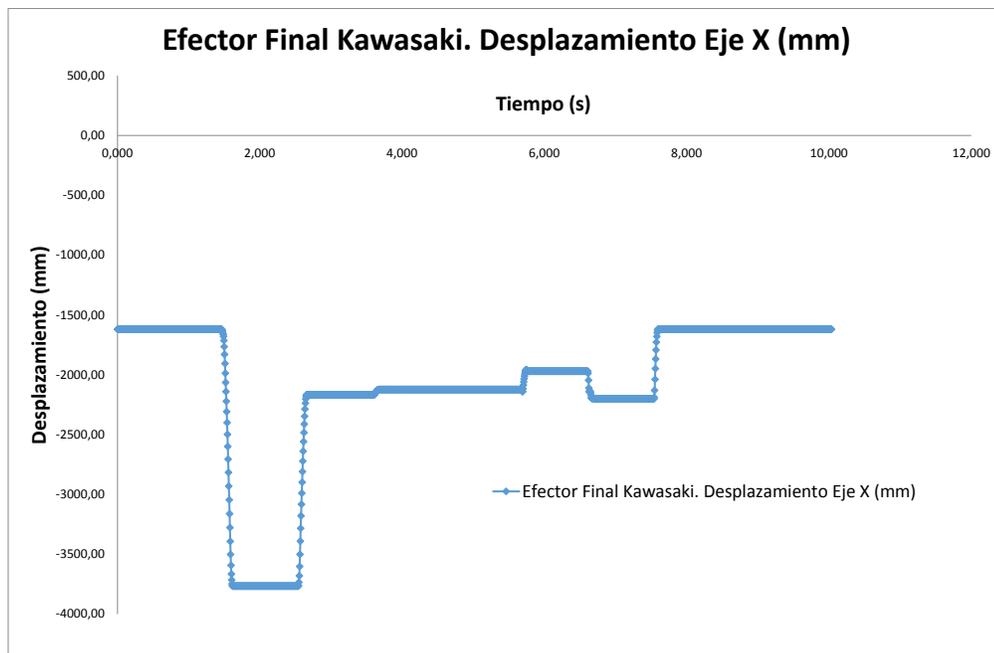


Figura 4.4: Desplazamiento en el eje X del manipulador Kawasaki.

Iteración	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Y3	0	0	1200	600	600	600	600	859	1000	0	0
PK	0	0	130	130	130	130	130	90	0	0	0
E3	0	0	-90	-90	-40	-40	-40	40	-30	0	0

Tabla 4.6: Coordenadas en el eje Y para Robot Kawasaki

Desplazamientos requeridos:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	1200	-600	0	0	0	259	141	-1000	0

Desplazamientos obtenidos expresados en la Figura 4.5.

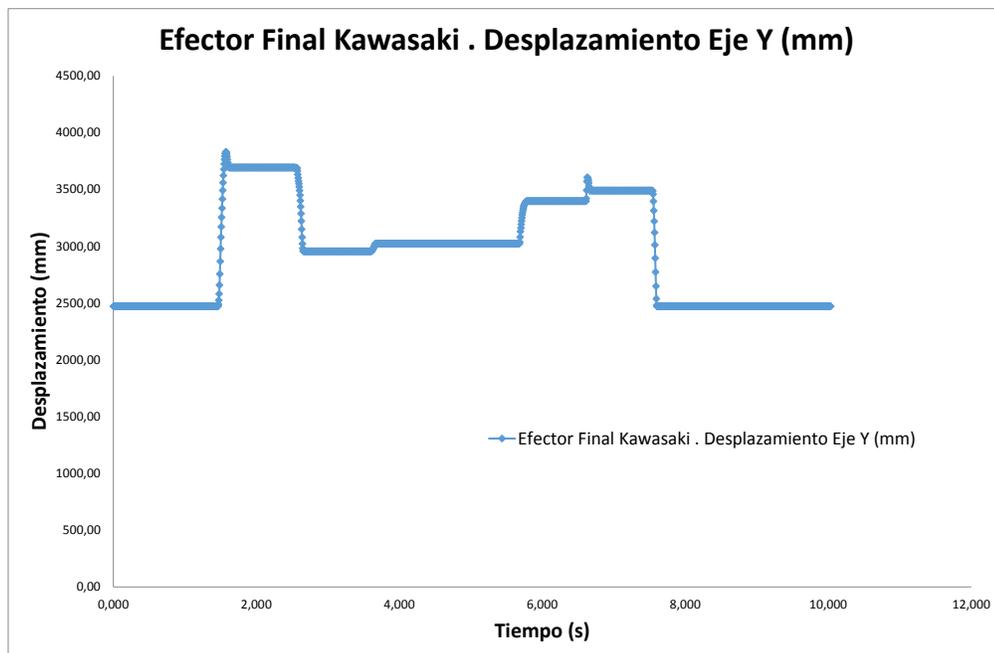


Figura 4.5: Desplazamiento en el eje Y del manipulador Kawasaki.

Iteración	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Z3	474	474	300	700	700	700	700	200	1000	474	474

Tabla 4.7: Coordenadas en el eje Z para Robot Kawasaki

Desplazamientos requeridos:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	-174	400	0	0	0	-500	800	-526	0

Desplazamientos obtenidos expresados en la Figura 4.6.

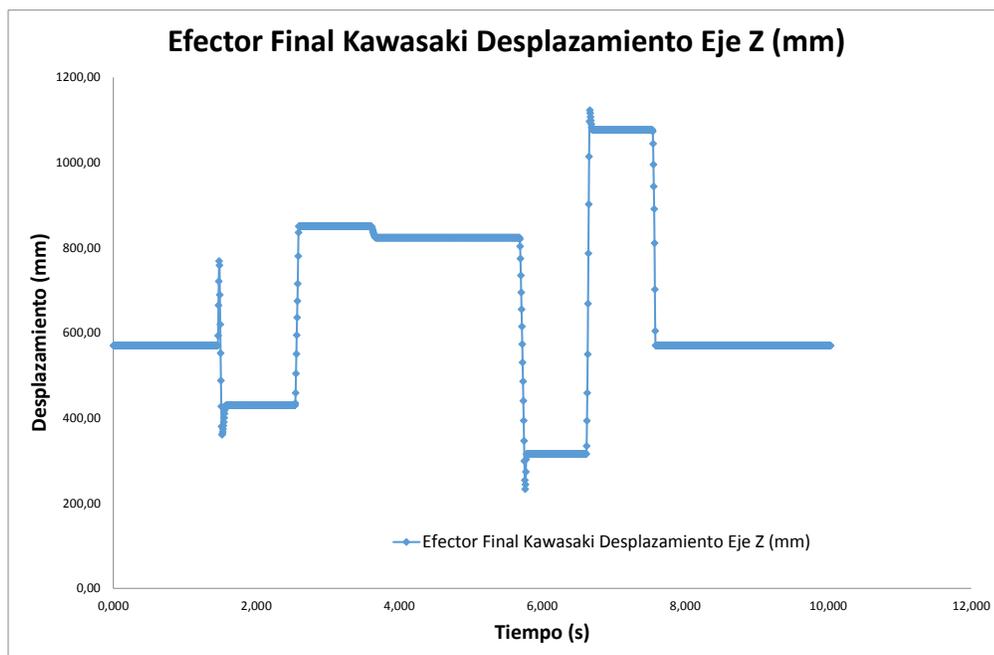


Figura 4.6: Desplazamiento en el eje Z del manipulador Kawasaki.

Iteración	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
X1	949	949	671	-500	-500	-500	-500	949	949	949	949
PF1	0	0	-130	0	0	0	0	0	0	0	0
E1	0	0	-90	0	-90	-90	-90	0	0	0	0

Tabla 4.8: Coordenadas en el eje X para Robot Fanuc 1

Desplazamientos requeridos:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	-278	-1171	0	0	0	1449	0	0	0

Desplazamientos obtenidos expresados en la Figura 4.7.

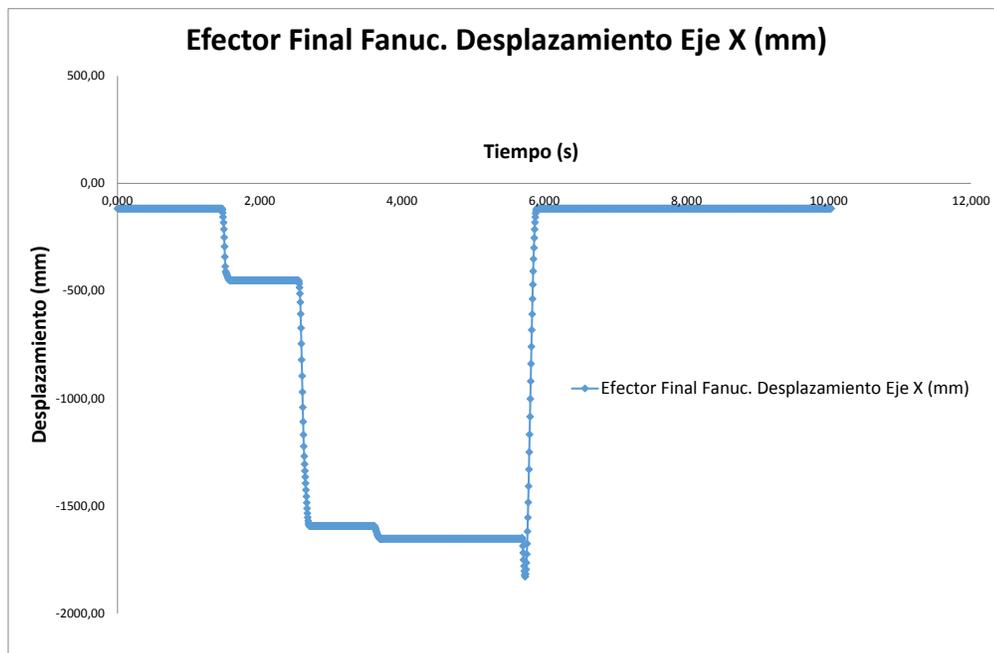


Figura 4.7: Desplazamiento en el eje X del manipulador Fanuc 1.

Iteración	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Y1	0	0	671	-17	-17	-17	-17	0	0	0	0
PF1	0	0	-130	0	0	0	0	0	0	0	0
E1	0	0	-90	0	-90	-90	-90	0	0	0	0

Tabla 4.9: Coordenadas en eje el Y para Robot Fanuc 1

Desplazamientos requeridos:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	671	-688	0	0	0	17	0	0	0

Desplazamientos obtenidos expresados en la Figura 4.8. La oscilación grande observada en el segundo 6,000 es debido a la configuración codo abajo del manipulador.

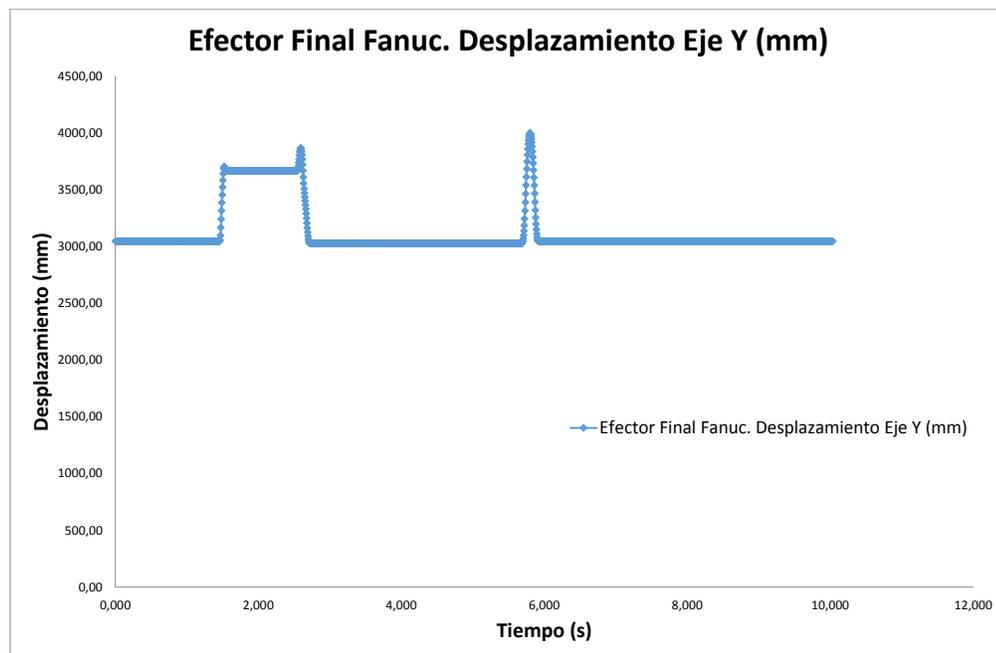


Figura 4.8: Desplazamiento en el eje Y del manipulador Fanuc 1.

Iteración	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Z1	331	331	331	700	700	700	700	331	331	331	331

Tabla 4.10: Coordenadas en el eje Z para Robot Fanuc 1

Desplazamientos requeridos:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0	369	0	0	0	-369	0	0	0

Desplazamientos obtenidos expresados en la Figura 4.9. El cambio observado en el segundo 2,000 y 4,000 se debe al valor tomado por el efector final en base a los ángulos θ_4 , θ_5 , y θ_6 .

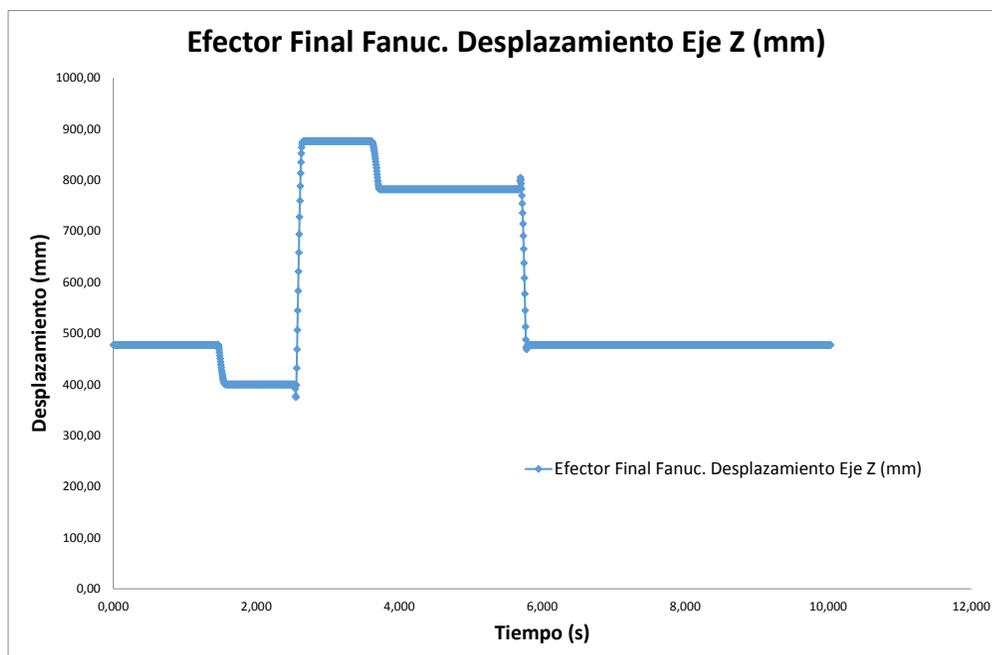


Figura 4.9: Desplazamiento en el eje Z del manipulador Fanuc 1.

Iteración	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
X2	1173	1173	781	-584	-600	-600	-579	-584	781	1173	1173
PF2	0	0	0	0	40	0	-40	0	0	0	0
E2	0	0	0	30	-40	30	-40	30	0	0	0

Tabla 4.11: Coordenadas en el eje X para Robot Fanuc 2

Desplazamientos requeridos:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	-392	-1365	-16	0	21	-5	1365	392	0

Desplazamientos obtenidos expresados en la Figura 4.10.

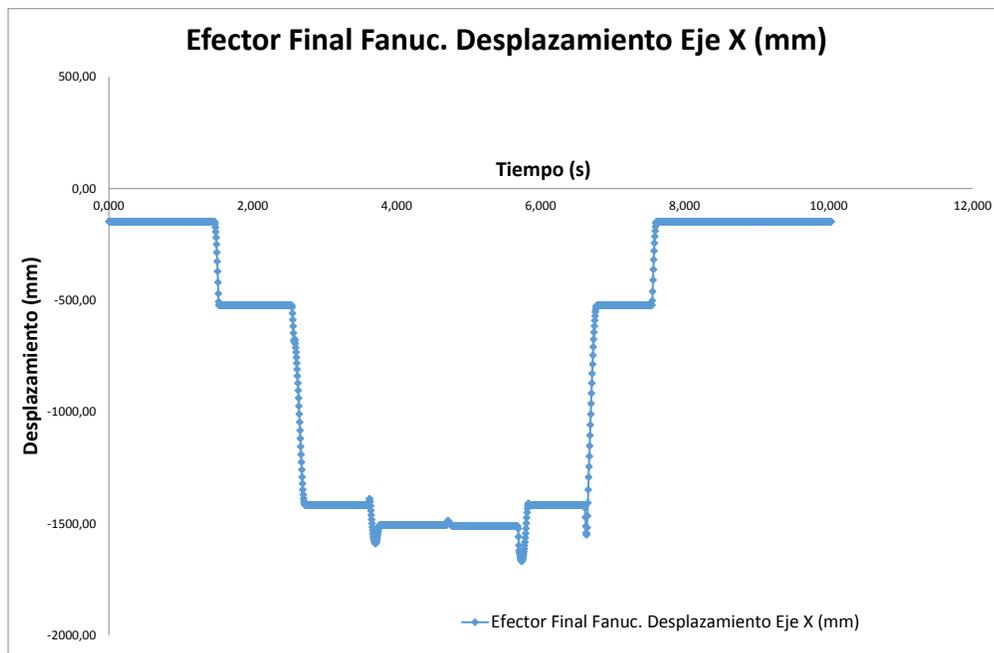


Figura 4.10: Desplazamiento en el eje X del manipulador Fanuc 2.

Iteración	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Y2	0	0	0	400	600	600	630	400	0	0	0
PF2	0	0	0	0	40	0	-40	0	0	0	0
E2	0	0	0	30	-40	30	-40	30	0	0	0

Tabla 4.12: Coordenadas en el eje Y para Robot Fanuc 2

Desplazamientos requeridos:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0	400	200	0	30	-230	-400	0	0

Desplazamientos obtenidos expresados en la Figura 4.11.

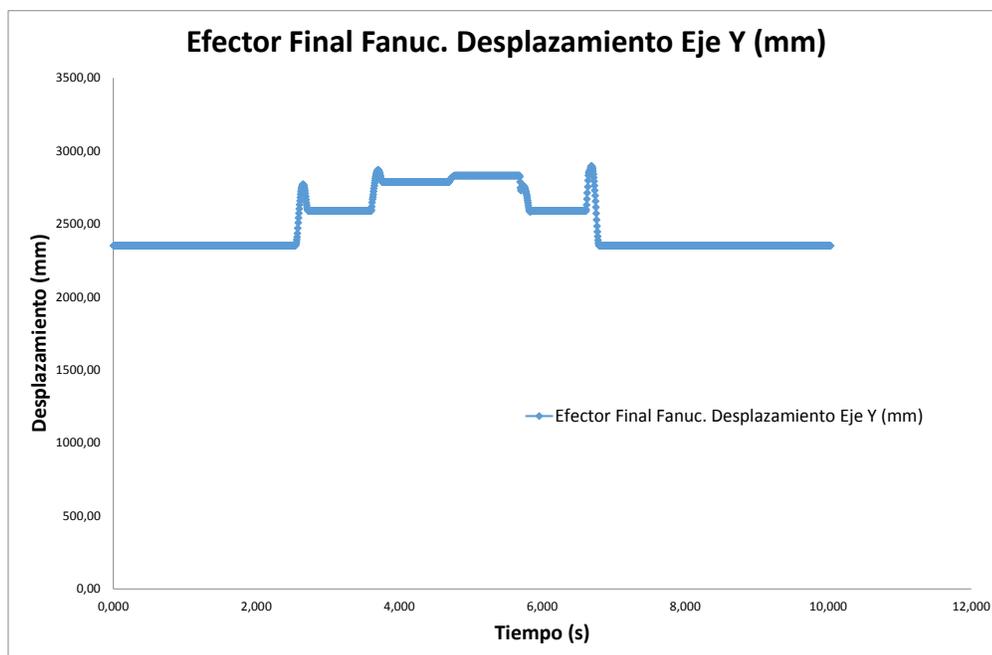


Figura 4.11: Desplazamiento en el eje Y del manipulador Fanuc 2.

Iteración	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Z2	566	566	1395	1395	800	800	800	1395	1395	566	566

Tabla 4.13: Coordenadas en el eje Z para Robot Fanuc 2

Desplazamientos requeridos:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	829	0	-595	0	0	595	0	-829	0

Desplazamientos obtenidos expresados en la Figura 4.12.

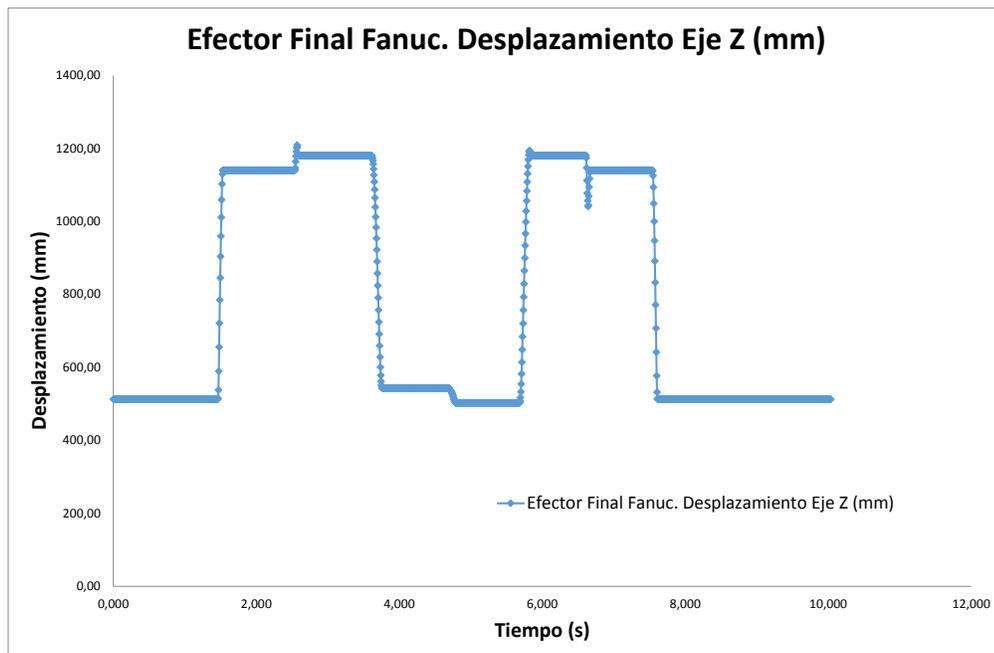


Figura 4.12: Desplazamiento en el eje Z del manipulador Fanuc 2.

Capítulo 5

Conclusiones y trabajos futuros

5.1. Conclusiones

- Las condiciones a las que fueron sometidas las posiciones de los diferentes motores a través de los simuladores, ofrecen al programador una idea clara de cómo se comportarán los manipuladores en el entorno real mediante una aproximación matemática en el software establecido.
- El software entrega posiciones ideales de los efectores finales, en el ambiente industrial, las posiciones y orientaciones de los mismos se ven sometidas a tolerancias a fallas y evasión de obstáculos.
- El control propuesto y la asignación de valores a ángulos por medio del modelo de cinemática inverso propuesto, contiene un error mínimo (2%), lo que lo hace un modelo aceptable.
- El modelo de control por medio de ganancias adaptables, proporciona un control ideal para este tipo de configuración de robots, ya que ofrece un medio confiable para las necesidades del programador. En este trabajo de investigación, los sensores y la falta de fuerzas externas hacen del modelo virtual, la herramienta perfecta para obtener las posiciones necesarias para aplicar un control dinámico en la vida real, integrando en este ambiente, las propiedades dinámicas y fuerzas existentes en el medio.

5.2. Trabajos a futuro

- Controlar en tiempo real manipuladores para fines didácticos.
- Implementar una técnica de control estable para dar origen a un proceso eficaz.

- Desarrollar aplicaciones para expansión de variables a controlar (manipuladores) de una forma sencilla.
- Implementar otras técnicas de control al modelo para impedir singularidades, errores en espacio de trabajo fuera de rango y tolerancia a fallas.
- Implementar un modelo dinámico para apreciar los valores de par para cada motor empleado, así como las fuerzas externas que actúan sobre el modelo físico.

Bibliografía

- [1] C. Urrea Oñate, *Fundamentos de Robótica Industrial, Texto Guía para la Asignatura de Fundamentos de Robótica Industrial*. Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Santiago de Chile, 2009.
- [2] F. Reyes Cortés, *Matlab aplicado a robótica y Mecatrónica*. México: Alfaomega, 2012.
- [3] A. González, *Modelación, simulación y control de robots industriales cooperativos*. Trabajo de final de la asignatura de Laboratorio de Fundamentos de Robótica Industrial. Universidad de Santiago de Chile, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Eléctrica, 2009.
- [4] M. P. Groover, M. Werss, R. N. Nogel, and N. G. Odrey, *Robótica Industrial. Tecnología, Programación y Aplicaciones*. México: McGraw Hill, 1994.
- [5] R. A. Carrasco Shmidt, *Detección y diagnóstico de fallas en robots móviles cooperativos*. Trabajo para optar al grado de Magister en Ciencias de la Ingeniería. Pontificia Universidad Católica de Chile, Escuela de Ingeniería, Agosto 2004.
- [6] R. A. Matteoda Robledo, *Estado del Arte y Simulación Computacional de Algoritmo de Trabajo Cooperativo entre Manipuladores de Tipo Industrial*. Trabajo de final de la asignatura de Laboratorio de Fundamentos de Robótica Industrial. Universidad de Santiago de Chile, Facultad de Ingeniería Departamento de Ingeniería Eléctrica, 2009.
- [7] A. González and M. Pineda, *Seguimiento Adaptativo de Trayectorias con Convergencia en Tiempo Finito de un Robot Antropomórfico Virtual de Tres Grados de Libertad*. Tesis. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 2007.
- [8] L. López Pacheco and V. Martínez Olguín, *Scorbot ER-VII virtual: modelado matemático y control de movimiento*. Tesis. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 2006.

-
- [9] C. V. Luna Jiménez, *Diseño e Implementación de un Prototipo Virtual de una Mesa de Coordenadas*. Tesis. Universidad Nacional Autónoma de México, 2006.
- [10] J. T. Buitrago-Molina and J. S. Carvajal-Guerrero, *Plataforma virtual para el mando local y remoto de un brazo robótico de apoyo para la educación en ingeniería*. Tesis. Tecno Lógicas, vol. 17, no. 32, pp. 67-74, 2014.
- [11] B. Rodney A., *Robust layered control system for a mobile robot*. IEEE Journal of Robotics and Automation, 1986.
- [12] T. Balch and R. C. Arkin, *Communication in reactive multiagent robotic system*. *Autonomous Robots*. 1994.
- [13] D. Jung and A. Zelinsky, *Grounded symbolic communication between heterogeneous cooperating robots*. *Autonomous Robots*. 1994.
- [14] A. Winfield, *Distributed sensing and data collection via broken ad hoc wireless connected networks of mobile robots*. En Proceedings of Fifth International Symposium on Distributed Autonomous Robotics Systems (DARS 2000), 2000.
- [15] P. Molnar and J. Starke, *Communication fault tolerance in distributed robotic systems*. En Proceedings of Fifth International Symposium on Distributed Autonomous Robotics Systems (DARS 2000), 2000.
- [16] G. Dedeoglu and G. Sukhatme, *Landmark-based matching algorithm for cooperative mapping by autonomous robots*. Proceedings of Fifth International Symposium on Distributed Autonomous Robotics Systems (DARS 2000), 2000.
- [17] I. Rekleitis and G. Dudek, *Graph-based exploration using multiple robots*. Proceedings of Fifth International Symposium on Distributed Autonomous Robotics Systems (DARS 2000), 2000.
- [18] L. H. López Pérez and I. E. Mata Herrera, *Estado del Arte en robótica móvil autónoma distribuida*.
- [19] O. Simonin and O. Grunder, *A Cooperative Multi-Robot Architecture for Moving a Paralyzed Robot*. *Mechatronics*, No. 19, 2009, pp. 463-470, 2000.
- [20] M. Améstegui Moreno, *Apuntes de Control PID*. Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia, Enero 2001.
- [21] P. Reynoso Mora and D. Mocenchua Mora, *Sintonización Difusa de un PID para Robots Manipuladores*. Seminario de Control Difuso, Marzo 2004.

-
- [22] J. Sungho, *Adaptive Biomimetic Control of Robot Arm Motions*. Neurocomputing, No. 71, 2008, Pp. 3625- 3630.
- [23] R. Ferreiro García and A. Pinon Pazos, *Adaptación mediante Gain Scheduling bajo Foundation Fieldbus*. Depto. Ingeniería Industrial, Universidad de A Coruña, España.
- [24] N. García and J. Sabater, *Simulación del Servocontrol Visual de un Robot de Dos Grados de Libertad*.
- [25] C. Soria and F. Roberti, *Control Servo Visual de un Robot Manipulador Tipo Scara Basado en Pasividad*.
- [26] H. Nafiz Aydin, *Gain Scheduling Adaptive Model Control*. Tr. J. of Engineering and Environmental Science, 1999, pp. 209 - 218.
- [27] C. Abrikencheikh, *Optimized-Motion planning, Theory and Implementation*. USA: John Wiley & Sons Inc, 1994.
- [28] M. W. Spong and M. Vidyasagar, *Robot Dynamics and Control*. USA: John Wiley & Sons Inc, 1989.
- [29] T. Yoshikawa, *Fundations of Robotics, Analysis and Control*. Japan: Massachusetts Institute of Technology, 1990.
- [30] T. Lung-Won, *Robot Analysis, The Mechanics of Serial and Paralell Mnipulators*. USA: John Wiley & Sons Inc, 1999.
- [31] R. R. Murphy, *Introduction to AI Robotics*. London, England: Massachusetts Institute of Technology, 2000.
- [32] R. M. Murray, Z. Li, and S. Shankar Sastry, *A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation*. USA: CRC Press LLC, 1994.
- [33] J. J. Craig, *Introduction to Robotics, Mechanics and Control*. USA: Addison-Wisley Publishing Company, 1989.
- [34] D. H. Myszka, *Máquinas y Mecanismos*. México: Pearson, 2012.
- [35] Guillet, *Cinemática de las máquinas*. México: Continental, 1982.
- [36] A. Ollevo Balvrone, *Robótica. Manipuladores y robots móviles*. México: Alfaomega, 2007.
- [37] F. Reyes Cortés, *Robótica. Control de Robots Manipuladores*. México: Alfaomega, 2011.

-
- [38] S. Cetinkunt, *Mecatrónica*. México: Grupo Editorial Patria, 2007.
- [39] F. Reyes Cortés, J. Cid Menjaraz, and E. Vargas Soto, *Mecatrónica. Control y Automatización*. México: Alfaomega, 2013.
- [40] W. Bolton, *Mecatrónica. Sistemas de control eléctrico en la ingeniería mecánica y eléctrica*. México: Alfaomega, 2012.
- [41] D. G. Alciatore and M. B. Hestand, *Introducción a la mecatrónica y los sistemas de medición*. México: McGraw Hill, 2008.
- [42] A. Barrientos, L. F. Penini, C. Balaguer, and R. Aracil, *Fundamentos de Robótica*. España: McGraw Hill, 2007.
- [43] R. Alami, R. Chatila, and H. Asama, *Distributed Autonomous Robotic Systems*. Japan: Springer, 2007.
- [44] H. Moravec, *Robot: Mere Machine to Transcendent Mind*. New York, USA: Oxford University Press, 1999.
- [45] H. F. Durrant-Whyte, *Integration, Coordination and Control of Multi-Sensor Robot Systems*. USA: Kluwer Academic Publishers, 1988.
- [46] “Identidades trigonométricas para el ángulo compuesto.” <http://matematica1.com/category/angulo-compuesto/>. Último día de acceso: 2013-10-27.
- [47] H. Yáñez Badillo, *Programación y Mantenimiento de un Robot Lineal*. Hidalgo, México: Universidad Politécnica de Tulancingo, 2011.
- [48] F. L. Lewis, D. M. Dawson, and C. T. Abdallah, *Robot Manipulator Control. Theory and Practice*. USA: Marcel Dekker, Inc., 2004.
- [49] A. Rentería and M. Rivas, *Robótica Industrial. Fundamentos y aplicaciones*. España: McGraw Hill, 2000.
- [50] G. C. Onwubolu, *Mechatronics. Principles and Applications*. Gran Bretaña: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005.
- [51] A. Glaser, *Industrial Robotics. How To Implement The Right System For Your Plant*. USA: Industria Press Inc., 2009.
- [52] P. Corke, *Robotics, Vision and Control. Fundamental Algorithms in MATLAB*. Alemania: Springer, 2011.

- [53] J. M. Angulo Usategui, S. Romero Yesa, and I. Angulo Martínez, *Introducción a la Robótica. Principios teóricos, construcción y programación de un robot educativo*. España: Paraninfo, 2005.

Apéndice A

Programa utilizado para cálculos matemáticos

Programa utilizado para obtener la matriz de transformación homogénea de la cinemática directa de un robot de 6 grados de libertad con articulaciones rotacionales.

```
1      clc
2      clear all
3      close all
4      %Aplicando valores a la tabla de Articulaciones Generada
5
6      d1=331;
7      a1=100;
8      a2=378;
9      a3=78;
10     d4=312;
11     d6=72;
12     fd1=566;
13     fa1=100;
14     fa2=378;
15     fa3=78;
16     fd4=312;
17     fd6=305;
18     kd1=474;
19     ka1=134;
20     ka2=605;
21     ka3=97;
22     kd4=568;
23     kd6=100;
24
```

```

25     T=[112 10 0 0 0 0];
26     d=[kd1 0 0 0 0 0];
27     a=[ka1 ka2 ka3 kd4 0 kd6];
28     A=[90 0 -90 -90 90 0];
29
30
31     MIH=[];
32     %Matriz de Transformacion Homogenea Generada
33     for i=1:1:6
34         if i==1
35             Th1=[cosd(T(1,i)), (-sind(T(1,i))*cosd(A(1,i))), (sind(T(1,
36                 i))*
37                 sind(A(1,i))), a(1,i)*cosd(T(1,i));
38                 sind(T(1,i)), (cosd(T(1,i))*cosd(A(1,i))), (-cosd(T(1,i)
39                 ))*
40                 sind(A(1,i))), a(1,i)*sind(T(1,i));
41                 0,sind(A(1,i)),cosd(A(1,i)),d(1,i);
42                 0,0,0,1] ;
43         elseif i==2
44             Th2=[cosd(T(1,i)), (-sind(T(1,i))*cosd(A(1,i))), (sind(T(1,i))
45                 *
46                 sind(A(1,i))), a(1,i)*cosd(T(1,i));
47                 sind(T(1,i)), (cosd(T(1,i))*cosd(A(1,i))), (-cosd(T(1,i))*
48                 sind(A(1,i))), a(1,i)*sind(T(1,i));
49                 0,sind(A(1,i)),cosd(A(1,i)),d(1,i);
50                 0,0,0,1] ;
51         elseif i==3
52             Th3=[cosd(T(1,i)), (-sind(T(1,i))*cosd(A(1,i))), (sind(T(1,i))
53                 *
54                 sind(A(1,i))), a(1,i)*cosd(T(1,i));
55                 sind(T(1,i)), (cosd(T(1,i))*cosd(A(1,i))), (-cosd(T(1,i))*
56                 sind(A(1,i))), a(1,i)*sind(T(1,i));
57                 0,sind(A(1,i)),cosd(A(1,i)),d(1,i);
58                 0,0,0,1] ;
59         elseif i==4
60             Th4=[cosd(T(1,i)), (-sind(T(1,i))*cosd(A(1,i))), (sind(T(1,i))
61                 *

```

```

62 elseif i==5
63 Th5=[cosd(T(1,i)), (-sind(T(1,i))*cosd(A(1,i))), (sind(T(1,i))
    *
64   sind(A(1,i))), a(1,i)*cosd(T(1,i));
65   sind(T(1,i)), (cosd(T(1,i))*cosd(A(1,i))), (-cosd(T(1,i))*
66   sind(A(1,i))), a(1,i)*sind(T(1,i));
67   0,sind(A(1,i)),cosd(A(1,i)),d(1,i);
68   0,0,0,1] ;
69 elseif i==6
70 Th6=[cosd(T(1,i)), (-sind(T(1,i))*cosd(A(1,i))), (sind(T(1,i))
    *
71   sind(A(1,i))), a(1,i)*cosd(T(1,i));
72   sind(T(1,i)), (cosd(T(1,i))*cosd(A(1,i))), (-cosd(T(1,i))*
73   sind(A(1,i))), a(1,i)*sind(T(1,i));
74   0,sind(A(1,i)),cosd(A(1,i)),d(1,i);
75   0,0,0,1] ;
76 end
77 end
78
79
80 % Matriz A0 <- A2 Generada
81 a02=Th1*Th2;
82 % Matriz A0 <- A3 Generada
83 a03=a02*Th3;
84 % Matriz A0 <- A4 Generada
85 a04=a03*Th4;
86 % Matriz A0 <- A5 Generada
87 a05=a04*Th5;
88 % Matriz A0 <- A6 Generada
89 a06=a05*Th6;
90
91
92 X1=[a06(1,4)];
93 Y1=[a06(2,4)];
94 Z1=[a06(3,4)];
95
96 X0=(a(1,1)+(a(1,2)*cosd(T(1,2)))+((a(1,3)+a(1,4))*cosd(T(1,2)
    +T(1,3)))+
97 (a(1,6)*cosd(T(1,2)+T(1,3)+T(1,5))))*cosd(T(1,1));
98 Y0=(a(1,1)+(a(1,2)*cosd(T(1,2)))+((a(1,3)+a(1,4))*cosd(T(1,2)
    +T(1,3)))+
99 (a(1,6)*cosd(T(1,2)+T(1,3)+T(1,5))))*sind(T(1,1));

```

```
100     Z0=d(1,1)+(a(1,2)*sind(T(1,2)))+((a(1,3)+a(1,4))*sind(T(1,2)+
101         T(1,3)))+
102     (a(1,6)*sind(T(1,2)+T(1,3)+T(1,5)));
103     % Comprobacion Valores de posiciones
104     R1=X1-X0;
105     R2=Y1-Y0;
106     R3=Z1-Z0;
107     O1=atand(Y0/X0);
108     l1=a(1,2);
109     l2=a(1,3)+a(1,4)+a(1,6);
110     xz=sqrt(((X0-a(1,1))^2)+((Z0-d(1,1))^2));
111     D1=(l1^2)+(l2^2)-(xz^2);
112     D2=2*l1*l2;
113     D11=D1/D2;
114     D12=sqrt(1-(D11^2));
115     O3=atand(D12/D11);
116     O21=atand((Z0-d(1,1))/(X0-a(1,1)));
117     O22=atand((l2*sind(O3))/(l1+(l2*cosd(O3))));
118     O2=(O21-O22)+75;
```

Apéndice B

Especificaciones Técnicas del Manipulador Fanuc 50iC/5L

ARC Mate® 50iC/5L

FANUC
Robotics

Basic Description

The new ARC Mate 50iC/5L is the latest arc welding offering from FANUC Robotics. The slim arm profile improves part and tooling accessibility while the lighter weight enables fast speeds. The profile also makes it the ideal solution for welding applications where space is a premium and throughput is a must.

Payload is a class-leading 5 kg, allowing for easy interchangeability with existing welding torches used in much larger class robots minimizing inventory overhead. The robot controller and easy-to-use ArcTool® software provide reliable performance with higher productivity.

Benefits

- Best-in-class reach versus stroke with 892 mm reach and 616 mm stroke.
- Best-in-class speed.
- Best-in-class payload and weight with highest wrist moment and inertias.
- +/- 0.03 mm repeatability.
- Higher rigidity and the most advanced servo technology enable smooth motion without vibration in high-speed operation.
- Tabletop size, slim wrists, and small footprint permit operation in tight work spaces.

Note: ARC Mate® and iRVision® are registered trademarks of FANUC LTD.

ARCLink® is a registered trademark of Lincoln Electric.



- Robot can flip over backwards for a larger work envelope.
- Enclosed mechanical design eliminates cables and hose snagging.
- Extremely compact controller cabinet.
- Upright, angle, wall or invert mounting increases installation flexibility.
- Same footprint and wrist bolt pattern as previous generation for easy upgrades.
- iPendant™, a color, Internetready teach pendant for even easier programming and custom cell user interface design.
- Standard “C” size batteries for encoder backup.
- Fail-safe mechanical brakes on all joints.

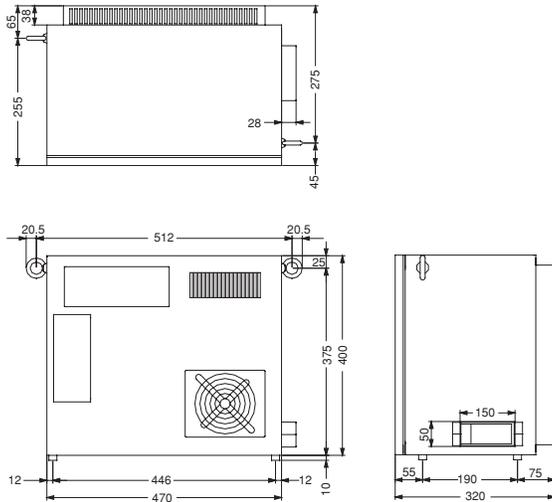
Robot and Controller Options

- 110 VAC single-phase input voltage.
- 360-degree J1 axis rotation.
- Extended communication capabilities: Ethernet, FTP, Serial and DeviceNet.
- Supports ArcLink® & ArcLink® XT.
- Supports a variety of intelligent functions including an internal programmable machine controller (PMC) and iRVision® (built-in vision-ready controller).

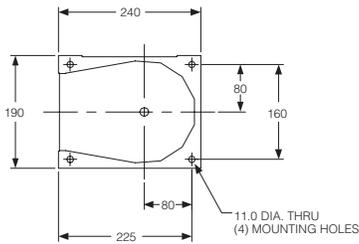
Robot Reliability

- The latest generation of a proven design.
- Sealed bearings and brushless AC motors.

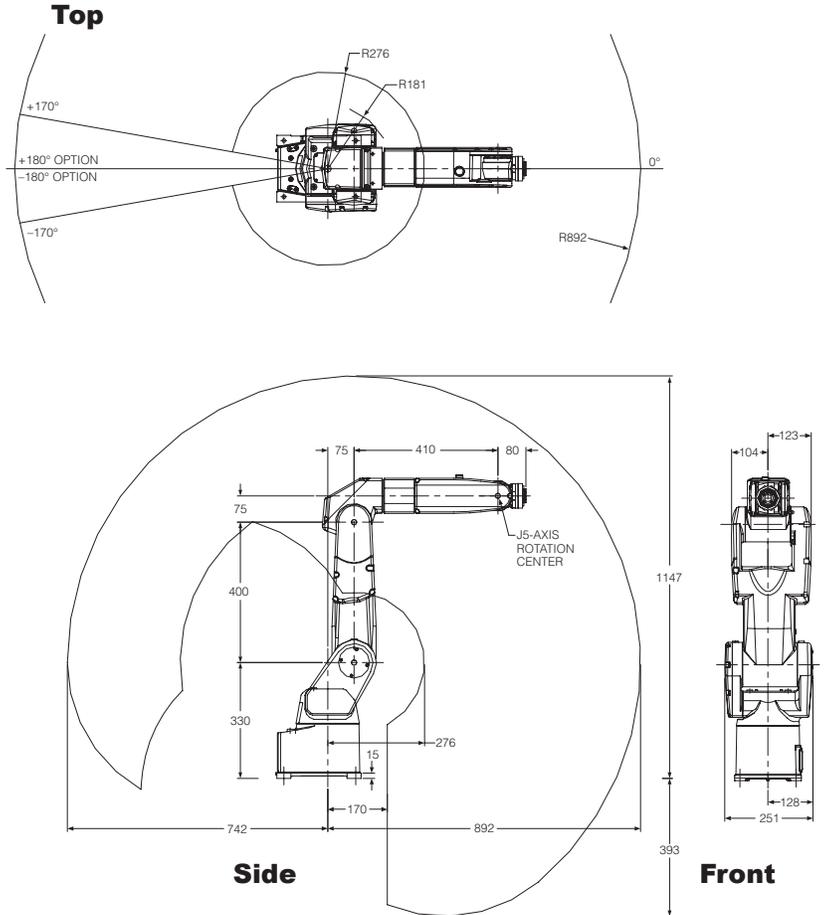
R-30iA Mate Controller



Footprint



ARC Mate 50iC/5L Dimensions



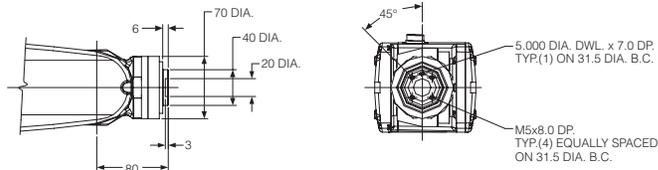
ARC Mate 50iC/5L Specifications

Items		
Axes		6
Payload (kg)		5
Reach (mm)		892
Repeatability (mm)		±0.03
Motion range (degrees)	J1	340 (360 option)
	J2	230
	J3	373
	J4	380
	J5	240
	J6	720
	Motion speed (degrees/s)	J1
J2		270
J3		270
J4		450
J5		450
J6		720
Wrist moments N-m (kgf-m)	J4	11.9 (1.21)
	J5	11.9 (1.21)
	J6	6.7 (0.68)
Wrist load inertia (kg-m ²)	J4	0.3
	J5	0.3
	J6	0.1
Mechanical brakes		All axes
Mechanical weight (kg)		29
Mounting method ⁽¹⁾		Floor, ceiling, angle, and wall
Installation environment		0 to 45
Temperature (°C)		
Humidity		
		Normally: 75% or less Short term (within a month): 95% or less No condensation
Vibration (m/s ²)		0.5 or less

Notes:

(1) J1 and J2 axis motion range will be limited for angle and wall mount installations.

Wrist



Note: Dimensions are shown in millimeters.
Detailed CAD data are available upon request.

Intelligent Robot Solutions

FANUC
Robotics

FANUC Robotics America, Inc.
3900 W. Hamlin Road
Rochester Hills, MI 48309-3253

Charlotte, NC
(704) 596-5121

Toronto, Canada
(905) 812-2300

Chicago, IL
(847) 898-6000

Montréal, Canada
(450) 492-9001

For sales or technical information, call:
1-800-iQ-ROBOT

Cincinnati, OH
(513) 754-2400

Aguascalientes, Mexico
52 (449) 922-8000

Los Angeles, CA
(949) 595-2700

Sao Paulo, Brazil
(55) (11) 3619-0599

marketing@fanucrobotics.com
fanucrobotics.com

Toledo, OH
(419) 866-0788

©2009 FANUC Robotics America, Inc. All rights reserved. FANUC ROBOTICS LITHO IN U.S.A. FRA-1/09

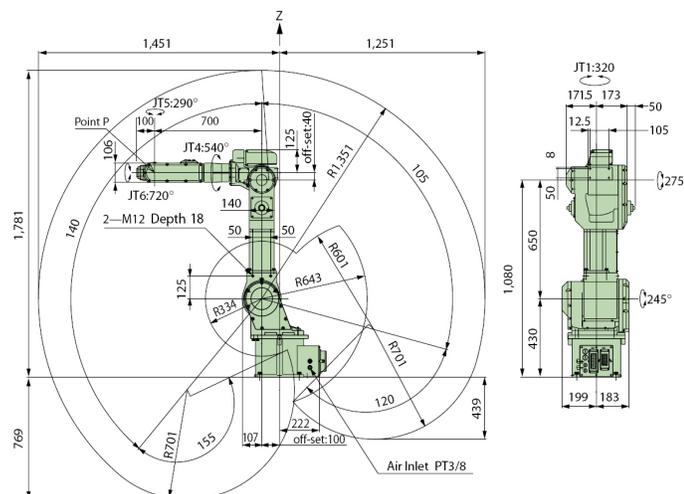
Apéndice C

Especificaciones Técnicas del Manipulador Kawasaki FS10E



Standard Applications:

- Arc Welding
- Dispensing
- Sealing
- Material Handling
- Machine Tending
- Material Removal
- Assembly
- Inspection



Arm Type	Articulated		
Degrees of Freedom	6 (Optionally 7)		
Axes Work Envelope and Maximum Speed	Axis	Work Envelope	Maximum Speed
	Arm Rotation (JT1)	± 160°	200° /s
	Arm Out-In (JT2)	+140° ~ -105°	140° /s
	Arm Up-Down (JT3)	+120° ~ -155°	200° /s
	Wrist Swivel (JT4)	± 270°	360° /s
	Wrist Bend (JT5)	± 145°	360° /s
	Wrist Twist (JT6)	± 360°	600° /s
	Arm Traverse (JT7)	Standard 2000 mm	1200 mm/s
Position Repeatability	±0.1 mm (at center of tool mounting surface)		
Payload	10 kg		
Maximum Linear Speed	8800 mm/s (Maximum Linear Interpolation Speed: 1600 mm/s)		
Wrist Load Capacity	(kgf * cm * s ²) (kg * m ²) (NOTE)		
Driving Motor	Brushless AC Servomotor		
Mass	170 kg (excluding options)		
Color	Kawasaki Standard		
Installation	Floor and ceiling mount		
Ambient Temperature	0 – 45° C for manipulator		
Relative Humidity	35 – 85% non-condensing		
Pneumatic Piping	Built-in Pneumatic Piping		
Power/Signal Cable Length	7 m		
Built-in Circuit	Built-in Sensor Harness; 4 circuits, 24 VDC, GND		
IP Rating	Wrist-IP67; Arm-IP65		
Options	Power/Signal Cable Length: 10 m, 15 m		
	Installation	Wall Mount	
	Protection	Dust Proof	
	Built-in Valve	1D/2D/1S/2S/1S1D	
	Installation Base	Robot Riser 600 mm, Robot Riser 300 mm, Base Plate	
	Mechanical Stopper	JT1,2,3 adjustable (22.5 deg)	
	Cover	Zeroing Surface Protect Cover	
Consult us about Maintenance Parts and Spare Parts.			