

ROBOT MANIPULADOR DE TIPO SEMINDUSTRIAL

**ANDRES FELIPE NAVAS ESCOBAR
EDWIN ANDRES ROJAS MARTINEZ
NATHALIA GALVIS BURBANO**

Proyecto de grado para optar al titulo de ingeniero mecatrónico

**Director
Freddy Naranjo Pérez
doctor ingeniero mecánico**

**CORPORACION UNIVERSITARIA AUTONOMA DE OCCIDENTE
DIVISION DE INGENIERIAS
PROGRAMA DE INGENIERIA MECATRÓNICA
SANTIAGO DE CALI
2002**

Nota de aceptación:

Trabajo aprobado por el comité de grado en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Corporación Universitaria Autónoma de Occidente para optar al título de Ingeniero Mecatrónico.

OSCAR CAMPO SALAZAR

Jurado

ARNALDO MENDEZ PUPO

Jurado

Santiago de Cali 5, Agosto, 2002

Dedico este pequeño paso de mi carrera a mi abuela, a mi tío Jair y a Jenny por su apoyo incondicional en todo momento, y a todos aquellos que no creían en mí.

Edwin Andres Rojas Martínez

A mi familia, Nelsy, Fernando, Santiago, abuelo Eduardo, por haberme guiado hacia este camino deseando siempre lo mejor para mí.

Nathalia Galvis Burbano

Este logro se lo dedico a mi padre a mi madre y mis hermanos, así como a toda mi familia por creer en mí y estar siempre apoyando mi trabajo. También quiero dedicar mi labor al mejor equipo de trabajo con el que se pueda contar, Nathalia y Edwin sin ellos no hubiese existido un sueño para convertirlo en una realidad.

Andrés Felipe Navas Escobar

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a las personas y entidades que estuvieron atentos durante el desarrollo del proyecto y que nunca dejaron de creer en que sería una realidad.

Gracias por su colaboración económica a la Corporación Universitaria Autónoma de Occidente y al Ingeniero Fernando Galvis.

Gracias por su aporte, colaboración e interés en el proyecto al Ingeniero Jorge Jordan Gerente TecniMaquila Ltda., al Ingeniero Carlos Andrés Camayo, al compañero Juan Carlos Merchan, al compañero Eivar Rojas, al compañero Mario Fernando Ibarra y a todo el grupo de profesores, directivos y secretaria del programa de Ingeniería Mecatrónica de la Corporación Universitaria Autónoma de Occidente.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCION	15
1. OBJETIVOS	16
1.1 OBJETIVO GENERAL	16
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
2. JUSTIFICACION	17
3. PLANIFICACION	18
3.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	18
3.2 ANÁLISIS QFD (QUALITY FUNCTION DEPLOYMENT) DEL PROBLEMA	19
3.2.1 Descripción de clientes	19
3.2.2 Requerimientos de cada uno de los clientes	19
3.2.3 Niveles de importancia de los requerimientos de clientes	21

3.2.4	Requerimientos específicos de ingeniería	22
3.3	ESPECIFICACIONES DEL DISEÑO	24
3.3.1	Especificaciones generales.	26
4.	DESARROLLO CONCEPTUAL	28
4.1	ANÁLISIS FUNCIONAL DEL PRODUCTO	28
4.1.1	Identificación de la función general del producto	28
4.1.2	Descomposición de la función general en subfunciones	29
4.2	ANÁLISIS MORFOLÓGICO DEL PROBLEMA	34
4.2.1	El Concepto Seleccionado	37
4.2.2	Evaluación del Concepto	37
4.2.3	Descripción del Concepto Desarrollado	38
4.3	MEMORIAS DE CÁLCULOS DE INGENIERÍA	40
4.3.1	Simulación de Torques y Fuerzas	40
4.3.2	Cálculos de cargas y velocidades	41
4.3.3	Pruebas	43

4.3.4 Cálculos para el diseño del Eje-Base Robot NEA144	45
4.3.5 Cálculo para el Pin de Sujeción de las platinas Brazo y Antebrazo	47
4.4 SELECCIÓN Y DIMENSIONAMIENTO DE COMPONENTES	48
4.4.1 Criterios de ingeniería utilizados para la selección y dimensionamiento de elementos	48
5. DISEÑO A NIVEL DE SISTEMAS	49
5.1 ARQUITECTURA DE PRODUCTOS	49
5.1.1 Arquitectura del sistema	49
5.1.2 Descomposición+Interacciones	50
5.1.3 Estableciendo la Arquitectura	51
5.1.4 Interacciones Incidentales	53
5.1.5 Análisis de interacciones	53
6. DISEÑO DETALLADO	56
6.1 DISTRIBUCIÓN GEOMÉTRICA DEL PROYECTO	56
6.1.1 Sistema Mecánico	56

6.1.2 Sistema Electrónico	56
6.2 PROTOTIPADO	61
6.2.1 Prototipo Físico: sistema mecánico	61
6.2.2 Prototipo Analítico: sistema mecánico	62
6.2.3 Prototipo Analítico: modelos matemáticos	63
7. CONCLUSIONES	70
8. FUTURAS MEJORAS	71
BIBLIOGRAFÍA	73

LISTA DE CUADROS

		Pág.
Cuadro 1	Requerimientos de los Estudiantes	19
Cuadro 2	Requerimientos de los Representantes de manufactura	20
Cuadro 3	Requerimientos de la CUAO	20
Cuadro 4	Calificación del requerimiento	21
Cuadro 5	Requerimientos específicos	22
Cuadro 6	Análisis QFD	23
Cuadro 7	Resumen de especificaciones	26
Cuadro 8	Conceptos básicos del robot	34
Cuadro 9	Datos experimentales	43
Cuadro 10	Relaciones entre los distintos elementos que componen el Robot	49
Cuadro 11	Programa para el robot NEA 144	60

LISTA DE FIGURAS

	Pag.
Figura 1	Etapas del proyecto 15
Figura 2	Especificación de los ejes 24
Figura 3	Software para el control del Robot NEA144 25
Figura 4	Espacio de Trabajo 27
Figura 5	Subfunciones de la Función general Robot Manipulador 29
Figura 6	Subfunciones de la Función Manipular Objetos 30
Figura 7	Subfunciones de la Función Coger Objetos 31
Figura 8	Subfunciones de la Función Mover Brazo 32
Figura 9	Subfunciones de la Función Soltar Objeto 33
Figura 10	Conceptos Seleccionados en el Análisis Morfológico del problema 35
Figura 11	Conceptos Seleccionados en el Análisis Morfológico del problema 36
Figura 12	Robot de configuración angular con articulaciones centradas 39
Figura 13	Simulación del Robot – Working Model 2D 40
Figura 14	Motor Colman IDQA 6039-730 43
Figura 15	Torque vs Voltaje 43
Figura 16	Representación del Robot como una columna excéntrica 45
Figura 17	Descomposición de los sistemas principales y sus interacciones con otros elementos del sistema 50
Figura 18	Sistema Electrónico del Robot 51
Figura 19	Sistema Mecánico del Robot 52

Figura 20	Interacciones incidentales entre elementos	53
Figura 21	Distribución Geométrica de cada Sistema	56
Figura 22	Observaciones de cambio (prototipo físico y virtual)	61
Figura 23	Prototipo virtual modelado en 3D-MAX	62
Figura 24	Dimensiones y ejes del Robot	63
Figura 25	Parámetros de Denavit – Hartenberg	64
Figura 26	Variables de unión del manipulador	68
Figura 27	Proyección del manipulador sobre el plano ZY	69
Figura 28	Robot manipulador NEA 144	72

GLOSARIO

ACTUADOR FINAL: equivalente a elemento terminal

AUTOMÁTICA: ciencia que trata de sustituir en un proceso el operador humano por un determinado dispositivo, generalmente electromecánico.

BALANCEO: uno de los tres movimientos permitidos a la muñeca del robot. Llamado así por similitud con el correspondiente movimiento de un barco o avión. Movimiento de giro alrededor de un eje longitudinal (horizontal) de un barco. Equivalente al ángulo Roll.

BRAZO DEL ROBOT: una de las partes del manipulador. Soportado en la base de éste, sostiene y maneja la muñeca (donde va instalado el útil de toma de objetos).

CABECEO: ángulo que se forma entre la herramienta y el plano base (tierra). Movimiento de giro alrededor de un eje transversal.

CHUNKS: conjunto de partes ó elementos que conforman un sistema o subsistema.

CINEMÁTICO: en robótica se utiliza este término para referirse a los accionamientos de un manipulador que suponen una unión física directa entre los mandos del operador y el elemento terminal.

COORDENADAS: sistema de ejes para el posicionamiento de un punto en el plano o en el espacio. Pueden ser: a) Angulares. Si la referencia de un punto se hace mediante la definición de ángulos a partir de los ejes (origen de los ángulos). b) Polares. Se establece un punto mediante la indicación de un ángulo y un valor escalar (numérico). c) Rectangulares. Cuando los puntos están definidos por varios números (dos o tres).

EJE: cada una de las líneas según las cuales se puede mover el robot o una parte de él (algún elemento de su estructura). Pueden ser ejes o líneas de desplazamiento longitudinal sobre sí mismo (articulación prismática) o ejes de giro (rotación). Cada eje define un "grado de libertad" del robot.

ELEMENTO: cada uno de los componentes de la estructura de un manipulador. Pueden ser elemento maestro, esclavo, de unión, terminal, etc.

FIRMWARE: software que es programado en una memoria para el uso de un microcontrolador ó procesador.

GRADO DE LIBERTAD: cada uno de los movimientos básicos que definen la movilidad de un determinado robot. Puede indicar un movimiento longitudinal o de rotación.

MANIPULADOR: en general, cualquier dispositivo mecánico capaz de reproducir los movimientos humanos para la manipulación de objetos. En particular, suele referirse a los elementos mecánicos de un robot que producen su adecuado posicionamiento y operación.

MUÑECA: dispositivo donde se articula el elemento terminal (garfio, pinza, etc.) de un manipulador. Es un elemento básico para la definición de la flexibilidad y precisión del manipulador. Las posiciones del elemento terminal vienen dadas por los grados de libertad de la muñeca.

PINZA: una de las configuraciones características del elemento terminal de un manipulador o de un robot. Se articula con el resto de la estructura a través de la muñeca.

PITCH: ángulo que se forma entre la herramienta y la junta anterior.

PUENTE H: configuración de cuatro mosfet dispuestos de tal manera que permiten invertir el sentido de la corriente para el manejo de motores DC.

PWM: pulse Width Modulation. Modulación de ancho de pulso.

QFD: quality Function Deployment. Despliegue de la función calidad; Se basa en el uso de la descripción sistemática de las relaciones existentes entre todas las exigencias de un producto.

ROBOT: ingenio mecánico controlado electrónicamente, capaz de moverse y ejecutar de forma automática acciones diversas, siguiendo un programa establecido.

ROLL: equivalente al ángulo de balanceo

TEACH PENDANT: dispositivo externo que permite visualizar los estados y manipular un robot. También es conocido como **Teach Box** ó caja de enseñanza.

RESUMEN

El robot manipulador NEA 144 es un producto esencialmente didáctico para el aprendizaje e investigación en la asignatura de robótica y otras materias pertenecientes a las áreas de Automática y Sistemas Integrados.

El robot es de configuración angular con cinco grados de libertad más un actuador final, que para la aplicación inicial de **Pick & Place** será un electroimán.

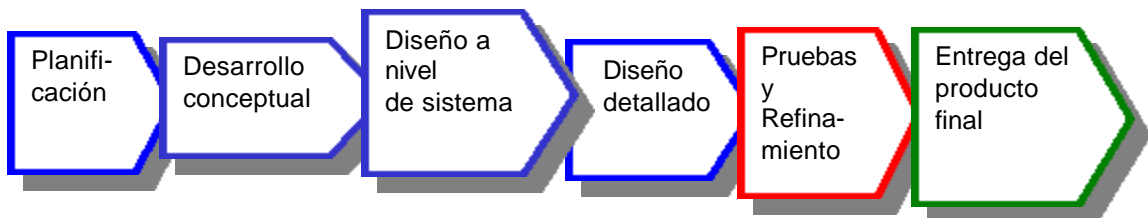
El robot se constituye básicamente por tres sistemas, mecánico, electrónico e informático, de ésta manera integra las tecnologías que definen el campo de trabajo de un ingeniero mecatrónico. Cada uno de estos sistemas principales se subdividen en módulos para el manejo independiente de cada articulación.

La estructura física de NEA 144 está hecha principalmente en aluminio, permitiendo una estructura liviana y robusta. El control del robot está basado en un microcontrolador PIC que entre otras cosas posee una interfaz USB v1.1 para la conectividad con el PC, de éste modo el usuario final puede interactuar con el robot desde prácticamente cualquier computador moderno. El software de manejo del robot ésta diseñado de tal modo que el usuario pueda realizar sus propios programas basados en el lenguaje de programación de los robots de la empresa Mitsubishi, y pueda simular en él todos los movimientos sin necesidad de conectar físicamente el robot; al conectar el robot el usuario puede controlarlo manualmente o descargar programas editados para su ejecución continua o por pasos, adicionalmente existe la posibilidad de ver al robot en vivo en la pantalla del computador gracias al uso de una **WebCam**.

INTRODUCCION

En el presente documento se muestra cómo desarrollar un robot manipulador siguiendo las diferentes etapas necesarias para la elaboración de proyectos, planteadas en el orden definido en la figura 1:

Figura 1. Etapas del proyecto



En la planificación se encuentra la descripción y el análisis **QFD** (Quality Function Deployment – Despliegue de la Función de Calidad) del problema así como las especificaciones de diseño. Dentro del desarrollo conceptual se menciona el análisis funcional del producto identificando las funciones y subfunciones principales, se realiza la evaluación del concepto seleccionado, adicionalmente se realizan los cálculos de ingeniería necesarios para el desarrollo de los conceptos. Para la etapa de diseño a nivel de sistemas se establece la arquitectura del producto y se hace una descomposición de los sistemas que hacen parte del proyecto. Durante el diseño detallado se define una distribución geométrica para los sistemas mecánicos, electrónicos y software, además se brinda una explicación detallada de los mismos con sus respectivos prototipos.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un producto mecatrónico de tipo semindustrial a bajo costo, con fines educativos que sirva de herramienta para la investigación en robótica.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar y construir un robot manipulador con características semindustriales con fines educativos.
- Desarrollar un software que permita manejar el robot de forma fácil y eficiente, siguiendo los estándares para el control de robots.
- Desarrollar prototipos para el sistema mecánico.
- Seleccionar los elementos eléctricos y electrónicos a utilizar en el robot (sensórica, actuadores y control).
- Diseñar los circuitos electrónicos que permitan realizar y controlar los movimientos del robot.

2. JUSTIFICACION

La industria Colombiana actual, necesita incorporar nuevas tecnologías para su desarrollo, por lo cual requiere de la automatización, y los productos mecatrónicos para el mejoramiento de procesos, indispensables para que las empresas sean más competitivas en un mercado global.

Los robots manipuladores se han convertido en una herramienta útil dentro de un proceso de producción debido a su flexibilidad (múltiples tareas), precisión y durabilidad. Por esto el desarrollo de un robot articulado es de mucha conveniencia, más aún si el costo puede ser mucho menor que el encontrado en mercados internacionales.

Adicionalmente este robot es de gran utilidad en la parte académica para poder desarrollar los conocimientos necesarios, facilitando el aprendizaje de la robótica y su manejo industrial.

3. PLANIFICACION

3.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

A menudo en la industria se observa la necesidad de automatizar cierto tipo de procesos de una forma económica y de fácil implementación. Las exigencias son: la capacidad de realizar múltiples tareas, la robustez y una interfaz amigable para cualquier usuario, teniendo en cuenta los estándares de programación y diseño.

Actualmente en la Corporación Universitaria Autónoma de Occidente se observa la necesidad de disponer de un robot que sirva de ayuda en el estudio de sus características, funcionalidad y programación para la continua investigación y desarrollo académico, teniendo en cuenta que el robot debe ser diseñado y construido con las herramientas que dispone la Universidad; esto quiere decir que las piezas y el diseño en general sean de fácil manufactura y viable construcción, adicionalmente debe ser de bajo costo.

El robot ha sido diseñado y construido gracias a los conocimientos adquiridos durante el proceso de formación en Ingeniería Mecatrónica.

3.2 ANÁLISIS QFD (QUALITY FUNCTION DEPLOYMENT) DEL PROBLEMA

3.2.1 Descripción de clientes

Estudiantes de Ingeniería: Todos los estudiantes que cursen asignaturas afines a la robótica o el control.

Representante de manufactura: Encargado de fabricar las piezas.

Corporación Universitaria Autónoma de Occidente: Entidad encargada de financiar el proyecto de investigación.

3.2.2 Requerimientos de cada uno de los clientes

- **Estudiantes**

Cuadro 1. Requerimientos de los Estudiantes

Requerimiento	Definición
Manipular Objetos	Robot angular capaz de mover objetos.
Usar un actuador final	Un elemento terminal capaz de sostener y transportar un elemento.
Buen alcance	Un brazo capaz de mover la mano hasta cualquier punto del espacio (dentro de su volumen de trabajo).
Repetibilidad	Precisión de movimientos luego de varios ciclos repetidos.
Velocidad de ejecución	Al menos igual al de un ser humano.
De fácil operación	Permiten a un operador manejar el robot de manera eficiente.
Memoria	Es capaz de registrar todas las instrucciones del operador.
Interfaz amigable con el usuario	Interactúa con los usuarios a través del computador .
Robusto	Cumple con sus funciones sin importar las perturbaciones del medio.
Precisión de movimientos	Movimientos con márgenes de tolerancia mínimos.
Rápida respuesta	En el momento de ejecutar una acción debe

Cuadro 1. Requerimientos de los Estudiantes

Requerimiento	Definición
	iniciar en corto tiempo la tarea.
Poco consumo de energía	Uso de actuadores que permitan consumir poca energía.
Uso de actuadores eléctricos	Actuadores eléctricos de fácil manejo.
Comunicación PC-Robot a través de puertos externos	Uso de puertos existentes en PC convencionales (Paralelo, serie o USB)
Control fácil de programar	Set de instrucciones de fácil entendimiento.
Fuerte pero ligero	Baja relación de carga-peso.
Capacidad de carga	Buen desempeño a bajas cargas.

- **Representante de manufactura**

Cuadro 2. Requerimientos de los Representantes de manufactura

Requerimiento	Definición
Poco mantenimiento	Construcción que permita un fácil mantenimiento, con un acceso rápido a los componentes
Intercambiabilidad	Poder intercambiar los componentes en caso de avería
Piezas comerciales	Elementos de fácil adquisición en el mercado.

- **Corporación Universitaria Autónoma de Occidente**

Cuadro 3. Requerimientos de la CUAO

Requerimiento	Definición
Económico	Debe ser más barato que los robots del mercado. (<US\$5000)
Seguro	No debe interferir con las plantas existentes en el laboratorio.
Desarrollo en 20 meses	Tiempo máximo de ejecución del proyecto en 3 semestres.

3.2.3 Niveles de importancia de los requerimientos de clientes

A continuación se calificará con una escala personal la importancia de cada uno de los requerimientos:

Cuadro 4. Calificación del requerimiento

Requerimiento	Calificación
Manipular Objetos	*
Usar un elemento terminal	5
Buen alcance	3
Repetibilidad	4
Velocidad de ejecución	3
De fácil operación	5
Memoria	3
Interfaz amigable con el usuario	3
Robusto	4
Precisión de movimientos	5
Rápida respuesta	5
Poco consumo de energía	3
Uso de actuadores eléctricos	5
Comunicación PC-Robot a través de puertos externos	5
Control fácil de programar	5
Fuerte pero ligero	2
Capacidad de carga	2
Poco mantenimiento	4
Intercambiabilidad	2
Piezas comerciales	5
Sujeción de objetos que no sobrepasen los 300 g	4
Económico (Valor del producto <US\$5000)	*
Seguro	*
Desarrollo en 20 meses	*

La escala de valoración es entre 1 y 5 donde 5 es la máxima importancia y 1 la mínima. El * denota que es de obligatorio cumplimiento.

3.2.4 Requerimientos específicos de ingeniería

El resumen de los requerimientos anteriores se presenta en unas especificaciones de ingeniería contenidas en la Cuadro 5:

Cuadro 5. Requerimientos específicos

Requerimiento	Definición
Tiempo de respuesta	Debe responder a una orden antes de 1s.
Espacio de trabajo	Volumen de trabajo descrito por una semiesfera de $r \approx 634$ mm
Numero de ejes	5 ejes
Grados de libertad	6 (5 ejes + elemento terminal)
Capacidad de carga	± 300 g
Peso	± 35 Kg
Elementos de transmisión de datos	Conexión USB.
Programado en ambiente Windows	Interfaz gráfica. Programación en Visual Basic 6
Materiales livianos	Aluminio preferiblemente.
Motoreductores eléctricos	Motores de ± 24 Vdc a ± 3 Kg·m
Mantenimiento	Mantenimiento 1 vez por año.
Repetibilidad	$\pm 1^\circ$
Ensamble	Tolerancia de ajuste entre piezas de ± 0.1 mm.

A continuación se resume toda la información de resultado del análisis QFD en el Cuadro 6 anexa:

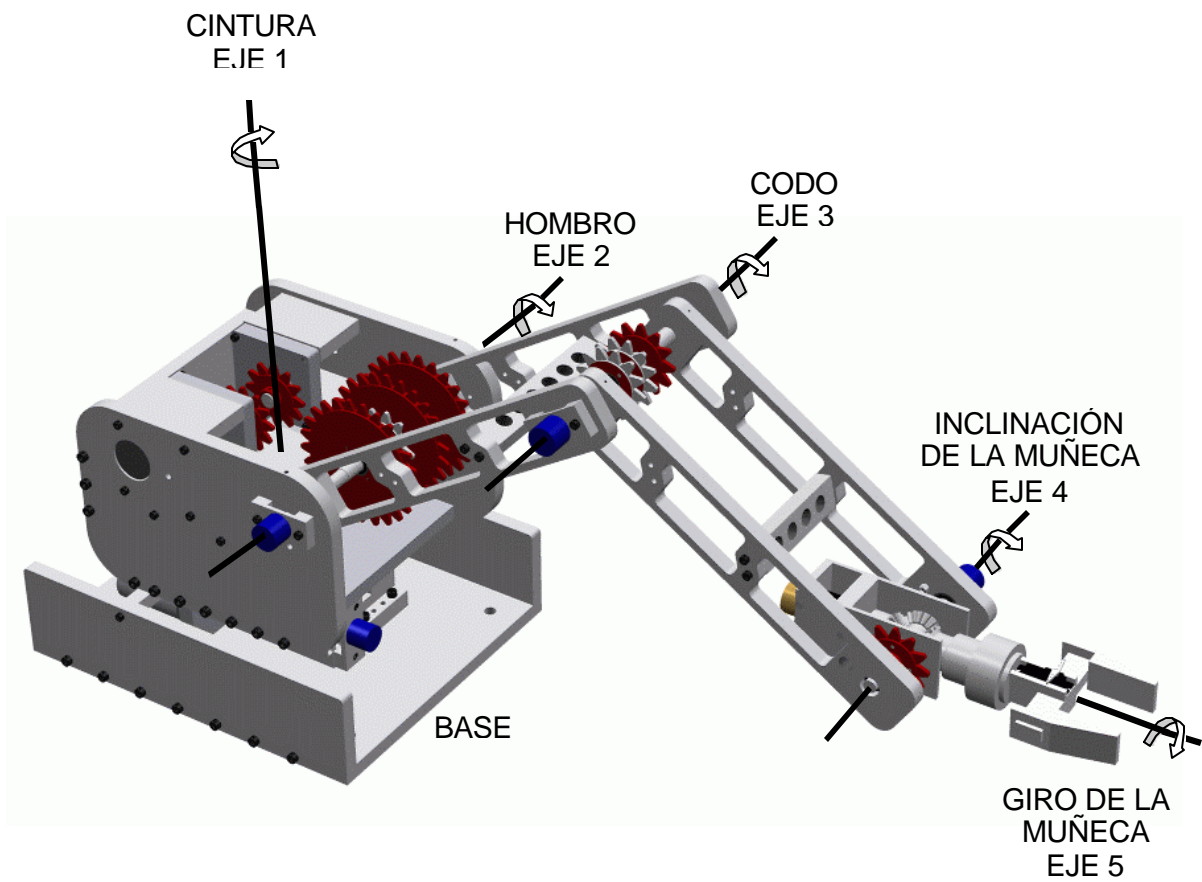
Cuadro 6. Análisis QFD

		REQUERIMIENTOS DE INGENIERÍA														COM					
ROBOT MANIPULADOR DE CONFIGURACION ANGULAR		CALIFICACIÓN	PRECISIÓN	TIEMPO DE RESPUESTA	ESPACIO DE TRABAJO	NÚMERO DE EJES	CAPACIDAD DE CARGA	PESO	CAPACIDAD DEL ACTUADOR FINAL	PROGRAMADO EN AMBIENTE WINDOWS	MATERIALES LIVIANOS	MOTOREDUCTORES ELÉCTRICOS	MANTENIMIENTO	PRESIÓN DE LA PINZA	ENSAMBLE	GRADOS DE LIBERTAD	TRANSMISIÓN DE DATOS	VELOCIDAD NOMINAL	PUMA 560C	MOVE MASTER EX	
MANIPULAR OBJETOS		*																	5	5	
REQUERIMIENTOS DEL CONSUMIDOR	DESEMPEÑO FUNCIONAL																				
	ROBUSTO	4	9			3	3								9	3	3		5	5	
	PRECISIÓN DE MOVIMIENTOS	5	9			3									9	9			5	5	
	RÁPIDA RESPUESTA	5		9															4	4	
	INTERFAZ AMIGABLE CON EL USUARIO	3								9									2	2	
	POCO CONSUMO DE ENERGÍA	3										9							1	2	
	POCO MANTENIMIENTO	4										3	9		1				4	4	
	USO DE ACTUADORES ELÉCTRICOS	5	3				3	3				9	3		3		9	9	5	5	
	CONTROL FÁCIL DE PROGRAMAR	5								9									3	4	
	FUERTE PERO LIGERO	2					9	9			9	3			1				3	2	
	USAR UN ELEMENTO TERMINAL	5			3			3	9						3				5	5	
	CAPACIDAD DE CARGA	2					9		9			9			9	3			5	3	
	PIEZAS COMERCIALES	5	9			1	1	3			1	9	3		9				1	1	
	REPETIBILIDAD	4	9			3						3			9	9			3	5	5
	VELOCIDAD DE EJECUCIÓN	3	3			3	3					9					9	9	5	5	
	MEMORIA	3								3									4	4	
	COMUNICACIÓN PC-ROBOT	5								9									N	N	
	INTERCAMBIABILIDAD	2	1			3					9	9	9	3	9				1	1	
	SEGURO	*																	5	5	
	DE FÁCIL OPERACIÓN	5				3		1		9	1			3			9		3	4	
ESP.	BUEN ALCANCE	3	3		9	9										9		5	4		
	SUJECIÓN DE OBJETOS QUE NO SOBREPASEN LOS 300G	4						9						1				5	5		
7	DESARROLLO EN 20 MESES	*																	/	/	
9	VALOR DEL PRODUCTO < US\$5000=	*																	0	0	
	UNIDADES Y MEDIDAS	±0.1mm	1s	Esfera r=540mm	5	±3Kg	±35Kg	300 g	VisualBasic	C	Al	±24Vdc ±3Kg·m	1Vez/año	0-5Psi	Tol. ±0.1mm	6	RS232	±1m/s			
	IMPORTANCIA RELATIVA	197	45	42	101	77	68	102	171	46	210	99	70	207	165	90	84				
COM	PUMA 560C (UNIMATION)	±0.1 mm	¿?	878 mm	6	4Kg	63 Kg	¿?	NO	¿?	¿?	DC ¿V?	¿?	N/A	¿?	7	RS232 RS423	1m/s			
	MOVEMASTER EX (MITSUBISHI)	±0.1 mm	¿?	700 mm	5	1Kg	±30 Kg	100 mm	NO	¿?	¿?	Paso Paso	¿?	N/A	¿?	6	¿?	1m/s			

3.3 ESPECIFICACIONES DEL DISEÑO

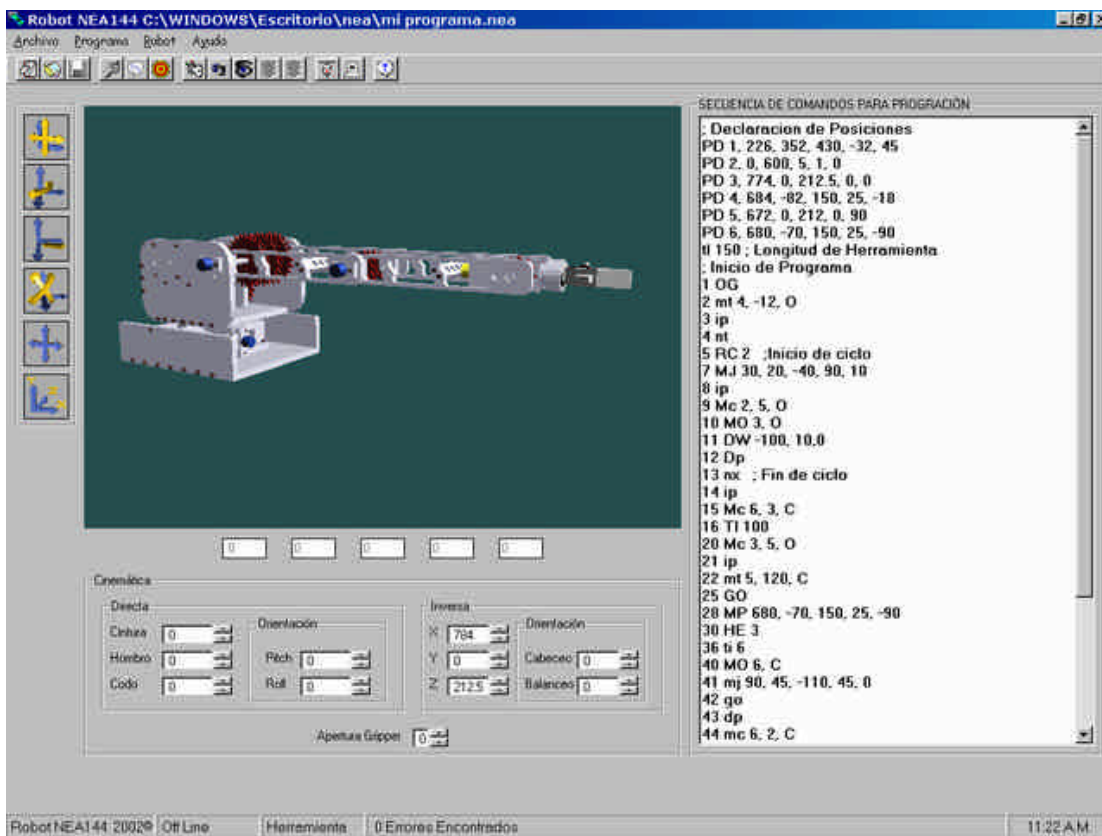
Robot manipulador de configuración angular con seis (6) grados de libertad (Giro de Cintura, hombro, codo, rotación de muñeca, giro de muñeca vertical y actuador final) de tipo semindustrial para propósitos educativos e investigativos, de acuerdo con la Figura 2.

Figura 2. Especificación de los ejes



El material utilizado fue el aluminio ya que es liviano y fácil de conseguir. También se utilizó el acero 1020 para los acoples. Los motores DC son manejados por PWM (Modulación de Ancho de Pulso) bajo una topología de Puente Completo (puente - H), de esta manera se puede garantizar la potencia eléctrica necesaria. El software de control está dividido en dos tipos: interno y externo; el interno o embebido (**firmware**) está conformado por rutinas para el control de posición individual en cada articulación, al cual no tiene acceso el usuario final; el externo es el encargado de brindar una interfaz gráfica para la programación del robot (interno basado en Microcontroladores; externo basado en PC). El software externo está programado bajo Visual Basic 6, y presenta de manera gráfica el estado del robot y su posición en el espacio (Figura 3), adicionalmente ofrece los servicios de programación del robot.

Figura 3. Software para el control del Robot NEA144



3.3.1 Especificaciones generales.

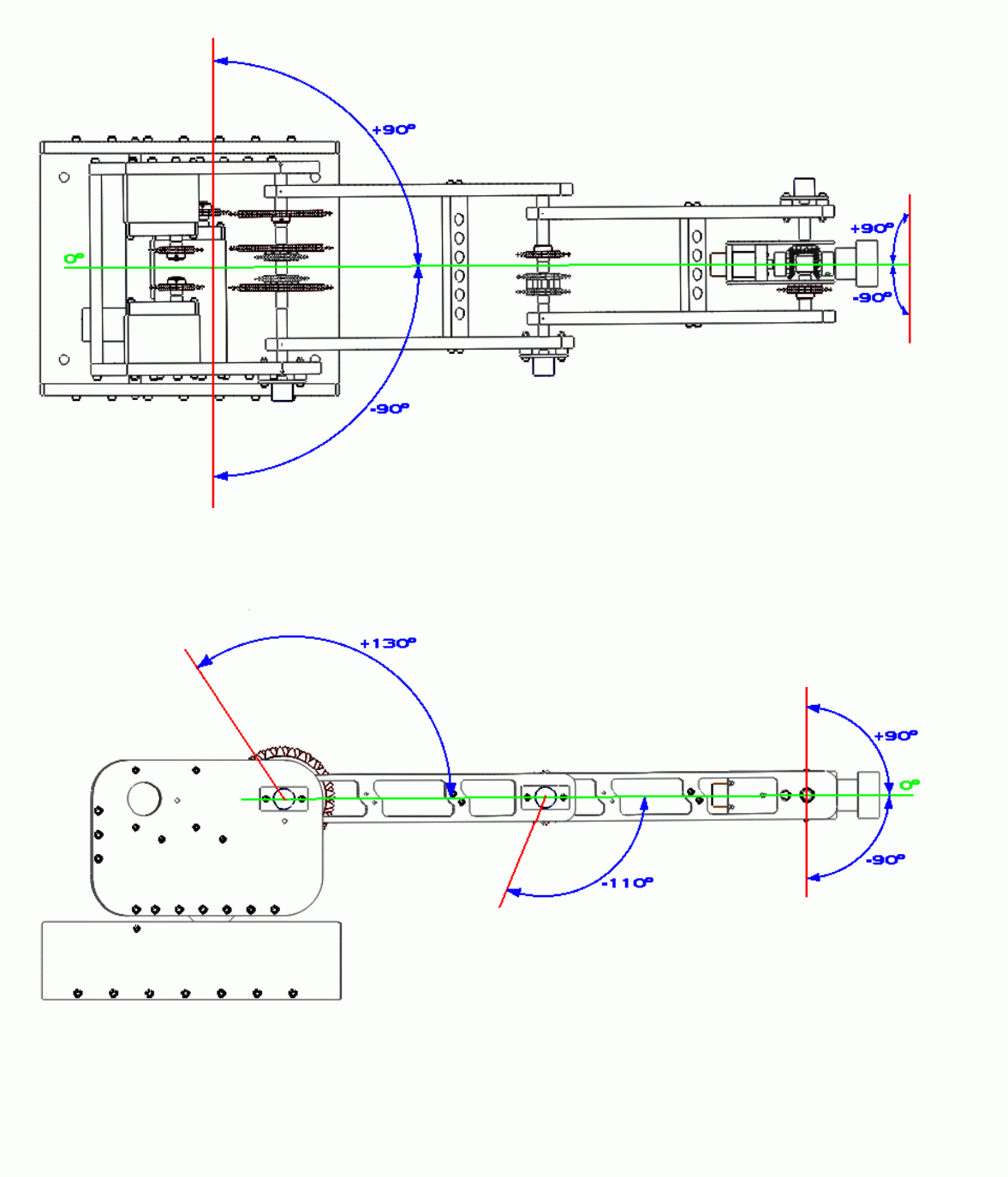
El cuadro 7 corresponde a las especificaciones generales desarrolladas en el proyecto del robot manipulador:

Cuadro 7. Resumen de especificaciones

General	Ejes	5
	Drivers	Motores DC
	Control de Posición	Potenciómetros Lineales (clarostatos)
Área de trabajo	Alcance a la muñeca	≈634 mm (De la base al eje 5)
	Eje 1	≈180°
	Eje 2	≈130°
	Eje 3	≈-110°
	Eje 4	≈180°
	Eje 5	≈180°
Capacidad de carga	Carga Nominal	±300 g
Desempeño	Repetibilidad	±1°
Controlador	Microcontrolador	Motorola 68HC08JK3 PIC16C765JW
	Programación	PC basado en Windows
	Interface	USB v1.1
Alimentación	Fuente de poder	Incorporada 110V/60Hz

El espacio de trabajo describe una semiesfera de 634 mm de radio, sin incluir la herramienta (Figura 4).

Figura 4. Espacio de Trabajo



4. DESARROLLO CONCEPTUAL

4.1 ANÁLISIS FUNCIONAL DEL PRODUCTO

4.1.1 Identificación de la función general del producto

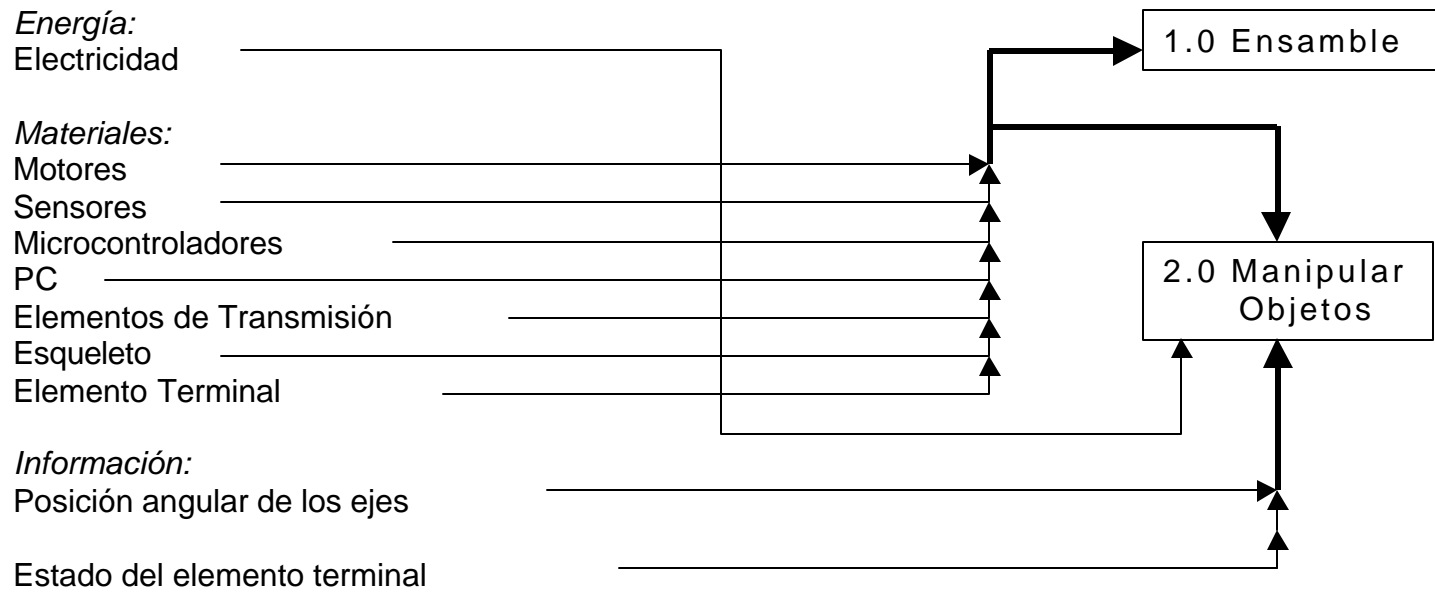
Robot manipulador de tipo semindustrial.

Robot de configuración angular que permite manipular diversos objetos de manera rápida y segura, gracias a un elemento terminal. Cuenta con 6 grados de libertad que le permiten ubicar un objeto en cualquier punto del espacio dentro de su área de trabajo; cada grado de libertad es controlado por servomotores eléctricos que están gobernados por microcontroladores y a su vez estos se conectan a un computador principal el cual es el encargado de programar las acciones a realizar por el robot.

A continuación se analizarán las funciones y subfunciones principales del sistema.

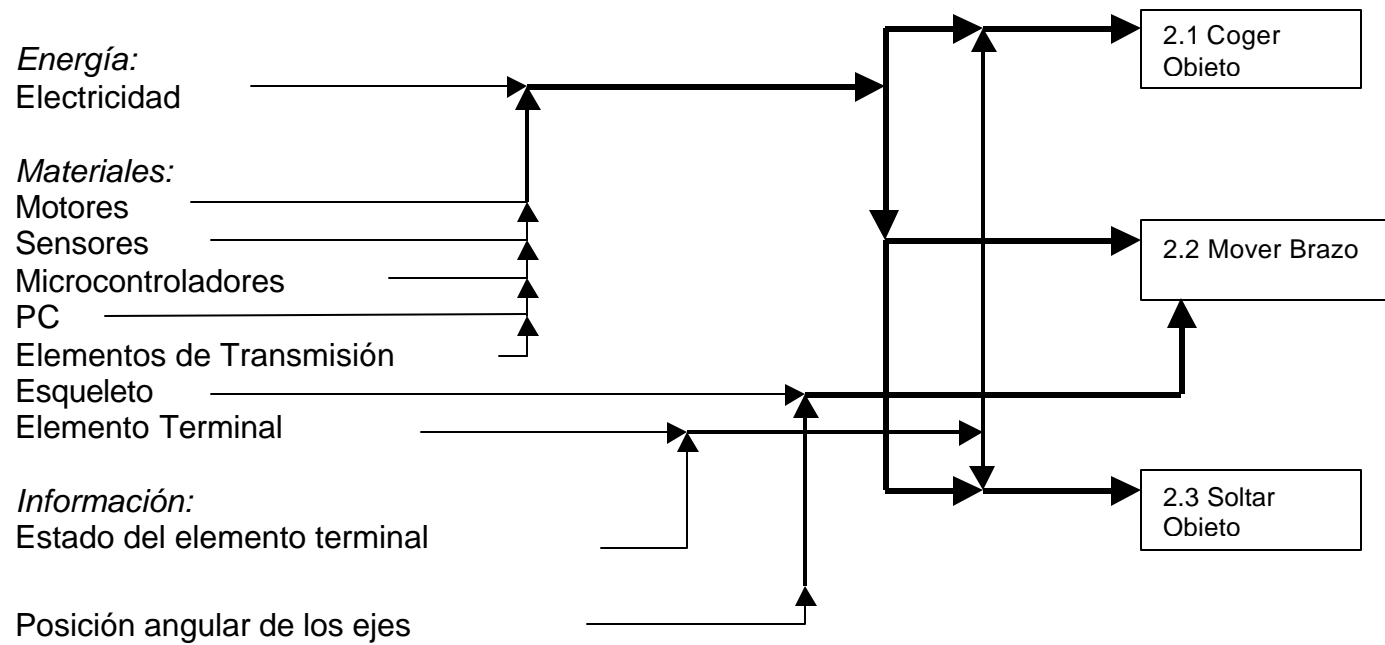
4.1.2 Descomposición de la función general en subfunciones

Figura 5. Subfunciones de la Función general Robot Manipulador



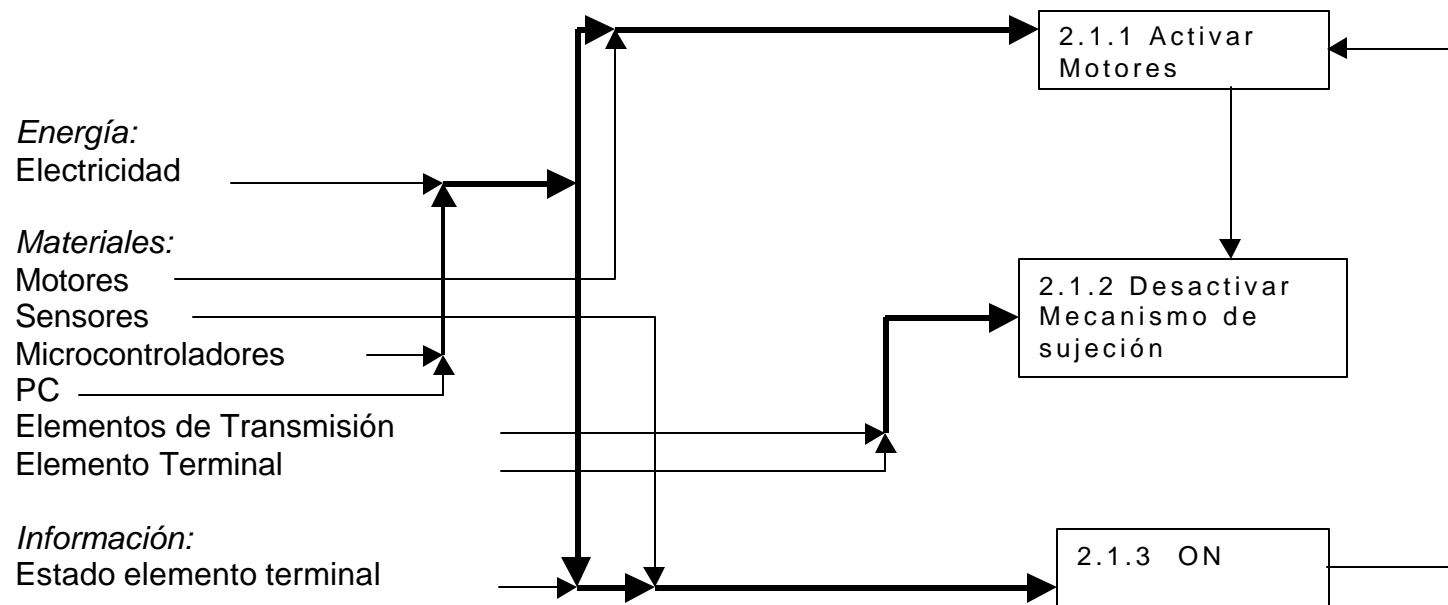
◆ **Descomposición de la función 2.0 manipular objetos en subfunciones**

Figura 6. Subfunciones de la Función Manipular Objetos



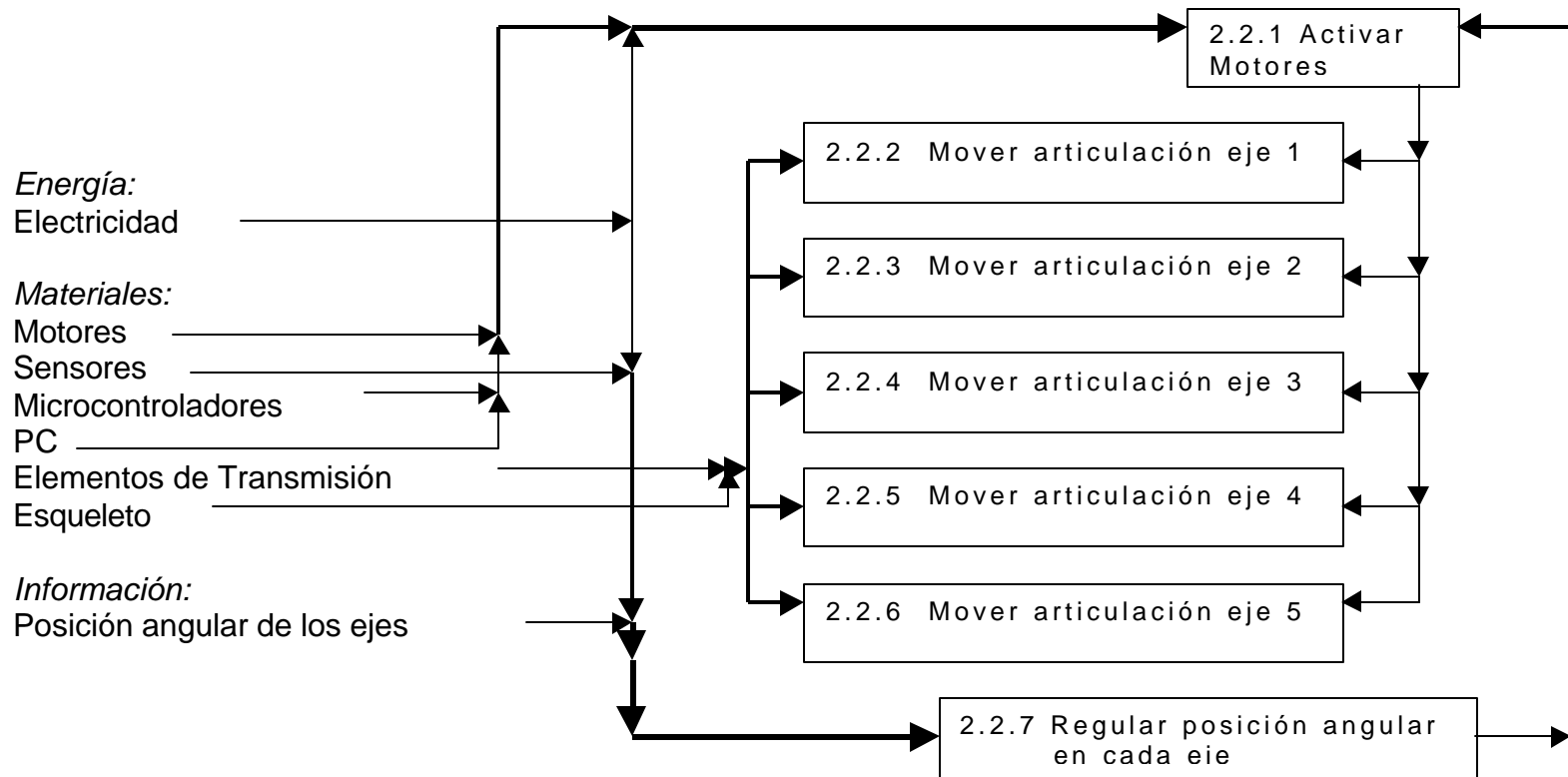
◆ **Descomposición de la función 2.1 Cogrer Objeto en subfunciones**

Figura 7. Subfunciones de la Función Cogrer Objetos



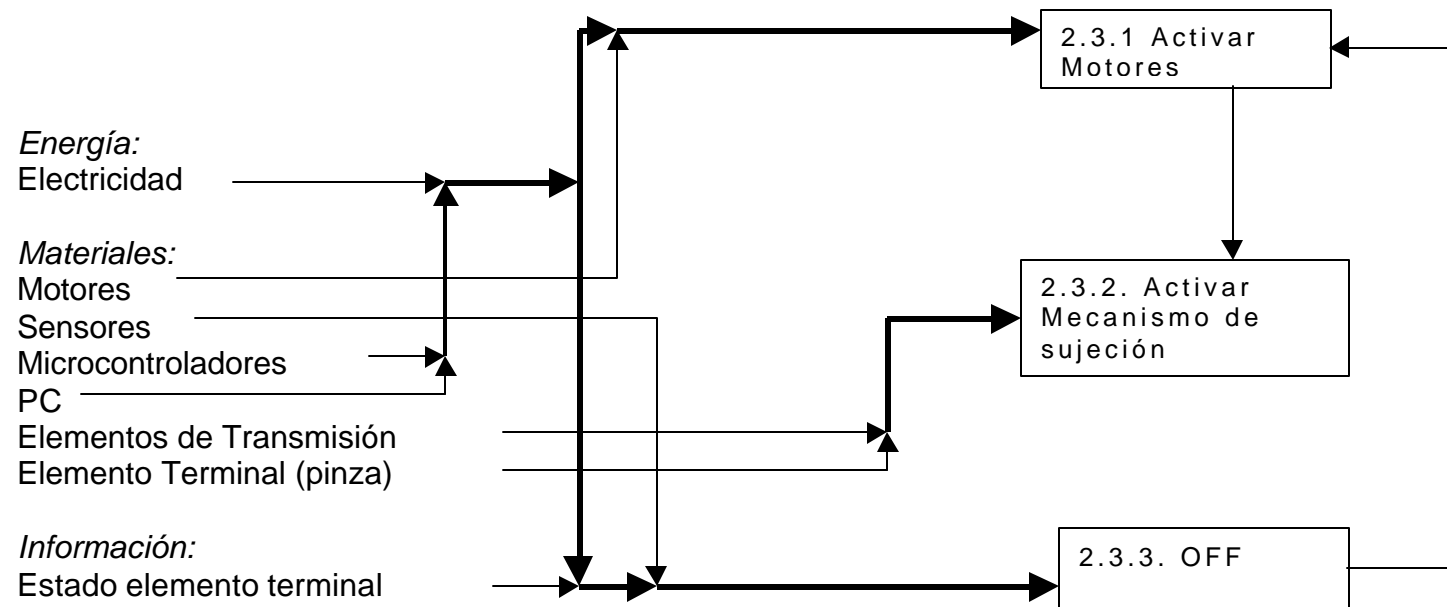
◆ **Descomposición de la función 2.2 Mover Brazo en subfunciones**

Figura 8. Subfunciones de la Función Mover Brazo



◆ **Descomposición de la función 2.3 Soltar Objeto en subfunciones**

Figura 9. Subfunciones de la Función Soltar Objeto



4.2 ANÁLISIS MORFOLÓGICO DEL PROBLEMA

Debido a que la función principal del robot es la manipulación de objetos, se analizó la función 2.0 manipular objetos (Figura 6) para determinar los conceptos básicos del robot.

Cuadro 8. Conceptos básicos del robot

Subfunciones para función 2.0 Manipular Objetos		Conceptos
2.1. Coger Objeto	2.1.1. Activar Motores	Motores DC
	2.1.2. Desactivar Mecanismo de sujeción	Electroimán (ON-OFF)
2.2. Mover Brazo	2.2.1. Activar Motores	Motores DC
	2.2.2. Mover Articulación Eje1	Transmisión: tren de engranes, cadenas, sinfín corona. Articulación: centrados, descentrados (con o sin contrapeso).
	2.2.3. Mover Articulación Eje2	
	2.2.4. Mover Articulación Eje3	
	2.2.5. Mover Articulación Eje4	
2.2.6. Mover Articulación Eje5		
	2.2.7. Regular posición angular en cada eje	Clarostato (potenciómetro lineal)
2.3. Soltar Objeto	2.3.1. Activar Motores	Motores DC
	2.3.2. Activar Mecanismo de sujeción	electroimán (ON-OFF)

En las figuras 10 y 11 se muestran los conceptos seleccionados. De aquí se seleccionaron los dispositivos que mejor se ajustaban a las necesidades del robot NEA144.

Figura 10. Conceptos Seleccionados en el Análisis Morfológico del problema

Articulaciones:

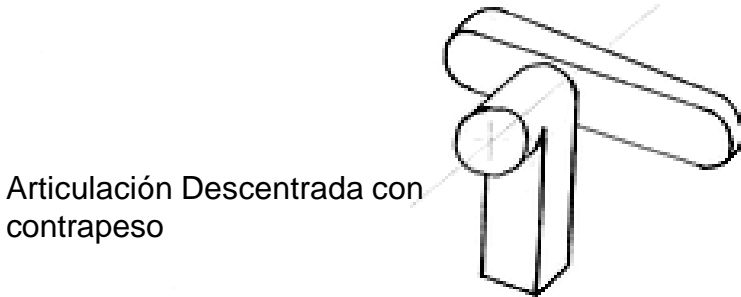
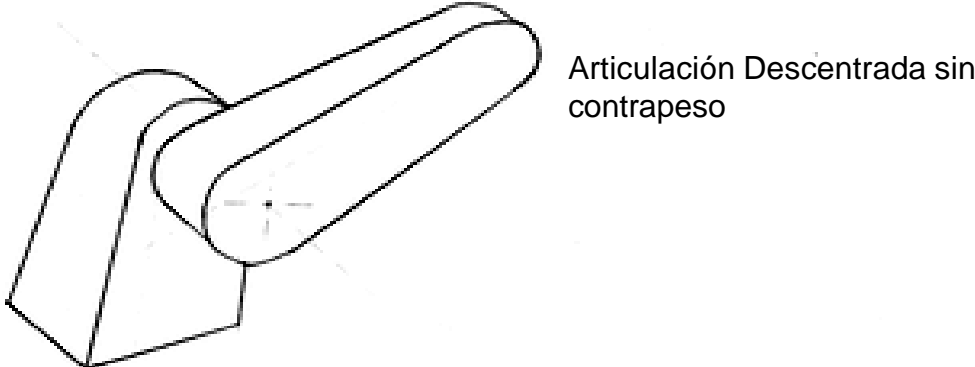
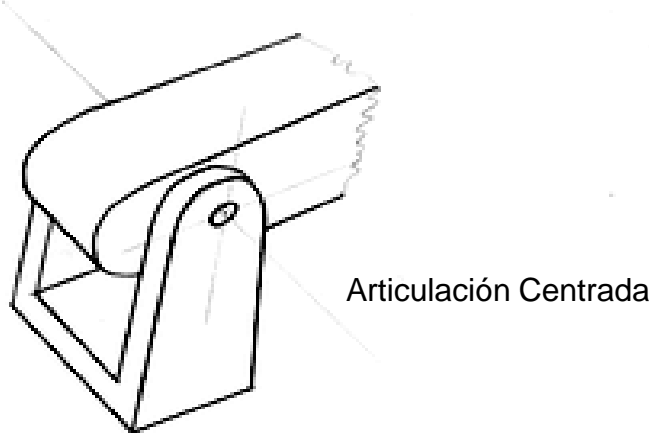
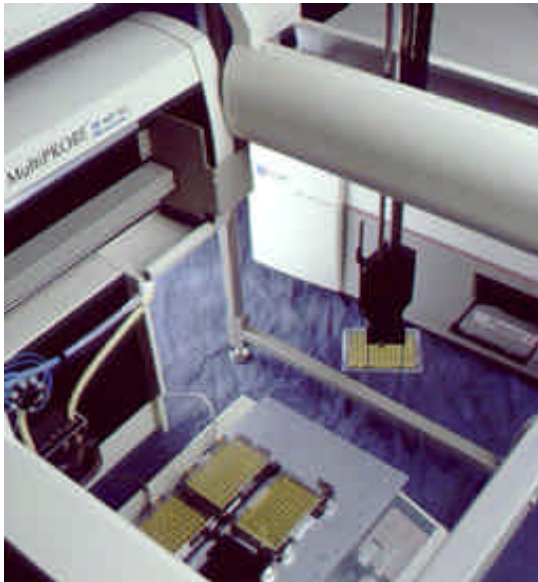


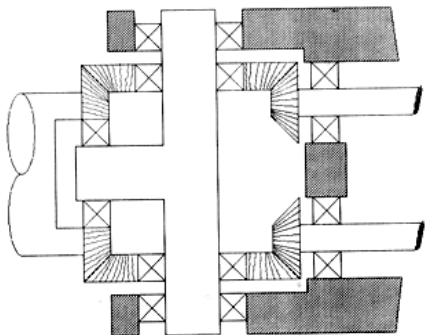
Figura 11. Conceptos Seleccionados en el Análisis Morfológico del problema

Mecanismos de sujeción (electroimán):



Este dispositivo permite sostener objetos metálicos y livianos

Transmisión:



Diferencial
Permite la rotación e inclinación de la muñeca del robot.

4.2.1 El Concepto Seleccionado

CONCEPTO: Robot de configuración angular con articulaciones centradas.

- Utiliza motores DC con reductor; el sistema de transmisión para los ejes 2, 3 y 5 será por cadenas; Para el eje 4 se usará un sistema de engranes cónicos; en el eje 1 un sinfín corona se encargará del giro de la base.
- El elemento terminal para la sujeción de objetos consta de un electroimán que permite atraer objetos metálicos en su estado ON y soltar dichos objetos en el estado OFF.

4.2.2 Evaluación del Concepto

CONCEPTO: Robot de configuración angular con articulaciones centradas.

VIABILIDAD: Este concepto es viable desde el punto de vista de ingeniería y desarrollo tecnológico, pues los elementos mecánicos necesarios son de fácil adquisición en el comercio; adicionalmente la manufactura necesaria es simple. Debido a que los elementos se encuentran alineados, el modelo cinemático se simplifica.

DISPONIBILIDAD DE TECNOLOGÍA: Los elementos mecánicos necesarios tales como los engranes y tornillos sinfín en acero (repuestos de máquinas de coser industriales) se encuentran disponibles en el mercado local, también hay en el comercio motoredutores eléctricos. El elemento terminal es de fácil adquisición y adaptación.

4.2.3 Descripción del Concepto Desarrollado

El concepto desarrollado fue: *Robot de configuración angular con articulaciones centradas* (Figura 12).

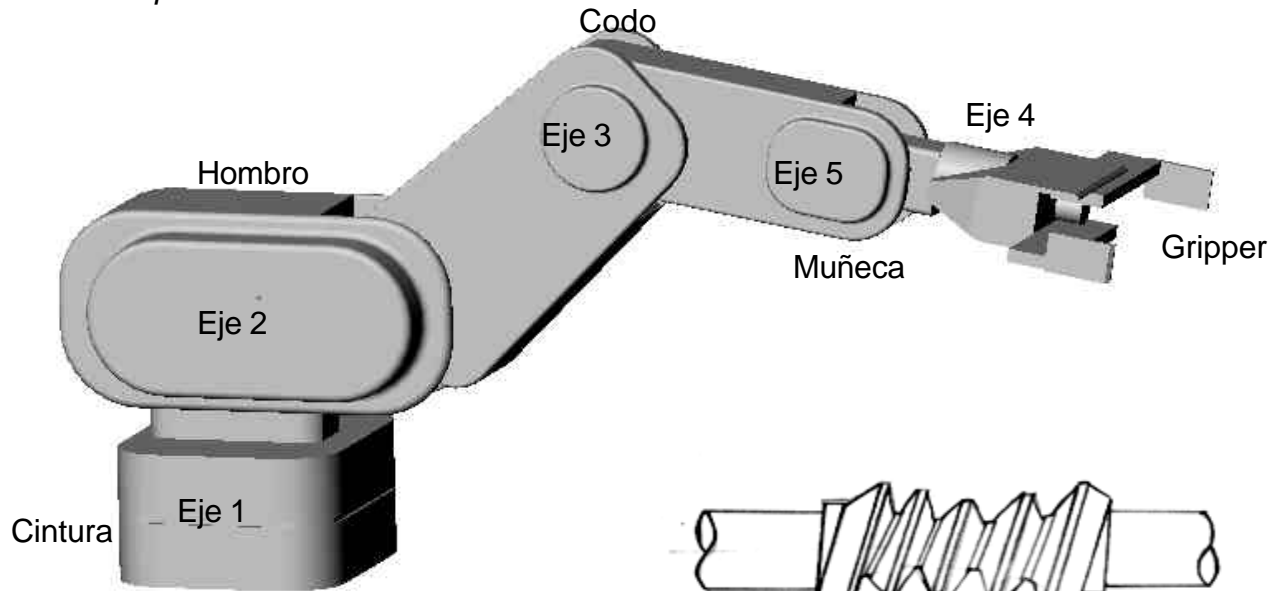
Este es un concepto unificado que consta de los siguientes elementos:

- Motores eléctricos (DC) para todos los ejes.
- Transmisión por sinfín-corona (Eje 1)
- Transmisión por cadenas (Ejes 2, 3 y 5)
- Transmisión por cónicos para la rotación de la muñeca (Eje 4)
- Electroimán como elemento terminal.
- Claróstatos para sensor posición angular de cada eje.
- Aluminio como material principal para el esqueleto del robot.
- Ejes y algunas platinas de sujeción en acero.

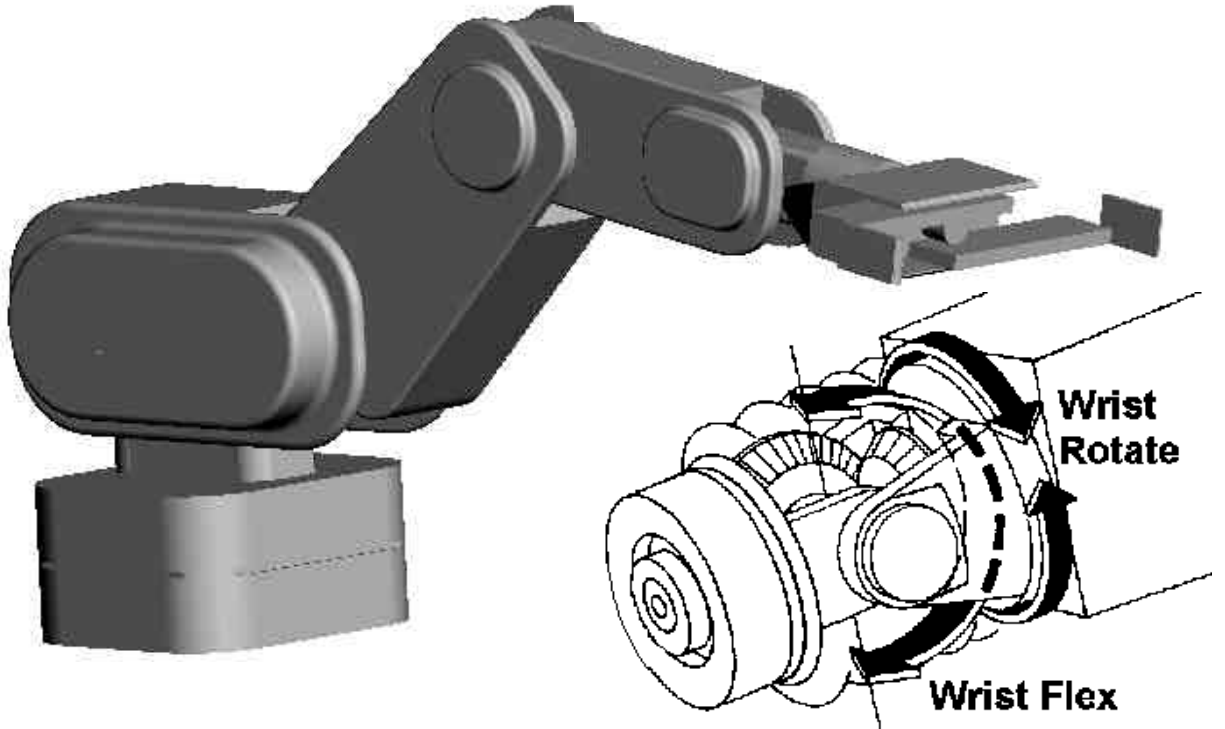
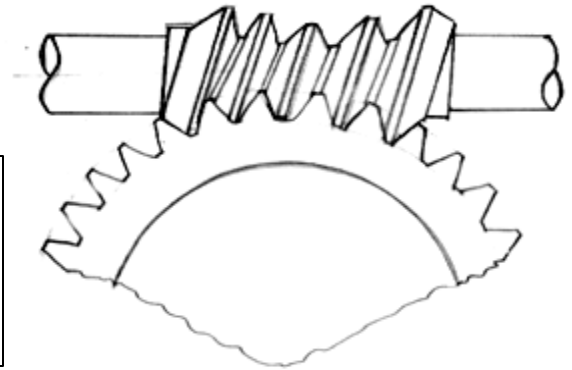
Las especificaciones de diseño mencionadas anteriormente (dimensiones y materiales) se mantuvieron intactas para el desarrollo del robot.

Figura 12. Robot de configuración angular con articulaciones centradas

Concepto desarrollado inicialmente:



Articulaciones centradas.
Transmisión por sinfín corona en el eje 1, cadenas en los ejes 2, 3 y 5, mecanismo por cónicos para el eje 4.

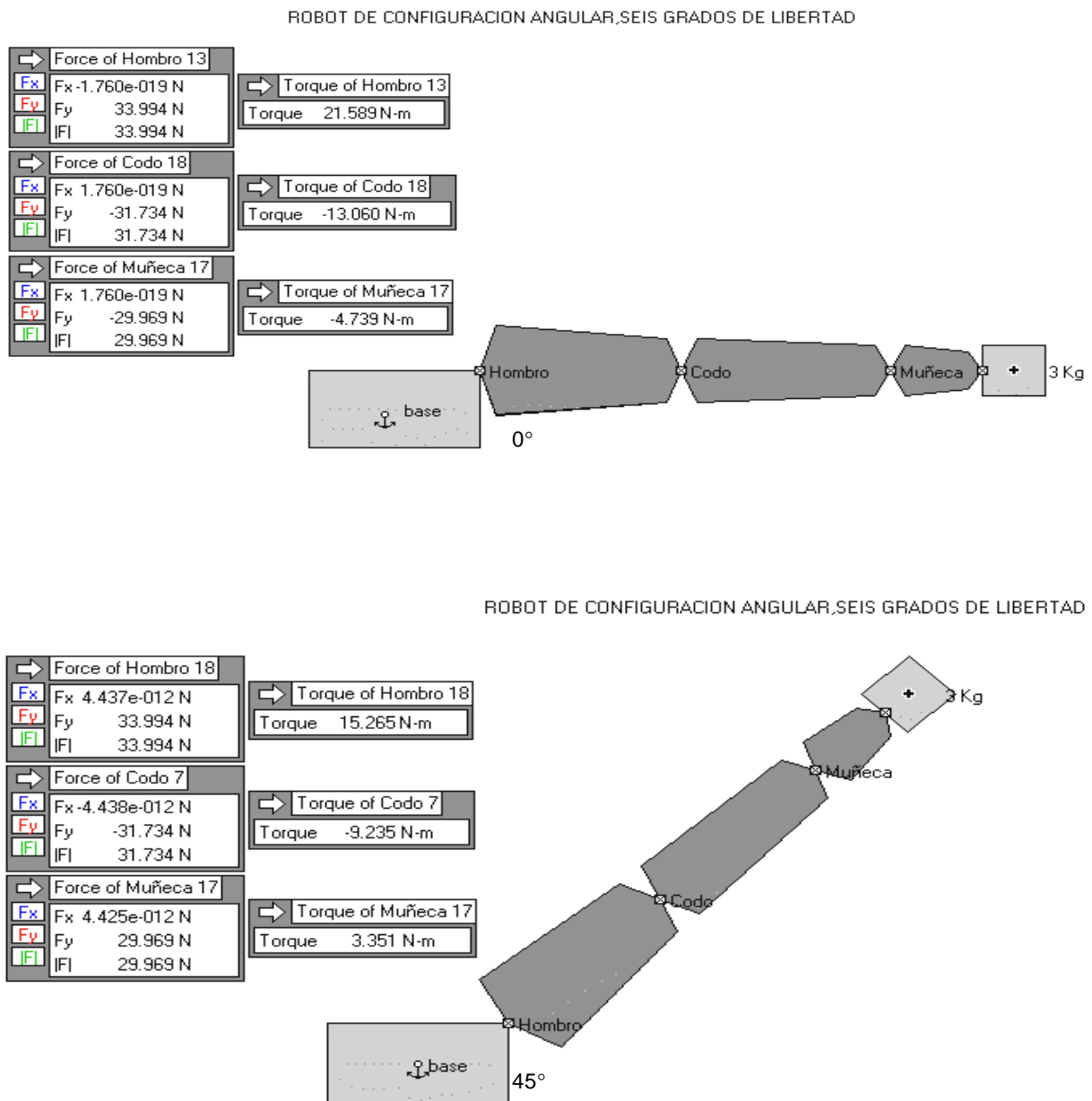


4.3 MEMORIAS DE CÁLCULOS DE INGENIERÍA

4.3.1 Simulación de Torques y Fuerzas

El software utilizado para esta simulación fue Working Model 2D. Los datos suministrados al programa son: La longitud, el peso y la velocidad angular de cada elemento.

Figura 13. Simulación del Robot – Working Model 2D



4.3.2 Cálculos de cargas y velocidades

◆ Análisis de cargas

Según la simulación anterior se observa que el mayor torque está dado en el hombro, para cualquier posición angular del robot.

El punto donde se observa mayor torque sobre las articulaciones es cuando el robot se encuentra totalmente extendido a 0° de la horizontal. El mayor valor de torque observado sobre el hombro es de $21.589\text{N}\cdot\text{m}$; sobre el codo de $13.060\text{N}\cdot\text{m}$ y sobre la muñeca de $4.739\text{N}\cdot\text{m}$.

En cada articulación recae una fuerza vertical paralela a la carga (F_y); según la simulación es prácticamente despreciable la carga horizontal (F_x) sobre los ejes. La máxima fuerza aplicada sobre cada eje es de 33.994N en el hombro, 31.734N en el codo y de 29.969N en la muñeca.

Para un ángulo de 45° sobre la horizontal, se obtiene que las fuerzas sobre los eje son las mismas; mientras los torques disminuyen con respecto a la posición anteriormente descrita.

Esta simulación se realizó aplicando una carga de 3Kg ejercida sobre el elemento terminal.

◆ Análisis de Velocidades

La velocidad tangencial en el elemento terminal debe ser de aproximadamente 1m/s . Basándose en esta velocidad se obtiene los siguiente:

$$\omega=V/r$$

Velocidad angular del hombro (suponiendo que el codo permanece rígido):

$$r=0.64\text{m}$$

$$V=1\text{m/s} \quad \omega=[(1\text{m/s})/(0.64\text{m})]*[60\text{s}/1\text{min}]*[1\text{Rev}/(2\pi\text{rad})]$$

$$\mathbf{w_h=14.89RPM \gg 15RPM}$$

Velocidad angular del codo (suponiendo que el hombro está rígido):

$$r=0.37\text{m}$$

$$V=1\text{m/s}$$

$$\omega=[(1\text{m/s})/(0.37\text{m})]*[60\text{s}/1\text{min}]*[1\text{Rev}/(2\pi\text{rad})]$$

$$\mathbf{w_c=25.8RPM \gg 26RPM}$$

Velocidad angular de la muñeca (inclinación):

$$r=0.1\text{m}$$

$$V=1\text{m/s}$$

$$\omega=[(1\text{m/s})/(0.1\text{m})]*[60\text{s}/1\text{min}]*[1\text{Rev}/(2\pi\text{rad})]$$

$$\mathbf{w_{mi}=95.49RPM \gg 95.5RPM}$$

De los análisis anteriores, y cumpliendo con el requerimiento de buscar todas las partes necesarias en el comercio; se define el uso de 4 motoreductores **COLMAN IDQA 6039-730** (Figura 14) de 24 VDC, estos motores serán los encargados de mover los ejes 1, 2, 3, 5 (cintura, hombro, codo e inclinación de muñeca).

La hoja técnica de los motores sacada de un análisis experimental es la siguiente:

Figura 14. Motor Colman IDQA 6039-730



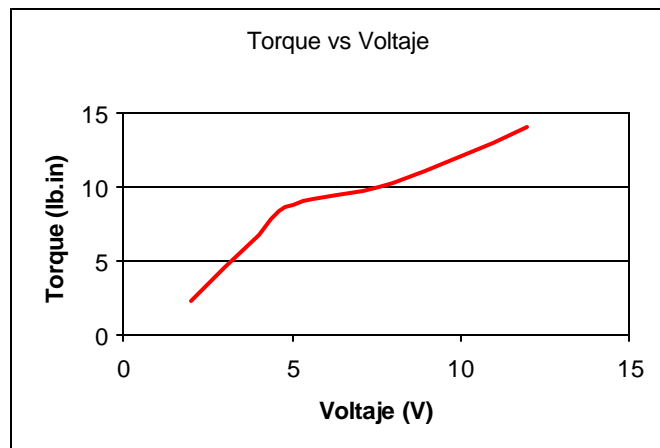
4.3.3 Pruebas

◆ Datos Experimentales Para El Torque Del Motor Colman IDQA 6039-730

Figura 15. Torque vs Voltaje

Cuadro 9. Datos experimentales

Voltaje	Torque(lb.in)
2	2.3369
3	4.6738
4	6.777
5	8.7634
8	10.2823
12	14.0214



◆ **Análisis de los datos experimentales**

Debido a que no se cuenta con suficiente información para realizar el respectivo cálculo a los motores, se efectuó un análisis experimental del cual se obtuvieron los datos anteriormente mostrados.

La capacidad de carga del robot luego de las modificaciones realizadas se determinó en 300g los cuales producen un torque de 12lb*in en el hombro (punto crítico).

Según lo experimentado a un voltaje nominal de 12 V (voltaje promedio suministrado por la etapa de potencia) se concluye que los motores están en capacidad de mover la carga máxima que será aplicada al robot.

Los sensores utilizados para medir la posición angular de cada eje son 5 potenciómetros lineales de $\pm 10\%$ de tolerancia en sus cambios resistivos.

4.3.4 Cálculos para el diseño del Eje-Base Robot NEA144

Diseño de columnas con cargas excéntricas

$\frac{L}{r}$ → Relación de esbeltez, es una medida de la flexibilidad de la columna. Sirve para clasificarlas como largas, intermedias o cortas.

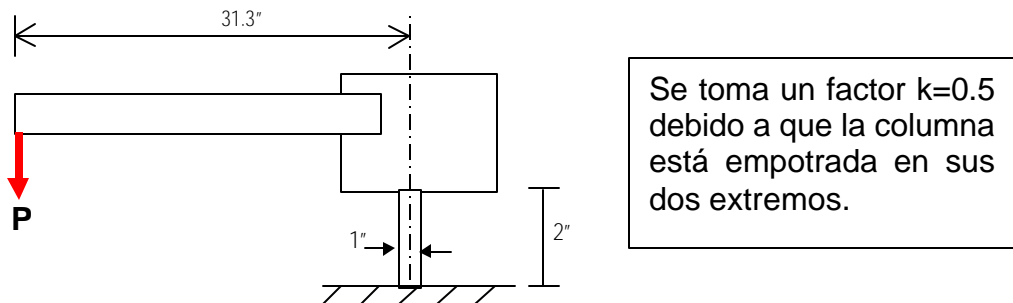
L= Longitud de la Columna

r= Radio de giro mínimo de la columna, determinado por

$$r = \sqrt{\frac{I}{A}}$$

donde I es el menor momento de inercia de la sección transversal de la columna y A es el área de la sección transversal de ésta.

Figura 16. Representación del Robot como una columna excéntrica



Relación de esbeltez máxima para la columna (kL/r)

$$r = \sqrt{\frac{\frac{p \cdot D^4}{64}}{\frac{p \cdot D^2}{4}}} \rightarrow r = 0.25 \text{ pulg}$$

I=4.9087X10⁻² pulg⁴
A=0.7854 pulg²

$$\frac{kL}{r} = \frac{0.5(2'')}{0.25''} = 4 \quad \text{Por inspección} \rightarrow \sigma_{perm} = 28 \text{ ksi para} \quad 0 \leq \frac{kL}{r} \leq 12$$

Para una Columna hecha de Acero 1020 laminada en caliente, se determina el valor máximo permisible de P, considerando que el esfuerzo permisible de flexión es $(\sigma_b)_{perm}=28\text{ksi}$.

$E=30\text{ kpsi}$ → Límite elástico a la tensión
 $\sigma_y=55\text{ksi}$ → Resistencia máxima a la tensión

$$\text{como } \left(\frac{kL}{r}\right)_c = \sqrt{\frac{2 \cdot P^2 \cdot E}{S_y}} = \sqrt{\frac{2 \cdot P^2 (30\text{ksi})}{55\text{ksi}}} = 3.28$$

$$\text{entonces } \left(\frac{kL}{r}\right)_c \leq \frac{kL}{r} \leq 200$$

Las columnas de acero estructural se diseñan con base en fórmulas por el Structural Stability Research Council (SSRC). A estas fórmulas se le aplican factores de seguridad y han sido adoptadas como especificaciones en la industria de la construcción por el American Institute of Steel Construction (AISC). La aplicación de esta fórmula requiere que se aplique un factor de seguridad F.S.=23/12 por tanto, para diseño, se debe usar la ecuación siguiente¹:

$$(S_a)_{perm} = S_{perm} = \frac{12P^2 E}{23(kL/r)^2} = \frac{12P^2 (30\text{ksi})}{23(4)^2} = 9.655\text{ksi}$$

Aplicando la ecuación de interacción $\frac{S_a}{(S_a)_{perm}} + \frac{S_b}{(S_b)_{perm}} \leq 1$ donde

$\sigma_a=P/A$ y $\sigma_b=Mc/I$ se obtiene:

$$\frac{P}{9.655\text{ksi}} + \frac{P(31.3\text{ pu lg})(0.5\text{ pu lg})}{4.9087 \times 10^{-2} \text{ pu lg}^4} = 1$$

$$\frac{P}{7.583\text{klb}} + \frac{p(15.65\text{ pu lg}^2)}{1.374\text{ pu lg}^2 \cdot \text{klb}} = 1 \Rightarrow P \left(\frac{1}{7.583\text{klb}} + \frac{15.65}{1.374\text{klb}} \right) = 1$$

$$P(11.518)=1$$

¹ Fuente. R.C, Hibbeler. Mecánica de materiales Tercera Edición, 1997. P. 703

$$P=8.6817 \times 10^{-2} \text{ klb} \rightarrow P=0.086817 \text{ kip}$$

$$P=86.817 \text{ Lb} \rightarrow$$

Magnitud de la carga P que puede soportar la columna.

Conclusión: El eje no va a tener ningún problema para un diámetro de 1" y una longitud L de 2". Además la carga máxima que soporta el brazo (extendido) excéntricamente no excede las 9 Lb por lo tanto no presenta ningún peligro.

4.3.5 Cálculo para el Pin de Sujeción de las platinas Brazo y Antebrazo

$$T = (1.5 \text{ lb})(25.1968 \text{ pu lg}) = 37.795 \text{ lb.pu lg}$$

$$P = \frac{37.795 \text{ lb.pu lg}}{0.5 \text{ pu lg}} = 75.59 \text{ lb}$$

$$\frac{P}{2A} \leq t_{adm}$$

$$A \geq \frac{P}{2t_{adm}}$$

$$A \geq \frac{75.59 \text{ lb}}{2 \times 9000 \text{ lb/pulg}^2}$$

$$A \geq 4.19947 \times 10^{-3} \text{ pu lg}^2$$

$$\frac{\pi d^2}{4} \geq 4.19947 \times 10^{-3} \text{ pu lg}^2$$

$$d \geq 7.3122 \times 10^{-2} \text{ pu lg} \approx 1.857 \text{ mm}$$

$$d \approx 2 \text{ mm} \quad (\text{Diámetro comercial})$$

ACERO ASTM A-36

$$t_y = \frac{s_y}{2} = \frac{36000 \text{ lb/pulg}^2}{2} = 18000 \text{ lb/pulg}^2$$

$$t_{adm} = \frac{t_y}{FS} = \frac{18000 \text{ lb/pulg}^2}{2} = 9000 \text{ lb/pulg}^2$$

del cálculo anterior se concluye que un Pin con un diámetro de 2 mm es suficiente para soportar la carga necesaria².

² Fuente. Robert L. Norton, Diseño de máquinas. 1999. P. 998

4.4 SELECCIÓN Y DIMENSIONAMIENTO DE COMPONENTES

La selección de los componentes mecánicos y electrónicos de precisión se hizo por catálogos internacionales debido a la escasez local de algunos de éstos elementos. Las dimensiones fueron tomadas teniendo en cuenta el espacio ocupado por cada uno de los componentes de tal forma que no interfirieran con los elementos de transmisión y tratando de distribuir el espacio lo mejor posible.

Una vez obtenidos los cálculos de las cargas máximas permisibles en los ejes se seleccionaron los rodamientos, motores y demás elementos sometidos a dichas cargas.

4.4.1 Criterios de ingeniería utilizados para la selección y dimensionamiento de elementos

Básicamente se tuvo muy en cuenta el peso y carga máxima soportada por el robot. Por esta razón se optó porque el esqueleto fuera de un material liviano (Aluminio) pero a la vez resistente. Los elementos sometidos a altas cargas como los ejes y platinas de sujeción se diseñaron en Acero 1020. Además se tuvo presente el costo y su fácil adquisición en el mercado.

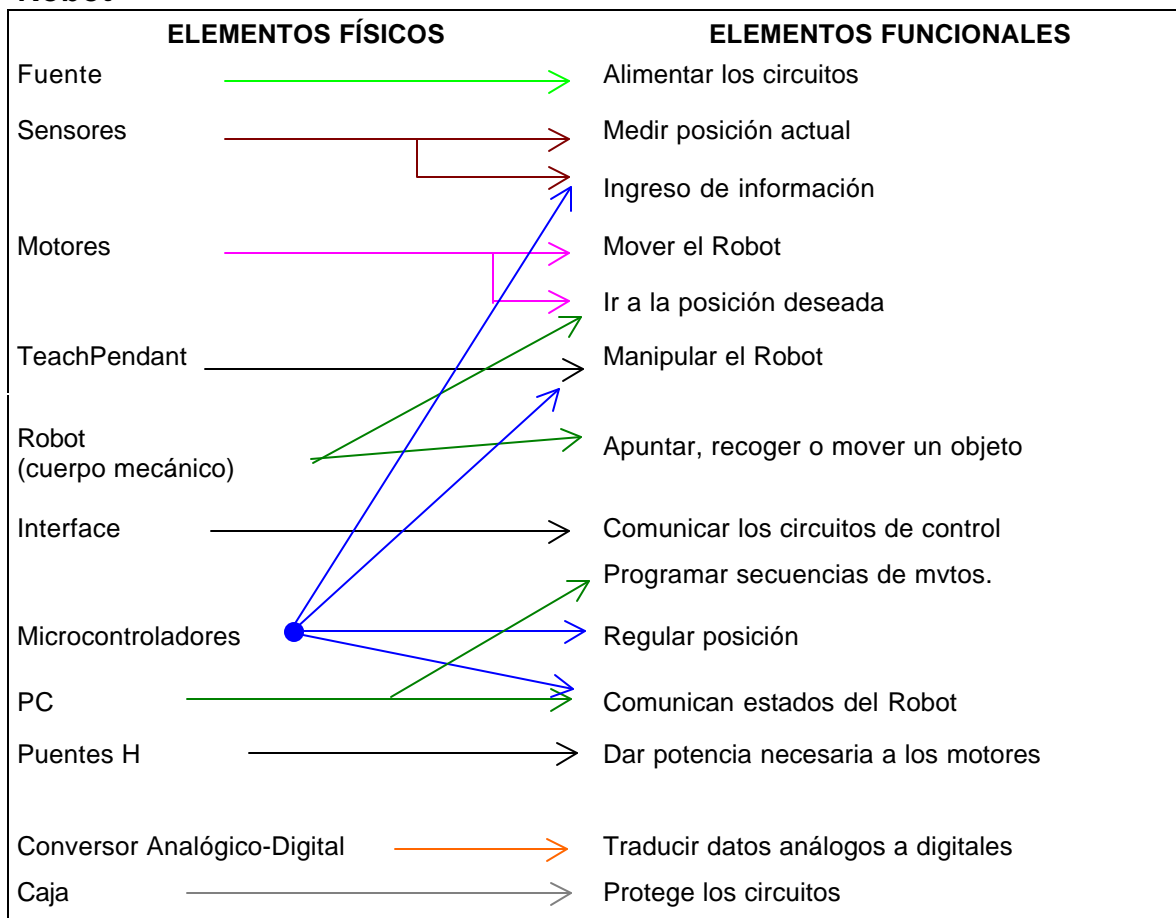
5. DISEÑO A NIVEL DE SISTEMAS

5.1 ARQUITECTURA DE PRODUCTOS

La arquitectura de un producto se refiere al arreglo de elementos funcionales en conjuntos físicos (chunks) que constituirán los ladrillos del producto.

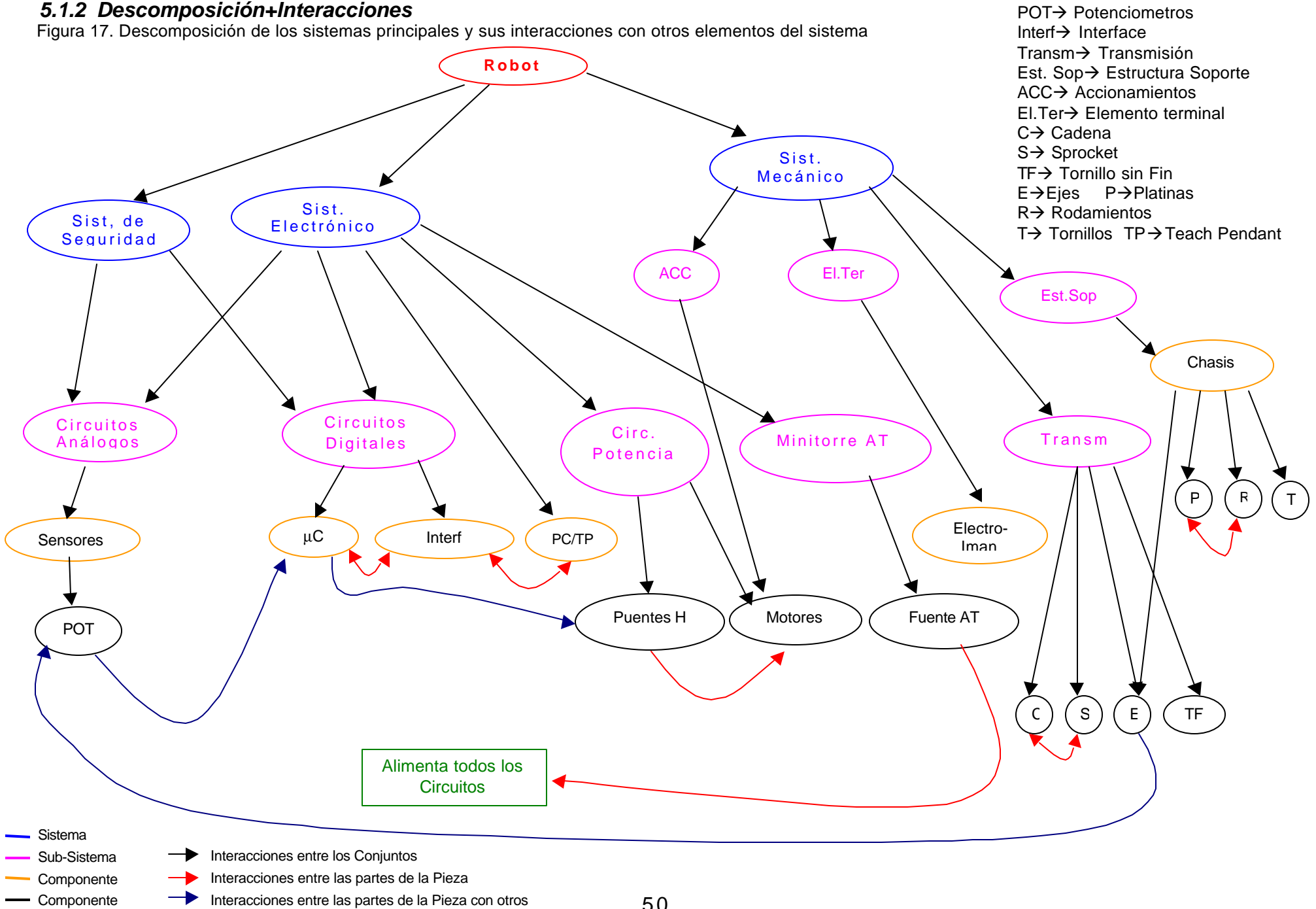
5.1.1 Arquitectura del sistema

Cuadro 10. Relaciones entre los distintos elementos que componen el Robot



5.1.2 Descomposición+Interacciones

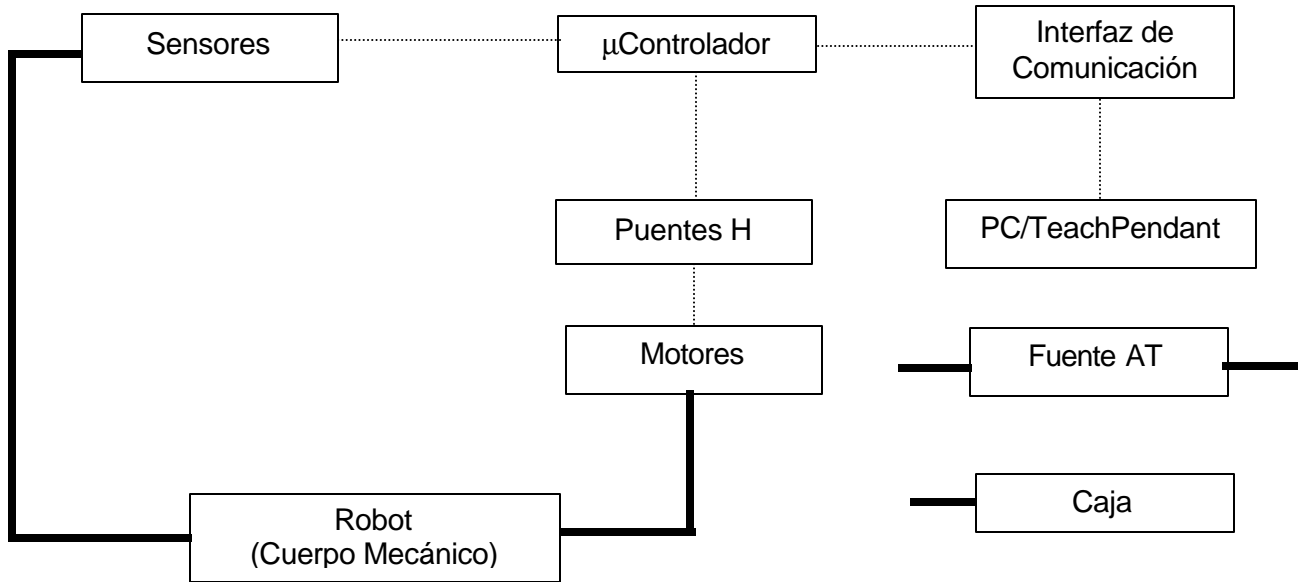
Figura 17. Descomposición de los sistemas principales y sus interacciones con otros elementos del sistema



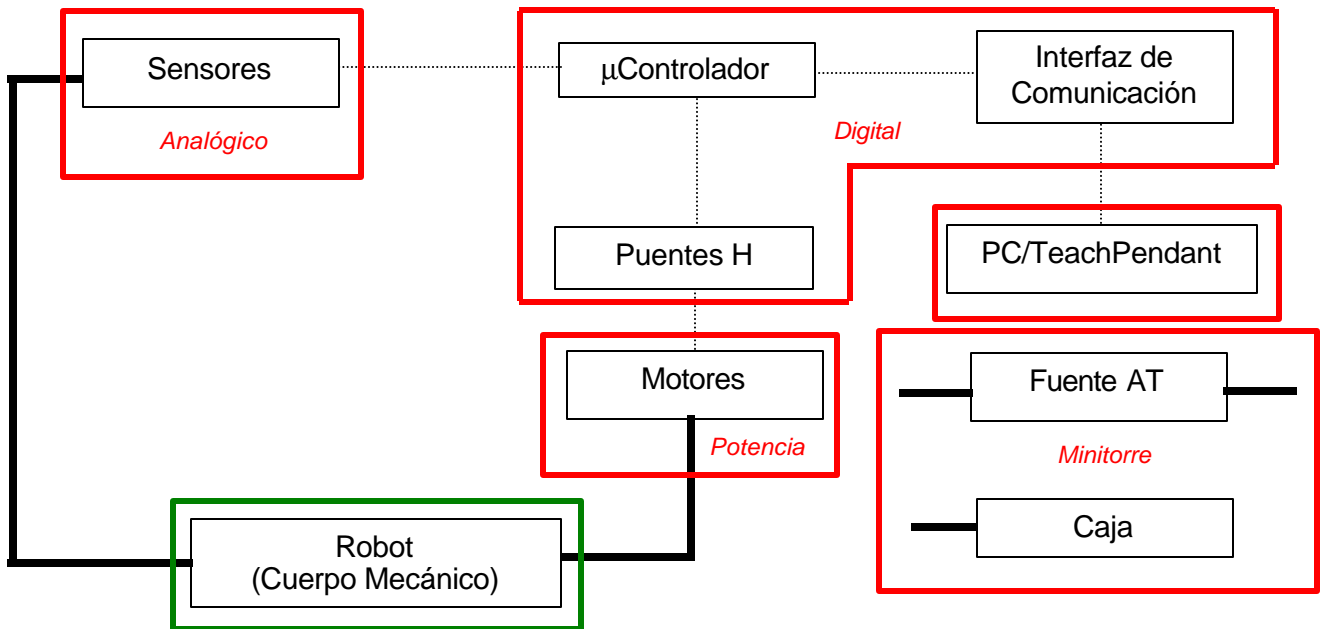
5.1.3 Estableciendo la Arquitectura

Figura 18. Sistema Electrónico del Robot

A. Esquema del Sistema Electrónico del Robot



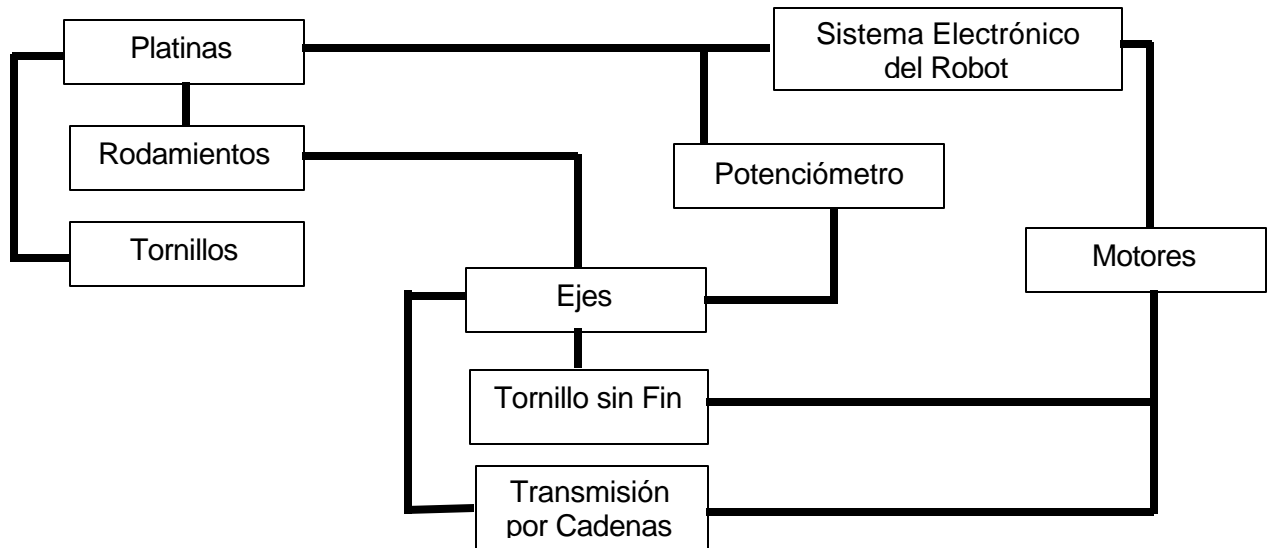
Conjuntos de Elementos



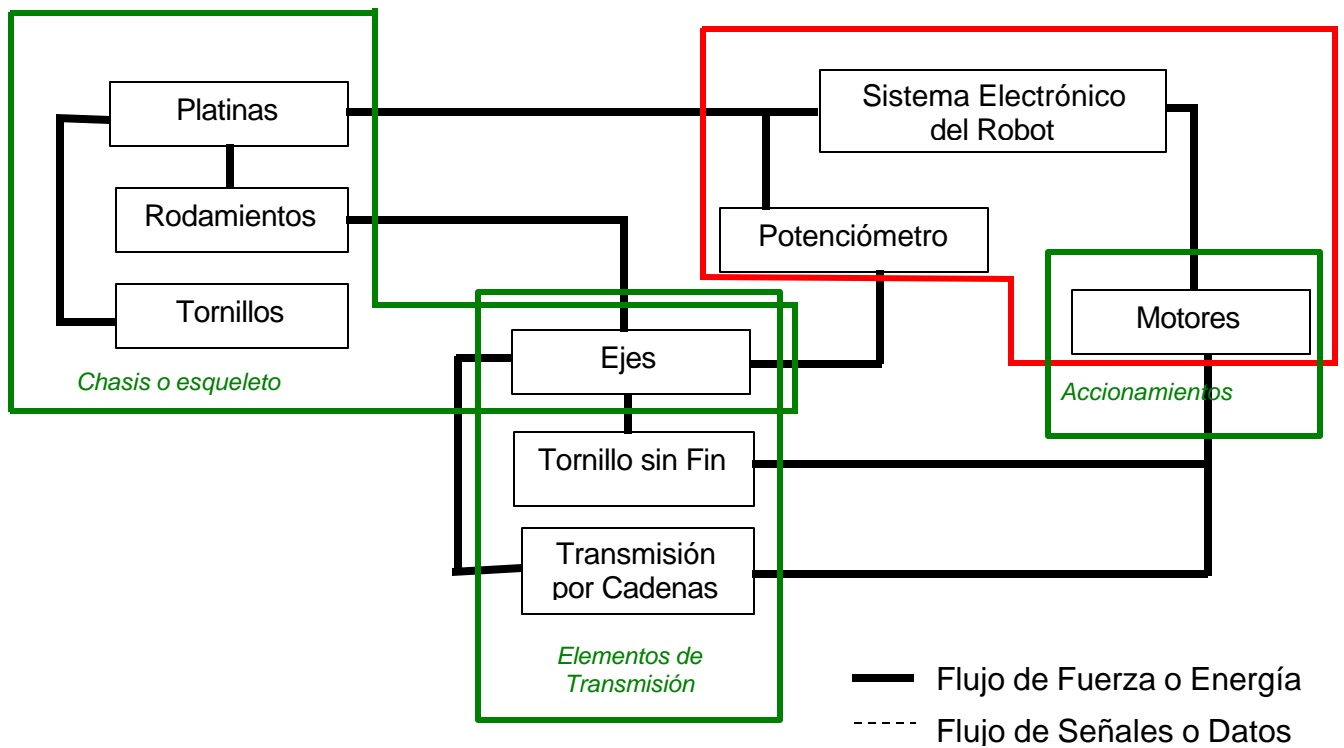
— Flujo de Fuerza o Energía
 - - - Flujo de Señales o Datos

Figura 19. Sistema Mecánico del Robot

B. Esquema del Sistema Mecánico del Robot

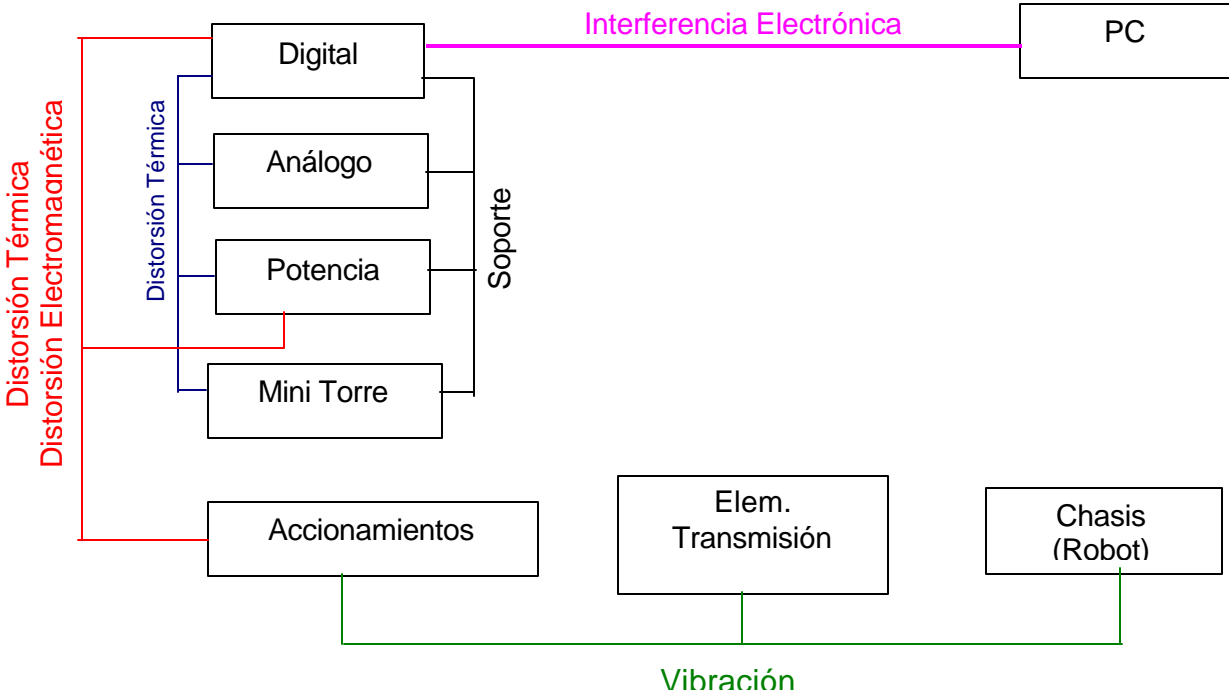


Conjuntos de Elementos



5.1.4 Interacciones Incidentales

Figura 20. Interacciones incidentales entre elementos



5.1.5 Análisis de interacciones

Para el esquema del sistema electrónico (Figura 18.) puede observarse que existe un flujo de fuerza entre el cuerpo mecánico y los sensores, puesto que estos reaccionan al movimiento o acción que realice la parte mecánica; por ejemplo, los potenciómetros reaccionan al cambio de ángulo que se genere en los ejes principales del robot. Los motores pertenecen al grupo de potencia del sistema electrónico y además forman parte del grupo accionamientos para el sistema mecánico; estos cumplen con la función de transmitir movimiento al sistema según las señales de control que generan los microcontroladores.

Cada "chunk" del sistema electrónico interactúa entre si por medio de transmisión de datos o flujo de información a excepción de las interacciones con la fuente y la parte mecánica con las cuales comparten fuerza o energía.

El subsistema digital es el encargado principal de controlar los movimientos del robot, además es quien se comunica directamente con el usuario vía USB a través del PC; el subsistema analógico cumple la función de leer la posición del robot y entregárselos a la parte digital para su procesamiento; el grupo potencia es la “salida” directa a los motores (drivers), el subsistema digital entrega a la parte de potencia la acción de control deseada y ésta se encarga de amplificarla.

Para el sistema mecánico (Figura 19) es importante mencionar que las interacciones son únicamente de flujo de fuerza o movimiento.

De las interacciones incidentales (Figura 20) es importante recalcar las posibles distorsiones térmicas que pueden causar los drivers y los motores al sistema digital, pudiendo afectar su buen funcionamiento; una estrategia a utilizar para evitar este tipo de efectos es usar disipadores para cada puente-H, adicionalmente la placa de potencia donde se ubicarán estos elementos estará dispuesta espacialmente de tal forma que no logre afectar al sistema digital. Se espera que los motores por su distancia con el sistema de control no logren afectar la parte digital que es realmente la que se desea proteger de la distorsión térmica (el circuito de potencia debe absorber estos efectos).

Los efectos de vibración causada por los motores y los elementos de transmisión sólo deben pertenecer a la parte mecánica, y se espera que la estructura y el uso de rodamientos absorban este tipo de efectos para evitar posibles daños y desajustes de las diferentes partes mecánicas e incluso eléctricas como motores y sensores dentro del robot. Para esto también se espera que las acciones de control sean lo suficientemente suaves como para que no se produzcan fuertes aceleraciones y movimientos no deseados.

◆ Decisiones

Con base en los conjuntos realizados anteriormente se define que en el producto predomina la arquitectura modular (aunque dentro de cada módulo o “Chunks” existe una arquitectura integral).

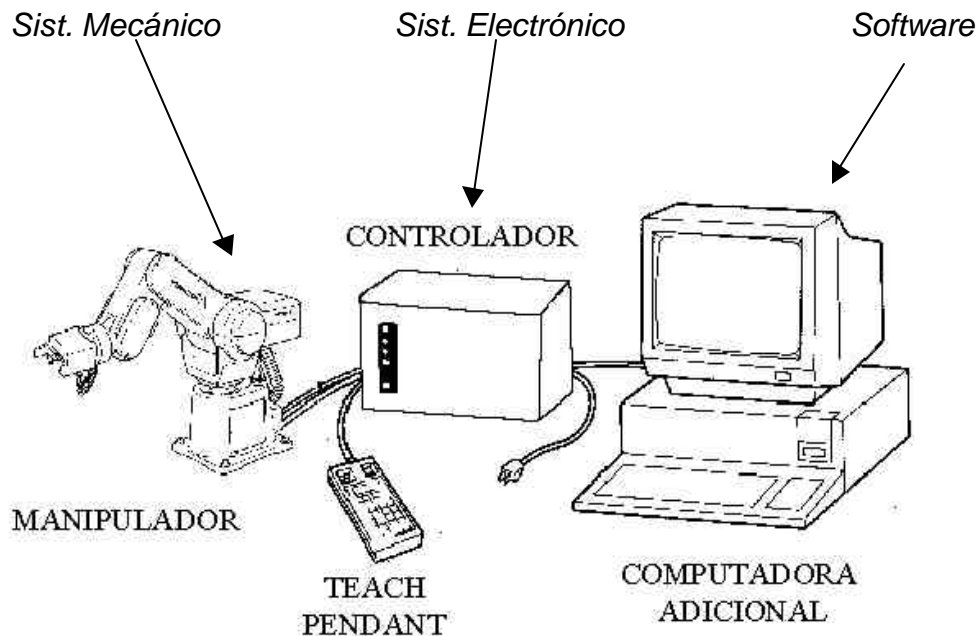
Por la forma en que los “Chunks” se relacionan se observa una modularidad tipo bus; en la que los módulos Analógico, Potencia y PC se conectan al módulo Digital como si este fuese una “Mother Board”.

De los conjuntos mencionados, el PC y la Minitorre con la fuente AT son de contratación externa, es decir, el grupo de desarrollo no se encargará de diseñarlos (serán adquiridos comercialmente).

6. DISEÑO DETALLADO

6.1 DISTRIBUCIÓN GEOMÉTRICA DEL PROYECTO

Figura 21. Distribución Geométrica de cada Sistema



6.1.1 Sistema Mecánico:

Consta del chasis, elementos de transmisión y accionamientos principalmente. La distribución geométrica puede observarse en los Planos Mecánicos del Robot.

6.1.2 Sistema Electrónico:

Está compuesto por los circuitos analógicos, digitales y de potencia. Se distribuyen en la plaqueta de tal modo que no se generen interferencias parásitas entre los elementos.

6.1.3 Software NEA144:

Interfaz amigable con el usuario. La programación del robot NEA144 está basada en el set de instrucciones del robot manipulador Mitsubishi RV-M1. Esto con el fin de que sea un lenguaje de programación comercial y de fácil entendimiento.

◆ Programación del Robot

Para programar el robot se utilizan diferentes comandos que se clasifican de la siguiente forma:

- Instrucciones de control de posición y movimiento.
- Comandos para estructurar los programas.
- Instrucciones de control de la mano (Elemento terminal).

Las instrucciones marcadas con asterisco (*) se ejecutan inmediatamente después de ser enviadas y no pueden ser incluidas en un programa en el que el número de línea que precede cada comando indique la secuencia que desarrollará el robot.

Control de posición y movimiento

DP: A partir de la posición actual, el robot se mueve a la anterior posición definida.

DW < distancia en x >, < distancia en y >, < distancia en z >:

Conservando la orientación, el robot desplaza el efector desde el punto en el que se encuentra, hasta un nuevo punto a una distancia determinada por los parámetros anteriores, en los ejes X, Y y Z.

HE < número de la posición>:

Guarda la posición actual asignándole el número suministrado como parámetro. Debe cumplirse que: $0 < \text{número de la posición} < 255$.

IP: Lleva el robot a la siguiente posición definida.

MC < posición 1 >, < posición 2 >, < O o C >:

El robot se mueve en forma continua entre la posición 1 y posición 2, pasando a través de las posiciones intermedias que hayan sido declaradas.

MJ < cintura >, < hombro >, < codo >, < pitch >, < roll >:

Mueve el robot por articulaciones. Cada parámetro se suministra en grados según los límites presentados en la Figura 3.

MO < posición >,< O o C >:

Movimiento a la posición seleccionada con el gripper abierto o cerrado (O o C).

MP <coord. X>,<coord. Y>,<coord. Z>,<ángulo Cabeceo>,<ángulo Balanceo>:Mueve el efector final del robot al punto dado por las coordenadas X, Y y Z, con orientación definida por los ángulos Cabeceo y Balanceo.

MT < posición >,< distancia >,< O o C >:

Movimiento en dirección de la herramienta a partir de la posición dada, a lo largo de la distancia definida.

NT: Lleva el robot a su origen mecánico.

OG: Lleva el robot al origen de movimiento por articulación. $J_1 = J_2 = J_3 = J_4 = J_5 = 0$ grados.

PD* <posición>, <coord.X>, <coord.Y>, <coord.Z>, <Cabeceo>, <Balanceo>: Crea una posición en las coordenadas dadas y con la orientación definida por los ángulos Cabeceo y Balanceo.

PL < posición 1 >,< posición 2 >:

Asigna las coordenadas y ángulos correspondientes a la posición 2 en la posición 1, borrando su contenido en caso de que esta se encontrara definida previamente.

PX < posición 1 >,< posición 2 >:

Asigna la posición 1 a la posición 2 y viceversa.

TI < contador de 0 a 600 >:

Espera un periodo de tiempo en segundos equivalente al valor del contador dividido entre 10.

TL* < longitud >:

Permite variar la longitud de la herramienta o efector final utilizados por el robot, para que los cálculos de posición sean realizados en función de esta nueva dimensión.

Control de programa

NX: Indica el final de un ciclo.

RC < número de repeticiones >:

Indica el número de veces que debe repetirse el fragmento de programa consecutivo, cuyo final es la instrucción NX. El parámetro número de repeticiones puede tomar un valor comprendido entre 1 y 200.

ED: Finaliza el programa.

Control de la mano

GC: Cerrar la mano.

GO: Abrir la mano.

Programa Ejemplo:

Este programa debe digitarse en la ventana de comandos del software NEA 144. La extensión del archivo generado es “*.nea”

Cuadro 11. Programa para el robot NEA 144

```
;Se declaran 4 posiciones definidas

PD 1, 750, 0, 190, 18,34
;Guarda en la posición 1 las coordenadas X,Y,Z,Cabeceo,Balanceo
PD 2, 680, -247.4, 120.4,8.2,21
;Guarda en la posición 2 las coordenadas X,Y,Z,Cabeceo,Balanceo
PD 3, 624, -250.9, 361.5, 13.5,21
;Guarda en la posición 3 las coordenadas X,Y,Z,Cabeceo,Balanceo
PD 4, 209.1,-492.6, -19.5,-23,0
;Guarda en la posición 4 las coordenadas X,Y,Z,Cabeceo,Balanceo

;Inicio de programa

10 MC 1,4,O ;Mueve el robot de la posición 1 a la 4 pasando por la posición 2 y 3
20 DP ;Mueve el robot a la posición 3
30 DW 757,-14,202 ;El efector se desplaza a la posición x,y,z conseravando la orientación
40 MO 3, O ;Mueve el robot a la posición 3 con la pinza abierta
50 IP ;Lleva el robot a la posición 4
60 GC ;Cierra la pinza
70 RC 2 ;Inicia un ciclo y lo repite 2 veces
80 MJ -80,37.5,-95.8,26.5,-33
;Mueve las articulaciones del robot Cintura,Hombro,Codo,Pitch,Roll
85 TI 50 ;Introduce un retardo de 5 segundos
90 MP 464.7,-355.3,35.6,0,16
;Mueve el efector final a las coordenadas x,y,z,Cabeceo,Balanceo
95 GO ;Abre la pinza
100 NX ;Fin del ciclo
115 MO 3,C ;Mueve el robot a la posición 3 con la pinza cerrada
120 MT 3,100,O ;Mueve el robot en la dirección de la herramienta a partir
;de la posición 3 una distancia de 100 mm
130 MO 1,C ;Mueve el robot a la posición 1 con la pinza cerrada
300 ED ;Finaliza el programa
```

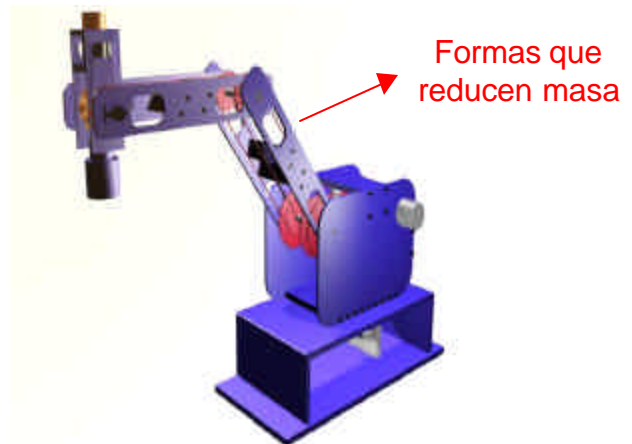
6.2 PROTOTIPADO

6.2.1 Prototipo Físico: sistema mecánico

Un modelo visual y tangible es muy importante y efectivo para evaluar la forma de un producto, por éste motivo se realizó una maqueta de bajo costo y de rápida implementación, utilizando materiales como el balsa, cartón y ejes de madera.

La maqueta representa un modelo de 3 dimensiones usado principalmente para tener un boceto del concepto. Además permite visualizar las ideas preliminares que se tienen sobre el proyecto y comunicar claramente los conceptos. Este boceto inicial no es un modelo operacional que imite el producto real, el modelo fue usado para dar una evaluación visual y para analizar características tangibles como forma o aspecto. Tal es el caso de las platinas que fueron rediseñadas después de analizar la maqueta pues se detalló que el armazón del robot podría ser muy pesado y era necesario reducir material en las platinas laterales (Figura 22).

Figura 22. Observaciones de cambio (prototipo físico y virtual)

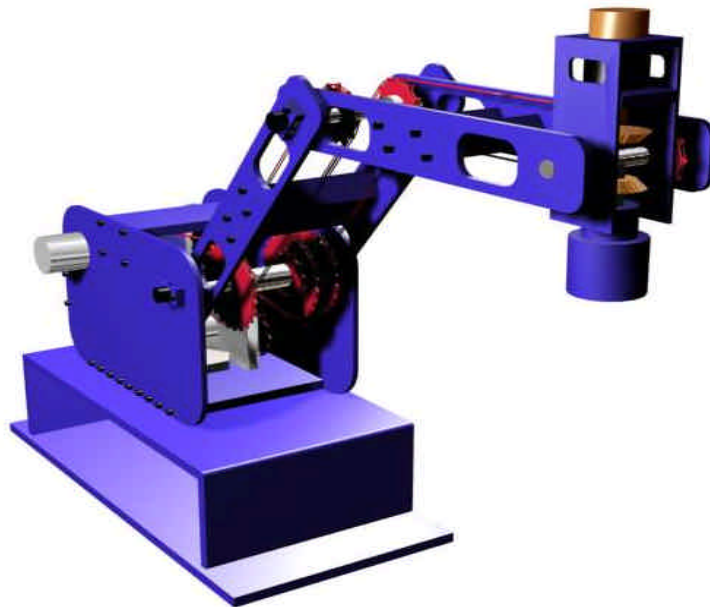


6.2.2 Prototipo Analítico: Sistema Mecánico

Usando el software de modelamiento 3D-MAX, se realizó un modelo computacional en 3D con el cual se pudo detallar claramente la ubicación de los elementos dentro del robot para posteriormente reubicarlos en posiciones óptimas (Figura 23).

Estas observaciones contribuyeron a realizar cambios de carácter estético y funcional al proyecto. Tal es el caso del motor situado en el hombro al cual se le invirtió su posición pues de esta manera se evitaba perforar la lamina exterior y permitía una mejor ubicación del accionamiento.

Figura 23. Prototipo virtual modelado en 3D-MAX

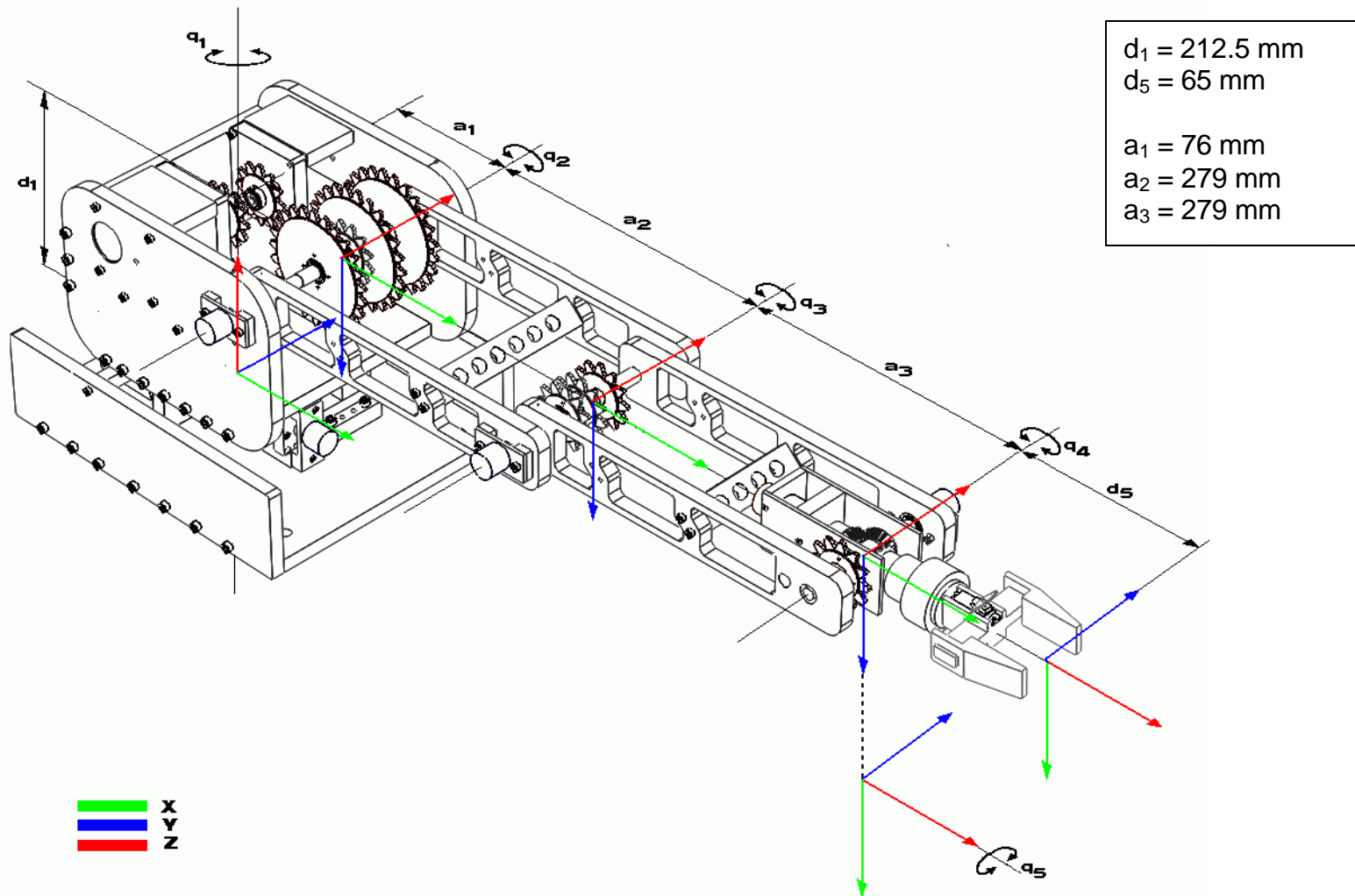


El desarrollo de los planos del robot se realizó utilizando herramientas CAD como el Autocad 14 y SolidEdge (Planos Mecánicos del Robot).

6.2.3 Prototipo Analítico: Modelos matemáticos

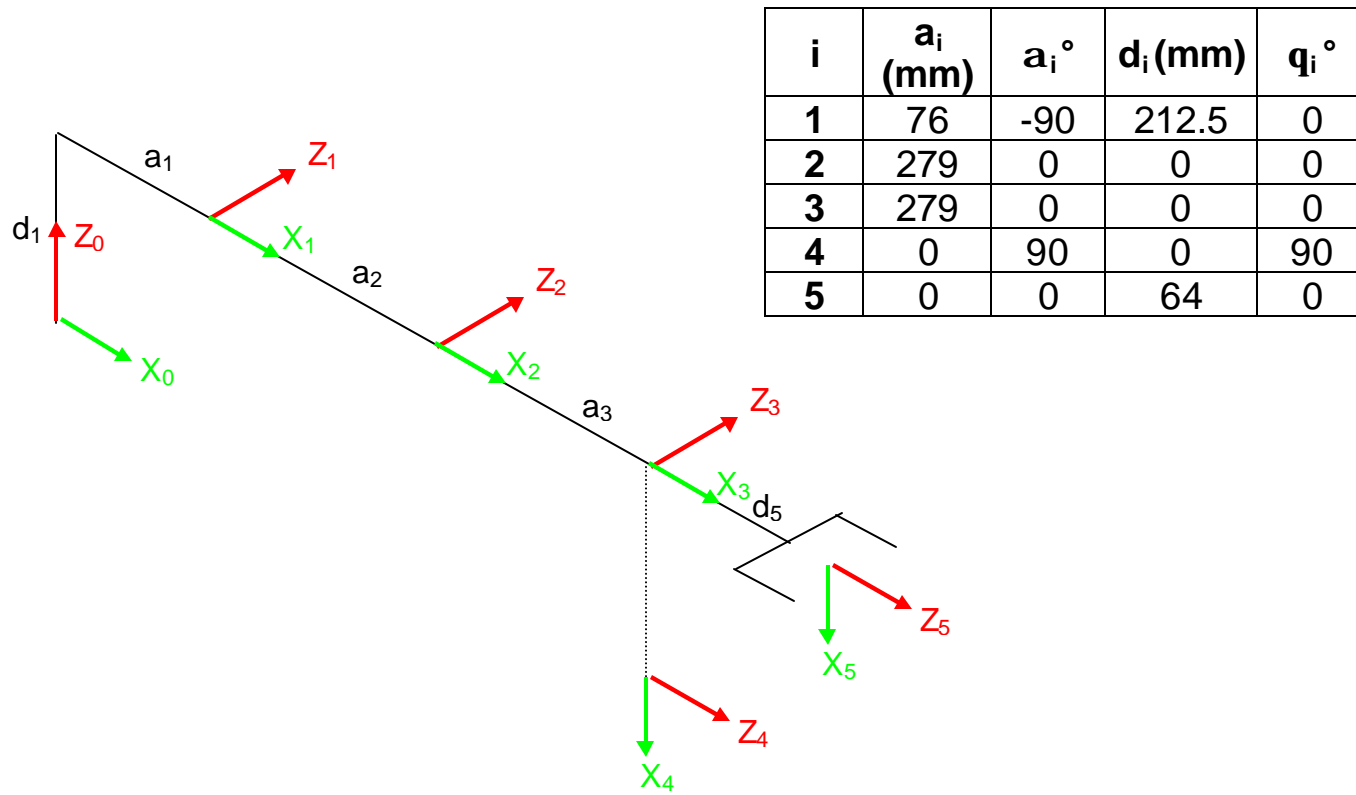
♦ Modelo cinemático directo para el robot NEA 144

Figura 24. Dimensiones y ejes del Robot



PARÁMETROS DE DENAVIT - HARTENBERG

Figura 25. Parámetros de Denavit - Hartenberg



CALCULO PARA LA TRANSFORMADA COMPLETA

$$T_1 = \begin{bmatrix} \cos \mathbf{q}_1 & 0 & -\text{sen } \mathbf{q}_1 & 76 * \cos \mathbf{q}_1 \\ \text{sen } \mathbf{q}_1 & 0 & \cos \mathbf{q}_1 & 76 * \text{sen } \mathbf{q}_1 \\ 0 & 1 & 0 & 212.5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_2 = \begin{bmatrix} \cos \mathbf{q}_2 & -\text{sen } \mathbf{q}_2 & 0 & 279 * \cos \mathbf{q}_2 \\ \text{sen } \mathbf{q}_2 & \cos \mathbf{q}_2 & 0 & 279 * \text{sen } \mathbf{q}_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_3 = \begin{bmatrix} \cos \mathbf{q}_3 & -\text{sen } \mathbf{q}_3 & 0 & 279 * \cos \mathbf{q}_3 \\ \text{sen } \mathbf{q}_3 & \cos \mathbf{q}_3 & 0 & 279 * \text{sen } \mathbf{q}_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_4 = \begin{bmatrix} \cos \mathbf{q}_4 & 0 & \text{sen } \mathbf{q}_4 & 0 \\ \text{sen } \mathbf{q}_4 & 0 & -\cos \mathbf{q}_4 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_5 = \begin{bmatrix} \cos \mathbf{q}_5 & -\text{sen } \mathbf{q}_5 & 0 & 0 \\ \text{sen } \mathbf{q}_5 & \cos \mathbf{q}_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T = T_1 * T_2 * T_3 * T_4 * T_5$$

$$T = \begin{bmatrix} n_x & s_x & a_x & p_x \\ n_y & s_y & a_y & p_y \\ n_z & s_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{n}_x = ((\cos(\theta_1)*\cos(\theta_2)*\cos(\theta_3)-\cos(\theta_1)*\sin(\theta_2)*\sin(\theta_3))*\cos(\theta_4)+(-\cos(\theta_1)*\cos(\theta_2)*\sin(\theta_3) - \cos(\theta_1)*\sin(\theta_2)*\cos(\theta_3))*\sin(\theta_4))*\cos(\theta_5)-\sin(\theta_1)*\sin(\theta_5)$$

$$\mathbf{n}_y = ((\sin(\theta_1)*\cos(\theta_2)*\cos(\theta_3)-\sin(\theta_1)*\sin(\theta_2)*\sin(\theta_3))*\cos(\theta_4)+(-\sin(\theta_1)*\cos(\theta_2)*\sin(\theta_3)- \sin(\theta_1)*\sin(\theta_2)*\cos(\theta_3))*\sin(\theta_4))*\cos(\theta_5)+\cos(\theta_1)*\sin(\theta_5)$$

$$\mathbf{n}_z = ((\sin(\theta_2)*\cos(\theta_3)+\cos(\theta_2)*\sin(\theta_3))*\cos(\theta_4)+(- \sin(\theta_2)*\sin(\theta_3)+\cos(\theta_2)*\cos(\theta_3))*\sin(\theta_4))*\cos(\theta_5)$$

$$\mathbf{s}_x = -((\cos(\theta_1)*\cos(\theta_2)*\cos(\theta_3)-\cos(\theta_1)*\sin(\theta_2)*\sin(\theta_3))*\cos(\theta_4)+(-\cos(\theta_1)*\cos(\theta_2)*\sin(\theta_3)- \cos(\theta_1)*\sin(\theta_2)*\cos(\theta_3))*\sin(\theta_4))*\sin(\theta_5)-\sin(\theta_1)*\cos(\theta_5)$$

$$\mathbf{s}_y = -((\sin(\theta_1)*\cos(\theta_2)*\cos(\theta_3)-\sin(\theta_1)*\sin(\theta_2)*\sin(\theta_3))*\cos(\theta_4)+(-\sin(\theta_1)*\cos(\theta_2)*\sin(\theta_3)- \sin(\theta_1)*\sin(\theta_2)*\cos(\theta_3))*\sin(\theta_4))*\sin(\theta_5)+\cos(\theta_1)*\cos(\theta_5)$$

$$\mathbf{s}_z = -((\sin(\theta_2)*\cos(\theta_3)+\cos(\theta_2)*\sin(\theta_3))*\cos(\theta_4)+(- \sin(\theta_2)*\sin(\theta_3)+\cos(\theta_2)*\cos(\theta_3))*\sin(\theta_4))*\sin(\theta_5)$$

$$\mathbf{a}_x = (\cos(\theta_1)*\cos(\theta_2)*\cos(\theta_3)-\cos(\theta_1)*\sin(\theta_2)*\sin(\theta_3))*\sin(\theta_4)-(-\cos(\theta_1)*\cos(\theta_2)*\sin(\theta_3)- \cos(\theta_1)*\sin(\theta_2)*\cos(\theta_3))*\cos(\theta_4)$$

$$\mathbf{a}_y = (\sin(\theta_1)*\cos(\theta_2)*\cos(\theta_3)-\sin(\theta_1)*\sin(\theta_2)*\sin(\theta_3))*\sin(\theta_4)-(-\sin(\theta_1)*\cos(\theta_2)*\sin(\theta_3)- \sin(\theta_1)*\sin(\theta_2)*\cos(\theta_3))*\cos(\theta_4)$$

$$\mathbf{a}_z = (\sin(\theta_2)*\cos(\theta_3)+\cos(\theta_2)*\sin(\theta_3))*\sin(\theta_4)-(-\sin(\theta_2)*\sin(\theta_3)+\cos(\theta_2)*\cos(\theta_3))*\cos(\theta_4)$$

$$\mathbf{p}_x = L*(\cos(\theta_1)*\cos(\theta_2)*\cos(\theta_3)-\cos(\theta_1)*\sin(\theta_2)*\sin(\theta_3))*\sin(\theta_4)-L*(-\cos(\theta_1)*\cos(\theta_2)*\sin(\theta_3)- \cos(\theta_1)*\sin(\theta_2)*\cos(\theta_3))*\cos(\theta_4)+279*\cos(\theta_1)*\cos(\theta_2)*\cos(\theta_3) -279*\cos(\theta_1)*\sin(\theta_2)*\sin(\theta_3) +279*\cos(\theta_1)*\cos(\theta_2)+76*\cos(\theta_1)$$

$$\mathbf{p}_y = L*(\sin(\theta_1)*\cos(\theta_2)*\cos(\theta_3)-\sin(\theta_1)*\sin(\theta_2)*\sin(\theta_3))*\sin(\theta_4)-L*(-\sin(\theta_1)*\cos(\theta_2)*\sin(\theta_3)- \sin(\theta_1)*\sin(\theta_2)*\cos(\theta_3))*\cos(\theta_4)+279*\sin(\theta_1)*\cos(\theta_2)*\cos(\theta_3) -279*\sin(\theta_1)*\sin(\theta_2)*\sin(\theta_3) +279*\sin(\theta_1)*\cos(\theta_2)+76*\sin(\theta_1)$$

$$\mathbf{p}_z = 425/2+L*(\sin(\theta_2)*\cos(\theta_3)+\cos(\theta_2)*\sin(\theta_3))*\sin(\theta_4)-L*(-\sin(\theta_2)*\sin(\theta_3) + \cos(\theta_2)*\cos(\theta_3))*\cos(\theta_4) +279*\sin(\theta_2)*\cos(\theta_3) + 279*\cos(\theta_2)*\sin(\theta_3) + 279*\sin(\theta_2)$$

Cinemática directa hasta la muñeca

$$T_m = \begin{bmatrix} n_x & s_x & a_x & x_m \\ n_y & s_y & a_y & y_m \\ n_z & s_z & a_z & z_m \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_m = T_1 * T_2 * T_3$$

$$X_m = 279 * \cos \theta_1 * \cos \theta_2 * \cos \theta_3 - 279 * \cos \theta_1 * \sin \theta_2 * \sin \theta_3 + 279 * \cos \theta_1 * \cos \theta_2 + 76 * \cos \theta_1 ((279 * \cos \theta_2 * \cos \theta_3 - 279 * \sin \theta_2 * \sin \theta_3 + 279 * \cos \theta_2) \cos \theta_1) + 76 * \cos \theta_1$$

$$\cos(A+B) = \cos A \cdot \cos B - \sin A \cdot \sin B$$

$$X_m = (279 * \cos(\theta_2 + \theta_3) + 279 * \cos \theta_2) \cos \theta_1 + 76 * \cos \theta_1$$

Coord X de la muñeca

$$Y_m = 279 * \sin \theta_1 * \cos \theta_2 * \cos \theta_3 - 279 * \sin \theta_1 * \sin \theta_2 * \sin \theta_3 + 279 * \sin \theta_1 * \cos \theta_2 + 76 * \sin \theta_1 ((279 * \cos \theta_2 * \cos \theta_3 - 279 * \sin \theta_2 * \sin \theta_3 + 279 * \cos \theta_2) \sin \theta_1) + 76 * \sin \theta_1$$

$$\cos(A+B) = \cos A \cdot \cos B - \sin A \cdot \sin B$$

$$Y_m = (279 * \cos(\theta_2 + \theta_3) + 279 * \cos \theta_2) \sin \theta_1 + 76 * \sin \theta_1$$

Coord Y de la muñeca

$$Z_m = 279 * \sin \theta_2 * \cos \theta_3 + 279 * \cos \theta_2 * \sin \theta_3 + 212.5 + 279 * \sin \theta_2$$

$$\sin(A+B) = \sin A \cdot \cos B + \cos A \cdot \sin B$$

$$Z_m = (279 * \sin \theta_2 + 279 * \sin(\theta_2 + \theta_3)) + 212.5$$

Coord Z de la muñeca

$$x' = x - (m \cdot \cos \mathbf{q}_1 - a_1 \cdot \cos \mathbf{q}1)$$

$$y' = y - (m \cdot \sin \mathbf{q}_1 - a_1 \cdot \sin \mathbf{q}1)$$

$$z' = z - (l \cdot \sin P) - d_1$$

$$m = l \cdot \cos P$$

$$\mathbf{q}_1 = \text{atan2}(y, x)$$

$$n = \sqrt{x^2 + y^2} - m - a_1$$

Proyectando el manipulador en el plano ZY se puede determinar lo siguiente:

$$c = \sqrt{n^2 + z'^2}$$

$$\mathbf{a} = a \cos \left[\frac{a_2^2 + c^2 - a_3^2}{2a_2c} \right]$$

$$\mathbf{b} = \text{atan2}(z', n)$$

$$\mathbf{d} = a \cos \left[\frac{a_3^2 + c^2 - a_2^2}{2a_3c} \right]$$

$$\mathbf{q}_2 = \mathbf{a} + \mathbf{b}$$

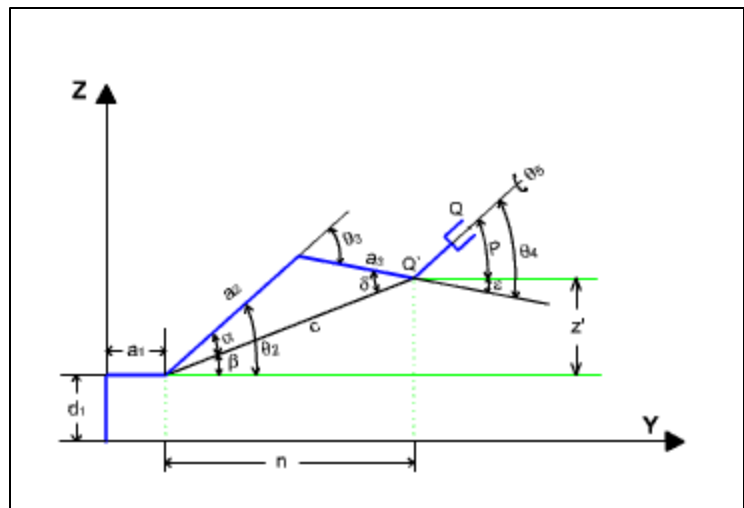
$$\mathbf{q}_3 = -(\mathbf{d} + \mathbf{a})$$

$$\mathbf{e} = \mathbf{b} - \mathbf{d}$$

$$\mathbf{q}_4 = P - \mathbf{e}$$

$$\mathbf{q}_5 = r$$

Figura 27. Proyección del manipulador sobre el plano ZY



Teniendo en cuenta que el ángulo de pitch está dado con respecto al sistema de coordenadas de la base y el de roll con respecto al sistema de coordenadas de la muñeca.

7. CONCLUSIONES

Se analizó y mejoró el diseño del sistema mecánico para el robot aplicando los conocimientos adquiridos durante el curso de diseño mecatrónico 2.

Gracias al diseño para manufactura se corrigieron problemas en el sistema mecánico del robot logrando utilizar piezas del mercado nacional a menor costo.

Haciendo uso de herramientas computacionales para visualización 3D, se realizó un prototipo virtual del proyecto que permitió hacer mejoras técnicas al robot.

Se efectuó la selección de los elementos eléctricos y electrónicos teniendo en cuenta factores económicos y funcionales.

El análisis de interacciones incidentales y fundamentales fue definitivo en el momento de realizar la distribución geométrica del sistema electrónico.

Los diseños electrónicos fueron realizados en su totalidad.

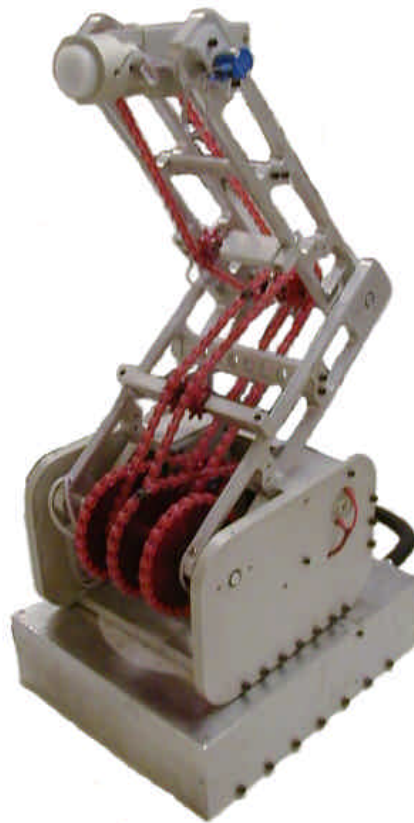
Se construyó el circuito impreso definitivo para todos los sistemas electrónicos (Digital, analógico y de potencia).

8. FUTURAS MEJORAS

- Existe la posibilidad de adecuar otro tipo de efector final con un gripper, teniendo en cuenta que el diseño de la muñeca provee una superficie circular para su montaje. Adicionalmente el sistema electrónico tiene la capacidad de entregar una señal de PWM para el control del dispositivo a través de un conector MiniDIN de 8 pines.
- Para un mejor desempeño del robot en las articulaciones de hombro y codo es posible cambiar los motores existentes por otros con mayor torque; todo esto sin necesidad de cambiar la etapa de potencia, teniendo en cuenta que cada salida provee $\pm 13V$ a 3A.
- El controlador dispone de un puerto serie RS-232 (en el panel de comunicaciones) para permitir la conectividad de un dispositivo externo como un TeachPendant u otro computador; que permita manipular el robot. Se propone como TeachPendant el uso de dispositivos electrónicos que posean puerto serie tal como calculadoras programables de ingeniería, PDA's, HandHeld PC's u otro computador.
- El controlador posee un puerto paralelo (8bits) libres para la interacción del robot con otros dispositivos. Con esto el robot puede ser incluido dentro de una celda de manufactura.
- Es posible cambiar los sensores del robot para aumentar su resolución. Se propone el uso de encoder's.

- Actualmente el software NEA144 provee la opción de visualizar el robot gracias a una WebCam. Se propone el uso de éste medio para realizar el control del robot por realimentación visual.
- El sistema electrónico permite actualizaciones del firmware que provean mejoras en el control.
- El uso del puerto USB permite que se desarrollen programas de control en otros equipos como un iMac o en otras plataformas como Linux.

Figura 28. Robot manipulador NEA 144



BIBLIOGRAFÍA

ANDEEN, Gerry B. Robot Design Handbook. New York: McGraw-Hill, 1988. 504 p.

AVILÉS, Rafael. Curso de Robótica. Madrid: Editorial Parainfo, 1989. 208 p.

AUDÍ, Daniel. Cómo y cuándo aplicar un robot Industrial. Barcelona: Productica, 1988. 355 p.

FU, Lee. Robótica Control, Detección, Visión e Inteligencia. México D.F: McGraw Hill, 1987. 478 p.

HARRIS, Mccloy. Robótica, Una Introducción. México D.F: Limusa Editores, 1993. 243 p.

NORTON, Robert. Diseño de Máquinas. Mexico: Prentice Hall, 1999. 643 p.

ULLMAN, David. The Mechanical Design Process. New York: McGraw-Hill, 1992. 346 p.

ULRICH, Karl. Product Design and development. Los Angeles: McGraw Hill, 1989. 238 p.