



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

---

PROGRAMA DE MAESTRIA Y DOCTORADO EN  
INGENIERIA

FACULTAD DE INGENIERIA

**NOMBRE DE LA TESIS**

DISEÑO, CONSTRUCCION Y CONTROL DE UN ROBOT  
CARTESIANO DE CUATRO GRADOS DE LIBERTAD,  
ENFOCADO A LA INDUSTRIA DEL CALZADO.

**T E S I S**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

**DOCTOR EN INGENIERIA**

INGENIERIA ELECTRICA – CONTROL

P R E S E N T A :

**ISMAEL MORALES MATA**

TUTOR:  
**YU TANG XU**

DIC. 2007



**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: DR. ALVAREZ ICAZA LONGORIA LUIS AGUSTIN

Secretario: DR. ARTEAGA PÉREZ MARCO

Vocal: DR. TANG XU YU

1er. Suplente: DR. SANTILLAN GUTIERREZ SAUL DANIEL

2do. Suplente DR. DORADOR GONZALEZ JESUS MANUEL

Lugar donde se realizó la tesis:

FACULTAD DE INGENIERIA

**TUTOR DE TESIS**

YU TANG XU

---

**FIRMA**

## **MUCHAS GRACIAS**

### **A ti Señor**

Porque a pesar de mis errores, en cada una de tus pruebas me has hecho salir adelante. Me has dado la fuerza necesaria para no dejarme vencer. Porque aunque yo crea que me has abandonado, es cuando estás más a mi lado, y siempre me brindas una segunda oportunidad. Gracias por haberme concedido la gracia de concluir este trabajo.

### **A mis padres**

Porque pase lo que pase nunca me han dejado solo, han creído en mí, me han apoyado en todos los sentidos, pero sobre todo, muchas gracias porque me aman.

### **A mis hermanos**

Por que estamos unidos, y me ayudan cuando lo requiero, gracias porque me impulsan, porque no me juzgan y me brindan su comprensión y su cariño.

### **A mis hijos y esposa**

A ustedes que son mi familia tengo que agradecerles por el tiempo que los dejé solos y aún con eso conté con su apoyo y comprensión.

### **A los miembros del jurado**

Independientemente de su experiencia acumulada y profesionalismo para corregir y transmitir sus conocimientos, por su enorme calidad como personas. Ya que sin sus correcciones, orientación, pero sobre todo comprensión y paciencia, este trabajo no estaría terminado.

# Índice general

<b>Índice de figuras</b>	<b>3</b>
<b>Índice de cuadros</b>	<b>6</b>
<b>1. Antecedentes</b>	<b>7</b>
1.1. Situación Actual . . . . .	7
1.2. La piel y el proceso de corte . . . . .	9
1.3. Calidad de la piel . . . . .	9
1.4. Defectos en la piel . . . . .	10
1.5. Estiramiento de la piel . . . . .	10
1.6. Método para cortar . . . . .	12
1.7. Maquinaria para el corte de piel . . . . .	13
1.8. Complementación del proyecto . . . . .	18
1.9. Estructuración del proyecto . . . . .	19
1.10. Motivación . . . . .	21
1.11. Objetivos . . . . .	22
1.12. Contribuciones . . . . .	23
1.13. Organización de la tesis . . . . .	24
<b>2. Diseño y construcción del robot</b>	<b>25</b>
2.1. Introducción . . . . .	25
2.2. Diseño conceptual del robot . . . . .	26
2.3. Programación de etapas . . . . .	27
2.4. Modelo matemático del robot . . . . .	33
2.5. Modelo del motor . . . . .	36
2.6. Simulación del modelo del robot . . . . .	39

2.7. Sistema mecánico del robot . . . . .	41
2.8. Sensor de fuerza . . . . .	48
2.9. Actuadores . . . . .	50
2.10. Sistema de succión . . . . .	53
2.11. Sistema eléctrico del robot . . . . .	56
<b>3. Control en la presencia de no linealidades duras</b>	<b>59</b>
3.1. Introducción . . . . .	59
3.1.1. Nolinealidades duras . . . . .	61
3.2. Definición del problema y el control ideal . . . . .	63
3.3. Diseño de un control PD difuso robusto . . . . .	65
3.3.1. Control PD difuso . . . . .	66
3.3.2. Control PD difuso robusto . . . . .	68
3.3.3. Análisis de estabilidad . . . . .	69
3.4. Simulación . . . . .	72
3.4.1. Resultados de la simulación . . . . .	73
3.5. Pruebas experimentales . . . . .	75
3.5.1. Resultados experimentales . . . . .	76
<b>4. Conclusiones</b>	<b>81</b>
4.1. Conclusiones . . . . .	81
4.1.1. Requerimientos . . . . .	82
<b>A. Apéndice</b>	<b>84</b>
A.1. Software . . . . .	84
A.1.1. Vistas del robot . . . . .	89
A.1.2. Navaja de corte . . . . .	92
<b>Bibliografía</b>	<b>94</b>
Bibliografía . . . . .	94

# Índice de figuras

1.1. Placas metálicas laminares y suaje metálico. . . . .	8
1.2. Prensa hidráulica de golpe o suajadora. . . . .	8
1.3. Dibujo esquemático de una piel y sus diferentes zonas de calidad. . . . .	10
1.4. Patrón de estiramiento de la piel. . . . .	11
1.5. Piezas de calzado con especificaciones de estiramiento (a). Areas de calidad del calzado (b). . . . .	12
1.6. Inicio y seguimiento de cortes sobre piel. . . . .	13
1.7. Dibujo esquemático de una máquina hidráulica. . . . .	14
1.8. Máquinas hidráulicas para el corte de piel. . . . .	15
1.9. Máquina hidráulica de puente, área de trabajo 1.6 m x 50 cm, peso 1700 kg. . . . .	15
1.10. Acomodo de piezas para corte secuencial. . . . .	16
1.11. Máquina CEI para corte de piel con chorro de agua. . . . .	17
1.12. Máquina HT para corte de piel con navaja. . . . .	18
1.13. Máquina FC4180. Área útil: 1800 x 600 mm. Velocidad: 40 cm/seg. Peso: 1100 Kg. Dimensión: 2.1 x 1.4 x 2.2 m. . . . .	20
1.14. Máquina FC4240. Área útil: 2400 x 1000 mm. Velocidad: 60 cm/seg. Peso: 1400 Kg. Dimensión: 3.0 x 1.6 x 2.6 m. . . . .	20
1.15. Máquina FC4360. Área útil: 3600 x 1400 mm. Velocidad: 50 cm/seg. Peso: 2200 Kg. Dimensión: 4.1 x 2.0 x 3.0 m. . . . .	21
2.1. Robot cartesiano de cuatro grados de libertad. . . . .	27
2.2. Primer fase de diseño. . . . .	28
2.3. Segunda fase de diseño. . . . .	29
2.4. Tercer fase de diseño. . . . .	30
2.5. Cuarta fase de diseño. . . . .	31

2.6. Forma de la estructura del robot y elementos considerados. . . . .	32
2.7. Vista de la maqueta del robot. . . . .	32
2.8. Sistema de coordenadas de los eslabones del robot cartesiano. . . . .	34
2.9. Coordenadas de los centros de masa de los eslabones del robot cartesiano. . . . .	35
2.10. Modelo del motor. . . . .	36
2.11. Respuesta de posición y velocidad de los eslabones $(z, x)$ . . . . .	40
2.12. Respuesta de posición y velocidad de los eslabones $(y, \phi)$ . . . . .	41
2.13. Estructura tubular del robot cartesiano. . . . .	42
2.14. Estructura del robot con soportes . . . . .	43
2.15. Estructura del robot y eslabones $(x, y, z, \phi)$ . . . . .	44
2.16. Eslabón prismático $x$ . . . . .	44
2.17. Eslabones prismáticos $(x, y)$ y eslabón $\phi$ . . . . .	45
2.18. Eslabón prismático $y$ , eslabón rotacional $\phi$ y sensor de fuerza. . . . .	45
2.19. Complemento de transmisión y sensores. . . . .	46
2.20. Componentes del robot cartesiano. . . . .	47
2.21. Robot cartesiano terminado. . . . .	47
2.22. Fases de la fuerza aplicada en la navaja al cortar piel. . . . .	48
2.23. Esquema del modelo eléctrico del sensor de fuerza. . . . .	49
2.24. Esquema del sensor de fuerza. . . . .	49
2.25. Encapsulado del sensor de fuerza. . . . .	50
2.26. Fuerzas que actúan en el eslabón $z$ . . . . .	50
2.27. Desplazamiento de $P_1$ a $P_2$ del eslabón $z$ a una velocidad de 1 m/s. . . . .	51
2.28. Ilustración del área de trabajo . . . . .	53
2.29. Tanque adaptado para generar el vacío . . . . .	54
2.30. Ilustración del sistema automático de encendido . . . . .	55
2.31. Configuración esquemática del sistema de succión . . . . .	55
2.32. Diagrama esquemático del sistema eléctrico del robot. . . . .	58
3.1. Zona muerta (A) y fricción de Coulomb y viscosa (B). . . . .	59
3.2. Funciones membresía para $e$ y $\dot{e}$ . . . . .	67
3.3. Simulación 1: Señales relevantes del control PD difuso . . . . .	74
3.4. Simulación 2: Señales relevantes del control PD difuso robusto . . . . .	74
3.5. Experimento 1: Señales relevantes del control PD difuso . . . . .	75

3.6. Experimento 2: Señales relevantes del control PD difuso robusto . . . . .	75
3.7. Forma de la pieza a cortar utilizando el robot (cm). . . . .	76
3.8. Resultados de la prueba en el panel gráfico. . . . .	77
3.9. Desplazamientos totales de los eslabones $(x, z)$ . . . . .	77
3.10. Posición de los eslabones $(x, z, \phi)$ . . . . .	78
3.11. Error de posición en los eslabones $(x, z)$ . . . . .	79
3.12. Panel gráfico del corte de dos cuadrados. . . . .	79
3.13. Gráfico interno de los desplazamientos $(x, z)$ al cortar dos cuadrados. . . . .	80
A.1. Puesta en ceros del eslabón $x$ . . . . .	85
A.2. Fijar y determinar parámetros para los cuatro eslabones. . . . .	86
A.3. Secuencia de desplazamiento del eslabón $x$ . . . . .	87
A.4. Secuencia de desplazamiento del eslabón $\phi$ . . . . .	88
A.5. Partes mecánicas del robot cartesiano. . . . .	89
A.6. Sensores Infrarojos del eslabón $(z)$ . . . . .	90
A.7. Encapsulado del sensor de fuerza montado en el eslabón $\phi$ . . . . .	90
A.8. Reductores de los eslabones $(x, y, z, \phi)$ con relación 10:1. . . . .	90
A.9. Tanque pulmonar de 300 l para mantener el vacío. . . . .	91
A.10. Eslabones $(x, y, z, \phi)$ . . . . .	91
A.11. Vista frontal del robot cartesiano. . . . .	91
A.12. Área de trabajo del robot cartesiano. . . . .	92
A.13. Diferentes tipos de navajas para corte industrial. . . . .	93



# Capítulo 1

## Antecedentes

### 1.1. Situación Actual

En México, la industria del calzado está conformada por más de dos mil empresas. De acuerdo a la infraestructura, cantidad y tamaño de las empresas establecidas, se puede mencionar que el estado de Guanajuato concentra la mayor cantidad de industrias en este ramo, siguiéndole en importancia Jalisco, México, Nuevo León, etc. Estas industrias se clasifican de acuerdo a su tamaño en micro, pequeña, mediana y grande, predominando la micro y pequeña industria.

Con más de ochocientas empresas registradas en la Cámara de la Industria del Calzado, la ciudad de León, Gto. ubicada al centro del país, es considerado el centro zapatero más importante de México. En esta localidad se encuentran establecidos los principales fabricantes de calzado del país (Flexi, Emico, Andrea, etc.).

En la fabricación de calzado intervienen diferentes procesos. El más importante de todos es el corte de piezas de piel, debido a que el cuero es el insumo más costoso de todo el proceso, representando aproximadamente el 40% del costo del producto final terminado. Industrialmente, el corte de piezas se efectúa manualmente por dos métodos: utilizando placas metálicas laminares con la forma de la pieza a cortar, y por medio de dados conocidos como suajes, que esencialmente es una cinta metálica con filo en un borde al que se le da la forma de la pieza que se va a cortar (Fig. 1.1). En la producción de calzado, se requiere la fabricación de varios juegos de placas y suajes metálicos. Se requiere un juego de cada medida comercial del zapato para el obrero y otro de reserva para sustituir los moldes

perdidos o dañados por el uso o maltrato.

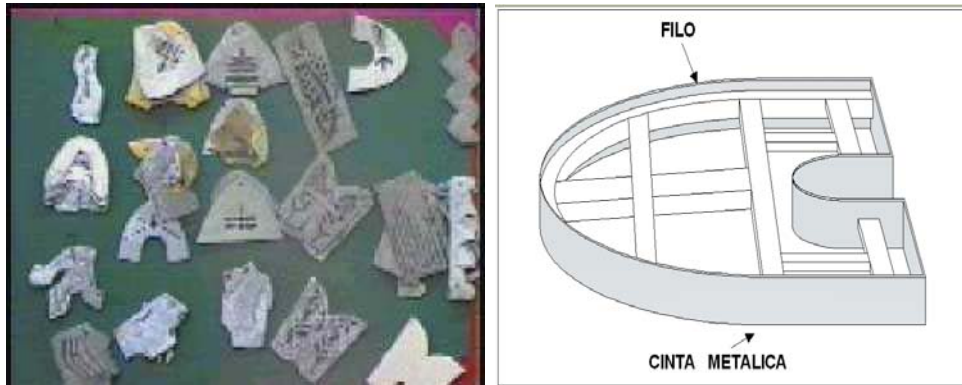


Figura 1.1: Placas metálicas laminares y suaje metálico.

Para cortar la piel manualmente, el obrero coloca la placa metálica sobre el cuero. Con la navaja va cortando la piel siguiendo el contorno de la placa, hasta obtener la pieza deseada. Con el suaje, el obrero utiliza una prensa hidráulica de golpe conocida como suajadora (Fig. 1.2). En el área de trabajo de la prensa, se extiende la piel y se coloca el suaje con el filo sobre la piel. Al accionar la prensa, el suaje es presionado sobre el cuero y de un solo golpe se obtiene el corte de la pieza deseada.



Figura 1.2: Prensa hidráulica de golpe o suajadora.

En ambos métodos, el obrero define, acomoda y efectúa cada uno de los cortes en forma secuencial durante la jornada de trabajo. El acomodo óptimo del suaje o la placa metálica para cortar, depende únicamente de la observación instantánea y la experiencia individual del trabajador. Esto significa que el desperdicio de piel varía de obrero a obrero, aún trabajando el mismo modelo de calzado. Este proceso, aparte de ser peligroso para el operador humano, depende de las habilidades individuales de cada operador. Por otro lado, el transcurso del tiempo de jornada, el cansancio y la monotonía del proceso merman las habilidades del obrero disminuyendo sus reflejos y rapidez productiva. Esto se refleja en una

baja productividad y un aumento considerable en el desperdicio de piel, que es la materia prima principal.

El aspecto más importante en este proceso es el rango de pérdidas que se pueden generar al efectuar manualmente los acomodos de cada pieza al cortar. Este es el punto crítico y más importante considerado por el industrial. Según un estudio realizado por una importante empresa fabricante de calzado de León, Gto., es práctica común que el obrero despegue los suajes más de 1 mm. al cortar las piezas, lo cual hace perder más de 355 mil decímetros cuadrados de piel, que calculado con el precio promedio asciende al orden de los millones de pesos de pérdidas anuales.

## **1.2. La piel y el proceso de corte**

La piel es la materia prima más importante y costosa en la fabricación de calzado, siendo en gran medida quien determina la calidad del producto terminado. Esta es la razón por la cual en los departamentos de corte y forro de las empresas de la industria del calzado se recluta personal altamente calificado. De esta manera, se puede garantizar la calidad de los cortes en función del sentido de estiramiento de las fibras y las diferentes calidades que requiere cada una de las piezas que conforma el calzado.

## **1.3. Calidad de la piel**

Según la composición de las fibras naturales del cuero del animal, se establecen zonas de diferente calidad como se indica en la Fig. 1.3. El grupón o lomo y la culata representada en el área 1, constituyen la zona de mayor calidad. El cogote y la falda en el área 2, poseen una calidad media. La falda será muy flexible si la vaca ha parido varias veces. Las garras y la cabeza en el área 3, presentan una calidad inferior. La parte de las axilas del área 4, es generalmente considerada como desecho o desperdicio.

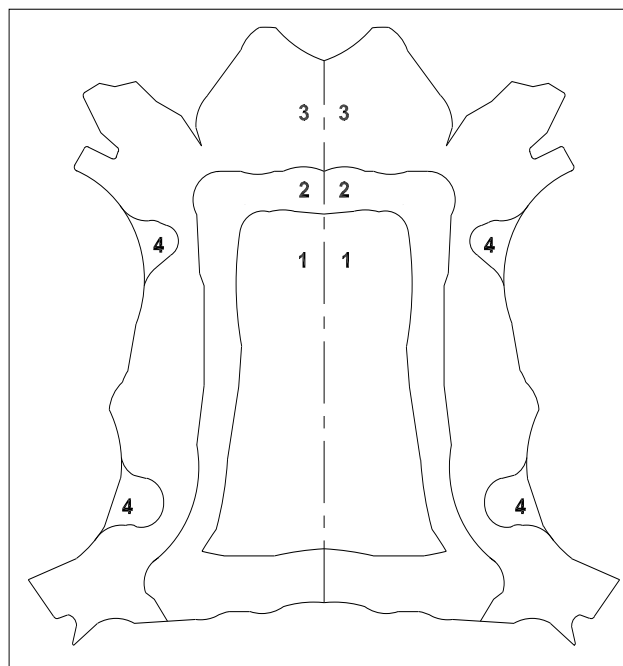


Figura 1.3: Dibujo esquemático de una piel y sus diferentes zonas de calidad.

## 1.4. Defectos en la piel

La piel puede tener adecuada textura de flor, buena estructura fibrosa, espesor y buen tamaño, pero si sus defectos superficiales son muy notables, esta piel será rechazada. Algunos de los defectos más comunes pueden ser originados por:

- Marcas de fierro.
- Garrapatas, espinillos. Rasguños, heridas.
- Agujeros por bacterias, marcas de sal.
- Venas, zonas flojas.
- Manchas por excremento y orina.
- Proceso de curtido (Tonalidad no uniforme, espesor, terminación, forma del cuero, etc.)

## 1.5. Estiramiento de la piel

Según el tipo de animal: vaca, cabra, oveja, cerdo, etc., el estiramiento de la piel podrá tener diferentes sentidos. Aspectos tales como la calidad y la estructura fibrosa

del cuero en una misma especie, dependen y varían de acuerdo a condicionamientos que imponen la raza, el sexo, el hábitat, alimentación, edad, etc. A pesar de estas diferencias y luego de varios análisis, se han establecido patrones de estiramiento como se muestra en la Fig. 1.4. El sentido de las flechas indican la tendencia de estiramiento de la piel. Sin embargo, no significa que hacia el lado opuesto, la piel no tenga estiramiento. Si lo tiene, pero en menor proporción.

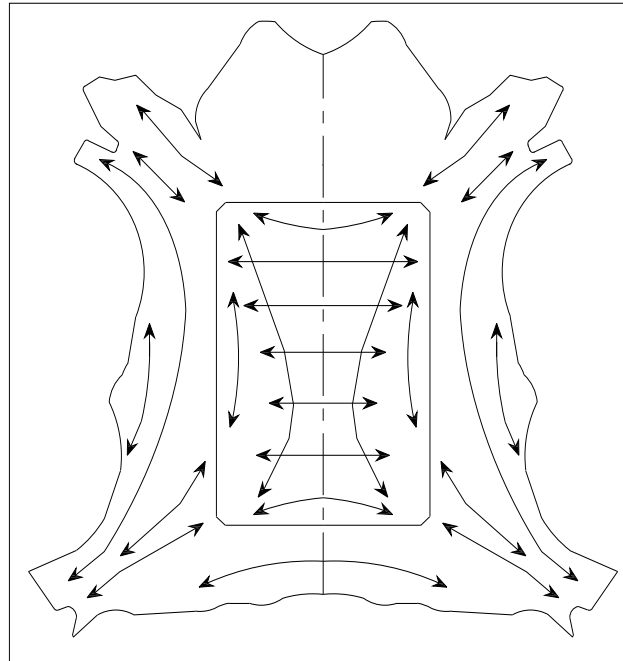


Figura 1.4: Patrón de estiramiento de la piel.

El cortador de piel debe consultar estos patrones para colocar en forma correcta el molde laminar o suaje. Ya que cada pieza, por la posición que ocupa en el calzado, debe ser cortada de acuerdo al patrón de estiramiento especificado. En la Fig. 1.5-a, se observan las piezas que conforman un zapato y la indicación de la posición en que deben cortarse en función del sentido de estiramiento de la piel.

Los requerimientos de calidad en las piezas del calzado, están en función de la exposición visual, resistencia requerida durante el proceso de fabricación y el uso. En primer orden de calidad, como se muestra en la Fig. 1.5-b, se encuentran las piezas que conforman la zona de la punta del calzado, (sección 1), en segundo orden son las piezas de la parte media (sección 2). Es aceptable que las partes del lado interno, por ser menos visibles, tengan una calidad inferior respecto a las externas. En tercer orden se ubican las piezas de la zona trasera (sección 3), y partes menos visibles del calzado como: talón, lengüeta, etc.

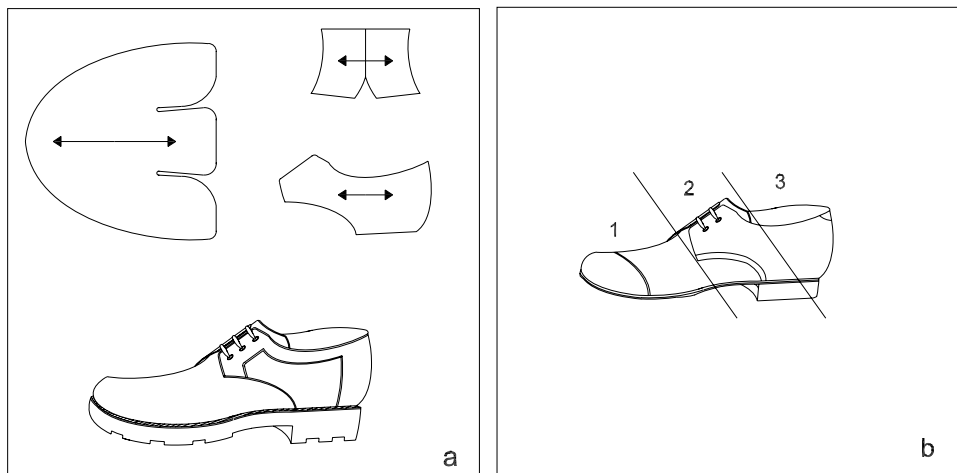


Figura 1.5: Piezas de calzado con especificaciones de estiramiento (a). Areas de calidad del calzado (b).

Es importante considerar que los defectos encontrados en el cuero pueden ubicarse en los márgenes de empastado o armado. Además, existen orillas en determinadas piezas, a las cuales no les afectan si pierden un milímetro al ser cortadas.

## 1.6. Método para cortar

Es esencial que los cortes se realicen adecuadamente en función de la calidad y el sentido del estiramiento de las fibras. Por este motivo, los cortadores deben respetar ciertas reglas básicas, que son:

- El corte debe iniciar a partir de la culata.
- Se ubicarán las piezas de mejor calidad en la parte del lomo y se seguirán colocando las siguientes de menor calidad requerida hasta terminar en la zona de la garra.
- Una vez que se aprovechó por completo toda la parte inferior, se empezará nuevamente desde el centro.
- Se seguirá por la franja superior, ubicando nuevamente las piezas de mayor importancia en el grupón.
- Se debe cortar una sola hoja de piel.
- No se deben encimar hojas de piel ni utilizar varios suajes a la vez.
- Cada pieza se debe cortar al filo de la anterior para evitar el desperdicio.

Existen varias razones por la cual se deben respetar estas reglas: al empezar los cortes por la mejor calidad, el mayor desperdicio de piel será de menor calidad. Al terminar líneas completas de corte, siempre quedará todo el ancho de la piel para la mejor ubicación de la otra fila de piezas. No se debe cortar con un suaje en forma indiscriminada, se generan problemas de calidad y no se completan pares de la misma zona. En la Fig. 1.6 se ilustra el sentido del inicio de los cortes de las piezas y la forma de continuar.

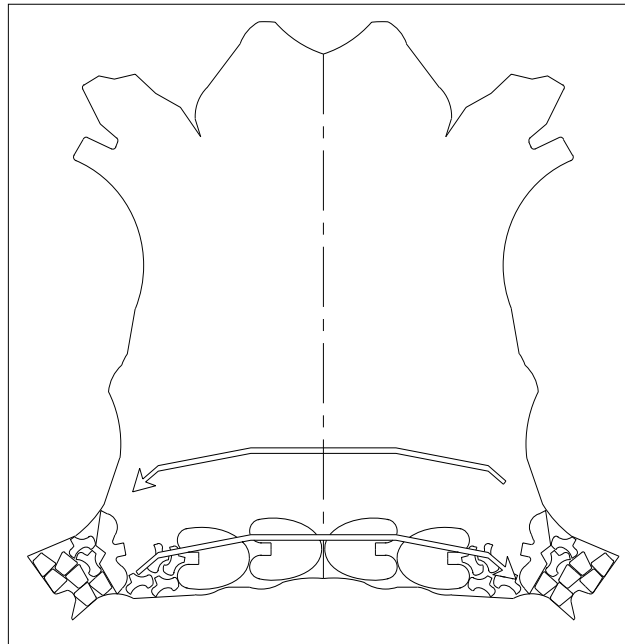


Figura 1.6: Inicio y seguimiento de cortes sobre piel.

## 1.7. Maquinaria para el corte de piel

En la actualidad se utilizan dos tipos de maquinaria para realizar los cortes de piel: hidráulicas y programables. La maquinaria hidráulica se divide en dos grupos a su vez: de brazo y de puente. La maquinaria programable, dependiendo de la herramienta para realizar el corte de piel puede ser de chorro de agua o de navaja.

### **Maquinaria hidráulica.**

Dentro de esta clasificación existen máquinas con una gran diversidad de fuerza de golpe. Dicha fuerza dependerá exclusivamente de la dimensión de los suajes a utilizar. La máquina de brazo se utiliza exclusivamente para piel con suajes de 19 mm, el área de trabajo de estas máquinas es aproximadamente de 60 cm x 90 cm. La máquina de puente posee una mayor superficie de trabajo Apx. 1.6 m x 50 cm, y se utiliza específicamente para material sintético

con suajes de 32 mm. En la Fig. 1.7 se muestra el dibujo de una máquina hidráulica.

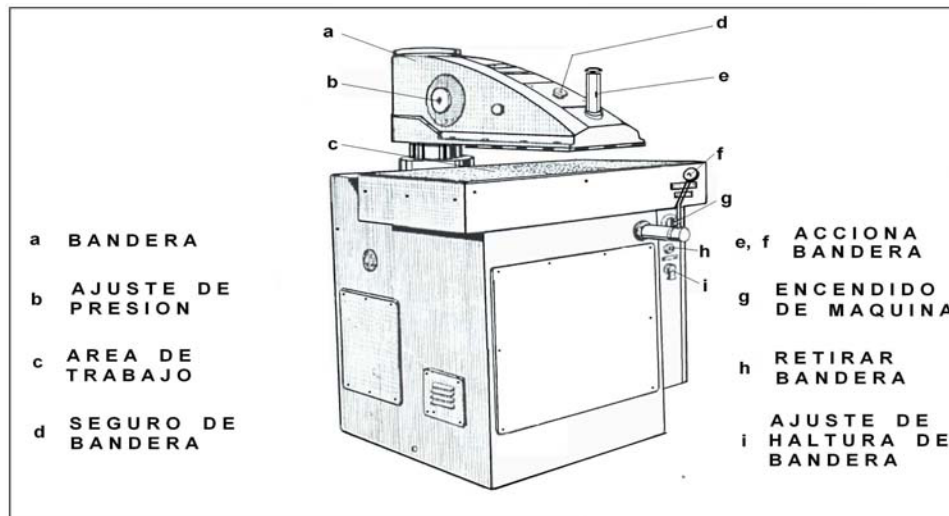


Figura 1.7: Dibujo esquemático de una máquina hidráulica.

Este tipo de maquinaria es la que se utiliza en la industria del calzado y se puede adquirir fácilmente en la ciudad de León, Gto. Su fabricación es muy variada: China, Italia, Brasil, etc., con marcas como: Svit, Atom, Chicen, Guisma, etc. El área de trabajo es variable oscilando en 60 cm x 80 cm a 65 cm x 90 cm, con una presión de golpe que va desde 20 a 35 toneladas. El costo de las suajadoras chinas van desde 30,900.00 pesos, el de las italianas desde 37,600.00 pesos. Es importante señalar que este tipo de maquinaria se fabrica inclusive en León Gto. Existen fabricantes como: Ramírez Aranda Hnos, Maquinaria Atilano, Maquinaria y Refacciones Aguilar, Moro Maquinaria Servicio y Refacciones, etc. Los costos de las suajadoras fabricadas en León, Gto., van desde los 11,500.00 pesos a 16,800.00 pesos.

El corte de piezas por medio de maquinaria hidráulica, se realiza acomodando la piel en el área de trabajo. El suaje se coloca sobre la piel con la orientación adecuada y en la calidad de piel especificada. Al accionar la máquina y por medio de presión de golpe sobre el suaje, se corte la pieza. La colocación y orientación del suaje se efectúa manualmente de acuerdo al criterio del obrero, considerando la calidad y estiramiento de la piel. Cada "golpe" de la máquina es una pieza obtenida. En la Fig 1.8 se muestran dos máquinas hidráulicas Atom de fabricación italiana. En la Fig. 1.8-A se muestra el modelo S120 C con una presión de corte de 20 ton, área de trabajo de 43 cm x 90 cm, 880 kg de peso y un costo de 3,580.00 Eur más IVA. En la Fig. 1.8-B se muestra el modelo S127 C con una presión de corte de 27 ton, área de trabajo de 45 cm x 90 cm, 920 kg de peso y un costo de 3,990.00 Eur más



IVA. En la Fig. 1.9 se muestra una máquina hidráulica de puente, este equipo se utiliza para cortar material sintético.



Figura 1.8: Máquinas hidráulicas para el corte de piel.



Figura 1.9: Máquina hidráulica de puente, área de trabajo 1.6 m x 50 cm, peso 1700 kg.

### Maquinaria programable.

A diferencia de las máquinas hidráulicas, las máquinas programables realizan los cortes de todas las piezas contenidas en una hoja de piel en forma secuencial. Las piezas son

previamente programadas por software y desplegadas en el monitor. En la Fig. 1.10 se ilustra un arreglo de las piezas utilizando el software Lasernest System.

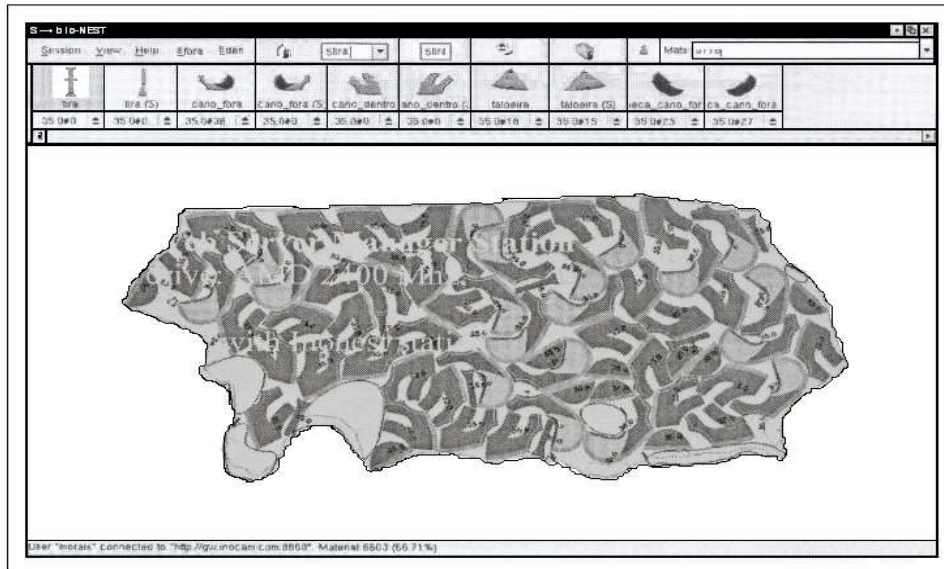


Figura 1.10: Acomodo de piezas para corte secuencial.

Estas máquinas cortan la piel por medio de navaja o con sistema de agua tratada bombeada a muy alta presión. Existen diferentes marcas de ambos equipos, italianas: Taglio, Atom, Esab, Cutjet, etc. Alemanas: HT Cutware, Humantec, Laser Match, Zipor Cei, etc. El costo de los equipos con herramienta de navaja oscila en los 320,000.00 Eur. El costo de los equipos a base de chorro de agua en los 572,000.00 Eur. Las características funcionales de estos equipos son:

- En ambas máquinas, se digitaliza el contorno de cada piel, donde por medio de software se acomodan y orientan cada una de las piezas para ser cortadas en forma consecutiva.
- La programación de los cortes se realiza a partir del dibujo maestro sin requerir el uso de suajes.
- El desperdicio de piel es menor debido al previo acomodo de las piezas.
- La velocidad de corte de estas máquinas, generalmente es de 40 cm/s a 1 m/s en las máquinas de navaja, y de 2 m/s en las de chorro de agua.
- La velocidad y calidad del corte es constante en cualquier turno, jornada o día.
- A lo largo de las jornadas, estas máquinas son más rápidas que las hidráulicas.

- Cuando se termina el proceso de corte de una determinada línea de calzado, el proceso de corte es almacenado en un disco. Esta es una ventaja importante ya que al tener un pedido extra, el proceso de corte de esa línea de calzado puede ser programado nuevamente con la misma calidad y eficiencia.

En la Fig. 1.11 se muestra el equipo Cei de Zipor a base de chorro de agua. En la Fig. 1.12 se muestra el equipo HT Cutware.



Figura 1.11: Máquina CEI para corte de piel con chorro de agua.

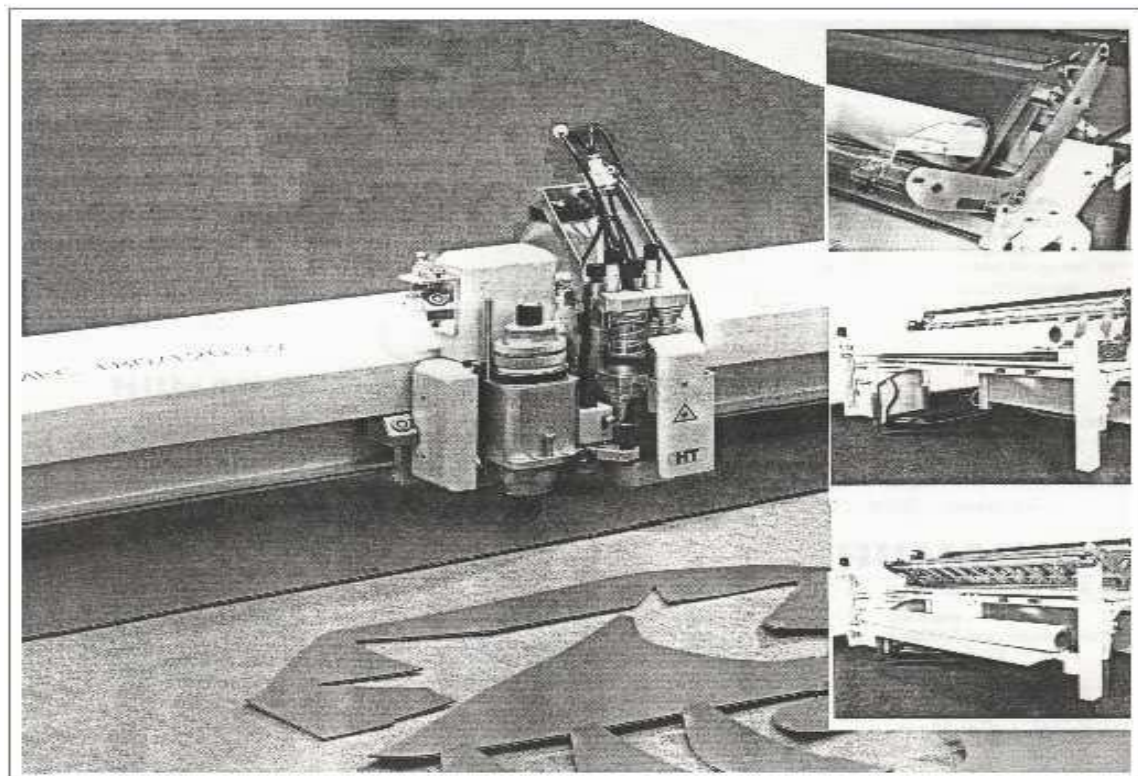


Figura 1.12: Maquina HT para corte de piel con navaja.

## 1.8. Complementación del proyecto

En las secciones anteriores se presentaron a grandes rasgos las fallas técnicas con que se realiza el corte de piel utilizando maquinas hidráulicas, así como las opciones disponibles para solucionar esas fallas, es decir, la integración de los equipos programables para cortar piel. Con objeto de corroborar y tener la certeza real de los requerimientos y necesidades de la industria del calzado, se dialogó con aproximadamente 45 empresarios de la industria pequeña, mediana y grande de la ciudad de León, Gto. La información obtenida se puede agrupar como sigue:

- El corte de piel es el proceso fundamental en la fabricación de calzado. Los puntos críticos de este proceso en orden de importancia son: el desperdicio de piel que se genera en ambos métodos de corte, la calidad del corte de la pieza cuando se utilizan moldes laminares y el error del corte de 1 mm.
- En la industria clasificada como grande, se utiliza maquinaria hidráulica para efectuar el corte de piel. En la industria mediana se utiliza maquinaria hidráulica y moldes laminares. La pequeña y micro industria utilizan moldes laminares.

- Se dispone de maquinaria programable especializada en el corte de piel, pero es de procedencia extranjera. Los costos de estos equipos y la dependencia tecnológica que se adquiere al comprarlos, dificultan enormemente su integración en la producción nacional.
- Existe bastante disponibilidad por parte de los industriales para que en común se genere y desarrolle tecnología propia, adaptada a sus técnicas de proceso, necesidades y requerimientos productivos.
- Por otra parte, el tamaño del sector industrial del calzado es enorme. Comprende más de ochocientas industrias del calzado registradas en la cámara de comercio de la industria del calzado de León, Gto., conformando en su totalidad 2252 industrias registradas a nivel nacional.

## 1.9. Estructuración del proyecto

En primera instancia se hicieron estudios relacionados al proceso de corte de piezas de calzado, en conjunto con el Departamento de Corte y Forro de un fabricante de calzado. Principalmente se observaron las diferentes consistencias de suavidad, elasticidad y dureza que se presentan en una sola hoja de piel. Se realizaron pruebas de corte de piel en el sentido de las fibras musculares y en sentidos perpendicular, transversal y combinado. Se pudo observar que estas características varían con cada tipo de piel (bovino, caprino exóticas, etc.) y con el calibre o grosor de la misma piel. Estas propiedades que presenta la piel, son elementos importantes que se deben considerar al momento de diseñar el control de fuerza de corte en la navaja.

Para complementar el diseño, se observaron las características funcionales y alcance de tres máquinas cortadoras de piel a base de navaja de la marca italiana Teseo, modelos: FC4180, FC4240 y FC4360 (Fig. 1.11, 1.12 y 1.13 respectivamente).

Con la información obtenida, se realizó un análisis que sirvió de sustento para conformar y exponer a industriales del calzado la siguiente propuesta: desarrollo de tecnología en conjunto enfocada a la automatización del corte de piel. Esta propuesta fue planteada, discutida y aceptada por la Gerencia de una empresa clasificada como grande de la ciudad de León, Gto. Posteriormente, considerando la infraestructura del Departamento de Robótica



Figura 1.13: Máquina FC4180. Área útil: 1800 x 600 mm. Velocidad: 40 cm/seg. Peso: 1100 Kg. Dimensión: 2.1 x 1.4 x 2.2 m.



Figura 1.14: Máquina FC4240. Área útil: 2400 x 1000 mm. Velocidad: 60 cm/seg. Peso: 1400 Kg. Dimensión: 3.0 x 1.6 x 2.6 m.



Figura 1.15: Máquina FC4360. Área útil: 3600 x 1400 mm. Velocidad: 50 cm/seg. Peso: 2200 Kg. Dimensión: 4.1 x 2.0 x 3.0 m.

y Control de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y los recursos económicos disponibles, se complementó en forma total el proyecto.

## 1.10. Motivación

En Italia y Alemania principalmente, existen fabricantes de equipos programables especializados en este proceso industrial. En México no hay ninguna empresa manufacturera de este tipo de equipo, a pesar de la demanda y el tamaño que representa la industria del calzado nacional. Si en un momento dado una empresa decidiera modernizar el proceso de corte utilizando maquinaria programable, se enfrentaría a los siguientes inconvenientes:

- Como son equipos de fabricación extranjera el costo es muy alto aún para las empresas clasificadas como grandes. Para la industria pequeña y mediana el costo de esta tecnología es prohibitivo.
- Al comprar el equipo se tiene una total dependencia tecnológica del fabricante. Los gastos de mantenimiento, refacciones, insumos, asesorías, capacitaciones etc., resultan por lo general muy elevados debido a que el fabricante es el único que puede proporcionar estos servicios o requerimientos.
- Debido al costo del equipo programable comparado con el costo de las suajadoras



hidráulicas fabricadas en León, Gto., y la mano de obra de que se dispone, la relación costo/producción al utilizar estos equipos no es justificable para el industrial nacional.

- Las máquinas cortadoras de piel existentes en el extranjero están diseñadas para ser integradas dentro de un rol de producción de calzado diferente al nacional. Se caracteriza por estar rodeado de un entorno tecnológico y de automatización muy por encima del existente en nuestro país.

Considerando lo anterior, es necesario el desarrollo, estructuración y puesta en marcha de un proyecto de desarrollo tecnológico para este sector industrial, sustentado en sus necesidades, requerimientos y capacidad productiva, involucrando adicionalmente al sector industrial y de gobierno.

## 1.11. Objetivos

El presente trabajo tiene como objetivo: diseñar, construir y controlar un robot cartesiano, cuya tarea específica es realizar el corte de piezas de piel para la fabricación industrial de calzado. Con este proyecto se pretende apoyar a la industria del calzado nacional y generar tecnología propia de aplicación y desarrollo, en lo que concierne al proceso industrial de corte serial de piezas del calzado.

### **Los objetivos específicos del proyecto son:**

1. Construir un prototipo de robot cartesiano diseñado específicamente para realizar cortes de piezas de piel para la fabricación de calzado, que cumpla además, con los requerimientos de funcionalidad operacional y desempeño confiable en cuanto a producción y calidad de producto generado, con objeto de integrarlo en la línea de producción de la industria nacional del calzado.
2. Desarrollar algoritmos de control y compensación de efectos no lineales para ser aplicados en sistemas mecánicos, principalmente en presencia de fricción de Coulomb y zona muerta.



## 1.12. Contribuciones

Teniendo en consideración la problemática real de la industria del calzado, es importante implementar programas enfocados a resolver problemas de adaptación y creación de tecnología para la industria nacional. Tomando en cuenta lo anterior, es primordial que el presente trabajo se sustente y considere la problemática de este sector así como los requerimientos y adaptaciones que se impliquen. De esta manera se estará en mejores condiciones para generar y proponer una solución alterna que satisfaga en gran medida a la industria del calzado. En este sentido, esta tesis contribuye con un prototipo que efectúa en forma automática el corte serial de piezas de piel para la fabricación de calzado. Concretamente, este trabajo ha logrado obtener:

1. El diseño y la construcción de un prototipo de robot cartesiano para realizar cortes de piezas de piel para el proceso de fabricación de calzado [8, 9]. El prototipo se encuentra instalado en la UNAM Campus Juriquilla, en el Laboratorio de la Unidad de Desarrollo Tecnológico de la Facultad de Ingeniería.
2. Diseño y análisis de estabilidad de un esquema de control y compensación aplicable a servomecanismos en presencia de no linealidades duras, principalmente zona muerta y fricción de Coulomb. Esto es con objeto de minimizar los efectos no lineales, mejorando considerablemente el problema de seguimiento de trayectorias. Los resultados han sido reportados en [10, 11].
3. Se han realizado pruebas y experimentos de corte y funcionalidad del prototipo en presencia de industriales del calzado. Con base en los resultados observados en las pruebas se obtuvieron opiniones favorables por parte de ellos, enfatizando que la culminación del proyecto va a representar una opción muy viable para que el robot sea integrado a la línea de producción de este sector. Considerando lo anterior, se va a contribuir con el desarrollo y adaptación de tecnología para la industria del calzado.
4. Considerando básicamente el punto anterior, al proyecto se le ha dado seguimiento por parte de industriales de una empresa de calzado clasificada como grande de la ciudad de León, Gto. Se ha demostrado bastante interés en el robot por parte de ellos, al punto que ya se estructuró el desarrollo de la segunda generación del robot cartesiano con el financiamiento económico por parte de dicha empresa y CONCYTEG.

### 1.13. Organización de la tesis

En el primer Capítulo, se expone en forma breve el porqué el corte de piel es el principal y más importante proceso para la industria del calzado en León, Gto., así como parte de la problemática que afecta a este sector industrial en lo que concierne al proceso del corte de piel. Se explica como se va a incidir o impactar en la industria del calzado con el desarrollo y la terminación del proyecto en su fase final. Se describen las características y requerimientos que deben reunir las hojas de piel para ser aceptados o rechazados por el Departamento de Corte. Se comentan brevemente las consideraciones que se toman para orientar los cortes de las piezas en función del estiramiento del tejido y zonas de calidad de la piel. Se describen algunos equipos o maquinaria que son utilizadas industrialmente para el corte de piezas de piel. Se estructura y define el proyecto programándose las fases de diseño y construcción del robot cartesiano de cuatro grados de libertad. El Capítulo se complementa mencionando las motivaciones, objetivos y contribuciones del proyecto.

El Capítulo 2 se enfoca al aspecto de diseño y construcción mecánica del robot en lo que concierne a: modelado y simulación del modelo matemático, estructura y soportes del robot, eslabones  $(x, y, z, \phi)$ , mecanismo de giro y soporte de la navaja, sensor de fuerza, actuadores, sistema de succión y descripción del sistema eléctrico del robot.

En el Capítulo 3 se desarrolla el diseño teórico del modelo de control para el robot cartesiano, el esquema de compensación de las no linealidades duras, así como el análisis de estabilidad.

El Capítulo 4 se refiere a las conclusiones referentes al trabajo.

Finalmente el Apéndice describe la estructuración del software que requiere el robot para su funcionamiento. Se muestran algunas vistas del robot cartesiano y se menciona el tipo de navaja que utiliza el robot.

## Capítulo 2

# Diseño y construcción del robot

### 2.1. Introducción

Se realizaron bosquejos preliminares con objeto de estructurar un robot adaptado para cortar piezas de piel. El objetivo se pudo lograr con base en la acumulación de ideas enfocadas a satisfacer los requerimientos planteados y solventando los problemas presentados a lo largo del bosquejo. Algunos de los requerimientos considerados y solventados fueron:

- La necesidad de una superficie plana para acomodar y apoyar la piel mientras es cortada. Además que la superficie soporte el paso del filo de la navaja, desgastando el filo lo menos posible.
- Como sujetar la piel a la superficie para que se pueda cortar.
- El tipo de navaja que se va a utilizar y el mecanismo para sujetarla mientras se corta la piel.
- Mecanismo para mover la navaja y darle la orientación al filo para que siga el contorno de una determinada pieza a cortar.
- Como modular, aplicar y controlar la fuerza en la navaja en lo que concierne a la fuerza de contacto en la superficie, la fuerza requerida en la perforación de piel y la fuerza en el corte de piezas.
- Considerar las características de elasticidad, dureza y el sentido de fibras musculares de la piel en el proceso de corte.

- De que manera medir la fuerza aplicada en la navaja y como generarla mecánicamente en tiempo real.
- Qué tipo de eslabones estructurar considerando el mecanismo para deslizar los eslabones.
- Cómo y de que manera se van a mover las partes mecánicas del sistema de tracción.
- La forma, apariencia física y dimensiones del robot, estructura física de los mecanismos y tipo de material para su construcción.
- Con la finalidad de facilitar el reemplazo de componentes en el robot, estructurar en forma modular los sistemas mecánico, eléctrico y de succión. Además, construir y ensamblar el robot con partes y componentes de fácil adquisición en el mercado nacional.

## 2.2. Diseño conceptual del robot

Analizando los bosquejos realizados y conjuntando la información acumulada, se consideró pertinente estructurar un robot cartesiano  $(x, y, z, \phi)$  para desempeñar la tarea asignada. En esta estructuración, el sistema de coordenadas  $(x, z)$  es para generar el seguimiento de las trayectorias deseadas, la coordenada  $y$  para aplicar y modular la fuerza requerida en la navaja. Finalmente la coordenada  $\phi$ , para dar la orientación del filo de la navaja de acuerdo a la trayectoria. Para medir en tiempo real y controlar la fuerza aplicada en la navaja se consideró adaptar un sensor de fuerza en el eslabón  $y$ . De esta manera, el sistema de coordenadas  $(x, y, z, \phi)$  conforman los eslabones del sistema mecánico de corte con los cuales se configuró el modelo conceptual del robot cartesiano de cuatro grados de libertad, como se muestra en la Fig. 2.1.



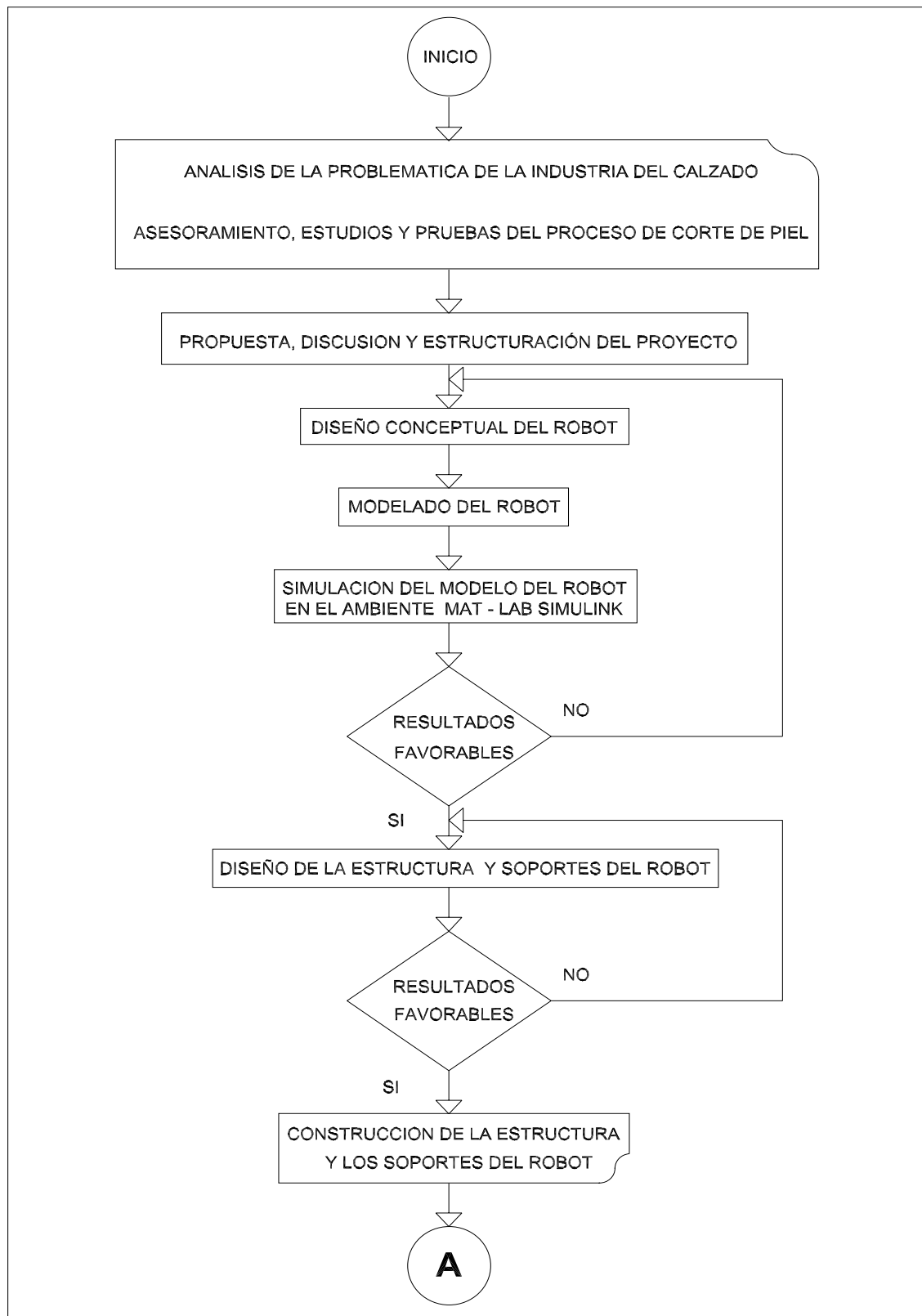


Figura 2.2: Primer fase de diseño.

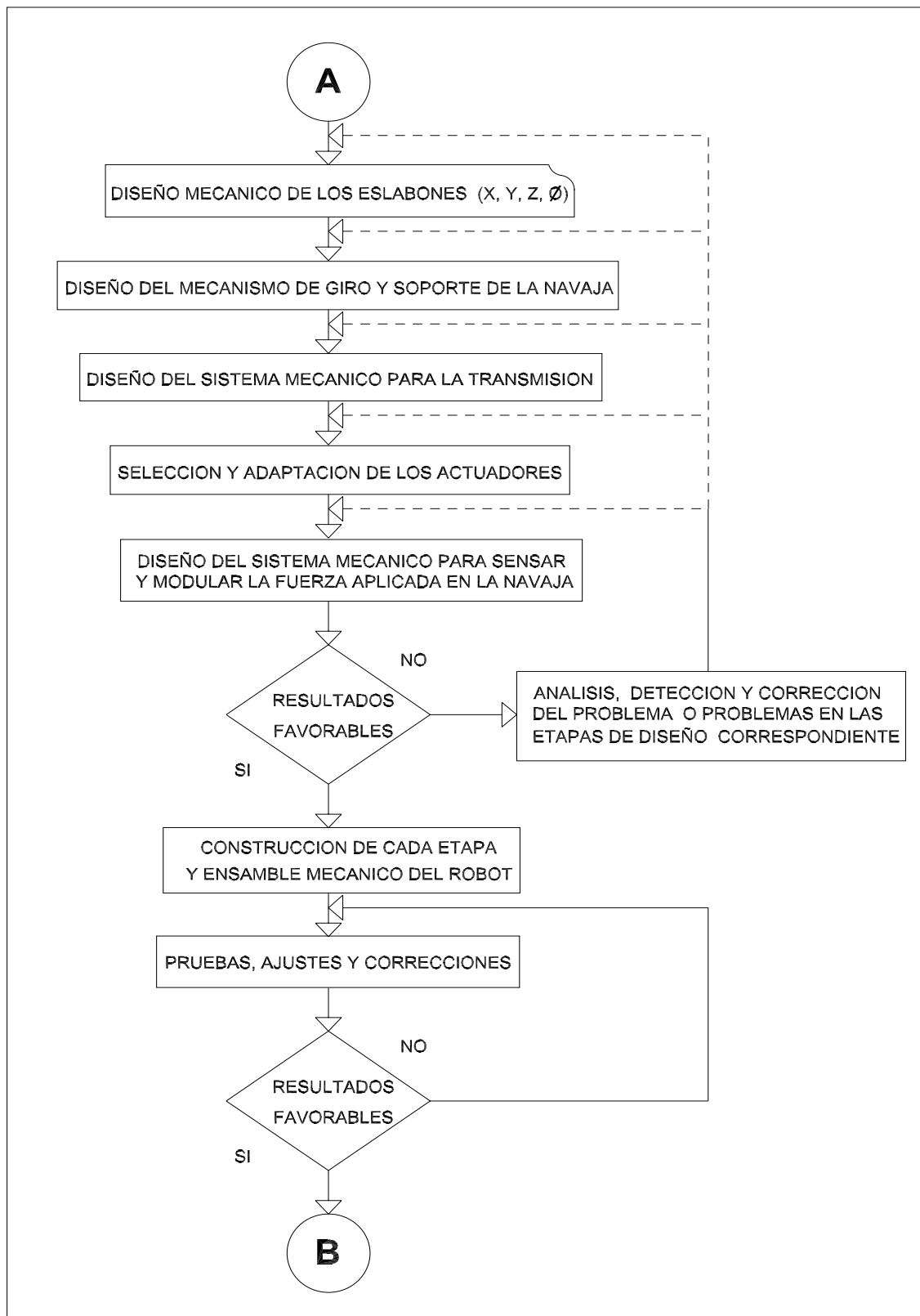


Figura 2.3: Segunda fase de diseño.

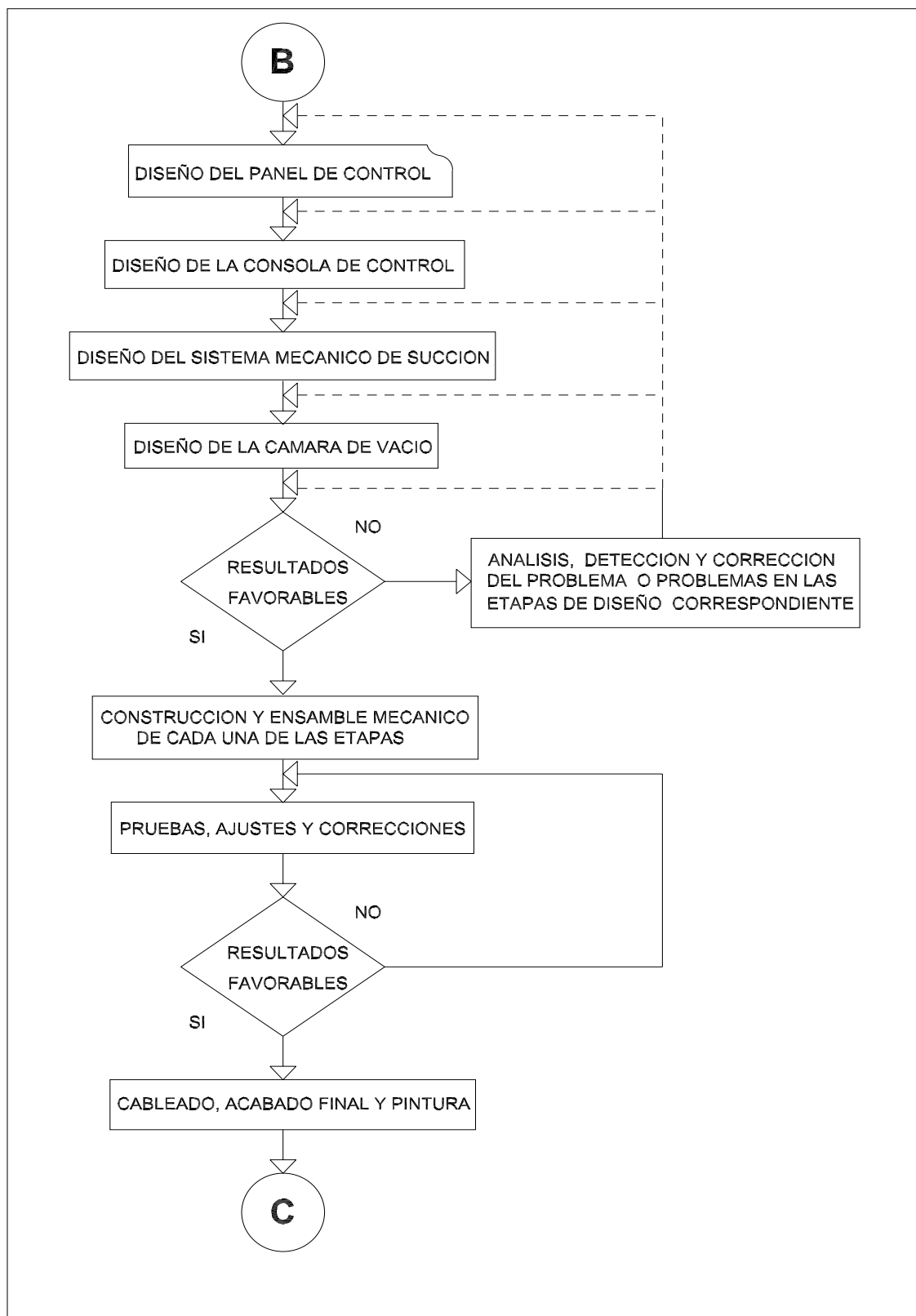


Figura 2.4: Tercer fase de diseño.



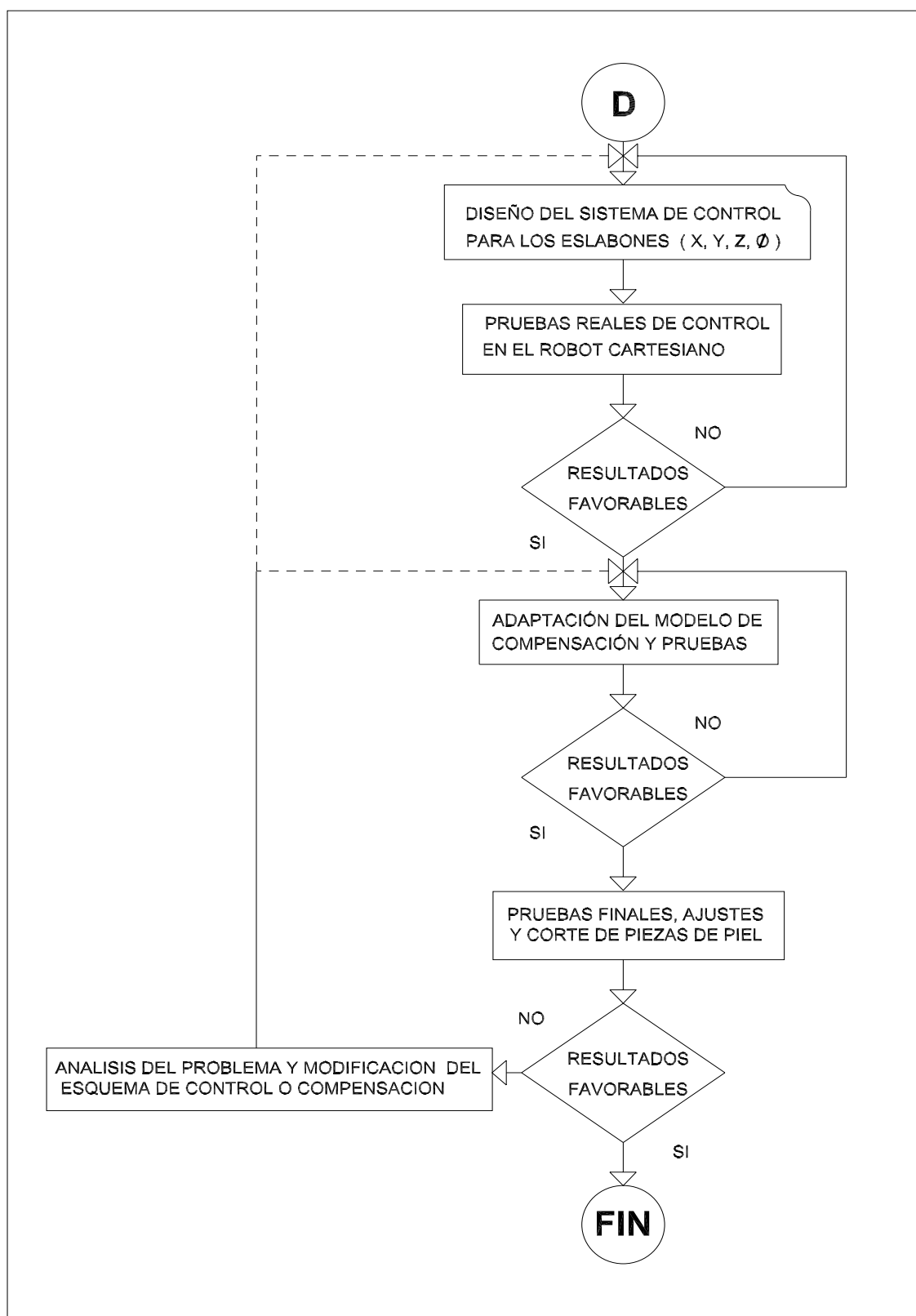


Figura 2.5: Cuarta fase de diseño.

Para complementar los aspectos conceptuales del modelo del robot, se construyó una maqueta como apoyo a la visualización de la forma física del robot, distribución de elementos mecánicos, espacios disponibles, distribución del cableado, la posible funcionalidad y operación del modelo conceptual, etc. En las Figs. 2.6 y 2.7, se muestra la maqueta donde se puede observar la distribución de algunos elementos considerados en su conformación como son los eslabones, cámara de vacío, área de trabajo, etc.



Figura 2.6: Forma de la estructura del robot y elementos considerados.

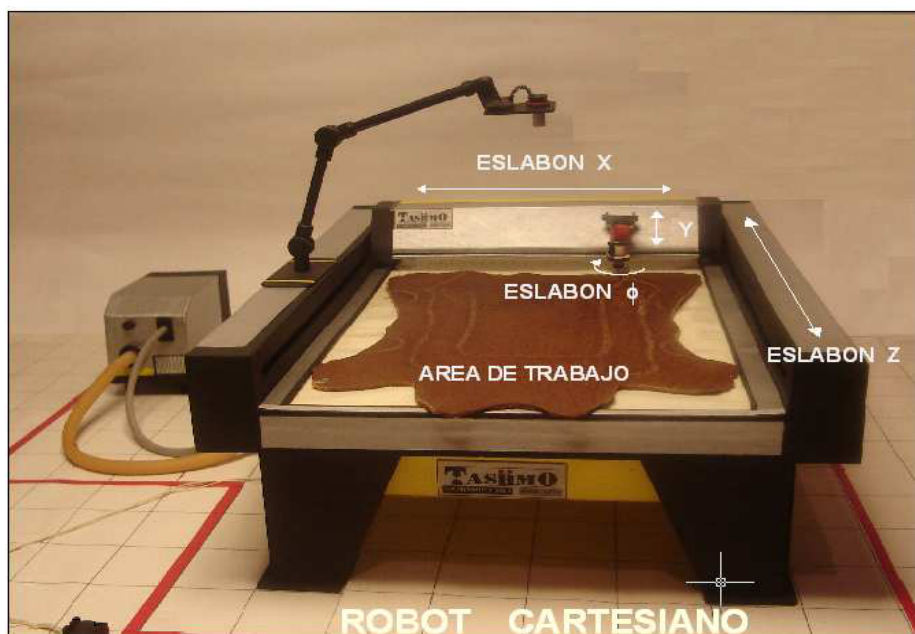


Figura 2.7: Vista de la maqueta del robot.

Conjuntando toda la información se simplificaron las fases para el diseño, construcción, ensamble y puesta en operación del robot, quedando enmarcadas en ocho fases como sigue:

1. Modelo matemático del robot.
2. Simulación del robot cartesiano.
3. Diseño del sistema mecánico.
4. Diseño y adaptación del sensor de fuerza.
5. Selección y adaptación de Actuadores.
6. Sistema de succión.
7. Sistema eléctrico.
8. Desarrollo del control.

Las especificaciones funcionales acordadas para el robot fueron las siguientes:

- Desarrollo de un robot cartesiano para cortar piel que use navaja como herramienta de corte.
- Area útil 80 x 60 cm.
- Velocidad de corte 1 m/s.
- Error de corte 1 mm.
- Software amigable para su operación y manejo.
- Asesoramiento y apoyo en mantenimiento.
- Costo aceptable en comparación con los comerciales.

## 2.4. Modelo matemático del robot

Para obtener el modelo matemático del robot cartesiano, se tomó como referencia la maqueta del modelo mostrada en las Figs. 2.6 - 2.7, la cual consta de dos eslabones prismáticos  $(x, z)$  para obtener el seguimiento de la trayectoria deseada. Un eslabón

rotacional  $\phi$  para dar la orientación al filo de la navaja en función del contorno de la pieza a cortar y un eslabón prismático  $y$  para generar y modular la fuerza en la navaja.

Los movimientos de cada uno de los eslabones ( $x, y, z, \phi$ ) que conforma el robot, se establecen y norman bajo un sistema de coordenadas de traslación y rotación que nos proporcionan información acerca de su posición y orientación individual. Este sistema de coordenadas y las transformaciones entre ellos nos permite establecer el modelo cinemático del robot. Los sistemas de coordenadas para cada eslabón del robot cartesiano, se establecen utilizando la convención de Denavit y Hartenberg [22], quedando como se muestra en la Fig. 2.8.

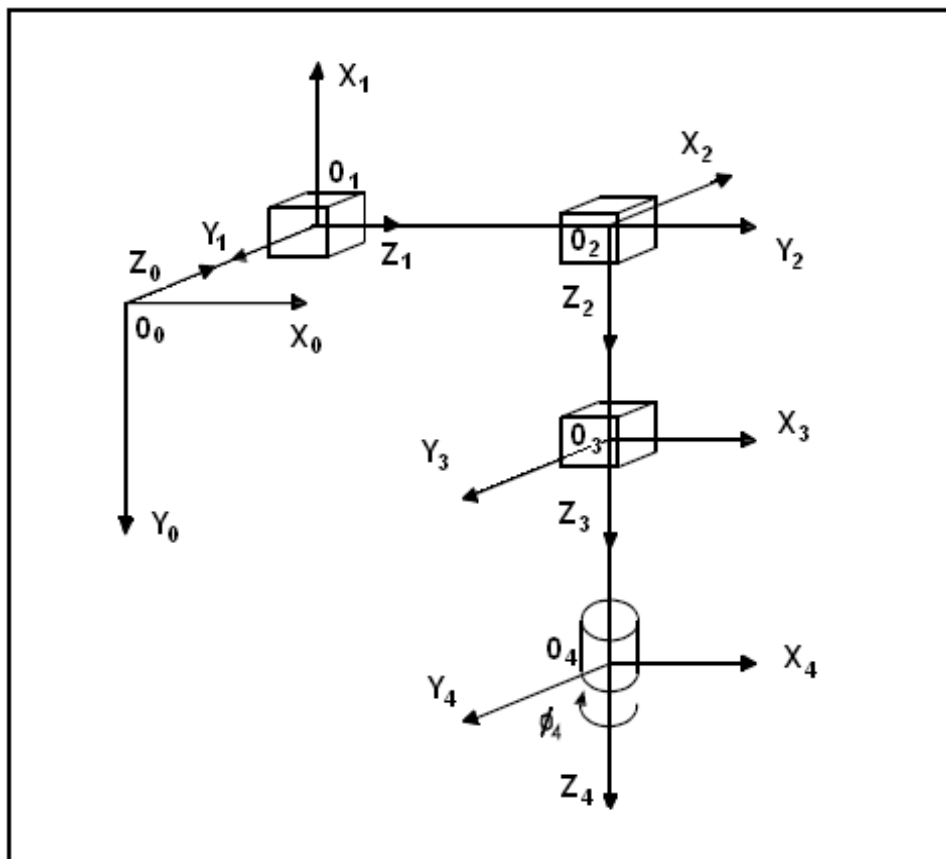


Figura 2.8: Sistema de coordenadas de los eslabones del robot cartesiano.

Estableciendo un sistema de coordenadas al centro de masa de cada eslabón como se muestra en la Fig. 2.9, es posible determinar la velocidad de cualquier punto del robot cuando está en movimiento.

Observando los movimientos de los eslabones del robot se puede apreciar la independencia entre ellos. Aprovechando esta característica, aplicamos la relación:  $F = m \times a$  para

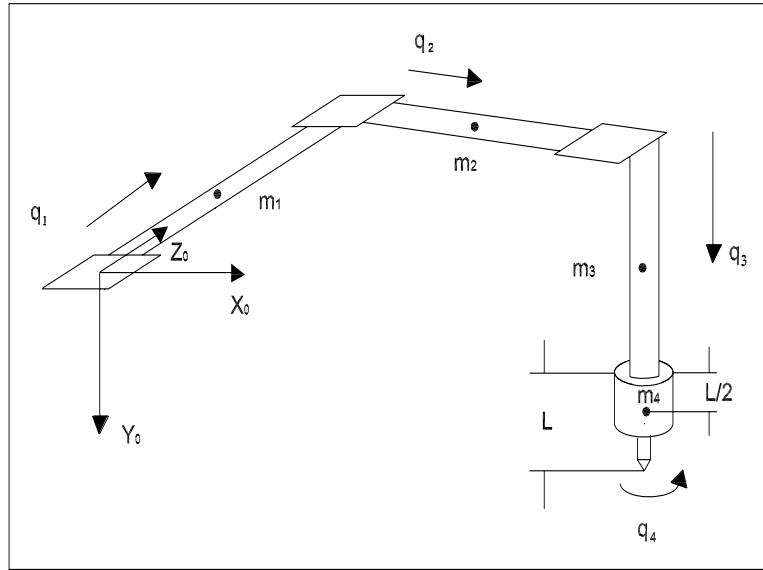


Figura 2.9: Coordenadas de los centros de masa de los eslabones del robot cartesiano.

encontrar las ecuaciones del robot cartesiano de cuatro grados de libertad. De esta manera tenemos:

$$(m_z + m_x + m_y + m_\phi)\ddot{q}_z = \tau_z \quad (2.1)$$

$$(m_x + m_y + m_\phi)\ddot{q}_x = \tau_x \quad (2.2)$$

$$(m_y + m_\phi)\ddot{q}_y - g\left(\frac{m_y}{2} + 2m_\phi\right) = \tau_y \quad (2.3)$$

$$\phi_4\ddot{q}_\phi = \tau_\phi \quad (2.4)$$

donde:

$m_x$  = masa del eslabón  $x$

$m_y$  = masa del eslabón  $y$

$m_z$  = masa del eslabón  $z$

$m_\phi$  = masa del eslabón  $\phi$

$\tau_x$  = fuerza del eslabón  $x$

$\tau_y$  = fuerza del eslabón  $y$

$\tau_z$  = fuerza del eslabón  $z$

$\tau_\phi$  = fuerza del eslabón  $\phi$

$\ddot{q}_x$  = aceleración del eslabón  $x$

$\ddot{q}_y$  = aceleración del eslabón  $y$

$\ddot{q}_z$  = aceleración del eslabón  $z$

$\ddot{q}_\phi =$  aceleración del eslabón  $\phi$

En las ecuaciones del modelo del robot (2.1 - 2.4) no se considera la fricción, dado que el modelo es para validar el diseño conceptual.

## 2.5. Modelo del motor

En cada eslabón del robot cartesiano se utiliza un servomotor de C.D. como actuador. Considerando este hecho, al modelo del robot (Eqs. 2.1 - 2.4), le falta involucrar los efectos de la ecuación dinámica del motor. Dicha ecuación, se obtiene de la malla del modelo del motor que se muestra esquemáticamente en la Fig. 2.10.

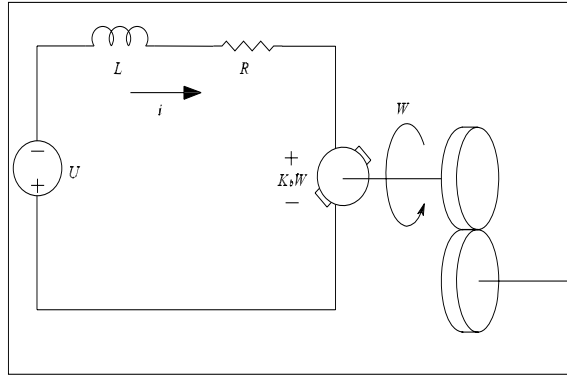


Figura 2.10: Modelo del motor.

Partiendo del modelo del motor, se obtiene la ecuación de la malla:

$$L \frac{d_i}{dt} + R_i = U - K_b W \quad (2.5)$$

Con  $L$  muy pequeña se puede despreciar la inductancia y determinar la corriente  $i$ :

$$\begin{aligned} Ri &= U - K_b W \\ i &= \frac{U - K_b W}{R} \end{aligned} \quad (2.6)$$

El torque  $\tau_m$  desarrollado por el motor se puede determinar sustituyendo  $i$  del modelo del

motor (2.6) en la relación  $\tau_m = K_m i$  para obtener:

$$\tau_m = K_m \left( \frac{U - K_b W}{R} \right) \quad (2.7)$$

Sustituyendo  $\tau_m$  de (2.7) en la ecuación  $J_m \dot{W} = \tau_m - \tau_l r$  que relaciona los torques desarrollados por la carga ( $\tau_l$ ) y el motor ( $\tau_m$ ) se obtiene:

$$J_m \dot{W} = K_m \left( \frac{U - K_b W}{R} \right) - \tau_l r \quad (2.8)$$

Considerando

$$W = \dot{q}_m, \quad r = \frac{n_m}{n_l}, \quad n_m q_m = n_l q_l, \quad q_m = \frac{n_l}{n_m} q_l, \quad U = u$$

$n_m q_m$  = del motor,  $n_l q_l$  = de la carga, y aplicándolas en (2.8) se tiene:

$$J_m \left( \frac{n_l}{n_m} \right) \ddot{q}_l = \frac{K_m}{R} \left[ u - K_b \left( \frac{n_l}{n_m} \right) \dot{q}_l \right] - \tau_l \left( \frac{n_m}{n_l} \right) \quad (2.9)$$

donde:

$J_m$  = Inercia del motor ( $Kgm^2$ )

$K_m$  = Constante del torque del motor (NM/A)

$R$  = Resistencia de armadura (Ohms)

$u$  = Voltaje del motor (Voltios)

$K_b$  = Constante de EMF inversa

El torque de la carga  $\tau_l$  se va a tomar de cada una de las siguientes ecuaciones del modelo del robot cartesiano:

$$(m_z + m_x + m_y + m_\phi) \ddot{q}_z = \tau_z \quad (2.10)$$

$$(m_x + m_y + m_\phi) \ddot{q}_x = \tau_x \quad (2.11)$$

$$(m_y + m_\phi) \ddot{q}_y - g \left( \frac{m_y}{2} + 2m_\phi \right) = \tau_y \quad (2.12)$$

$$I_\phi \ddot{q}_\phi = \tau_\phi \quad (2.13)$$

Sustituyendo separadamente 2.10 - 2.13 en (2.9) se obtienen las siguientes relaciones para cada uno de los eslabones.

$$\left[ J_{m_z} \left( \frac{n_{l_z}}{n_{m_z}} \right) \left( \frac{R_z}{K_{m_z}} \right) + d_z \left( \frac{n_{m_z}}{n_{l_z}} \right) \left( \frac{R_z}{K_{m_z}} \right) \right] \ddot{q}_z + K_{b_z} \left( \frac{n_{l_z}}{n_{m_z}} \right) \dot{q}_z = u_z \quad (2.14)$$

$$\left[ J_{m_x} \left( \frac{n_{l_x}}{n_{m_x}} \right) \left( \frac{R_x}{K_{m_x}} \right) + d_x \left( \frac{n_{m_x}}{n_{l_x}} \right) \left( \frac{R_x}{K_{m_x}} \right) \right] \ddot{q}_x + K_{b_x} \left( \frac{n_{l_x}}{n_{m_x}} \right) \dot{q}_x = u_x \quad (2.15)$$

$$\left[ J_{m_y} \left( \frac{n_{l_y}}{n_{m_y}} \right) \left( \frac{R_y}{K_{m_y}} \right) + d_y \left( \frac{n_{m_y}}{n_{l_y}} \right) \left( \frac{R_y}{K_{m_y}} \right) \right] \ddot{q}_y + K_{b_y} \left( \frac{n_{l_y}}{n_{m_y}} \right) \dot{q}_y -$$

$$g \left( \frac{m_y}{2} + 2m_\phi \right) \left( \frac{n_{m_y}}{n_{l_y}} \right) \left( \frac{R_y}{K_{m_y}} \right) = u_y \quad (2.16)$$

$$\left[ J_{m_\phi} \left( \frac{n_{l_\phi}}{n_{m_\phi}} \right) \left( \frac{R_\phi}{K_{m_\phi}} \right) + d_\phi \left( \frac{n_{m_\phi}}{n_{l_\phi}} \right) \left( \frac{R_\phi}{K_{m_\phi}} \right) \right] \ddot{q}_\phi + K_{b_\phi} \left( \frac{n_{l_\phi}}{n_{m_\phi}} \right) \dot{q}_\phi = u_\phi \quad (2.17)$$

donde:

$$d_z = (m_z + m_x + m_y + m_\phi)$$

$$d_x = (m_x + m_y + m_\phi)$$

$$d_y = (m_y + m_\phi)$$

$$d_\phi = I_\phi$$

Para simplificar, se agrupan y se re-nombran los siguientes elementos:

$$k_z = \left[ J_{m_z} \left( \frac{n_{l_z}}{n_{m_z}} \right) \left( \frac{R_z}{K_{m_z}} \right) + d_z \left( \frac{n_{m_z}}{n_{l_z}} \right) \left( \frac{R_z}{K_{m_z}} \right) \right], \quad p_z = K_{b_z} \left( \frac{n_{l_z}}{n_{m_z}} \right)$$

$$k_x = \left[ J_{m_x} \left( \frac{n_{l_x}}{n_{m_x}} \right) \left( \frac{R_x}{K_{m_x}} \right) + d_x \left( \frac{n_{m_x}}{n_{l_x}} \right) \left( \frac{R_x}{K_{m_x}} \right) \right], \quad p_x = K_{b_x} \left( \frac{n_{l_x}}{n_{m_x}} \right)$$

$$k_y = \left[ J_{m_y} \left( \frac{n_{l_y}}{n_{m_y}} \right) \left( \frac{R_y}{K_{m_y}} \right) + d_y \left( \frac{n_{m_y}}{n_{l_y}} \right) \left( \frac{R_y}{K_{m_y}} \right) \right], \quad p_y = K_{b_y} \left( \frac{n_{l_y}}{n_{m_y}} \right)$$

$$g_y = g \left( \frac{m_y}{2} + 2m_\phi \right) \left( \frac{n_{m_y}}{n_{l_y}} \right) \left( \frac{R_y}{K_{m_y}} \right)$$



$$k_\phi = \left[ J_{m_\phi} \left( \frac{n_{l_\phi}}{n_{m_\phi}} \right) \left( \frac{R_\phi}{K_{m_\phi}} \right) + d_\phi \left( \frac{n_{m_\phi}}{n_{l_\phi}} \right) \left( \frac{R_\phi}{K_{m_\phi}} \right) \right], \quad p_\phi = K_{b_\phi} \left( \frac{n_{l_\phi}}{n_{m_\phi}} \right)$$

de esta manera se obtienen las siguientes ecuaciones compactas de los eslabones, que facilitan la simulación del modelo del robot cartesiano:

$$k_z \ddot{q}_z + p_z \dot{q}_z = u_z \quad (2.18)$$

$$k_x \ddot{q}_x + p_x \dot{q}_x = u_x \quad (2.19)$$

$$k_y \ddot{q}_y + p_y \dot{q}_y - g_y = u_y \quad (2.20)$$

$$k_\phi \ddot{q}_\phi + p_\phi \dot{q}_\phi = u_\phi \quad (2.21)$$

## 2.6. Simulación del modelo del robot

Con objeto de observar el comportamiento del modelo matemático del robot, se realizaron las pruebas de simulación en el ambiente MatLab-Simulink. Despejando la aceleración en las Ecs. 2.18 - 2.21 para efectuar la simulación, se tiene:

$$\ddot{q}_z = k_z^{-1}(u_z - p_z \dot{q}_z) \quad (2.22)$$

$$\ddot{q}_x = k_x^{-1}(u_x - p_x \dot{q}_x) \quad (2.23)$$

$$\ddot{q}_y = k_y^{-1}(u_y - p_y \dot{q}_y + g_y) \quad (2.24)$$

$$\ddot{q}_\phi = k_\phi^{-1}(u_\phi - p_\phi \dot{q}_\phi) \quad (2.25)$$

$$(2.26)$$

En la simulación se utilizó un voltaje senoidal en el rango de 1-48 V. como referencia y los parámetros del cuadro 2.1.

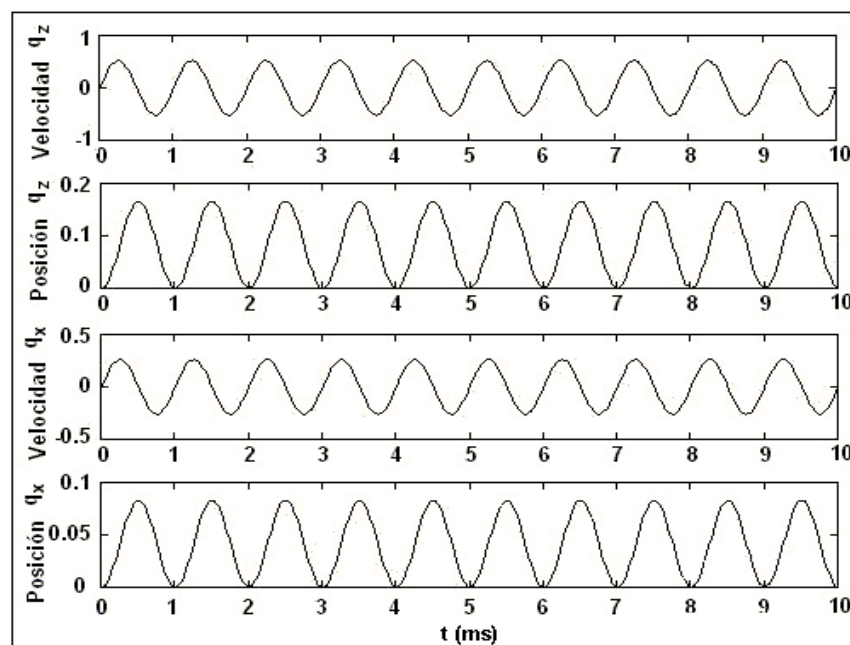
Las respuestas de posición y velocidad de los eslabones  $(x, z)$  se muestran en la Fig. 2.11, la respuesta de los eslabones  $(y, \phi)$  se muestran en la Fig. 2.12. Se puede observar que la posición y velocidad en los eslabones  $(x, z)$  no presentan distorsión considerable a lo largo de la prueba. Las respuestas de posición y velocidad en los eslabones  $(y, \phi)$  presentan distorsión en el lapso de 0 - 1.5 seg. A partir de 1.5 seg. en adelante, la distorsión en las respuestas no es considerable. Las distorsiones generadas al inicio de la prueba en los eslabones  $(y, \phi)$ , se deben a que no se implementó un sistema de control para mejorar las

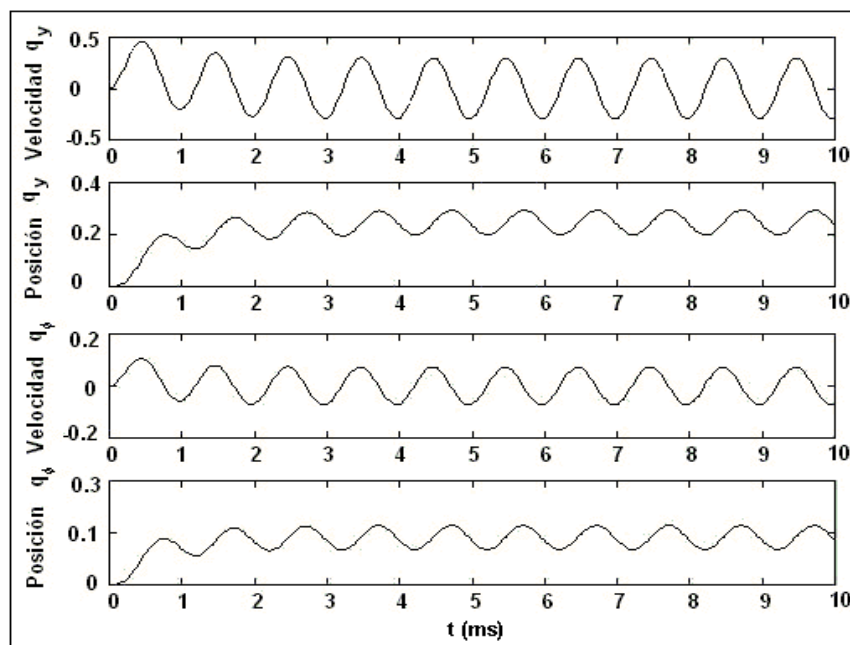
Descripción	Eslabón z	Eslabón x	Eslabón y	Eslabón $\phi$
Masa (Kg.)	63	26	1.5	0.9
Resistencia de armadura $\Omega$	1.6	1.8	1.5	1.5
Constante del torque del motor $K_m$ (N - m/A)	0.118	0.085	0.078	0.078
Momento de inercia del motor $J_a$ (kg - m <sup>2</sup> )	0.0155	0.004237	0.00494	0.00494
Momento de inercia de la carga $J_l$ (kg - m <sup>2</sup> )	0.000155	0.000049	0.000042	0.000042
Momento de inercia equivalente de los motores $J_m$ (kg - m <sup>2</sup> )	0.015655	0.004286	0.005032	0.005032
Relación de engranes $r = \frac{n_l}{n_m}$	0.1	0.1	0.1	0.1
Constante FEM (V - seg/rad)	15.5	9.2	8.4	8.4

Cuadro 2.1: Valores de los parámetros utilizados en la simulación del modelo del robot.

respuestas de posición y velocidad.

Lo importante de la simulación en esta fase de diseño, es mostrar y validar el comportamiento del modelo del robot estructurado. De aquí se concluye que los resultados obtenidos de la simulación del modelo del robot en lazo abierto son aceptables. Esto permite continuar con el proyecto para que se complemente con un modelo más real que considere la retroalimentación para ejercer las acciones de control y compensación de los efectos no-lineales como es la fricción y zona muerta.

Figura 2.11: Respuesta de posición y velocidad de los eslabones ( $z, x$ )



## 2.7. Sistema mecánico del robot

Las características funcionales y de diseño encontrados en la maqueta del robot, sustentadas en el modelo matemático y los resultados de la simulación de este, sirvieron de referencia para diseñar cada una de las partes que integran al robot cartesiano. Adicionalmente, para asegurar el correcto funcionamiento del robot y con el fin de soportar largas jornadas de trabajo con un moderado uso rudo, se determinó diseñar una estructura mecánica sencilla pero a la vez robusta.

El sistema de tracción del robot se estructuró con base en engranes, poleas de tiempo, bandas dentadas, reductores de velocidad 10:1 y cuatro servomotores de C.D. como actuadores. Como sensor de posición y velocidad se utilizó un codificador de posición de 1000 pulsos por revolución, instalado en cada motor de C.D.

Con estas consideraciones, se procedió a diseñar y construir las siguientes partes mecánicas: estructura y soportes del robot, eslabones ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ,  $\phi$ ), mecanismo de giro y soporte de la navaja, sistema de transmisión y el sistema para sensar y modular la fuerza en la navaja.

### Estructura y soportes del robot

Esta parte mecánica es la base que sostiene las partes del robot. En la Fig. 2.13, se muestra el dibujo de esta estructura con sus partes. La sección **a** consiste básicamente en una mesa adecuada con los espacios y dimensiones para ensamblar cada componente del robot. La sección **b** consta de dos estructuras que dan soporte y espacio al eslabón  $z$ . La sección **c** es la estructura del eslabón  $x$ . El componente **d** es la estructura en donde se ensamblan los eslabones  $(y, \phi)$ . Todas las estructuras se construyeron en PTR tubular # 25.

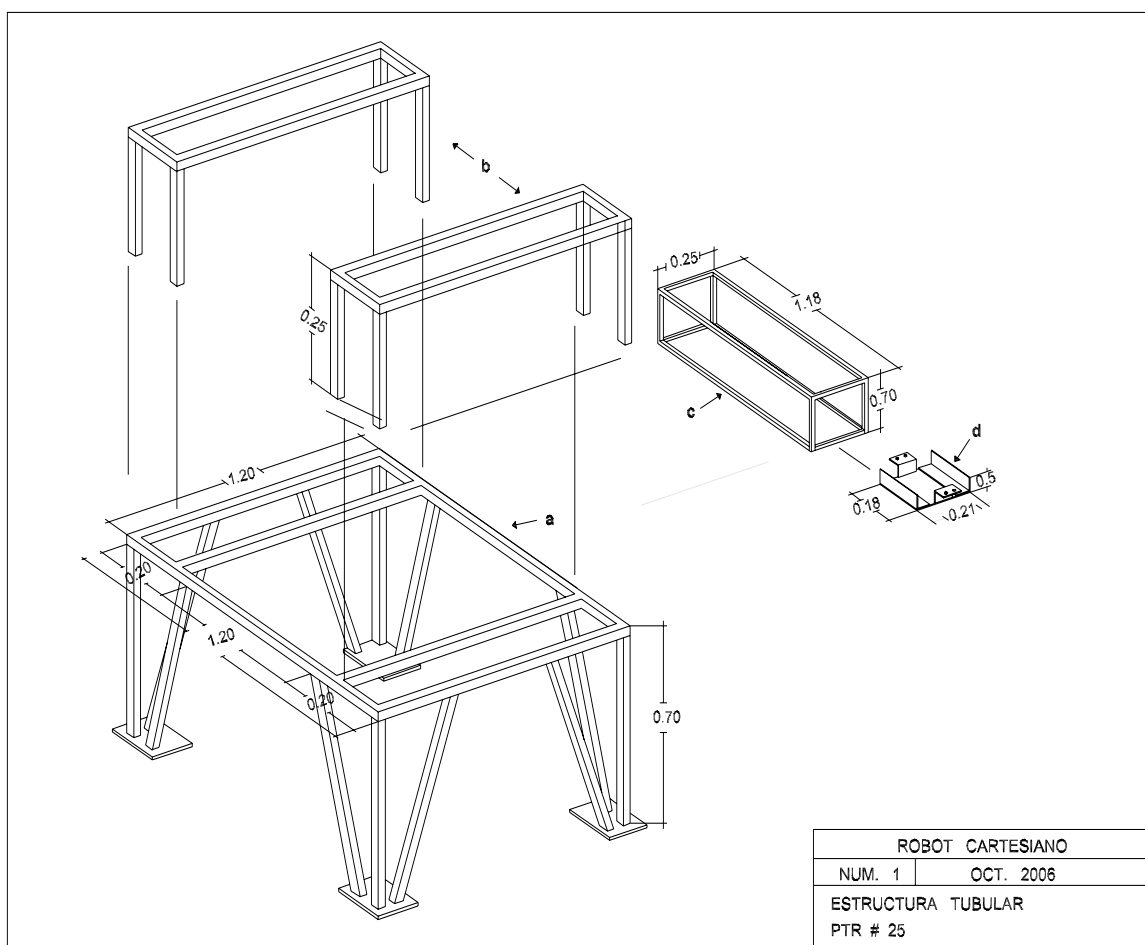


Figura 2.13: Estructura tubular del robot cartesiano.

En la Fig. 2.14 se muestra la estructura del robot adaptada con los siguientes soportes y bujes:

- a).- Base para el soporte del motor y reductor del eslabón  $z$ .
- b, c).- Bujes para los ejes de las poleas del eslabón  $z$  y eslabón  $x$  respectivamente.
- d, e).- Guías y soporte de los eslabones  $z$  y  $x$  respectivamente.
- f).- Base para el soporte del motor y reductor del eslabón  $x$ .

- g).- Base para el soporte del motor y reductor del eslabón  $y$ .
- h).- Base para el soporte del motor y reductor del eslabón  $\phi$ .
- j).- Eslabón  $y$ .
- k).- Guía interna del eslabón  $y$ .
- m, n).- Soportes para fijar los extremos de las bandas en el eslabón  $x$  y en el eslabón  $z$  respectivamente.
- p).- Baleros de rodamiento.

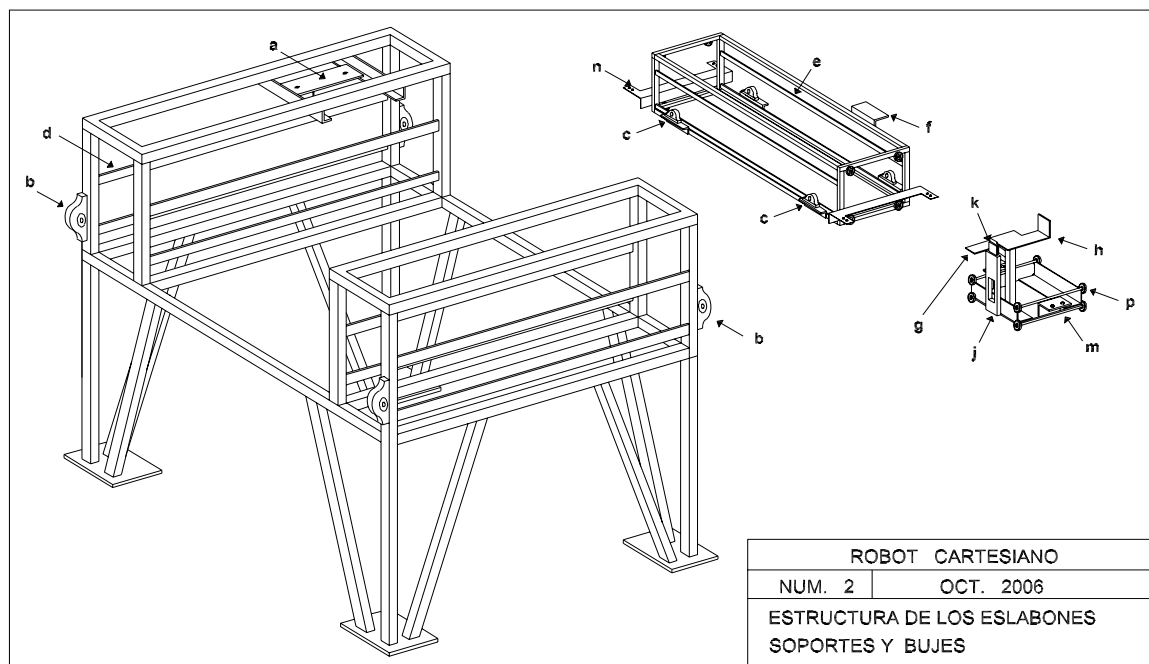


Figura 2.14: Estructura del robot con soportes

En la Fig. 2.15 se muestra la estructura del robot con los eslabones ( $x, y, z, \phi$ ) ensamblados separadamente, el sistema de transmisión y los actuadores de los cuatro eslabones ( $x, y, z, \phi$ ), (a, b, c, d) respectivamente. La Fig. 2.16 muestra la transmisión del eslabón  $x$ , la colocación de los sensores que determinan la posición cero ("home") (a), y el tope para el desplazamiento máximo (b). En la Fig. 2.17 se muestran los eslabones ( $x, y, \phi$ ) totalmente ensamblados. La Fig. 2.18 da una mejor idea del ensamble de los eslabones ( $y, \phi$ ). También se puede observar la colocación del sensor de fuerza en el extremo superior del eslabón  $\phi$ . En la Fig. 2.19 se muestra la transmisión a base de engrane y piñón del eslabón  $\phi$  (Fig. 2.19-1a), y el sistema de cremallera del eslabón  $y$  (Fig. 2.19-3b).

El eslabón  $\phi$  (Fig. 2.19-5) está montado en una pieza con guías internas y cremallera en la parte posterior (Fig. 2.19-3). En esta parte, en el interior de las guías se coloca la parte

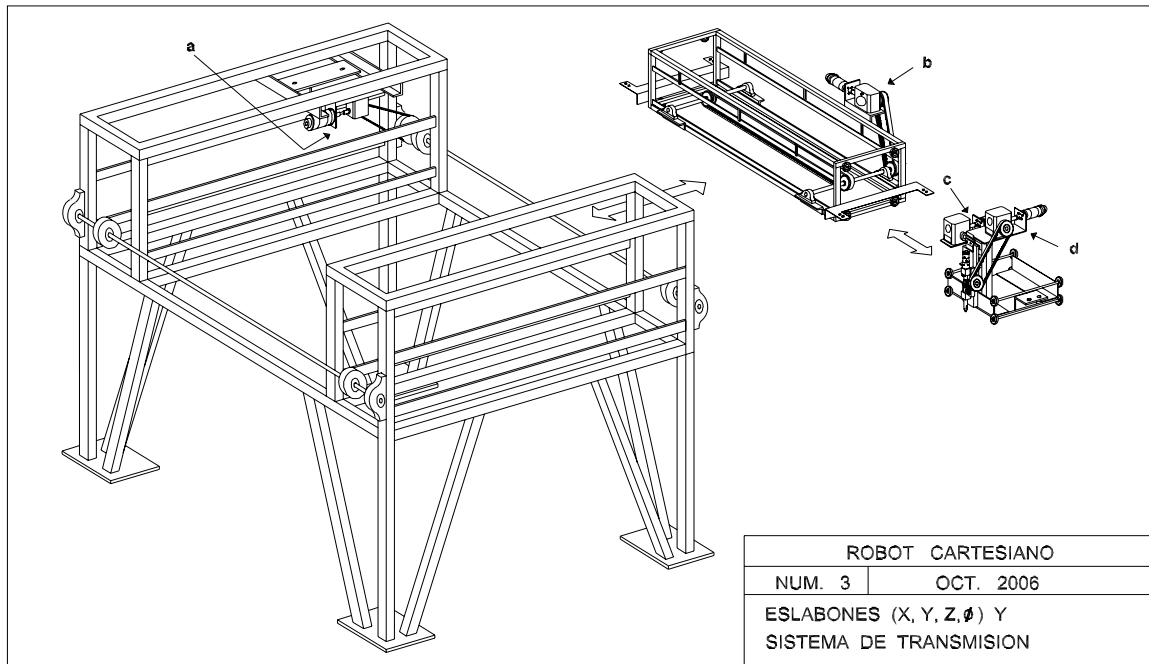


Figura 2.15: Estructura del robot y eslabones  $(x, y, z, \phi)$ .

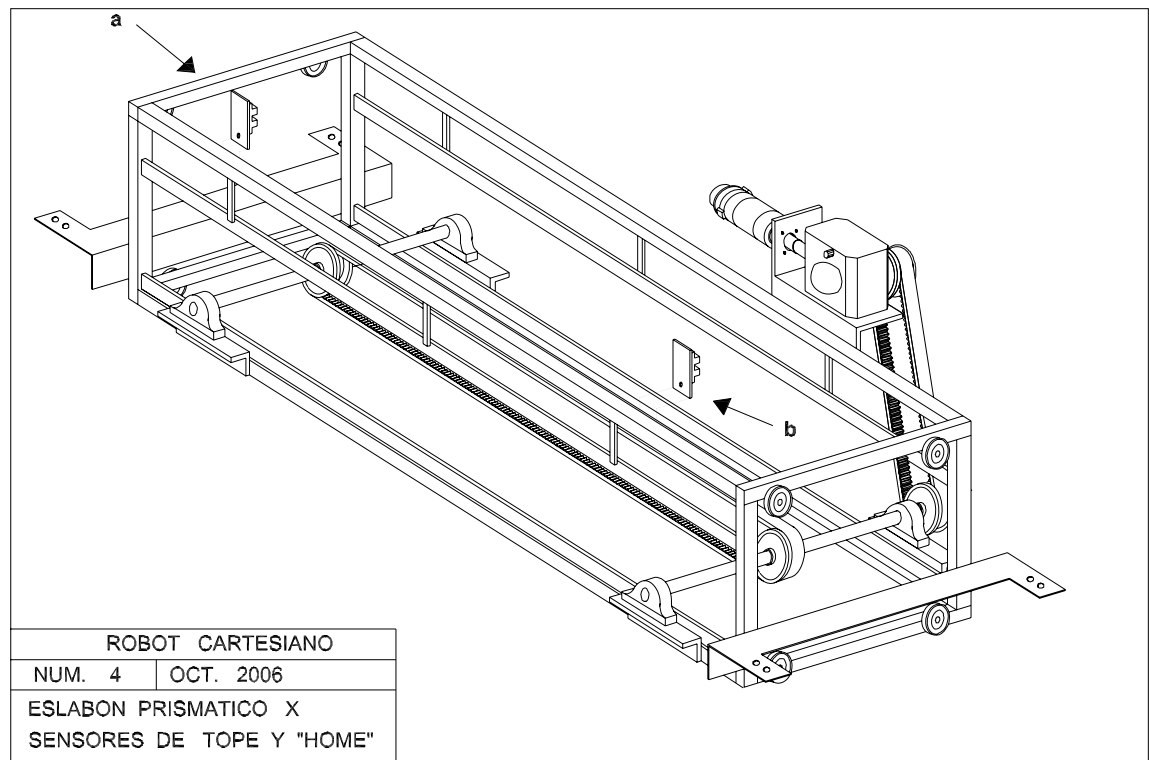


Figura 2.16: Eslabón prismático  $x$ .

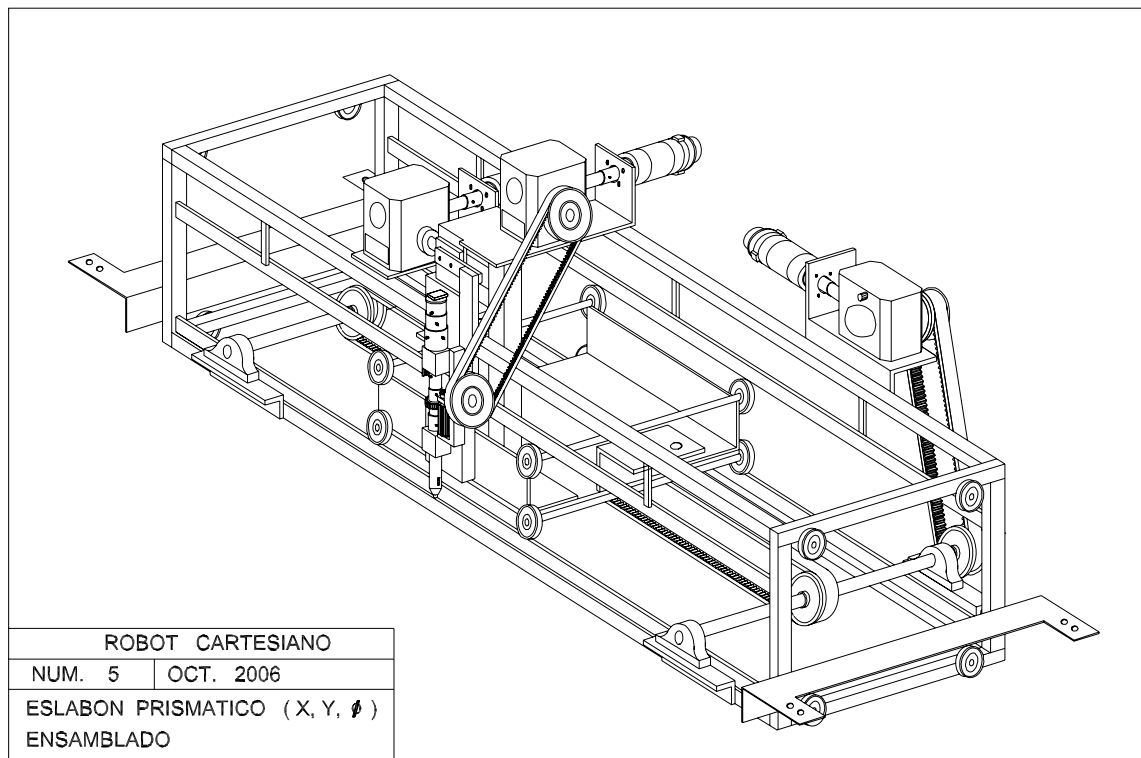


Figura 2.17: Eslabones prismáticos ( $x, y$ ) y eslabón  $\phi$ .

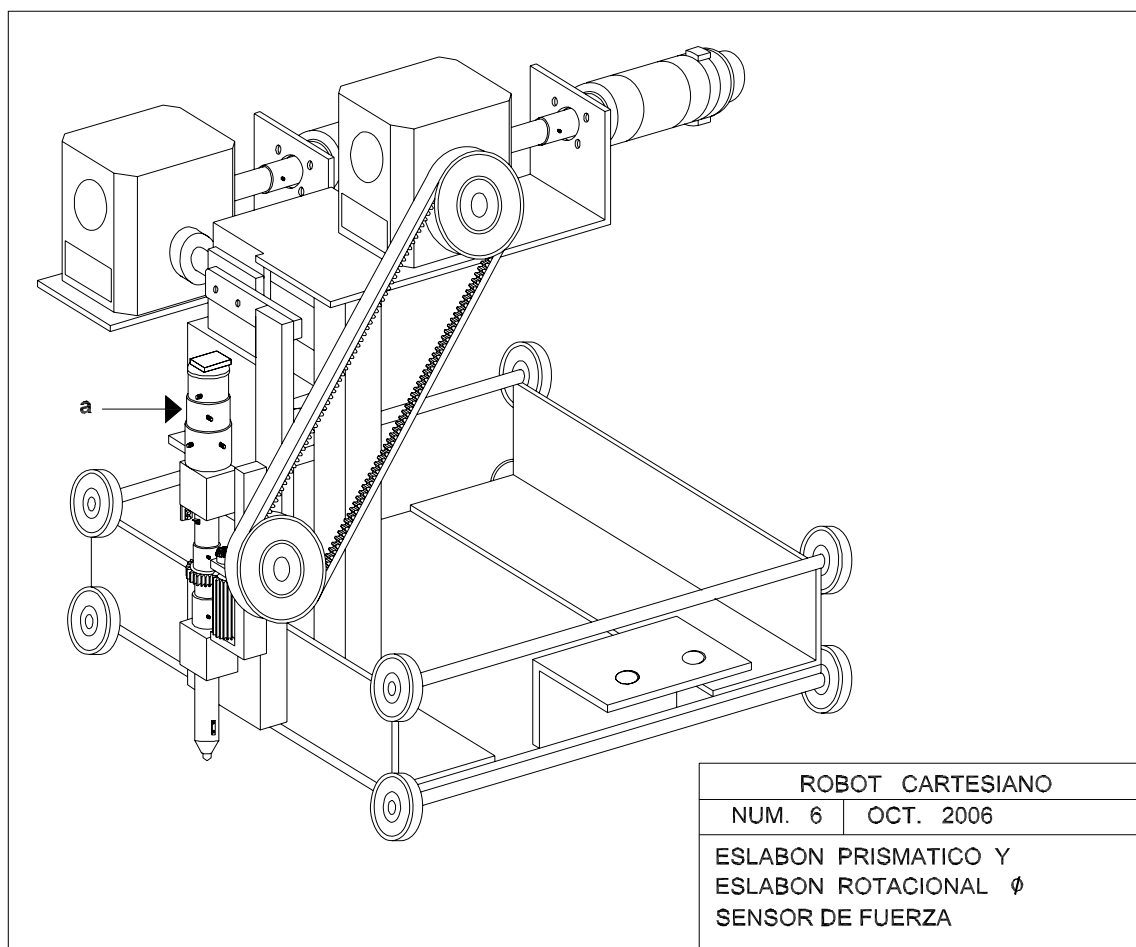


Figura 2.18: Eslabón prismático  $y$ , eslabón rotacional  $\phi$  y sensor de fuerza.

mostrada en la Fig. 2.19-4. Esta pieza es fija y es donde se desliza el eslabón  $y$ . Además, soporta la transmisión del eslabón  $\phi$  como se muestra en la Fig. 2.19-1.

En la Fig. 2.19-5c se puede ver la colocación del sensor de posición "home" del eslabón  $\phi$  y el soporte de la navaja (Fig. 2.19-5d). La Fig. 2.20 muestra al robot cartesiano ensamblado

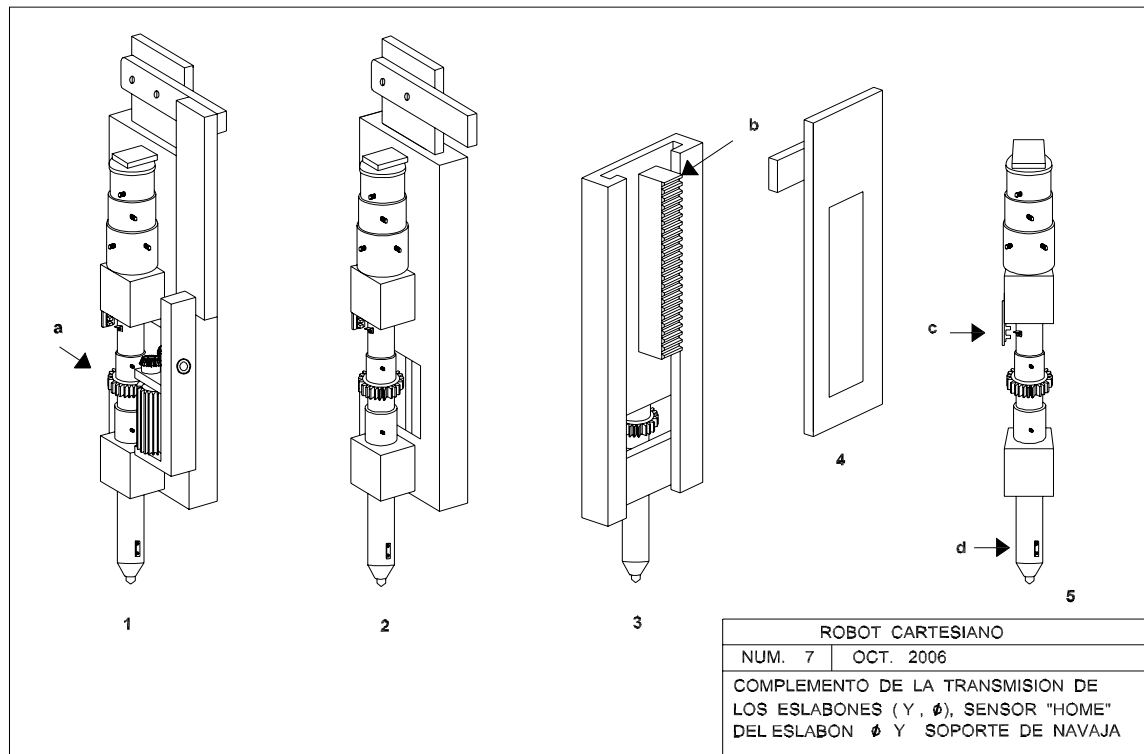


Figura 2.19: Complemento de transmisión y sensores.

con todos los componentes requeridos:

- a).- Controlador Mid 7654 de cuatro canales.
- b).- Medidor de presión inversa.
- c).- Bomba de vacío.
- d).- Contenedor de las interfases A, B y C.
- e).- Fuente de alimentación de  $\pm 5$  y  $\pm 12$  VCD.
- f).- Tanque para generar el vacío.

En la Fig 2.21 se muestra el robot terminado. El panel de control (Fig 2.21-a) tiene los controles manuales básicos para usuario: prender/apagar, suspender proceso/continuar y paro de emergencia.



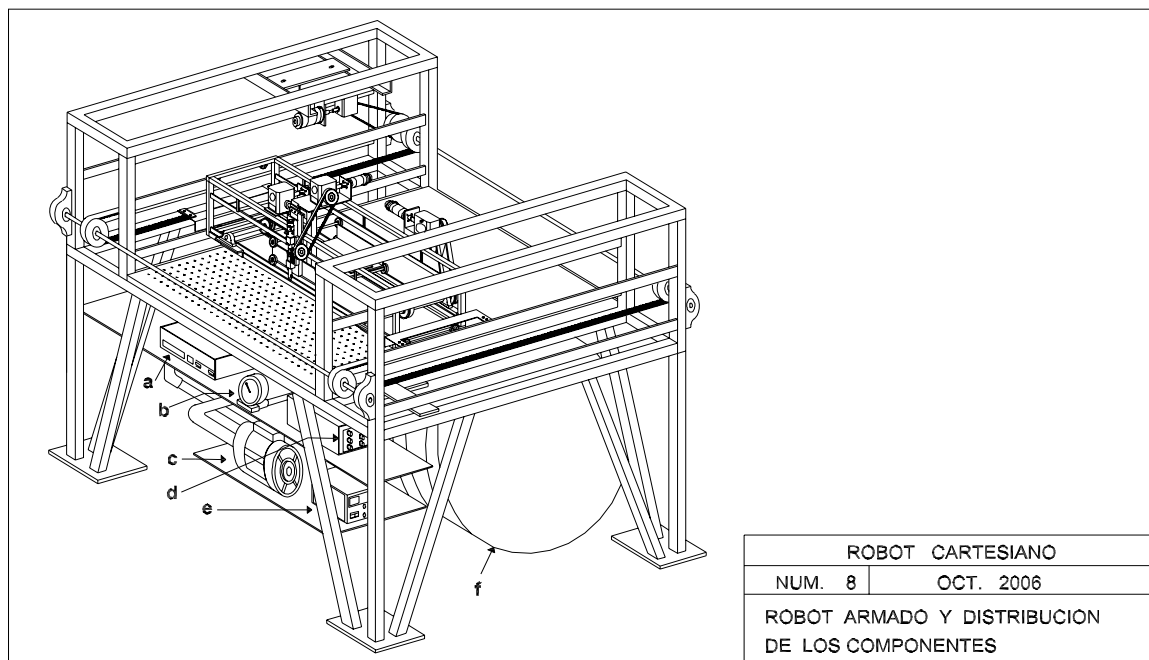


Figura 2.20: Componentes del robot cartesiano.

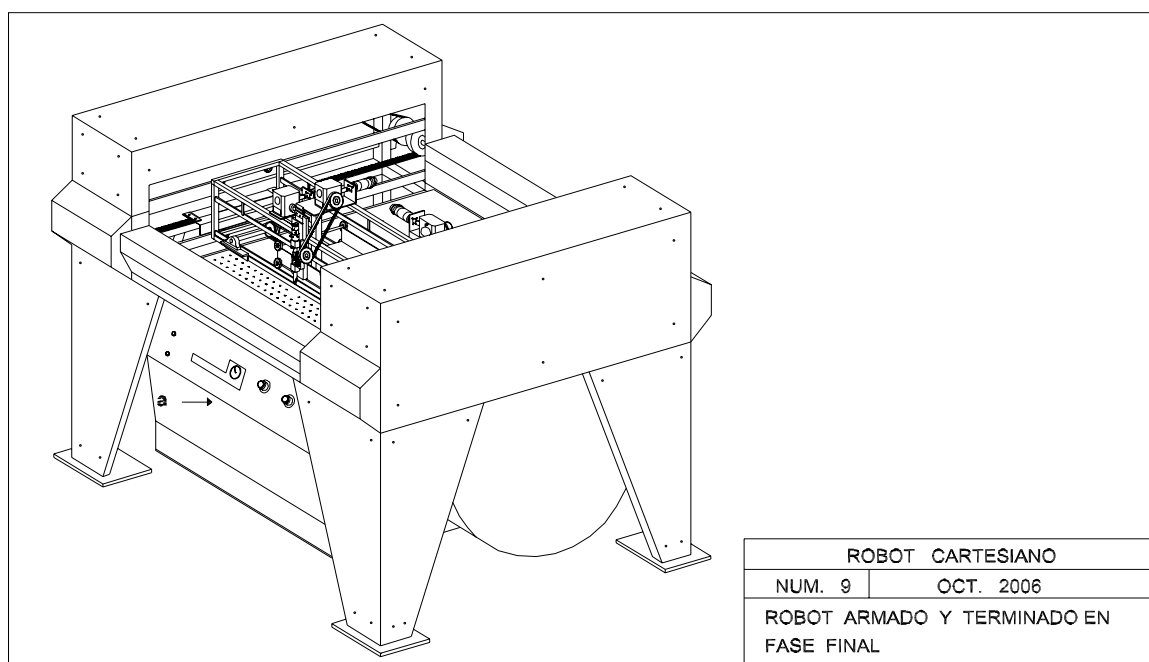


Figura 2.21: Robot cartesiano terminado.

## 2.8. Sensor de fuerza

El corte de piezas sobre piel requiere de dos fases. Inicialmente, en estado estático se aplica una fuerza  $F_p$  para perforar la piel. El siguiente paso consiste en disminuir la fuerza de perforación  $F_p$  hasta el umbral de corte propio de la piel  $F_u$ , manteniéndola constante. Bajo estas condiciones se inicia el deslizamiento de la navaja sobre la piel uniformemente. A manera de esquema, las fuerzas  $F_p$  y  $F_u$  en el proceso de corte se representan idealmente en la Fig. 2.22. Un factor importante que se debe considerar es que esas fuerzas varían en

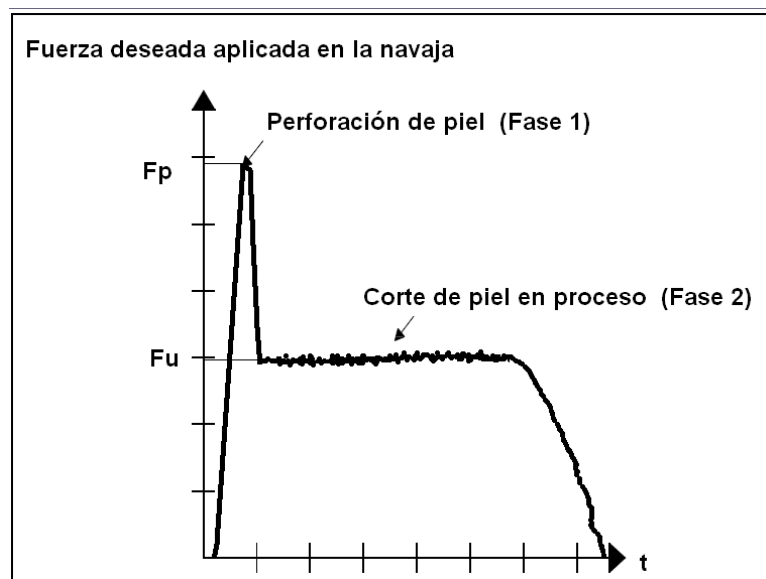


Figura 2.22: Fases de la fuerza aplicada en la navaja al cortar piel.

función del tipo de piel, es decir del grosor y dureza de la piel. Solventando estas propiedades que se presentan en la piel al momento de ser cortada, se prolonga la vida útil de la navaja obteniéndose cortes más uniformes evitando las rasgaduras y marcas.

Con objeto de dosificar las fuerzas que se aplican en la navaja al efectuar el corte de piel, se determinó diseñar un sistema modulador de fuerza en el eslabón  $y$  del robot. De esta manera se puede implementar un sistema de control de lazo cerrado para dosificar apropiadamente la acción de las fuerzas  $F_p$  y  $F_u$  en la navaja, en función de los requerimientos reales del corte.

Para medir el rango de fuerza ejercida por el eslabón sobre la navaja, se requiere la adaptación de un transductor que transforme esa fuerza mecánica en un rango de señal eléctrica apropiada para el manejo y su conversión a señal digital para su proceso (Fig.

2.23).

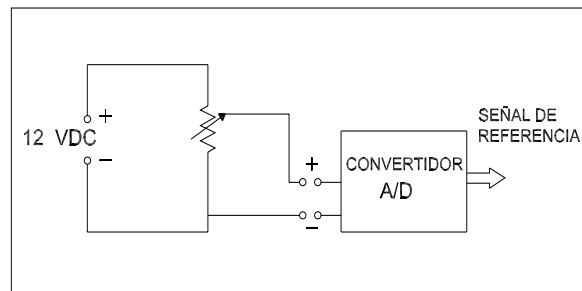


Figura 2.23: Esquema del modelo eléctrico del sensor de fuerza.

En este caso específico se utilizó un reóstato adaptado al sistema mecánico de desplazamiento del eslabón  $y$  como se muestra en la Fig. 2.24. Cuando el eslabón  $y$  baja el soporte de la navaja, este comprime un resorte y mueve la perilla del reóstato por medio de un pivote conectado al vástago del soporte de la navaja. Con este sistema se obtiene la conversión de fuerza en señal eléctrica. En la aplicación real, el voltaje requerido varía en el rango de 0 a 3 V.D.C. Este rango de voltaje es suficiente para modular y ajustar diferentes niveles de fuerza en la navaja. El rango de fuerza requerido para cortar piel fue fijado y ajustado con base en experimentos de prueba y error con diferentes tipos de pieles. La sincronía en tiempo real de la modulación de fuerza con la fase de corte que se está ejecutando es por medio de software. En la Fig. 2.25 se muestra el encapsulado del sensor de fuerza.

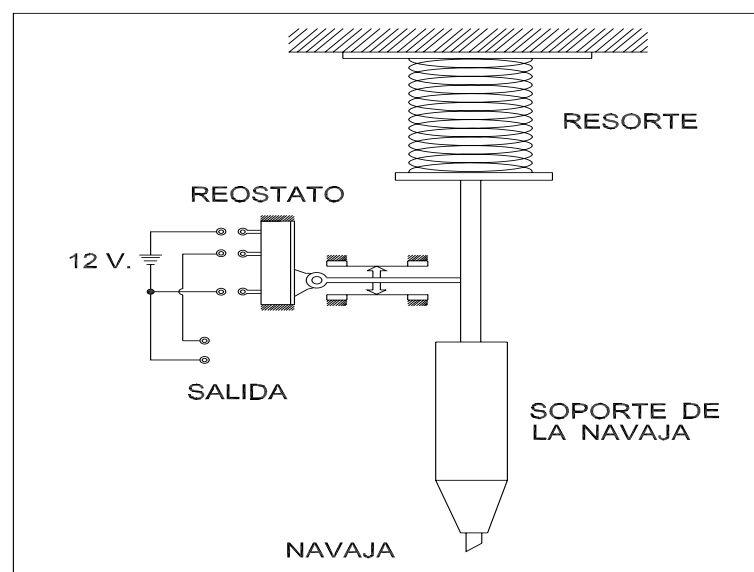


Figura 2.24: Esquema del sensor de fuerza.

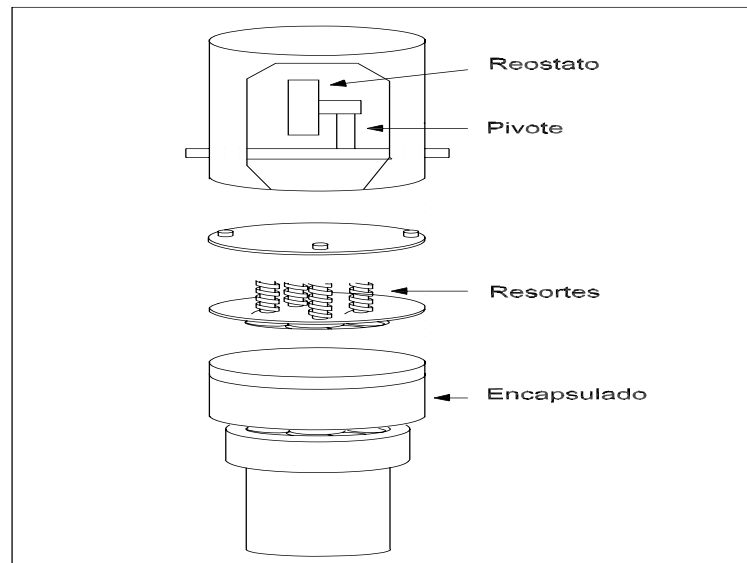


Figura 2.25: Encapsulado del sensor de fuerza.

## 2.9. Actuadores

La selección y adaptación de los actuadores para este robot estuvo en función del equipo disponible en el Laboratorio de Robótica de la Facultad de Ingeniería. De esta forma, se dispuso del controlador existente MID 7654 de cuatro canales de Nacional Instruments. Es por este motivo que en el robot se utilizaron servomotores de C.D. con decodificadores de posición de 1000 pulsos por revolución.

Para determinar la potencia que se requiere en el motor para mover el eslabón z, se utiliza el diagrama de cuerpo libre del eslabón z y las fuerzas  $F_a$ ,  $F_c$ ,  $F_{cr}$ ,  $W$  y  $N$  que actúan sobre él. Esta representación se muestra en la Fig. 2.26.

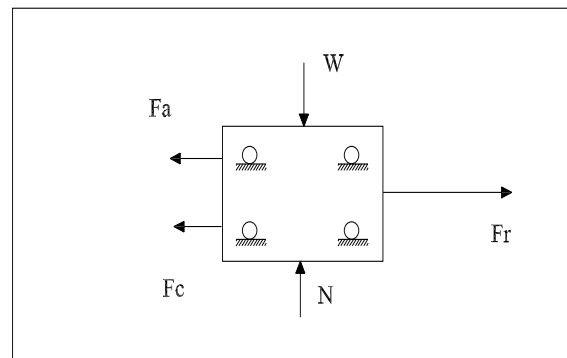


Figura 2.26: Fuerzas que actúan en el eslabón z.

donde:

$$W = \text{Peso del eslabón (196 kg m/s}^2\text{)}$$

$F_a$  = Fuerza de rozamiento ( $\mu N$ ).

$F_r$  = Fuerza requerida para deslizar el eslabón 1 m/s.

$F_c$  = Fuerza de arrastre para cortar la piel (78.4 N)

$N = W$  (Fuerza normal debido al peso).

De acuerdo a estas consideraciones, se aplicó el principio de trabajo y energía:

$$\text{Trabajo} = \text{Componente de la fuerza (N)} \times \text{desplazamiento (Mts.)} \quad (2.27)$$

$$\text{Energía cinética} = 1/2mv^2 \quad (2.28)$$

en el eslabón z de la Fig. 2.27, al desplazarse de la posición  $P_1$  a la posición  $P_2$  en un segundo, obteniéndose como componente de la fuerza:  $(F_r - F_a - F_c)$  en el eslabón z.

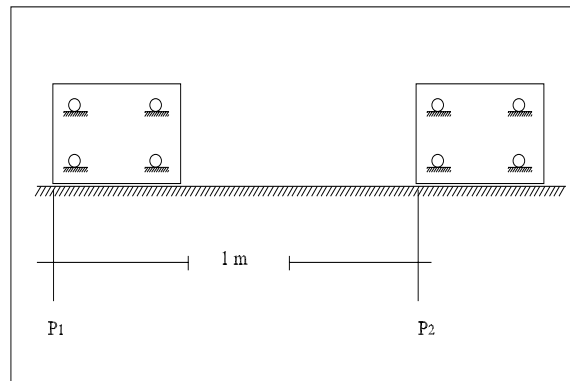


Figura 2.27: Desplazamiento de  $P_1$  a  $P_2$  del eslabón z a una velocidad de 1 m/s.

De esta manera, de (2.27), (2.28) y la componente de la fuerza en el eslabón z se tiene:

$$(F_r - F_a - F_c)de = (1/2)mv^2 \quad (2.29)$$

donde:

$F_a = \mu N$        $\mu$  = coeficiente de fricción.       $de$  = desplazamiento (1 m).

$\mu = 0.25$        $N = W$        $F_a = (0.25)(196)N$        $F_a = 49N$ .

Sustituyendo  $F_a$ ,  $F_c$  y  $v = 1m/s$  en (2.29) y despejando  $F_r$ , se tiene que la fuerza  $F_r$  necesaria para mover el eslabón z a una velocidad máxima de 1 m/s es de 137 N.

De acuerdo con relación:  $\text{Potencia} = (\text{Fuerza}) (\text{Velocidad})$  y la equivalencia de  $1 \text{ hp} = 746 \text{ Wts}$ , se tiene que la potencia del servomotor que se requiere en este eslabón de  $0.18 \text{ hp}$ .

Repetiendo el mismo procedimiento para los eslabones restantes, se obtienen las potencias del Cuadro 2.2.

Eslabón	Potencia calculada	Potencia máxima disponible	Peso del eslabón (kg)
x	0.14	0.20	26
y	0.09	0.16	1.5
z	0.18	0.25	63
$\phi$	0.09	0.16	0.9

Cuadro 2.2: Potencia de los servomotores en hp.

## 2.10. Sistema de succión

Para cortar la piel por medio de navaja, se requiere que la piel se mantenga extendida, uniforme y fija hasta la terminación del último corte. Una forma de lograrlo es por medio de succión generada por un sistema de vacío. Los elementos que conforman el sistema de vacío diseñado para el robot son:

- Area de trabajo.
- Tanque de vacío.
- Sistema automático de encendido.
- Bomba de vacío.

### Area de trabajo.

Es el área donde se coloca la piel para ser cortada por el robot. Está integrada por una superficie plana plástica con perforaciones de 1.6 mm de diámetro, distribuidas cada 1 cm en forma de cuadrícula. Una parte de la cara inferior de esta superficie plana, cubre totalmente la cámara de vacío para sellarla. Esta cámara sellada construida en lámina calibre # 22, sirve para distribuir uniformemente la succión en cada una de las perforaciones. En la Fig. 2.28 se ilustra en forma esquemática el área de trabajo.

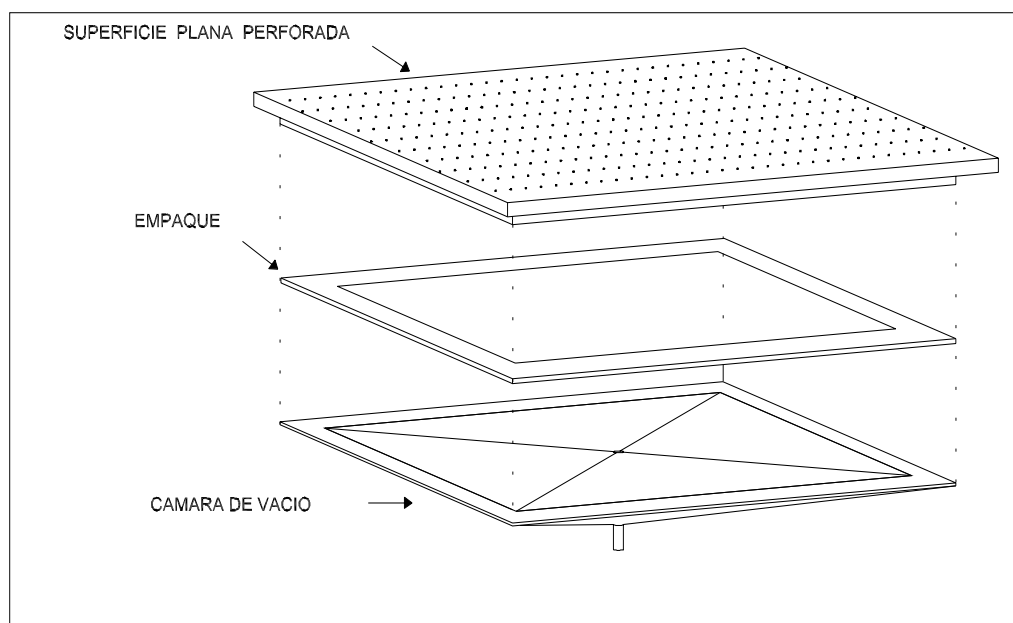


Figura 2.28: Ilustración del área de trabajo

**Tanque de vacío.**

Para generar la succión se utilizó un tanque de trescientos litros de capacidad, adaptado con válvulas solenoide, de paso y de membrana. La bomba de vacío se conecta en el extremo donde está la válvula de membrana. Esta válvula es unidireccional y evita que el tanque se llene de aire cuando la bomba está apagada. El otro extremo de la tubería se conecta a la cámara de vacío. En esta sección, la llave de paso se utiliza para ajustar y fijar la fuerza de succión que se requiere. La válvula solenoide acciona la succión en forma automática cuando es requerida por el robot para cortar piel. En la Fig. 2.29 se muestra la distribución de los elementos mencionados.

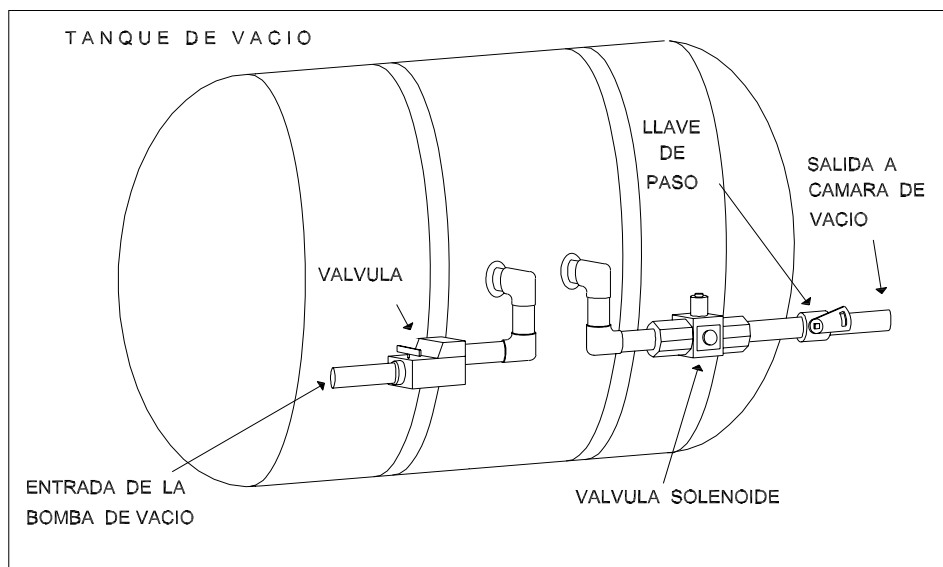


Figura 2.29: Tanque adaptado para generar el vacío

**Sistema automático de encendido.**

Este sistema (Fig. 2.30) prende o apaga la bomba de vacío en función de los límites mínimo y máximo de presión inversa previamente fijados. En la aplicación, el límite máximo se fijó 40 psi y el mínimo 30 psi. El sistema está integrado por un medidor de presión inversa comercial que toma muestras del interior del tanque de vacío. Cuando la presión inversa llega a 40 psi, el medidor de presión apaga la bomba. Si la presión baja a 30 psi o es menor, se acciona la bomba hasta llegar al límite máximo de presión inversa. El accionar de la bomba de vacío es por medio de un relevador de 120 V.C.A. de entrada y salida.



La bomba para generar el vacío de succión es un motor sencillo de 120 V.C.A. de 1 hp de potencia, el cual es energizado por el relevador. De esta manera, el sistema de succión quedó conformado como se ilustra en la Fig. 2.31.

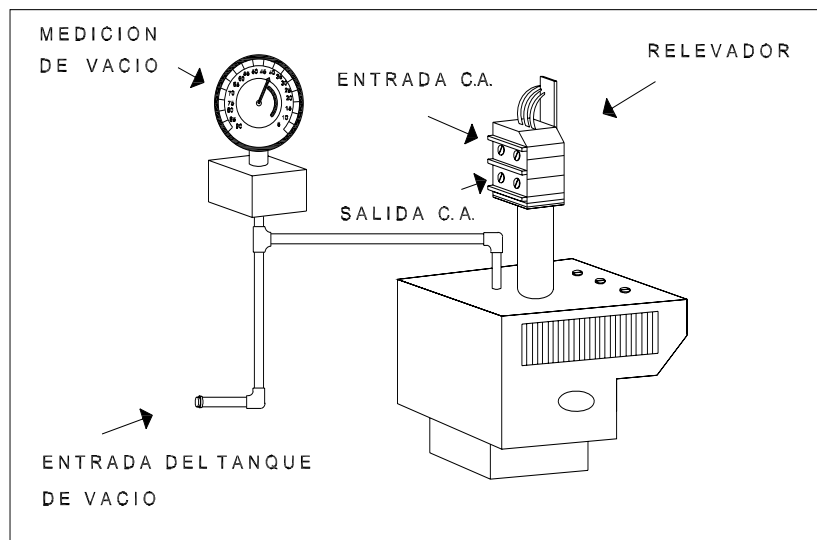


Figura 2.30: Ilustración del sistema automático de encendido

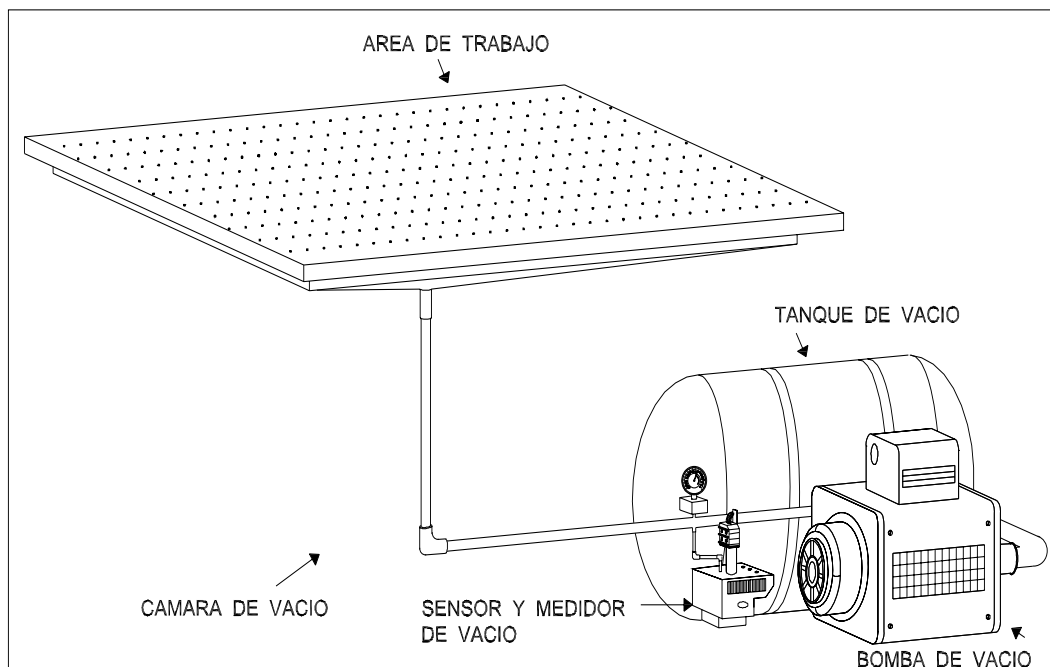


Figura 2.31: Configuración esquemática del sistema de succión

## 2.11. Sistema eléctrico del robot

El sistema eléctrico del robot en este caso, comprende la adaptación, instalación y cableado de cada elemento eléctrico que fue seleccionado para ser integrado en el robot cartesiano. Los componentes considerados son:

- Controlador.
- Motores.
- Sistema automático de encendido.
- Sensor de límite.
- Sensor de fuerza.
- Decodificadores de posición.
- Interfaz de acoplamiento.
- Sistema automático de encendido.
- Motor o bomba de vacío.
- Válvula solenoide.
- Fuente de alimentación.

### **Controlador.**

Se adaptó el controlador MID 7456 de National Instruments para el control de los motores de los cuatro eslabones. Este control dispone de cuatro canales con salida de  $\pm 48$  V.C.D. modulados por pulsos. Cada canal cuenta con una entrada para decodificador óptico de posición, convertidor analógico-digital, convertidor digital-analógico y las entradas para fijar los límites de los desplazamientos.

### **Motores.**

Se conectaron al MID los cuatro motores de V.C.D., uno de cada eslabón ( $x, y, z, \phi$ ). Los motores cuentan con un decodificador óptico de posición, los cuales fueron conectados al controlador MID 7654 para retroalimentar los desplazamientos.

**Sensores de límite.**

Para fijar el desplazamiento efectivo de los eslabones se requiere tener las referencias de donde debe iniciar el desplazamiento ("home") y donde debe terminar. Para este fin se utilizaron paquetes de transistores infrarrojos encapsulados TIL 144.

**Sensor de fuerza.**

Este sistema Requiere 12 V.C.D. de alimentación. La salida es de 0 a 3 V.C.D.

**Decodificadores de posición.**

Se utilizaron cuatro decodificadores modelo: M21-1000/0 de Danaher Controls. El voltaje requerido para cada decodificador es de 5 V.C.D.

**Interfaz de acoplamiento.**

Se utilizaron tres diferentes interfases para acoplar los diferentes niveles de voltaje obtenidos en los circuitos: circuito para fijar los límites de desplazamiento de cada eslabón (interfaz B), circuito para la cuadratura de las salidas de los decodificadores de posición (interfaz A) y circuito para activar la válvula solenoide de 120 V.C.A. (interfaz C)

**Sistema automático de encendido.**

Este sistema requiere únicamente ser energizado con 120 V.C.A. y el botón de encendido/apagado para seguridad.

**Motor o bomba de vacío.**

Motor de 120 V.C.A. de 1 hp de potencia.

**Válvula solenoide.**

Válvula de 120 V.C.A.

**Fuente de alimentación.**

Se instaló una fuente de voltaje de  $\pm 12$  y  $\pm 5$  V.C.D. para energizar los circuitos de las tres diferentes interfaces que se adaptaron en el robot.

La distribución y relación de los componentes eléctricos instalados en el robot, se muestran en forma gráfica en la Fig. 2.32.

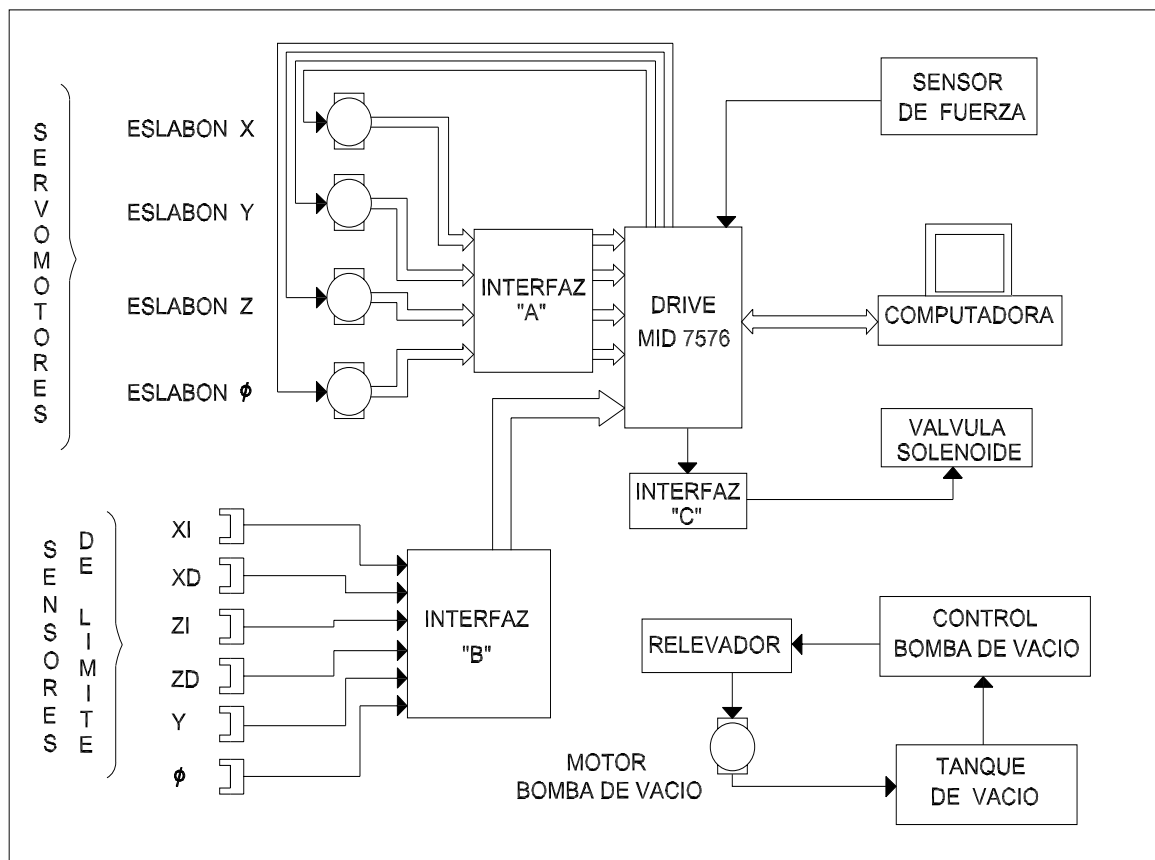


Figura 2.32: Diagrama esquemático del sistema eléctrico del robot.

Para facilitar el mantenimiento preventivo y correctivo del equipo, en el diseño y construcción mecánica del robot se consideró el ensamble en forma modular de las partes mecánicas y eléctricas. En la adaptación e implementación de cada una de estas etapas se utilizaron elementos y componentes de fácil adquisición en la localidad.

Se puede mencionar que en cada una de las etapas desarrolladas, se efectuaron pruebas en las cuales se presentaron múltiples problemas y situaciones no previstas. Finalmente, todas ellas fueron superadas, terminadas y probadas satisfactoriamente.

## Capítulo 3

# Control en la presencia de no linealidades duras

### 3.1. Introducción

En servo aplicaciones los efectos de las no linealidades tales como fricción de Coulomb y zona muerta (Fig. 3.1), reducen la precisión de los desplazamientos en los sistemas mecánicos. La fricción y zona muerta son fenómenos físicos que se presentan al generarse desplazamientos prismáticos o rotacionales en mecanismos con tracción de poleas, engranes, cremalleras, etc. Su comportamiento no lineal deteriora la precisión de los desplazamientos de las partes mecánicas involucradas, tanto en posicionamiento como en velocidad. En el caso específico del robot cartesiano, estos efectos no lineales generan desplazamientos erróneos de posición y velocidad en cada uno de los eslabones del robot. Finalmente, los errores de cada eslabón se acumulan en el desplazamiento del efector, sumándose para empeorar la trayectoria deseada de este.

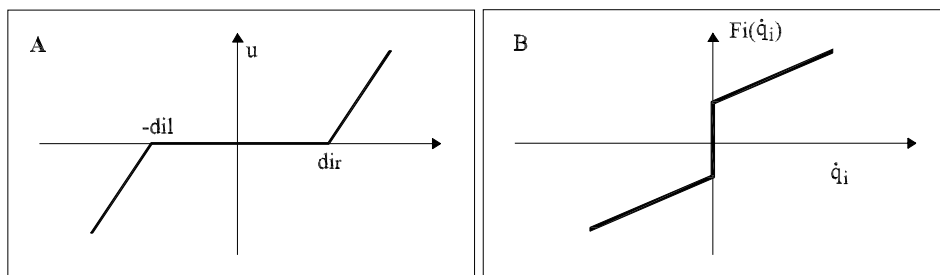


Figura 3.1: Zona muerta (A) y fricción de Coulomb y viscosa (B).

En primera instancia, estas no linealidades pueden ser disminuidas en gran medida optimizando el diseño mecánico del sistema, así como mejorando el maquinado de las piezas que lo integran. Dependiendo de la demanda de precisión y velocidad en los desplazamientos, puede ser necesario minimizar estos efectos utilizando diversas estrategias de control y compensación, por medio de técnicas avanzadas de control.

Las técnicas o esquemas de control más conocidos para este tipo de servo aplicaciones son los controles tipo PD debido a su simplicidad, robustez y buen desempeño. Un excelente ejemplo de las aplicaciones de este tipo de control son los manipuladores robóticos [4, 5, 7, 15, 16, 17, 20], los cuales influyen fuertemente a los últimos desarrollos y diseños metodológicos de control basados en pasividad [13].

Un típico control PD en su forma más simple está dado por  $u = K_p(\dot{\tilde{x}}) - K_D(\tilde{x})$ , donde  $K_p$  y  $K_D$  son constantes a determinar,  $\dot{\tilde{x}} = \dot{x}_d - \dot{x}$  y  $\tilde{x} = x_d - x$ , son errores de velocidad y posición respectivamente. Existen diferentes modelos [1, 12] y técnicas ampliamente utilizadas [14, 19] que han generado considerables avances en este campo para compensar los efectos de las no linealidades duras [18].

El control difuso ha generado aplicaciones exitosas [3]. Debido a su inherente capacidad para manejar las incertidumbres, es un candidato ideal para ser aplicado en servomecanismos donde se presentan varios y diferentes efectos no lineales, requiriéndose alta precisión. En la práctica, se han diseñado controles difusos basados en la experiencia sin requerir el modelo del control. Este enfoque es totalmente adecuado para la práctica en el campo de la ingeniería, pero la estabilidad del sistema no puede ser garantizada antes de su implementación y se requiere generalmente tiempo para afinar su sintonía.

Por otra parte, la estructura de la información del sistema basado en el modelo disponible en la mayoría de las aplicaciones reales es desperdiciada. Basada en los resultados aceptables de un control difuso PD y técnicas de diseño de control robusto, en esta aplicación se considera el diseño de un control difuso PD para manejar algunas desventajas en el diseño de controles tipo PD. El control propuesto consiste de un componente difuso PD que usa el error y la derivada del error de la trayectoria para generar una acción de control de acuerdo

a una experiencia experta y a un componente de control robusto "plug-in", cuyo propósito es incrementar la precisión del seguimiento de la trayectoria. En lugar de suponer un modelo para las no linealidades o una cota en sus efectos, este control robusto PD difuso es diseñado basándose en el hecho de que un control tipo PD puede generar un seguimiento aceptable de trayectoria en la mayoría de las aplicaciones. La compensación de efectos no lineales es requerida únicamente con objeto de mejorar la precisión del seguimiento de trayectoria.

### 3.1.1. Nolinealidades duras

En los sistemas de control las nolinealidades duras (NLD) se refieren a la clase de nolinealidades no-diferenciables con respecto a la entrada, por ejemplo, zona muerta, backlash, histéresis y la fricción de Coulomb, etc. Estos fenómenos son comunes en los sistemas electro-mecánicos como manipuladores robóticos y motores eléctricos debido a los contactos entre las componentes mecánicas o las características de los sensores y/o actuadores [26]. La existencia de estos fenómenos presenta una severa limitación en el desempeño de los sistemas de control causando imprecisión en el seguimiento de las trayectorias deseadas, oscilaciones no deseadas, y a veces hasta la inestabilidad [27, 34]. La compensación de estos fenómenos es por lo tanto indispensable en los sistemas electro-mecánicos de alta precisión.

Además de ser no diferenciables, algunas de las NLD se caracterizan por tener parámetros desconocidos y/o variantes en el tiempo, y las variables (entrada o salida de las NLD) no son medibles. Estas características dificultan el diseño de sistemas de control para los sistemas considerados.

Existen diversos métodos para tratar la clase de estas nolinealidades entre los cuales están el control inverso [31, 35], compensación basada en modelos [24, 32, 39] y compensación relativa a modelos [14, 33].

En el control inverso, se diseña un compensador que invierte el efecto de la NLD. En [31], se diseñó un compensador adaptable para invertir el efecto de una zona muerta precedida de una planta lineal suponiendo que todos los estados del sistema lineal están disponibles

para la retroalimentación. En [34], se trató el mismo problema pero bajo la suposición de que solo la salida del sistema es medible. Las técnicas en estos trabajos fueron extendidas para tratar otras NLD como backlash [35], histéresis [36], y zona muerta precedida de una planta no lineal [37].

A diferencia de los modelos estáticos usados en el control inverso, en la compensación basada en modelos se propone un modelo dinámico de una NLD en cuestión. El modelo dinámico sirve para diseñar un observador del fenómeno no lineal, y de esta manera se trata de cancelar su efecto en la salida del sistema de control. En [24], se propuso un modelo para el fenómeno de la fricción, el cual fue utilizado para diseñar, mediante técnicas adaptables observadores de la fricción. Bajo la misma filosofía, en [32, 39], se presentaron dos modelos para la histéresis. En ambos casos, se usó el control adaptable para compensar el fenómeno no lineal.

En la compensación relativa a modelos se parte del modelo dinámico de un fenómeno no-lineal para deducir ciertas propiedades (acotamiento por cierta función conocida, propiedad de pasividad, etc.). No se diseña en este caso un observador del fenómeno no-lineal, sino que se obtiene el compensador directamente usando las propiedades deducidas del modelo. En este sentido se propuso un esquema de control adaptable para la compensación de la fricción obteniendo la estabilidad asintótica del origen. En [25, 33], se combinaron las técnicas del control adaptable y el control robusto para obtener la estabilidad exponencial de una vecindad del origen (estabilidad práctica).

Técnicas basadas en la lógica difusa (LD) y las redes neuronales (RN) han sido propuestas para el diseño del compensador en las NLD. Aunque muchas aplicaciones de LD o RN reportadas en la literatura están basadas en argumentos heurísticos, se han proporcionado fundamentos matemáticos sobre el funcionamiento de los controles neuro-difusos en los trabajos de investigación [28, 40]. Dadas las propiedades de aproximación universal y de clasificación, el control neuro-difuso es una herramienta natural para compensar las NLD ya que en general éstas tienen distintos efectos en distintas zonas de operación.



En [38], el control difuso fue usado para compensar el fenómeno backlash y posteriormente en [27], el fenómeno de la zona muerta. En ambos trabajos, un mecanismo de adaptación se usó para actualizar los parámetros del controlador. Ideas similares fueron presentadas en [29], para tratar zonas muertas variantes en el tiempo. En [30], un controlador difuso se utilizó para generar pulsos con el fin de compensar la fricción en un mecanismo de posicionamiento de alta precisión.

### 3.2. Definición del problema y el control ideal

Para obtener los desplazamientos prismáticos y rotacional de los eslabones  $(x, y, z, \phi)$  del robot, se diseñaron los mecanismos apropiados que generan la tracción en cada eslabón. Los elementos principales de estos mecanismos como se puede apreciar en las Figs. 2.15, 2.16, 2.17, 2.18 y 2.19, son engranes, poleas, bandas, cremalleras, etc. Considerando lo expuesto en la sección anterior referente a la fricción de Coulomb y zona muerta, es de esperarse que el desplazamiento final del efector tenga una fuente de error no-lineal en cada eslabón.

Por otra parte, en el efector se debe tomar en cuenta los efectos causados en la navaja al cortar las fibras musculares de la piel, así como las características comentadas en la sección 2.8. Para el adecuado desempeño del robot cartesiano, esos son los elementos o fuentes generadoras de problemas que se deben considerar dentro del diseño del sistema de control y compensación de efectos no-lineales. De esta manera, el diseño del sistema de control requerido es como sigue:

Considere un sistema no lineal de segundo orden dado por

$$\begin{aligned}
 m\ddot{x} + f(x, \dot{x}) &= D(u), \\
 x_1 &= x, \\
 x_2 &= \dot{x}, \\
 \dot{x}_1 &= x_2, \\
 \dot{x}_2 &= -\frac{f(x, \dot{x})}{m} + \frac{1}{m}D(u) = g(\mathbf{x}, u), \\
 \dot{x}_2 &= g(\mathbf{x}, u),
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

donde  $m$  es la masa,  $f(x, \dot{x})$  la fricción,  $D(u)$  la zona muerta,  $u \in \mathbb{R}$  es la entrada del

sistema,  $x = [x_1, x_2]^T$  la posición y velocidad, y  $g(.,.)$  es una función suave desconocida. Se asume la "ganancia de control" de (3.1) i.e.,  $\partial g(\mathbf{x}, u)/\partial u \neq 0, \forall \mathbf{x} \in D \subset \mathbb{R}$ , un dominio conteniendo la referencia de los estados. Observe que el sistema en la eq. (3.1) incluye las no linealidades en la entrada del control. El objetivo es seguir una trayectoria de referencia  $y_r$ . La trayectoria de referencia y su primera derivada  $y_r, \dot{y}_r$  se asumen acotadas, y  $\ddot{y}_r$  uniformemente continua. El error de trayectoria se puede definir como

$$\mathbf{e} = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{bmatrix} \triangleq \begin{bmatrix} x_1 - y_r \\ x_2 - \dot{y}_r \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

entonces

$$\dot{\mathbf{e}} = A_c \mathbf{e} + B_c [g(\mathbf{x}, u) - \ddot{y}_r] \quad (3.3)$$

donde

$$A_c \triangleq \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, B_c \triangleq \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

Si el control puede ser seleccionado de acuerdo a:

$$g(\mathbf{x}, u) = -k\mathbf{e} + \ddot{y}_r, \quad (3.4)$$

donde:  $k = [k_1 \ k_2]$  es tal que

$$A_{cl} \triangleq A_c - B_c k = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -k_1 & -k_2 \end{bmatrix}, \quad (3.5)$$

es Hurwitz, entonces el error de trayectoria  $\mathbf{e}(t) = \exp(A_{cl}t)\mathbf{e}(0)$  convergerá al origen exponencialmente. Por lo tanto, el control ideal es:

$$u_* = g^{-1}(\mathbf{x}, -k\mathbf{e} + \ddot{y}_r), \quad (3.6)$$

donde  $g^{-1}(\mathbf{x}, \cdot)$  denota la inversa de  $g(\mathbf{x}, \cdot)$ . La consideración de que  $\partial g(\mathbf{x}, u)/\partial u \neq 0, \forall \mathbf{x} \in D$ , asegura que esta inversa existe en  $D$ . Para que el diseño del control PD difuso robusto esté dentro de la región continua, adicionalmente se hacen las siguientes suposiciones:

*Suposición 1:*  $0 < g_0 \leq \frac{\partial g(\mathbf{x}, u)}{\partial u} \leq g_1 q(\|\mathbf{x}\|), \forall \mathbf{x} \in D$ , donde  $g_0$  y  $g_1$  son constantes positivas desconocidas, y\*

$$q(\|\mathbf{x}\|) = 1 + \|\mathbf{x}\| \quad (3.7)$$

*Suposición 2:* El sistema (3.1) puede ser estabilizado con un control PD tipo  $u_{PD}(\mathbf{e})$ , el cual es una función suave de  $\mathbf{e}$ , y

$$|u_{PD}(\mathbf{e}) - u_*| = |u_{PD}(\mathbf{e}) - g^{-1}(\mathbf{x}, -k\mathbf{e} + \ddot{y}_r)| \leq \bar{u}, \quad (3.8)$$

en la región de interés, por alguna constante  $\bar{u}$  positiva desconocida.

*Observación 2.1:* La Suposición 1 asegura que la "ganancia de control" de (3.1) sea uniformemente acotada por abajo y acotada por arriba por una función continua de  $\|\mathbf{x}\|$ . Dado el modelo de un sistema, esta suposición puede ser verificada inmediatamente en la práctica.

*Observación 2.2:* La Suposición 2 asume la existencia de un control tipo PD (no necesariamente un control difuso) el cual estabiliza el sistema. Esta suposición se basa en el hecho de que un control tipo PD puede estabilizar la mayoría de los servo mecanismos y puede obtener un seguimiento aceptable [5, 17, 20], aunque la sintonía de un control PD en una situación incierta y cambiante es una tarea pesada y consume mucho tiempo.

### 3.3. Diseño de un control PD difuso robusto

En esta sección se diseña el control PD difuso robusto para la planta (3.1). Primero, un control PD difuso se sintetiza con base en una experiencia experta (ver *e.g.*, [2]), después se usa la técnica de rediseño de Lyapunov [6], para diseñar un componente "plug-in" para

\*A lo largo del trabajo  $\|\cdot\|$  denota la norma Euclídeana.

mejorar el desempeño del seguimiento de trayectoria.

### 3.3.1. Control PD difuso

Basándose en la experiencia experta, la acción del control se obtiene observando el error de trayectoria  $e_1$  y la derivada de ese error  $e_2$  por medio de las reglas:

$$R_k: \text{ si } e_1 \text{ es } A_k(e_1) \text{ y } e_2 \text{ es } B_k(e_2) \text{ entonces } u_f \text{ es } \theta_k$$

donde  $R_k$  denota la  $k$ -ésima regla,  $k = 1, 2, \dots, nr$ ,  $nr$  es el número de reglas.  $\theta_k$  es el difuso singleton para la salida en la  $k$ -ésima regla, y  $A_k, B_k$  son los conjuntos difusos caracterizados por las funciones membresía  $\mu_{A_k}$  y  $\mu_{B_k}$ , respectivamente. Para sistemas que satisfacen la Observación 1, un control PD difuso típico está dado en el Cuadro 3.1, donde el conjunto difuso  $A_k \in [N_1, Z_1, P_1]$  y  $B_k \in [N_2, Z_2, P_2]$ , con las correspondientes funciones membresía (ver Fig. 3.2)

Reglas	$e_2$			
	$N_2$	$Z_2$	$P_2$	
$e_1$	$N_1$	PL	PM	PS
	$Z_1$	PM	ZE	NS
	$P_1$	PS	NS	NL

Cuadro 3.1: Control difuso PD

$$\mu_{N_1}(e) = \frac{1}{1 + \exp\{a_1(e - c_{11})\}}, \quad \mu_{N_2}(\dot{e}) = \frac{1}{1 + \exp\{a_2(\dot{e} - c_{21})\}}, \quad (3.9)$$

$$\mu_{Z_1}(e) = \exp\left\{-\frac{e}{\sigma_1}\right\}^2, \quad \mu_{Z_2}(\dot{e}) = \exp\left\{-\frac{\dot{e}}{\sigma_2}\right\}^2, \quad (3.10)$$

$$\mu_{P_1}(e) = \frac{1}{1 + \exp\{-a_1(e - c_{12})\}}, \quad \mu_{P_2}(\dot{e}) = \frac{1}{1 + \exp\{-a_2(\dot{e} - c_{22})\}}, \quad (3.11)$$

y  $\theta_k$  toma los valores del arreglo  $[PL, PM, PS, ZE, NS, NM, NL]$ . Los elementos de información, P, N, L, M y S denotan positivo, negativo, grande, mediano y pequeño, respectivamente. En consecuencia por ejemplo, las expresiones PL y NS significan

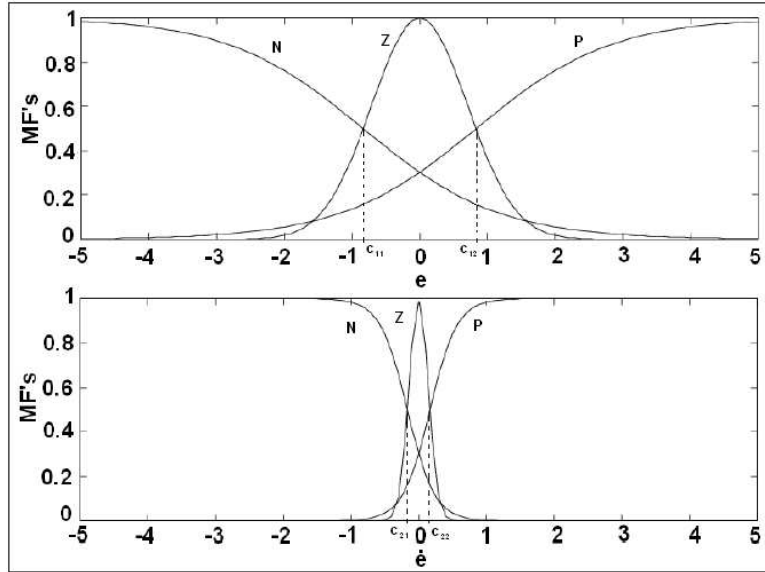


Figura 3.2: Funciones membresía para  $e$  y  $\dot{e}$ .

positivo grande y negativo pequeño, respectivamente. ZE indica cero. Aplicando la regla del producto-inferencia y el centro promedio de la señal lingüística convertida en señal numérica o señal de salida [21], el control difuso PD está dado por:

$$u_f = \sum_{k=1}^{n_r} \phi_k(\mathbf{e})\theta_k, \quad (3.12)$$

$$\phi_k(\mathbf{e}) = \frac{\mu_{A_k}(e_1)\mu_{B_k}(e_2)}{\sum_{k=1}^{n_r} \mu_{A_k}(e_1)\mu_{B_k}(e_2)}. \quad (3.13)$$

Se observa que si las funciones de membresía son fijadas, la función difusa base  $\phi_k(\mathbf{e})$  depende únicamente del error de seguimiento  $\mathbf{e}$ , y el control difuso (3.12) permite una parametrización lineal en los parámetros consecuentes  $\theta_k$ :

$$u_f = \phi^T(\mathbf{e})\theta, \quad (3.14)$$

donde

$$\phi(\mathbf{e}) \triangleq [\phi_1(\mathbf{e}) \phi_2(\mathbf{e}) \dots \phi_{n_r}(\mathbf{e})]^T, \quad \theta \triangleq [\theta_1 \theta_2 \dots \theta_{n_r}]^T. \quad (3.15)$$

*Observación 3.1:* Es bien conocido que el sistema de lógica difusa tal como  $u_f(\mathbf{e})$  en (3.14) es un aproximador universal de funciones continuas de  $e$  en el sentido de que dada cualquier función real continua; por ejemplo  $u_{PD}(\mathbf{e})$ , en un conjunto compacto  $E \subset \mathbb{R}^2$  y para

cualquier  $\rho > 0$ , puede existir un sistema lógico difuso (3.14) tal que [21]

$$\sup_{\mathbf{e} \in E} |u_f(\mathbf{e}) - u_{PD}(\mathbf{e})| < \rho. \quad (3.16)$$

Por lo tanto, la función  $u_{PD}(e)$  puede ser expresada como

$$u_{PD}(\mathbf{e}) = \phi^T(\mathbf{e})\theta_* + \Delta u_{PD}(\mathbf{e}), \quad \forall \mathbf{e} \in E \subset \mathbb{R}^2, \quad (3.17)$$

donde  $\Delta u_{PD}(\mathbf{e})$  es el error de aproximación que satisface

$$\sup_{\mathbf{e} \in E} |\Delta u_{PD}(\mathbf{e})| < \rho, \quad (3.18)$$

y  $\theta_*$  es el vector de parámetros óptimos

$$\theta_* \triangleq \arg \min_{\theta \in \mathbb{R}^{n_r}} \left\{ \sup_{\mathbf{e} \in E} |\phi(\mathbf{e})^T \theta - u_{PD}(\mathbf{e})| \right\}. \quad (3.19)$$

El diseño de un control PD difuso como (3.12) requiere una experiencia experta disponible. Sin embargo, la sintonización fina basada en prueba y error generalmente es inevitable para obtener un buen seguimiento de trayectoria. En la sección siguiente, se presenta un enfoque basado en Lyapunov para diseñar un control PD difuso robusto, que evita que el proceso de sintonización consuma mucho tiempo.

### 3.3.2. Control PD difuso robusto

El control propuesto para el sistema (3.1) es

$$u = u_f + u_c, \quad (3.20)$$

donde  $u_f$  es el componente del control difuso en (3.12) y  $u_c$  es el componente del control robusto "plug-in" dado por

$$u_c = -\hat{\delta}^2 \frac{q^2(\|\mathbf{e}\|) p_n^T \mathbf{e}}{\hat{\delta} q(\|\mathbf{e}\|) |p_n^T \mathbf{e}| + \epsilon}, \quad (3.21)$$

$$\dot{\hat{\delta}} = -\sigma \hat{\delta} + \gamma |p_n^T \mathbf{e}| q(\|\mathbf{e}\|), \quad \hat{\delta}(0) > 0, \quad (3.22)$$

donde  $\epsilon, \sigma, \gamma > 0$  son los parámetros de diseño,  $\hat{\delta}(t)$  es el estimado de  $\delta$  (se definirá en (3.29)) en el instante  $t \geq 0$ , y  $p_n$  es la última columna de la matriz  $P$  resultante de la ecuación

$$A_{cl}^T P + P A_{cl} = -I, \quad (3.23)$$

donde  $A_{cl}$  está dada en (3.5).

### 3.3.3. Análisis de estabilidad

Retomando lo expuesto en la Observación 3.1 referente a que un control tipo PD  $u_{PD}(e)$  puede ser expresado como

$$u_{PD}(\mathbf{e}) = \phi^T(\mathbf{e})\theta_* + \Delta u_{PD}(\mathbf{e}), \quad (3.24)$$

donde  $\theta_*$  representa el mejor conjunto de parámetros de un controlador PD difuso, y  $\Delta u_{PD}(e)$  la diferencia entre este mejor controlador PD difuso y el mejor controlador tipo PD (no necesariamente un control PD difuso). Arreglando el control (3.20) como

$$u = u_* + u_c + \Delta u, \quad (3.25)$$

donde  $u_*$  es el control ideal en (3.6),  $u_c$  el componente de la compensación en Eq. (3.21), y  $\Delta u$  se define como

$$\Delta u \triangleq [u_{PD}(\mathbf{e}) - u_*(\mathbf{x}, \mathbf{y}_R)] + \phi^T(\mathbf{e})\tilde{\theta} - \Delta u_{PD}(\mathbf{e}), \quad (3.26)$$

donde, con un poco de abuso en la notación,  $u_*(\mathbf{x}, \mathbf{y}_R)$  es el control ideal en Eq. (3.6) siendo  $\mathbf{y}_R = [y_r \ \dot{y}_r \ \ddot{y}_r]^T$ . Esta desviación del control surge de la diferencia entre: a) el control ideal y el mejor control tipo PD (no necesariamente un control PD difuso), b) el mejor control PD difuso y el control PD difuso basado en la experiencia-experta ( $\tilde{\theta} \triangleq \theta - \theta_*$ ), y c) el mejor control PD difuso y el mejor control tipo PD.

Aplicando el teorema del valor medio a las funciones  $g(\mathbf{x}, u)$  para  $u \in [u_*, u_* + u_c + \Delta u]$  se obtiene

$$g(\mathbf{x}, u) = g(\mathbf{x}, u_*) + \frac{\partial g(\mathbf{x}, z_a)}{\partial u}(u_c + \Delta u), \quad (3.27)$$

donde

$$z_a = \eta u_* + (1 - \eta)(u_* + u_c + \Delta u), \text{ para } \eta \in [0, 1]. \quad (3.28)$$

Considerando de las Suposiciones 1 y 2, y de la Observación 3.1 que

$$\begin{aligned}
q(\|\mathbf{x}\|) &= 1 + \|\mathbf{x}\|, \\
&= 1 + \|\mathbf{e} + \mathbf{y}_r\|, \\
&\leq 1 + \|\mathbf{e}\| + \|\mathbf{y}_r\|, \\
&= (1 + \|\mathbf{y}_r\|) \left\{ 1 + \frac{1}{1 + \|\mathbf{y}_r\|} \|\mathbf{e}\| \right\}, \\
&\leq \frac{(1 + \|\mathbf{y}_r\|)}{g_1} g_1 (1 + \|\mathbf{e}\|), \\
&= \frac{1 + \|\mathbf{y}_r\|}{g_1} q(\|\mathbf{e}\|), \\
&\leq \frac{1 + \max_{t \geq 0} \|\mathbf{y}_r(\mathbf{t})\|}{g_1} q\|\mathbf{e}\|, \\
\left| \frac{\partial g(\mathbf{x}, z_a)}{\partial u} \Delta u \right| &\leq \left| \frac{\partial g(\mathbf{x}, z_a)}{\partial u} \right| \{ |u_{PD}(\mathbf{e}) - u_*(\mathbf{y}, \mathbf{y}_R)|, \\
&\quad + |\phi^T(\mathbf{e})\tilde{\theta}| + |\Delta u_{PD}(\mathbf{e})| \}, \\
&\leq g_1 q(\|\mathbf{x}\|) \{ \bar{u} + \|\tilde{\theta}\| + \rho \}, \\
&\leq g_1 \frac{1 + \max_{t \geq 0} \|\mathbf{y}_r(\mathbf{t})\|}{g_1} \{ \bar{u} + \|\tilde{\theta}\| + \rho \} q(\|\mathbf{e}\|), \\
&= g_0 \frac{1 + \max_{t \geq 0} \|\mathbf{y}_r(\mathbf{t})\|}{g_0} \{ \bar{u} + \|\tilde{\theta}\| + \rho \} q(\|\mathbf{e}\|), \\
&= g_0 \delta q(\|\mathbf{e}\|), \\
\delta &\triangleq \frac{1 + \max_{t \geq 0} \|\mathbf{y}_r(\mathbf{t})\|}{g_0} \{ \bar{u} + \|\tilde{\theta}\| + \rho \} \quad (3.29)
\end{aligned}$$

el error dinámico puede ser expresado de acuerdo a (3.3), (3.4), (3.6) y (3.27) como:

$$\dot{\mathbf{e}} = A_{cl}\mathbf{e} + B_c \frac{\partial g(\mathbf{x}, z_a)}{\partial u} (u_c + \Delta u). \quad (3.30)$$

Considerando la función Lyapunov candidata

$$V = \frac{1}{2} \mathbf{e}^T P \mathbf{e} + \frac{g_0}{2\gamma} \tilde{\delta}^2. \quad (3.31)$$

donde  $P$  es la solución de (3.23),  $\tilde{\delta} \triangleq \hat{\delta} - \delta$ , y  $\gamma > 0$  es un parámetro definido. Tomando la



derivada en tiempo de  $V$ , se tiene de (3.23) y (3.30) que:

$$\begin{aligned}\dot{V} &= -\frac{1}{2}\mathbf{e}^T\mathbf{e} + \mathbf{e}^T P B_c \frac{\partial g(\mathbf{x}, z_a)}{\partial u}(u_c + \Delta u) + \frac{g_0}{\gamma}\tilde{\delta}\dot{\delta} \\ &= -\frac{1}{2}\mathbf{e}^T\mathbf{e} + p_n^T\mathbf{e} \frac{\partial g(\mathbf{x}, z_a)}{\partial u}(u_c + \Delta u) + \frac{g_0}{\gamma}\tilde{\delta}\dot{\delta}.\end{aligned}\quad (3.32)$$

En el siguiente procedimiento, se acotarán los dos últimos términos de la parte derecha de (3.32) por medio de la componente de compensación  $u_c$  en (3.21):

$$\begin{aligned}& p_n^T\mathbf{e} \frac{\partial g(\mathbf{x}, z_a)}{\partial u}(u_c + \Delta u) + \frac{g_0}{\gamma}\tilde{\delta}\dot{\delta} \\ & \leq p_n^T\mathbf{e} \frac{\partial g(\mathbf{x}, z_a)}{\partial u}u_c + |p_n^T\mathbf{e}| \left| \frac{\partial g(\mathbf{x}, z_a)}{\partial u}\Delta u \right| + \frac{g_0}{\gamma}\tilde{\delta}\dot{\delta} \\ & \leq p_n^T\mathbf{e} \frac{\partial g(\mathbf{x}, z_a)}{\partial u}u_c + g_0\delta |p_n^T\mathbf{e}| q(\|\mathbf{e}\|) + \frac{g_0}{\gamma}\tilde{\delta}\dot{\delta}\end{aligned}$$

considerando:  $g_0 \leq \frac{\partial g}{\partial u} \leq g_1 q(\|\mathbf{x}\|)$   $g_0 P n^T \mathbf{e} u_c \geq P n^T \mathbf{e} \frac{\partial g}{\partial u} u_c$

$$\begin{aligned}& \leq g_0 p_n^T \mathbf{e} u_c + g_0 \delta |p_n^T \mathbf{e}| q(\|\mathbf{e}\|) + \frac{g_0}{\gamma} \tilde{\delta} \dot{\delta} \\ & = g_0 \left\{ p_n^T \mathbf{e} u_c + \hat{\delta} |p_n^T \mathbf{e}| q(\|\mathbf{e}\|) \right\} \\ & \quad + \frac{g_0}{\gamma} \tilde{\delta} \left\{ \dot{\delta} - \gamma |p_n^T \mathbf{e}| q(\|\mathbf{e}\|) \right\} \\ & = g_0 \left\{ p_n^T \mathbf{e} u_c + \hat{\delta} |p_n^T \mathbf{e}| q(\|\mathbf{e}\|) \right\} - \frac{g_0 \sigma}{\gamma} \hat{\delta} \\ & \leq \epsilon g_0 - \frac{g_0 \sigma}{\gamma} \tilde{\delta}^2 + \frac{g_0 \sigma}{\gamma} \delta^2.\end{aligned}\quad (3.34)$$

La segunda desigualdad es generada por la desigualdad (3.29), la tercera desigualdad es debido a la Suposición 1 y al hecho de que  $p_n^T u_c \leq 0$ , la última desigualdad se debe a que  $p_n^T \mathbf{e} u_c + \hat{\delta} |p_n^T \mathbf{e}| q(\|\mathbf{e}\|) \leq \epsilon$  y  $-\tilde{\delta}\dot{\delta} \leq -\tilde{\delta}^2 + \delta^2$ , considerando  $\hat{\delta}(t) \geq 0, \forall t \geq 0$ .

De las eqs. (3.32)-(3.34) se tiene:

$$\dot{V} \leq -2\alpha V + \epsilon_e, \quad \forall t \geq 0, \quad (3.35)$$

donde  $\alpha \triangleq \min\{\lambda_{\max}(P), \sigma\}$ , y  $\epsilon_e \triangleq g_0(\epsilon + \frac{\sigma}{\gamma}\delta^2)$ .

Considerando  $r_E \triangleq \max\left\{\frac{\lambda_{\max}(P)}{\lambda_{\min}(P)} \|\mathbf{e}(0)\|^2 + \frac{g_0 \tilde{\delta}^2(0)}{\lambda_{\min}(P)\gamma}, \frac{\epsilon_e}{\lambda_{\min}(P)\alpha}\right\}$ ,

$$E \triangleq \left\{ \mathbf{e} \in \mathbb{R}^2 \mid \|\mathbf{e}\| \leq r_E^{1/2} \right\}$$

$\subset \mathbb{R}^2$  un conjunto compacto, y  $X \subset D$  el conjunto compacto correspondiente para una trayectoria de referencia dada. Entonces  $E$  es invariante, *i.e.*, para cualquier condición

inicial  $\mathbf{e}(0) \in E \Rightarrow \mathbf{e}(t) \in E, \forall t \geq 0$ . Por lo tanto,  $\mathbf{x}(t) \in X, \forall t \geq 0$ .

*Observación 3.2:* El error final acotado está dado por  $\frac{\epsilon_e}{\lambda_{\min}(P)\alpha}$ . Asume que la precisión de seguimiento es requerida para ser menor que  $e_{max}$ . Para lograr este objetivo, los parámetros pueden ser elegidos para satisfacer

$$\sigma + \frac{\sigma}{\gamma}\delta^2 \leq \frac{e_{max}}{g_0}\lambda_{\min}(P) \min\{\lambda_{max}(P), \sigma\}. \quad (3.36)$$

Esta condición se puede satisfacer siempre, eligiendo un  $\epsilon$  suficientemente pequeño y una  $\gamma$  grande.

### 3.4. Simulación

En la simulación, se consideró únicamente el desplazamiento del eslabón  $x$ , ya que los cuatro grados de libertad del robot son independientes. En el modelo se incluyó la fricción y zona muerta. En este caso, la ecuación de movimiento está dado por:

$$m\ddot{x} + f(\dot{x}) = u, \quad u = D(v), \quad (3.37)$$

donde  $x$  es la posición \*\*,  $m$  la masa de la parte en movimiento,  $u$  es la fuerza aplicada,  $v$  el voltaje aplicado al motor de CD,  $D$  denota el efecto de zona muerta \*\*\*, y  $f$  la fricción, el cual es una función de la velocidad, así como de la fuerza externa aplicada.

Si se definen

$$x_1 = x, \quad (3.38)$$

$$x_2 = \dot{x}, \quad (3.39)$$

entonces

$$\dot{x}_1 = x_2, \quad (3.40)$$

$$\dot{x}_2 = -\frac{1}{m}f(x_2) + \frac{1}{m}D(v) \quad (3.41)$$

\*\* Se usaron unidades MKS si no se especifican.

\*\*\* En realidad, una zona muerta ideal no satisface la suposición  $\partial g(u)/\partial u \neq 0$  requerida en el diseño del control. Sin embargo, puede ser aproximada con una función de primer y tercer cuadrante suave.

observe que la función

$$g(\mathbf{x}, v) = -\frac{1}{m}f(x_2) + \frac{1}{m}D(v) \quad (3.42)$$

$$\frac{\partial g(\mathbf{x}, v)}{\partial v} = \frac{1}{m} \frac{\partial D(v)}{\partial v} > 0 \quad (3.43)$$

$$\left| \frac{\partial g(\mathbf{x}, v)}{\partial v} \right| = \frac{1}{m} \left| \frac{\partial D(v)}{\partial v} \right| \quad (3.44)$$

$$\leq \frac{1}{m}(c_0 + c_1 |v|) \quad (3.45)$$

$$\leq \bar{c}_0 + \bar{c}_1 \|x\| \quad (3.46)$$

En la simulación, se utilizó el modelo de LuGre [12]

$$F(\dot{x}) = \sigma_o z_z + \sigma_1 \dot{z}_z + \alpha_2 \dot{x},$$

$$\dot{z}_z = \dot{x} - \sigma_o \frac{|\dot{x}|}{\alpha_o + \alpha_1 \exp\left(-\left(\frac{\dot{x}}{v_o}\right)^2\right)} z_z, \quad z_z(0) = 0$$

y se consideró una zona muerta simétrica con valor de 0.2 con el conjunto de parámetros estimados del robot cartesiano [9].

### 3.4.1. Resultados de la simulación

La simulación se realizó en el ambiente Matlab/Simulink con objeto de observar las mejoras en el seguimiento de trayectoria logradas con la introducción del componente del control robusto. El control PD como se describió en (3.12)-(3.14) y el Cuadro 3.1, con

$$\sigma_1 = 1, \quad c_{11} = -\sigma_1 \sqrt{\log(2)}, \quad c_{12} = \sigma_1 \sqrt{\log(2)}, \quad a_1 = 1,$$

$$\sigma_2 = 0,2, \quad c_{21} = -\sigma_2 \sqrt{\log(2)}, \quad c_{22} = \sigma_2 \sqrt{\log(2)}, \quad a_2 = 5,$$

donde  $\sigma_1, \sigma_2, a_1, a_2$  toman valores asignados de alguna manera para ser sustituidos en las Eqs. (3.9) a (3.11) y los singletons

$$\begin{aligned} \theta^T &= [PL \ PM \ PS \ PM \ ZE \ NS \ PS \ NS \ NL] \\ &= [7,50 \ 3,75 \ 1,80 \ 3,75 \ 0 \ -3,00 \ 1,80 \ -3,00 \ -7,50], \end{aligned}$$

se aplicaron al sistema (3.37). Este control es obtenido basándose en la experiencia en control sin una exhaustiva sintonía fina. Los resultados se muestran en la Fig. 3.3.

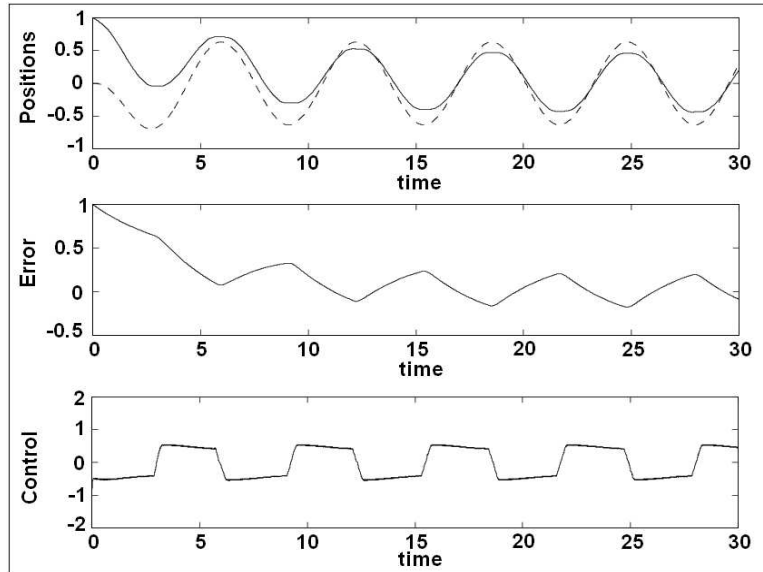


Figura 3.3: Simulación 1: Señales relevantes del control PD difuso

Una vez implementado el componente del control, los parámetros  $k_1 = -3$ ,  $k_2 = -4$  y  $\sigma = 1$  fueron (de alguna manera arbitrariamente) elegidos, entonces para conocer la exactitud final del seguimiento de trayectoria  $e_{max} \leq 0.001$ , los parámetros  $\gamma = 200$  y  $\epsilon = 0.001$  fueron obtenidos. Implementando este componente para la compensación se obtienen los resultados mostrados en la Fig. 3.4, donde la condición inicial fue  $\hat{\delta}(0) = 1$ .

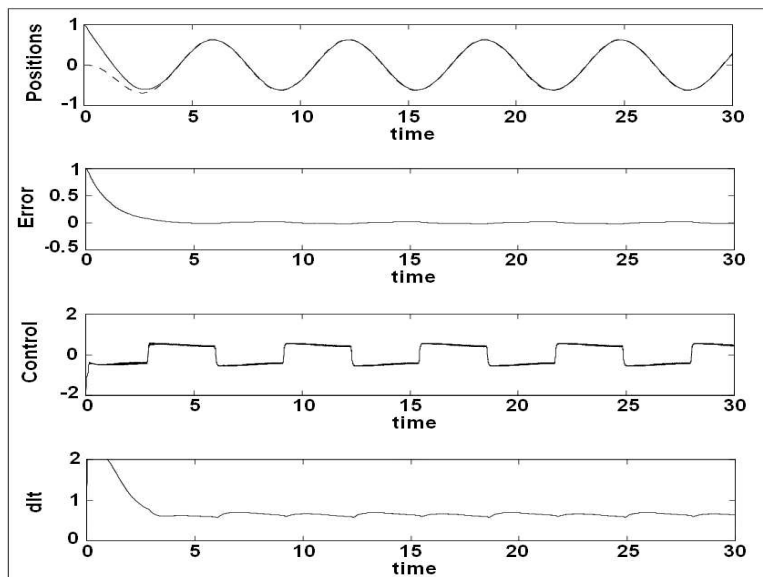


Figura 3.4: Simulación 2: Señales relevantes del control PD difuso robusto

### 3.5. Pruebas experimentales

Para verificar los resultados obtenidos, los controles fueron implementados en el robot cartesiano con los mismos parámetros de la simulación. La medición de la velocidad de motor se efectuó por medio de un estimador del drive del motor. Los resultados se muestran en las Fig. 3.5 y Fig. 3.6.

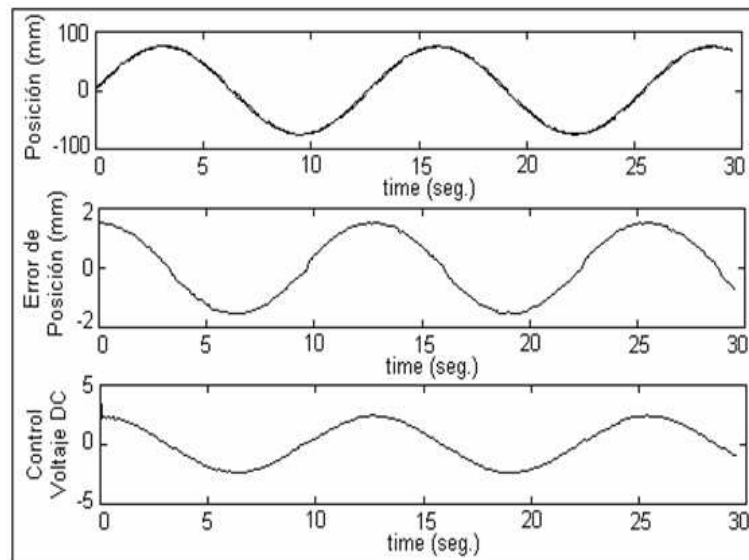


Figura 3.5: Experimento 1: Señales relevantes del control PD difuso

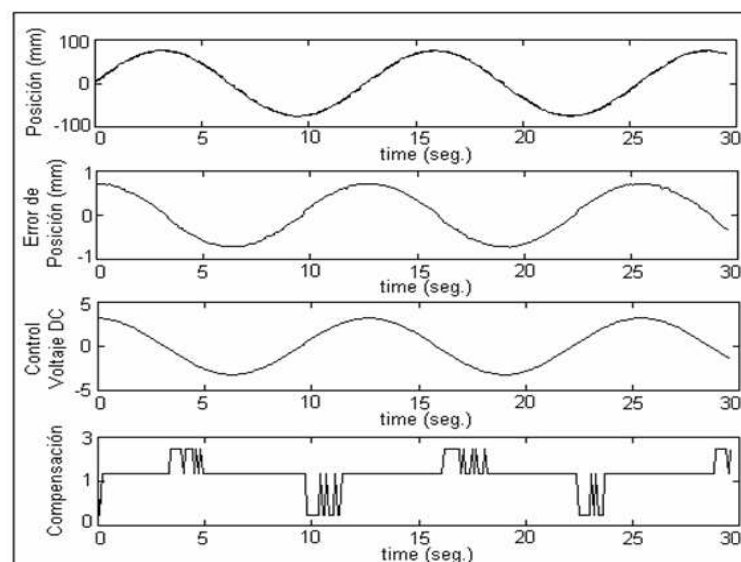


Figura 3.6: Experimento 2: Señales relevantes del control PD difuso robusto

El error de posición del control PD difuso (Fig. 3.5) es mayor de 1 mm, a diferencia del control PD difuso robusto (Fig. 3.6), con la implementación de este control, el error de posición es menor de 1 mm. De esta manera se puede constatar que los desplazamientos

de los eslabones  $(x, y, z, \phi)$ , tienen un seguimiento de trayectorias mejorado cuando se implementa el control PD difuso robusto.

### 3.5.1. Resultados experimentales

Con los resultados anteriores como antecedentes, se procedió a efectuar las pruebas reales de corte de piel, utilizándose la forma de la Fig. 3.7 como pieza para ser cortada en el robot. En la Fig. 3.8 se muestra el panel gráfico de la prueba terminada. En el se presentan los

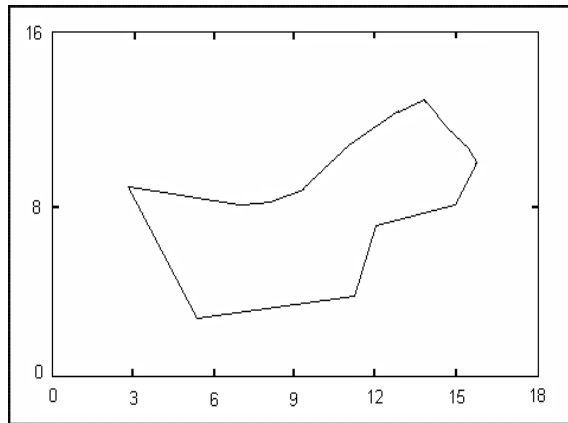


Figura 3.7: Forma de la pieza a cortar utilizando el robot (cm).

resultados de error  $(x - x_d)$  y  $(z - z_d)$ , el seguimiento de posición  $x, x_d$  y  $z, z_d$  expresados en mm, así como la fuerza aplicada en la navaja durante la prueba. En la Fig. 3.9 muestra el gráfico interno generado por los desplazamientos  $(x, z)$  totales, correspondientes a:

**a)-** Ciclo "Home" (desplazamiento tipo circular en el gráfico). Este ciclo desplaza los cuatro eslabones y los retorna a la coordenada "cero", en el gráfico presentado solo se observa el ciclo en los eslabones  $(x, z)$ . Este desplazamiento se ejecuta al inicio de cualquier desplazamiento programado en el robot. El objeto de este ciclo es autocalibrar los cuatro eslabones  $(x, y, z, \phi)$ .

**b)-** La trayectoria del desplazamiento desde "cero" hasta el posicionamiento en las coordenadas de la pieza a cortar.

**c)-** El desplazamiento correspondientes a el corte de la pieza programada.

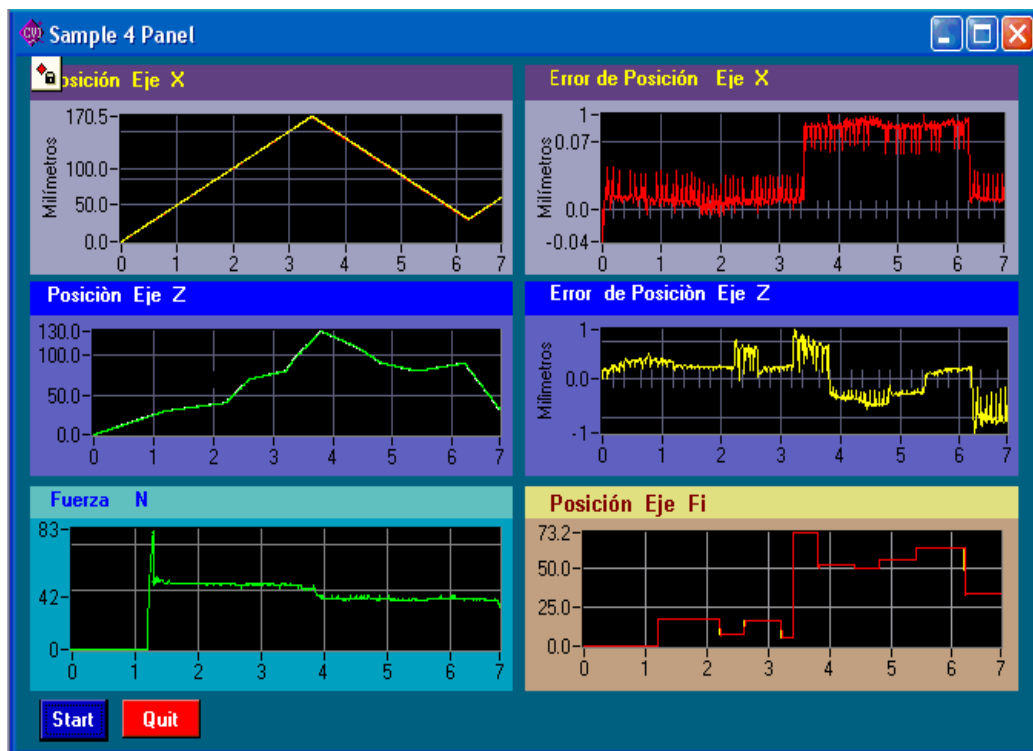
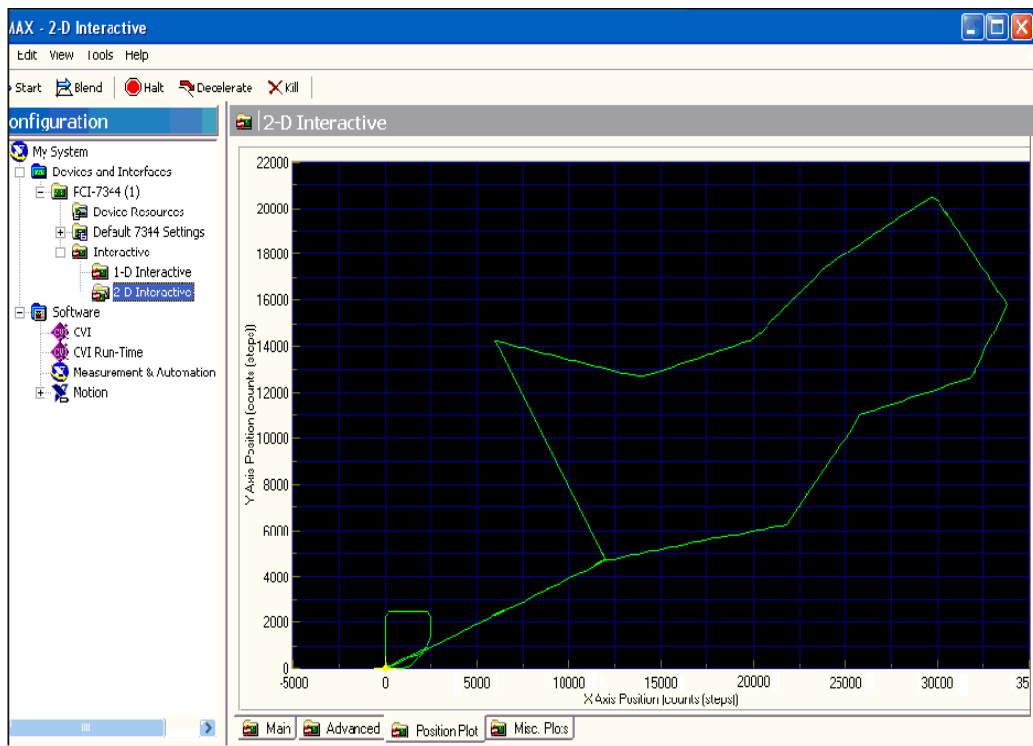


Figura 3.8: Resultados de la prueba en el panel gráfico.

Figura 3.9: Desplazamientos totales de los eslabones ( $x, z$ ).

d)- La trayectoria de regreso a "Home". Debido a que el corte de la pieza inicia y termina en la misma coordenada, la trayectoria de regreso es igual a la trayectoria de posicionamiento.

En la Fig. 3.10 y 3.11 se muestran las gráficas de posición y error de los eslabones de la misma prueba. En la Fig. 3.12 se muestra el panel gráfico con los resultados obtenido al

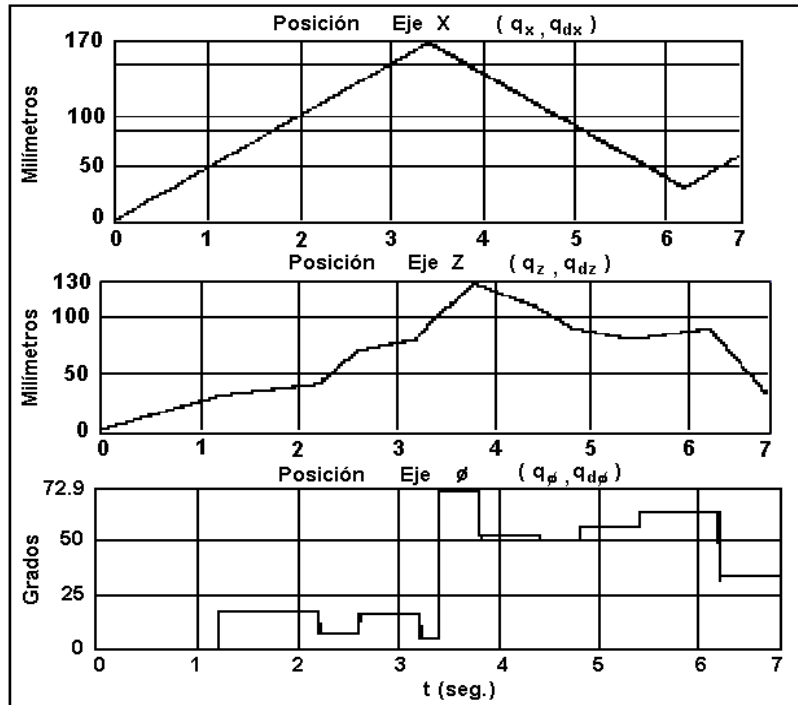


Figura 3.10: Posición de los eslabones  $(x, z, \phi)$ .

cortar dos cuadrados. La Fig. 3.13 muestran el gráfico interno con las trayectorias realizadas por los eslabones  $(x, z)$ .

Como se puede ver en las gráficas de la Fig. 3.11, el desplazamiento de los eslabones  $(x, z)$ , se mantienen con 1 mm de error de posición al realizar el corte de la pieza de la Fig. 3.7 sobre piel, constatándose la confiabilidad del control PD difuso. La velocidad de desplazamiento de los eslabones  $(x, z)$  es aproximadamente de 60 cm/seg. Debido a la capacidad de potencia del controlador Mid 7654, no se pueden adaptar motores de mayor capacidad a los que se utilizaron en los eslabones.



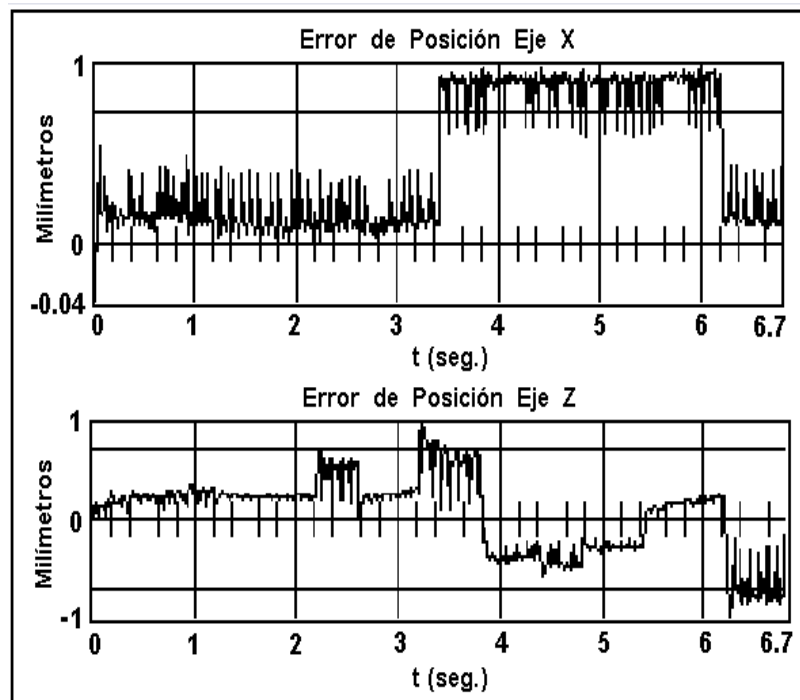


Figura 3.11: Error de posición en los eslabones ( $x, z$ ).

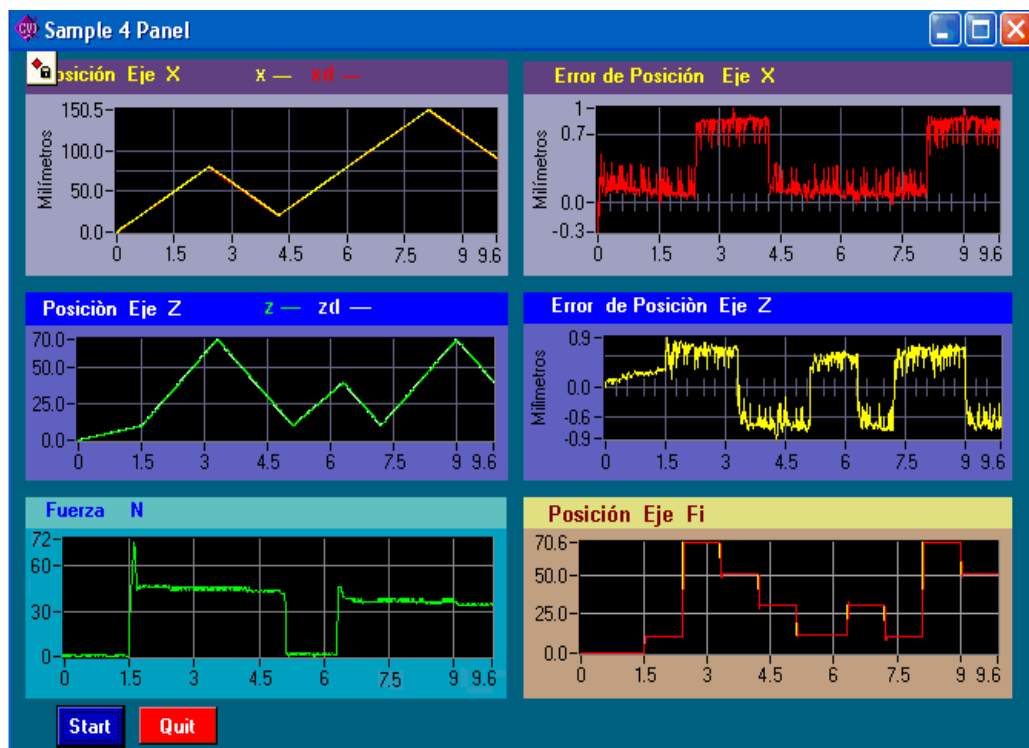


Figura 3.12: Panel gráfico del corte de dos cuadrados.

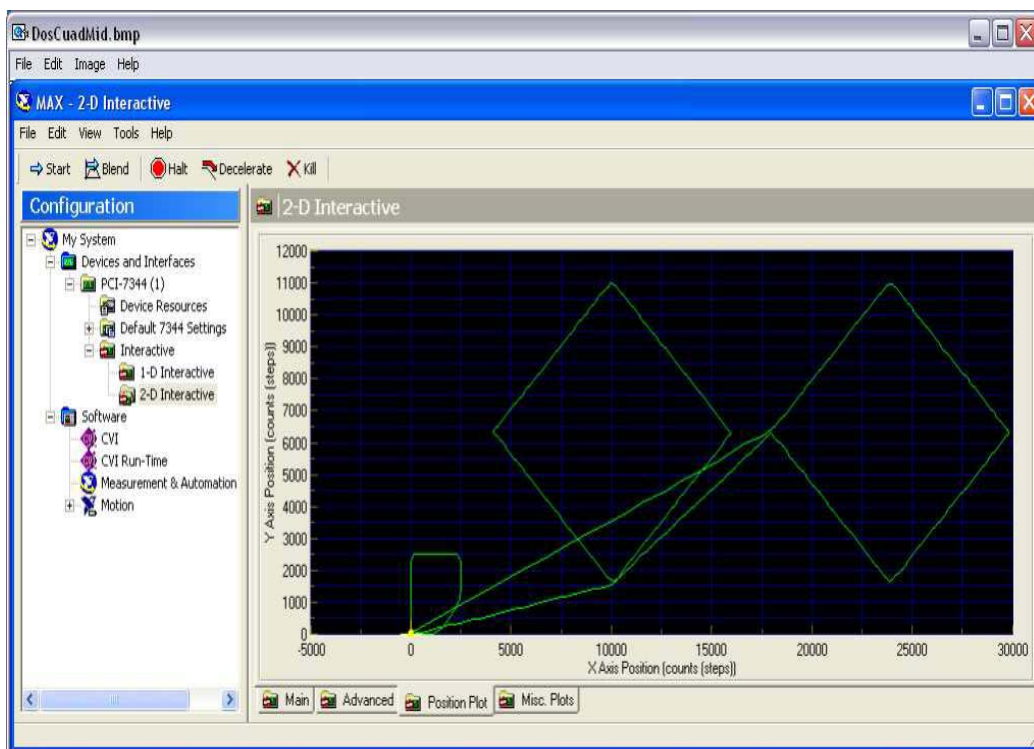


Figura 3.13: Gráfico interno de los desplazamientos ( $x, z$ ) al cortar dos cuadrados.

# Capítulo 4

## Conclusiones

### 4.1. Conclusiones

El prototipo del robot se terminó, ajustándose al presupuesto que se le asignó para su desarrollo y terminación final. Se obtuvieron resultados satisfactorios en las pruebas que se realizaron para validar su funcionamiento, llegándose a las siguientes conclusiones:

- Por las características físicas del sistema mecánico del prototipo y los requerimientos de la aplicación industrial, se requiere un control que sea robusto con respecto a la incertidumbre ( tanto paramétrica como no paramétrica ) y simple para ser implementado. El control PD difuso sin compensación no puede lograr la precisión requerida. Por su robustez y buen desempeño, el control PD difuso más compensación fue diseñado e implementado en el prototipo del robot, logrando un desempeño satisfactorio. De esta manera, se ha desarrollado y establecido un simple pero efectivo control PD difuso, propuesto para ser aplicado en servo aplicaciones donde se requiere alta precisión, dado su seguimiento exponencial de trayectoria deseada con un error arbitrariamente pequeño.
- Se logró obtener un prototipo funcional que en base a los resultados obtenidos en las pruebas aplicadas, se obtuvo un error de 1 mm en los desplazamientos de los eslabones  $(x, z)$ . Considerando estos resultados y los requerimientos indicados en la siguiente sección, este prototipo puede llegar a ser con seguridad, un equipo de alto desempeño en la industria del calzado. Pudiendo competir ampliamente en eficiencia, funcionalidad y costo, con los equipos de fabricación extranjera.
- El costo del desarrollo total de este primer prototipo fue de ochocientos mil pesos.

Tomando como referencia esa cantidad y el costo de un equipo industrial de este tipo existente en el extranjero, se puede estimar que el costo para llevar a su fase final el diseño, construcción y control del robot cartesiano (robot de segunda generación, proyecto ya iniciado con apoyo del sector industrial) estará por debajo de los costos de los equipos existentes. Este hecho puede generar que las industrias de calzado mayoritarias como es la pequeña y mediana industria, puedan integrar este equipo en su línea de producción. Ya que el costo de estos equipos importados es el factor decisivo que impide su adquisición.

- El prototipo desarrollado puede ser complementado con requerimientos de software de aplicación, integración de tareas o necesidades adicionales en el proceso de corte. De esta manera se genera apoyo y desarrollo tecnológico para este sector industrial, en lo que concierne al proceso de corte industrial de piel.

#### 4.1.1. Requerimientos

No obstante, para que este modelo de robot cartesiano pueda ser integrado a la industria del calzado y competir en el mercado con los equipos ya existentes, requiere ser mejorado en dos aspectos: diseño mecánico del robot y su construcción. Respecto al control, se aplicaría el mismo esquema de control y compensación que se tiene desarrollado, con los ajustes pertinentes en función de la velocidad de desplazamiento, masas de los eslabones y los servomotores que se utilicen.

#### Diseño

El diseño del robot puede ser mejorado reduciendo la altura de los eslabones  $(x, z)$ . En el eslabón  $z$  esta medida proporciona más flexibilidad para alcanzar las piezas cortadas, el eslabón  $x$  se beneficia con menos peso. Para cubrir por completo todas las aplicaciones que se requieren al cortar piel, es necesario aumentar el tamaño del área de trabajo del robot. Esto implica diseñar los eslabones  $(x, z)$  más largos, sustituir los servomotores con otros de mayor potencia y seccionar la cámara de vacío en el área de trabajo o mesa. Otra observación en el diseño es separar del robot la bomba de succión y el tanque con que se genera el vacío. Con esta modificación se obtiene un equipo casi silencioso.

Para jornadas largas de trabajo, que es un objetivo de este robot, se requiere aumentar el volumen del tanque de vacío.

### Construcción

El prototipo actual se puede mejorar considerablemente utilizando mecanismos y estructuras deslizables existentes en el mercado, que son fabricadas y acopladas para configurar sistemas de deslizamiento prismático. Utilizando estos componentes en la construcción de los eslabones se mejora la precisión en los desplazamientos. Respecto a la resolución de los decodificadores de posición en los motores, es necesario adaptar decodificadores mayores a 1000 p.p.r., con objeto de aumentar la resolución de lectura de posición angular. En las salidas de los servomotores se pueden utilizar reductores de la misma marca Dynetics. Estos reductores tienen menor zona muerta, y no requieren un cople para la transmisión. Como detalle y con objeto de mejorar el aspecto físico del robot que es muy importante, es conveniente utilizar el acero inoxidable en el área de trabajo. Se genera bastante roce de la piel con las partes metálicas y con el constante uso se pierde la pintura. Para reducir el peso de los eslabones se puede utilizar aluminio, sobre todo en la tapa del eslabón  $x$ . Todas estas mejoras pueden ser solventadas y consideradas en el diseño del siguiente prototipo.

# Apéndice A

## Apéndice

### A.1. Software

El software para el funcionamiento y operación del robot se divide en tres partes: Software de control, ejecutado por una computadora Pentium IV configurada como esclava. Software de proceso, ejecutado en otra computadora Pentium IV configurada como maestra y Software interfaz, ejecutado en ambas computadoras maestra y esclava para establecer la transferencia de información y sincronización del proceso. En esta sección solo se comentará el software de control.

#### Software de control

Para que el robot desempeñe las tareas asignadas dentro del proceso del corte de piel, se requiere precisión y confiabilidad en cada uno de los desplazamientos de los eslabones  $(x, y, z, \phi)$ . El objetivo se logró aplicando los esquemas de control más compensación, desarrollados para este robot e implementados en el mismo.

Este software procesa las coordenadas que conforman la pieza que se va a cortar. Por medio de estas coordenadas se generan los desplazamientos sincronizados de los eslabones  $(x, y, z, \phi)$ , que mueven al efector para obtener el corte de la pieza. Además, mantiene la retroalimentación de la velocidad y el desplazamiento de cada eslabón, efectuando el control de las trayectorias deseadas y la compensación de los efectos no lineales generados por la fricción y zona muerta de las partes mecánicas. Desde el inicio y durante el proceso, la fuerza en el eslabón  $\phi$  es también retroalimentada para su modulación y aplicación en la

navaja de acuerdo a los requerimientos que exija la piel al momento de ser cortada. De esta manera, el software de control se estructuró con estos esquemas de control utilizando el Lenguaje Anci C, Lab Windows y Flex Motion. La estructuración del software se muestra en las Figs. A.1, A.2, A.3 y A.4.

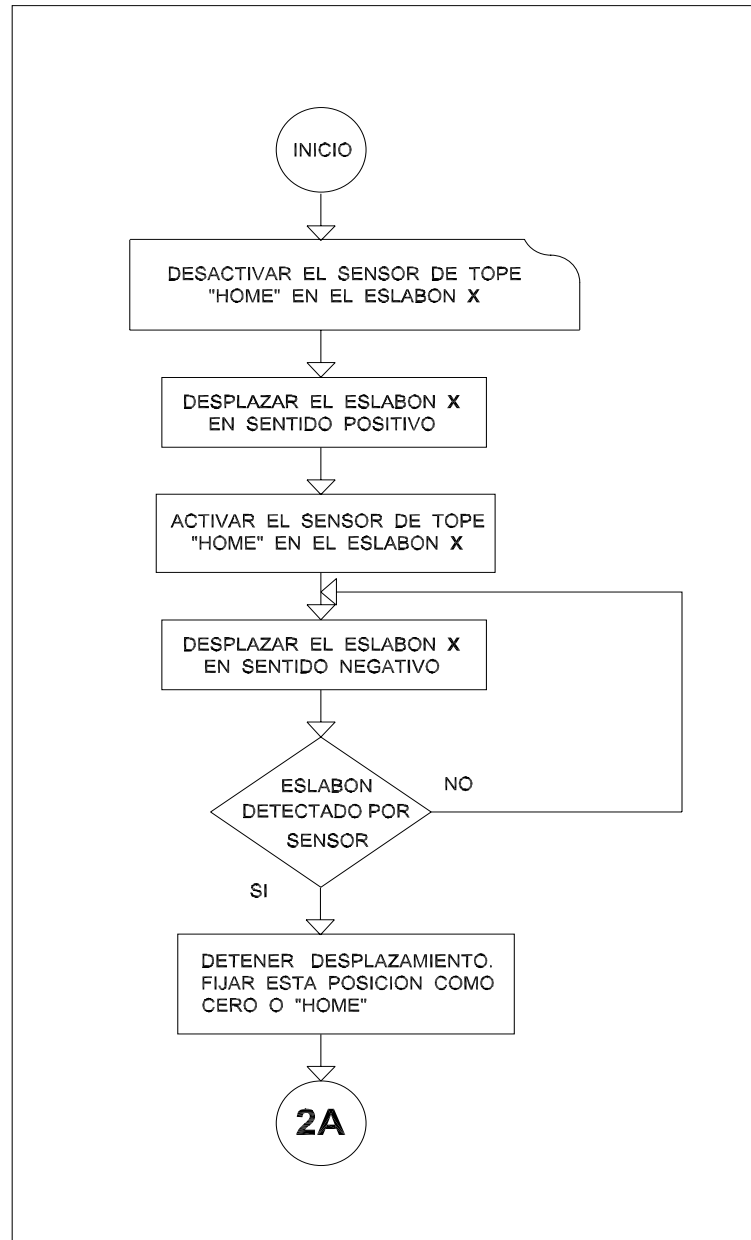


Figura A.1: Puesta en ceros del eslabón  $x$ .

En la Fig. A.1 se muestra la configuración del software de inicialización o puesta en posición cero para el eslabón  $x$ . Esta subrutina se aplica en los cuatro eslabones en la misma secuencia.

En la Fig. A.2 se muestra la secuencia para fijar los parámetros referentes al sensor de fuerza, determinación de las posiciones y velocidades deseadas, el ángulo de giro del eslabón

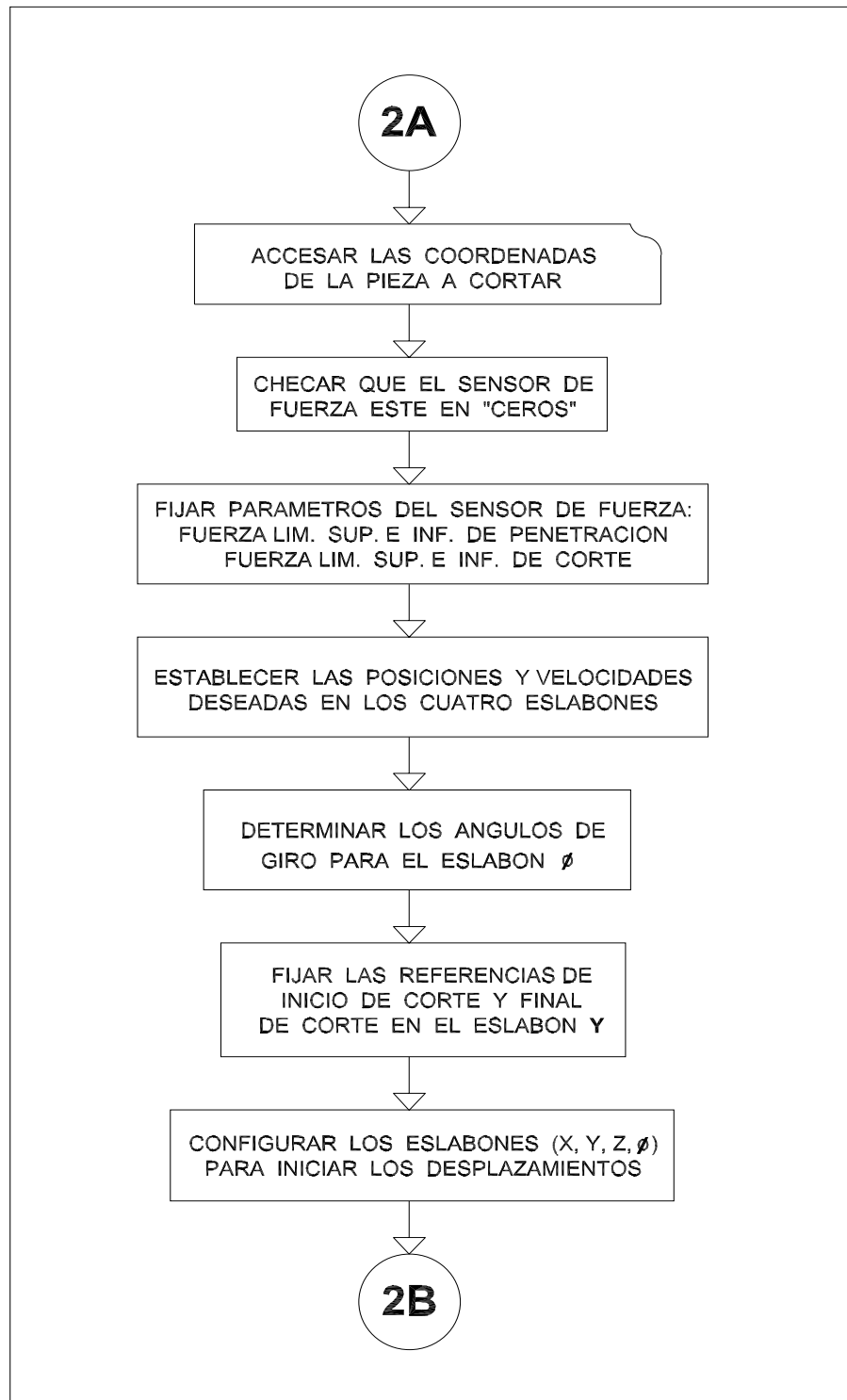


Figura A.2: Fijar y determinar parámetros para los cuatro eslabones.



$\phi$  así como la configuración de los cuatro eslabones para iniciar los desplazamientos. En

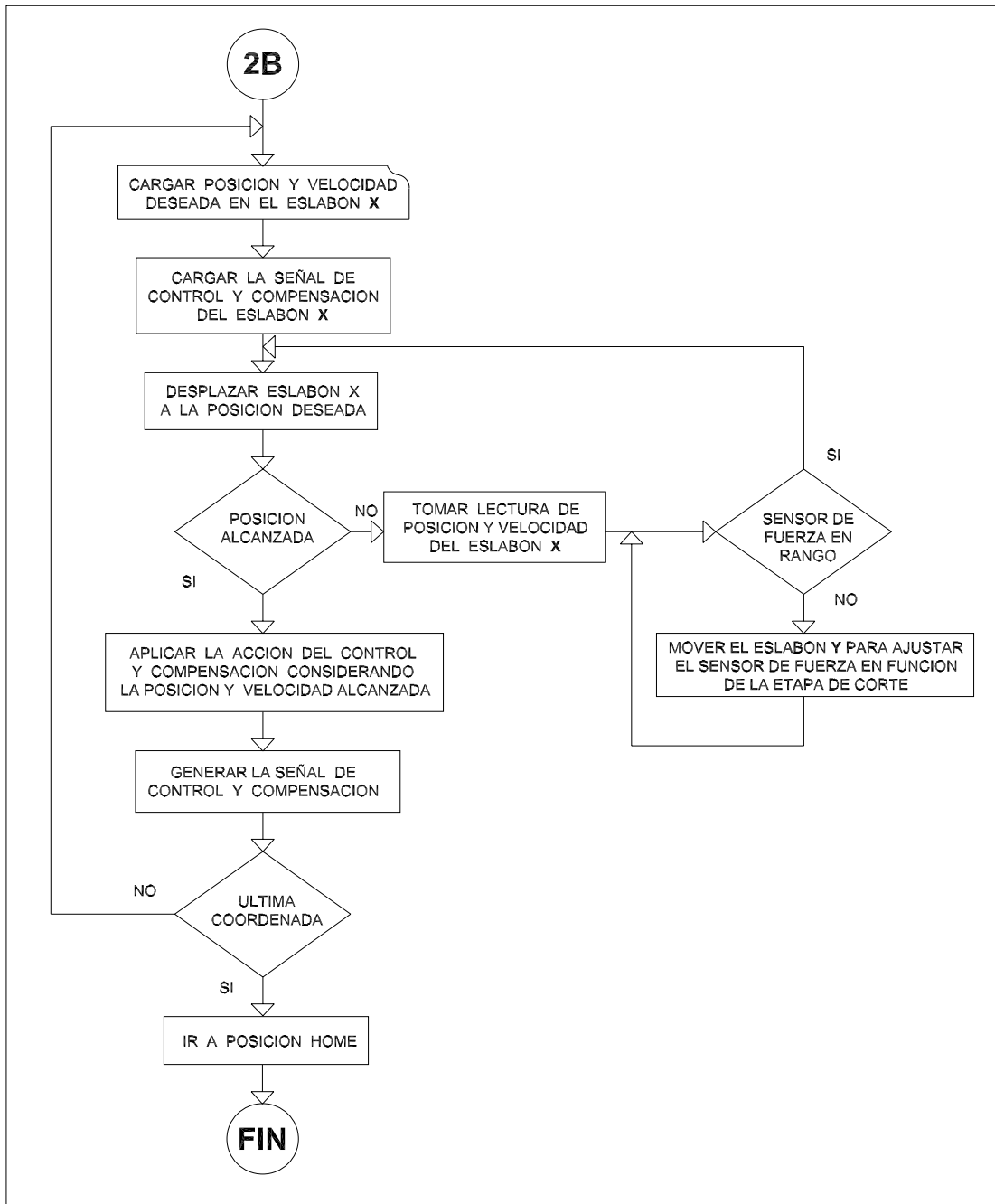
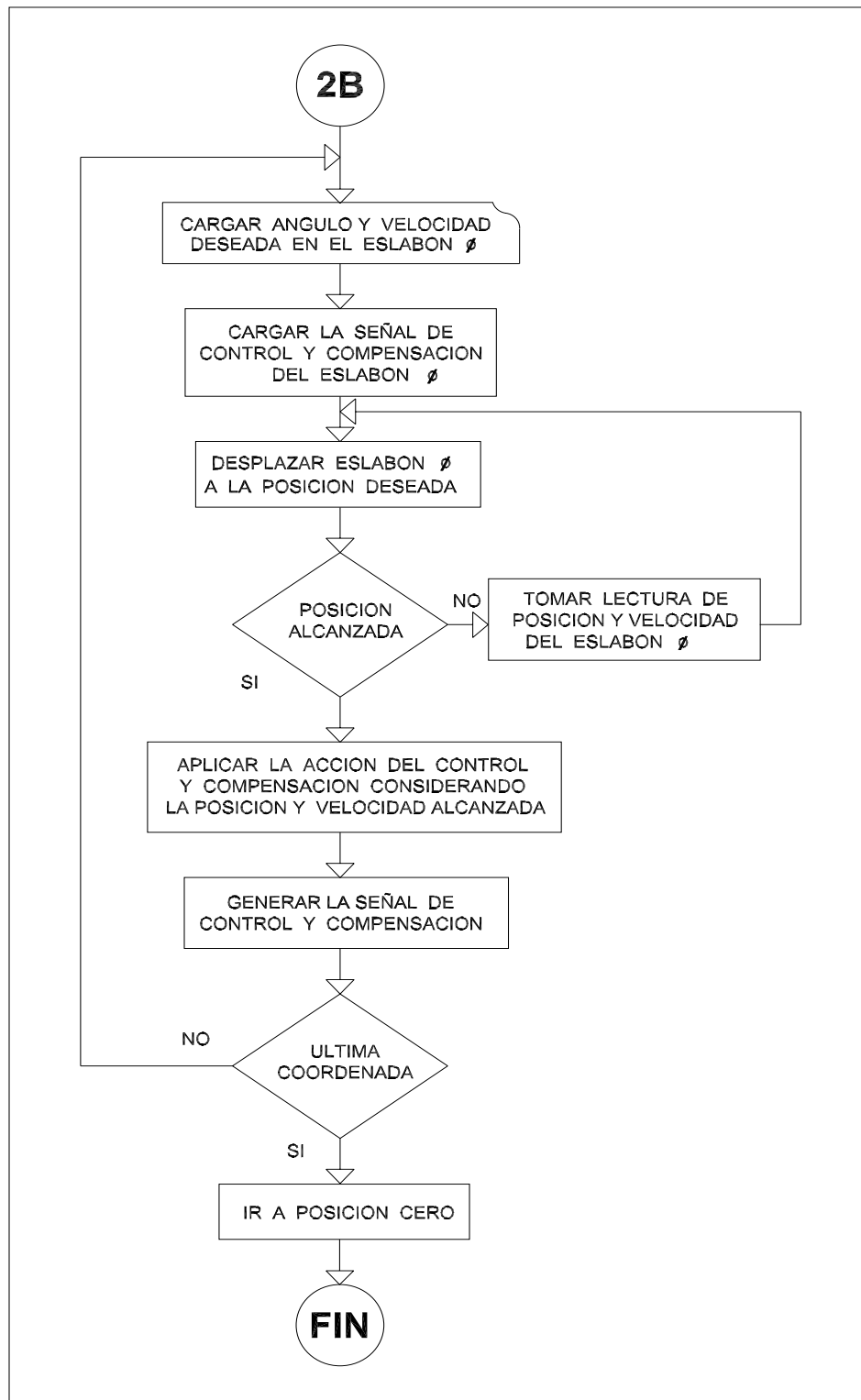


Figura A.3: Secuencia de desplazamiento del eslabón  $x$ .

la Fig. A.3 se muestra la secuencia que sigue el eslabón  $x$  al desplazarse. Esta secuencia también se aplica en los eslabones  $(y, z)$ . En la Fig. A.4 se muestra la estructuración del seguimiento de posición y velocidad del eslabón  $\phi$ . Este eslabón no tiene relación directa con el sensor de fuerza, aunque depende totalmente de los eslabones  $(x, z)$ .

Figura A.4: Secuencia de desplazamiento del eslabón  $\phi$ .

### A.1.1. Vistas del robot

En esta sección se presentan algunas fotos de las diferentes partes mecánicas que integran al robot cartesiano. La Fig. A.5 muestra las principales partes del robot:

- a).- Estructura del soporte principal.
- b).- Estructura del soporte de los eslabones ( $x, y, \phi$ ).
- c).- Estructura del soporte de los eslabones ( $y, \phi$ ).
- d).- Cámara de Vacío.
- e).- Tapas de los bujes del eslabón  $z$ .
- f).- Tapas laterales inferiores de la estructura.
- g).- Tapa del eslabón  $x$ .

La Fig. A.6 muestra el eslabón  $x$  y los sensores de posición cero o "home" (Fig. A.6-a) y



Figura A.5: Partes mecánicas del robot cartesiano.

del límite máximo para el desplazamiento del eslabón  $z$  (Fig. A.6-b). La Fig. A.7 muestra la adaptación del sensor de fuerza (Fig. A.7-a) colocado en el extremo superior del eslabón  $\phi$  (Fig. A.7-b). Además, se observa la configuración de los eslabones ( $y, \phi$ ). La Fig. A.8 Muestra los reductores con relación 10:1 de los eslabones ( $x, y, z, \phi$ ). La Fig. A.9 muestra la parte posterior del robot cartesiano mostrando el tanque con capacidad de 300 l para mantener y generar el vacío en la cámara. En la Fig. A.10 se muestran los cuatro eslabones ensamblados. La Fig. A.11 y A.12 muestran diferentes vistas del robot cartesiano terminado.



Figura A.6: Sensores Infrarojos del eslabón (z).

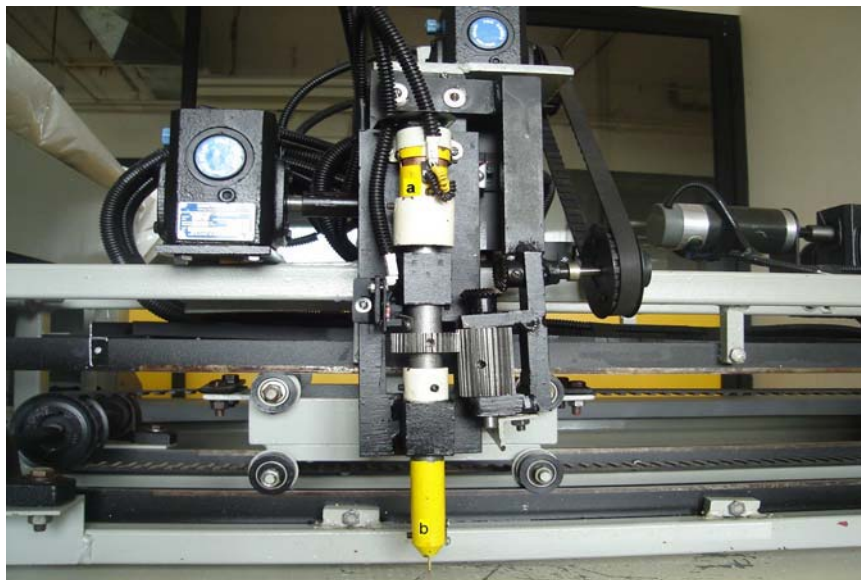


Figura A.7: Encapsulado del sensor de fuerza montado en el eslabón  $\phi$ .



Figura A.8: Reductores de los eslabones ( $x, y, z, \phi$ ) con relación 10:1.



Figura A.9: Tanque pulmonar de 300 l para mantener el vacío.

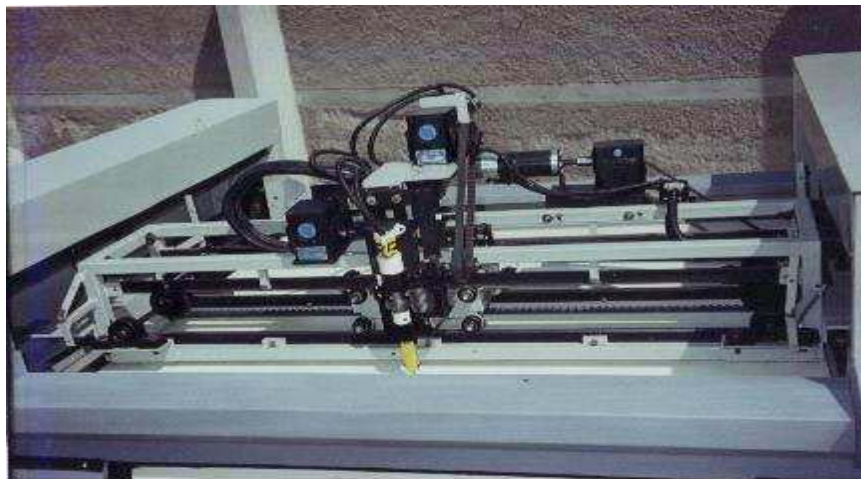


Figura A.10: Eslabones  $(x, y, z, \phi)$ .

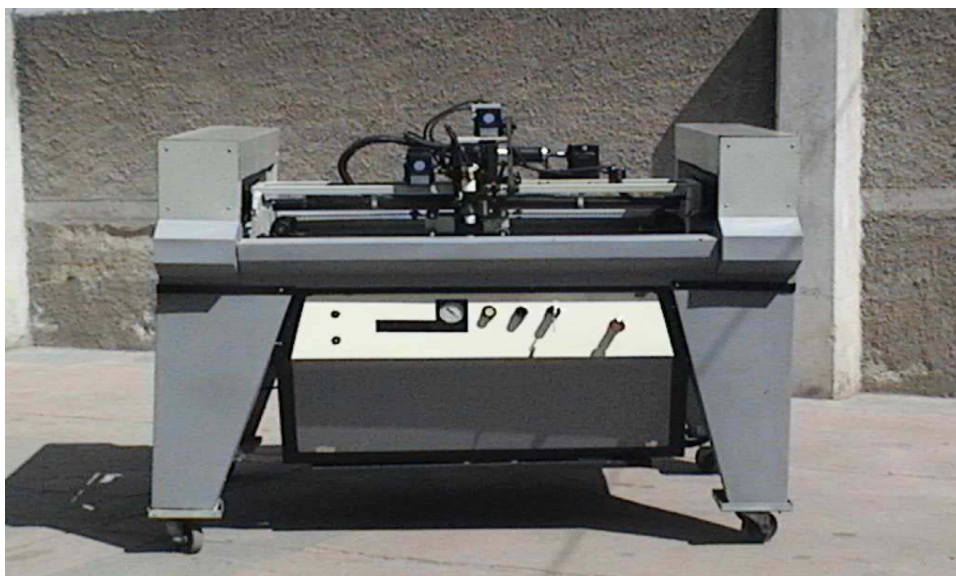


Figura A.11: Vista frontal del robot cartesiano.





Figura A.12: Area de trabajo del robot cartesiano.

### A.1.2. Navaja de corte

Existe una gran variedad de tipos de navajas (Fig. A.13 ) utilizadas en el corte industrial de distintos materiales como piel, plásticos, telas, sintéticos, etc. Los factores que se consideran para seleccionar un determinado tipo de navaja, va a depender más que nada del material que se va a cortar. Por ejemplo, para el corte de material sintético se utilizan las navajas tipo Z 28 4/45 y Z29 3.5/45 con cabezal vibratorio. La navaja utilizada en el robot para el corte de piel es del tipo Z 10 90. Es una navaja de carburo de tungsteno tipo universal de alta velocidad, especificada para cortar piel.













1.2.1 Zünd and Wild flat knives						
Illustration	Type	Angle $\alpha/\beta$ [degrees]		Description	Order number	Packing unit
	Z 20	5/25	Zünd: POT	for corrugated board up to 10 mm, rubber (one sided, 25 mm long)	910 313	1
	Z 21	5/25	Zünd: POT	for corrugated board up to 13 mm, rubber (one sided, 28 mm long)	910 314	1
	Z 22	10/25	Zünd: POT	for hard cardboard up to 3 mm, rubber (25 mm long)	910 315	1
	Z 26	12/25	Zünd: POT	for fibrous tissue, cloth, textiles (25 mm long)	910 317	1
	Z 28	4/45	Zünd: POT	for soft materials up to 23 mm (38 mm long)	910 318	1
	Z 29	3,5/45	Zünd: POT	for soft materials up to 28 mm	910 319	1
	Z 40		Zünd: EOT/POT Wild:	Knife made of super high-speed steel for cutting fibrous tissues, textiles, etc. Especially for EOT	910 322	10
	Z 41		Zünd: EOT/POT	Special knife for cutting thick leather and textiles (POT)	910 323	1
	Z 42		Zünd: EOT/POT	Special knife for cutting thick leather and textiles (EOT/POT)	910 324	1
	Zünd Type 2	90/45	Zünd: T- heads Wild: TA2-10- 100	Universal knife made of super high-speed steel for soft, thin materials	910 302	10
	Zünd Type 3	90/36	Zünd: T- heads Wild: TA2-10- 100	Universal knife made of super high-speed steel for soft materials	910 303	10
	Zünd Type 4	36	Zünd: T- heads Wild: TA2-10- 100	Universal knife made of super high-speed steel for soft, thin materials such as leather; especially for POT/EOT	910 304	1

Figura A.13: Diferentes tipos de navajas para corte industrial.

## Bibliografía

- [1] B. Armstrong-Helouvry, P. Dupont and C. Canudas de Wit, "A survey of models, analysis tools and compensation methods for control of machines with friction," *Automatica*, Vol. 30, No. 7, pp. 1083-1138, 1994.
- [2] G. Chen, "Conventional and fuzzy PID controllers: An overview," *Int. J. Intell. Contr. Syst.*, Vol. 1, pp. 235-246, 1996.
- [3] S. Farinwata, D. Filev and R. Langari (Ed), "Fuzzy Control Synthesis and Analysis", John Wiley & Sons, LTD, 2000.
- [4] S. Hsia, "Robustness analysis of a PD controller with approximate gravity compensation for robot manipulators," *J. Robot. Syst.*, Vol. 11, pp. 517-521, 1994.
- [5] R. Kelly, "Global positioning of robot manipulators via PD control plus a class of nonlinear integral actions," *IEEE Trans. Robot. Automat.*, Vol. 43, pp. 934-938, 1998.
- [6] H. K. Khalil, *Nonlinear Systems (3rd Ed.)*, Prentice-Hall, 2002.
- [7] F. L. Lewis, A. Yesildirek, and K. Liu, "Multilayer neural net robot controller with guaranteed tracking performance," *IEEE Trans. on Neural Networks*, Vol. 7, no. 2, pp. 388-399, 1996.
- [8] I. Morales-Mata and Y. Tang "Instrumentation and control of a leather cutting cartesian robot," *International Conference on Dynamics, Instrumentation and Control, Querétaro, Qro. August 13-16, 2006*
- [9] I. Morales-Mata and Y. Tang "Diseño Mecatrónico de un robot cartesiano enfocado a la Industria del Calzado," *Proc. the 2do Congreso Nacional de Mecatronica. Universidad Anáhuac del Sur, México. Nov. 2004.*
- [10] I. Morales-Mata and Y. Tang, "A high precision fuzzy PD control for servo mechanisms," *Proceeding 3rd International Conference on Computing, Communications and Control Technologies (CCCT 05), Texas, EU, Jul. 2005.*
- [11] I. Morales-Mata and Y. Tang, "An effective fuzzy PD control for high precisions servo mechanisms," *The 6th World Congress on intelligent Control and Automation, June 21-23, 2006 Dalian China.*
- [12] H. Olsson, K. J. Astrom, C. Canudas, M. Gafvert and P. Lischinsky, "Friction models and friction compensation," *European J. Contr.*, Vol. 4, No. 3, 1998.
- [13] R. Ortega, A. Loria, P.J. Nicklasson, H. Sira-Ramírez, "Passivity-based Control of EulerLagrange Systems," Springer, Berlin, 1998.
- [14] E. Panteley, R. Ortega and M. Gafvert, "An adaptive friction compensator for global tracking in robot manipulators," *Contr. Lett.*, Vol. 33, pp. 307-313, 1998.
- [15] S. M. Shahruz, G. Langari, and M. Tomizuka, "Design of robust PD-type control laws for robot manipulators with parametric uncertainties," *J. Robot. Syst.*, Vol. 10, pp. 447-462, 1993.
- [16] J. J. Slotine and W. Li, "On the adaptive control of manipulators," *Int. J. Robot. Res.*, Vol. 6, pp. 49-59, 1987.
- [17] M. Takegaki, S. Arimoto, "A new feedback method for dynamic control of manipulators," *ASME J. Dynam. Syst. Meas. Control*, Vol. 103, pp. 119-125, 1981.



- [18] G. Tao and P. Kokotovic, "Adaptive Control Of Systems With Actuator And Sensor Nonlinearities," John Wiley and Sons, 1996.
- [19] Y Tang, M. Tomizuka, G. Gerrerro, G. Montemayor, "Decentralized robust control of mechanical systems", *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 45, pp. 771 - 776, 2000.
- [20] P. Tomei, "Adaptive PD controller for robot manipulators," *IEEE Trans. Robot. Automat.*, Vol. 7, pp. 565-570, 1991.
- [21] L. Wang, *Adaptive Fuzzy Systems and Control, Design and Stability Analysis*, Prentice Hall, 1994.
- [22] M. Spong and Vidyasagar, *Robot Dynamics and Control*. New York: Wiley, 1989.
- [23] D. C. Karnopp, D. L. Margolis, and R. C. Rosenberg, *System Dynamics: Modeling and Simulation of Mechatronic System*, 2000.
- [24] Canudas de Wit, C., H. Olsson, K. J. Astrom, P. Lischinsky, "A new model for control of systems with friction," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, Vol. 40, No. 3, pp. 419-425.
- [25] Corless M. and G. Leitmann, "Continuous state feedback guaranteeing uniform ultimate boundedness for uncertain dynamic systems," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, Vol. 26, pp. 1139-1144, 1981.
- [26] Friedland, *Advanced Control System Design*, Prentice Hall, 1996.
- [27] Lewis F. L., W. K. Tim, L. Wang, Z. X. Li, "Deadzone compensation in motion control systems using adaptive fuzzy logic control," *IEEE Trans. Contr. Syst. Tech.*, Vol. 7, No. 6, pp 731 - 741, 1999.
- [28] Narendra K. S., K. Parthasarathy, "Identification and control of dynamical systems using neural," *IEEE Trans. Neural Networks*, Vol. 1, No. 1, pp. 4-27.
- [29] Oh S. Y., D. J. Park, (1998), "Design of new adaptive fuzzy logic controller for nonlinear plants with time varying deadzones," *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, Vol. 6, No. 4, pp. 482 - 491.
- [30] Popovic M. R., D. M. Gorinevsky, A. A. Golgenberg, "High-precision positioning of a mechanism with nonlinear friction using a fuzzy logic pulse controller," *IEEE Tran. Contr. Syst. Tech.*, Vol. 8, No. 1, pp. 151 - 158, 2000.
- [31] Recker D., P. Kokotovic, D. Rhode, I. Winkelman, "Adaptive nonlinear control of systems containing a dead-zone," *Proc. 30th IEEE Conf. Decision Control*, Brighton, England, pp. 2111-2115, 1991
- [32] Su C., Y. Stepanenko, J. Svoboda, T. P. Leung, , "Robust adaptive control of a class of nonlinear systems with unknown Backlash-like hysteresis," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, Vol. 45, No. 12, pp. 2427 - 2432, 2000.
- [33] Tang and D. Velez-Diaz, "Robust fuzzy control of mechanical systems", *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, Vol. 11, pp.411-417, 2003.
- [34] Tao G., P. Kokotovic, "Adaptive control of plants systems with unknown dead-zones," *IEEE Trans. Automat. Cotr.*, Vol. 39, No. 1, pp. 59 - 68, 1994.
- [35] Tao G., P. Kokotovic, "Continuous time adaptive control of systems with unknown backlash," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, Vol. 40, No. 6, pp. 1083 - 1087, 1995.

- [36] Tao G., P. Kokotovic, "Adaptive control of plants with unknown hysteresis," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, Vol. 40, No. 2, pp. 200 - 212, 1995.
- [37] Tian M., G. Tao, "Adaptive control of a class on nonlinear systems with unknown deadzones," *Proc. IFAC World Congress*, San Fco, pp. 209 - 214, 1996.
- [38] Woo K. T., L. L. Wang, F.L. Lewis, Z. X. Li, , "A fuzzy system compensator for Backlash," *Proc. IEEE Intern. Confr. On Robotics and Automat.*, Leuven, Belgium, pp. 181 - 186, 1996.
- [39] Yang J. H., L. C. Fu, "Nonlinear adaptive control for manipulator system with gear Backlash," *Proc. 35th Confr. Dec. Contr.*, Kobe, Japan, pp. 4369 - 4374, 1996.
- [40] Wang L., *Adaptive Fuzzy Systems and Control, Design and Stability Analysis*, Prentice Hall, 1994.
- [41] Wang l., "Stable adaptive fuzzy controller with application to inverted pendulum tracking," *IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. 26, pp. 677-691, 1996.