

**METODOLOGÍA PARA LA RECONSTRUCCIÓN DE UN ROBOT SERIE,
APLICADO A UN CASO DE ESTUDIO**



**Jorge Ernesto Barajas Castillo
Juan Carlos Ordoñez Bravo**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA, INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL
POPAYÁN
2010**

**METODOLOGÍA PARA LA RECONSTRUCCIÓN DE UN ROBOT SERIE,
APLICADO A UN CASO DE ESTUDIO**

Monografía presentada como requisito parcial para optar por el título de
Ingenieros en Automática Industrial

Jorge Ernesto Barajas Castillo
Juan Carlos Ordoñez Bravo

Director
Sergio Alexander Salinas
Magister en Electrónica y Telecomunicaciones

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA, INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL
POPAYÁN
2010**

Nota de Aceptación

Director

Mg. Sergio Alexander Salinas

Jurado

Ing.

Jurado

Ing.

Fecha de sustentación: Popayán, Junio de 2010

AGRADECIMIENTOS

Los autores del presente trabajo, manifiestan sus agradecimientos a su director, magister Sergio Alexander Salinas, a los ingenieros Oscar Andrés Vivas, Jaime Díaz, Juan Fernando Flórez y demás ingenieros del Departamento de Electrónica Instrumentación y Control, a la Universidad del Cauca, amigos y compañeros, quienes contribuyeron con el desarrollo de este trabajo.

*A mis padres,
por todo lo que se han esforzado
porque llegue este momento.
Este proyecto es, en buena medida,
fruto de su perseverancia y trabajo.*

*A mi hermana,
por comprenderme cuando el estrés
de las tareas se imponía a la razón.*

*A mis tíos,
por el apoyo que me aportaron,
y siguen aportando,
desde el principio de mi carrera.*

*A mis familiares,
amigos y todos aquellos que,
con sus palabras de animo,
me infundieron la fuerza necesaria
para conseguir mis objetivos.*

Jorge Ernesto

*A Dios
por la oportunidad de seguir luchando
cada día por alcanzar un sueño.*

*A mi mamá y mi papá
por la entrega, sacrificio
y confianza de forjar una ilusión
y hacerla realidad*

Juan Carlos

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
1. CONCEPTOS GENERALES	3
1.1. ESTRUCTURA MECÁNICA.....	3
1.1.1. Configuraciones típicas de robots.....	4
1.2. SISTEMAS DE ACTUACIÓN.....	5
1.2.1. Actuadores neumáticos.....	5
1.2.2. Actuadores hidráulicos.....	6
1.2.3. Actuadores eléctricos.....	6
1.3. SISTEMAS DE TRANSMISIÓN	9
1.3.1. Transmisores	9
1.3.2. Reductores de velocidad.....	10
1.4. SISTEMA SENSORIAL.....	10
1.4.1. Clasificación.....	10
1.4.2. Medida de la posición y velocidad	11
1.5. SISTEMAS DE CONTROL ARTICULAR DE ROBOTS SERIE	12
1.5.1. Control cinemático	13
1.5.2. Control dinámico	14
1.5.3. Técnicas de control dinámico en robots manipuladores	15
2. PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA RECONSTRUCCIÓN DE ROBOTS SERIE	20
2.1. ESPECIFICACIÓN DE REQUERIMIENTOS	21
2.2. MODELADO DEL ROBOT	22
2.2.1. Obtención del modelo geométrico directo.....	22
2.2.2. Obtención de los modelos dinámicos.....	24
2.3. OBTENCIÓN DE LOS PARES MECÁNICOS NECESARIOS PARA ACCIONAR CADA UNA DE LAS ARTICULACIONES DEL ROBOT	31

2.3.1. Obtención de los pares mecánicos a partir de la simulación y control sobre una trayectoria definida del robot mediante los modelos dinámicos.....	31
2.3.2. Obtención de los pares mecánicos mediante la simulación del modelo dinámico inverso en lazo abierto.....	33
2.3.3. Obtención de los pares mecánicos necesarios para accionar cada una de las articulaciones mediante pruebas físicas.....	34
2.4. SELECCIÓN DE LOS COMPONENTES TECNOLÓGICOS QUE INTEGRARÁN EL SISTEMA ROBÓTICO.....	35
2.4.1. Sistemas de control.....	36
2.4.2. Actuadores.....	37
2.4.3. Mecanismos de accionamiento.....	40
2.4.4. Sensores.....	42
2.4.5. Hardware de acondicionamiento, transmisión y amplificación de señales.....	47
2.5. MÉTODO DE EVALUACIÓN TECNOLÓGICA.....	48
2.6. INTEGRACIÓN Y PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA ROBÓTICO.....	49
3. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA.....	51
3.1. ESPECIFICACIÓN DE REQUERIMIENTOS.....	52
3.1.1. Evaluación del estado en que se encuentra el robot.....	52
3.2. MODELADO DEL ROBOT.....	53
3.3. OBTENCIÓN DE LOS PARES MECÁNICOS NECESARIOS PARA ACCIONAR CADA UNA DE LAS ARTICULACIONES DEL ROBOT.....	56
3.3.1. Obtención de los pares mecánicos a partir de la simulación y control sobre una trayectoria definida del robot mediante los modelos: dinámico directo y dinámico inverso.....	56
3.3.2. Obtención de los pares mecánicos mediante la simulación del modelo dinámico inverso en lazo abierto.....	59
3.3.3. Obtención de los pares mecánicos necesarios para accionar cada una de las articulaciones mediante pruebas físicas.....	59
3.4. SELECCIÓN DE LOS COMPONENTES TECNOLÓGICOS QUE INTEGRARÁN EL SISTEMA ROBÓTICO.....	60
3.4.1. Sistemas de control.....	60
3.4.2. Actuadores.....	62
3.4.3. Mecanismos de accionamiento.....	65

3.4.4. Sensores.....	67
3.4.5. Hardware de acondicionamiento, transmisión y amplificación de señales.....	69
3.5. INTEGRACIÓN DEL SISTEMA ROBÓTICO	70
3.5.1. Integración de los motores, sistemas de accionamiento y sensores	70
3.5.2. Integración de los sistemas electrónicos y de control	71
3.5.3. Integración y depuración del sistema robótico completo.....	72
4. IDENTIFICACIÓN PARAMÉTRICA Y CONTROL ARTICULAR DEL SISTEMA	75
4.1. IDENTIFICACIÓN PARAMÉTRICA DEL SISTEMA.....	75
4.1.1. Definición del diseño experimental.....	76
4.1.2. Caracterización de la estructura	79
4.1.3. Estimación de parámetros	81
4.1.4. Simulación y validación del modelo estimado	84
4.2. SISTEMA DE CONTROL DEL ROBOT HRA934.....	85
5. CONCLUSIONES.....	89
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	91
ANEXO A. DETERMINACIÓN DE LA FUERZA QUE DEBERÁN TENER ACTUADORES LINEALES PARA ARTICULACIONES ROTACIONALES.....	100
ANEXO B. DESCRIPCIÓN DEL SIETEMA MECATRÓNICO.....	104
B.1. Diagrama en bloques.....	104
B.2. Control y adquisición de datos.....	105
B.3. Amplificador de potencia	105
B.4. Descripción del circuito.....	107
B.5. Control de potencia.....	108
B.6. Tarjeta de potencia.....	109
B.7. Sensores	110
B.8. Esquema de conexionado.....	111
ANEXO C. MANUAL TECNICO Y DE USUARIO	113
C.1. Requerimientos mínimos para la instalación de LabView y funcionamiento del programa.....	113
C.2. Ejecución y manejo de la interfaz de usuario en LabView.....	113

C.3. Desarrollo del software de control mediante LabView.....	113
C.4. Recomendaciones antes de utilizar el programa.....	115
C.5. Programación del panel frontal.....	115
ANEXO D. ESQUEMAS DE CONEXIONES DEL ROBOT	126
ANEXO E. COSTO DE LA RECONSTRUCCIÓN DEL ROBOT HRA934	130

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura1.1. Principales configuraciones de robots manipuladores.....	4
Figura 1.2. Funcionamiento del control cinemático.....	13
Figura 1.3. Esquema de control PID en el espacio articular.	16
Figura1.4. Esquema de control CTC.....	17
Figura 1.5. Control adaptativo por modelo de referencia.	18
Figura 1.6. Sistema de control difuso.....	19
Figura 2.1. Diagrama de flujo que resume la metodología para reconstrucción de robots serie.....	20
Figura 2. 2. Diagrama de flujo para determinar la viabilidad de la reconstrucción de determinado robot.....	22
Figura 2. 3. Transformación de coordenadas.	24
Figura 2. 4. Esquema en donde se indican las distancias x , y y z hasta la base R	30
Figura 2. 5. Diagrama de fuerzas que ejercen un par mecánico sobre el punto O de la barra.	31
Figura 2.6. Esquema para un sistema de control CTC.	32
Figura 2. 7. Esquema para un sistema de control PID.....	32
Figura 2. 8. Esquema para la obtención de los pares mecánicos mediante el MDI en lazo abierto.	33
Figura 2. 9. Esquema del montaje a realizar para determinar los pares necesarios para accionar el manipulador mediante la experimentación física.	34
Figura 2. 10. Esquema del montaje a realizar disponiendo de un torquímetro.....	35
Figura 2. 11. Proceso de evaluación tecnológica, adquisición integración y puesta en marcha del sistema.....	50
Figura 3. 1. Esquema del brazo robótico HRA334 [89].....	51
Figura 3. 2. <i>Processor box robot interface</i> [89].	52
Figura 3. 3. Esquema geométrico del robot HRA934.....	53
Figura 3. 4. Diseño en SolidEdge® de los cuerpos del robot HRA934.	55
Figura 3. 5. Trayectoria articular grado cinco.....	57

Figuras 3. 6. a) Pares obtenidos con un tiempo de duración de la trayectoria de 10 segundos. b) Error articular de la trayectoria de la trayectoria trazada por el robot en un tiempo de 10 segundos. c) Pares obtenidos con un tiempo de duración de la trayectoria de 5 segundos. d) Error articular de la trayectoria de la trayectoria trazada por el robot en un tiempo de 5 segundos.....	58
Figura 3.7. Grafica de los pares necesarios para el accionamiento del robot HRA934 obtenidos mediante la técnica de la simulación del modelo dinámico inverso en lazo abierto.....	59
Figura 3.8. Sistema de accionamiento de la segunda articulación del HRA reconstruido.....	73
Figura 3.9. Esquema de la configuración del sistema robótico HRA934 reconstruido.....	73
Figura 3.10. Robot HRA934 reconstruido	74
Figura 4.1. Proceso de identificación paramétrica de un sistema dinámico	76
Figura 4.2. Formas de onda de las señales de excitación del robot HRA934 reconstruido para su identificación paramétrica.	79
Figura 4.3. Graficas obtenidas en el proceso de estimación de parámetros para la quinta articulación de HRA934.....	83
Figura 4.4. Error articular obtenido en la sintonización del controlador PID para una trayectoria grado tres en diez segundos (línea verde: primera articulación, azul oscuro: segunda, roja: tercera, azul claro: cuarta y violeta: quinta articulación).....	86
Tabla 4.6. Valores utilizados para el controlador PID articular en el robot real.....	86
Figura. 4.5. Graficas de seguimiento de una trayectoria grado tres por el HRA934 reconstruido (a la izquierda) y error articular obtenido en la sintonización del controlador PID con los valores mostrados en la tabla 4.5.	87
Figura A1. Esquema del posicionamiento del motor lineal sobre cada una de las articulaciones.....	101
Figura A2. Fuerzas necesarias para accionar las articulaciones 2, 3 y 4 del robot HRA934 mediante actuadores lineales.....	102
Figura B1. Diagrama en bloques del sistema mecatrónico.....	104
Figura B2. Esquema electrónico de la etapa de potencia para cada uno de los motores del robot.....	106
Figura B3. Diagrama en bloques del puente H.	108
Figura B4. Conexiones de la tarjeta de potencia.	109

Figura B5. Potenciómetro utilizado.	110
Figura C1. Panel frontal de .VI principal.....	113
Figura C2. Diagrama de flujo del programa.	116
Figura C3. Bloque en diagrama de flujo.....	116
Figura C4. Bloque de generación de trayectorial.....	117
Figura C5. Bloque de adquisición y PID en diagrama de flujo.	118
Figura C6. Algoritmo en LabView del bloque <i>adquisición y PID</i>	119
Figura C7. Diagrama de flujo de bloque de PWM.....	121
Figura C8. Algoritmo encargado de generación y envío de PWM.....	122
Figura C9. Diagrama de flujo de <i>bloque de datos</i>	123
Figura C10. Rutina de cargar datos.	124
Figura C11. Rutina de guardar datos.....	125
Figura D1. Diagrama de conexiones del las fuentes de alimentación y el sistema de adquisición de datos	127
Figura D2. Diagrama de conexiones de los sensores de posición angular.....	128
Figura D3. Diagrama de conexiones del sistema de control y de potencia	129

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 2. 1. Parámetros geométricos de un robot serie.	23
Tabla 2. 2. Alternativas tecnológicas para el lazo de control de un sistema robótico.....	37
Tabla 2. 1. Posibles actuadores a instalarse en el robot en reconstrucción..	40
Tabla 2. 4. Mecanismos de accionamiento posibles para cada una de las articulaciones del robot.....	42
Tabla 2. 5. Alternativas para la escogencia de sensores a instalarse en el robot en reconstrucción.....	46
Tabla 2. 6. Posibilidades para la reconstrucción del hardware del robot.....	47
Tabla 3. 1. Tabla de parámetros geométricos del robot HRA934.	53
Tabla 3. 2. Tabla de parámetros de base del robot HRA934.....	54
Tabla 3. 3. Valores numéricos para X_j , Y_j , Z_j , D_j , R_j e IA_j y las distancias para la simulación del robot HRA934.....	56
Tabla 3.4. Valores con los cuales se sintonizó el controlador CTC para determinar los pares necesarios para accionar cada una de las articulaciones del robot HRA934.....	58
Tabla 3.5. Pares necesarios para accionar las articulaciones 2, 3 y 4 del robot en reconstrucción utilizando el método de pruebas físicas.....	59
Tabla 3.6. Resumen de los pares obtenidos para el accionamiento de cada una de las articulaciones del robot HRA934 y la selección definitiva del par que tendrán los actuadores.....	60
Tabla 3.7. Prioridades a tener en cuenta a la hora de la evaluación del módulo en el que irá montado el sistema de control.....	61
Tabla 3.8. Resultado de la evaluación de las tecnologías para el modulo de control del robot HRA934.....	61
Tabla 3.9. Evaluación del software en el que se implementará el sistema de control del robot en reconstrucción [93] - [96].....	62
Tabla 3.10. Evaluación de las fuentes de alimentación para los actuadores del robot HRA934.....	63

Tabla 3.11. Características prioritarias estipuladas numéricamente tenidas en cuenta a la hora adquirir los actuadores para el robot HRA934.	64
Tabla 3.12. Resultado de la evaluación de los posibles actuadores que se instalaran en el manipulador que se está reconstruyendo.	64
Tabla 3.13. Características prioritarias a tener en cuenta a la hora adquirir los mecanismos de accionamiento para el robot HRA934.....	66
Tabla 3.14. Resultado de la evaluación de los mecanismos de accionamiento que se propone instalar en el robot HRA934.....	66
Tabla 3.15 Características prioritarias a tener en cuenta a la hora adquirir los sensores de presencia para el robot caso de estudio.	67
Tabla 3.16. Resultados de la evaluación de los sensores de presencia para la aplicación de la metodología en la reconstrucción del robot HRA934.	67
Tabla 3.17. Características prioritarias a tener en cuenta a la hora adquirir los sensores de posición para la reconstrucción del robot HRA934.	68
Tabla 3.18. Resultados de la evaluación de los sensores de posición para la aplicación en la reconstrucción del robot HRA934.....	68
Tabla 3.19. Criterios prioritarios a la hora de hacer la selección del hardware de acondicionamiento de señales.....	69
Tabla 3.20. Resultados de la evaluación de las posibilidades tecnológicas para el hardware de acondicionamiento de señales.	70
Tabla 4.1. Ancho de banda del robot HRA934 reconstruido.....	78
Tabla 4.2. Resultados obtenidos en el primer proceso de estimación de parámetros de la quinta articulación del robot en simulación.....	82
Tabla 4. 3. Resultados obtenidos en el segundo proceso de estimación de parámetros de la quinta articulación del robot en simulación.....	82
Tabla 4. 4. Resultados obtenidos en el tercer proceso de estimación de parámetros de la quinta articulación del robot en simulación.....	83
Tabla 4.5. Valores utilizados para el controlador PID articular en simulación.....	86
Tabla 4.6. Valores utilizados para el controlador PID articular en el robot real.....	86
Tabla B1. Estados del motor.....	108
Tabla B2. Rango de voltajes en cada una de las articulaciones.....	110
Tabla C1. Vi utilizados en el bloque de <i>adquisición y PID</i>	121

Tabla C2. .vis utilizados en el bloque de <i>PWM</i>	123
Tabla E1. Costo del proyecto.....	130

INTRODUCCIÓN

Hoy día, las sociedades avanzadas se sirven de los adelantos de la tecnología para suplir al hombre en la realización de tareas tediosas o pesadas, esto sin duda ha dado lugar al desarrollo de la robótica y la automatización. En la robótica industrial, se trata fundamentalmente de dotar de flexibilidad a los procesos productivos manteniendo al mismo tiempo el nivel de productividad que se consigue con una máquina automática especializada [1].

En la actualidad, la industria requiere realizar tareas con gran precisión, rapidez y a bajo costo. Más aun, la industria de un país en desarrollo como Colombia, que busca competir a nivel mundial a través de los productos que ofrece en el mercado, por ello se puede argüir que la automatización es una necesidad para las industrias [2].

La manufactura mediante robots industriales es una estrategia que contribuye en gran parte a la competitividad empresarial en el campo de producción de bienes, esto es posible gracias a que los robots sustituyen ventajosamente al humano en todas las labores repetitivas, como asegurar la transferencia de piezas fabricadas y realizar los trabajos en serie. Gracias a ellos, se obtiene una buena velocidad de ejecución y la tasa de error es mínima [3].

El gran problema que se presenta en nuestro país y en general en los países en vía de desarrollo, es que estos beneficios implican altos costos, y muchas veces los empresarios no disponen de los medios económicos necesarios, o no están dispuestos a invertir en ello. Quizá esto se deba a una falta de conocimiento o asesoría en cuanto a los beneficios que estas tecnologías proporcionarían a sus empresas.

Pero no sólo en la industria se carece de capital para la adquisición de robots. También en las universidades existe este inconveniente y posiblemente mucho más agudo que en las empresas de producción. Esto impide que los estudiantes tengan una formación teórico-práctica óptima que les permita tener un nivel idóneo de competitividad en su vida profesional. La falta de material sobre la cual se puedan realizar experimentos en robótica, genera un vacío en esta parte de la formación académica.

Sin embargo, en empresas y universidades colombianas existe gran diversidad de robots que por algún motivo no están en operación. Muchos de ellos han sufrido alguna avería y nunca fueron reparados, otros están

obsoletos debido a que se perdió el contacto con los proveedores de piezas y software actualizado, u otras veces las empresas fabricantes desaparecieron y con ellas el soporte respectivo. Pero las estructuras mecánicas de estos robots pueden estar en perfecto estado, solamente es necesario un trabajo organizado de actualización y puesta a punto del material, que tanto dinero ha costado a la empresa o universidad, para colocarlo de nuevo en funcionamiento.

A diferencia de las soluciones en las que se propone la construcción de un robot partiendo de cero [4]-[7] o dando una solución particular a la reconstrucción de un sistema robótico [8] [9], en este proyecto se realiza una metodología sistemática, clara y eficiente, que permita al entorno académico y empresarial disponer de una herramienta de guía para la reconstrucción o repotenciación de un robot serie, cuyos costos se podrían ajustar a cada una de las posibilidades y necesidades que puedan surgir en cada proyecto. La metodología, producto de este estudio, se plantea como general y aplicable a cualquier robot académico o industrial de estructura serial, ya que la mayor parte de los robots industriales son esencialmente brazos articulados controlados [10].

La aplicación de la metodología se probó en un caso de estudio: el robot HRA934 de la empresa FeedBack, robot serie de cinco grados de libertad, que posee la Universidad del Cauca y que había quedado en desuso.

En el primer capítulo de este texto encontrará los conceptos básicos sobre robots manipuladores y sus principales componentes. El segundo muestra la metodología propuesta para la reconstrucción de robots de estructura serial. En el tercero se da a conocer la aplicación de la metodología en el robot HRA934. El cuarto capítulo hace referencia a la identificación paramétrica de robots, las razones por las cuales no fue posible identificar el robot caso de estudio y los resultados obtenidos con el controlador implementado para el robot, y finalmente se presentan las conclusiones del proyecto.

1. CONCEPTOS GENERALES

La definición de robot industrial de la RIA (Asociación de Industrias de Robótica), que coincide con la ISO (Organización Internacional de Estándares) es “...Manipulador multifuncional reprogramable, con varios grados de libertad, capaz de manipular materias, piezas, herramientas o dispositivos especiales según trayectorias variables programadas para realizar tareas diversas...” [10].

Un robot está formado por los siguientes elementos: Estructura mecánica, sistema de transmisión, sistema de accionamiento, sistema sensorial, sistema de control, dispositivos de entrada y salida y elementos terminales [10] [11].

1.1. ESTRUCTURA MECÁNICA

Un mecanismo es un medio para transmitir, controlar o limitar un movimiento relativo. Mecánicamente el robot está formado por eslabones consecutivos, unidos por articulaciones que permiten un movimiento relativo entre cada dos eslabones consecutivos. El movimiento de cada articulación puede ser prismática, rotacional, o una combinación de ambos. De este modo son posibles diferentes tipos de articulaciones aunque en la práctica en los robots solo se emplean la de rotación y la prismática [11].

El número de grados de libertad del robot es igual a la suma de todos los de cada articulación por separado.

Las partes que conforman el manipulador reciben, entre otros, los nombres de: brazo, muñeca y efector final (o elemento terminal). A este último se le conoce habitualmente como aprehensor, garra, pinza o *gripper* [12].

El brazo está constituido por la concatenación de miembros y articulaciones. Un miembro consiste básicamente en una barra rígida y está unido a otros miembros a través de articulaciones montadas en sus extremos, el brazo permite posicionar el extremo del robot en cualquier punto del espacio para esto se necesita 3 grados de libertad no singulares [13].

En algunas tareas de manipulación suele ser necesario que el efector final tenga determinada orientación en el espacio, esto se logra añadiendo al extremo del brazo una muñeca la cual dota al robot de grados de libertad adicionales. Para orientar el efector final en cualquier punto en el espacio son necesarios 3 grados de libertad, aunque también son habituales muñecas

con menos grados de libertad, esto dependerá de la labor para la cual fue diseñado el robot [14].

1.1.1. Configuraciones típicas de robots

El empleo de diferentes combinaciones de articulaciones en un robot, da lugar a diferentes configuraciones con unas características determinadas que influirán en cuestiones tan diversas como son, el diseño del sistema de control o la distribución de los elementos motores [15].

A continuación se presenta cinco configuraciones comúnmente disponibles en el comercio de los robots industriales (Figura 1.1).

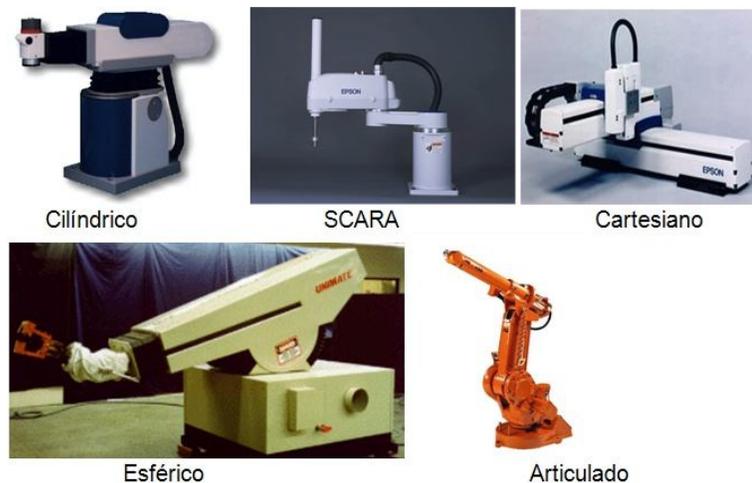


Figura 1.1. Principales configuraciones de robots manipuladores [9] [11] [12].

- **Cartesiana / Rectilínea:** El posicionando en el espacio de trabajo se hace con articulaciones prismáticas. Esta configuración es bastante utilizada cuando debe cubrirse un gran espacio trabajo. Sus tres grados de libertad corresponden a los movimientos localizados en los ejes X, Y y Z, el espacio de trabajo de un robot cartesiano es una caja rectangular, la configuración no es adecuada para acceder a puntos en espacios relativamente cerrados [15] [16] [17].
- **Cilíndrica:** El robot tiene un movimiento de rotación sobre una base, una articulación prismática para la altura, y una prismática para el radio. Esta configuración es útil cuando las tareas a ser realizadas se localizan en un radio definido dentro del cual no hay obstrucciones [18] [19].
- **Esférica / Polar:** con dos articulaciones rotacionales y una prismática permiten al robot orientarse en muchas direcciones, y extender el efector final

a poca distancia radial. Los movimientos son: rotacional, angular y lineal, esta configuración permite alcanzar un gran espacio de trabajo [18].

- **SCARA:** consiste en dos articulaciones rotacionales con respecto a dos ejes paralelos y una prismática en sentido perpendicular al plano, así las dos primeras articulaciones no trabajan con las fuerzas gravitatorias de los eslabones y de la carga útil. Este brazo puede realizar movimientos horizontales debido a sus dos articulaciones rotacionales y un movimiento lineal mediante su tercera articulación. Esta configuración esta especialmente diseñada para realizar tareas de montaje en un plano [17].
- **Articulado:** El robot usa tres articulaciones de rotación para posicionarse. Generalmente el espacio de trabajo es esférico, debido a que tiene mejor acceso a espacios cerrados. Muchos robots industriales, educativos y para actividades de investigación y desarrollo son del tipo articulado [16] [18].

1.2. SISTEMAS DE ACTUACIÓN

Son dispositivos que efectúan acciones físicas para generar el movimiento de los elementos del robot, según las órdenes dadas por algún sistema de control. Esta acción física puede ser un movimiento lineal o circular, según sea el caso. Los actuadores utilizados en robótica generalmente emplean energía neumática, hidráulica o eléctrica. Cada uno de estos sistemas presenta características diferentes, siendo preciso evaluarlas a la hora de seleccionar el tipo de actuador más conveniente. Las características a considerar son entre otras: potencia, controlabilidad, peso, volumen, precisión, velocidad, mantenimiento, costo [18] [19] [20] [21].

Estas características dependen del proceso a controlar y la acción que se tiene que llevar a cabo dentro del espacio de trabajo. A continuación se detalla los tres tipos de actuadores citados según la energía utilizada.

1.2.1. Actuadores neumáticos

Este tipo de actuador utiliza como fuente de energía la presión del aire. Dado que el aire es altamente compresible el control preciso de la velocidad y posición es muy difícil, además estos parámetros dependen directamente de la carga. Por un lado esto representa una desventaja. Sin embargo su sencillez, bajo costo, sus componentes confiables y de mantenimiento sencillo, resistencia a los daños causados por una sobrecarga, y robustez hacen adecuado su uso en aquellos casos en los que sea suficiente un

rápido posicionamiento en dos situaciones diferentes (todo o nada). En robótica se utiliza básicamente dos tipos de unidades [22] [23]:

- **Cilindros neumáticos:** en los cuales se consigue el desplazamiento de un émbolo encerrado en un cilindro como consecuencia de la diferencia de presión en sus lados. Normalmente en los cilindros neumáticos se persigue un posicionamiento en sus extremos y no un posicionamiento continuo.
- **Motores neumáticos:** en estos se consigue el movimiento de rotación de los ejes por medio de aire a presión.

1.2.2. Actuadores hidráulicos

Este tipo no se diferencia mucho a los neumáticos, en lugar de aire se utilizan aceites minerales; al igual que en los neumáticos existen tipo cilindro y motor.

Sin embargo, las características del fluido utilizado en los actuadores hidráulicos marcan ciertas diferencias con los neumáticos. En primer lugar, el grado de compresibilidad de los aceites usados es considerablemente menor al del aire, por lo que la precisión obtenida en este caso es mayor. Por motivos similares, es más fácil en ellos realizar un control continuo, logrando posicionar su eje en todo un intervalo de valores (haciendo uso del servocontrol) con notable precisión. Además, las elevadas presiones de trabajo, diez veces superiores a las de los actuadores neumáticos, permiten desarrollar elevadas fuerzas y pares [20].

Los actuadores hidráulicos lineales son más compactos y robustos que sus equivalentes eléctricos o neumáticos, y por lo tanto están indicados para su uso en robots con juntas prismáticas.

La exigencia de elementos de control y la presurización de fluidos hidráulicos hace que el costo de estos sistemas sea alto, por lo que es ventajoso sólo en los brazos de gran tamaño [10] [20].

1.2.3. Actuadores eléctricos

Se le da el nombre de actuadores eléctricos a los dispositivos que usan la energía eléctrica para que el robot ejecute sus movimientos. Las características de control, sencillez, exactitud, precisión y repetitividad de los accionamientos eléctricos han hecho que sean los más usados en los robots industriales, comerciales y experimentales actuales.

Generalmente los robots de tamaño pequeño o mediano utilizan actuadores eléctricos. Los actuadores eléctricos comúnmente usados en la robótica son: motor de corriente continua o DC, servo motor y motor paso a paso. Los motores de corriente alterna se usan raramente por la dificultad de controlarlos con precisión, y por depender su velocidad de giro de la frecuencia de la corriente alterna que los alimenta, la cual no se puede variar más que con dispositivos electrónicos complejos [24].

A continuación se describe más detalladamente algunos actuadores eléctricos utilizados en la robótica [22] [25].

- **Motores de corriente continua (DC)**

Los motores DC tienen un movimiento suave y un par máximo superior que los motores paso a paso y puede ser utilizado a altas velocidades, el par de salida es directamente proporcional a la corriente aplicada. En comparación con los motores paso a paso, requieren de una señal de retroalimentación para un funcionamiento estable.

Los motores DC disponen de dos devanados: el inductor, situado en el estator, es el que genera el campo magnético. Y el inducido en el rotor. Ambos devanados son alimentados con corriente continua. El colector funciona como un conmutador, sincronizado con el motor, manteniendo el desfase entre los campos magnéticos del rotor y el estator.

Los motores de excitación independiente son los que presentan mayor interés para la robótica. En este tipo de motores, el rotor y el estator son alimentados por fuentes de tensión independiente. El control de la velocidad se efectúa hasta la velocidad nominal del motor, actuando sobre la tensión de alimentación del rotor, manteniendo constante el flujo del estator. Se distinguen dos técnicas de control:

- Variar la magnitud de la tensión aplicada al rotor. Este método no es del todo eficaz, especialmente a bajas velocidades.
- Actuar sobre el tiempo durante el cual se aplica tensión al motor, manteniendo constante la magnitud de la misma. Al detectarse que el motor supera la velocidad deseada, se corta la alimentación, y viceversa. Este método de control de la velocidad se conoce como PWM (modulación por ancho de banda).

Los motores DC son controlados mediante referencias de velocidad. Estas normalmente son seguidas mediante un bucle de retroalimentación de velocidad analógica, que se cierra mediante una electrónica específica. Sobre este bucle de velocidad se coloca otro de posición, en el que las

referencias son generadas por la unidad de control, sobre la base del error entre la posición deseada y la real.

El motor DC presenta el inconveniente del obligado mantenimiento de las escobillas. Por otra parte, no es posible mantener el par con el rotor parado más de unos segundos, debido al calentamiento que se produce en el colector.

Para evitar estos problemas se han desarrollado motores sin escobillas. En éstos, los imanes de excitación se sitúan en el rotor, y el devanado del inducido en el estator, con lo que es posible convertir la corriente mediante interruptores estáticos, que reciben la señal de conmutación de un detector de posición del rotor [10].

- **Servo-motores**

Los servo motores son usados en variedad de aplicaciones en la robótica, se utilizan para el mando de motores y precisión en el posicionamiento, básicamente cualquier motor puede usarse en un sistema servo, pero generalmente se usa un motor del imán permanente, el servomotor además de un motor incorpora algunos dispositivos como son un reductor junto con un sensor de posición (angular o lineal), generalmente se utiliza un potenciómetro, y pequeños circuitos integrados para el control realimentado, los servomotores son extremadamente compactos, fáciles de controlar, pequeños y se encuentran en amplia variedad de torques, la limitación principal del servomotor es que no puede mover cargas grandes [20] [22].

El eje del servomotor puede moverse a una posición angular específica enviándole un punto de consigna codificado, en general se utiliza una señal PWM (*Pulse Width Modulation*), o sea que la posición angular dependerá del ancho de pulso enviado [23].

- **Motores lineales eléctricos**

Un motor lineal es un dispositivo compacto que incorpora un motor eléctrico en conjunto con una caja reductora que transforma el movimiento rotacional del motor en un movimiento prismático, su ventaja es que puede transmitir gran cantidad de carga a bajo costo y sus desventajas es que son mecánicamente poco eficientes y producen juegos de posicionamiento, algunos de estos dispositivos traen incorporado un sensor de posición que puede ser utilizado para realizar un control realimentado [24].

- **Motores paso a paso**

El principio de funcionamiento de los motores paso a paso consiste en que, al suministrar un pulso de corriente al estator, el motor gira un determinado

ángulo o paso. El ángulo girado por el motor se controla con el número de pulsos suministrados, y su velocidad, por la frecuencia de los pulsos [25] [26].

Estos motores poseen la habilidad de poder quedar enclavados en una posición, son fiables, fáciles de controlar, pues al ser cada estado de excitación del estator estable, el control se realiza en bucle abierto, sin la necesidad de sensores de realimentación [10] [24].

Entre los inconvenientes se puede citar que su funcionamiento a bajas revoluciones no es suave, y que existe el peligro de pérdida de una posición por trabajar en bucle abierto. Tienden a sobrecalentarse trabajando a velocidades elevadas y presentan un límite en el tamaño que pueden alcanzar. Su par máximo se alcanza a bajas revoluciones, se emplean para el posicionamiento de ejes que no precisan de grandes potencias [27].

- **Motores de corriente alterna (AC)**

Este tipo de motores no ha tenido aplicación en robótica hasta hace unos años, debido fundamentalmente a la dificultad de su control. Sin embargo, las mejoras que se han introducido en las máquinas síncronas hacen que se presenten como un claro competidor de los motores de corriente continua.

Esto se debe principalmente a tres factores: la construcción de los motores síncronos sin escobillas; el uso de convertidores estáticos que permiten variar la frecuencia (y así la velocidad de giro) con facilidad y precisión; y el empleo de la microelectrónica, que permite una gran capacidad de control. Existen dos tipos fundamentales de motores de corriente alterna: Los motores asíncronos y los síncronos [10] [22].

1.3. SISTEMAS DE TRANSMISIÓN

Elementos encargados de transmitir el movimiento desde los actuadores hasta las articulaciones y del desempeño dinámico del robot, [20] a continuación se presentan dos tipos de transmisión.

1.3.1. Transmisores

Dado que los movimientos en los extremos del robot se dan con aceleraciones elevadas, es importante reducir su momento de inercia; del mismo modo los pares estáticos que deben vencer los actuadores dependen de la distancia de las masas al actuador. Por esto, se trata de que el actuador se encuentre lo más cercano posible a la base del robot; esta circunstancia obliga a utilizar sistemas de transmisión que trasladen el

movimiento hasta las articulaciones, en especial las de los extremos del robot. También los transmisores se pueden usar para convertir el movimiento circular en lineal y viceversa.

Es muy importante que el sistema de transmisión a utilizar no afecte al movimiento que transmite, ya sea por el rozamiento inherente a su funcionamiento o por las holguras que su desgaste pueda introducir. También hay que tener en cuenta que el sistema de transmisión sea capaz de soportar un funcionamiento continuo a un par elevado y, a ser posible, entre grandes distancias. Las transmisiones más habituales son los engranajes, las correas dentadas y las cadenas [10] [27].

1.3.2. Reductores de velocidad

Los motores eléctricos tienen un problema ya que se mueven a alta velocidad con bajo par mecánico, para solucionar este problema se utilizan los reductores, que son los encargados de adaptar el par y la velocidad de la salida del actuador a los valores adecuados para el movimiento de los elementos del robot [14]. Se buscan reductores de bajo peso, reducido tamaño, bajo rozamiento y que al mismo tiempo sean capaces de realizar una reducción elevada de velocidad.

1.4. SISTEMA SENSORIAL

Un sensor es un dispositivo que convierte una señal de una forma física en una señal correspondiente pero de otra forma física distinta, es por tanto un dispositivo que convierte un tipo de energía en otro [28] [29].

1.4.1. Clasificación

Desde el punto de vista de la robótica, los sensores pueden ser divididos en dos grandes categorías, de acuerdo con su uso en un robot [22]:

- Sensores internos: son usados para medir posición, velocidad y aceleración de juntas o extremidades de un robot manipulador.
- Sensores externos: son utilizados para monitorear al robot y su relación con el entorno.

1.4.2. Medida de la posición y velocidad

Para controlar el movimiento de cada uno de los ejes de un robot es necesario conocer en todo instante tanto su posición como su velocidad. Por tanto, se incorpora al sistema de transmisión de cada eje, un dispositivo que proporcione una medida de la posición y velocidad del accionamiento de dicho eje. Según ésta sea rotacional o traslacional, el sensor deberá tener una estructura mecánica adaptada a la medición de ángulos o de distancias.

La precisión en el posicionamiento no sólo dependerá de la resolución del sensor de posición, sino también de efectos no considerados como flexión de la estructura o juegos angulares introducidos por elementos reductores. En el caso de utilizar reductores, se debe notar que los requerimientos de resolución también se reducen cuando se coloca el sensor en el eje del motor.

Los sensores de posición son captadores capaces de medir la posición absoluta de un objeto, o la distancia recorrida desde un punto de referencia, generando a la salida una señal eléctrica proporcional a la magnitud que se desea medir. Pueden ser clasificados atendiendo dos criterios [26] [28] [30] [31]:

- En función del tipo de señal de salida que originen, se clasifican en analógicos y digitales.
- En función del tipo de movimientos, en angulares y lineales.
- **Potenciómetro:** Es un resistor con un contacto móvil deslizante o giratorio. El contacto móvil divide la caída de tensión en la resistencia en dos, el valor de la tensión en el contacto móvil es proporcional a su posición. Las ventajas del uso de un potenciómetro son su reducido tamaño, simple, robusto y permite tener exactitudes elevadas en relación con su precio. Sin embargo, sufre deterioro con el tiempo debido a las partes móviles mecánicas, resulta un dispositivo de resolución insuficiente para la robótica, no puede ser usado en sistemas donde se requieran grandes precisiones, en potenciómetros de calidad puede conseguirse errores lineales del 0,1%, por lo tanto lo hacen apto para ejes de poca importancia o robots educativos [13] [16] [29] [32].

- **Resolvers y sincroresolvers:** Básicamente están formados por un rotor y un estator. En un resolver, el estator consta de dos devanados, a 90° uno con respecto al otro, al excitar el rotor con una señal alterna, en los devanados del estator se obtienen como salida dos señales senoidales de la misma frecuencia que la señal de entrada y desfasadas 90° entre sí. La amplitud de las señales de salida depende del ángulo existente entre rotor y estator. En los sincroresolvers, el estator tiene tres devanados desfasados 120° y, de igual modo, la amplitud de las señales de salida representa una medida del desplazamiento [26].
- **Inductosyn-regla magnética:** Es equivalente al resolver. Una regla de lectura con un devanado plano actúa como estator, y un cabezal de lectura con dos devanados desfasados 90° , como rotor. El cabezal de lectura se desplaza sobre la regla [26].
- **Encoder óptico:** Un encoder es un sensor digital de posición que mediante unos dispositivos ópticos convierten una magnitud de posición lineal o angular detectando el movimiento de traslación o rotación de un eje, transformando la posición en una señal digital que mediante una electrónica asociada permite captarla, adecuarla, procesarla y mostrarla. En otras palabras un encoder es una unidad de realimentación que informa de las posiciones actuales de las articulaciones del robot de forma que puedan ser comparadas con posiciones deseadas y sus movimientos sean planeados. Un encoder opera solidariamente al eje de un accionamiento cuya posición y velocidad se desea determinar. En el mercado existen dos clases principales de encoders: incrementales y absolutos.
- **Los encoders incrementales:** (contrario a los absolutos) no determinan la posición absoluta de un eje, sino su posición relativa a la posición de origen. Por tanto, cada vez que se alimenta de nuevo el sensor, es decir cada vez que se arranca el robot, es necesario realizar una secuencia de búsqueda de ceros [26] [28] - [30].

1.5. SISTEMAS DE CONTROL ARTICULAR DE ROBOTS SERIE

El objetivo de un sistema de control articular (que comúnmente se constituye por ecuaciones matemáticas y/o algoritmos computacionales) es lograr que el robot trace, de manera autónoma, trayectorias idénticas a las propuestas por el usuario mediante ecuaciones matemáticas parametrizadas o matrices numéricas que indican la posición de cada articulación en cada instante de tiempo t , según el periodo de muestreo [18].

1.5.1. Control cinemático

El control cinemático establece cuáles son las trayectorias que debe seguir cada articulación del robot a lo largo del tiempo, para lograr los objetivos fijados por el usuario (punto de destino, trayectoria cartesiana del efector final del robot, tiempo invertido por el usuario, etc.). Estas trayectorias se seleccionan atendiendo las restricciones físicas propias de los accionamientos, y a ciertos criterios de calidad en la trayectoria como suavidad en los movimientos o precisión [10] [18].

- **Funciones de control cinemático**

La Figura 1.2, muestra de manera esquemática el funcionamiento del control cinemático. Recibe como entradas los datos procedentes del programa del robot escrito por el usuario (punto de destino, precisión, tipo de trayectoria deseada, velocidad o tiempo invertido, etc.) y, apoyándose en el modelo cinemático del robot, establece las trayectorias para cada articulación como funciones del tiempo. Estas trayectorias deben ser muestreadas con un período T a decidir, generándose en cada instante de tiempo kT un vector de referencias articulares para los algoritmos de control dinámico [33].

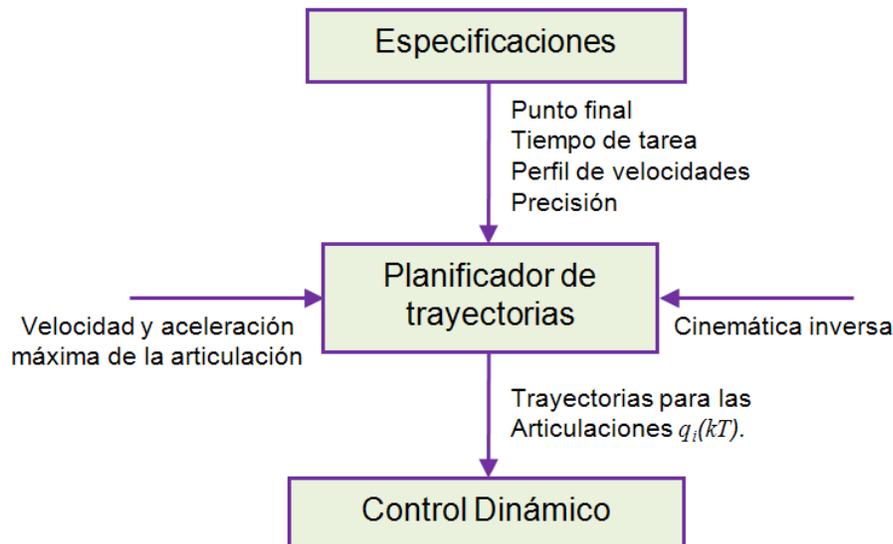


Figura 1.2. Funcionamiento del control cinemático [33].

- **Tipos de trayectorias**

Para realizar una tarea determinada, el robot debe moverse desde un punto inicial hasta un punto final. Este movimiento puede realizarse siguiendo un número infinito de trayectorias espaciales. De todas ellas hay algunas que, por su sencillez de implementación, utilidad y aplicación en diversas tareas,

son las que incorporan en la práctica los robots comerciales. Así, puede ocurrir que los robots dispongan de trayectorias punto a punto, coordinadas y continuas [10].

Trayectorias punto a punto: En este tipo de trayectorias, cada articulación evoluciona desde su posición inicial a la final sin realizar consideración alguna sobre el estado o evolución de las demás articulaciones. Normalmente, cada actuador trata de llevar a su articulación al punto de destino en el menor tiempo posible.

Trayectorias coordinadas o isócronas: Para evitar que algunos actuadores trabajen forzando sus velocidades y aceleraciones, teniendo que esperar después la conclusión del movimiento de la articulación más lenta, puede hacerse un cálculo previo, averiguando cuál es esta articulación y qué tiempo invertirá. Se ralentizará entonces el movimiento del resto de los ejes para que inviertan el mismo tiempo en su movimiento, acabando todos ellos simultáneamente. Se tiene así que todas las articulaciones se coordinan, comenzando y acabando su movimiento a la vez, adaptándose todas a la más lenta.

Trayectorias continuas: Cuando se pretende que la trayectoria que sigue el extremo del robot sea conocida por el usuario (trayectoria en el espacio cartesiano o de la tarea), es preciso calcular de manera continua las trayectorias articulares.

1.5.2. Control dinámico

El control cinemático selecciona trayectorias que idealmente deberá seguir el robot, para teniendo en cuenta sus limitaciones ajustarse lo mejor posible a las especificaciones del movimiento dadas por el usuario. En la práctica, este ajuste del movimiento del robot a las especificaciones del usuario no será del todo posible, pues las características dinámicas del robot (inercias, rozamiento, holguras, etc.) impiden, en general, que las trayectorias real y deseada coincidan [10] [18] [34].

El control dinámico tiene como objetivo procurar que las trayectorias realmente seguidas por el robot $q(t)$ sean lo más parecidas posible a las propuestas por el control cinemático como trayectorias deseadas $q_d(t)$. Para llevar a cabo esa tarea hace uso del conocimiento del modelo dinámico del robot y de las herramientas de análisis y diseño aportadas por la teoría del servocontrol (estabilidad de Lyapunov [35] [36], control PID [34], control adaptativo [10] [37], etc.).

El modelo dinámico de un robot es fuertemente no lineal, multivariable, acoplado y de parámetros variantes, por lo que, en general, su control es

extremadamente complejo. En la práctica se llevan a cabo ciertas simplificaciones, que resultan aceptables para un gran número de los robots comerciales, las cuales facilitan el diseño del sistema de control proporcionando unos resultados razonablemente buenos, aunque limitan en ciertas situaciones la calidad de sus prestaciones [1] [10] [36].

Una posibilidad para controlar el movimiento articular es considerar un modelo de robot compuesto por la superposición de articulaciones totalmente independientes unas de otras, sin tener en cuenta la interacción entre ellas, que sin duda existe y condiciona el movimiento global. Por tanto, en esta situación el modelo dinámico empleado es directamente el correspondiente al accionador de una articulación. Este modo de control se conoce como control desacoplado o monoarticular. Su principal ventaja es su mayor simplicidad de cálculo y es habitual implementar controladores PID [27] [34] [38], controladores PID con prealimentación y controladores PD con compensación de gravedad [10]. La principal desventaja surge en aquellas ocasiones en las que existe una gran influencia del movimiento de una articulación sobre el de otras, y, por ende, sobre el movimiento global.

El control acoplado o multiarticular se basa en un modelo de robot en el que se considera el modelo dinámico global del mismo, es decir, se tiene en cuenta la influencia de los movimientos de las articulaciones entre sí. Desde el punto de vista analítico, este planteamiento resulta más complejo. Las técnicas de control utilizadas son las basadas en control PID y control por prealimentación, ampliamente extendidas, utilizándose también en ocasiones la linealización por inversión del modelo. También se emplean técnicas de control más potentes, como el control adaptativo [23] [34] [36] [37] [39].

1.5.3. Técnicas de control dinámico en robots manipuladores

A continuación se describen brevemente algunas de las técnicas que son altamente aplicadas en el control de robots industriales así como en el ambiente académico por su alta eficiencia, bajo costo económico y computacional o simplicidad en su implementación.

- **Control Proporcional Integral Derivativo (PID)**

Esta es una técnica de control clásico muy utilizada en robots industriales debido a que este tipo de controlador ofrece ciertas ventajas, como la facilidad de implementación, relativa simplicidad en la sintonización de sus parámetros, la amplia teoría desarrollada al respecto y la baja carga computacional requerida en su funcionamiento [40] [41]. Sin embargo, las características propias de un robot serie como las de no-linealidad y dinámicas acopladas, hacen que este controlador se vea afectado en su rendimiento principalmente por la variabilidad del desempeño dinámico

según la configuración del manipulador y la poca exactitud en el seguimiento de trayectorias a velocidades elevadas [42]. Además el PID necesita ser sintonizado para cada tarea que le sea programada al manipulador, lo que se convierte en gran inconveniente si el robot necesita realizar varias funciones de manera consecutiva en su puesto de trabajo [43] [44].

El fundamento matemático que soporta un sistema de control PID en el espacio articular para robots seriales está dado por la ecuación 1, y su esquema se indica en la Figura 1.3 [40] [42].

$$\Gamma = K_p (q^d - q) + K_d (\dot{q}^d - \dot{q}) + K_i \int_{t_0}^t (q^d - q) d\tau \quad (1)$$

Donde:

q_d : Posición articular deseada

\dot{q}_d : Velocidad articular deseada

K_p, K_i, K_d : Matrices diagonales definidas y positivas $n \times n$ cuyos elementos son la ganancia proporcional, integral y derivativa del controlador para cada articulación j del robot.

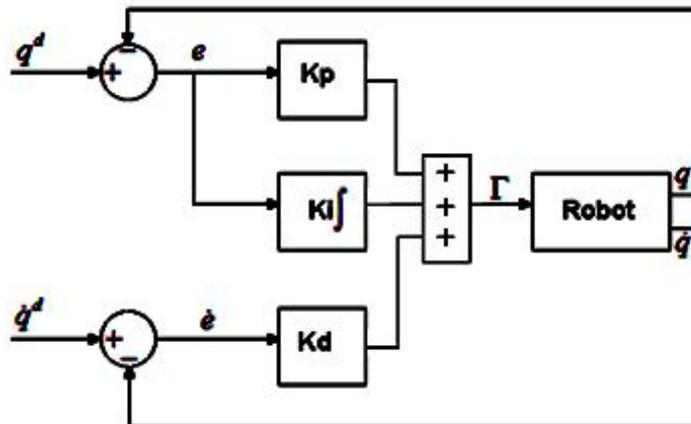


Figura 1.3. Esquema de control PID en el espacio articular [44].

La implementación del controlador de la forma como se ve en la figura anterior permite anular el efecto de perturbaciones en régimen permanente, así como conseguir que la salida q alcance a la entrada después de tiempo establecido. Sin embargo, no garantiza que ante una trayectoria de entrada q_d , la salida coincidiese con ella en todo momento [41][42].

- **Control por par calculado (CTC: *Computed Torque Control*)**

El sistema de control por par calculado es una excelente solución teórica para el control de robots, ya que este tipo de control asegura el desacople y la linealización de las ecuaciones del modelo las cuales son no lineales y acopladas. El inconveniente que presenta este método es que es necesario conocer el modelo dinámico inverso del robot junto con los valores de sus parámetros dinámicos [45].

La fundamentación matemática que respalda la técnica de control por par calculado articular se indica en la ecuación 2 y su esquema se muestra en la Figura 1.4 [44] [46].

$$w(t) = \ddot{q}^d + K_v(\dot{q}^d - \dot{q}) + K_p(q^d - q) \quad (2)$$

Donde K_v y K_p son las matrices de ganancia de dimensión $n \times n$. Si el movimiento está completamente especificado: (se fijan como variables deseadas la posición, la velocidad y la aceleración)

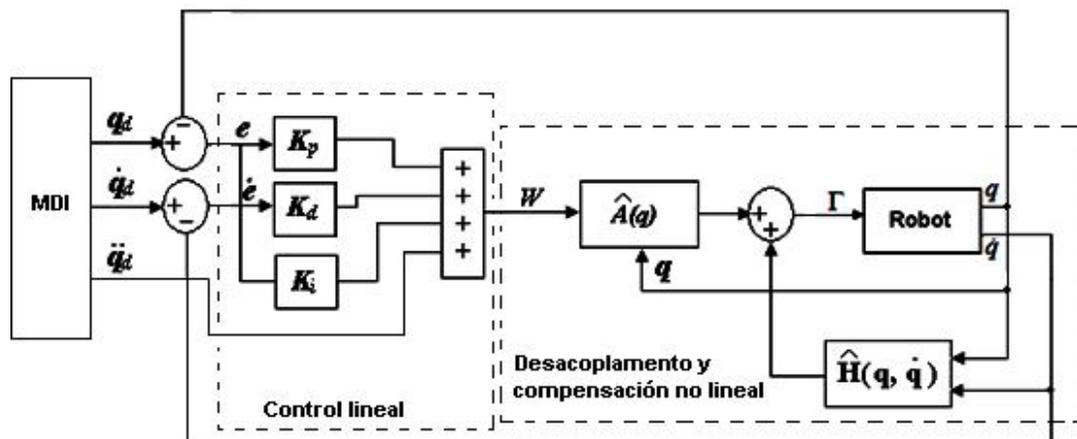


Figura1.4. Esquema de control CTC [40].

- **Control Adaptativo**

Cuando se habla de controladores basados en el modelo, a menudo los parámetros no se conocen con exactitud, cuando los parámetros en el modelo no concuerdan con los parámetros del dispositivo real se producen errores en los actuadores, estos errores podrían usarse para controlar cierto esquema de adaptación que intente actualizar los valores de los parámetros del modelo, hasta que los errores desaparezcan, un sistema de este tipo aprendería sus propias propiedades dinámicas. Se han propuesto varios esquemas adaptativos que varían en complejidad [1] [36] [38].

Un esquema ideal adaptativo podría ser como el de la Figura 1.5 donde se usa una ley de control basada en el modelo.

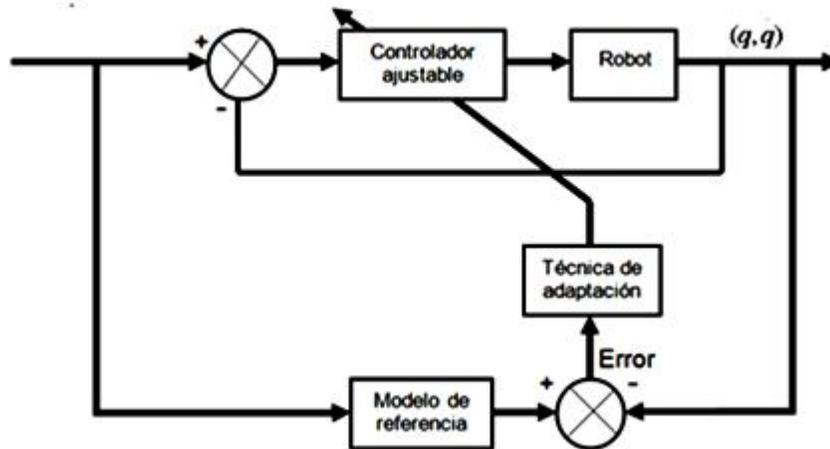


Figura 1.5. Control adaptativo por modelo de referencia [1].

- **Control Fuzzy**

El uso de técnicas de control clásico, como es el control PID, resulta ser una buena alternativa para controlar sistemas dinámicos; ya que proporcionan tiempos de respuesta rápidos. Sin embargo entre mayor es la precisión requerida en el sistema, el ajuste de este tipo de control es más difícil, ya que son bastante sensibles a las señales de ruido y en ocasiones introducen oscilaciones cuando se presentan retardos en el sistema.

Cuando la dinámica de los sistemas o procesos a controlar es no lineal, el control tiene que tener la capacidad de compensar esta no-linealidad y aunque el control PID asume relaciones lineales, este no tiene la capacidad para responder a esto [47].

En la actualidad estas técnicas continúan siendo ineficientes cuando existen incertidumbres en los parámetros del sistema o la carga, ya que una de las principales deficiencias de los controladores convencionales, presentes en los accionamientos eléctricos, es la incapacidad de capturar las características desconocidas de una carga alrededor de un amplio rango del punto de operación. Esto dificulta la selección y ajuste del controlador a emplear [40].

La lógica difusa es motivada por su habilidad para capturar estrategias cualitativas de control y su capacidad de implementar un comportamiento de control altamente flexible. Con esto se logra que los sistemas puedan ajustarse a condiciones cambiantes [39].

En un sistema difuso Figura 1.6, el valor de entrada real (proveniente de sensores) es convertido a un valor difuso vía el proceso de fusificación. Este valor es enseguida introducido al proceso lógico difuso. En donde es continuamente evaluado en un conjunto de reglas en donde esta depositado el conocimiento del experto; este proceso genera un valor de salida difuso, el cual es transformado a un valor de salida real a través del proceso de defusificación [21].

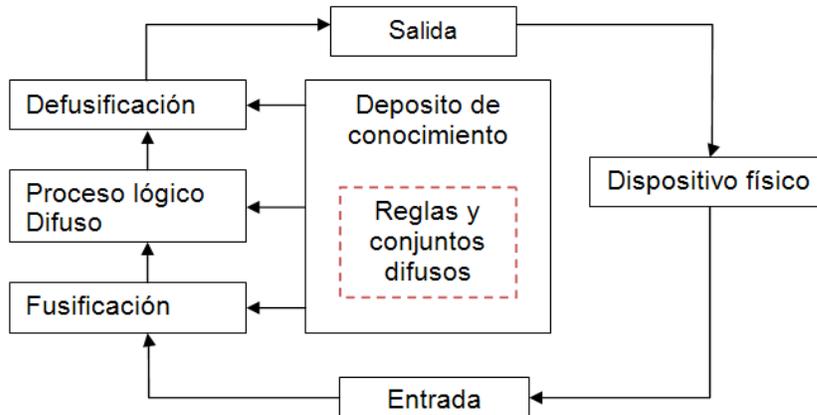


Figura 1.6. Sistema de control difuso [39]

2. PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA RECONSTRUCCIÓN DE ROBOTS SERIE

En este capítulo se da a conocer una propuesta metodológica para la reconstrucción de robots serie, teniendo en cuenta la aplicación que tendrá el sistema robótico, el presupuesto para la reconstrucción y la estructura original del mecanismo.

Se darán una serie de alternativas mostrando sus ventajas y desventajas más relevantes, así como su manera de evaluarlas y determinar la más conveniente para la aplicación.

La Figura 2.1 muestra un diagrama de flujo que resume la metodología que se presenta en detalle a lo largo de este capítulo.

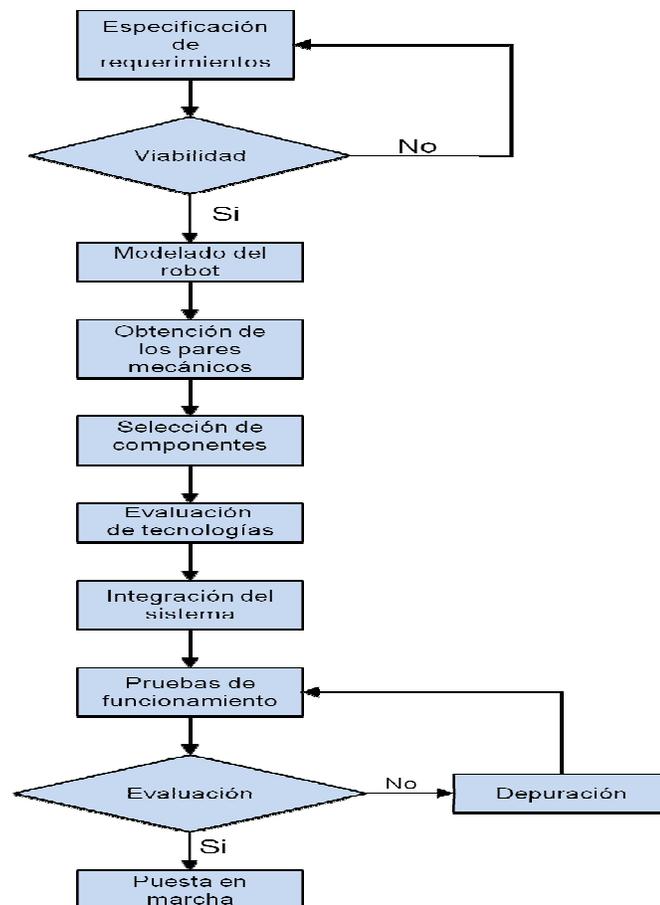


Figura 2.1. Diagrama de flujo que resume la metodología para reconstrucción de robots serie.

2.1. ESPECIFICACIÓN DE REQUERIMIENTOS

Antes de pensar en cualquier alternativa de reconstrucción, es necesario tener claro algunos aspectos preliminares que darán una visión más clara del mecanismo robótico que se tiene, lo que se desea y la función final del robot reconstruido. Así como del presupuesto del que se dispone, o se debería disponer, para su reconstrucción.

En primera instancia es necesario hacer una evaluación exhaustiva del mecanismo del que se dispone y el estado en que se encuentra. Es posible que éste sólo necesite algunas reparaciones en el sistema electrónico, en el sistema mecánico o en la integración de estos. Lo que llevaría a concluir que su reconstrucción es en realidad un reacondicionamiento o mantenimiento.

Otra opción es que el sistema esté mediana o completamente descompuesto, y que además del sistema mecánico, sólo algunos componentes o ninguno puedan ser útiles para su reconstrucción.

Y la última posibilidad es que todo el robot necesite ser reconstruido, en este caso, será necesario acudir a una metodología de reconstrucción de sistemas mecánicos de robots, para poner a punto el manipulador descompuesto.

La reconstrucción va muy ligada a la finalidad que tendrá el robot, pues de ello depende la robustez, velocidad, el sistema de control que se va a implementar, entre otros aspectos fundamentales, que se deben tener en cuenta antes de iniciar cualquier procedimiento. Pues es muy diferente un mecanismo robótico con fines industriales, cuya velocidad, robustez y precisión son variables críticas, en comparación con un robot para fines académicos, el cual debe ser susceptible a mejoras y ser reconstruido con presupuestos bajos.

Después de haber hecho estas evaluaciones y definido unos parámetros iniciales de reconstrucción, es el momento de decidir si la reconstrucción es viable o no. De no serlo, ya sea por motivos económicos, inviabilidad técnica o tecnológica; o por algún otro motivo que lleve a esta conclusión, deberán cambiarse los requerimientos del proyecto o en su defecto, se dará por abortado. Si el proyecto es viable se puede seguir adelante con la metodología.

El diagrama de flujo de la Figura 2.2 indica la secuencia metodológica para determinar la viabilidad de la reconstrucción de un determinado robot de estructura serial.

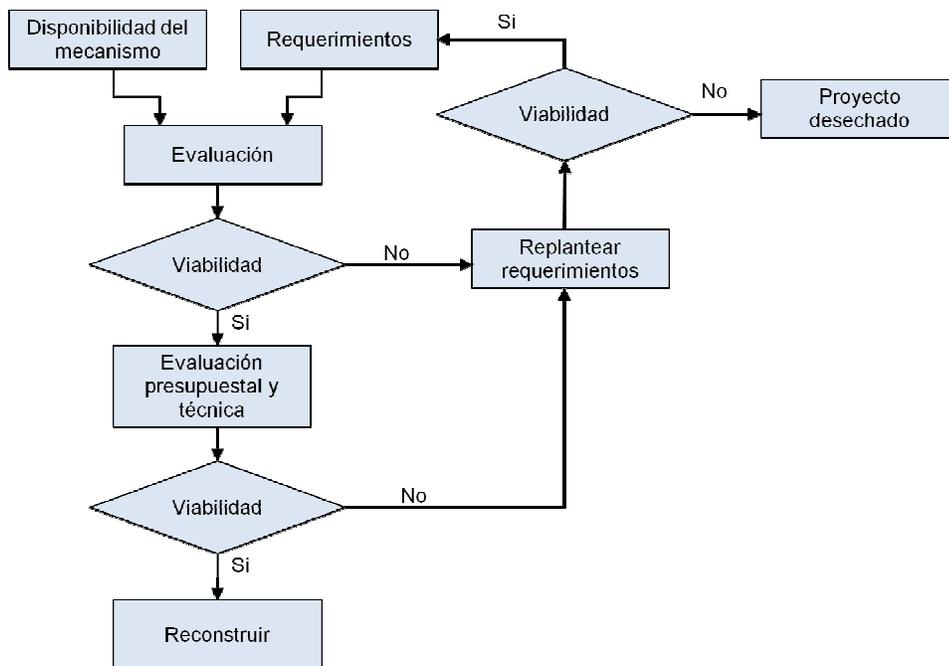


Figura 2. 2. Diagrama de flujo para determinar la viabilidad de la reconstrucción de determinado robot.

2.2. MODELADO DEL ROBOT

El modelo matemático es la estructura fundamental que sustenta de manera teórica la estructura física y dinámica del robot.

Para la reconstrucción se analizan los siguientes modelos del robot: geométrico directo, dinámico inverso y dinámico directo, dejando al margen el modelo geométrico inverso y cinemáticos directo e inverso, los cuales son importantes en el modelado de algunos sistemas de control y para determinar algunas variables cuando el robot se encuentra en funcionamiento, pero no para la reconstrucción.

Para la obtención de los modelos geométrico directo, dinámico directo y dinámico inverso se pueden seguir las metodologías utilizadas por Ollero [1], Sciavicco L y Siciliano B [38] o Khalil y Dombre [44].

2.2.1. Obtención del modelo geométrico directo

El modelo geométrico directo (MGD) expresa la posición y orientación del efector final, es decir las coordenadas operacionales del robot, en función de sus coordenadas articulares [48]. Este permite calcular la posición y orientación del efector final del robot en el espacio cartesiano, conociendo los

valores θ_j y r_j asociados a las articulaciones, haciendo uso de las matrices de transformación entre los sistemas coordenados de cada articulación [54]. El MGD no es indispensable en el proceso de reconstrucción, pero es de gran ayuda para la simulación del comportamiento de los actuadores con respecto a la posición del robot.

Para hallar este modelo, primero es necesario determinar los parámetros geométricos del robot, que expresan cómo está constituido geoméricamente el sistema mecánico del robot.

A continuación se describe el método de Khalil – Dombre [44] que permite realizar esta tarea.

- Colocar el eje z_j como el eje de traslación o rotación de la articulación j .
- Colocar el eje x_j perpendicular común a los ejes z_j y z_{j-1} .

Hallar los parámetros geométricos de las articulaciones del mecanismo usando las siguientes reglas:

α_j : ángulo entre los ejes z_{j-1} y z_j correspondiente a una rotación alrededor de x_{j-1} .

d_j : distancia entre z_{j-1} y z_j a lo largo de x_{j-1} .

θ_j : ángulo entre los ejes x_{j-1} y x_j correspondiente a una rotación alrededor de z_j .

r_j : distancia entre x_{j-1} y x_j a lo largo de z_j .

σ_j : constante igual a cero si la articulación es rotoide y uno si la articulación es prismática.

Estas variables constituyen la tabla 2.1 de parámetros geométricos del robot.

j	σ_j	α_j	d_j	θ_j	r_j
1	σ_1	A_1	d_1	θ_1	r_1
2	σ_2	α_2	d_2	θ_2	r_2
3	σ_3	α_3	d_3	θ_3	r_3
.
.
.
n	σ_n	α_n	d_n	θ_n	r_n

Tabla 2. 1. Parámetros geométricos de un robot serie.

Estos datos dan lugar a la matriz ${}^{j-1}T_j$ (ecuación 3) que define la matriz de transformación del marco de coordenadas R_j en el marco R_{j-1} . En la Figura 2.3, se presenta un esquema de transformación de coordenadas.

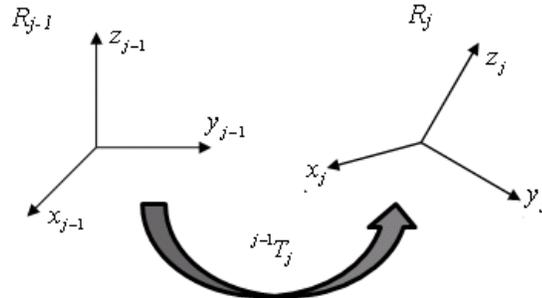


Figura 2. 3. Transformación de coordenadas.

$${}^{j-1}T_j = \begin{bmatrix} \cos \theta_j & -\text{sen } \theta_j & 0 & d_j \\ \cos \alpha_j \text{sen } \theta_j & \cos \alpha_j \cos \theta_j & -\text{sen } \alpha_j & -r_j \text{sen } \alpha_j \\ \text{sen } \alpha_j \text{sen } \theta_j & \text{sen } \alpha_j \cos \theta_j & \cos \alpha_j & r_j \cos \alpha_j \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Ya teniendo las matrices ${}^{j-1}T_j$ para las j articulaciones, es necesario multiplicar estas para obtener la matriz 0T_j y así obtener el MGD del robot serie.

Es decir:

$$MGD = {}^0T_1 \times {}^1T_2 \times {}^2T_3 \times \dots \times {}^{j-1}T_j \quad (4)$$

2.2.2. Obtención de los modelos dinámicos

La dinámica se ocupa de la relación entre las fuerzas que actúan sobre un cuerpo y el movimiento que en éste se origina. Por lo tanto, el modelo dinámico de un robot, tiene por objeto conocer la relación entre el movimiento del robot y las fuerzas implicadas en el mismo [24].

Los modelos dinámicos son usados para lograr los siguientes propósitos en el sistema robótico [10] [50]:

- Simulación de la dinámica del robot.
- Diseño y evaluación de la estructura mecánica.

- Dimensionamiento de los actuadores en cada una de las articulaciones.
- Diseño y evaluación del sistema de control del robot.

- **Formulación de Newton – Euler**

La obtención del modelo dinámico de un mecanismo, y en particular de un robot, se basa fundamentalmente en el planteamiento del equilibrio de fuerzas establecido en la segunda ley de Newton (ecuación 5), o su equivalente para movimientos de rotación, la denominada ley de Euler (ecuación 6) [44]:

$$\sum f = m\dot{v} \quad (5)$$

$$\sum \Gamma = I_j \dot{\omega} + \omega \times (I_j \omega) \quad (6)$$

Donde m es la masa del mecanismo, \dot{v} la aceleración del sistema, I_j la masa de la articulación j y ω la velocidad de la articulación j .

Estas ecuaciones matemáticas relacionan [24] [33] [51]:

- La posición del robot definida por sus variables articulares o por las coordenadas de localización de su extremo, y sus derivadas: velocidad y aceleración.
- Las fuerzas y pares aplicados en las articulaciones.
- Los parámetros dimensionales del robot: longitud, masa e inercias de sus elementos.

- **Formulación de Lagrange**

Otra forma de modelar matemáticamente la dinámica de un robot es acudiendo al formalismo de Lagrange. Estas ecuaciones describen el movimiento en términos del trabajo y la energía del sistema, lo cual se traduce cuando el esfuerzo sobre el órgano terminal es nulo [9] [24], por consiguiente:

$$\Gamma_i = \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i} \quad (7)$$

Donde L es el lagrangiano del robot definido como la diferencia entre la energía cinética E y la energía potencial U del sistema.

$$L = E - U \quad (8)$$

La ecuación de la energía cinética sería:

$$E = \frac{1}{2} \dot{q}^T A \dot{q} \quad (9)$$

Donde A es la matriz de inercia del robot. Sus elementos son función de variables articulares. Los elementos (i, j) de A son denotados por A_{ij} .

Y la energía potencial esta dada por:

$$U = \sum_{j=1}^n U_j = \sum_{j=1}^n -M_j g^T (L_{oj} + S_j) \quad (10)$$

Donde:

L_{oj} designa el vector origen en O_o y extremo en O_j proyectando estos vectores en R_o .

S_j es el vector que une el origen O_j y el centro de masa del cuerpo C_j

Dado que la energía potencial está en función de la posición de las articulaciones, las ecuaciones 7 y 9 dan lugar a:

$$\Gamma = A(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + Q(q) \quad (11)$$

Donde:

$Q = [Q_1 \dots Q_n]^T$ Es el vector de fuerzas gravitacionales.

$C(q, \dot{q})\dot{q}$ Es el vector $(n \times 1)$ de fuerzas de coriolis y centrifugas, tal que:

Consecuentemente, el modelo dinámico del robot es descrito por n juntas y ecuaciones diferenciales no lineales de segundo orden.

Los elementos del vector Q son calculados de la siguiente manera:

$$Q_i = \frac{\partial U}{\partial q_i} \quad (12)$$

Los elementos de A , C y Q son funciones de los parámetros geométricos e inerciales del robot.

- **Modelado de robots con articulaciones elásticas**

La presencia de articulaciones elásticas es una característica muy común en robots industriales de la actualidad. La elasticidad en las articulaciones podría surgir de algunas fuentes, como la elasticidad en las marchas, transmisiones, drivers armónicos entre otros. Por consiguiente, se deduce que un tiempo de desplazamiento variable se introduce entre la posición del actuador y la posición de la articulación. La elasticidad conjunta es modelada como un resorte de torsión lineal para articulaciones rotoides y resorte lineal para articulaciones prismáticas. De este modo, el modelo dinámico requiere el doble del número de coordenadas generalizadas para caracterizar completamente la configuración de las articulaciones y de los rotores de los actuadores. Q_M denota el vector $(n \times 1)$ de la posición del rotor. El vector conjunto de deformaciones viene dado por $(q - q_M)$. Anotando que el MGD es solo una función de las variables de las articulaciones q [44].

La energía potencial de los resortes está dada por la ecuación 13.

$$U_k = \frac{1}{2} (q - q_M)^T k (q - q_M) \quad (13)$$

Donde k es la matriz de rigidez en las articulaciones.

La ecuación dinámica es obtenida utilizando la ecuación de Lagrange.

$$A\ddot{q} + c\dot{q} + Q + k(q - q_M) = 0 \quad (14)$$

$$I_a (\ddot{q}_M) F_{vm} + \text{diag}(\text{sign}(\dot{q}_M)) F_{cm-k} (q - q_m) = \Gamma \quad (15)$$

- I_a es la matriz diagonal $(n \times n)$ de inercia de los motores.
- F_{vm} y F_{cm} son los vectores $(n \times 1)$ de viscosidad y parámetros de coulomb de los actuadores y transmisiones correspondientes a la articulación.
- La fricción de la articulación puede fácilmente ser incluida en la Ecuación 15.

- **Modelo de frotamientos**

El modelo de frotamiento seco o de Coulomb hace referencia a una fuerza constante opuesta al movimiento. Al inicio del movimiento una fuerza superior al frotamiento seco debe ser aplicada con el fin de mover las articulaciones. El modelo de rotamiento viscoso hace referencia al

frotamiento existente en presencia de movimiento. La expresión matemática del modelo de frotamientos está dada por [44]:

$$\Gamma_f = F_v \dot{q} + F_s \text{sign}(\dot{q}) \quad (16)$$

Existen dos tipos de análisis dinámico en un sistema robótico: modelo dinámico directo (MDD) y modelo dinámico inverso (MDI).

- **Modelo dinámico inverso**

Este modelo expresa las fuerzas y pares que intervienen en función de la evolución de las coordenadas articulares y sus derivadas, de esta manera es posible conocer los pares necesarios para accionar cada una de las articulaciones del robot [10] [52]. Su representación matemática es la siguiente.

$$\Gamma = f(q, \dot{q}, \ddot{q}, f_e) \quad (17)$$

Donde:

- Γ es el vector de pares o fuerzas conjuntas, dependiendo si la articulación es rotacional o prismática.
- q : El vector de posiciones de la articulación.
- \dot{q} : El vector de velocidades de la articulación.
- \ddot{q} : El vector de aceleraciones de la articulación.
- f_e : Representa el esfuerzo exterior que ejerce el robot sobre el ambiente.

- **Modelo dinámico directo.**

El modelo dinámico directo (MDD) expresa, la evolución temporal de las coordenadas articulares en función de las fuerzas y pares mecánicos, que lo intervienen [10]. Su expresión matemática tiene la siguiente forma.

$$\ddot{q} = f(q, \dot{q}, \Gamma, f_e) \quad (18)$$

Donde \ddot{q} representa la aceleración articular en función de las posiciones, velocidades y fuerzas en las articulaciones [24], y f_e representa el esfuerzo exterior que ejerce el robot sobre el ambiente.

Este modelo es empleado para llevar a cabo simulaciones con el fin de probar el rendimiento del robot y el estudio de la síntesis de las leyes de

control. Durante la simulación, las ecuaciones dinámicas son resueltas para el conjunto de aceleraciones generadas por los pares mecánicos de entrada. Obteniendo las posiciones y velocidades de las articulaciones.

Dada la ecuación 10, se puede expresar el problema del modelo dinámico directo como solución de las aceleraciones conjuntas a partir de la ecuación 19.

$$A\ddot{q} = [\Gamma - H(q, \dot{q})] \quad (19)$$

Donde H es la constante que agrupa las fuerzas de coriolis, centrífuga, gravedad, fricción y pares mecánicos externos.

Aunque en la práctica no se calcula de forma explícita la inversa de la matriz A, la solución de la ecuación 19 es generalmente denotada por:

$$\ddot{q} = A^{-1} [\Gamma - H(q, \dot{q})] \quad (20)$$

El cálculo de la dinámica directa se puede dividir en tres pasos: El cálculo de $H(q, \dot{q})$, el cálculo de A, y la solución de la ecuación 20, para \ddot{q} .

La complejidad computacional del primer paso puede minimizarse utilizando una versión especializada del algoritmo de la dinámica inversa, en la cual las aceleraciones conjuntas de las articulaciones son cero.

Existen también programas de computador especializados que generan distintos modelos matemáticos para diferentes configuraciones mecánicas de robots, lo que representa una enorme ventaja a la hora del modelado, ya que se minimiza enormemente la probabilidad de errores en los cálculos y la respuesta del computador es prácticamente inmediata.

- **Parámetros de base del modelo dinámico.**

El conjunto mínimo de parámetros inerciales se llaman parámetros de base y permiten simplificar el cálculo del modelo dinámico. Estos permiten eliminar aquellos parámetros que no tienen efecto sobre el modelo y agrupar otros con el fin de simplificar las ecuaciones finales del modelo, así como también el tiempo computacional de cálculo [44] [48].

- **Cálculo de los tensores de inercia**

Los tensores de inercia ${}^j j_j$ del cuerpo C_j con relación a la base R_j están expresados de la siguiente manera [44].

$${}^j j_j = \begin{bmatrix} \int (y^2 + z^2) dm & -\int (xy) dm & -\int (xz) dm \\ -\int (xy) dm & \int (x^2 + z^2) dm & -\int (yz) dm \\ -\int (xz) dm & -\int (yz) dm & \int (x^2 + y^2) dm \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} XX_j & XY_j & XZ_j \\ XY_j & YY_j & XZ_j \\ XZ_j & YZ_j & ZZ_j \end{bmatrix} \quad (21)$$

Donde X , Y y Z es la distancia que hay entre el centro de masa del eslabón j hasta la articulación j . En la Figura 2.4, se presenta un esquema en donde se indican las distancias X , Y y Z , hasta la base del eslabón R donde se encuentra dicha articulación.

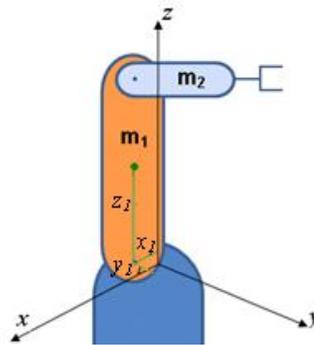


Figura 2. 4. Esquema en donde se indican las distancias x , y y z hasta la base R .

Los centros de masa se pueden encontrar fácilmente cuando el cuerpo presenta una composición geométrica simple y su masa es homogénea a lo largo del eslabón, pero cuando este presenta una forma compleja y/o está construido de diferentes tipos de material, es recomendable acudir a herramientas computacionales CAD (Diseño Asistido por Computador), para realizar en estos su diseño y obtener de allí los centros de masa y las distancias X , Y y Z hasta la base R .

- **Primer momento de inercia**

El primero momento de inercia del cuerpo C_j alrededor del origen de la base R_j , es la relación que existe entre la masa del cuerpo C_j y la distancia de su centro de masa hasta la junta. Su denominación es la siguiente [48]:

$$M_j S_j = [MX_j \quad MY_j \quad MZ_j]^T \quad (22)$$

- **Inercia del accionador**

La inercia del accionador es la inercia generada por el sistema de accionamiento de la articulación j . Y se expresa de la siguiente manera [44]:

$$I_{aj} = N_j J_{mj} \quad (23)$$

Donde N_j es la relación de reducción del eje j y J_{mj} es el momento de inercia del rotor del accionador.

2.3. OBTENCIÓN DE LOS PARES MECÁNICOS NECESARIOS PARA ACCIONAR CADA UNA DE LAS ARTICULACIONES DEL ROBOT

Se define el par mecánico τ de una fuerza F que actúa sobre algún punto del cuerpo rígido, en una posición r respecto de cualquier origen O , por el que puede pasar un eje sobre el cual se produce la rotación del cuerpo rígido, al producto vectorial entre la posición r y la fuerza aplicada F , según la siguiente expresión [53][54] (Figura 2.5):

$$\vec{\tau} = \vec{r} \times \vec{F} \quad (24)$$

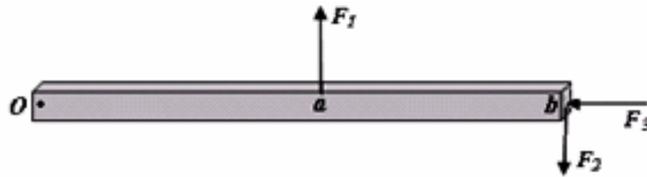


Figura 2. 5. Diagrama de fuerzas que ejercen un par mecánico sobre el punto O de la barra.

El par mecánico es una magnitud vectorial, si α es el ángulo entre r y F , su valor numérico, por definición del producto vectorial, es:

$$\tau = rF \sin \alpha \quad (25)$$

Su dirección es siempre perpendicular al plano de los vectores r y F , su sentido esta dado por el producto vectorial, el sentido de avance del tornillo o la regla de la mano derecha [54].

2.3.1. Obtención de los pares mecánicos a partir de la simulación y control sobre una trayectoria definida del robot mediante los modelos dinámicos.

Los pares mecánicos necesarios para accionar cada una de las articulaciones son obtenidos a partir del MDI como se mencionó anteriormente. Por lo tanto es necesario generar una trayectoria articular que excite el sistema, y sintonizar un sistema de control articular que minimice el error entre el recorrido de cada una de las articulaciones y la trayectoria articular descrita. Los pares obtenidos dependerán del tipo de trayectoria, la

velocidad con que esta se trace y la precisión del controlador para seguir la trayectoria, por eso es necesario definir previamente la velocidad articular que tendrá el robot, y se recomienda simular varios tipos de trayectorias con diferentes velocidades, y luego obtener una media de los pares obtenidos con el fin de no sobredimensionar los actuadores.

En las Figuras 2.6 y 2.7 se indican esquemas de los diagramas de bloques para sistemas de control CTC y PID articular para un robot de n grados de libertad, de donde se pueden obtener los pares mecánicos necesarios para el accionamiento de las articulaciones, en donde las entradas son las posiciones articulares de cada una de las articulaciones, y las salidas son: el error articular del manipulador con respecto a la trayectoria definida a priori y los pares mecánicos necesarios para trazar dicha trayectoria a determinada velocidad. Los bloques de los MDD y MDI contienen las ecuaciones de los respectivos modelos.

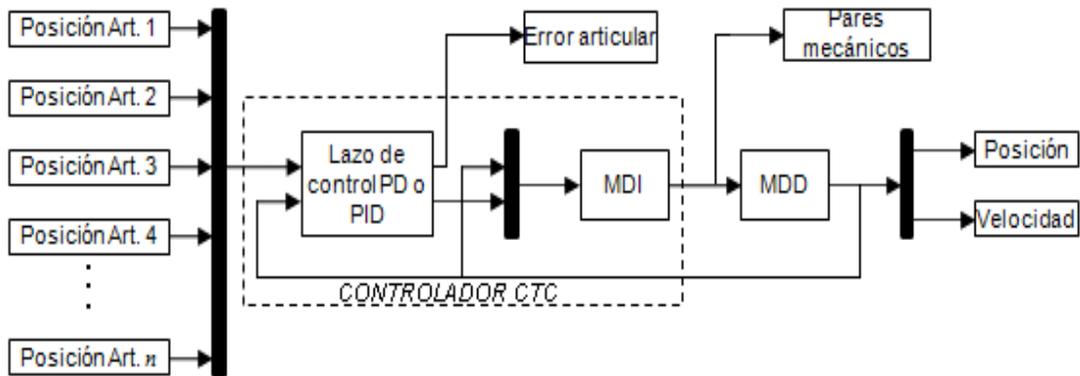


Figura 2.6. Esquema para un sistema de control CTC.

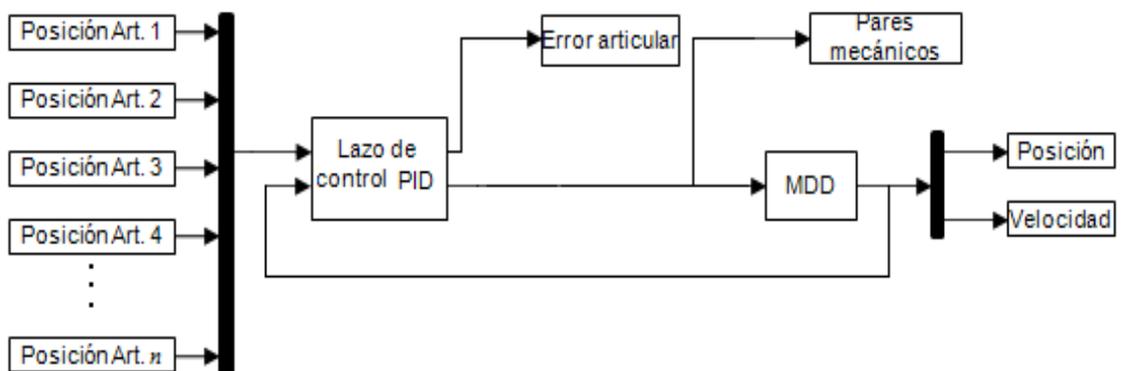


Figura 2. 7. Esquema para un sistema de control PID.

En el momento que se hayan preseleccionado los posibles motores que accionarán el robot, es necesario modificar los valores de masas en los tensores de inercia y momentos de inercia reales de los motores

preseleccionados. De esta manera se tendrá mayor precisión en lo que será el comportamiento real de los motores ya instalados en el mecanismo.

Si la articulación es prismática, lo que se obtendrá a la salida del MDI no será el par sino la fuerza necesaria para accionar la articulación con los requerimientos dados.

2.3.2. Obtención de los pares mecánicos mediante la simulación del modelo dinámico inverso en lazo abierto

Una forma complementaria de obtener los pares mecánicos necesarios para el accionamiento de cada una de las articulaciones del robot, es excitando el MDI con una señal externa.

Partiendo del fundamento teórico que indica que, el modelo dinámico inverso (MDI) expresa las fuerzas y pares que intervienen en función de la evolución de las coordenadas articulares y sus derivadas [1]. Y del hecho que, para encontrar los pares mecánicos es necesario conocer las velocidades y aceleraciones requeridas [4], y no tanto la trayectoria a ser trazada, es pertinente tomar los pares mecánicos a partir del modelo dinámico inverso del robot, consignándole a éste la posición inicial, velocidades articulares nominales y aceleraciones, como se muestra en el esquema de la Figura 2.8.

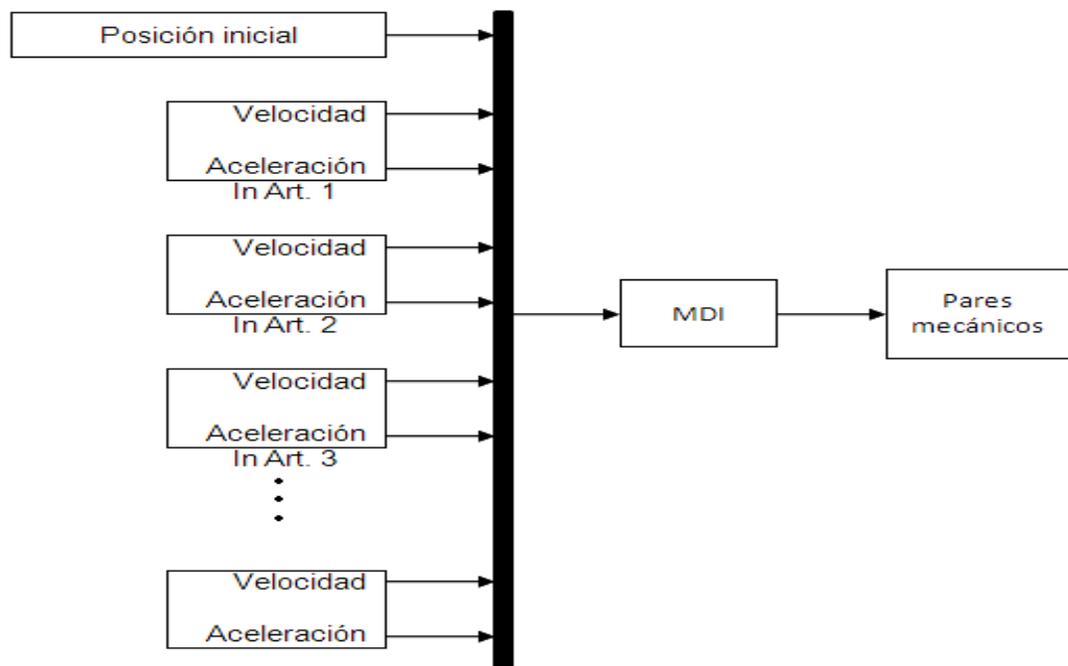


Figura 2. 8. Esquema para la obtención de los pares mecánicos mediante el MDI en lazo abierto.

2.3.3. Obtención de los pares mecánicos necesarios para accionar cada una de las articulaciones mediante pruebas físicas

Este método consiste en encontrar la fuerza necesaria para desequilibrar el sistema, que se realiza con un contrapeso y debe ser capaz de levantar el sistema robótico, el cual inicialmente se encuentra en posición horizontal (Figura 2.5).

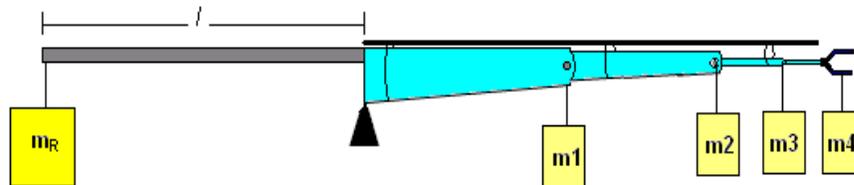


Figura 2.9. Esquema del montaje a realizar para determinar los pares necesarios para accionar el manipulador mediante la experimentación física.

Este método es muy eficiente si los eslabones del robot presentan facilidad para desarticularlos, o es posible hacer la prueba con el mecanismo completo, pero presenta dificultades si los eslabones de la articulación no permiten que se instalen mecanismos, que permitan hacer la prueba o si la articulación se encuentra sobre el eje z .

El procedimiento de la prueba es el siguiente:

1. Atar una barra de la longitud del brazo robótico a este mediante abrazaderas o la cuerda.
2. Sujetar con la prensa un extremo de otra barra de longitud conocida a la base del robot, tal como se muestra en la figura 3.9.
3. Situar el sistema sobre el soporte justo donde se va a medir el par mecánico. Y dejarlo de tal manera que éste ejerza la única fuerza hacia arriba.
4. Colocar masas cuyo peso sea una aproximación al peso de los motores en cada una de las articulaciones.
5. Colocar masas en el otro extremo de la barra de un metro, justo hasta que su peso incline el sistema hacia este lado.
6. Calcular el par necesario para vencer la fuerza generada por el brazo, de acuerdo con la ecuación 24. Que al reemplazarla por los valores del experimento, quedaría de la siguiente manera.

$$\tau = m_R l g \quad (26)$$

Donde m_R es la masa que hace contrapeso a la masa del brazo robótico, l la longitud de la barra y g aceleración gravitacional.

7. Si es posible desmontar la primera articulación, hacerlo y realizar los procedimientos anteriores. Y si no, realizar nuevamente el experimento de los puntos 1 - 5 en cada una de las articulaciones sin que estas sean desmontadas.

En caso de disponer de un torquímetro, colocarlo sobre la base del robot (como se muestra en la Figura 2.10) y omitir los pasos 2, 5 y 6.

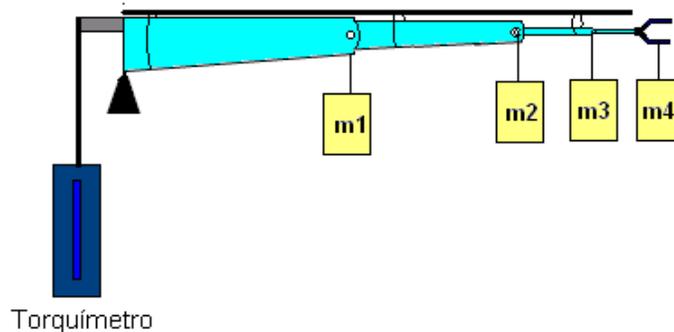


Figura 2. 10. Esquema del montaje a realizar disponiendo de un torquímetro.

De esta manera se habrá determinado los pares necesarios para el accionamiento de cada una de las articulaciones.

Cada uno de los procedimientos del experimento propuesto anteriormente, se hace siempre y cuando las articulaciones sean rotoides. Si la articulación es prismática o cualquier otro tipo de articulación, este experimento no es posible llevarlo a cabo y es necesario tomar otra de las alternativas ya expuestas, para determinar la fuerza que debe ejercer el actuador para accionar dicha articulación.

2.4. SELECCIÓN DE LOS COMPONENTES TECNOLÓGICOS QUE INTEGRARÁN EL SISTEMA ROBÓTICO

Una vez se disponga de los pares mecánicos necesarios para accionar el robot, una clara conciencia de las tareas que se pretenden desarrollar y el ambiente en el que se va a trabajar, es pertinente proceder a evaluar diferentes tecnologías que sustituyan los componentes electrónicos y mecánicos del robot original.

Los componentes que podrían ser cruciales cuando se está reconstruyendo un robot de estructura serial son:

- Sistema de control.
- Actuadores.
- Mecanismos de accionamiento.
- Sensores.
- Hardware de acondicionamiento, transmisión y amplificación de señales.

Las tablas 2.2 a 2.6 presentan una serie de alternativas, que para su adecuada selección es necesario compararlas entre si, o de acuerdo a un patrón ideal previamente establecido, de acuerdo a las características que cada subsistema requiere y/o que los componentes presentan.

2.4.1. Sistemas de control

En cuanto al sistema de control es importante tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Robustez del sistema
- Programabilidad
- Componentes de Entrada/Salida (E/S)

La tabla 2.2 presenta algunas posibilidades que podrían cerrar el lazo de control de sistema robótico en reconstrucción [55]-[58].

	Ventajas	Desventajas
PC	<p>Interfaces gráficas amigables y de fácil manejo para el usuario.</p> <p>Múltiples posibilidades de interconexión con periféricos.</p> <p>Permite realizar múltiples tareas de manera paralela y efectiva.</p>	<p>Los costos de hardware y software pueden llegar a ser elevados.</p> <p>Dificultades con el sistema operativo para sistemas de control en tiempo real.</p> <p>Poca robustez.</p> <p>No es recomendable para trabajar en ambientes hostiles.</p>
PLC	<p>Control del robot en tiempo real.</p> <p>Posibilidad de utilizar dispositivos de E/S especializados.</p>	<p>Requiere de una alta inversión para la adquisición del equipo.</p> <p>Requiere de dispositivos</p>

	No requiere de más sistemas electrónicos o interfaces anexas para el control de los actuadores. Permite una eficaz programación, puesta en marcha y es de funcionamiento confiable.	adicionales para la programación del controlador.
Sistema empotrado	El dispositivo es asequible a muy bajo costo. Requiere de poco espacio para su instalación.	Su programación puede tornarse compleja. Representa poca confiabilidad. Se necesita de dispositivos adicionales para su programación.

Tabla 2. 2. Alternativas tecnológicas para el lazo de control de un sistema robótico.

Una vez seleccionado el componente físico que contendrá el sistema de control debe procederse a evaluar y seleccionar el software en el cual se va a desarrollar el sistema de control. Además del tipo de control que tendrá el sistema robótico para así tener de manera íntegra el sistema de control del robot reconstruido. Éste software varía completamente según el tipo de aplicación que se esté desarrollando, por esta razón no se presentan alternativas de selección.

2.4.2. Actuadores

El tipo de actuadores que llevará el sistema robótico, es quizá uno de los factores más críticos a tener en cuenta en el proceso de reconstrucción. Ya que con esta selección a priori, se determina en gran parte el tipo de componentes restantes que llevará el manipulador. Para la selección de éstos es de vital importancia tener en cuenta:

- Complejidad de control.
- Tamaño.
- Peso.
- Velocidad del actuador.
- Inercia.
- Costo.
- Par (o fuerza) de arranque.
- Par (o fuerza) máximo(a).
- Condiciones del medio ambiente en el que el robot trabajará.

- Ruido.
- Ciclo de vida.

Las posibilidades para este subsistema se presentan a continuación [10] [59]-[73].

		Ventajas	Desventajas
Motores DC	Brush	<p>Posicionamiento rápido y preciso</p> <p>Alta controlabilidad</p> <p>Menos costosos que los brushless, pero más que ac.</p>	<p>Se generan inercias.</p> <p>Necesitan mantenimiento.</p> <p>Se generan chispas.</p> <p>Son muy pesados.</p>
	Brushless	<p>Tiempo de vida superior a los brush.</p> <p>Más fiable.</p> <p>Características térmicas favorables</p> <p>Baja inercia.</p>	<p>Alto costo.</p>
	Accionadores lineales	<p>Ideales para articulaciones prismáticas.</p> <p>Inercias bajas.</p> <p>Instalación simple.</p>	<p>Dificultad para su consecución el las dimensiones requeridas.</p> <p>Altos costos.</p>
Motores AC	Síncronos	<p>Velocidad constante.</p> <p>Factor de potencia ajustable.</p>	<p>Altos costo.</p> <p>Bajo par de arranque.</p> <p>Oscilación de velocidad o penduleo.</p> <p>Necesidad de fuente de excitación exterior.</p> <p>Necesita un manejo más cuidadoso.</p>
	Asíncronos	<p>Bajo costo.</p>	<p>Los equipos para el arranque, frenado, regulación de la velocidad, son más complejos. Esto significa más caros, más</p>

			voluminosos y personal más entrenado para su manejo.
	Motores paso a paso	Fáciles de controlar. Amplio rango de variación de velocidad.	Imprecisión en su posicionamiento. Alta inercia en aceleraciones y desaceleraciones.
Actuadores hidráulicos	Cilindros	Excelente relación fuerza peso. Ideal para cargas grandes. Estable frente a cargas estáticas. Soporta cargas sin aporte de energía.	Altos costos de mantenimiento. Las elevadas presiones propician fugas de aceite.
	Motor de paletas	Alto par de salida. Velocidades bajas, que lo hace fácil de controlar. Son silenciosos. Su giro es bastante uniforme y continuo.	Alto costo de adquisición. Alto costo de mantenimiento.
	Motor de pistones axiales	Admiten mayor presión de trabajo.	Alto costo de adquisición. Alto costo de mantenimiento. Peso elevado.
Actuadores neumáticos	Cilindros	Cuando se produce escapes de aire no son perjudiciales y pueden colocarse en las líneas, en depuradores o extractores para mantener el aire limpio. Son fiables en ambientes explosivos, incluso en temperaturas extremas. Movimientos rápidos.	Poca precisión.

		Bajo costo.	
	Motor de paletas	<p>Cuando se produce escapes de aire no son perjudiciales y pueden colocarse en las líneas, en depuradores o extractores para mantener el aire limpio.</p> <p>Son fiables en ambientes explosivos, incluso en temperaturas extremas.</p> <p>Par de arranque elevado.</p> <p>Bajo costo.</p>	<p>Necesita de preparación antes de su utilización (eliminación de impurezas y humedad).</p> <p>Debido a la compresibilidad del aire, no permite velocidades de los elementos de trabajo regulares y constantes.</p> <p>Necesitan precarga, para evitar que giren a velocidades altas.</p> <p>Poca precisión.</p>
	Motor de pistones	<p>Cuando se produce escapes de aire no son perjudiciales y pueden colocarse en las líneas, en depuradores o extractores para mantener el aire limpio.</p> <p>Son fiables en ambientes explosivos, incluso en temperaturas extremas.</p> <p>Par de arranque elevado.</p> <p>Su control de velocidad se facilita bastante.</p> <p>Óptimos para velocidades bajas y cargas grandes.</p>	<p>Necesita de preparación antes de su utilización (eliminación de impurezas y humedad).</p> <p>Es costoso.</p> <p>Poca precisión.</p> <p>El aire es una fuente de energía costosa.</p>

Tabla 2. 3. Posibles actuadores a instalarse en el robot en reconstrucción

2.4.3. Mecanismos de accionamiento

El sistema de transmisión es otro aspecto que necesita de sumo cuidado a la hora de elegirlo, ya que está directamente relacionado con el actuador, y no todas las transmisiones son compatibles con todos los tipos de actuadores, incluso muchos de éstos no necesitan de un sistema de transmisión para accionar determinado eslabón o sistema de eslabonamiento del robot, por lo

tanto se recomienda tener en cuenta los siguientes aspectos a la hora de la elección de una transmisión [10].

- Relación de reducción (Según la ecuación 27).

$$T_2 = \eta T_1 \frac{\omega_1}{\omega_2} \quad (27)$$

Donde:

η = Rendimiento de la transmisión.

T_1 =Par de entrada.

T_2 =Par de salida.

ω_1 = Velocidad de entrada.

ω_2 =Velocidad de salida.

- Peso y tamaño.
- Momento de inercia.
- Velocidad de entrada máxima.
- Par de salida nominal.
- Par de salida máximo.
- Juego angular.
- Rigidez torsional.
- Rendimiento.

La siguiente tabla indica una serie de posibilidades para la transmisión de la fuerza o el par desde el actuador hasta la articulación que se desea accionar [10] [69] - [71].

	Ventajas	Desventajas
Accionamiento directo	Se evitan los errores añadidos por el reductor como: Juego angular o backlash, rozamientos, falta de rigidez, entre otros. Mayor precisión y velocidad.	Es necesario actuadores que den un par elevado a bajas velocidades Aumenta la inercia al poner motores pesados junto a las articulaciones. Condiciona la estructura mecánica. El sensor de posición va directamente acoplado al eje: necesita ser mucho más preciso. El control debe ser mucho más sofisticado.
Engranaje	Pares altos.	Son muy voluminosos.

	Reducen la inercia reflejada.	No son concéntricos. Presentan holguras.
Correa dentada	Permiten la transmisión de movimiento y par sobre grandes distancias. Mantienen el sentido de giro. Evita deslizamientos.	Su desgaste es alto. Tiene una pequeña elasticidad.
Cadena	Grandes pares. No hay deslizamiento. Mantiene el sentido de giro.	Problemas de ruido. Necesita lubricación.
Paralelogramo	Pares altos.	Giro limitado.
Cable	Poco peso. Permite transmisión a grandes distancias.	Presenta deformabilidad. Se generan desgastes.

Tabla 2. 4. Mecanismos de accionamiento posibles para cada una de las articulaciones del robot.

A todos estos ítems a tener en cuenta para cada una de las alternativas tecnológicas, para la reconstrucción, es necesario agregar lo siguiente:

- Compatibilidad del dispositivo con el resto del sistema.
- Costo de adquisición.
- Plazo de entrega por parte del vendedor.

2.4.4. Sensores

En cuanto a los sensores a utilizar, el principal ítem para su escogencia es qué variable se desea sensar, además de:

- Facilidad de instalación.
- Tipo de datos entregados.
- Fiabilidad de los datos entregados.
- Resolución.

La tabla 2.5 muestra diferentes tipos de sensores con algunas de sus características, que en un momento dado se podrían escoger para medir determinada variable del robot [10] [74] - [83].

		Ventajas	Desventajas
Sensores de presencia	Inductivos	<p>Bajos costos de fabricación.</p> <p>Alta estabilidad a perturbaciones.</p> <p>Detectan sin contacto físico.</p> <p>Muy buena adaptación a ambientes industriales.</p> <p>Inmunidad a ambientes adversos (Humedad, polvo, aceites y temperaturas variables)</p> <p>Larga vida útil.</p>	<p>Limites de reducción del tamaño constructivo en caso de tecnología de bobinado convencional.</p> <p>Señal de salida dependiente de la velocidad de rotación, no sirve para movimientos casi estáticos.</p> <p>Sensibilidad a variaciones del entrehierro</p> <p>Detectan solo objetos metálicos.</p>
	Capacitivos	<p>Mínimo error de carga, ya que no existe contacto físico.</p> <p>Alta estabilidad, reproducibilidad y resolución.</p> <p>Rápida respuesta.</p> <p>Mayor precisión.</p> <p>Larga vida útil.</p>	<p>Posibilidad de interferencias capacitivas.</p> <p>Dependen de la constante dieléctrica del material a sensar, por lo que necesitan un ajuste previo de sensibilidad y son muy inestables respecto al grado de humedad y suciedad.</p>
	De efecto hall	<p>Salida independiente de la frecuencia del campo detectado.</p> <p>Son inmunes a condiciones ambientales adversas (polvo, humedad, vibraciones, etc.).</p> <p>Ausencia de contactos en la detección de movimientos.</p>	<p>La salida del sensor es muy débil.</p> <p>El costo de adquisición es alto.</p>
	Célula reed	<p>Muy tolerantes al desalineamiento.</p> <p>Se ajustan bien a entornos</p>	<p>Alto costo de adquisición.</p> <p>Posibilidad de interferencias</p>

		contaminados por polvo y líquido.	electromagnéticas.
	Ópticos	<p>Larga vida útil.</p> <p>Gran precisión.</p> <p>Resistencia a fluctuaciones de la temperatura.</p> <p>Se obtiene buena resolución.</p> <p>Dimensiones reducidas.</p> <p>Sensibilidad a gran distancia; el haz luminoso sólo deberá viajar en una dirección, del transmisor al receptor.</p>	<p>No recomendable en ambientes contaminados (humedad, polvo, etc.)</p> <p>Susceptible a desalineamientos.</p> <p>Elevado coste de instalación, debido a tener que montar dos aparatos, cableados y ajustados.</p>
	De ultrasonido	<p>Elevada precisión en medición.</p> <p>Amplios alcances de exploración.</p> <p>Detectan incluso objetos transparentes y líquidos.</p> <p>Se puede instalar al aire libre.</p> <p>Miden y detectan distancias a objetos en movimiento.</p>	<p>Depende de condiciones ambientales.</p> <p>Reaccionan con relativa lentitud</p> <p>Incertidumbre de la procedencia del eco.</p> <p>Son costosos.</p>
	De contacto	<p>Son muy económicos.</p> <p>Su instalación es muy simple.</p> <p>Tiempo de respuesta rápido</p> <p>Diversidad de tamaños a la hora de implementarlo.</p>	<p>Necesitan de contacto físico con el elemento a sensar para poder reconocerlo.</p> <p>Susceptibles al ruido eléctrico.</p>
Sensores de posición	Potenciómetros	<p>Estructura sencilla, fácil de comprender.</p> <p>Margen de medición elevado tanto en recorrido como en tensión a utilizar.</p> <p>No se requiere electrónica de</p>	<p>Desgaste mecánico, abraxión.</p> <p>Errores de medición a causa de restos de abrasión.</p> <p>Problemas en caso de</p>

	<p>adaptación.</p> <p>Buena resistencia a tensiones parasitas.</p> <p>Amplia gama de temperaturas funcionamiento (<250°C).</p> <p>Amplio campo de medición.</p> <p>Ejecución de redundancia sin problemas.</p> <p>Facilidad de calibración.</p>	<p>utilizarlo dentro de un líquido.</p> <p>Variación de la resistencia de contacto entre cursor y pista de medición.</p> <p>Levantamiento del cursor en caso de fuertes aceleraciones o vibraciones.</p> <p>Miniaturización limitada.</p> <p>Producción de ruido.</p>
Resolver	<p>Muy precisos.</p> <p>Alta resolución.</p>	<p>Se pueden presentar inconvenientes en su instalación.</p> <p>Son costosos.</p>
Sincro	<p>Alta resolución.</p> <p>Buena estabilidad térmica.</p>	<p>Rango de medición muy limitado.</p> <p>La medición de ángulos grandes tiene un comportamiento no lineal.</p> <p>Su instalación puede llegar a complicarse.</p>
LVDT	<p>Resolución infinita.</p> <p>Poca carga mecánica.</p> <p>Bajo rozamiento: vida ilimitado y alta fiabilidad.</p> <p>Aísla el sensor (vástago) del circuito eléctrico.</p> <p>Alta repetibilidad.</p> <p>Alta linealidad.</p> <p>Rápida respuesta dinámica.</p>	<p>Existe la presencia de armónicos en la salida.</p> <p>Es sensible a los cambios de temperatura.</p> <p>Necesita circuito electrónico de acondicionamiento de señal.</p>
Encoder absoluto	<p>Son insensibles a los fallos de alimentación, dado que al</p>	<p>Son costosos.</p>

		<p>arrancar después de tal fallo el encoder suministra información sobre la posición angular real de la parte móvil que la puede utilizar el sistema de procesamiento de forma inmediata.</p> <p>Son insensibles a las interferencias en la línea. Las interferencias pueden alterar el código generado por un encoder absoluto pero automáticamente vuelve a la normalidad tan pronto como éstas desaparecen.</p> <p>Generan datos binarios paralelos, lo que facilita su conexión a un computador.</p>	<p>La cantidad de datos generados pueden llegar a ser un inconveniente a la hora de su adquisición.</p>
	Encoder incremental	<p>Bajo costo</p> <p>Concebido para uso semipesado</p> <p>Especial para ambientes industriales</p> <p>Montado sobre rodamientos</p> <p>Alta resolución</p> <p>Fácil montaje</p>	<p>Necesitan un punto de referencia antes de empezar a indicar la posición del elemento en un momento determinado.</p>
Sensor de velocidad	Sensor tacogeneratriz	<p>Su confiabilidad es alta.</p> <p>Rápida respuesta dinámica.</p> <p>Su construcción es simple, y por lo tanto económicos.</p>	<p>Su peso es elevado.</p>

Tabla 2. 5. Alternativas para la escogencia de sensores a instalarse en el robot en reconstrucción.

2.4.5. Hardware de acondicionamiento, transmisión y amplificación de señales

Otro de los componentes vitales en la reconstrucción de un robot serie es el hardware de transmisión, acondicionamiento y amplificación de señales desde los sensores hasta el sistema de control y desde éste hasta los actuadores.

Para la selección del hardware de acondicionamiento, transmisión de señales y control de potencia, es pertinente tener en cuenta:

- Robustez
- Velocidad de transmisión
- Compatibilidad con el resto del sistema
- Tamaño del subsistema
- Funcionamiento en tiempo real

En la siguiente tabla se presentan las alternativas para construir o reconstruir este subsistema [77] [81] - [84].

	Ventajas	Desventajas
Tarjetas electrónicas comerciales	Alta confiabilidad en la transmisión de señales. Bajo ruido. Alta velocidad de transmisión. Posible compatibilidad con software especializado sin necesidad de programación adicional.	Alto costo.
Sistemas electrónicos diseñados de acuerdo con los requerimientos	Tarjetas diseñadas de acuerdo a los requerimientos del sistema. Podría representar un costo mas bajo con respecto a los sistemas electrónicos comerciales.	Representan menos fiabilidad con respecto a las tarjetas electrónicas comerciales. Se podrían presentar inconvenientes con la adquisición de algunos elementos para su construcción. Resultan menos compactas que las tarjetas electrónicas comerciales.

Tabla 2. 6. Posibilidades para la reconstrucción del hardware del robot.

2.5. MÉTODO DE EVALUACIÓN TECNOLÓGICA

Teniendo ya una serie de posibilidades para la selección de los componentes tecnológicos que llevará al manipulador a su correcto funcionamiento, es preciso evaluar cada una de las posibilidades, y de esta manera determinar cuál se ajusta más a las necesidades y requerimientos estipulados con anterioridad.

Es pertinente tomar en cuenta cada uno de los ítems descritos anteriormente para la selección de determinado dispositivo, además de otras variables que se puedan presentar en una aplicación particular. En seguida, se da un valor entre 0 y 1 o 0 y 100% a cada factor a ser tenido en cuenta, y la suma de los valores de todos los ítems debe ser igual a 1 o 100%, para que de esta manera se pueda dar una interpretación mas simple a los resultados obtenidos, y la evaluación completa sea manejada en una misma escala [85] - [87].

Habiendo estimado ya de manera numérica los ítems más importantes para cada necesidad de implementación tecnológica, es necesario evaluar cada posible solución, dando puntajes a cada uno de los factores tenidos en cuenta sobre la base establecida anteriormente [87].

Una vez obtenidos todos los puntajes, será preciso sumar los valores de cada alternativa, y la que obtenga el mayor puntaje será la primera opción a ser escogida, pero no la definitiva. Pues es posible es ésta tenga incompatibilidades técnicas con el resto del sistema o puede presentarse algún otro inconveniente que no se haya previsto y por lo tanto no es conveniente que esta tecnología sea implementada en el robot. En ese caso, será escogida la opción con el segundo mayor puntaje o la tercera si se siguen presentando inconvenientes [87].

Este procedimiento debe hacerse para cada una de las necesidades de implementación tecnológica. Y una vez se haya seleccionado todas las soluciones, será necesario corroborar de manera crítica que las soluciones escogidas son las más adecuadas, en el momento de la integración del sistema no se deben presentar incompatibilidades, esta integración debe ser lo más simple posible. De esta forma se está seguro que los componentes seleccionados van a responder a las necesidades y requerimientos del sistema.

2.6. INTEGRACIÓN Y PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA ROBÓTICO

Una vez se disponga de todos los componentes que van a integrar el sistema robótico, se dará paso a la integración. Para ello, es recomendable empezar poniendo en marcha el *gripper* o efector final y luego la articulación que antecede a éste, y así sucesivamente hasta llegar a la articulación de la base del robot, esto con el fin de estar seguro de que el sistema tendrá un óptimo desempeño cuando esté integrado completamente.

Una vez se hayan instalado sensores y actuadores en cada una de las articulaciones, es pertinente instalar el sistema de potencia y el sistema de acondicionamiento y transmisión de señales de los sensores al sistema de control, y con esto el sistema quedará integrado en su parte hardware.

El controlador, que debió haber sido desarrollado paralelamente al trabajo de selección, adquisición e integración de los elementos hardware y previamente probado mediante simulación, será integrado al hardware y sólo faltará hacer pruebas y reacondicionamiento del sistema para que el robot tenga un óptimo desempeño.

En la Figura 2.10 se indica un diagrama de flujo que muestra de manera progresiva el proceso de integración y puesta en marcha del sistema.

Con la puesta en marcha, se da por concluida la reconstrucción del sistema robótico, quedando sólo como tarea opcional la identificación paramétrica de éste, de la cual se tratará en el capítulo 4, advirtiéndose que ésta no es estrictamente necesaria para poner en marcha el robot, si se tiene el sistema de control adecuado.

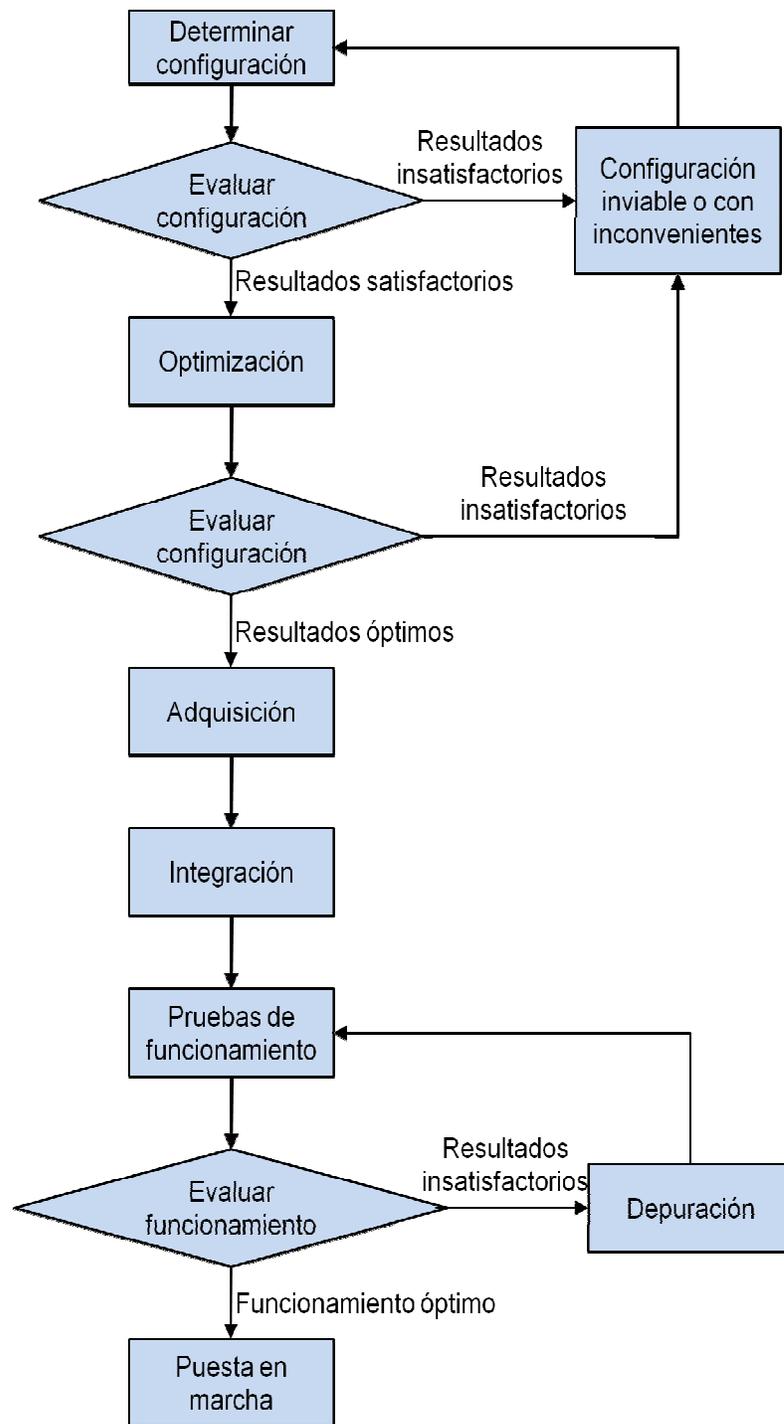


Figura 2. 11. Proceso de evaluación tecnológica, adquisición integración y puesta en marcha del sistema

3. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA

En este capítulo se hace una aplicación sistemática a un caso de estudio (robot HRA934), de la metodología para la reconstrucción de un robot serie propuesta en el capítulo anterior.

El manipulador en cuestión, es un robot producido por la empresa inglesa FeedBack que entró en el mercado en el año 1983, y permaneció hasta 1990 [88]. Éste es un robot serie de 5 grados de libertad con articulaciones rotacionales, más un efector final de dos estados. Todo el sistema mecánico es accionado mediante émbolos hidráulicos, mientras que el sistema de control está dado por un sistema electrónico que actúa sobre las válvulas y que a su vez recibe una señal de control desde un PC o un control manual (*processor box robot interface*) [88] [90] (Figuras 3.1 y 3.2).

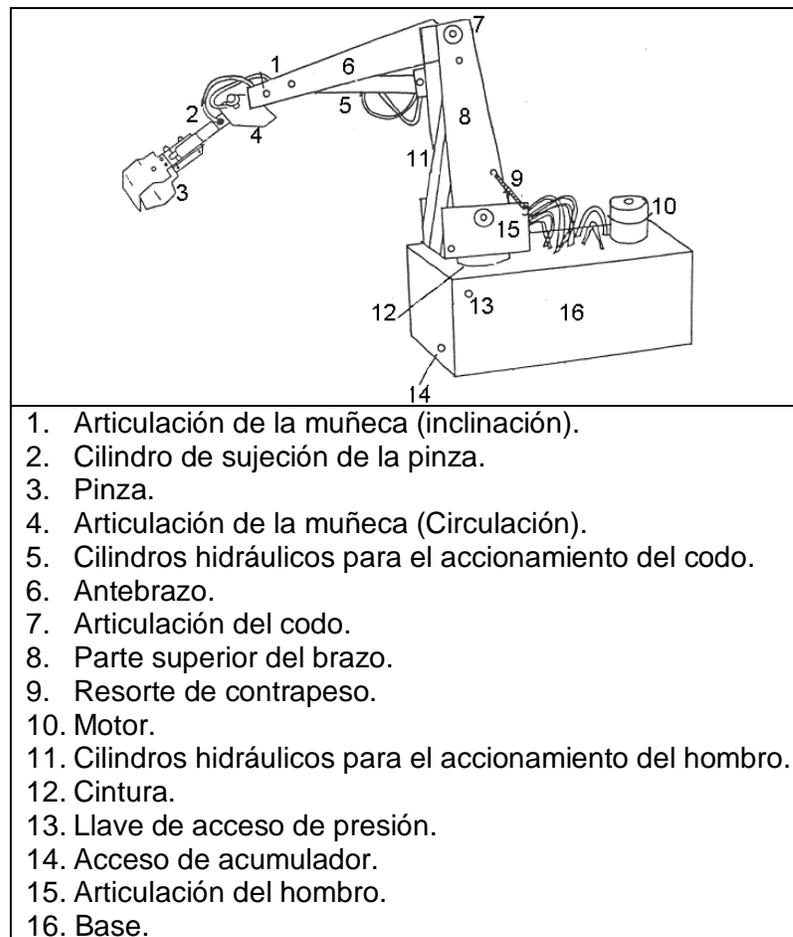


Figura 3. 1. Esquema del brazo robótico HRA334 [89].

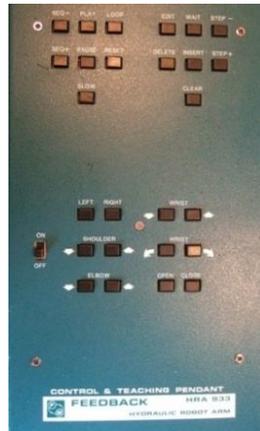


Figura 3. 2. *Processor box robot interface* [89].

Este robot tiene una estructura mecánica construida en aluminio en cuanto a sus eslabones se refiere, mientras que la base está hecha de hierro, alcanza una distancia máxima de 1.13 m. desde su base hasta el efector final y tiene una capacidad de rotación de 120° sobre su base [90].

3.1. ESPECIFICACIÓN DE REQUERIMIENTOS

El robot reconstruido, tiene fines netamente académicos en donde se pueda experimentar sobre éste diferentes técnicas de control y modelado, de tal forma que se aporte al desarrollo de la robótica industrial y de prácticas académicas rutinarias, que contribuyan con el aprendizaje de la robótica en el estudiante. Por estas razones no fue necesario hacer una reconstrucción con características industriales, en donde la velocidad, precisión y potencia de éste son variables sumamente críticas, y no dan espacio para prescindir de la excelente respuesta del manipulador en éstas. En cambio, se hizo indispensable hacer la aplicación de la metodología a un bajo costo, en donde los recursos económicos fueron muy limitados y en un tiempo medianamente corto.

3.1.1. Evaluación del estado en que se encuentra el robot

El brazo robótico HRA934 que dispuso el Departamento de Electrónica Instrumentación y Control de la Universidad del Cauca, se encontró en un estado bastante deplorable. Pues éste no tenía el panel de control (como el mostrado en la figura 3.2), además la bomba de aceite presentaba fugas y los émbolos se encontraron en muy malas condiciones. Esto sumado al desgaste natural y al deterioro por falta de mantenimiento. Es decir el

HRA934 se encontró totalmente arruinado y la estructura mecánica fue lo único rescatable.

Esto llevó a concluir que este mecanismo robótico necesitaba una reconstrucción total. Lo que significa cambio de accionadores, sensores, diseño de un nuevo sistema de control y un medio de transmisión de datos desde los sensores hasta el controlador y desde este hasta los actuadores. Todo esto utilizando el mínimo de recursos económicos posible y aprovechando al máximo los elementos y dispositivos ofrecidos por la Universidad.

3.2. MODELADO DEL ROBOT

Para determinar el modelado del robot, se realizó el esquema geométrico indicado en la Figura 3.3, y con este se diligenció la tabla 3.1 de parámetros geométricos, siguiendo el método de Khalil – Dombre [44]. (Haciendo claridad que la articulación 6 es una extensión del cuerpo 5, para poder tener en cuenta la distancia entre ésta articulación y el extremo del efector final).

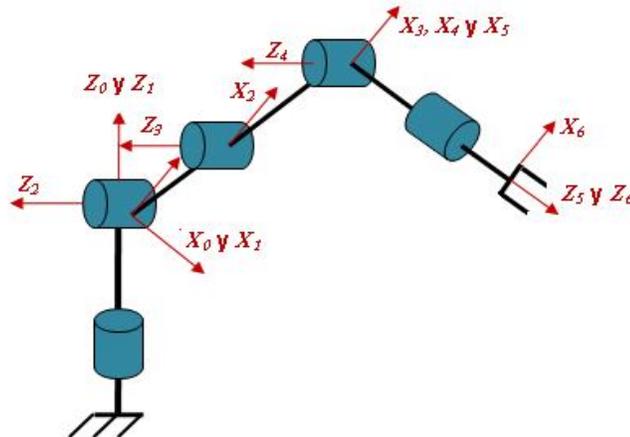


Figura 3. 3. Esquema geométrico del robot HRA934

j	σ_j	α_j	d_j	θ_j	r_j
1	0	0	0	θ_1	0
2	0	90	0	θ_2	0
3	0	0	D_3	θ_3	0
4	0	0	D_4	θ_4	0
5	0	90	0	θ_5	0
6	x	0	0	0	R_6

Tabla 3. 1. Tabla de parámetros geométricos del robot HRA934.

La tabla anterior fue introducida en el software SYMORO+® (SYmbolic MOdelling of RObots) [91], la cual arrojó la tabla de parámetros de base indicada en la tabla 3.2, y cuyas ecuaciones de reagrupamiento de parámetros se indican enseguida (ecuaciones 28 - 47). Esta tabla fue nuevamente introducida en SYMORO+® para que entregara los MGD, MDI y MDD y con estos proceder a realizar las respectivas simulaciones en donde se pueda vislumbrar el comportamiento del robot HRA934 a reconstruir.

<i>j</i>	<i>XX</i>	<i>XY</i>	<i>XZ</i>	<i>YY</i>	<i>YZ</i>	<i>ZZ</i>	<i>MX</i>	<i>MY</i>	<i>MZ</i>	<i>M</i>	<i>Ia</i>
1	0	0	0	0	0	ZZ1R	0	0	0	0	0
2	XX2R	XY2	XZ2R	0	YZ2	ZZ2R	MX2R	MY2	0	0	IA2
3	XX3R	XY3	XZ3R	0	YZ3	ZZ3R	MX3R	MY3	0	0	IA3
4	XX4R	XY4	XZ4	0	YZ4R	ZZ4R	MX4	MY4R	0	0	IA4
5	XX5R	XY5R	XZ5R	0	YZ5R	ZZ5R	MX5R	MY5R	0	0	IA5
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 3. 2. Tabla de parámetros de base del robot HRA934.

$$ZZ1R = IA1 + ZZ1 + \text{sen}(\pi/2)^2 \left(\begin{array}{l} D4^2(M4 + M5) + D3^2(M3 + M4 + M5) + YY2 + YY3 \\ + YY4 + (YY5 + YY6)(1 - \text{sen}(\pi/2)^2) \end{array} \right) \quad (28)$$

$$XX2R = -(D3^2(M3 + M4 + M5)) + XX2 - YY2 \quad (29)$$

$$XZ2R = XZ2 - D3(MZ3 + MZ4 + MZ5 \cos(\pi/2)) \quad (30)$$

$$ZZ2R = D3^2(M3 + M4 + M5) + ZZ2 \quad (31)$$

$$MX2R = D3(M3 + M4 + M5) + MX2 \quad (32)$$

$$XX3R = -(D4^2(M4 + M5)) + XX3 - YY3 \quad (33)$$

$$XZ3R = XZ3 - D4(MZ4 + MZ5 \cos(\pi/2)) \quad (34)$$

$$ZZ3R = D4^2(M4 + M5) + ZZ3 \quad (35)$$

$$MX3R = D4(M4 + M5) + MX3 \quad (36)$$

$$XX4R = XX4 - YY4 + YY5 + YY6 - (YY5 + YY6)(1 - \text{sen}(\pi/2)^2) \quad (37)$$

$$YZ4R = YZ4 + (YY5 + YY6) \cos(\pi/2) \text{sen}(\pi/2) \quad (38)$$

$$ZZ4R = ZZ4 + (YY5 + YY6) \text{sen}(\pi / 2)^2 \quad (39)$$

$$MY4R = MY4 - MZ5 \text{sen}(\pi / 2) \quad (40)$$

$$XX5R = XX5 + XX6 - YY5 - YY6 \quad (41)$$

$$XY5R = XY5 + XY6 \quad (42)$$

$$XZ5R = XZ5 + XZ6 \quad (43)$$

$$YZ5R = YZ5 + YZ6 \quad (44)$$

$$ZZ5R = ZZ5 + ZZ6 \quad (45)$$

$$MX5R = MX5 + MX6 \quad (46)$$

$$MY5R = MY5 + MY6 \quad (47)$$

De acuerdo a la ecuación 21 indicada en el capítulo anterior se procedió a calcular los tensores de inercia, y para encontrar los centros de masa y sus distancias hasta cada una de las articulaciones, se diseñaron los cuerpos en el software CAD SolidEdge®, y así tener una mayor precisión en los valores que enseguida se reemplazarían en las variables X_j , Y_j , Z_j , D_j , R_j e IA_j . El diseño de los cuerpos en el software mencionado se muestra en la Figura 3.4 y los valores numéricos obtenidos en la tabla 3.3, junto con otros valores necesarios para la simulación.

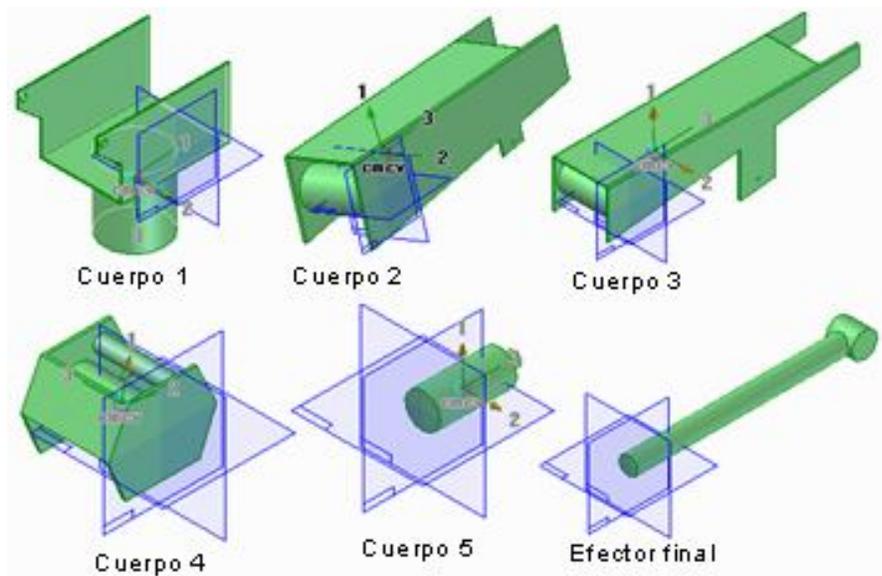


Figura 3. 4. Diseño en SolidEdge® de los cuerpos del robot HRA934.

j	X_j (m)	Y_j (m)	Z_j (m)	R_j (m)	D_j (m)	IA_j (Kg.m ²)	M_j (Kg)
1	0.00001	0.00001	-0.06642	-	-	0.045	3.30
2	0.07505	0.00001	0.00001	-	-	0.045	4.50
3	0.07607	0.00001	0.00001	-	0.395	0.045	3.00
4	-0.01296	0.01893	0.00001	-	0.405	0.045	0.70
5	0.03964	0.00001	0.00001	-	-	0.045	0.65
6	0.00001	0.00001	-0.11334	0.29	-	-	0.60

Tabla 3. 3. Valores numéricos para X_j , Y_j , Z_j , D_j , R_j e IA_j y las distancias para la simulación del robot HRA934.

Cabe anotar que R_j y D_j se consiguieron haciendo mediciones directas sobre el robot en reconstrucción, lo mismo que las masas de los cuerpos (M_j), con la diferencia que a éstas se les añadió un valor que sería la masa tentativa del motor que accionaría la articulación de dicho cuerpo, e IA_j es un valor de inercia típico de un motor DC brush.

Los valores consignados en la tabla 3.3, son valores válidos para simular los modelos dinámicos del robot con su estructura original. Aunque se están omitiendo algunas parámetros como los coeficientes de fricción seca y viscosa y no se está teniendo en cuenta el modelo de la dinámica del resorte de contrapeso en la articulación dos, el modelo es válidos para determinar los pares mecánicos necesarios para accionar cada una de las articulaciones. Pero no para simular el sistema reconstruido, ya que su estructura física, masas de los cuerpos, centros de gravedad e inercias de los accionadores cambian completamente con respecto a la estructura original.

3.3. OBTENCIÓN DE LOS PARES MECÁNICOS NECESARIOS PARA ACCIONAR CADA UNA DE LAS ARTICULACIONES DEL ROBOT

Para determinar los pares mecánicos necesarios para accionar cada una de las articulaciones del robot en reconstrucción, se emplearon los tres métodos descritos en el capítulo dos.

3.3.1. Obtención de los pares mecánicos a partir de la simulación y control sobre una trayectoria definida del robot mediante los modelos: dinámico directo y dinámico inverso

Para determinar los pares mecánicos mediante este método se utilizó una trayectoria articular grado cinco (descrita por la ecuación 48 y cuya grafica se indica en la Figura 3.5), con unos tiempos de duración del trazado de 5 y 10 segundos, debido a que cuanto más rápido sea el trazado de la trayectoria,

el esfuerzo de control es mayor y los pares deben ser más grandes. Esto se hizo con el fin de determinar cuál podría ser la velocidad apropiada para la aplicación del robot, en donde se tenga un equilibrio entre velocidad y potencia de los actuadores, que se ve traducida en tamaño y costo de estos.

$$r(t) = 10\left(\frac{t}{t_f}\right)^3 - 15\left(\frac{t}{t_f}\right)^4 + 6\left(\frac{t}{t_f}\right)^5 \quad (48)$$

Donde: $r(t)$ es la posición articular en el tiempo t y t_f , el tiempo final de la trayectoria.

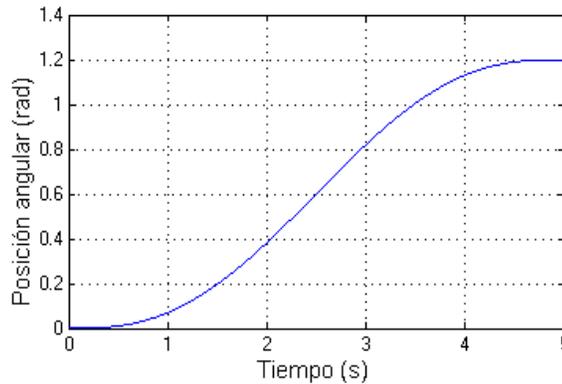
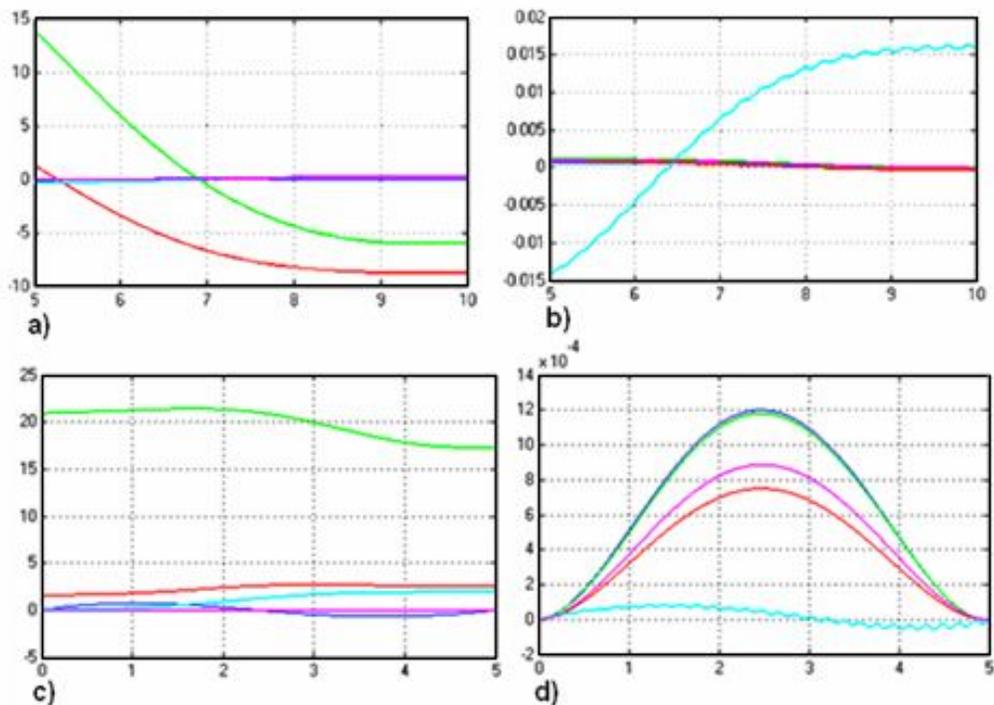


Figura 3. 5. Trayectoria articular grado cinco.

La técnica de control utilizada fue control por par calculado (*calculate torque control - CTC*). Las imágenes de la Figura 3.6, muestran los pares necesarios para accionar cada una de las articulaciones del robot caso de estudio (a la izquierda), y los errores articulares alcanzados con dichos pares. Dichas graficas fueron obtenidas mediante *Matlab – Simulink®*.



Figuras 3. 6. a) Pares obtenidos con un tiempo de duración de la trayectoria de 10 segundos. b) Error articular de la trayectoria de la trayectoria trazada por el robot en un tiempo de 10 segundos. c) Pares obtenidos con un tiempo de duración de la trayectoria de 5 segundos. d) Error articular de la trayectoria de la trayectoria trazada por el robot en un tiempo de 5 segundos.

Se debe destacar que las graficas de color azul oscuro pertenecen a la primera articulación, verde a la segunda, rojo la tercera, azul claro la cuarta articulación y violeta la quinta. Los valores proporcionales y derivativos utilizados para la sintonización del controlador están indicados en la tabla 3.4.

Articulación	Valor proporcional (k_p)	Valor derivativo (k_d)
1	15000	40
2	10000	45
3	10000	40
4	1200	0.02
5	25000	100

Tabla 3.4. Valores con los cuales se sintonizó el controlador CTC para determinar los pares necesarios para accionar cada una de las articulaciones del robot HRA934.

3.3.2. Obtención de los pares mecánicos mediante la simulación del modelo dinámico inverso en lazo abierto

Para la obtención de los pares mecánicos mediante la simulación del modelo dinámico inverso en lazo abierto, se utilizó una señal de posición de forma seno con una frecuencia de 1 rad/s , las velocidades y aceleraciones se obtuvieron con la primera y segunda derivada respectivamente. La posición inicial de las articulaciones fue $[0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$, es decir que el robot inició desde una posición horizontal.

La Figura 3.7, muestra los pares necesarios para el accionamiento del robot HRA934 utilizando esta técnica. La simulación fue realizada utilizando el software *Matlab – Simulink®* y los colores que representan a cada una de las articulaciones son iguales que los de la grafica 3.6.

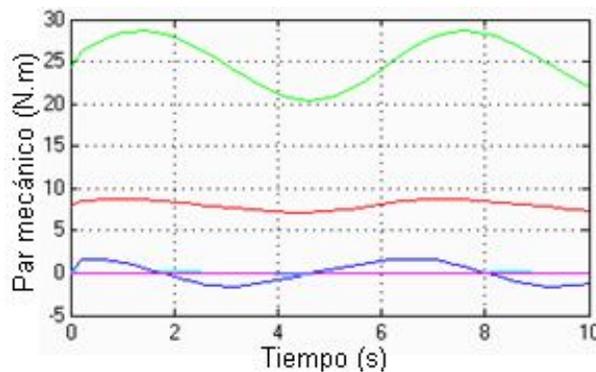


Figura 3.7. Grafica de los pares necesarios para el accionamiento del robot HRA934 obtenidos mediante la técnica de la simulación del modelo dinámico inverso en lazo abierto.

3.3.3. Obtención de los pares mecánicos necesarios para accionar cada una de las articulaciones mediante pruebas físicas

Con este método se determinaron los pares necesarios para accionar las articulaciones 2, 3 y 4. Para las articulaciones 1 y 5 no fue posible determinar sus pares mecánicos debido a su eje de rotación. Siguiendo a cabalidad el procedimiento descrito en el subtítulo 2.3.3, se obtuvieron los siguientes resultados.

Articulación	Par necesario para su accionamiento (N.m)
2	32.41
3	12.38
4	1.25

Tabla 3.5. Pares necesarios para accionar las articulaciones 2, 3 y 4 del robot en reconstrucción utilizando el método de pruebas físicas.

Después de haber encontrado los pares mecánicos necesarios para accionar cada una de las articulaciones del robot HRA934 mediante diferentes técnicas y, obteniendo resultados similares, se tomó la decisión que el par mecánico que debe generar cada uno de los actuadores para accionar las articulaciones del robot es el par más alto encontrado mediante las diferentes técnicas, más un 20% de par mecánico adicional. Este porcentaje es en mínimo recomendado para que el actuador no trabaje en el límite de su capacidad de accionamiento [7] [87] [92].

La tabla 3.6 muestra un resumen de los pares mecánicos necesarios para accionar cada una de las articulaciones encontradas mediante las diferentes técnicas y los pares mecánicos seleccionados para accionar cada una de las articulaciones del robot.

Articulación	Pares obtenidos (<i>N.m</i>)				Par seleccionado
	El lazo cerrado		En lazo abierto	Mediante pruebas físicas	
	5s	10s			
1	0.74	0.0084	1.65	-	2
2	21.42	14	28.6	32.41	40
3	2.74	1.33	8.75	12.38	14
4	1.96	0.246	0.1	1.25	2.35
5	0.067	0.175	0.03	-	0.21

Tabla 3.6. Resumen de los pares obtenidos para el accionamiento de cada una de las articulaciones del robot HRA934 y la selección definitiva del par que tendrán los actuadores.

3.4. SELECCIÓN DE LOS COMPONENTES TECNOLÓGICOS QUE INTEGRARÁN EL SISTEMA ROBÓTICO

Teniendo en cuenta las alternativas y sus criterios a evaluar a la hora de su selección, presentados en la sección 2.4, se buscó determinar las tecnologías más adecuadas de acuerdo a las especificaciones y limitaciones del manipulador, para cada uno de los subsistemas críticos mencionados en dicha sección de esta monografía.

3.4.1. Sistemas de control

Para el módulo físico que contendría el sistema de control se habían presentado tres alternativas, que ahora serán evaluadas de acuerdo a los criterios intrínsecos del sistema y las necesidades del robot HRA934 para su correcta reconstrucción.

En la tabla 3.7, se presenta la prioridad (en números) que se le da a los ítems de más relevancia a la hora de la selección del módulo de sistema de control.

Criterios evaluados	Valor
Robustez	15
Programabilidad	25
Componentes de E/S	20
Compatibilidad	20
Costo	10
Plazo de entrega	10
Total (%)	100

Tabla 3.7. Prioridades a tener en cuenta a la hora de la evaluación del módulo en el que irá montado el sistema de control.

La tabla anterior indica que la programabilidad del módulo del sistema de control es la prioridad a la hora de adquirir la tecnología que soporte este sistema. Y el costo y el plazo de entrega son los criterios de menos peso para este caso a la hora de reconstruir el robot HRA934.

En la siguiente tabla se indica la evaluación realizada a tres alternativas para el sistema de control. La evaluación se hizo de acuerdo a las necesidades, las posibilidades técnicas, tecnológicas y económicas del medio y el momento.

Criterios evaluados	PC	PLC	Sistema empotrado
Robustez	10	12	10
Programabilidad	20	15	10
Componentes de E/S	15	10	5
Compatibilidad	15	15	10
Costo	10	5	10
Plazo de entrega	10	5	5
Total (%)	80	62	50

Tabla 3.8. Resultado de la evaluación de las tecnologías para el modulo de control del robot HRA934.

Los resultados de la tabla 3.8, indican que claramente un PC es el módulo más apropiado para programar allí el sistema de control. Este dispositivo además de mostrar las ventajas indicadas en la tabla anterior con respecto a las demás posibilidades, presenta el beneficio de que es posible programar la HMI (interfaz hombre-máquina), lo que reduce enormemente el costo de la reconstrucción, ya que se están integrando dos subsistemas del robot en un mismo dispositivo.

Una vez escogido el hardware donde se implementará el sistema de control, es pertinente seleccionar el software donde se va a implementar este. La tabla 3.9, muestra una serie de posibilidades con sus características más relevantes, de donde se seleccionará el software para la implementación del controlador.

Software	Ventajas	Desventajas
LabView	Fácil comunicación con periféricos. Lenguaje de programación gráfico. Se reduce el tiempo de desarrollo de las aplicaciones al menos de 4 a 10 veces, ya que es muy intuitivo y fácil de aprender. Dota de gran flexibilidad al sistema, permitiendo cambios y actualizaciones tanto del hardware como del software. Tiene la posibilidad de incorporar aplicaciones escritas en otros lenguajes.	Costo de licencia elevada. Software sobredimensionado para el diseño. No ejecuta las tareas en tiempo real.
Java	Se puede ejecutar con cualquier tipo de ordenador. Software libre. Programación orientada a objetos.	Los programas desarrollados en Java son lentos. Poco desarrollo en la parte gráfica.
C	Software potente y adecuado para la aplicación.	Suelen ser programas muy pesados. No es multiplataforma.

Tabla 3.9. Evaluación del software en el que se implementará el sistema de control del robot en reconstrucción [93] - [96].

Teniendo en cuenta que los datos se visualizarán en un computador de una manera agradable con el usuario, su programación es simple y es posible establecer comunicación con una amplia gama de periféricos, se seleccionó LabView, a pesar de ser una opción costosa, pero esto no es inconveniente ya que el software lo ofrece la Universidad.

3.4.2. Actuadores

En cuanto al sistema de accionamiento de las articulaciones del robot se presenta una amplia gama de posibilidades. Por lo tanto es pertinente ir

descartando posibilidades paulatinamente, hasta llegar a una solución correcta y definitiva.

En primer lugar se hará una evaluación para la selección de la fuente de alimentación, que energizará al actuador, después de tener la fuente y haber descartado una cantidad considerable de posibilidades, se hará una evaluación mas exhaustiva para determinar el tipo de actuador que llevará cada una de las articulaciones.

La tabla 3.10, muestra la evaluación de la fuente de alimentación con la cual se accionan los posibles actuadores que llevará el sistema.

Fuente	Costo			Facilidad de instalación	Controlabilidad	Recursos adicionales para la integración del sistema	Ambiente de trabajo del robot
	Adquisición	Instalación	Mantenimiento				
Hidráulica	Medio	Medio	Alto	Media	Media	Muchos	Pueden presentarse fugas
Neumática	Alto	Medio	Medio	Media	Baja	Muchos	Ruidoso
Eléctrica	CD	Medio	Bajo	Ninguno	Alta	Muy pocos	Se pueden presentar chispas
	CA	Baja	Bajo	Ninguno	Media	Pocos	

Tabla 3.10. Evaluación de las fuentes de alimentación para los actuadores del robot HRA934

De acuerdo a la tabla 3.10, el tipo de alimentación más conveniente es la de fuente eléctrica de corriente directa (CD), con el inconveniente de que se pueden presentar chispas cuando el robot esté en marcha. Pero como este será un robot netamente académico, donde es muy poco probable que estas generen incendios o provoquen explosiones por gases en el aire, esto no presenta mayor inconveniente. Por esto, se descartan definitivamente los actuadores alimentados mediante medios hidráulicos, neumáticos y eléctricos de corriente alterna (CA). Por lo que de aquí en adelante sólo se tendrán en cuenta, para la evaluación los accionadores alimentados mediante corriente directa, es decir, los motores DC brush, brushless, accionadores lineales y motores paso a paso.

El paso a seguir, es definir la prioridad que tendrá cada una de las características a tener en cuenta al momento de seleccionar los actuadores. Esto se define en la tabla 3.11.

Criterios evaluados	Valor
Complejidad de control	12
Tamaño	10
Peso	10
Velocidad	6
Inercia	5

Par de arranque	5
Par máximo	6
Ciclo de vida	5
Compatibilidad	10
Costo	25
Plazo de entrega	6
Total (%)	100

Tabla 3.11. Características prioritarias estipuladas numéricamente tenidas en cuenta a la hora adquirir los actuadores para el robot HRA934.

Debido al bajo presupuesto dispuesto para la reconstrucción del robot en cuestión, el costo del actuador es el factor más importante a tener en cuenta a la hora de su adquisición, sin dejar de lado los demás parámetros que influyen en la selección (como se muestra en la tabla 3.11).

Criterios evaluados	Motores DC		Accionadores lineales	Motores Paso a paso
	Brush	Brushless		
Complejidad de control	6	6	10	5
Tamaño	5	6	8	5
Peso	7	8	7	4
Velocidad	6	6	5	4
Inercia	3	4	5	2
Par de arranque	4	4	5	3
Par máximo	4	4	4	3
Ciclo de vida	4	5	6	4
Compatibilidad	6	6	9	4
Costo	20	8	12	10
Plazo de entrega	5	3	3	3
Total (%)	70	60	74	47

Tabla 3.12. Resultado de la evaluación de los posibles actuadores que se instalaran en el manipulador que se está reconstruyendo.

La tabla anterior indica que los actuadores más apropiados para instalarse en el robot HRA934 son los lineales, debido que son relativamente económicos y no necesitan mecanismos de accionamiento adicionales. Además, el robot original se accionaba mediante émbolos hidráulicos de movimiento similar (figura 3.1).

Estos actuadores son ideales para las articulaciones 2, 3 y 4. Pero no para 1 y 5, debido que el eje de rotación de éstas se encuentra sobre el eje z , y hacer la instalación de un actuador lineal allí es arduo, y su funcionamiento podría ser menos eficiente que la de un motor rotacional. Por eso, para estas

articulaciones se seleccionará un motor DC brush, que obtuvo un mayor puntaje en la evaluación después de los accionadores lineales.

El método diseñado para la determinación de la fuerza que deberán tener los actuadores lineales, para accionar articulaciones rotacionales y los resultados obtenidos para las articulaciones 2, 3 y 4 del HRA934 se muestran en el anexo A.

Buscando en el mercado los actuadores que respondan a estos requerimientos de fuerza, que se puedan instalar en el robot y que su longitud y elongación se acondicionen a las características físicas del mecanismo, se pudo determinar que en el mercado local y nacional no es posible encontrar unos accionadores que se ajusten a los requerimientos que exige la reconstrucción. Y en el mercado internacional los costos que implica su consecución son considerablemente altos, de acuerdo al presupuesto del que se dispone se hace muy difícil su adquisición.

Debido a este inconveniente, se procedió entonces a buscar unos motores DC brush (que después de los accionadores lineales obtuvieron el puntaje más alto en la evaluación), en el mercado local. Pero los motores que se pudieron encontrar y que se ajustaban al presupuesto, fueron unos motores con reducción de velocidad, que generan un par más bajo del necesario para accionar las articulaciones y giran a una velocidad más alta de la adecuada para el correcto funcionamiento del robot. Esto obliga a colocar un mecanismo de accionamiento adicional, que aumente el par generado por el motoreductor y disminuya la velocidad de acuerdo a la ecuación 27.

3.4.3. Mecanismos de accionamiento

Como se mencionó anteriormente, los motores disponen de un mecanismo de accionamiento constituido por engranajes, pero ninguno de los pares generados por los motoredutores alcanza a accionar de manera holgada las articulaciones del robot, y además sus velocidades son muy altas. Por lo que se hace indispensable colocar mecanismos de accionamiento adicionales que solucionen de manera eficiente estos inconvenientes.

Para ello se hizo una evaluación a los mecanismos de accionamiento propuestos en el capítulo tres, y en seguida la respectiva selección del subsistema más adecuado. La tabla 3.13 indica las prioridades de manera numérica que se darán a las características de los mecanismos de accionamiento, y la tabla 3.14, los resultados de la evaluación realizada.

Criterios evaluados	Valor
Relación de reducción	10
Peso y tamaño	8
Momento de inercia	8
Velocidad de entrada máxima	5
Par de salida nominal	7
Par de salida máximo	7
Juego angular	8
Rigidez torsional	6
Rendimiento	8
Costo de instalación	5
Compatibilidad	10
Costo	12
Plazo de entrega	6
Total (%)	100

Tabla 3.13. Características prioritarias a tener en cuenta a la hora adquirir los mecanismos de accionamiento para el robot HRA934.

Criterios evaluados	Accionamiento directo	Engranaje	Correa dentada	Cadena	Paralelogramo	Cable
Relación de reducción	1	8	9	6	6	6
Peso y tamaño	8	6	5	7	4	5
Momento de inercia	8	6	7	7	7	7
Velocidad de entrada máxima	5	5	4	5	2	3
Par de salida nominal	1	5	4	6	6	5
Par de salida máximo	1	6	6	6	7	6
Juego angular	8	4	5	7	7	7
Rigidez torsional	6	5	3	4	5	4
Rendimiento	1	7	6	7	3	5
Costo de instalación	0	2	2	4	1	3
Compatibilidad	0	6	7	8	2	5
Costo	0	2	4	8	1	6
Plazo de entrega	0	1	4	4	1	2
Total (%)	39	63	66	79	52	64

Tabla 3.14. Resultado de la evaluación de los mecanismos de accionamiento que se propone instalar en el robot HRA934.

De acuerdo a los resultados indicados en la tabla 3.14, el mecanismo de accionamiento más apropiado para instalarse en el robot caso de estudio, es

el de cadena. Con estos mecanismos se lograría solucionar los problemas de par y velocidad generados por los motores dispuestos para la reconstrucción.

3.4.4. Sensores

La variable que se desea medir en este sistema es la posición angular de cada articulación ya que la velocidad del robot puede ser inferida a partir de los datos de posición de cada una de las articulaciones. Además, es pertinente colocar sensores de fin de carrera que indiquen que la articulación ya alcanzó el ángulo máximo o mínimo permitido, y que detenga el actuador en caso de falla del sistema de control. Por lo tanto se analizará sólo y por separado los sensores de presencia y de posición.

- **Sensores de presencia**

Las tablas 3.15 y 3.16, muestran las prioridades tenidas en cuenta y los resultados de la evaluación realizada para la aplicación caso de estudio.

Criterios evaluados	Valor
Facilidad de instalación	25
Tipo de datos entregados	10
Fiabilidad de los datos entregados	15
Resolución	5
Compatibilidad	10
Costo	25
Plazo de entrega	10
Total (%)	100

Tabla 3.15 Características prioritarias a tener en cuenta a la hora adquirir los sensores de presencia para el robot caso de estudio.

Criterios evaluados	Inductivos	Capacitivos	Efecto hall	Célula reed	Ópticos	Ultrasonido	De contacto
Facilidad de instalación	10	15	15	10	20	15	23
Tipo de datos entregados	8	8	8	10	10	5	8
Fiabilidad de los datos entregados	10	15	10	10	12	15	12
Resolución	3	4	4	4	5	5	4
Compatibilidad	8	10	10	8	10	5	10
Costo	5	5	4	1	20	2	24
Plazo de entrega	2	2	2	1	8	2	10
Total (%)	46	59	53	44	85	49	91

Tabla 3.16. Resultados de la evaluación de los sensores de presencia para la aplicación de la metodología en la reconstrucción del robot HRA934.

Según los resultados indicados en la tabla anterior, el componente más adecuado para detectar que la articulación alcanzó su ángulo máximo o mínimo de giro es el sensor de contacto. Pues su costo es muy reducido, no

es necesario agregar componentes adicionales y su funcionamiento es simple y confiable.

- **Sensores de posición angular**

En seguida se hizo la evaluación para determinar el sensor de posición angular, que debe llevar cada una de las articulaciones del robot. Las tablas 3.17 y 3.18, indican los resultados del procedimiento de evaluación para el caso.

Criterios evaluados	Valor
Facilidad de instalación	20
Tipo de datos entregados	15
Fiabilidad de los datos entregados	15
Resolución	10
Compatibilidad	10
Costo	20
Plazo de entrega	10
Total (%)	100

Tabla 3.17. Características prioritarias a tener en cuenta a la hora adquirir los sensores de posición para la reconstrucción del robot HRA934.

Criterios evaluados	Potenciómetros	Resolver	Sincro	LVDT	Encoder absoluto	Encoder incremental
Facilidad de instalación	15	4	5	4	15	17
Tipo de datos entregados	12	14	12	12	15	12
Fiabilidad de los datos entregados	12	15	12	12	15	15
Resolución	8	10	9	10	9	9
Compatibilidad	9	8	8	2	9	9
Costo	15	2	2	5	3	6
Plazo de entrega	7	2	2	3	3	3
Total (%)	78	55	50	48	69	71

Tabla 3.18. Resultados de la evaluación de los sensores de posición para la aplicación en la reconstrucción del robot HRA934.

Según los resultados de la evaluación, los potenciómetros son los sensores adecuados para medir la posición de cada una de las juntas del robot HRA934, por su simplicidad y bajo costo.

3.4.5. Hardware de acondicionamiento, transmisión y amplificación de señales

Esta parte de la aplicación de la metodología debió ser dividida en tres partes: acondicionamiento, transmisión y amplificación de señales. Para poder así hacer una correcta selección del hardware.

Se tomó en primera instancia el subsistema que acondicionará la señal que envían los sensores al controlador, teniendo en cuenta que los sensores de posición entregan una señal de voltaje analógica y, el módulo de control sólo es capaz de leer datos digitales. Además que los sensores de presencia entregan datos discretos *On-Off* que indica si el sistema esta funcionando correctamente o hay alguna emergencia por falla del controlador. Así que, lo que se necesita en este módulo es un conversor A/D de cinco canales. Las señales de los sensores de contacto se pueden enviar por las mismas entradas del conversor A/D al controlador.

La tabla 3.19, muestra los criterios prioritarios para la selección de dicho hardware, y la tabla 3.20 los resultados de la evaluación de las posibilidades tecnológicas propuestas.

Criterios evaluados	Valor
Robustez	20
Velocidad de transmisión	15
Compatibilidad con el resto del sistema	20
Tamaño del subsistema	5
Costo	25
Plazo de entrega	10
Funcionamiento en tiempo real	5
Total (%)	100

Tabla 3.19. Criterios prioritarios a la hora de hacer la selección del hardware de acondicionamiento de señales.

Para esta evaluación se tomó el módulo de adquisición de datos USB 6008 de National Instrument [84], como la única tarjeta electrónica comercial con posibilidad de ser utilizada en este proyecto, debido a que estaba dispuesta por el Departamento de Electrónica Instrumentación y Control de la Universidad de Cauca, para el desarrollo de prácticas de laboratorio y proyectos como éste. Otras posibilidades comerciales se descartaron de entrada debido a los altos costos y dificultad de consecución en el mercado local o nacional, y su importación elevaría aun más su costo.

Criterios evaluados	Tarjetas electrónicas comerciales	Sistemas electrónicos diseñados de acuerdo con los requerimientos
Robustez	15	10
Velocidad de transmisión	10	10
Compatibilidad con el resto del sistema	15	20
Tamaño del subsistema	5	2
Funcionamiento en tiempo real	2	3
Costo	25	10
Plazo de entrega	10	5
Total (%)	82	60

Tabla 3.20. Resultados de la evaluación de las posibilidades tecnológicas para el hardware de acondicionamiento de señales.

El módulo de amplificación de señales es el que recibe los datos del controlador y los entrega directamente al actuador, con la potencia necesaria para que éstos puedan responder adecuadamente a la señal de control. Desafortunadamente en el mercado no se encontraron módulos de este tipo que pudieran ser acoplados al sistema, ya que la potencia requerida por los actuadores es considerablemente alta. Debido a esto, no es necesario hacer evaluación de hardware para este módulo, puesto que diseñar dichas tarjetas es la única opción.

La transmisión de los datos desde el modulo de control hasta el subsistema de amplificación de señales, no necesita más que hilos conductores de las señales discretas emitidas por el PC, y sobre las que actúan directamente los amplificadores de potencia.

3.5. INTEGRACIÓN DEL SISTEMA ROBÓTICO

3.5.1. Integración de los motores, sistemas de accionamiento y sensores

Una vez adquiridos los componentes que serían parte del HRA934 reconstruido, se comenzó a integrar el sistema robótico instalando cada uno de los actuadores a las transmisiones y éstas a cada una de las articulaciones, empezando por el acoplamiento del efector final con la quinta articulación y sus respectivos sistemas de accionamiento. En seguida se procedió a poner en marcha la cuarta junta, pero no sin antes haber probado satisfactoriamente el movimiento de la articulación cinco. De la misma manera se procedió para la instalación de los mecanismos de accionamiento en las juntas tres, dos y uno siendo el motor y la transmisión de la primera articulación, la última en ponerse en marcha.

Cuando se instalaron todos los accionadores, se hizo una nueva prueba de cada uno de estos, energizando directamente los motores con un voltaje de 24 vdc (con el fin de garantizar la correcta instalación de los motores y transmisiones, además de poner a prueba la capacidad de estos para poner en marcha el mecanismo), ya que hasta este momento no se disponía de ningún sistema electrónico que accionara los motores haciendo regulación de voltaje o corriente.

Después de la instalación de los mecanismos de accionamiento, se procedió a colocar los sensores de fin de carrera (contactores) y de posición (potenciómetros lineales), protegiéndolos con capuchones de aluminio para aislarlos del ruido eléctrico exterior. De esta manera quedó reconstruida la parte electromecánica del HRA934, quedando lista para ser integrada con el sistema electrónico y de control. (La instalación de los sensores, actuadores y mecanismos de accionamiento fueron hechas por mano de obra de la empresa IMVEL, debido a que la reconstrucción mecánica demanda un tiempo considerable, herramientas especializadas y bases sólidas en mecánica).

3.5.2. Integración de los sistemas electrónicos y de control

Luego de tener la parte electromecánica del robot listo. Se procedió al diseño del software de adquisición de datos, transmisión de datos y control del sistema sobre LabView®, y el sistema electrónico de control de potencia (Anexos B y C).

En cuanto al software, se diseñó primero los algoritmos de adquisición (módulo del programa que capta las señales de los sensores a través de la tarjeta de adquisición de datos USB6008) y transmisión de datos (señal de control). Una vez estos estuvieron a punto, se diseñó un algoritmo de control PID que emita señales de PWM (*Pulse Width Modulation*) a través de la USB6008.

Este software da la posibilidad al usuario, mediante una interfaz hombre máquina (HMI), de accionar cada una de las articulaciones por separado de manera manual, de controlar una trayectoria articular del robot previamente definida mediante una matriz de valores articulares $n \times 5$, o por una ecuación matemática en donde se establezcan las posiciones iniciales y finales de cada una de las articulaciones y el tiempo de trazado de la trayectoria. Además, si el controlador PID falla, o los parámetros articulares introducidos por el usuario sobrepasan los límites físicos del robot, los sensores de fin de carrera instalados en cada una de las juntas del robot envían una señal de alarma y el hardware de control de los motores retorna al robot hasta una posición en donde éste pueda operar de manera normal.

Por otra parte el sistema electrónico de control de potencia, consiste en puentes H (uno para cada motor), contruidos con transistores de tecnología MOSFET, cuyas señales de entrada (es decir la señal de esfuerzo de control provenientes del PC) están protegidas por: opto-acopladores que hacen un aislamiento eléctrico entre el sistema de amplificación de potencia y el PC, y un circuito lógico que evita que al puente H entren las dos señales de control en alto al mismo tiempo y arruinen los transistores. Estas tarjetas transmiten la señal de PWM y el sentido de giro de cada uno de los motores indicados por el controlador, con un nivel de tensión máximo de 24V y la corriente requerida para accionar cada articulación.

3.5.3. Integración y depuración del sistema robótico completo

Después de tener los sistemas computacionales (algoritmos de control, HMI de transmisión y recepción de datos) y de control de potencia completos, y en aparente correcto funcionamiento, se hizo pruebas para determinar la respuesta del sistema por separado. Los resultados obtenidos fueron desafortunados debido a que la tarjeta de adquisición de datos USB6008 no tiene la capacidad de emitir seis señales de PWM (cinco para controlar las articulaciones del robot y una para manipular el efector final) con una frecuencia lo suficientemente alta para controlar los actuadores del manipulador correctamente.

Para corregir este problema se recurrió al modulo de comunicaciones del PC, LPT (puerto paralelo) para enviar a través de éste las señales de control PWM, con el inconveniente que este solo permita la transmisión de un byte a la vez. Es decir dispone de ocho canales de transmisión paralela, y la configuración del robot necesita de doce canales de transmisión para poder accionar en los dos sentidos los seis motores del HRA934 reconstruido. Por lo que se optó por transmitir las señales de control a los cuatro sistemas de accionamiento con menor reducción a través del puerto paralelo (articulaciones 1, 2 3 y 4) y a los dos sistemas restantes mediante el puerto USB a través de la tarjeta USB6008 (articulación 5 y el efector final). Y con esto quedó solucionado el problema de velocidad de transmisión de las señales de control a los actuadores del robot.

Otro de los inconvenientes presentados por el sistema fue el alto consumo de corriente por los actuadores debido a su gran tamaño y alto par mecánico que debían desarrollar sobre todo en el arranque de estos. La solución a este problema fue añadir a cada una de las tarjetas de potencia un circuito limitador de corriente, de tal manera que estas entregaran solo la corriente necesaria para accionar el mecanismo. Cabe anotar que este circuito fue ajustado mediante el método de la prueba y error ya que hasta este instante no se tiene conocimiento preciso de los pares que desarrollan los actuadores

para accionar el mecanismo. Además, sobre la segunda articulación se instaló nuevamente un resorte como el que contenía el sistema original (Figura 3.1) con el fin de secundar al par desarrollado por el motor de la articulación dos (Figura 3.8).

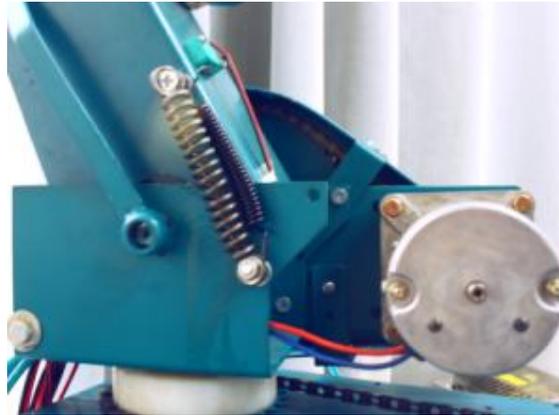


Figura 3.8. Sistema de accionamiento de la segunda articulación del HRA reconstruido.

Hechos los ajustes anteriormente mencionados se probaron nuevamente los sistemas primero por separado y luego ya integrados en el HRA934 (Figura 3.9) obteniendo en esta oportunidad los resultados esperados.

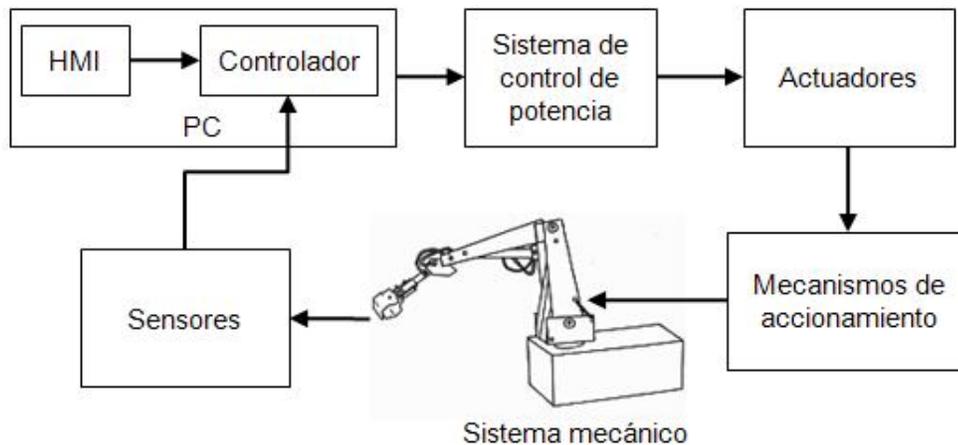


Figura 3.9. Esquema de la configuración del sistema robótico HRA934 reconstruido.

Con en proceso de integración del robot y después de probar el correcto funcionamiento del HRA934, dio por concluida su reconstrucción. Quedando listo para pruebas de laboratorio y trabajos posteriores (Figura 3.10).

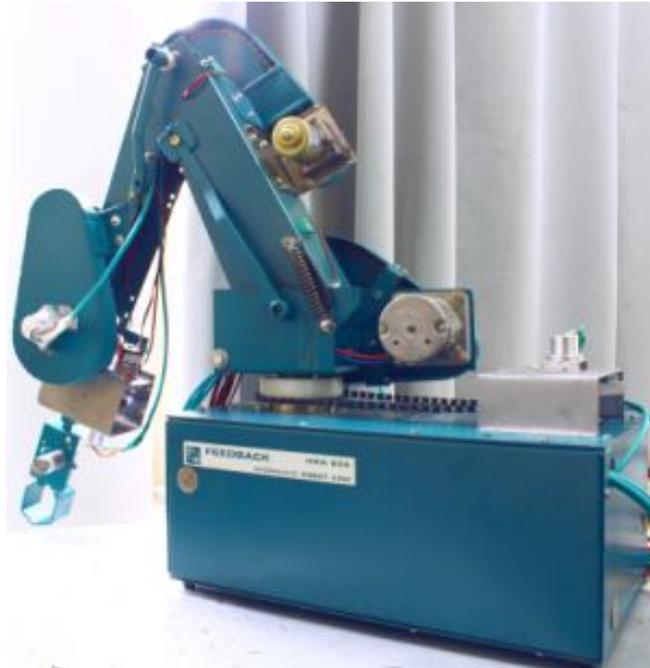


Figura 3.10. Robot HRA934 reconstruido.

4. IDENTIFICACIÓN PARAMÉTRICA Y CONTROL ARTICULAR DEL SISTEMA

Como se mencionó en el capítulo dos, la identificación paramétrica no es parte fundamental en el proceso de reconstrucción de un robot serie. Pero la precisión, rendimiento, estabilidad y robustez de muchas de las técnicas de control, dependen en gran parte de la exactitud de los parámetros que describen el modelo dinámico. En vista de esto, una determinación precisa a priori de los parámetros dinámicos es útil para la mayoría de los sistemas y es crucial para algunos otros. Además estos valores son necesarios para simular las ecuaciones dinámicas [44] [97].

Por su parte el diseño de un sistema de control de seguimiento de trayectoria (trayectoria articular para este caso), es un proceso substancial en el desarrollo de aplicaciones para robots manipuladores. Por eso se mostrará una aplicación de un sistema de control PID para una trayectoria articular definida.

4.1. IDENTIFICACIÓN PARAMÉTRICA DEL SISTEMA

El procedimiento de identificación (Figura 4.1) está constituido por el conjunto de teorías, algoritmos y estudios cuyo objetivo es el conocimiento de las características dinámicas del sistema, sintetizadas en su modelo matemático a partir del análisis de datos experimentales [46] [98]. Es decir la obtención de los valores de los parámetros del robot mediante técnicas de identificación, se fundamenta en el desarrollo de algunos experimentos con el sistema real. Consiste en medir las secuencias de salida, correspondientes a ciertas trayectorias de entradas suministradas [46] [99] [100].

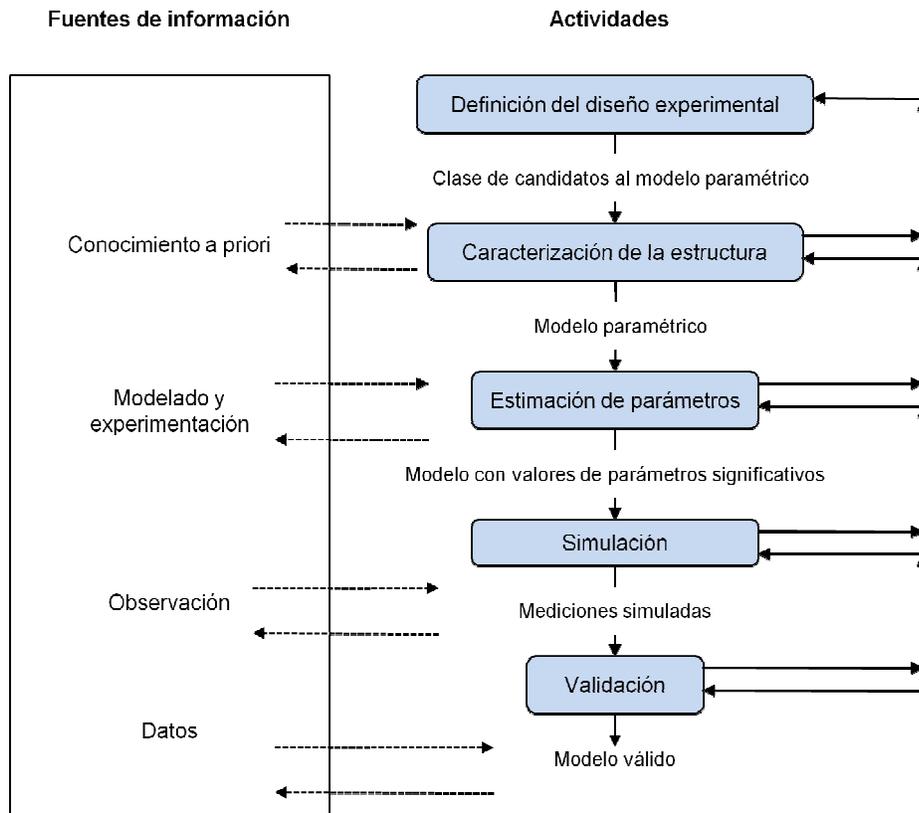


Figura 4.1. Proceso de identificación paramétrica de un sistema dinámico [101].

4.1.1. Definición del diseño experimental

La identificación de los parámetros dinámicos (lineales) del robot HRA934, parte del modelo dinámico caracterizado por los parámetros de base indicados en la tabla 3.2. La planificación implica entonces resolver varios aspectos como: Las variables de interés y las frecuencias importantes que deben ser excitadas durante el experimento, y forma de obtención de los datos [102] [103].

La elección de las señales de entrada influyen directamente sobre los datos observados y por lo tanto, sobre los parámetros estimados. Con esta elección se determina el punto de operación del sistema robótico y que partes y modos del sistema serán excitados. La señales de excitación del robot deben ser ricas armónicamente, es decir de frecuencia y amplitud variante de modo que exciten interrumpidamente las cinco articulaciones del robot durante el experimento, teniendo en cuenta que estas no deben exceder los límites físicos del robot [46], es decir las velocidades y

amplitudes de la señal deben ser acordes a la capacidad de respuesta del HRA934 reconstruido [46] [104] [105].

Los movimientos programados para cada articulación se llevan a cabo simultáneamente, esto genera un movimiento completo del sistema de acuerdo al tiempo programado, durante el cual se debe ir guardando la información entregada tanto por los sensores (potenciómetros lineales) como la señal de excitación generada por el PC mediante LabView. A partir de estos datos se infiere respectivamente las posiciones articulares de cada junta (en radianes) y el voltaje (en voltios) aplicado a cada motor para producir los pares requeridos, para generar los respectivos movimientos [46].

Las variables de interés para la estimación de los parámetros dinámicos del HRA934 reconstruido, son los pares mecánicos aplicados a cada uno de los motores del robot (entradas) y las posiciones articulares (salidas). Pero este sistema robótico presenta el inconveniente de no permitir medir los pares mecánicos generados directamente, por lo que se debe apelar a deducir los pares a través de los voltajes aplicados a cada uno de los motores de acuerdo con:

Un motor DC puede modelarse matemáticamente como una función de transferencia de primer orden de la forma [104]:

$$Y(s) = \frac{k}{\tau s + 1} u(s) \quad (49)$$

Donde: $Y(s)$ es el par mecánico generado por el motor y $u(s)$ el voltaje aplicado para que el actuador genere ese par. τ es un valor muy pequeño y la respuesta del motor es muy rápida en comparación con la respuesta del sistema completo y por lo tanto la función de transferencia mostrada en la ecuación 49 puede reducirse a:

$$Y(s) = u(s)k \quad (50)$$

Lo que indica que el par generado por el motor es igual al voltaje de entrada multiplicado por una constante de ganancia k , que para el caso de estudio no se conoce para ninguno de los actuadores. Esto constituye un primer inconveniente a la hora de realizar el proceso de identificación, ya que al no conocerse estas constantes no es posible conocer los pares de entrada al sistema.

Las señales que se introducirían en el sistema para que el robot se mueva en todo su espacio de trabajo y su ancho de banda, fueron programadas en Matlab mediante el método de Schroeder [106], tomando como frecuencia fundamental la frecuencia mínima a la que el robot puede operar, y los

armónicos se determinaron de acuerdo a la cantidad de parámetros asociados a cada articulación, teniendo en cuenta que no hayan componentes de frecuencia que superen la frecuencia máxima de operación de determinada articulación del robot.

Para parametrizar las señales se introdujeron voltajes AC sinusoidales de diferentes amplitudes y frecuencias a los motores determinando así: el voltaje mínimo con el cual la articulación podía ser accionada, y la máxima frecuencia a la que esta podía moverse; y el voltaje máximo y la frecuencia mínima con la que la articulación podía moverse antes de volviera inestable. Resaltando que este experimento se hizo dejando el robot en lazo abierto.

La tabla 4.1 indica el ancho de banda de cada una de las articulaciones del robot y la Figura 4.2 muestra las formas de onda que se programaron para excitar cada una de las articulaciones del HRA934.

	Art.1	Art.2	Art. 3	Art.4	Art. 5
Frecuencia máxima (rad/s)	0.314	0.314	0.314	0.314	0.376
Frecuencia mínima (rad/s)	3.141	3.141	3.141	3.141	3.769

Tabla 4.1. Ancho de banda del robot HRA934 reconstruido

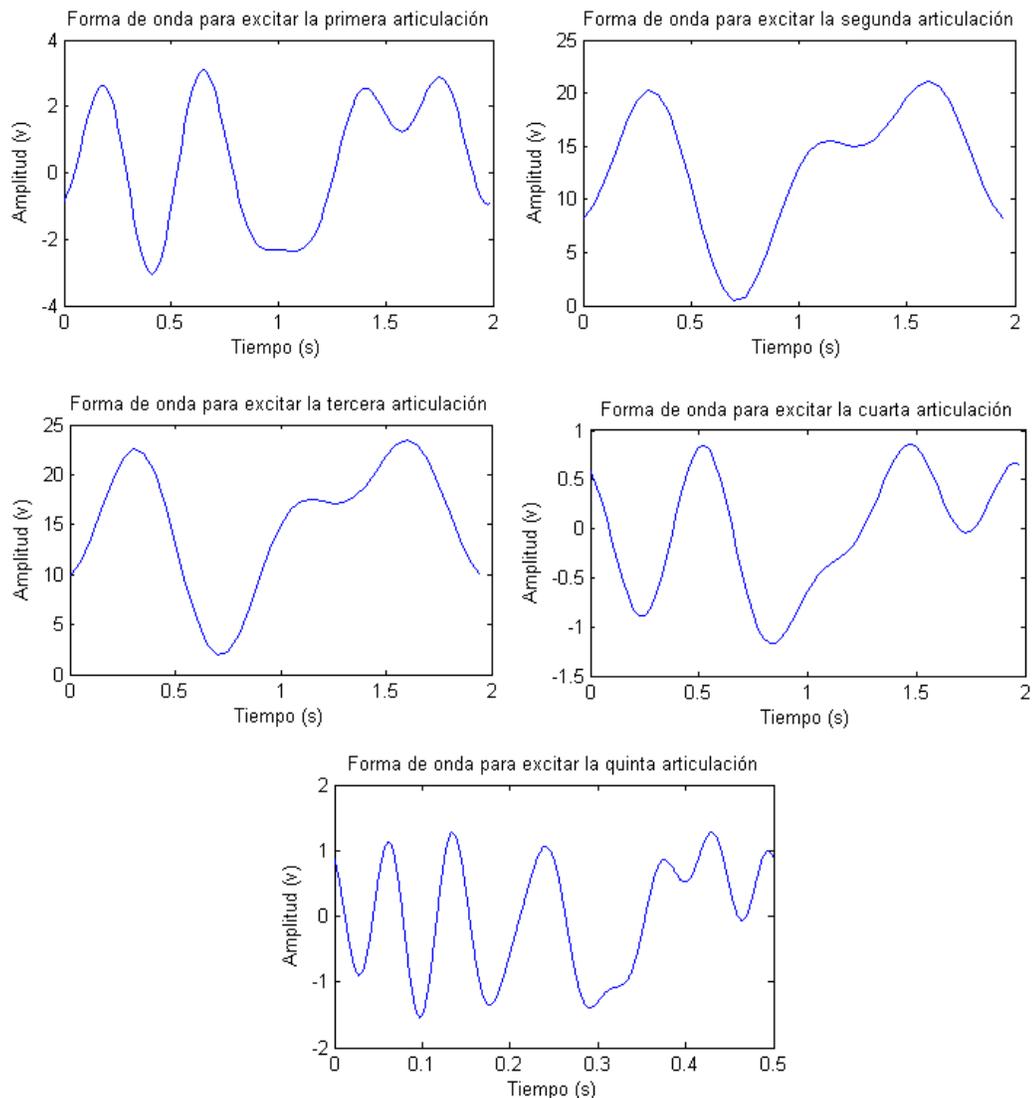


Figura 4.2. Formas de onda de las señales de excitación del robot HRA934 reconstruido para su identificación paramétrica.

4.1.2. Caracterización de la estructura

La selección de la estructura del modelo afecta de manera notoria la estimación de parámetros dinámicos del robot, además del método que se va a utilizar para su solución, considerando que la complejidad de la estructura elegida, afecta directamente la fidelidad con que el modelo estimado aproxima el comportamiento dinámico del robot real [100].

Al igual que la gran mayoría de sistemas dinámicos existentes, el robot HRA934 reconstruido es un sistema no lineal; pero mediante la metodología para el modelado dinámico descrita en el capítulo dos y su aplicación en el

tres, se obtuvo un modelo dinámico lineal en sus parámetros de base, permitiendo reestructurar la ecuación 11 de manera que facilite la aplicación de técnicas menos complejas de identificación.

Una estructura comúnmente utilizada en este tipo de procedimiento, se indica en la ecuación 51 la cual se constituye por una parte determinística y una estocástica [103].

$$Y(k) = G(h)u(k) + v(k) \quad (51)$$

En donde: $Y(k)$ es la señal de salida; $G(h)$ representa el sistema dinámico de parámetros lineales; $u(k)$, las señales de entrada (que para el caso son los voltajes aplicados a los actuadores de cada articulación). Todas estas son componentes determinísticas. Y $v(k)$, es una señal estocástica que representa el ruido que afecta el proceso de medición de los datos.

Del mismo modo al expresar el Modelo Dinámico Inverso (MDI) de la ecuación 11, de acuerdo a la estructura indicada en la ecuación 51, se obtiene la siguiente expresión:

$$Y(\Gamma, \dot{q}) = W(q, \dot{q}, \ddot{q})X + \rho \quad (52)$$

La ecuación anterior constituye la forma general en que sería escrito el modelo de identificación para el HRA934 reconstruido, donde X es el vector de parámetros a estimar, r el número total de ecuaciones, ρ el vector residual y W la matriz de observación o regresor lineal, el cual contiene información sobre la dinámica del sistema y depende en general de los datos de entrada-salida pasados hasta el instante $n-1$, siendo útil para inferir comportamientos futuros de acuerdo a determinada excitación [42].

El inconveniente que se presenta con el HRA934 reconstruido es que no se tiene un modelo dinámico no parametrizado que describa de manera aceptable el comportamiento del sistema real. Debido a que el modelo que fue construido de acuerdo con las teorías enunciadas en el capítulo dos, no se modela los frotamientos del sistema (que para el robot reconstruido no son despreciables), además el resorte que estaba en el sistema original y se volvió a colocar en la reconstrucción tampoco se modeló. Y así se hubiese modelado, éste está tensionado permanentemente y por lo tanto su constante de deformación k (según la ley de Hooke) varía constantemente con el tiempo tal vez de manera despreciable en un periodo corto, pero después de un tiempo prolongado su comportamiento será muy diferente al comportamiento del resorte cuando se modeló. Además el mecanismo de accionamiento de las articulaciones compuesto por los engranajes de las cajas reductoras de los motoredutores y los sistemas de cadena, presentan holguras que representan un periodo de tiempo muerto para el sistema y

tampoco está modelado. Todas estas omisiones hacen que el modelo dinámico dispuesto no represente confiabilidad para estimar sobre él los parámetros dinámicos del manipulador. Posiblemente sea factible desarrollar un modelo donde se tengan en cuenta todas estos criterios pero se hacen necesarios fuertes conocimientos teóricos en modelado de sistemas dinámicos, y en especial de robots articulados de configuración serial, y un tiempo prolongado para desarrollar todo un procedimiento matemático que lleve a un modelo dinámico del robot valido, para la estimación y validación de sus parámetros dinámicos.

4.1.3. Estimación de parámetros

La estimación de los parámetros de base del robot utilizando técnicas de identificación, se basa en el análisis de la relación causa-efecto de acuerdo a las trayectorias programadas previamente; es decir, las parejas de datos de entrada-salida sensadas, se organizan de manera que, al ser incluidos en el *toolbox* de Matlab® *Simulink*® *Parameter Estimation*, sea posible efectuar o no el pre-procesamiento respectivo, el cálculo de los coeficientes de la estructura definida según el criterio de estimación por el método de los mínimos cuadrados y posteriormente, la validación del modelo [42].

Simulink® *Parameter Estimation* es una herramienta basada en simulación para estimar y calibrar los parámetros del modelo a partir de datos experimentales. Este paquete estima los parámetros mediante la comparación de resultados del modelo con los datos experimentales de la planta, dada una misma señal de entrada (estimación transitoria), estima condiciones iniciales de los estados a partir de datos experimentales (condición de estimación inicial) y estime la tabla de valores en los puntos de interrupción establecido mediante el uso de mediciones del sistema físico (tablas adaptativas de búsqueda) [107].

Para el proceso de estimación de parámetros, se programaron cinco trayectorias articulares para las cinco articulaciones, con el fin de excitar todas las dinámicas del robot y así obtener de manera experimental los parámetros reales del robot. Cada conjunto de datos sensado, asociado a la excitación del robot con cada una de las trayectorias programadas.

Debido a la imposibilidad de realizar el proceso de identificación del sistema real se procedió a estimar los parámetros de base asociados a la quinta articulación del robot en simulación. Es decir, se hizo un proceso de identificación paramétrica (tres pruebas) del modelo dinámico de la quinta articulación del robot, asignándole al modelo a identificar diferentes valores iniciales a los parámetros, con el objetivo de que algoritmo encontrara los parámetros con el cual se hizo la simulación.

Las tablas 4.2 a 4.4 muestran los valores iniciales con los cuales se intentó estimar los parámetros de simulación de la quinta articulación del robot y los resultados obtenidos en cada proceso de estimación, resaltando que los parámetros *FS5* y *FV5* son los coeficientes de fricción seca y viscosa respectivamente que se colocaron en el modelo en simulación, para que éste no se proyectara a infinito con una excitación mínima. Y la Figura 4.3 las graficas del modelo en simulación (en azul) y del modelo con los parámetros estimados (en verde) con la cual es posible hacer una comparación.

Resultados de la primera prueba de estimación			
Parámetro	Valores iniciales	Valores obtenidos	Valores objetivo
<i>XX5R</i>	0.04	0.097634	-0.0182
<i>XY5R</i>	0.03	0.042441	-1.3353x10 ⁻⁶
<i>XZ5R</i>	-0.002	0.032356	-0.0035
<i>YZ5R</i>	-0.001	-0.0022729	0
<i>ZZ5R</i>	0.2	0.024376	0.0182
<i>MX5R</i>	0.1	0.097634	0.0042
<i>MY5R</i>	0.05	0.039953	0
<i>IA5</i>	0.015	0.016337	0.045
<i>FS5</i>	0.1	0.096531	0.2
<i>FV5</i>	0.1	0.14125	0.2

Tabla 4.2. Resultados obtenidos en el primer proceso de estimación de parámetros de la quinta articulación del robot en simulación.

Resultados de la segunda prueba de estimación			
Parámetro	Valores iniciales	Valores obtenidos	Valores objetivo
<i>XX5R</i>	-0.04	-0.037152	-0.0182
<i>XY5R</i>	0.025	0.026989	-1.3353x10 ⁻⁶
<i>XZ5R</i>	0.0015	0.0025989	-0.0035
<i>YZ5R</i>	-0.01	-0.01052	0
<i>ZZ5R</i>	-0.02	-0.020185	0.0182
<i>MX5R</i>	0	-0.16864	0.0042
<i>MY5R</i>	0	-0.015817	0
<i>IA5</i>	0.08	0.079873	0.045
<i>FS5</i>	0.25	0.24634	0.2
<i>FV5</i>	0.25	0.28245	0.2

Tabla 4. 3. Resultados obtenidos en el segundo proceso de estimación de parámetros de la quinta articulación del robot en simulación.

Resultados de la tercera prueba de estimación			
Parámetro	Valores iniciales	Valores obtenidos	Valores objetivo
<i>XX5R</i>	-0.017	0.016371	-0.0182
<i>XY5R</i>	0	-0.0037081	-1.3353x10 ⁻⁶
<i>XZ5R</i>	-0.0025	-0.0025379	-0.0035
<i>YZ5R</i>	0.001	0.00096414	0

<i>ZZ5R</i>	0.02	0.020107	0.0182
<i>MX5R</i>	0.0045	0.0044906	0.0042
<i>MY5R</i>	0.0001	9.8897×10^{-5}	0
<i>IA5</i>	0.04	0.040067	0.045
<i>FS5</i>	0.18	0.19963	0.2
<i>FV5</i>	0.22	0.2135	0.2

Tabla 4. 4. Resultados obtenidos en el tercer proceso de estimación de parámetros de la quinta articulación del robot en simulación.

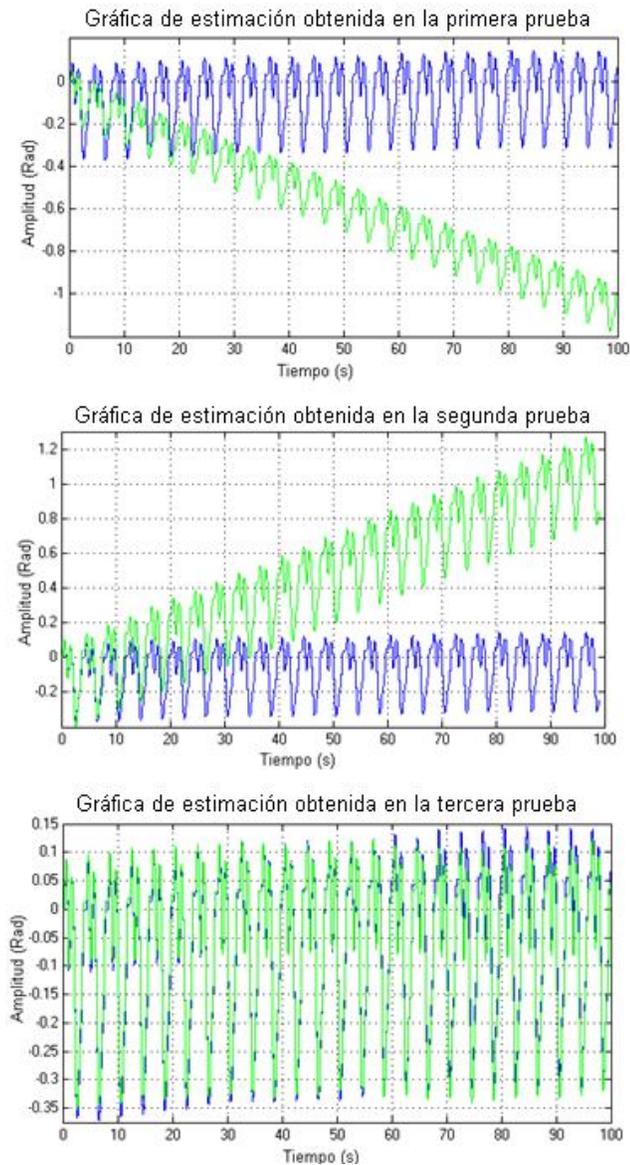


Figura 4.3. Graficas obtenidas en el proceso de estimación de parámetros para la quinta articulación de HRA934.

4.1.4. Simulación y validación del modelo estimado

Una vez estimados los parámetros dinámicos del robot es preciso probar el modelo para determinar su comportamiento y si se ajusta satisfactoriamente al sistema real. Es decir, qué tan válido es el modelo para los propósitos determinados.

La herramienta de validación más versátil es la simulación. El sistema verdadero y el sistema identificado se alimentan con la misma señal de entrada y se comparan las salidas. Para una buena comparación es deseable que el experimento se base en datos nuevos, es decir que las señales de entrada no se hayan utilizado para la estimación de parámetros. Esto recibe el nombre de validación cruzada [108]. Con esto se asegura que se ha modelado el sistema robótico y no a un conjunto de salidas que fueron procesadas para obtener los parámetros dinámicos.

Para el caso de estudio es evidente que el modelo no es válido pues la grafica del modelo con los parámetros estimados difiere considerablemente con la grafica del sistema en simulación. Y la diferencia entre los datos estimados y los datos de simulación indicados en las tablas 4.2, 4.3 y 4.4 es considerable.

En conclusión, el proceso de identificación de los parámetros reales del robot HRA934 reconstruido no es posible realizarla mediante las técnicas mencionadas en esta monografía. Pues los inconvenientes más relevantes son:

El mecanismo del robot es descompensado en su centro de masa, eso hace que cuando el sistema esté trazando trayectorias para la estimación de sus parámetros, vibre y pierda equilibrio, y en el peor de los casos el movimiento del mecanismo podría hacer caer el robot de su sitio de trabajo.

No se tiene información de alguna de las características de funcionamiento de los motores, por lo que se hace complejo determinar las constantes de ganancia entre el voltaje aplicado y el par generado.

Las holguras que presentan los mecanismos de accionamiento representan tiempo muerto en el sistema, lo que significa que su modelo matemático se haga más complejo.

El resorte insertado sobre la segunda articulación representa un modelo matemático que cambia constantemente en el tiempo y por lo tanto el modelo obtenido y validado hoy podría ya no ser fiable en el futuro.

Los frotamientos en las articulaciones no son despreciables y su modelo matemático no es posible reducirlo hasta una constante, debido a que estos

cambian con las velocidades y posiciones de la articulación. Además estos también son variantes en el tiempo.

4.2. SISTEMA DE CONTROL DEL ROBOT HRA934

El objetivo de un sistema de control articular es lograr que el robot trace de manera autónoma, trayectorias idénticas a las propuestas por el usuario mediante ecuaciones matemáticas parametrizadas o matrices numéricas que indican la posición de cada articulación en cada instante de tiempo t , según el periodo de muestreo.

La trayectoria articular para la que se sintonizó el HRA934 reconstruido fue una trayectoria grado tres cuya ecuación que la gobierna se indica a continuación:

$$q(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3 \quad (53)$$

Donde:

$$a_0 = q_{inicial}$$

$$a_1 = 0$$

$$a_2 = \frac{3}{t_{final}^2} D$$

$$a_3 = -\frac{2}{t_{final}^3} D$$

$$y, D = q_{final} - q_{inicial}$$

Antes de sintonizar el controlador en el robot real, se hizo una sintonización en simulación sobre el MDD que se obtuvo para determinar los pares mecánicos y los parámetros utilizados en ese ejercicio.

El resultado que se obtuvo utilizando los valores mencionados en la tabla 4.5 para el controlador se indican en la figura 4.4.

Articulación	Proporcional	Integral	Derivativo
1	10000	0	10
2	300000	0	220
3	50000	0	30
4	10000	0	20
5	1000	0	1

Tabla 4.5. Valores utilizados para el controlador PID articular en simulación.

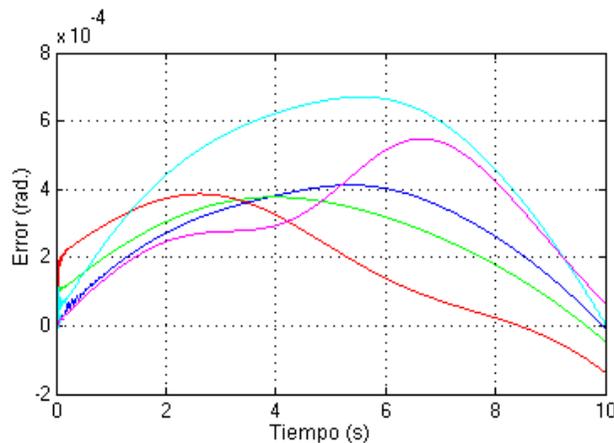


Figura 4.4. Error articular obtenido en la sintonización del controlador PID para una trayectoria grado tres en diez segundos (línea verde: primera articulación, azul oscuro: segunda, roja: tercera, azul claro: cuarta y violeta: quinta articulación).

Después de haber simulado el sistema de control en Matlab - Simulink®, se procedió a sintonizar el controlador PID para el robot real, haciendo que trace la señal articular grado tres en diez segundos.

Los valores con los cuales se sintonizó el PID implementado en LabView (Anexo C) se muestran en la tabla 4.6 y los resultados obtenidos en las gráficas de la Figura 4.5. Resaltando que la diferencia entre dichos valores y los parámetros de sintonización del PID en simulación se debe a que el MDD obtenido no corresponde a la dinámica que presenta el robot real.

Articulación	Proporcional	Integral	Derivativo
1	700	0	0.5
2	2000	0	0.1
3	900	0	1.2
4	3000	0	0.5
5	80	0	0.8

Tabla 4.6. Valores utilizados para el controlador PID articular en el robot real.

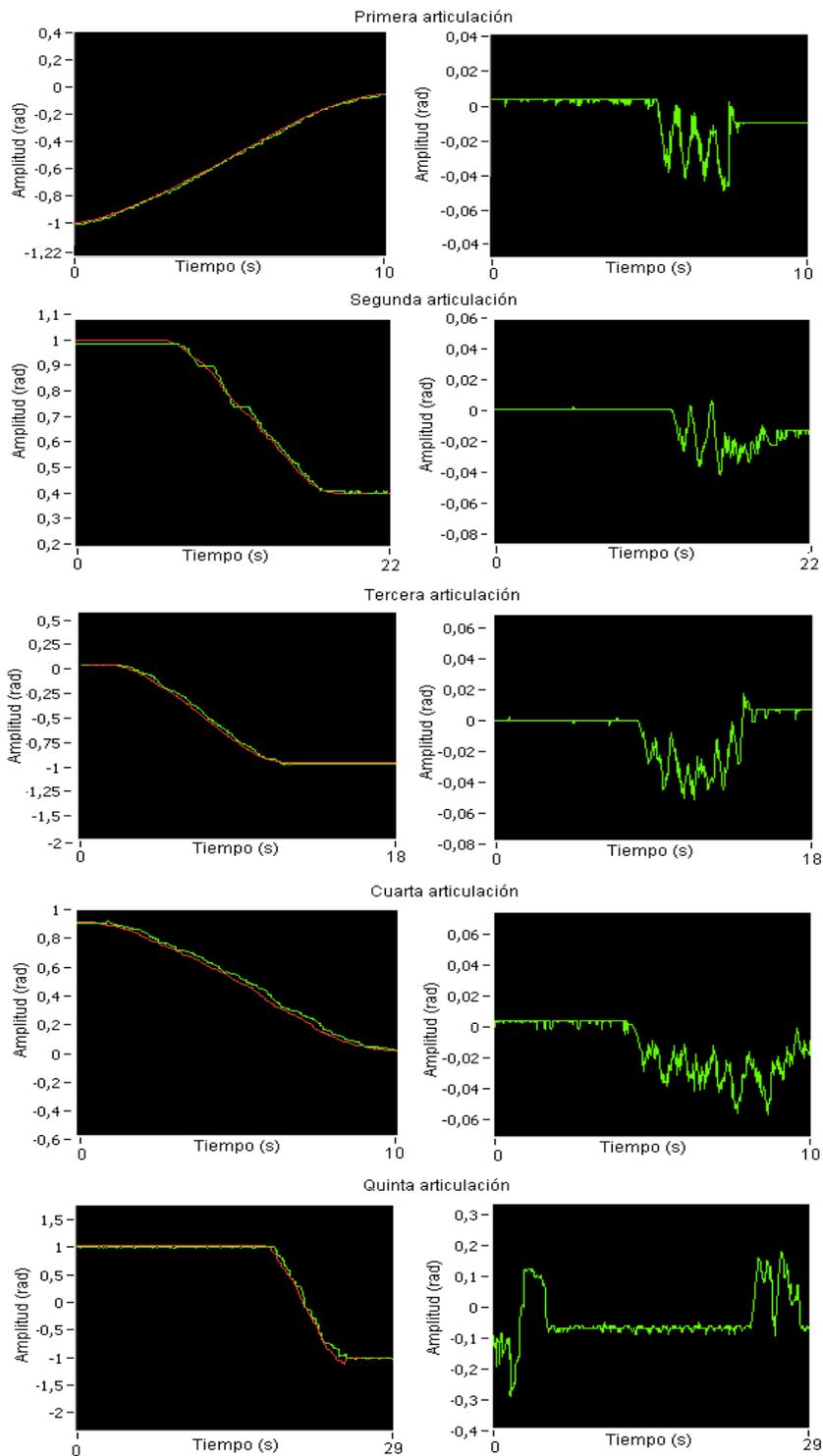


Figura. 4.5. Graficas de seguimiento de una trayectoria grado tres por el HRA934 reconstruido (a la izquierda) y error articular obtenido en la sintonización del controlador PID con los valores mostrados en la tabla 4.5.

Los resultados obtenidos en el seguimiento de una trayectoria articular por el robot HRA934 reconstruido, controlado mediante un PID no fueron tan óptimos como los obtenidos en simulación. Esto se debe a que en el caso real el esfuerzo de control tiene un límite (24 V para cada motor), lo que no sucede con el sistema en simulación. Y las holguras que se presentan los mecanismos de accionamiento representan un retardo en el sistema y esto hace que se presente un error entre el tiempo que el controlador recibe la señal de posición y el tiempo que este tarda en superar la holgura y rectificar la posición de la articulación. Por esta razón se presentan esas oscilaciones que muestran las graficas del error indicadas a la derecha de la figura 4.5.

La articulación que presento un seguimiento de trayectoria mas precisa fue la articulación 1, donde se alcanzó un error de 0.04 radianes, debido al buen ajuste de la estructura física, el ajuste del controlador y la protección del sensor y la señal emitida por este ante el ruido generado por los motores del robot. En cambio, no fueron completamente satisfactorios los resultados en la quinta articulación, en donde se obtuvo el mayor error articular en el trazado de la trayectoria. Esto es consecuencia de la holgura que se presenta en el mecanismo de accionamiento, la velocidad de la señal de PWM que llega al accionador y quizá el ruido afecte más a la señal del sensor de esta articulación debido a que el conductor recorre toda la estructura del robot la señal se ve comprometida con el ruido generado por los seis motores de la estructura de una manera mas directa que las demás.

Finalmente se puede concluir que los resultados obtenidos fueron buenos y que el robot HRA934 responde de manera aceptable en el seguimiento de una trayectoria articular controlada mediante un PID.

5. CONCLUSIONES

Disponer de una metodología para la reconstrucción de robots, permite reducir los tiempos de diseño e implementación, reducir costos, organizar las actividades del proyecto y visualizar la dirección del proceso de reconstrucción.

Antes de la reconstrucción de un robot serie, es de suma importancia tener en cuenta las posibilidades económicas, técnicas y tecnológicas disponibles, esto con el propósito de no sobredimensionar o subdimensionar el proyecto, y en el caso de que el manipulador se encuentre en un estado avanzado, para concluir que la reconstrucción es inviable por cualquiera de estos factores.

El modelado matemático para determinar las características que tendrá el robot reconstruido es una herramienta muy importante a la hora de la reconstrucción, pero no es definitiva en el robot ya reconstruido. A menos que se encuentren en el mercado los elementos con las características que se ajusten exactamente a los requerimientos del modelo.

Es importante que la estructura original del robot se conserve lo mas intacta posible y, preferiblemente, que los nuevos componentes a acondicionarse en el robot, sean similares a los elementos a remplazarse, de esta manera se ayuda a garantizar la robustez y confiabilidad del manipulador reconstruido.

Las herramientas computacionales representan una enorme ventaja a la hora de encontrar los modelos dinámicos de un robot de varios grados de libertad; ya que a medida que las juntas del manipulador aumentan, la complejidad matemática se incrementa considerablemente.

La implementación del lazo de control en un computador sobre una plataforma como Windows, puede ser que funcione correctamente pero no es lo ideal, puesto que bajo este sistema operativo no se garantiza que el controlador opere en tiempo real. Con esto se corre el riesgo que el robot quede en lazo abierto por largos periodos de tiempo, y si éste está trabajando en el límite de su campo de acción el sistema podría colapsar.

Los sensores y los medios de transmisión de la señal sensada deben estar muy bien protegidos contra el enorme ruido eléctrico que generan los motores, de esta manera se evita tomar datos errados del sensor.

El diseño y construcción de sistemas electrónicos por parte del personal encargado de la reconstrucción del robot, se convierte en una alternativa

económica y personalizada, pero se requiere de conocimientos sólidos y una gran inversión de tiempo. Razón por la cual, lo más indicado es buscar en el mercado sistemas ya construidos y adaptarlos a las necesidades del requerimiento, con esto se optimiza el tiempo de la reconstrucción y muchas veces se gana robustez en el sistema.

La transmisión de las señales de control a través del puerto USB demultiplexadas mediante la USB6008 y el puerto paralelo del PC no es óptimo ya que se están utilizando demasiados recursos hardware del ordenador. Lo ideal sería transmitir todas las señales por un solo puerto y utilizar una tarjeta de adquisición de datos con reloj externo para obtener una señal de PWM con una frecuencia ideal.

Un sistema de control más optimizado podría estar soportado sobre una plataforma de tiempo real, o embebido en un microcontrolador, y utilizar el PC sólo para ingresar las trayectorias que se desea trace el robot.

Para una identificación paramétrica del robot reconstruido se necesita: diseñar una metodología específica donde se involucre un excelente modelo matemático no parametrizado de la dinámica del sistema; un diseño del experimento que permita observar completamente la dinámica del sistema y la implementación de un algoritmo de estimación y validación de parámetros robusto. Así mismo, el tiempo suficiente que permita llevar a cabo y de manera exitosa la identificación paramétrica del HRA934 reconstruido.

Como trabajos futuros queda optimizar el sistema de control e implementar nuevos algoritmos para el mismo, optimizar el sistema de transmisión de datos y modelar el robot geoméricamente con el fin de implementar sobre éste sistemas de control cartesiano.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]. A. Ollero, *Robótica: Manipuladores y Robots Móviles*. Barcelona: Alfaomega, 2001.
- [2]. L. Morales, *Optimización de Trayectorias de Puntos Múltiples para un Robot Industrial*. Puebla: Universidad de las Américas, 1999.
- [3]. Robótica Industrial. <http://www.linkses.com/articulos/articulo.asp?id=132>. [Consultado: Noviembre de 2008].
- [4]. N. Navarro, S. Robles y K. Paulsen, “Diseño y fabricación de un brazo robot de cinco grados de libertad articulado verticalmente: modelado cinemático y dinámico”, Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica, Cusco, 23 al 25 de Octubre de 2007.
- [5]. E. Madrid, J. Tafur, S. Robles y J. Curay, “Diseño y fabricación de un brazo robot de cinco grados de libertad articulado verticalmente: control y potencia”, Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica, Cusco, 23 al 25 de Octubre de 2007.
- [6]. L. Utili, B. Barriga y D. Domínguez, “Diseño y fabricación de un brazo robot de cinco grados de libertad articulado verticalmente: diseño y selección”, Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica, Cusco, 23 al 25 de Octubre de 2007.
- [7]. Robotek Ltda. Mecatrónica y Sistemas Inteligentes. <http://www.robotekltda.com>. [Consultado: Enero de 2009]
- [8]. M. Murillo y P. Zeledón, “Reparación del brazo hidráulico HRA934 y desarrollo de hardware y software para su control y su utilización en conjunto con una banda transportadora automatizada para implementar un proceso”, trabajo de graduación, Universidad de Costa Rica, San José de Costa Rica, 2000.
- [9]. J. Flórez, “Reconversión del sistema de control de un robot tipo SCARA”, proyecto de pregrado, Universidad EAFIT, Medellín, 2008.
- [10]. A. Barrietos, L. Peñin, C. Balaguer y R. Aracil, *Fundamentos de Robótica*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, McGrawHill, 1997.

- [11]. Robótica. <http://www.monografias.com/trabajos31/robotica/robotica.html>.
[Consultado: Agosto de 2009]
- [12]. Robótica. http://cfievalladolid2.net/tecno/ctrl_rob/robotica/contenido.htm
[Consultado: Agosto de 2009]
- [13]. J. Somolinos, *Avances en Robótica y Visión por Computador*, Cuenca: Universidad de Castilla-La Mancha, 2002.
- [14]. P. Sandin, *Robot mechanisms and mechanical devices*. United States of America: Mc Hill, 2003.
- [15]. Robótica. <http://proton.ucting.udg.mx/materias/robotica/r166/r58/r60/r60.htm>
[Consultado: Agosto de 2009].
- [16]. O. Caparroso, O. Avilés y H. Bello, “Una introducción a la robótica industrial”, Universidad Militar Nueva Granada. <http://www.umng.edu.co/www/resources/4n1art2.pdf>. [Consultado: Agosto de 2009]
- [17]. L. Wen, *Robot Analysis*. Sons: John Wiley & Sons, 1999.
- [18]. J. Rojas y M. Vargas, “Sistemas de control aplicados a la robótica”, monografía, Universidad de Costa Rica, San José de Costa Rica, 2005.
- [19]. D. Hunt, *Industrial robotics handbook*. United States of America: Industrial Prees Inc, 1983.
- [20]. V. Carrara V, *Apostila de Robótica*. Mogi das Cruzes: Universidade Braz Cubas 2006.
- [21]. F. Lewis, *Mechanical Engineering Handbook*. Boca Raton: Frank Kreith, 1999.
- [22]. E. De Pieri, *Curso de Robótica Móvel*. Catarina: Universidad de Federal de Santa, 2002.
- [23]. V. Vagad, *Mechatronics*. Pune: Technical Publications, 2003.
- [24]. F. Borbón, J. Rojas y D. Viques, “Aplicación de los sistemas de control en la robótica”, monografía, Universidad de Costa Rica, San José de Costa Rica, 2003.
- [25]. Universidad Autónoma del Caribe, *Manual de robótica y C.N.C.* Barranquilla: Universidad Autónoma del Caribe, 2003.

- [26]. S. Margni, y G. López, “Motores y sensores en robótica”. Proyecto de pregrado, Universidad de la República Oriental de Uruguay, Montevideo, 2003.
- [27]. J. Domingo, “Robótica”, apuntes para la asignatura, Universitat de Valencia, Valencia, 2003.
- [28]. Paulo, *Robótica*. Camaçari: CETEB-CA, 2002.
- [29]. B. Blanqué, “Simulación interactiva de motores de reluctancia autoconmutados”, Tesis doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2007.
- [30]. Encoder Incremental: Descripción General, <http://www.silge.com.ar>. [Consultado: Agosto de 2009].
- [31]. Encoders Ópticos.
http://www.cpr2valladolid.com/tecno/cyr_01/robotica/sistema/sensores.htm [Consultado: Agosto de 2009].
- [32]. R. Pallás, *Sensores y acondicionadores de señal*. Barcelona: Marcombo, 2003.
- [33]. L. Sánchez y M. Saavedra, “Matemáticas y Robótica”, Universidad de la Laguna.
<http://webpages.ull.es/users/imarrero/sctm05/modulo2tf/4/lacosta.html>. [Consultado: Agosto de 2009].
- [34]. W. Spong, S. Hutchinson, and M. Vidyasagar. *Robot Modeling and Control*. New York: John Wiley & Sons, 2003.
- [35]. Spong W. y Vidyasagar M.: *Robot Dynamics and Control*. John Wiley and Sons, 1989.
- [36]. J. Craig, *Robótica*. México: Pearson educacion, 2006.
- [37]. Darren M., Frank L, and Chaouki T., *Robot Manipulator Control Theory and Practice*. Edit MARCEL DEKKER, INC, NEW YORK, 2004.
- [38]. B. Siciliano y K. Oussama, *Handbook of Robotics*. Berlin: Springer, 2008.
- [39]. M. Pineda, “Control de un modelo aerodinámico aplicando sistemas difusos”, tesis de ingeniería, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 2008.
- [40]. O. Vivas. “Control predictivo de un robot tipo SCARA”. *Revista Chilena de Ingeniería*, vol. 14, pp. 135-145, N° 2, 2006.

- [41]. M. Améstegui, "Apuntes de Control PID". Universidad Mayor de San Andrés.
http://www.alumnos.usm.cl/~ignacio.morande/descargas/apuntes_de_control_pid.pdf. [Consultado: Agosto de 2009].
- [42]. K. Torres y A. Costaín, "Modelado, Identificación paramétrica y Control de un Robot de Cinco Grados de Libertad", Monografía de pregrado, Universidad del Cauca, Popayán, 2008.
- [43]. E. Wernholt, *On Multivariable and Nonlinear Identification of Industrial Robots*. Linköping: Linköping University, 2004.
- [44]. W. Khalil y E. Dombre, *Modeling, Identification and control of robots*. London: Kogan Page Science, 2002.
- [45]. E. Aguilar, "Modelado y control de posición y de fuerza de una prótesis robótica de mano", Documento para Examen de Valoración, Universidad del Cauca, Popayán, Septiembre 2007.
- [46]. A. Costaín, K. Torres, J. Arango y A. Vivas, "Modelado, Identificación Paramétrica y Control del Robot SCORBOT-ER 5 PLUS". Universidad del Cauca, Universidad Nacional de Colombia, Popayán, Manizales, 2008.
- [47]. J. Rodríguez, A. Pardo y T. Acevedo, "Control inteligente utilizando logica fuzzy de un motor de inducción controlado por campo orientado", trabajo de grado, Universidad de Pamplona, Pamplona, 2008.
- [48]. S. Salinas, "Modelado, simulación en 3D y control de un robot para cirugía laparoscópica", Tesis de maestría, Universidad del Cauca, Popayán, 2009.
- [49]. A. Mejía. "Diseño de un controlador dinámico para un robot SCARA mediante redes neuronales artificiales", Trabajo de grado, Universidad de Pamplona, Pamplona, 2007.
- [50]. L. Sciavicco y B. Siciliano, *Modeling and control of robot manipulators*. New York: McGraw Hill. 1996.
- [51]. R. Caberta, M. Ramírez y M. Nandayapa, "Caracterización matemática para la obtención del modelo dinámico del robot Scrobot-ER V Plus", Memorias de la decimotercera semana de Ingeniería, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.
http://www2.uacj.mx/publicaciones/memoriasIIT/III_SI_%E2%80%A2_Memorias_parte_3.pdf [Consultado: Agosto de 2009].

- [52]. J. Naudet, D. Lefeber y Z. Terze, "General formulation of an efficient Recursive algorithm based on canonical momenta for forward dynamics of open-loop multibody systems". University of Zagreb. http://mech.vub.ac.be/multibody/publications/full_texts/ECCOMAS_2003_Naudet.pdf [Consultado: Agosto de 2009].
- [53]. Capítulo 6. Torque y equilibrio de cuerpo rígido. <http://www2.udec.cl/~jinzunza/fisica/cap6.pdf> [Consultado: Septiembre de 2009].
- [54]. Torque o momento de fuerza (o de torsión). <http://www.ucsc.cl/~fisica/torque.html>. [Consultado: Enero de 2009].
- [55]. Controladores de lógica programable (PLC). http://www.profesores.frc.utn.edu.ar/industrial/sistemasinteligentes/UT3/UNI5200_1.pdf [Consultado: Octubre de 2009].
- [56]. ¿Qué es un PLC?. <http://www.abcinnova.com/articulos-e-informacion/18-ique-es-un-plc-y-que-beneficios-tiene.html>. [Consultado: Octubre de 2009].
- [57]. PLC Vs PC. <http://www.infoplcn.net/foro//archive/index.php/t-363.html>. [Consultado: Octubre de 2009].
- [58]. El PLC. <http://www2.udec.cl/~fcisternas/DreamHC/PLC/page10.html>. <http://www2.udec.cl/~fcisternas/DreamHC/PLC/page10.html>. [Revisado: Octubre de 2009].
- [59]. Motores utilizados en la robótica. <http://www.slideshare.net/omarspp/motores-288804>. [Revisado: Octubre de 2009].
- [60]. Máquinas eléctricas de corriente alterna: constitución, funcionamiento y aplicaciones características. <http://blog.educastur.es/soporte2/files/2009/05/resumen-motores-ca.pdf> [Revisado: Octubre de 2009].
- [61]. Introducción a las Máquinas herramienta de Control Numérico. <http://isa.umh.es/asignaturas/fac/Tema11.pdf> [Revisado: Octubre de 2009].
- [62]. R. Herrán R., "Estudio y diseño de los módulos de potencia con control discreto de un convertidor v/f Para la regulación de la velocidad de motores asíncronos monofásicos de pequeña potencia", Proyecto fin de carrera, Universidad de Cantabria, Santander, 2005.

- [63]. Ventajas. <http://www.mitecnologico.com/iem/Main/VentajasYDesventajasDeLosSistemasHidraulicosYNeumaticos>. [Revisado: Octubre de 2009].
- [64]. Neumac - Motores neumáticos. http://www.neumac.es/storage/pdf/113/MOTORES%20NEUMATICOS_FOLLETO%20GENERAL%20Rev0105.pdf. [Revisado: Octubre de 2009].
- [65]. Herramientas neumáticas. http://www.alces.cl/index2.php?option=com_content&do_pdf=1&id=40. [Revisado: Octubre de 2009].
- [66]. Motores lineales tubulares. <http://www.mecmod.com/productes/copley/Articulo-tecnico-Motores-lineales-tubulares.pdf>. [Revisado: Octubre de 2009].
- [67]. El motor serie universal. <http://redexperimental.gob.mx>. [Revisado: Octubre de 2009].
- [68]. Actuadores. http://cfievalladolid2.net/tecno/cyr_01/robotica/sistema/actuadores.htm. [Revisado: Octubre de 2009].
- [69]. Morfología del robot. http://jestrugooglepages.com/morfologia_blanco.pdf. [Revisado: Octubre de 2009].
- [70]. ASIS-TEC. <http://www.asis-tecweb.com/motores-hidraulica/> [Revisado: Octubre de 2009].
- [71]. Motores hidráulicos: Engranajes. <http://ocw.uc3m.es/ingenieria-mecanica-y-oleohidraulica/trasparencias/motoresHidraulicos.pdf>. [Revisado: Octubre de 2009].
- [72]. Válvulas distribuidoras y circuitos de mando. <http://www.mecatronicauancv.com/descargas/CLASE03-VALVULAS-Y-CIRCUITOS-DE-MANDO.pdf>. [Revisado: Octubre de 2009].
- [73]. Motores neumáticos a engranajes. http://www.fuiberica.com/motores_neumaticos.htm. [Revisado: Octubre de 2009].
- [74]. Sensores de proximidad. <http://www.comind.cl>. [Revisado: Octubre de 2009].

- [75]. Sensores de posición. http://www.fing.edu.uy/iimpi/academica/grado/instindustrial/teorico/080310-Sensores-parte_V.posici%C3%B3n.pdf. [Revisado: Octubre de 2009].
- [76]. Infrarot & Co. <http://www.cypsela.es/especiales/pdf235/infrarot.pdf>. [Revisado: Octubre de 2009].
- [77]. J. Aching y D. Rojas, "Reconocimiento biomédico de huellas dactilares y su implementación en DSP – Anexos", tesis de ingeniería, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, 2005.
- [78]. Sensores fotoeléctricos. http://www.fornvalls.com/pdfs/Sens_fotoelectricos.pdf. [Revisado: Octubre de 2009].
- [79]. Sensores de ultrasonido. <http://www.sick.es/es/productos/sensores/ultrasonidos/es.html>. [Revisado: Octubre de 2009].
- [80]. J. Ruiz y S. Salazar, "Sensores, Actuadores y Efectores", Universidad de Chile. <http://robotica.li2.uchile.cl/EL63G/capitulo2.pdf>. [Revisado: Octubre de 2009].
- [81]. D. Sánchez y D. Motivar, "Simulación del proceso de ensamble de tapas pico", proyecto de prototipos, Universidad de la Salle, Bogotá D.C., 2006.
- [82]. A. Selios y R. Biardo, "Transductores inductivos transformadores diferenciales variables y lineales (LVDT)". <https://iie.fing.edu.uy/ense/asign/medel/archivos/monografias/2003/LVTD.pdf>. [Revisado: Octubre de 2009].
- [83]. Encoders Incrementales. <http://www.jaxen.com.ar/ht/HT101.pdf>. [Revisado: Octubre de 2009].
- [84]. USB 6008/6009 - User guide. *National Instruments*. <http://www.ni.com/pdf/manuals/371303e.pdf>. [Revisado: Octubre de 2009].
- [85]. Evaluación tecnológica. <http://www.usm.edu.ec/tesis/innovaciontecnologica/metodologias%20de%20evaluacion/metodologia%20de%20ev1.pdf>. [Revisado: Marzo de 2010].
- [86]. H. Ponce, "Una alternativa para realizar diagnósticos y determinar estrategias de intervención en las organizaciones productivas y

- sociales”. <http://www.eumed.net/ce/2006/hpt-FODA.zip>. [Revisado: Marzo de 2010].
- [87]. A, Jardón, “Metodología de diseño de robots asistenciales. Aplicación al robot portátil ASIBOT”, Tesis doctoral, Universidad Carlos III de Madrid, Leganés, 2006.
- [88]. BeebControl.
<http://www.anf.nildram.co.uk/beebcontrol/arms/genesis+feedback/index.html>. [Revisado: Abril de 2010].
- [89]. Genesis/FeedBack.
<http://www.anf.nildram.co.uk/beebcontrol/arms/index.html>. [Revisado: Abril de 2010].
- [90]. FeedBack, *Hidraulic Robot Arm Type HRA933: Students`s Manual*, Crowborough: FeedBack, 1983.
- [91]. W. Khalil y D. Creusot. SYMORO+: A system for the symbolic modelling of robots. *Robotica*, Vol. 15, 1997, p. 153-161.
- [92]. E. Rojas, “Recomendaciones para la reconstrucción de un robot manipulador”. [En línea] Mensaje para: Juan Carlos Ordoñez y Jorge Barajas. Cali, 22 de diciembre de 2008. Comunicación personal.
- [93]. Tutorial de LabView.
http://www.gte.us.es/ASIGN/IE_4T/Tutorial%20de%20Labview.pdf. [Consultado: Septiembre de 2009].
- [94]. National Instruments LabVIEW 8.5. <http://www.icasoft.org/main/1801-national-instruments-labview-8.5.html>. [Consultado: Septiembre de 2009].
- [95]. Java. <http://www.angelfire.com/ut/chudak/java.html>. [Consultado: Septiembre de 2009].
- [96]. Ventajas y Desventajas: Comparación de los Lenguajes C, C++ y Java.
http://www.americati.com/doc/ventajas_c/ventajas_c.html [Consultado: Septiembre de 2009].
- [97]. M. Díaz, V. Mata, N. Farhat y S. Provenzano, “Identificación de parámetros dinámicos de robots paralelos: métodos de obtención de las variables cinemáticas a partir de la medición de la posición”. Congreso iberoamericano de ingeniería mecánica. Cusco, 23 al 25 de octubre de 2007.
- [98]. Y. Zhu, *Multivariable System Identification for Proces Control*. Kidrington Oxford OX5 IGB: Elsevier Science Ltda, 2001.

- [99]. H. Botero y J. Ramírez, “Identificación de sistemas de excitación: Análisis detallado de metodología y Resultados”. <http://www.scielo.org.co/pdf/dyna/v75n156/a06v75n156.pdf>. [Consultado: Marzo de 2010].
- [100]. Vallejo E. Identificación paramétrica de sistemas dinámicos. http://ciruelo.uninorte.edu.co/pdf/ingenieria_desarrollo/2/identificacion_parametrica_de_sistemas_dinamicos.pdf [revisado en: Marzo de 2010].
- [101]. J. Díaz. “Apuntes de identificación”. Universidad del Cauca, Popayán, 2008.
- [102]. H. Herrera, J. Gentile y N. Sánchez, “Identificación de sistemas: Aplicación al diseño de controladores de temperatura”, Memorias II congreso latinoamericano de Ingeniería Biomédica, Habana 2001, Mayo 23 al 25 del 2001, La Habana, Cuba.
- [103]. Introducción a la identificación de sistemas dinámicos. <http://lc.fie.umich.mx/~jrincon/Identificacion%20de%20sistemas%20lineales.pdf>. [revisado en: Marzo de 2010].
- [104]. Identificación de parámetros de un motor DC. *Universidad de Alcalá*. http://www.depeca.uah.es/docencia/ITT-SE/lsecd/docs/n_trans.pdf. [revisado en: Marzo de 2010].
- [105]. J. Swevers, C. Ganseman, D. Bilgin T“ukel y J. De Schutter. “Optimal Robot Excitation and Identification”. IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 13, no. 5, october 1997. http://people.mech.kuleuven.be/~jswevers/papers/ieee_swevers_robot.pdf. [revisado en: Marzo de 2010].
- [106]. L. Ljung, *System Identification: Theory for the User*. 2nd ed. New Jersey: Prentice all, 1999.
- [107]. The mathworks Inc., “Simulink® Parameter Estimation”, Matlab Documentation, 2005.
- [108]. S. Garrido. “Identificación, estimación y control de sistemas no-lineales mediante RGO”, Tesis de doctorado (PhD), Universidad Carlos III de Madrid, Leganés, 1999.

ANEXO A

DETERMINACIÓN DE LA FUERZA QUE DEBERÁN TENER ACTUADORES LINEALES PARA ARTICULACIONES ROTACIONALES

Los actuadores lineales son óptimos para el accionamiento de articulaciones prismáticas, puesto que estos son capaces de ejercer una fuerza F en el mismo sentido en la que se moverá la articulación, y solo es necesario tener en cuenta que el actuador si es capaz de ejercer la fuerza necesaria para accionar dicha articulación a la velocidad requerida, la capacidad de elongación y su tamaño de tal manera que se ajuste de manera precisa sobre los eslabones.

En algunas ocasiones este tipo de actuadores también son recomendables para accionar articulaciones rotacionales, debido a la configuración mecánica del robot, facilidad de instalación, costos o facilidad de consecución entre otras razones. Pero para determinar si la fuerza de este tipo de actuadores son capaces de ejercer el par necesario para accionar la articulación cuestionada es necesario realizar determinados cálculos que se describen a continuación:

Tomemos la Figura 1 para hacer la descripción del sistema estudiado donde:

d es la distancia que hay entre la articulación y el punto de apoyo del motor y el eslabón movido.

k , la distancia que hay entre la articulación y el punto de apoyo del motor y el eslabón anterior al que se va a mover.

θ , ángulo formado por el motor y el eslabón accionado.

ω , ángulo formado en la articulación.

Y l la longitud del eslabón.

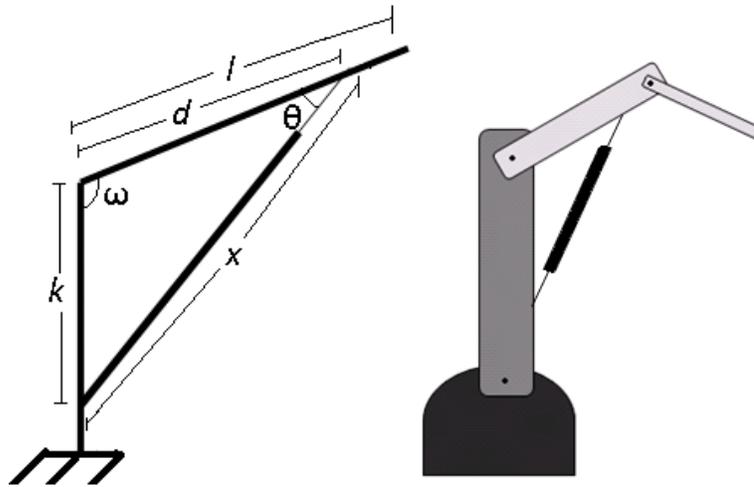


Figura A1. Esquema del posicionamiento del motor lineal sobre cada una de las articulaciones.

Empecemos por decir que la fuerza útil que ejerce el motor es la fuerza sobre el eje y . Esta fuerza queda descrita por la ecuación 1.

$$F_y = F_m \text{sen } \theta \quad (54)$$

El par necesario para el accionamiento de la articulación queda:

$$\tau = F_m d \text{sen } \theta \quad (55)$$

Ahora tomemos el triángulo formado por los eslabones de la articulación y el motor, y según el teorema del coseno este triángulo se describe por:

$$x^2 = d^2 + k^2 - 2dk \cos \omega \quad (56)$$

De allí tenemos que:

$$\omega = \arccos \left(\frac{d^2 + k^2 - x^2}{2dk} \right) \quad (57)$$

Y,

$$\tau = F_m d \frac{k}{x} \text{sen } \omega \quad (58)$$

Entonces:

$$F_m = \frac{x\tau}{kd \text{sen } \omega} \quad (59)$$

La fuerza necesaria para accionar cada articulación en función de la distancia que recorrerá el motor queda dada por:

$$F_m = \frac{x\tau}{kd \sin \left[\arccos \left(\frac{d^2 + k^2 - x^2}{2dk} \right) \right]} \quad (60)$$

Y la fuerza que debe ejercer el motor para genera el par necesario para accionar la articulación queda descrita en la ecuación 8.

$$F_m = \frac{\tau \sqrt{d^2 + k^2 - 2dk \cos \omega}}{kd \sin \omega} \quad (61)$$

Mediante MATLAB® se procedió a realizar graficas para la ecuación 8 dando los respectivos valores a d y k para determinar la fuerza que debe tener el actuador para generar el par requerido por la articulación.

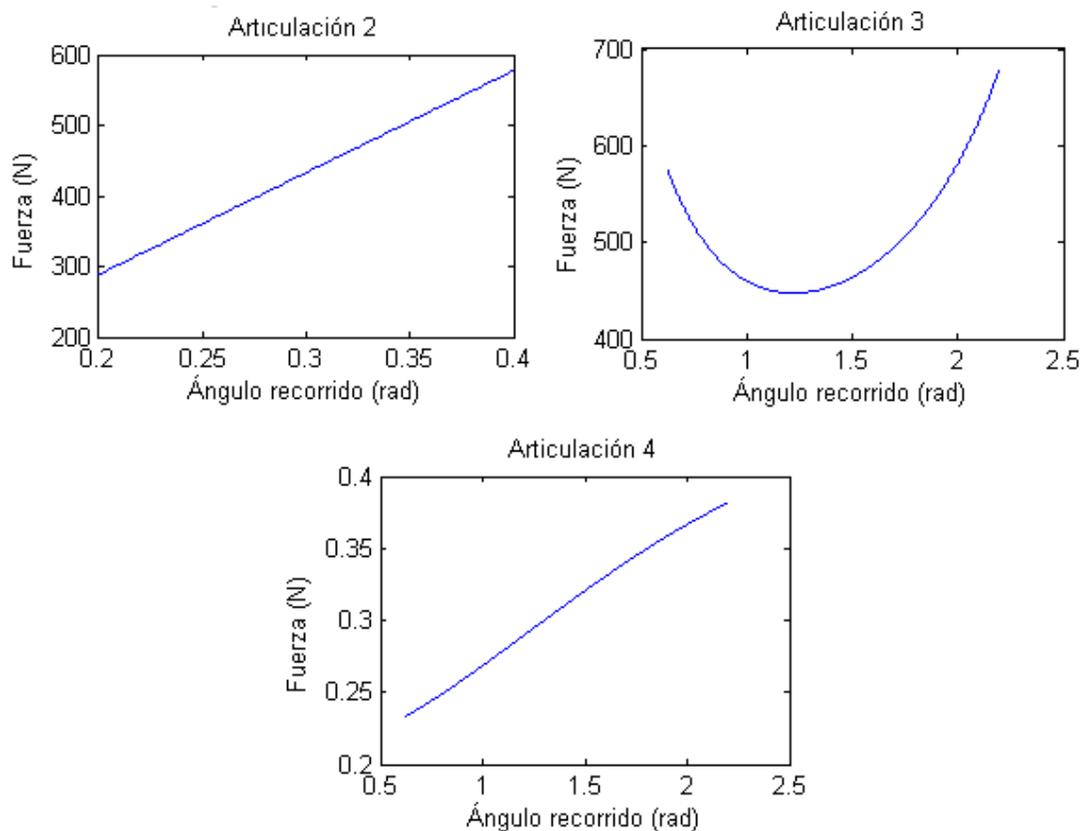


Figura A2. Fuerzas necesarias para accionar las articulaciones 2, 3 y 4 del robot HRA934 mediante actuadores lineales.

De acuerdo a las graficas anteriores los accionadores deben generar una fuerza máxima de 600 N. para la segunda articulación, 680 para la tercera y 0.38 N. para la cuarta articulación.

La diferencia tan grande entre las fuerzas necesarias para accionar las articulaciones 2 y 3, y la articulación 4 se debe a que además de necesitarse un par mecánico mucho menor el ángulo ω es muy pequeño, por lo tanto la fuerza útil sobre la articulación se maximiza.

ANEXO B

DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA MECATRÓNICO

En la Figura B1 se puede observar el diagrama en bloques del sistema mecatrónico el cual esta conformado por varios subsistemas los cuales son control y adquisición de datos, amplificador de potencia y robot.

A continuación se describe la función de cada uno de los bloques, sus entradas salidas y su interacción con otros.

B.1. Diagrama en bloques

La siguiente figura muestra el diagrama en bloques de la integración del sistema.

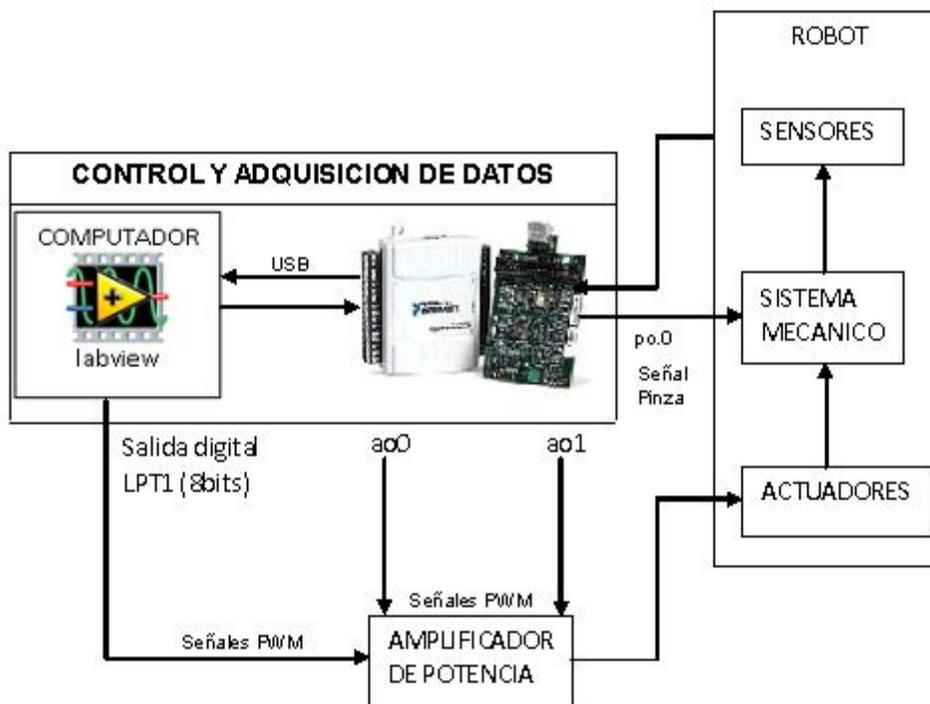


Figura B1. Diagrama en bloques del sistema mecatrónico.

B.2. Control y adquisición de datos

En el bloque de control y adquisición de datos se encuentran el computador y la tarjeta de adquisición de datos USB6008, en el computador están los programas en el entorno de programación LabView los cuales se encargan de la comunicación con la USB6008 para el envío y recepción de datos (anexo C). El bloque de control y adquisición de datos se encarga de la recepción de los datos analógicos de los sensores que representan la posición de las articulaciones del robot, digitalizarlos y procesarlos para enviar 10 señales de PWM a las 5 articulaciones, y una digital para la pinza, estas señales van al bloque amplificador de potencia.

B.3. Amplificador de potencia

A este bloque llegan las 10 señales de PWM que manejan los motores de las 5 articulaciones, para controlar cada motor se utilizan 2 señales de PWM.

Para la etapa de potencia se utilizo puentes H con los cuales es posible invertir la polaridad y por ende el sentido de giro de los motores.

A continuación (Figura B2) se muestra el esquema de la etapa de potencia.

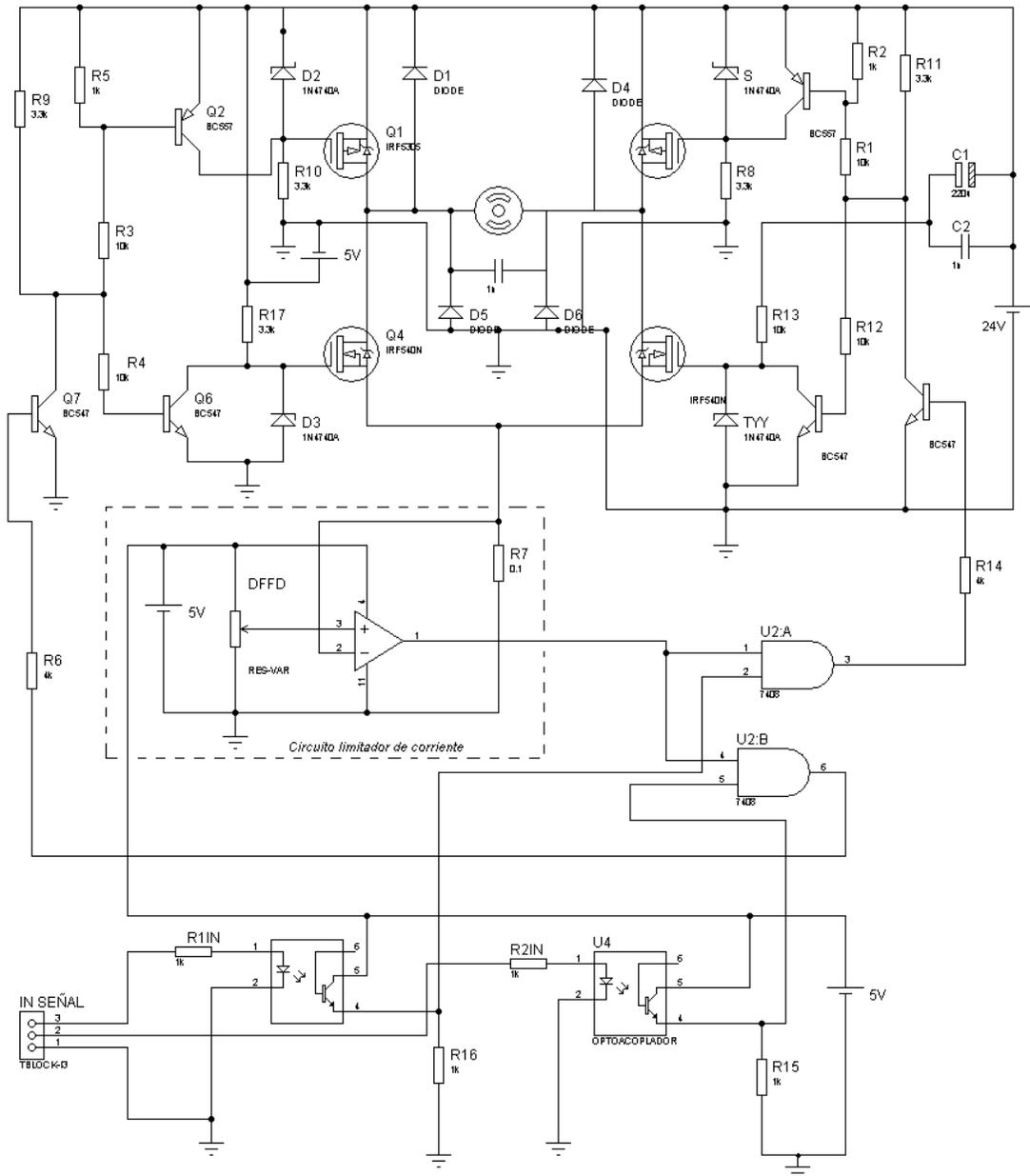


Figura B2. Esquema electrónico de la etapa de potencia para cada uno de los motores del robot.

Para el diseño del puente H se utiliza transistores MOSFET principalmente para mejorar la eficiencia del puente (en comparación con transistores bipolares).

En el caso de las etapas de potencia del robot se emplearon los siguientes transistores MOSFET.

IRF9540: MOSFET canal P, soporta hasta 19A en drenador (en continuo) y hasta 100v de VDS, su resistencia entre drenador y surtidor es de 0,2 Ω .

IRF540: MOSFET canal N, soporta hasta 22A en drenador (en continuo) y hasta 100v de VDS, su resistencia entre drenador y surtidor es de 0,055 Ω .

Se eligieron los transistores por que soportan la corriente necesaria para los motores del robot y se encuentran comercialmente en el país, además están diseñados para conmutar a altas frecuencias.

B.4. Descripción del circuito

En la Figura B3 se encuentra el diagrama de bloques del puente H, en este se encuentra el bloque LOGICA GATE el cual es implementa la lógica encargada de activar o desactivar los MOSFET para poder cambiar el sentido de la corriente que circula hacia el motor y evitar que exista cortocircuito entre el voltaje de alimentación y tierra. Este bloque contiene unas entradas especiales llamadas OPTO1 y OPTO2, estas entradas son controladas por dos fines de carrera los cuales al ser accionados envían señales al bloque LOGICA GATE para invertir el sentido de giro de los motores y evitar que se dañe la articulación, el bloque PROTECCION DE SOBRECARGA contiene un comparador que se encarga de desactivar los MOSFET en caso de bloqueo de los motores o cortocircuitos en la electrónica para evitar que no se quemé el puente H ni los motores, por medio de una resistencia variable (RVARIABLE) se puede regular la corriente máxima que se desea que circule a través de los motores.

Los diodos zener se encargan de adecuar el voltaje que llega a los MOSFET de tal manera que estos no se rompan, también se tiene el bloque VOLTAJE REGULADOR el cual regula la señal de entrada que es de 24 v que se utiliza para la alimentación de los motores a 5 voltios para la alimentación de la circuitería lógica.

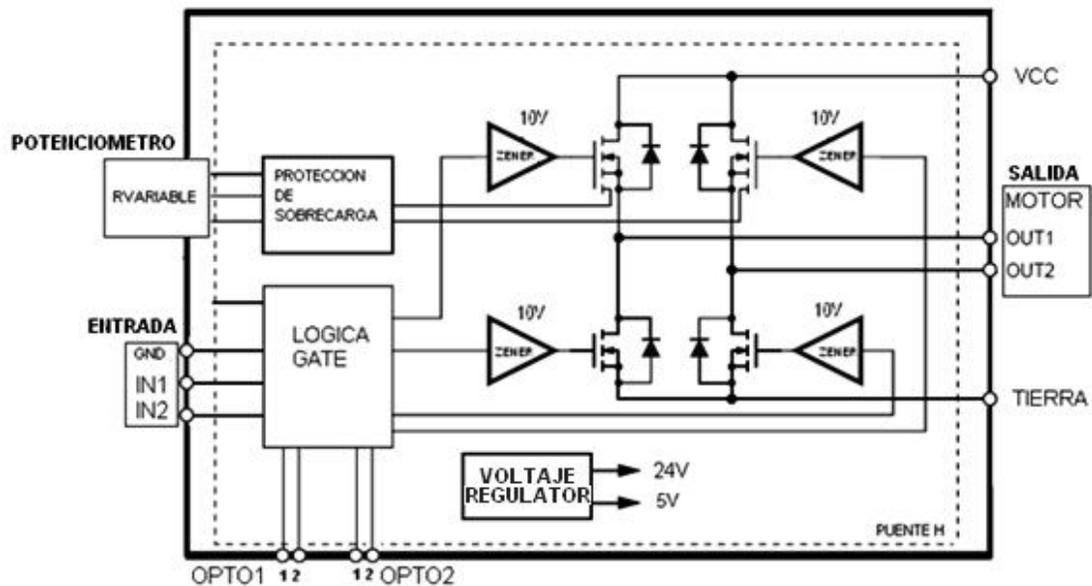


Figura B3. Diagrama en bloques del puente H.

A continuación se muestra la tabla de estados del puente H en relación con su entrada y su salida.

Entrada		Estado del motor	Voltaje salida (vout1-vout2)
In1	In2		
0	0	Parado	0
0	1	Giro en un sentido	24
1	0	Giro en sentido contrario	-24
1	1	Parado	0

Tabla B1. Estados del motor

B.5. Control de potencia

Como ya se ha mencionado. Para variar posición angular de la articulación, se necesita variar el voltaje de alimentación al motor DC. Para esto se utiliza una técnica denominada PWM.

- **Modulación por PWM**

La modulación por ancho de pulsos PWM (*pulse width modulation*) es una técnica de modulación en la que se modifica el ciclo de trabajo de una señal periódica para variar la velocidad de un motor o su par.

El ciclo de trabajo de una señal periódica es el ancho relativo de su parte positiva en relación al periodo. Cuando más tiempo pase la señal en estado

alto, mayor será la velocidad del motor o su par. Este tren de pulsos, hace que el motor marche alimentado por la tensión máxima de la señal durante el tiempo en que esta se encuentra en estado alto, y que pare en los tiempos en que la señal esta en estado bajo. La generación de pulsos PWM se genera por software y es enviada por el puerto paralelo (LPT1) y la USB6008 (a través de las salidas analógicas AO.0, AO.1) a la etapa de potencia el cual recibe 2 señales para cada motor que son conectadas a las entradas IN1 e IN2. Cabe mencionar que las entradas están optoacopladas, esto hace que la tierra de la señal de entrada no esté compartida con la tierra de los motores. Esto se hace para evitar interferencias.

B.6. Tarjeta de potencia

A continuación (Figura B4) se muestra como quedo implementada físicamente la tarjeta de potencia diseñada y como están dispuestas sus conexiones.

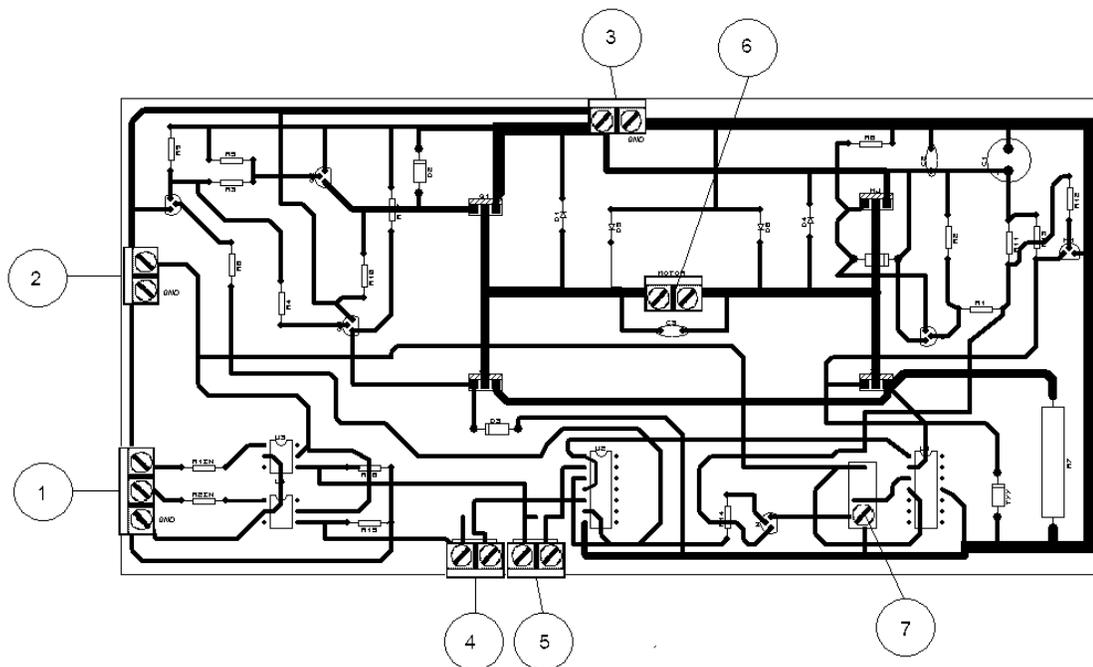


Figura B4. Conexiones de la tarjeta de potencia.

1. Conector de señales de PWM.
2. Conector de alimentación 5V.
3. Conector de alimentación 24V.
4. Conector de sensor de fin de carrera superior.
5. Conector de sensor de fin de carrera inferior.
6. Conector del motor.
7. regulador de corriente.

B.7. Sensores

- **Potenciómetro Lineal.**

El potenciómetro está acoplado al mecanismo de accionamiento, reflejando de esta forma su posición angular por medio de un voltaje. De sus tres terminales, un extremo se encuentra conectado a una fuente de 5V, el otro extremo se encuentra conectado a tierra y la terminal del centro se encuentra conectada a la entrada del convertor Analógico Digital implementado en la USB6008.

El potenciómetro tiene una resistencia total de 10KΩ entre los dos extremos, y debido a las limitaciones mecánicas los voltajes obtenidos se encuentran en el rango mostrado en la tabla B2 (cuyos ángulos máximos y mínimos corresponden al rango de trabajo articular del robot), dependiendo de la articulación que se está analizando. Este rango es totalmente lineal en cada una de las articulaciones.

Articulación	Angulo Max	Voltaje Max	Angulo Min	Voltaje Min
1	70°	5	-70°	0
2	85°	3,2	5°	1,5
3	25°	1	-130°	4,1
4	50°	4,6	-50°	2,7
5	85°	4	-85°	1

Tabla B2. Rango de voltajes en cada una de las articulaciones.

En la Figura B5, se muestra los sensores utilizados para el presente caso.



Figura B5. Potenciómetro utilizado.

Debido al ruido electromagnético causado por los motores y otras interferencias, fue necesario utilizar cable blindado para llevar las señales de los sensores a la tarjeta USB6008, además de un filtro pasa bajo para cada señal de referencia del potenciómetro para minimizar el ruido.

B.8. Esquema de conexionado.

El robot posee dos esquemas de conexionado, uno dispuesto por una serie de borneras, y otro a través del puerto paralelo del computador por medio de un conector LPT. A continuación se muestra y describen las conexiones a estos conectores.

En la Figura B6 se muestra como queda dispuesta la bornera y sus conexiones.

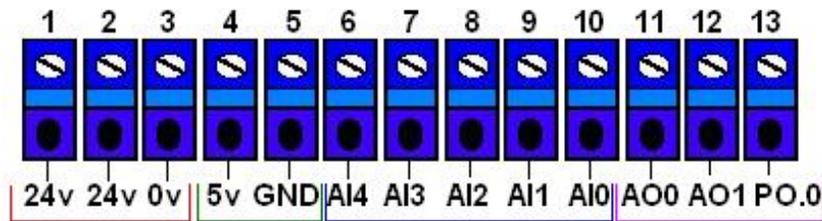


Figura B6. Bornera de conexión.

En la Figura B6, se muestran agrupadas las conexiones en varios colores para hacer más fácil su comprensión, en rojo se encuentran las borneras 1-3, las cuales son encargadas de alimentar los motores que son controlados por las tarjetas de potencia, la bornera 1 alimenta los motores 1, 3, 4, 5 y 6; y la bornera 2 alimenta el motor 2, la bornera 3 es la referencia a tierra de las borneras de alimentación 1 y 2. En verde se muestra las borneras 4 y 5 encargadas de la alimentación de los sensores. Cabe anotar que la bornera 5 la cual es la referencia a tierra debe estar separada de la bornera 3 pues son tierras diferentes. En azul se encuentran agrupadas las 5 señales analógicas de los sensores los cuales deben ir a la USB6008 respectivamente. En fucsia se agrupan las borneras 11, 12 y 13 en las cuales se debe conectar las salidas analógicas AO0, AO1 de la tarjeta de adquisición de datos, estas controlan la articulación 5 (enviando 2 señales de PWM) y PO.0 es la señal de entrada que controla la pinza.

En la Figura B7 se muestra el conector LPT utilizado para el envío de las señales de PWM correspondientes a las articulaciones 1, 2, 3 y 4.



Figura B7. Puerto LPT

En la figura B7 también es posible apreciar la disposición de pines. En ella se encuentran agrupados en amarillo los 8 bits encargados de el envío de las señales PWM para los 4 motores (los pines 2, 3 manejan el primer motor; pines 4, 5 el segundo; pines 6, 7 el tercero y pines 8, 9 el cuarto), los pines restantes no son utilizados para esta aplicación a excepción de las referencias a tierra.

ANEXO C

MANUAL TECNICO Y DE USUARIO

La aplicación que se presenta a continuación fue desarrollada para el control del robot serie reconstruido.

C.1. Requerimientos mínimos para la instalación de LabView y funcionamiento del programa.

Antes de instalar LabView en una computadora es recomendable revisar los requerimientos mínimos que solicita el fabricante para ser instalado. A continuación se muestra un listado de las características mínimas que requiere el software para ser utilizado en una computadora.

- Procesador 800Mhz.
- 128 MB en memoria RAM.
- LabView soporta Windows 2000/NT 4.0 Service Pack 6 o superior/XP. LabView no soporta Windows Me/98/95.
- Tarjeta de adquisición de datos USB6008 o USB6009.

C.2. Ejecución y manejo de la interfaz de usuario en LabView

Ejecute el `.vi` interfasarobot, inmediatamente se desplegara el panel frontal de la aplicación ver figura C1.

C.3. Desarrollo del software de control mediante LabView



Figura C1. Panel frontal de `.VI` principal.

A continuación diríjase al grupo de herramientas que sirve para controlar la ejecución de un programa en LabView, haga click en el botón *run* para ejecutar el programa. Y si desea, parar su ejecución haga click en el botón rojo abort execution. Los botones restantes no deben usarse.

Una vez ejecutado el programa, la función específica del panel frontal del *.vi* principal (Figura C1), es presentar al usuario la interfaz gráfica para el control del robot, en el panel se puede apreciar varias variables de control.

En primer lugar se tiene varias barras de control llamadas *qf1* a *qf5*. Estas barras representan las consignas respectivas de cada una de las 5 articulaciones denotadas como *BASE*, *HOMBRO*, *CODO*, *MUÑECA* y *MANO*. Las consignas están en radianes debido a que el desplazamiento es angular y pueden ser variadas linealmente según lo desee el usuario, no es recomendable variar las consignas directamente dado que se estaría enviando señales tipo escalón al sistema, es por eso que se debe presionar el botón *programar* que es el encargado de generar una trayectoria de tercer grado que posee una pendiente suave y que posiciona la articulación desde su posición actual *qi* hasta una posición final *qf*. Es aquí donde los controles *tf* a *tf5* son útiles ya que representa el tiempo en que el usuario desea que la articulación respectiva se desplace de su posición actual a su posición final *qf*, también es posible cargar unas trayectorias definidas por el usuario presionando el botón cargar, este de inmediato despliega un panel donde pide al usuario que direcciona la localización de la trayectoria definida con extensión *.txt* y como función adicional también despliega un panel para guardar en una dirección a especificar en formato *.txt*, los datos captados por los sensores y los voltajes enviados a cada uno de los motores durante el transcurso de la prueba.

Para controlar el efector final del robot que en este caso es una pinza se tiene el botón pinza el cual al presionarlo da la señal para que se abra y al presionar de nuevo se cierre.

En la parte superior derecha se encuentran un panel con una serie de pestañas llamadas *art1* a *art5*, las cuales despliegan información de cada una de las articulaciones así como es posible cambiar distintos parámetros, en este panel se observan dos gráficas en función del tiempo las cuales son nombradas como: *posición-consigna* y *señal PWM*. La primera despliega información de la consigna actual en color rojo y información de la dinámica de la articulación sensada en verde, la segunda gráfica muestra la variación del PWM según la dinámica de la consigna respecto a la posición sensada, en la parte derecha de esta gráfica también es posible observar un indicador llamado *ESFUERZO* el cual muestra información del porcentaje de esfuerzo de control enviado a cada articulación. Debajo de este indicador se muestran dos indicadores más; uno llamado *Voltaje* el cual muestra el

voltaje enviado a esa articulación, y *dirección* la cual muestra el cambio de dirección de la articulación. También se muestra un panel llamado *Control*; el cual consta de los parámetros del Controlador PID implementado para cada articulación, estos parámetros pueden ser variados asta sintonizar cada controlador para disminuir el error en cada trayectoria a desarrollar, la ultima pestaña llamada *art1-5* despliega una grafica en donde se observa la dinámica de las 5 articulaciones sensadas. Por ultimo se tiene el botón *stop* el cual detiene la ejecución del programa.

C.4. Recomendaciones antes de utilizar el programa

1. Verifique que la TAD marca National Instrument modelo USB6008 esté conectado al puerto USB del PC.
2. Conecte el cable paralelo al puerto del PC.
3. Presione el botón encendido de la alimentación de 24v.
4. Compruebe que todo el sistema hardware esté debidamente conectado.
5. Indique el nombre y la dirección del archivo en la cual se guardará la información adquirida. En caso de que no exista la ruta, deberá crearla.
6. Presione *Ctrl + H* para ver la ayuda. Si posiciona el puntero del mouse sobre una ventana, botón o alguna otra opción, le mostrará lo que éste hace.

C.5. Programación del panel frontal

En esta parte se describe de la programación del panel frontal, el cual se puede dividir en cuatro bloques principales (Figura C2) los cuales son bloque de: *generación de trayectoria*, *adquisición* y *PID*, *PWM* y *datos*. Los tres primeros bloques se repiten para cada articulación así que solo se explicará la programación de la primera articulación (el bloque de datos tiene en cuenta las 5 articulaciones). Básicamente el programa comienza con el bloque de *generación de trayectoria* el cual genera una trayectoria de tercer grado definida por el usuario, esa trayectoria que es en realidad 5 trayectorias para cada una de las articulaciones, son las consignas que se envían al bloque de *adquisición* y *PID*, este bloque captura las consignas y se las envía a 5 controladores PID que manejan individualmente cada articulación, en este bloque se adquiere las señales de los sensores los escaliza y los envía a cada controlador PID, cada controlador generara una señal de esfuerzo que dependerá de la consigna enviada, la señal sensada y los parámetros de sintonización del controlador. Esta señal de esfuerzo es

enviada al bloque de *PWM* el cual transforma esa señal de esfuerzo en pulsos que varían su ancho dependiendo de el valor de la señal de esfuerzo y se envían por el puerto paralelo y la DAQ USB6008 hacia las tarjetas de potencia que se encargaran de transformar el PWM en una señal de voltaje que llega a los motores, el bloque de datos es el encargado de cargar un archivo (si el usuario lo desea) con una trayectoria predefinida para las 5 articulaciones, esta trayectoria se enviará directamente al bloque *adquisición* y *PID* que tratará las trayectorias como consignas para cada controlador PID. Este bloque también se encarga de guardar automáticamente en un archivo durante el funcionamiento del robot las señales captadas por los sensores y los voltajes enviados a los motores durante toda la trayectoria definida.

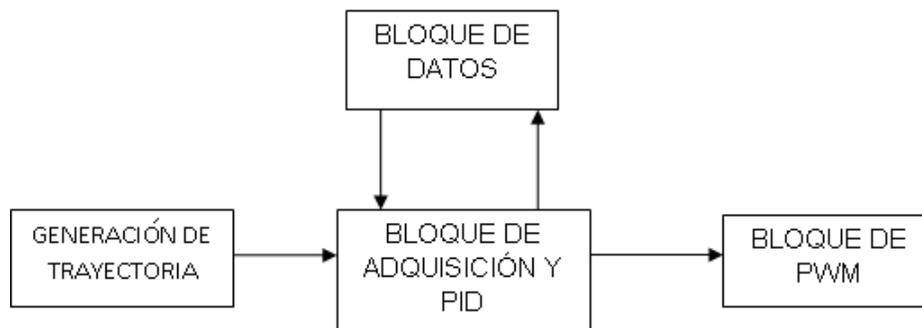


Figura C2. Diagrama de flujo del programa.

A continuación se explicara en detalle la programación de cada uno de los bloques mencionados, para mayor claridad se mostraran dos figuras para cada bloque uno en LabView y el otro en diagrama de flujo para entender que entra y que sale.

- **Bloque *generación de trayectoria***

Este bloque se encarga de generar una trayectoria de tercer grado (Figura C3) se observa el diagrama de flujo en donde de entrada- salida y su interacción con otros bloques.

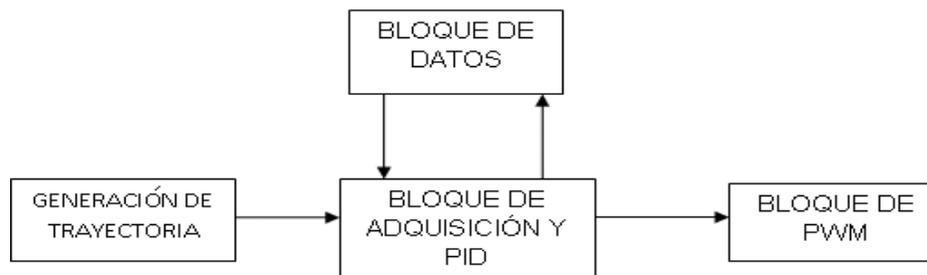


Figura C3. Bloque en diagrama de flujo.

A continuación se describen las entradas y salidas del bloque en diagrama de flujo:

programar: habilita o deshabilita la generación de la trayectoria.

qf: es la posición final de la articulación dada en radianes que el usuario ha establecido.

qi: es la posición inicial de la articulación.

tf: tiempo en que el usuario desea que la articulación se desplace de qi a qf.

In-in, In-out: se encarga de incrementar el contador cada diez milisegundos, que es el tiempo en que se genera cada punto de la trayectoria (es una variable interna del bloque).

element: es la señal de la posición sensada de la articulación en radianes.

En seguida se muestra el algoritmo del bloque de generación de trayectoria en LabView (figura C4).

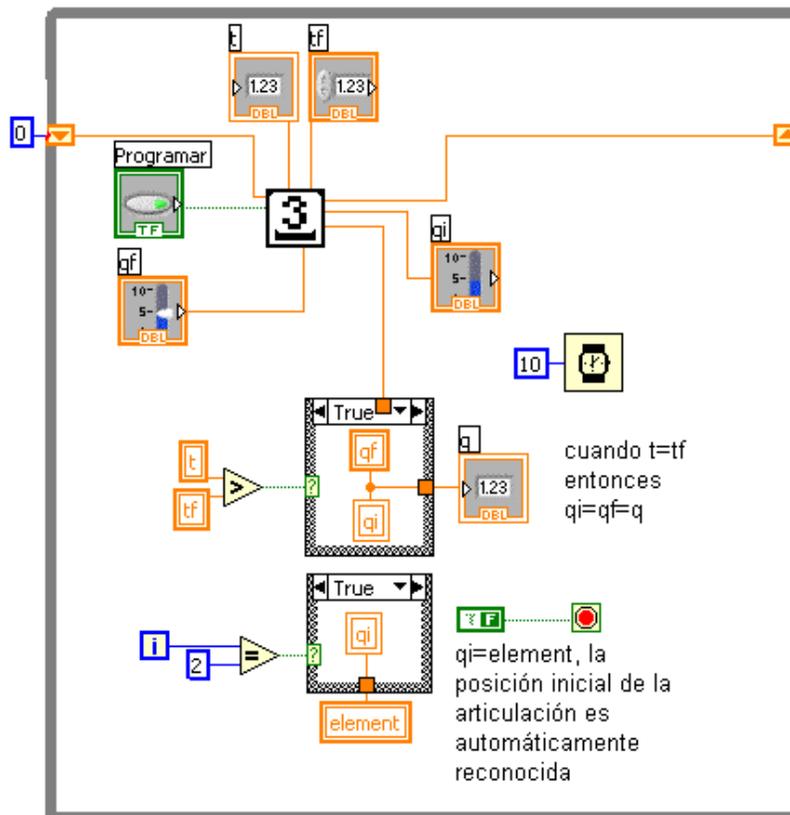


Figura C4. Bloque de generación de trayectorial.

En este bloque se tiene como parte principal el *.vi grado3*. Este es encargado de generar las órdenes de referencia en posición, velocidad y aceleración, que son funciones del tiempo. Este *.vi* incorpora un polinomio de tercer grado que genera un movimiento entre dos puntos con trayectoria restringida entre los puntos, este polinomio se realiza imponiendo una velocidad nula al inicio y al final del movimiento.

El *.vi grado3* tiene como entradas: *programar*, *qf*, *qi*, *tf*, *in-in* y como salidas: *t* e *in-out*.

El resto del programa se encarga de reconocer que una vez se llega a *qf* este sea automáticamente *qi* para así continuar con una nueva trayectoria *qf*. Además al inicio del programa la posición inicial es automática, como se observa en la Figura C3, la única salida del bloque es *q* el cual es el *set point* que va hacia el bloque *adquisición y PID*.

- **Bloque *adquisición y PID***

En este bloque (Figuras C5 y C6) se encuentra el controlador llamado *PID simple* el cual recibe la señal de consigna *p1* o *q*, dependiendo de si *cargar* esta o no habilitado, este *PID* envía una señal de esfuerzo dependiendo del error y de sus parámetros de sintonización .

La figura C5 se observa las entradas y salidas de este bloque y a continuación se describe cada una de ellas.

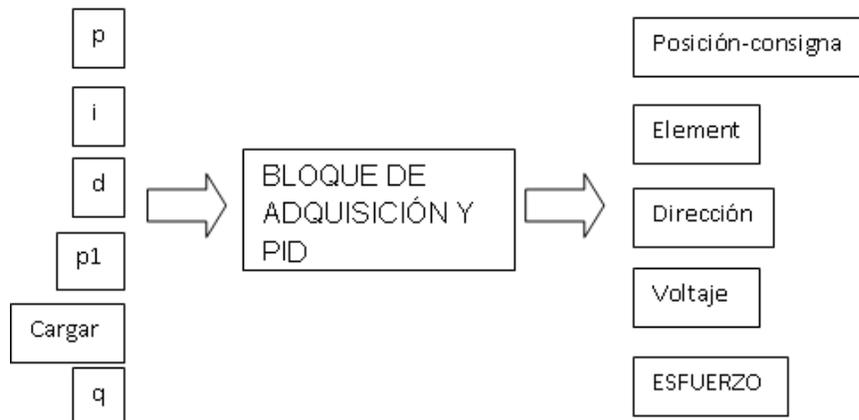
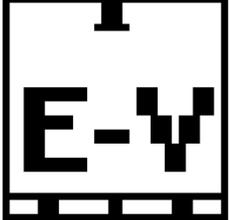
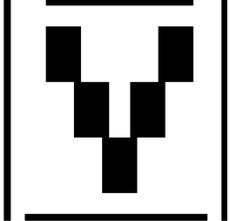


Figura C5. Bloque de adquisición y PID en diagrama de flujo.

Entradas:

p1: es la consigna generada cuando se carga una trayectoria definida de un archivo *.txt*.

Cargar: habilita la consigna *p1*.

	<p>Variable del proceso: es la consigna.</p> <p>Limite superior e inferior: son los límites de las articulaciones en radianes.</p> <p>Referencia: es la señal de los sensores.</p> <p>Salida:</p> <p>Valor de salida: es el esfuerzo de control.</p>
	<p>Vs-es: transforma la señal de esfuerzo en dos salidas una del valor absoluto de su entrada y otra de 1 o 0 dependiendo de si es positivo o negativo el esfuerzo.</p> <p>Entrada:</p> <p>Esfuerzo: es el Valor de salida del PID.</p> <p>Salidas:</p> <p>ES: valor absoluto del esfuerzo.</p> <p>Dirección: es un 1 o 0 dependiendo de si la entrada es negativa o positiva.</p>
	<p>Esfuerzo-voltaje: convierte el esfuerzo en la señal de voltaje que llega a los actuadores.</p> <p>Entrada:</p> <p>E: valor absoluto del esfuerzo.</p> <p>Salida:</p> <p>Voltaje: voltaje que llega a los actuadores.</p>
	<p>Art1radianes: se encarga de transformar la señal de los de los sensores que esta en voltaje a radianes o a grados.</p> <p>Entrada:</p> <p>Voltios: señal del sensor de la articulación.</p> <p>Salidas:</p> <p>Grados: valor del desplazamiento de la articulación en grados.</p> <p>Radianes: valor del desplazamiento de la articulación en</p>

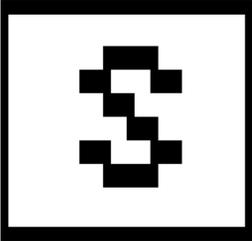
	radianes
	<p>d-v: se encarga de captar las señales de las 5 articulaciones en voltajes.</p> <p>Entrada:</p> <p>Stop: detiene la adquisición de datos.</p> <p>Salida:</p> <p>Voltaje1 a voltaje5: son los voltajes captados por los sensores de la ubicación de cada articulación.</p>

Tabla C1. Vi utilizados en el bloque de *adquisición y PID*.

- **Bloque de PWM**

En este bloque se encuentra el *.vi PWM* (figuras C7 y C8) el cual recibe el esfuerzo del controlador PID y transforma ese valor en una serie de pulsos de amplitud variable que son enviados al *.vi paralelo* que se encarga de enviar esa señal por el puerto paralelo y a la USB6008 por los canales analógicos.

En Figura C7 se muestra las entradas y salidas de este bloque y en seguida se describe cada una de ellas.



Figura C7. Diagrama de flujo de bloque de PWM.

Entradas:

Periodo: Indica el periodo del PWM.

Esfuerzo: el esfuerzo de control del PID.

Dirección: es la dirección de la articulación.

Salidas:

Señal PWM: es un indicador de la dinámica del PWM. Se puede visualizar su grafica en el panel principal (figura C1).

Puerto paralelo: se envían a través del puerto paralelo los 8 bits de PWM, dos por articulación, canal1 y canal2 para un total de 4 articulaciones.

USB6008: se envían las dos señales de PWM de la 5 articulación por los canes analógicos a0 y a1 de la USB6008.

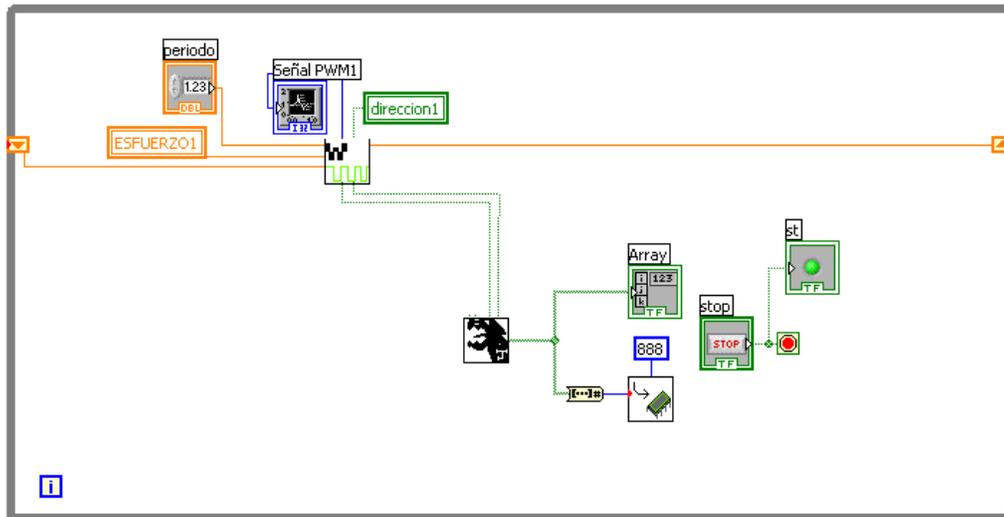


Figura C8. Algoritmo encargado de generación y envío de PWM.

A continuación se describe los *vis* utilizados en el bloque de PWM tabla C2.

Símbolo	significado
	<p>PWM: recibe el esfuerzo del controlador PID y transforma ese valor en una serie de pulsos de amplitud variable.</p> <p>Entradas:</p> <p>Periodo: es el periodo del PWM.</p> <p>Esfuerzo%: el valor del esfuerzo de control en %</p> <p>Inc-in: contador que se incrementa se inicializa en 0.</p> <p>Dirección: es la señal de dirección proveniente del bloque de adquisición y PID.</p> <p>Salidas:</p> <p>inc-out: contador incrementado en 1 unidad.</p>

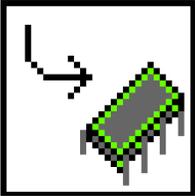
	<p>PWM: señal modulada por ancho de pulso.</p> <p>canal1, canal2: se envía el PWM por uno de los dos canales dependiendo del valor de la dirección mientras el otro canal se mantiene en 0.</p>
	<p>Paralelo: se encarga enviar las señales de PWM de las 4 articulaciones a un arreglo de 8 bits.</p> <p>Entradas:</p> <p>Boolean1 a 8: estas son las señales de PWM de las 4 articulaciones</p> <p>Salidas:</p> <p>Array: es un arreglo de 8 bits que contiene el PWM de las 4 articulaciones.</p>
	<p>Out port 32:</p> <p>Entradas:</p> <p>Write value: es la señal de PWM a enviar.</p> <p>Address: es la dirección del puerto lpt1.</p>

Tabla C2. .vis utilizados en el bloque de *PWM*.

- **Bloque de datos**

Este bloque (Figuras C9, C10 y C11) es el encargado de cargar un archivo con extensión *.txt* donde se encuentran las trayectorias para cada una de las articulaciones y guardar los datos de los voltajes enviados a cada articulación y la posición entregada por los sensores simultáneamente durante la prueba. Se puede dividir el bloque en dos diferentes rutinas (Figuras C10 y C12).



Figura C9. Diagrama de flujo de *bloque de datos*.

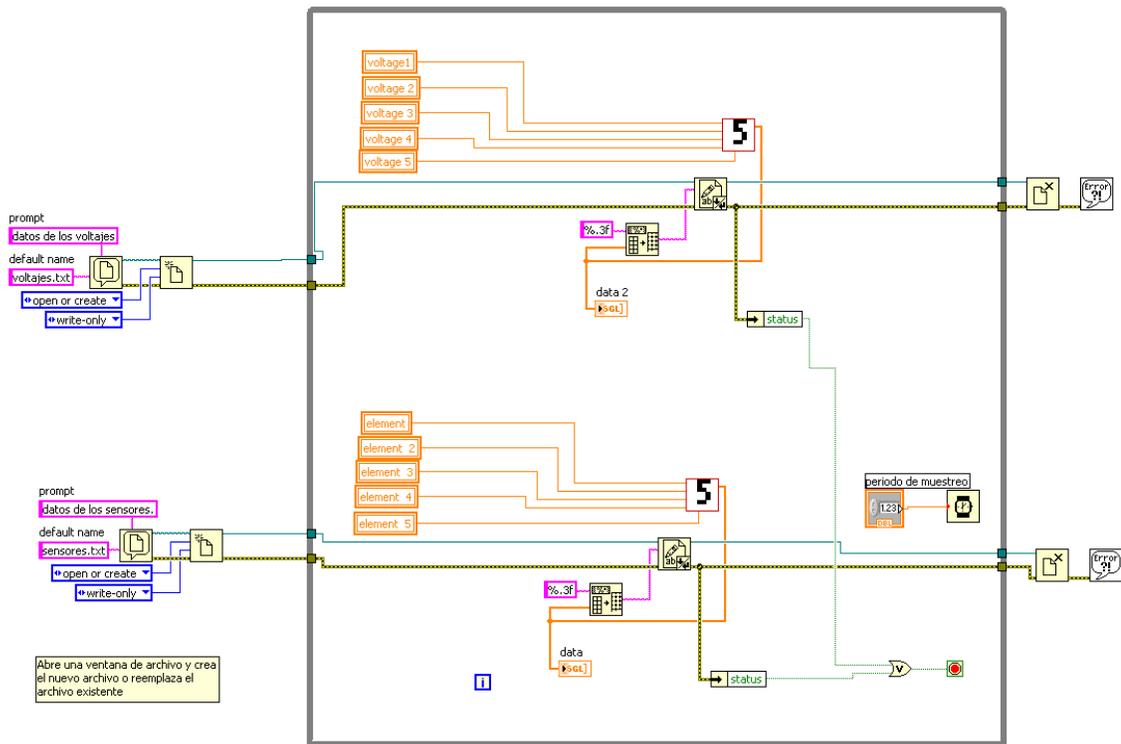


Figura C11. Rutina de guardar datos.

ANEXO D

ESQUEMAS DE CONEXIONES DEL ROBOT HRA934 RECONSTRUIDO

En esta sesión se dan a conocer los esquemas de conexiones entre los diferentes subsistemas del robot. En la Figura D1 se indican las conexiones entre las fuentes de alimentación, el sistema de adquisición de datos mediante la USB6008 y las borneras que se encuentran en la parte trasera de la base del robot. La Figura D2, las conexiones entre los sensores de posición angular y las borneras mencionadas anteriormente. Y la Figura D3 el esquema de conexiones entre las tarjetas de potencia del sistema y los motores, el PC y las tarjetas de potencia y los sensores de fin de carrera y las borneras.

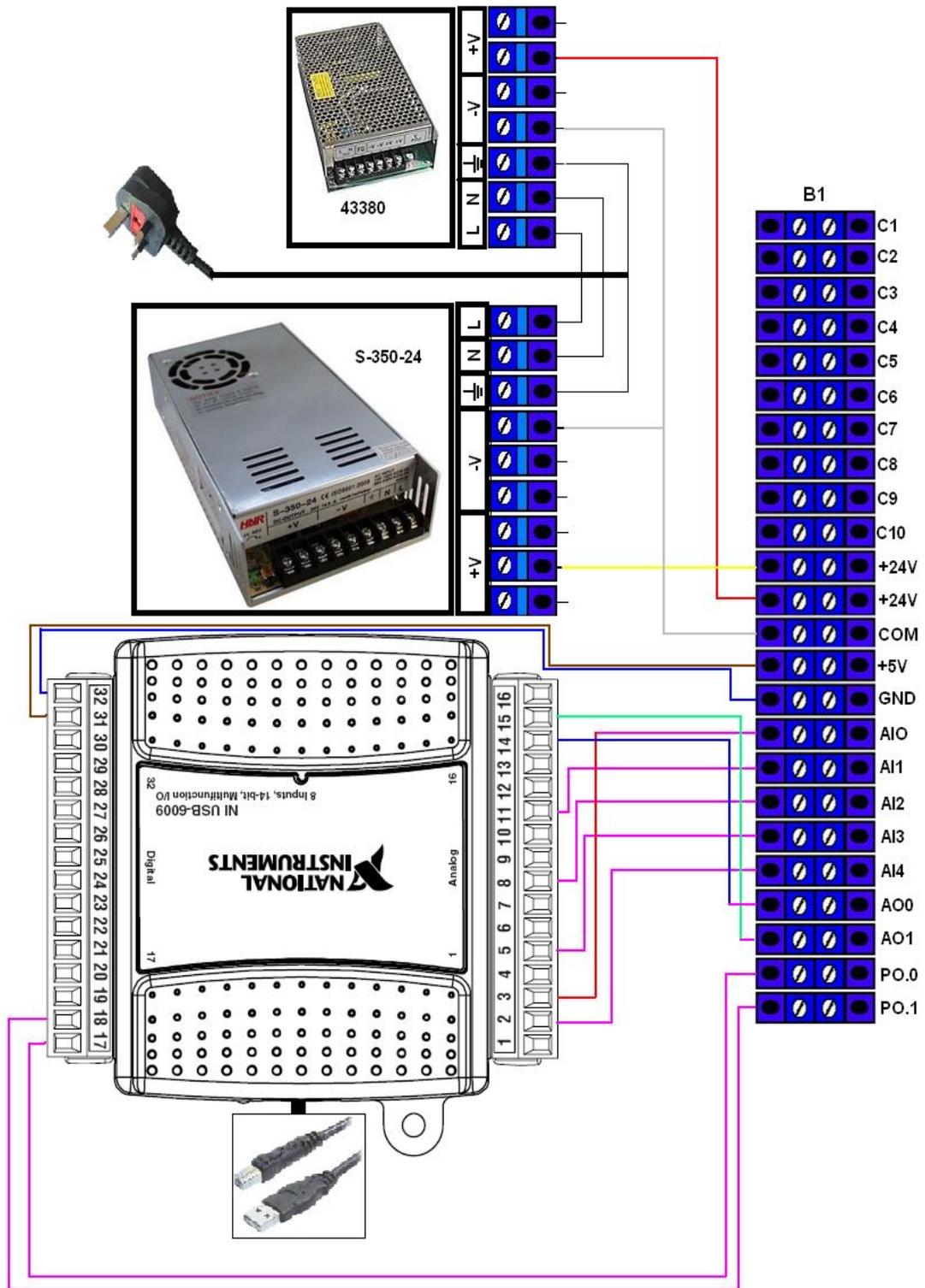


Figura D1. Diagrama de conexiones de las fuentes de alimentación y el sistema de adquisición de datos

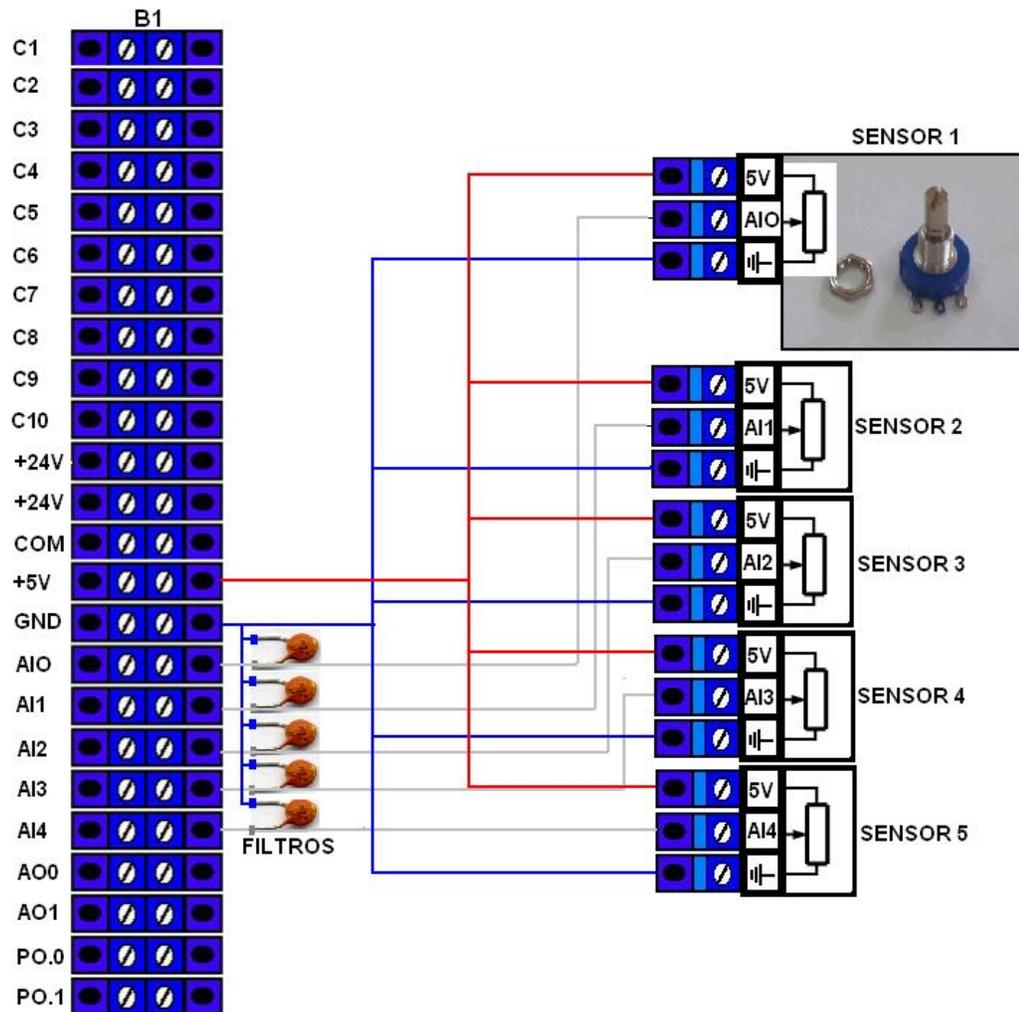


Figura D2. Diagrama de conexiones de los sensores de posición angular

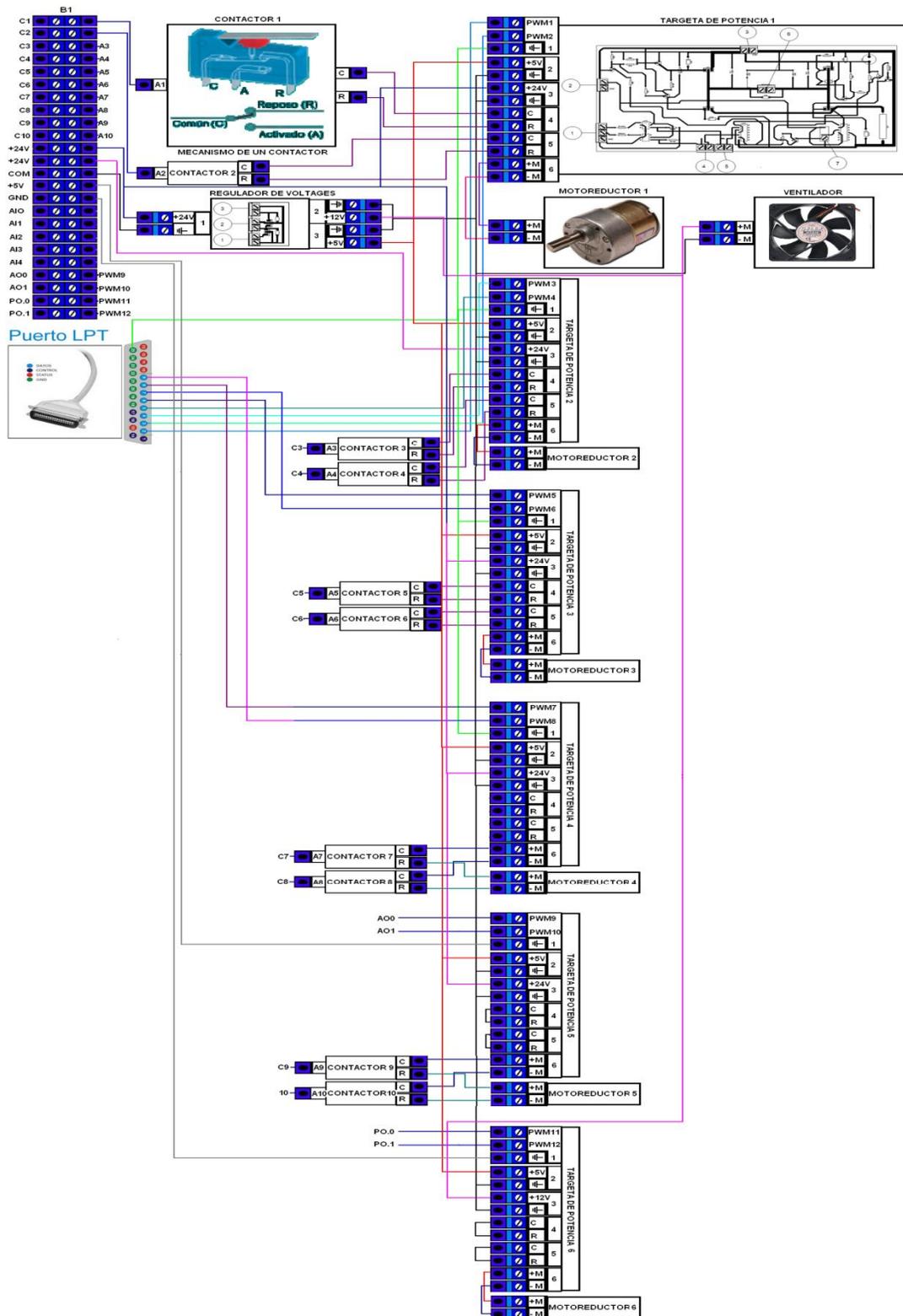


Figura D3. Diagrama de conexiones del sistema de control y de potencia

ANEXO E

COSTO DE LA RECONSTRUCCIÓN DEL ROBOT HRA934

A continuación se presenta una tabla que indica los costos del proyecto, sin tener en cuenta el costo de los insumos y equipos de cómputo dispuestos por la universidad, ni número de horas dedicadas al desarrollo del trabajo de grado por parte de los ejecutantes y del director.

Rubro	Costo
Motoreductores DC	250.000
Sensores	240.000
Fuente de alimentación DC	350.000
Componentes electrónicos	250.000
Insumos varios	350.000
Mano de obra por parte de INVEL	1'260.000
Construcción de impresos PCB	180.000
Total	2'700.000

Tabla E1. Costo del proyecto

La financiación del proyecto se dio por parte de la Universidad del Cauca en un 80%. Y el 20% restante por parte de los realizadores del proyecto.