

140
2 es.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO.

FACULTAD DE INGENIERIA

SISTEMA DE MEDICIÓN PARA UN MANIPULADOR ANTROPOMÓRFICO TELEOPERADO.

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA
A R E A M E C A N I C A
P R E S E N T A:
E R N E S T O R I E S T R A M A R T I N E Z.

DIRECTOR DE TESIS : M.I. VICTOR GONZALEZ VILLELA

263178



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

*A mis padres, Ernesto y Ma. Eugenia y a mi hermana Mónica,
por su apoyo e interés en mi desarrollo, y a toda mi familia por su amor.*

*A Martha, quien ha estado a mi lado
en todas, y a su familia tan adorable.*

*A mis hermanos, Javier, Cacho, Adriana
y Héctor, deseándoles lo mismo.*

A Víctor, por el apoyo, confianza y amistad que me ha ofrecido.

CONTENIDO.

TABLA DE ILUSTRACIONES.....	6
INTRODUCCIÓN.....	6
ANTECEDENTES DEL PROYECTO MAT.....	9
1.1. OBJETIVOS DEL PROYECTO.....	9
1.2. GENERALIDADES DEL PROYECTO: MANO ANTROPOMÓRFICA TELEOPERADA (MAT).....	10
DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA.....	10
1.2.1. Sistema de medición.....	11
1.2.2. Sistema de visualización y procesamiento de información.....	11
1.2.3. Sistema de control de posición y movimiento.....	12
1.2.4. Manipulador y estructuras de soporte.....	13
SISTEMAS DE MEDICIÓN Y CRITERIOS DE SELECCIÓN.....	14
2.1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA DE MEDICIÓN.....	14
2.1.1. Elementos de los sistemas de medición.....	14
2.1.2. Problemas de diseño del sistema de medición para M.A.T.....	15
2.2. INVESTIGACIÓN DE SISTEMAS EXISTENTES.....	16
2.2.1. Transductores activos y pasivos.....	16
2.2.2. Transductores afectados por un grado de libertad.....	16
2.2.3. Transductores afectados por varios grados de libertad.....	16
2.2.4. Arreglos de transductores.....	18
2.3. COMPARACIÓN DE SOLUCIONES POSIBLES.....	20
2.3.1. Parámetros de evaluación.....	20
2.3.2. Características del sistema ideal.....	20
SELECCIÓN DEL TRANSDUCTOR.....	21
3.1. JUSTIFICACIÓN DE LA SELECCIÓN DEL PAR IRED-PT.....	22
3.2. MODELO DEL TRANSDUCTOR.....	22
3.2.1. Variación por desplazamiento axial (η_x).....	23
3.2.2. Variación por rotación de los componentes (η_z y η_y).....	25
3.2.3. Método de insensibilidad inherente.....	26
PROCESAMIENTO DE LAS SEÑALES.....	36
4.1. JUSTIFICACIÓN DE LA SELECCIÓN DEL AMPLIFICADOR SELECTOR UTILIZADO.....	36
4.2. SISTEMA DE AMPLIFICACIÓN Y SELECCIÓN DE LA SEÑAL.....	37
CONTROL Y CALIBRACIÓN DE LAS SEÑALES.....	40
5.1. DIGITALIZACIÓN.....	40
5.2. PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN.....	41
5.2.1. Calibración e interpolación.....	41

5.2.2 <i>Formato</i>	46
5.3. PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN SERIAL.....	46
5.3.1. <i>Configuración del puerto serial</i>	46
5.3.2. <i>Cadena transmitida</i>	47
CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE MEDICIÓN.....	48
6.1. MONTAJE DE LOS TRANSDUCTORES EN EL GUANTE DE SOPORTE.....	48
6.2. AMPLIFICADOR Y SELECTOR.....	50
6.3. TARJETA DEL MC68HC11 Y PROGRAMACIÓN.....	51
RESULTADOS DEL SISTEMA DE MEDICIÓN.....	54
7.1. RESPUESTA DEL SISTEMA DE MEDICIÓN.....	54
7.1.1. <i>Retardo del movimiento</i>	54
7.1.2. <i>Mejoramiento del control percibido por el usuario</i>	55
7.2. ESPECIFICACIONES EN COMPARACIÓN CON SISTEMAS ACTUALES.....	56
7.2.1. <i>Resolución</i>	57
7.2.2. <i>Linealidad</i>	57
7.2.3. <i>Velocidad de muestreo</i>	57
7.3. CONTINUIDAD DEL PROYECTO.....	58
7.3.1. <i>Desarrollo de funciones inversas paramétricas y transformaciones</i>	58
7.3.2. <i>Incremento en la velocidad de la plataforma de desarrollo</i>	58
7.3.3. <i>Incorporación de retroalimentación de fuerzas</i>	58
7.3.4. <i>Reconocimiento de instrucciones</i>	59
7.3.5. <i>Transformaciones geométricas para el control de otros manipuladores</i>	59
CONCLUSIONES.....	60
BIBLIOGRAFÍA.....	62
APÉNDICES. APÉNDICE A1. ELEMENTOS PARA MEDICIÓN DE POSICIÓN.....	64
<i>Transductores de desplazamiento capacitivos</i>	64
<i>Transductores de desplazamiento inductivos</i>	64
<i>Transductores de desplazamiento potenciométricos</i>	65
<i>Transductores de desplazamiento por galgas extensométricas</i>	65
<i>Transductores de desplazamiento electroópticos</i>	65
<i>Codificadores lineales y angulares</i>	65
<i>Dispositivos radar y sonar, sensores de distancia</i>	66
APÉNDICE A2. CARACTERÍSTICAS DE SISTEMAS EXISTENTES EN EL MERCADO.....	67
<i>El DataGlove</i>	67
<i>El CyberGlove</i>	68
<i>El PowerGlove</i>	68
<i>El DHM (Dextrous HandMaster)</i>	68
APÉNDICE A3. SOLUCIONES PROPUESTAS PARA EL ELEMENTO DE MEDICIÓN PRIMARIO	69
<i>Medidores capacitivos o inductivos</i>	69
<i>Medidores resitivos</i>	69
<i>Medidores de esfuerzo</i>	69
<i>Exoesqueleto</i>	70
<i>Sensor óptico de CdS</i>	70
<i>Pérdidas en fibra óptica</i>	70
<i>Variación de potencia luminosa recibida por cambios geométricos</i>	70
APÉNDICE B MODELO DE FUENTE LUMINOSA ISOTRÓPICA.....	71
APÉNDICE C. TABLAS Y GRÁFICAS EXPERIMENTALES PARA EL MODELO DEL TRANSDUCTOR.....	74

APÉNDICE D1 PROGRAMA PRINCIPAL DEL SISTEMA DE MEDICIÓN	81
APÉNDICE D2 PROGRAMA CON MINIMIZACIÓN DE LA FRECUENCIA DE MUESTREO	85

TABLA DE ILUSTRACIONES.

Diagrama 1.1. Sistema de teleoperación.....	11
Foto 1.2 Pantalla del sistema de simulación y visualización.....	12
Foto 1.3. Manipulador antropomórfico ensamblado.....	13
Diagrama 2.1. Elementos funcionales de un sistema de medición.....	15
Diagrama 2.2. Transductor capacitivo afectado por dos variables.....	17
Diagrama 2.3. Sensor capacitivo insensible a la dirección \hat{e}_r	18
Diagrama 2.4. Arreglo de capacitores.....	18
Diagrama 3.1. Modelo plano del transductor.....	23
Gráfica 3.2. Comportamiento axial del transductor.....	24
Gráfica 3.3. Comportamiento angular del emisor IRED.....	25
Gráfica 3.4. Comportamiento angular del receptor PT.....	26
Diagrama 3.5. Montaje del par IR en un elemento flexible.....	26
Gráfica 3.6. Función angular del transductor montado en el fleje.....	27
Gráfica 3.7. Función de error para el ajuste de la función η_{ang}	28
Diagrama 3.8. Geometría del transductor.....	29
Gráfica 3.9. Modelo del transductor en función a S (distancia inicial entre IRED y PT) con $\delta=2.5$	31
Gráfica 3.10 a. Modelo del transductor en función a δ (distancia entre el soporte flexible y el IRED/PT).....	32
Gráfica 3.10 b. Modelo del transductor en función a δ (vista lateral).....	32
Gráfica 3.11. Modelo del transductor en función a S (distancia inicial entre IRED y PT) con $\delta=25$	33
Gráfica 3.12 a y b. Comparación del desplazamiento del punto máximo de la función para medir ángulos de sobreextensión.....	34
Gráfica 3.13. Valores experimentales y función ajustada para el transductor en función a un potenciómetro lineal.....	35
Diagrama 4.1. Amplificación y Multiplexado de la señal.....	37
Diagrama 4.2. Amplificador inversor para el PT.....	37
Diagrama 5.1. Analogía mecánica de la rutina de calibración.....	41
Diagrama 5.2. Diagrama de estados de la rutina de calibración.....	42
Gráfica 5.1. Variación de las variables $ef[i]$, $lh[i]$ y $uh[i]$ con el tiempo en el modo C de operación.....	43
Gráfica 5.2. Transformación del rango recibido al rango del formato.....	44
Diagrama 6.1. Montaje del soporte flexible del transductor en el guante.....	48
Diagrama 6.2. Ubicación de los transductores en el guante.....	48
Diagrama 6.3. Circuito del Amplificador del transductor.....	49
Diagrama 6.4. Circuito del amplificador selector del sistema de medición.....	49
Diagrama 6.5. Esquema de la tarjeta de Amplificación y Selección.....	51
Diagrama 6.6. Diagrama de flujo del programa del sistema de medición.....	52
Diagrama 7.1. Operación del puerto serial.....	54
Diagrama 7.2. Operación del puerto serial para el programa 2.....	55
Tabla. 7.3. Desempeño en función al tiempo de muestreo visual.....	56
Diagrama D1.1. Soportes utilizados para la caracterización del IRED y del PT.....	73
Diagrama D1.2. Circuito utilizado para la caracterización.....	74
Tabla D1.3. Valores medidos de voltaje para la caracterización del transductor.....	74
Gráfica D1.4. Medición del movimiento del transductor.....	75
Gráfica D1.5. Medición del movimiento del transductor evitando exceder la alineación de los ejes ópticos.....	76
Gráfica D1.6. Función del comportamiento del transductor.....	77
Gráfica D1.7. Función del comportamiento del transductor con disminución del ruido.....	78
Gráfica D1.8. Señales del transductor y del generador de señales variando con el tiempo.....	79

INTRODUCCIÓN.

En este trabajo se presenta el sistema de medición diseñado para el proyecto del Manipulador Antropomórfico Teleoperado (MAT), que se llevó a cabo en el Departamento de Mecatrónica de la Facultad de Ingeniería. Se inicia con la investigación, planeación y trabajo teórico del proyecto. La primera parte, antecedentes de proyecto MAT introduce el tema de la teleoperación describiendo las ventajas del uso de un manipulador antropomórfico, presentando los objetivos del proyecto y finalmente ubicando los componentes del proyecto en un esquema formal de control en donde el controlador es un humano. La segunda parte, sistemas de medición y criterios de selección, presenta una definición formal para los sistemas de medición, para después describir los sistemas utilizados en la actualidad para la solución del problema de medición y establecer cual es el sistema ideal en este caso particular. La tercera parte, selección del transductor, comienza con una explicación de la selección del transductor optoelectrónico activo utilizado, continúa con el desarrollo del modelo físico correspondiente, sustentado experimentalmente, siguiendo una metodología analítica. La cuarta parte, procesamiento de las señales, presenta el sistema de amplificación y selección de señales, justificando primero la razón por la cual se escogió la configuración del amplificador selector particular. La quinta parte, control y calibración de las señales, introduce a la programación del sistema, iniciando con la digitalización, procesamiento y calibración de la señal, presentando el formato utilizado para la comunicación entre las distintas partes del MAT, además de las configuraciones de hardware del sistema de medición.

A continuación se presentan los capítulos relacionados con la implementación del sistema y resultados. La sexta parte, construcción del sistema de medición, explica el desarrollo del sistema de medición, comenzando con el guante de soporte de los transductores, para luego continuar con el sistema de amplificación y selección de las señales y la programación de la tarjeta de Motorola MC68HC11E9 en modo expandido. La séptima parte, resultados del proyecto, contiene información de desempeño del sistema y presenta mejoras del software de fácil implementación que se realizaron en el sistema y las especificaciones más importantes para sistemas de este tipo. Termina con un resumen de las mejoras con las que se continuaría el desarrollo de este proyecto en lo que se refiere a la medición y procesamiento de información. El trabajo concluye con algunos puntos importantes involucrados con este proyecto y con

sus resultados. Se anexa la bibliografía consultada y apéndices en donde se presentan los resúmenes de la investigación bibliográfica, el modelo utilizado para la variación en distancia del transductor, tablas y gráficas experimentales y los programas utilizados para el control.

1

ANTECEDENTES DEL PROYECTO.

El proyecto del manipulador operado a distancia busca la construcción de una mano artificial, por medio de tecnologías accesibles tanto en costo como en tiempo de desarrollo, cuyo control esté basado en un sistema de medición directo que, a diferencia de otros tipos de control, permita operar el sistema sin necesidad de un entrenamiento previo. La ventaja de hacerlo de este modo es que en lugar de manejar por ejemplo, tres grados de libertad con una palanca o un arreglo de palancas se pueden controlar varios grados de libertad con la mano.

Si bien la habilidad requerida para controlar varios grados de libertad en un proceso cualquiera puede ser muy grande, el ser humano tiene la capacidad de hacer movimientos coordinados sumamente complejos. Sobre todo cuando se trata de controlar un manipulador similar a la mano humana, se hace evidente lo ventajoso que resulta el contar con un sistema de medición que aproveche las habilidades que tiene el usuario por el hecho de haberse desenvuelto a lo largo de su vida en un ambiente tridimensional, manipulando objetos de distintos tipos de manera natural e intuitiva.

1.1. Objetivos del proyecto.

Los objetivos del proyecto se pueden contemplar bajo diversos aspectos, pues el desarrollo del manipulador beneficia tanto a las personas involucradas directamente como a los que aprovechen sus resultados en subsecuentes proyectos, similares a éste. El objetivo principal es diseñar y construir un sistema que permita controlar la posición de un manipulador antropomórfico a partir de la posición equivalente de la mano de un usuario, aportando

conocimientos en el área de la mecatrónica industrial, particularmente en teleoperación, que puedan ser de utilidad para investigaciones futuras en el Departamento de Mecatrónica, en la Facultad de Ingeniería y en México, a fin de aproximar el nivel tecnológico nacional hacia las tecnologías de punta internacionales.

Otros objetivos del proyecto contemplan la creación de un precedente que pueda servir como base para servicio social o proyectos desarrollados por estudiantes de licenciatura relacionados con cibernética, inteligencia artificial, control, robótica y biomecánica, además de la elaboración de trabajos y publicaciones que participen en diversos foros de divulgación científica, representando a la U.N.A.M.

1.2. Generalidades del proyecto: Mano Antropomórfica Teleoperada (MAT).

El proyecto MAT surge dentro del contexto de los sistemas mecatrónicos industriales con el objeto de aplicar tecnologías accesibles a la solución de problemas de diseño en mecatrónica. Los resultados de este proyecto interesan a las labores en donde la teleoperación es fundamental. Por ejemplo en el manejo de sustancias peligrosas o radioactivas, donde el operador no puede tomar con sus manos los materiales; en lugares inaccesibles por el hombre, como en las profundidades del océano o en minas de alto riesgo; y en la medicina, como auxiliar en la cirugía laparoscópica o microcirugía.

Descripción del sistema.

El sistema se basa en cuatro etapas, que se distinguen por ser relativamente independientes en cuanto al conjunto de soluciones de cada una y principios fundamentales con base en los cuales se pueden construir: sistema de medición; sistema de visualización y procesamiento de información; sistema de control de posición; y manipulador y estructuras de soporte.

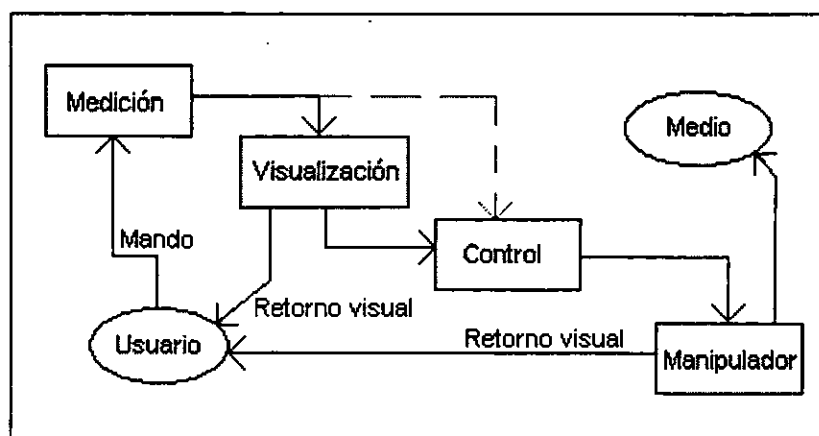


Diagrama 1.1. Sistema de teleoperación.

1.2.1. Sistema de medición.

El objetivo que se planteó para el sistema de medición abarca no solamente el diseño, sino también la fabricación de un prototipo funcional, de acuerdo con los objetivos del proyecto.

Este sistema, cuyo diseño y construcción son tratados en este trabajo, consiste en el punto en donde se toma la información referente a la posición de la mano humana para procesarla para enviarla a los demás sistemas. En realidad el sistema de medición comprende también la visualización, sin embargo se prefirió distinguir uno de otro dada la complejidad de cada uno de los problemas.

1.2.2. Sistema de visualización y procesamiento de información.

En este sistema se despliega gráficamente la configuración tridimensional de la mano, y se regula el problema cinemático directo, además de ser la herramienta para resolver el problema cinemático inverso de la planeación de trayectorias. Está basado en transformaciones homogéneas que varían conforme varía la entrada del sistema de medición. Además permite la planeación de trayectorias, generadas a partir de puntos que controlan curvas de interpolación cúbicas (splines).

El sistema de medición junto con el de visualización y procesamiento de información conforman el primer circuito de retroalimentación de información para el usuario, mostrado en el diagrama 1.1. Este primer circuito es importante, ya que se puede contemplar como un retorno asistido por computadora, lo que significa que se puede manipular información, tanto de salida como de entrada, con el fin de hacerla de fácil acceso y comprensión para el usuario. Por ejemplo, la medición de las fuerzas en el manipulador, cuya

implementación está fuera de los objetivos de esta etapa del proyecto, se podría convertir en un retorno visual por medio de indicadores de fuerza, el cual podría reforzar y hasta sustituir el retorno táctil hacia el usuario.

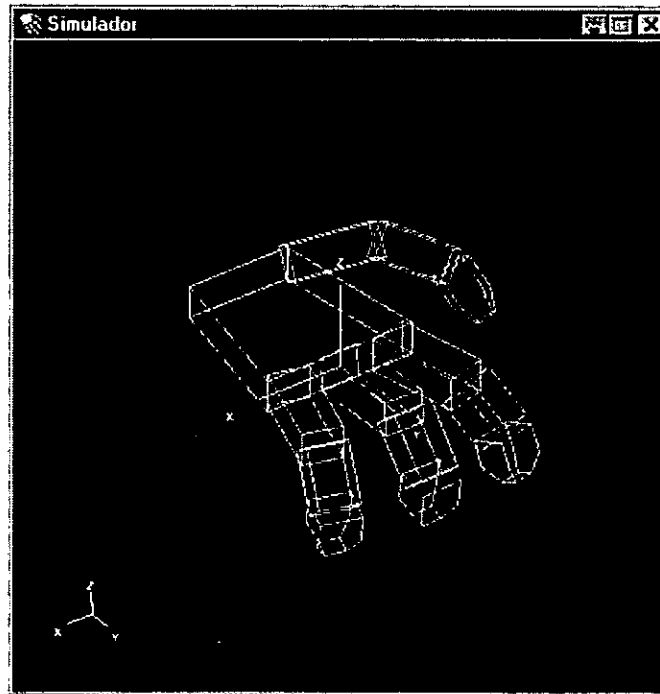


Foto 1.2 Pantalla del sistema de simulación y visualización.

1.2.3. Sistema de control de posición y movimiento.

Esta etapa tiene la tarea de mover al manipulador con el mínimo error y con una buena respuesta en frecuencia, recibiendo la información del sistema de medición o del sistema de procesamiento de información y actualizando las posiciones de los motores que mueven cada elemento.

Este sistema actualmente tiene una estructura híbrida de control, ya que el ciclo de control es analógico, pero un microprocesador se encarga de intercambiar información con este sistema. Está basado en el control de la velocidad y de la posición por medio de dos sensores respectivamente. Posee una caja de reducción de 1 a 60, de modo que se obtiene en la salida un par alto y una velocidad reducida.

La próxima evolución de este sistema contempla el control digital de posición, velocidad o aceleración, utilizando un procesador más veloz, como un procesador digital de señales, para el control, en combinación con un microprocesador como el utilizado para el control del flujo de información y la regulación y ajuste de los parámetros de control.

1.2.4. Manipulador y estructuras de soporte.

Esta parte es el dispositivo actuador, y consiste en las estructuras de soporte y de transmisión de potencia que pueden de un modo eficiente imitar la función de la mano humana, permitiendo la realización de los diversos tipos de sujeción que ésta es capaz de hacer.

Actualmente se trabaja en las mejoras que puede tener el manipulador, tanto en su estructura como en su fabricación. También se están estudiando nuevas configuraciones, todas variantes de la forma de la mano, cuyo control sea más sencillo, sin modificar la capacidad de manipulación.

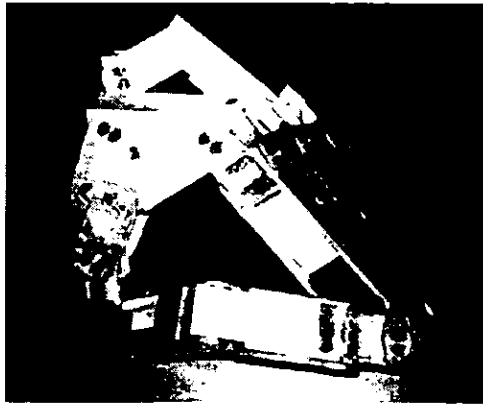


Foto 1.3. Manipulador antropomórfico ensamblado.

2

SISTEMAS DE MEDICIÓN Y CRITERIOS DE SELECCIÓN.

En este capítulo se presentan: el problema de medición, un resumen de la investigación sobre conceptos básicos y sistemas comerciales para resolver el problema y una comparación de las soluciones. La intención de este capítulo es presentar el contexto a partir del cual se desarrolló el sistema de medición de un modo descriptivo.

El objetivo que se planteó para el sistema de medición abarca no solamente el diseño, sino también la fabricación de un prototipo funcional, de acuerdo con los objetivos del proyecto.

2.1. Definición del problema de medición.

La definición del problema es el principio del cual debe partir el diseño del sistema de medición. Para poder definir el problema se identificaron primero los elementos del sistema de medición y después se particularizaron dichos elementos para este proyecto.

2.1.1. Elementos de los sistemas de medición.

Los elementos fundamentales presentes en cualquier sistema de medición se muestran en el diagrama 2.1.

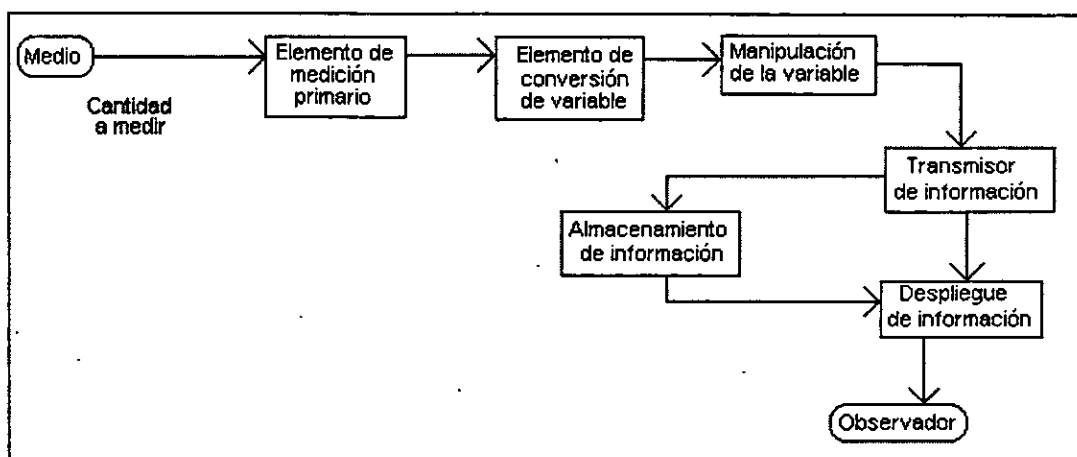


Diagrama 2.1. Elementos funcionales de un sistema de medición.

El recorrido de la información inicia en un medio que contiene a la variable de interés. El elemento que extrae la variable de interés es el elemento de medición primario, siendo éste el primero en recibir energía del medio. A continuación se encuentra un elemento de conversión de variable. No todos los sistemas de medición cuentan con este elemento, aunque algunos tienen varios. Después se puede procesar la información a través del elemento de manipulación de variables. Este elemento puede omitirse, o encontrarse en cualquier otro punto a lo largo del proceso de medición. En muchos sistemas de medición, y en este proyecto en particular, es necesario transmitir la información a través de una distancia. Para este fin se utiliza un elemento de transmisión de información. La fase final es el despliegue de la información de algún modo conveniente al usuario, ya sea a través de imagen, sonido u otro medio perceptible.

2.1.2. Problemas de diseño del sistema de medición para M.A.T.

El problema de medición en este caso consiste en diseñar un elemento primario de medición que mida de manera directa o indirecta el ángulo de cada grado de libertad de la mano cuyo equivalente en el manipulador se desee controlar. En particular interesa que el elemento de conversión tenga una variable eléctrica como salida y que el elemento de transmisión de información utilice un protocolo de comunicación estandarizado que sea compatible con los demás sistemas. Este es el alcance del problema, ya que la etapa de visualización está integrada al sistema de procesamiento de información y dicha etapa y el control se encuentran de manera implícita dentro del esquema del manipulador.

El sistema no debe ser invasivo ni restringir el movimiento de la mano y debe ser adaptable a diferentes usuarios, además de permitir la manipulación de objetos diversos con el fin de estudiar y comparar varios tipos de sujeción. El

sistema debe ser de fácil montaje y calibración, y de una simplicidad tal que se pueda desarrollar y fabricar sin un costo excesivo.

2.2. Investigación de sistemas existentes.

Se realizó una investigación bibliográfica para determinar los conceptos fundamentales de medición y sistemas de medición involucrados con este problema particular. Dentro de los dispositivos que se utilizan para medir variables físicas existen distintos tipos. Esta investigación se enfocó principalmente a transductores de posición. En particular el enfoque se dirige a los dispositivos sensibles a varios grados de libertad, y al método de insensibilidad inherente.

2.2.1. Transductores activos y pasivos.

Un transductor pasivo es un dispositivo que convierte energía de un tipo en otro para poder medir con mayor facilidad alguna variable física. Por ejemplo, un micrófono convierte la energía acústica, caracterizada por una variación oscilante de la presión y de la posición de una membrana, en energía eléctrica de tipo alterno. En este caso no se requiere de energía adicional para realizar la conversión de ondas de presión a un voltaje oscilante.

Un transductor activo es un dispositivo que modula el flujo de energía de algún tipo por medio de otra variable física. El flujo de energía es función del valor de la variable física moduladora. Por ejemplo, un medidor de distancia láser emite un flujo de energía luminosa coherente que se refleja en un punto. La distancia desde el punto de emisión hasta el punto de reflexión determina el tiempo que tarda en retornar el haz. En este caso sí se requiere de energía adicional para realizar la conversión de una distancia en un tiempo de retardo.

2.2.2. Transductores afectados por un grado de libertad.

Son transductores que convierten una variable de posición, ya sea una distancia o un ángulo, en otra variable física. Entre otros se tienen los transductores resistivos, capacitivos, inductivos, ópticos e interferómetros láser. Todos estos permiten medir sólo un grado de libertad, por lo que para medir la posición de un objeto en el espacio tridimensional se requieren seis de ellos. En el apéndice A1 se mencionan algunos de estos transductores.

2.2.3. Transductores afectados por varios grados de libertad.

Consisten en dispositivos que se ven afectados por dos o más grados de libertad. Un ejemplo podría ser el considerar un capacitor cuya área entre placas varíe al mismo tiempo que la distancia entre placas en función a dos desplazamientos ortogonales o linealmente independientes, sean para este caso

x y y sus direcciones. En este caso no basta sólo con realizar la medición de la capacitancia del dispositivo para obtener, a partir del modelo de variación del capacitor con respecto al área y distancia entre placas, los desplazamientos x y y , pues sólo se tiene una variable, que por sí sola no puede representar la totalidad de la información de posición.

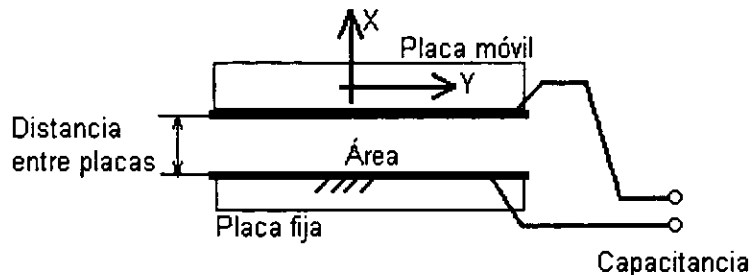


Diagrama 2.2. Transductor capacitivo afectado por dos variables.

En este caso se tiene un transductor que mide el desplazamiento en x , y se ve afectado por el desplazamiento en y ; aunque podría ser visto como un transductor que mide el desplazamiento en y afectado por x , dependiendo de la variable de interés. O incluso se podría desear medir el desplazamiento en alguna dirección dada por el vector unitario \hat{e}_m , y considerar al vector \hat{e}_r como un vector en la dirección de la variable que no se desea conocer.

2.2.3.1. Método de insensibilidad inherente.

El método de insensibilidad inherente aplicado al diseño de transductores, en este caso mecánicos, conduce a idear alguna manera de insensibilizar el transductor en las direcciones distintas a la de la variable de interés, o de manera más general, alguna manera de conducirlo por una trayectoria paramétrica de un sólo grado de libertad. Esto en un espacio tridimensional corresponde a utilizar tres ecuaciones paramétricas, o dos funciones implícitas, para obtener una sola variable a medir. Para el caso de n dimensiones, se requieren $(n-1)$ ecuaciones que relacionen entre sí las n funciones. Para el capacitor de ejemplo, esto equivaldría a restringir el movimiento en alguna dirección (diagrama 2.3.) o mediante algún mecanismo que generara una trayectoria (1 G.L.). Este caso es relevante para el diseño de los transductores que se emplearán en la propuesta del sistema de medición, como se verá más adelante.

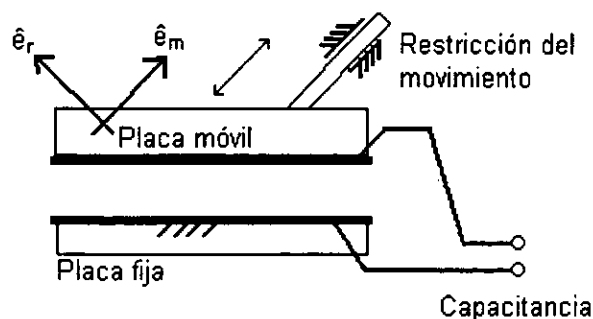


Diagrama 2.3. Sensor capacitivo insensible a la dirección \hat{e}_r .

2.2.3.2. Combinación de transductores

Por otro lado se podría necesitar tanto la información del área como de la distancia entre placas, es decir, un vector de variables. En este caso se podría colocar un segundo transductor, en una dirección distinta al primero (diagrama 2.4.), para operar sobre la información obtenida y obtener ambas variables. Este es el caso del tipo de solución para el diseño del arreglo de transductores. En el caso en que no se insensibilizaran los transductores con respecto a trayectorias independientes, con el fin de reflejar únicamente la variación de manera individual, se dice que ambos transductores están acoplados, en otras palabras, la variable de medición de uno de ellos afecta a la del otro, y/o viceversa. El caso de acoplamiento entre transductores obliga a procesar de alguna manera especial las variables medidas. En el caso de un conjunto de n transductores lineales esto equivaldría a usar una transformación lineal representada por una matriz cuadrada de $n \times n$ con coeficientes distintos de 0 fuera de la diagonal principal. Para conjuntos de transductores no lineales implicará el uso de transformaciones no lineales más complejas de manipular.

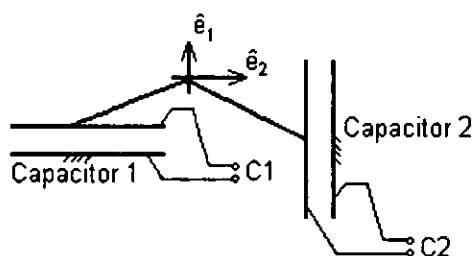


Diagrama 2.4. Arreglo de capacitores.

2.2.4. Arreglos de transductores.

Para medir varios grados de libertad es preciso utilizar tantos transductores como grados se tengan. Estos conjuntos de transductores se llamarán "arreglos de transductores".

Los arreglos de transductores se utilizan para capturar información compleja que permita determinar el estado de un vector de variables en un sistema, y pueden ser acoplados o no acoplados, como se mencionó en el punto anterior. En este caso particular la información consiste en parámetros que permiten determinar la posición de la mano de un usuario, dado por un vector de posiciones.

Se hizo también una investigación sobre los tipos de transductores y arreglos empleados comercialmente, para determinar la manera más sencilla de obtener el vector de posiciones de la mano.

2.2.4.1. Exoesqueletos. (Estructuras Rígidas).

Consisten en mecanismos de barras articuladas montadas sobre la mano de un usuario, con transductores en puntos que facilitan la medición. Estos sistemas presentan variaciones más bruscas entre usuarios con distinta antropometría y necesitan calibración mecánica. Como ejemplo se tiene el DHM de Exos Inc. , el cual es una estructura metálica que se lleva en el dorso de la mano.

2.2.4.2. Guantes. (Estructuras Flexibles).

En estos sistemas se colocan los transductores, generalmente de tipo flexible, en las articulaciones de tal modo que se puedan medir variaciones debidas a la flexión de los elementos. La precisión de estos sistemas es menor a la de los exoesqueletos pero debido a que incorporan transductores distribuidos puede ser utilizado por varios usuarios sin necesidad de ajustarse. Como ejemplos que se encuentran disponibles en el mercado se tienen el DataGlove que utiliza fibra óptica y el CyberGlove, que utiliza sensores resistivos lineales patentados.

2.2.4.3. No estructurados.

Consiste en la colocación de transductores directamente sobre el usuario, de modo que se registre la posición en el espacio de una red de puntos. La principal desventaja es el tiempo que tarda la colocación de los transductores. Sin embargo, dado que carecen de estructuras de soporte, pueden usarse para capturar información geométrica con una alta densidad, por ejemplo la expresión facial de modelos animados por computadora controlados por un actor en la industria cinematográfica. Un ejemplo de este tipo de transductor es el Polhemus, que consiste en un receptor electromagnético que capta el campo variable generado por una antena para determinar seis grados de libertad, por ejemplo, tres distancias ortogonales y tres ángulos asociados con los ejes de referencia.

2.3. Comparación de soluciones posibles.

Para la búsqueda de soluciones se recurrió primero a la generación de soluciones posibles y luego se restringió el espacio de soluciones definiendo parámetros de evaluación para seleccionar con base en el menor costo de desarrollo, es decir, tanto costo de componentes como tiempo para desarrollar el sistema.

2.3.1. Parámetros de evaluación.

Los principales parámetros de evaluación en nuestro caso fueron cualitativos, es decir, se caracterizaron por medio de conceptos de manera discreta, lo cual es más sencillo –y menos costoso– que determinar valores cuantitativos medidos con equipo. Por ejemplo el costo (muy alto, alto, medio, bajo); la facilidad de construcción (difícil, media, fácil) que también es un costo; la precisión, exactitud de la medición, reflejadas a través de la resolución; y la facilidad de calibración del sistema. En el apéndice A3 se muestran las principales soluciones que se analizaron para llegar a la selección final.

Por otro lado no interesan las características dinámicas del elemento de medición primario, ya que no se harán mediciones en frecuencias altas –por arriba de los 100 Hz para este caso–, y esto simplifica los elementos de procesamiento y compensación del sistema.

2.3.2. Características del sistema ideal.

El sistema ideal tiene las siguientes características: debe tener el costo más bajo de desarrollo de todas las soluciones posibles. Se calibra fácilmente y tiene buena resolución. No presenta perturbaciones por movimientos contiguos o en direcciones distintas de la principal (acoplamiento), tiene un rango de medición mayor o igual que el rango de movimientos del usuario, dimensiones reducidas y no presenta histéresis.

3

SELECCIÓN DEL TRANSDUCTOR.

La selección condujo a utilizar un transductor óptico activo basado en un par emisor-receptor infrarrojo usado normalmente para comunicación digital en fase de saturación, muy económico y comercialmente extendido. Este arreglo posee una variación de la señal en fase de ganancia que puede utilizarse en este caso para medir variaciones en la potencia luminosa recibida con una buena resolución. Además, debido a que se maneja en la banda de radiación infrarroja presenta una buena inmunidad al ruido ambiental. Por otro lado, el hecho de que el principio de operación sea la transmisión de luz, el efecto de histéresis por fricción no existe, y la histéresis sólo depende de las estructuras sobre las que se monte. En este capítulo se desarrollan los modelos de las variaciones de parámetros eléctricos con respecto a parámetros geométricos, para determinar la mejor forma de acoplar este principio de operación con el vector de posiciones de la mano que interesa conocer.

Se identificarán para este transductor las partes del modelo del sistema de medición que en él se encuentran. Primero se tiene el elemento de medición primario, que es el receptor infrarrojo. El medio de medición es el espacio en el que se encuentra el emisor infrarrojo, y la variable de medición directa es la potencia luminosa recibida. Finalmente el elemento de conversión de variables es nuevamente el receptor infrarrojo, que realiza la conversión de energía luminosa en eléctrica. El transductor es activo porque se necesita alimentar con energía eléctrica el emisor para generar la variable de medición directa y polarizar el receptor para que pueda realizar la conversión. En realidad la variable de medición directa se ve perturbada por las condiciones generales de posición del par, por lo que existe la necesidad de modelar cómo afectan estas condiciones perturbadoras a dicha variable.

3.1. Justificación de la selección del par IRED-PT.

El motivo por el cual conviene utilizar este transductor es el costo. Dado que los componentes son ampliamente utilizados en aplicaciones de comunicación por infrarrojo, es fácil encontrarlos en el mercado. Además, la selección de un dispositivo óptico conduce a eliminar fricción entre componentes, ya que estos no se tienen que tocar. Por otro lado, es fácil compensar el transductor, ya que a diferencia de un capacitor o un inductor puede trabajar con corriente continua. Esto permite también eliminar el ruido ambiental causado por la radiación oscilante de algunos emisores ambientales, como la luz fluorescente, mediante un filtro para eliminar altas frecuencias.

3.2. Modelo del transductor.

Dado que el transductor utilizado no se utiliza comúnmente en transmisión con pérdidas se cuenta con poca información del fabricante acerca del comportamiento de la corriente eléctrica que resulta de la potencia luminosa recibida. Sin embargo este comportamiento en general es lineal, por lo que el proceso de conversión de energía luminosa a eléctrica se puede caracterizar por una constante, y no representa un problema para el modelo.

El modelo del transductor consiste entonces en una serie de relaciones que permitirán obtener las condiciones espaciales a las que está sujeto el par emisor-receptor a partir de las condiciones eléctricas del receptor, y este modelo mecánico es no lineal, por lo que sí interesa conocerlo en detalle. Primero se obtendrán las relaciones para ciertos casos particulares, y luego se extenderán los resultados para obtener expresiones más generales.

El modelo del transductor se basa en tres funciones independientes de atenuación, que corresponden a las variables geométricas que afectan la transmisión en el par. De este modo se tiene un voltaje, modificado por tres grados de libertad, de acuerdo a la siguiente expresión:

$$V_s = V_{pol} + \Delta V \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \dots (1)$$

Esta expresión representa un valor de voltaje modulado por tres funciones de atenuación normalizadas, η con valores entre 0 y 1, cuyo valor depende de tres grados de libertad distintos respectivamente, mientras que V_{pol} y ΔV son parámetros dependientes de características de compensación del elemento de

manipulación de la variable y serán analizados en el capítulo siguiente. La determinación del modelo del transductor consiste en la determinación de estas funciones.

En el diagrama 3.1. se muestran las relaciones de cada una de las funciones de atenuación con sus respectivos grados de libertad asociados.

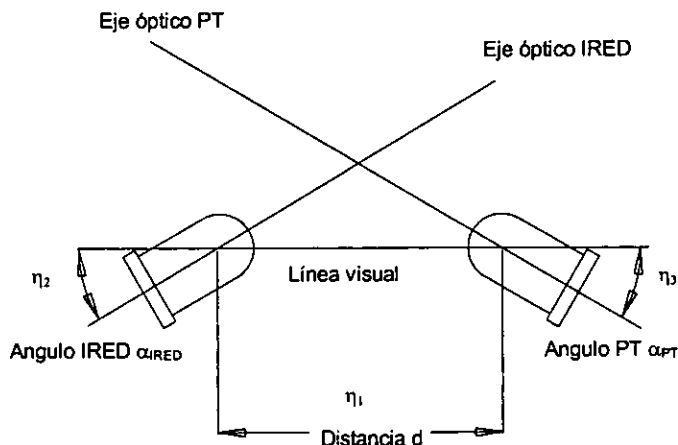


Diagrama 3.1. Modelo plano del transductor.

Las funciones de atenuación actúan modulando una señal transmitida por el emisor por medio de dos mecanismos de atenuación principales. El primero es debido a la divergencia del haz emitido, por lo cual la radiación recibida varía con la distancia. El segundo se refiere a los perfiles de transmisión del IRED y del PT, con lo que se tienen menores potencias conforme la línea de visión se aleja del eje de simetría o eje óptico de cada uno de los componentes. La función η_1 depende únicamente de la distancia entre el par, mientras que las funciones η_2 y η_3 dependen del perfil de transmisión del IRED y del PT para ángulos α_{IRED} y α_{PT} .

3.2.1. Variación por desplazamiento axial (η_1).

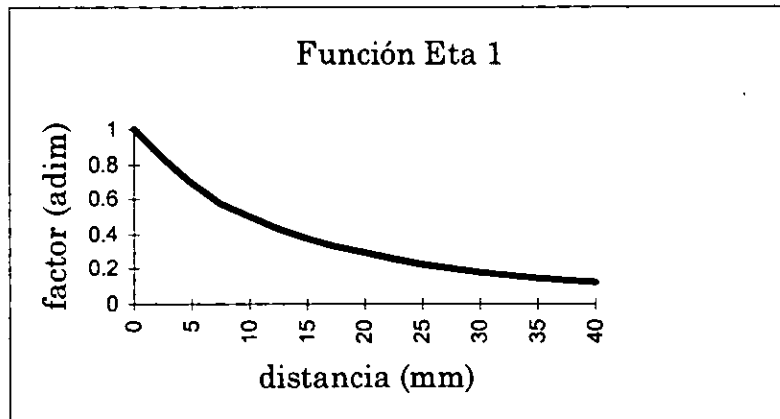
El modelo propuesto para la variación por desplazamiento sobre el eje óptico consiste en un modelo de fuente luminosa puntual isotrópica. Si se ubica un punto de medición en el entorno de esta fuente se observa que la única causa por la cual varía la luminosidad percibida es la variación de la distancia. El modelo general que se desarrolla en el apéndice B conduce a la siguiente expresión:

$$P_{\text{recibida}} = P_{\text{emitida}} \cdot \left(\frac{k_1}{(x - x_0)^2} \right) \dots (2)$$

Esta expresión conduce a la definición de una eficiencia de transmisión axial o primera función de atenuación.

$$\eta_1 = \frac{P_{\text{recibida}}}{P_{\text{emitada}}} \dots (3) \quad \eta_1 = \frac{k_1}{(x - x_0)^2} \dots (4)$$

La función (4) contiene dos parámetros que caracterizan al transductor en particular. Se trata de la ecuación de una hipérbola con una asíntota en $\eta_1=0$ que se puede trasladar en la dirección de x . En el modelo real existe un desplazamiento virtual debido a las lentes incorporadas al IRED y PT, por lo que se espera obtener una función con $x_0 < 0$. De mediciones experimentales se obtuvo una función que se ajusta al modelo planteado (gráfica 3.2).



Gráfica 3.2. Comportamiento axial del transductor.

Haciendo un análisis de correlación se obtienen los siguientes valores para k_1 y x_0 , en la primera función de atenuación:

$$\eta_1 = \frac{535.91}{(d + 24)^2} \dots (5)$$

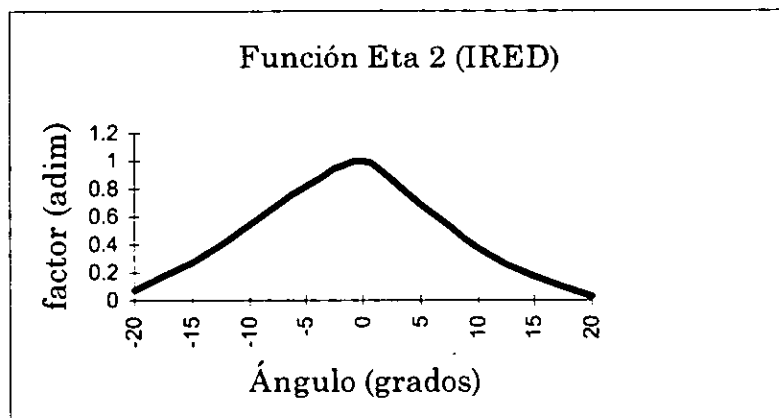
en donde d es la distancia a lo largo de la línea visual en milímetros.

3.2.2. Variación por rotación de los componentes (η_2 y η_3).

La variación de la señal por rotación de los componentes es debida a que tanto el IRED como el PT presentan un perfil de transmisión no uniforme con respecto al ángulo de transmisión referido al eje óptico.

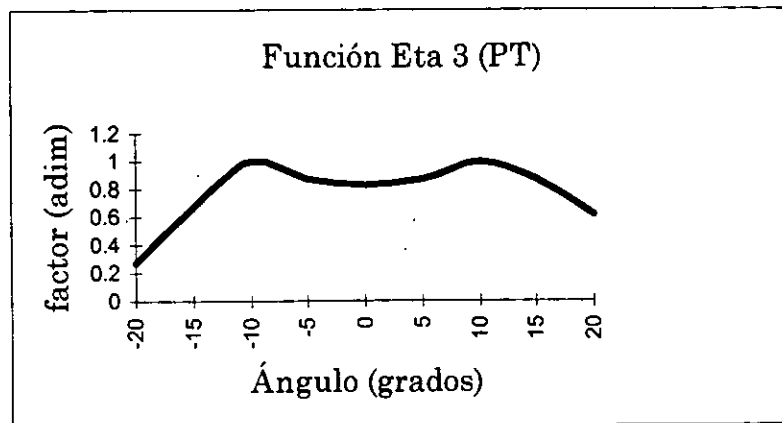
Estas funciones se determinaron experimentalmente para el PT y el IRED, de modo que se pudieran observar los puntos críticos, es decir máximos y mínimos, y los rangos de variación. En el apéndice D1 se explican los procedimientos empleados para obtener las funciones.

Para la variación por rotación de los componentes se recurrió a hojas técnicas únicamente con fines de comparación [13], y no para plantear el modelo del transductor, ya que las mediciones experimentales mostraron una desviación importante con respecto a los modelos ideales debido a la cercanía entre los componentes, la cual provocó que no se comportaran como puntos ideales de emisión y recepción. Se encontró que la rotación en torno al eje óptico podía modificar la función de atenuación, introduciendo una asimetría considerable. La función para el IRED se muestra en la gráfica 3.3. a continuación.



Gráfica 3.3. Comportamiento angular del emisor IRED.

Por otro lado, mientras que se esperaba que la transmisión tuviera un máximo en el eje óptico de cada componente, se encontró que no ocurre de este modo con el PT, sino que se tiene un máximo en un cono de 10° respecto al eje (gráfica 3.4). Este hecho hace que el diseño del fleje sea crítico, para que la superposición de variaciones conduzca a una función monótona, evitando tener máximos o mínimos dentro del rango de medición que producirían ambigüedades en las mediciones.



Gráfica 3.4. Comportamiento angular del receptor PT.

3.2.3. Método de insensibilidad inherente.

El modelo más general para los componentes del transductor cuenta con 6 grados de libertad. Para este modelo se consideró que los traductores tenían funciones de transmisión uniformes respecto a la rotación sobre su eje, de tal modo que la rotación del IRED o del PT en torno a su eje óptico no produce variaciones en la atenuación. Esta suposición está más alejada de la realidad conforme se acercan los componentes y se hace considerable la geometría del área de emisión y recepción, lo cual complica el modelo.

De este análisis se hizo evidente la necesidad de restringir el movimiento relativo entre componentes de modo que no hubiera rotación sobre los ejes ópticos, alojándolos en un plano a lo largo de todo el movimiento. Esto se realizó mediante el montaje de los componentes en un fleje o lámina flexible, que restringe la rotación en torno a los ejes principales de los componentes y además produce una dependencia entre las variaciones del ángulo y de la distancia entre los componentes (diagrama 3.5.). Esto conduce al modelo plano descrito por las funciones de atenuación ya planteadas, con una simplificación adicional que consiste en que los ángulos α_{IRED} y α_{PT} son iguales.

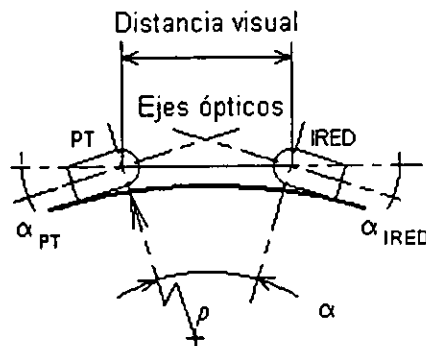
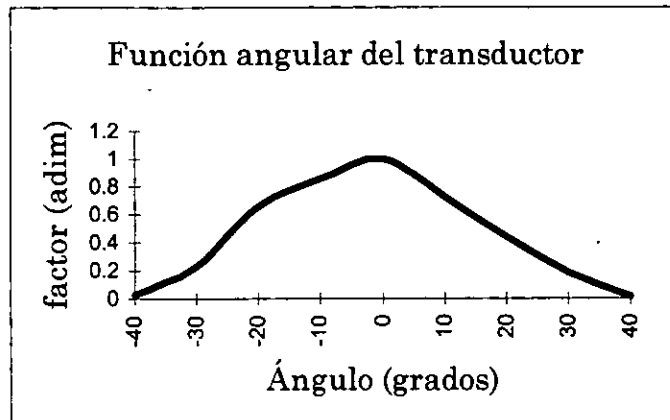


Diagrama 3.5. Montaje del par IR en un elemento flexible.

$$\frac{\alpha}{2} = \alpha_{IRED} = \alpha_{PT} \dots (6)$$

Al considerar esta simplificación se puede obtener una función de variación que sea producto de las funciones de variación η_2 y η_3 , sea ésta η_{ang} . Esta función es monótona, a pesar de que η_3 no es monótona (gráfica 3.6.).



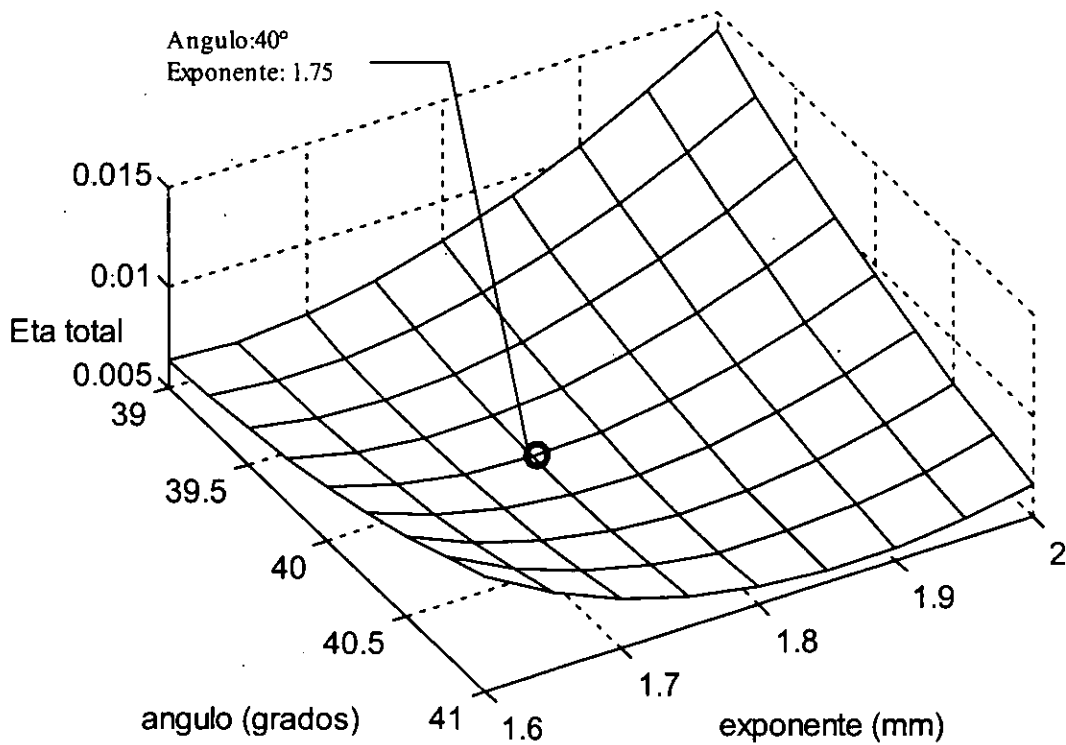
Gráfica 3.6. Función angular del transductor montado en el fleje.

Se tendría así, al sumarse el efecto de la función η_1 , o η_{rad} , una función monótona dependiente de una sola variable, sea ésta η_{tot} . La determinación de η_{tot} es lo que estará constituido en el método de diseño presentado en la sección 2.2.3.1., es decir, el método de insensibilidad inherente.

Se puede utilizar una función de la siguiente forma para modelar el comportamiento angular del transductor:

$$\eta_{ang} = \left[\cos\left(\frac{90}{a}\alpha\right) \right]^b \dots(7)$$

en donde la constante a sirve para ajustar la función coseno de modo que el valor 0 se encuentre en $\pm 40^\circ$, y el exponente b controla la inflexión de la curva. Para obtener a y b se recurrió a minimizar el error respecto a los datos experimentales. La función de error respecto a los datos experimentales se muestra en la gráfica 3.7.



Gráfica 3.7. Función de error para el ajuste de la función η_{ang} .

De la gráfica 3.7. se observó lo siguiente: para que el modelo del transductor presente un valor de 0 en 40 grados para la flexión

$$\eta_{ang} = \left[\cos\left(\frac{9}{4}\alpha\right) \right]^{1.75} \dots(8)$$

Para determinar la función η_{tot} se tienen que analizar las características geométricas de un fleje sobre el cual se montan los componentes (diagrama 3.8). Dado que la flexión del elemento flexible es muy simple, se decidió hacer la suposición de que su curva elástica está descrita por un arco de circunferencia. Un análisis más detallado implicaría determinar la curva elástica real del fleje dadas las condiciones de frontera bajo las cuales esté sujeto. Sin embargo, para la resolución con la cual se desea caracterizar el transductor se justifica la simplificación.

Se modelará entonces la curva elástica de deformación del fleje como una función exclusivamente del ángulo entre los extremos del fleje, el cual es una función lineal del ángulo presente en las articulaciones del usuario. De este modo, y considerando que la longitud del fleje es invariante, se buscará determinar el ángulo entre los ejes ópticos de los componentes, relacionado con

η_{ang} ; y la distancia entre los componentes como se determinó para η_1 , en este caso η_{rad} , para obtener η_{tot} como el producto siguiente:

$$\eta_{tot} = \eta_{rad} \eta_{ang} \dots (9)$$

Para determinar la función η_{rad} hay que considerar el diámetro de los componentes, definiéndolo con una constante, sea ésta δ , y una longitud del fleje inicial invariante S , cuya curva elástica se aproximará con un arco de radio ρ , referidos todos estos elementos en el diagrama 3.8. Defínense dos vectores, u_{PT} y u_{IRED} , cuyas direcciones y magnitudes corresponden a los segmentos entre el centro del arco aproximado por el fleje y el centro de la lente de cada componente.

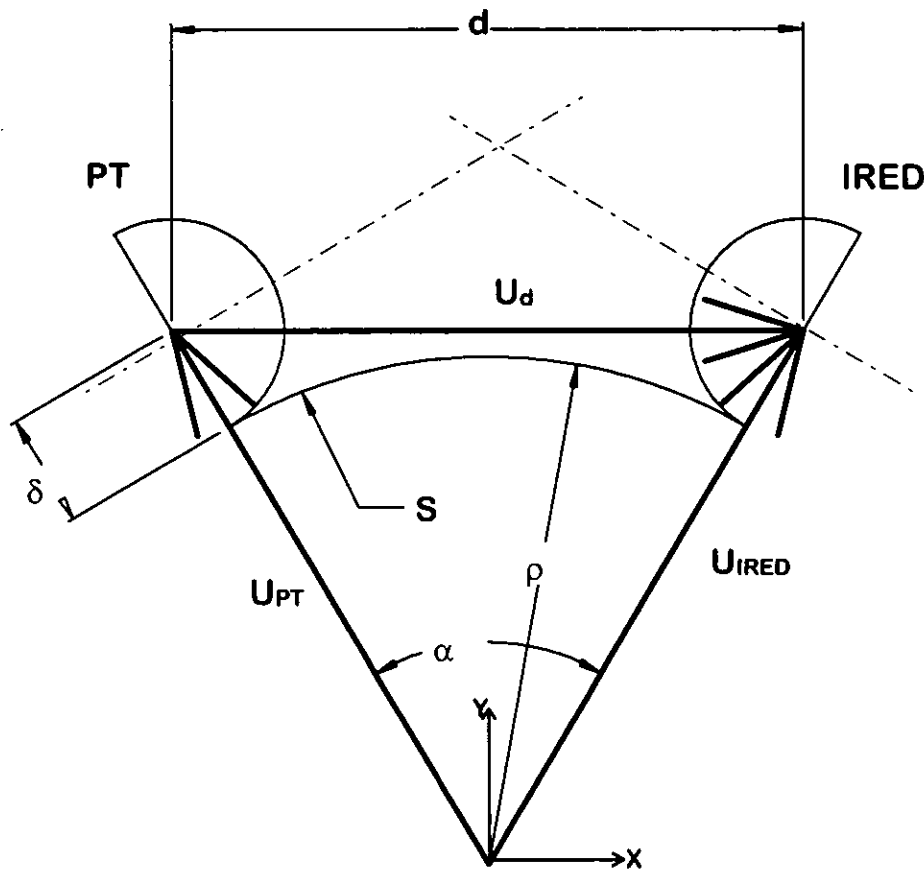


Diagrama 3.8. Geometría del transductor.

Del diagrama 3.8 es claro que los vectores u_{PT} y u_{IRED} , de magnitud igual a la suma de δ y ρ , se pueden definir en base a sus componentes ortogonales en las direcciones i y j , siendo las componentes en i de igual magnitud y dirección contraria, mientras que las componentes en j tienen la misma dirección y magnitud.

$$u_{PT} = (\rho + \delta) \left(-\operatorname{sen} \frac{\alpha}{2} i + \operatorname{cos} \frac{\alpha}{2} j \right) \dots (10a)$$

$$u_{IRED} = (\rho + \delta) \left(\operatorname{sen} \frac{\alpha}{2} i + \operatorname{cos} \frac{\alpha}{2} j \right) \dots (10b)$$

Es claro que para poder determinar la distancia que hay entre el foco del PT y el foco de IRED se requiere determinar la magnitud de la diferencia entre los vectores de cada componente. Para obtener esta distancia se tiene que

$$u_d = di = u_{IRED} - u_{PT} \dots (11)$$

por lo que la distancia está dada por

$$d = 2(\rho + \delta) \operatorname{sen} \frac{\alpha}{2} \dots (12)$$

en donde

$$\rho = \frac{180S}{\pi\alpha} \dots (13)$$

siendo S la longitud invariante del fleje en mm y α está en grados.

De este modo se tiene una función η_{rad} que es función del ángulo entre ejes:

$$\eta_{rad} = \frac{535.91}{\left(2 \left(\frac{180S}{\pi\alpha} + \delta \right) \operatorname{sen} \frac{\alpha}{2} + 24 \right)^2} \dots (14)$$

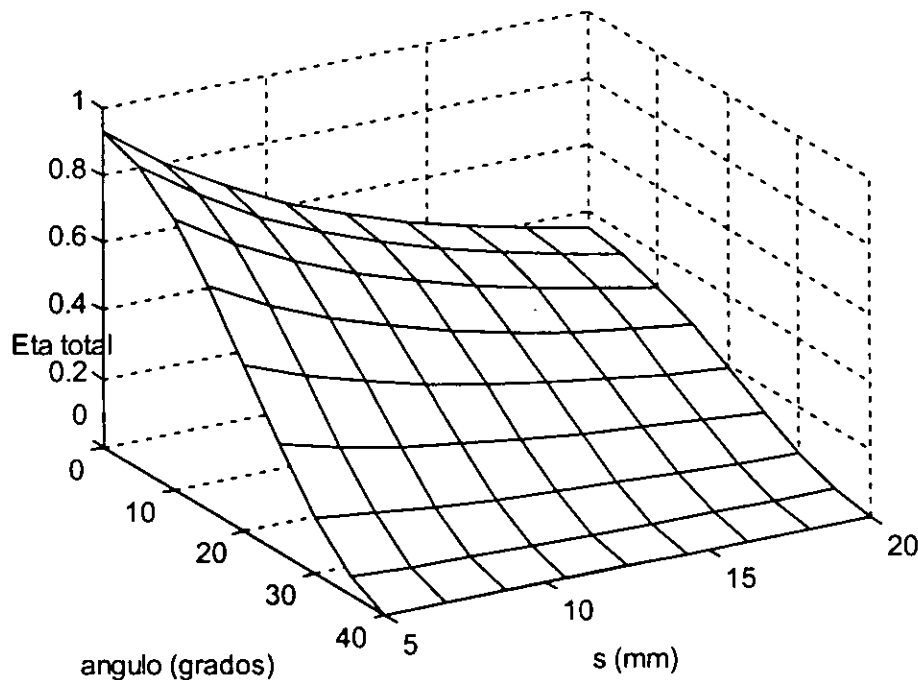
De esta ecuación y la ecuación 8 se tiene :

$$\eta_{tot} = \frac{535.91 \left(\cos \left(\frac{9}{4} \alpha \right) \right)^{1.75}}{\left(2 \left(\frac{180S}{\pi\alpha} + \delta \right) \operatorname{sen} \frac{\alpha}{2} + 24 \right)^2} \dots(15)$$

En donde S y d están en mm, y α en grados. Esta función de atenuación substituye a todas las funciones η en la ecuación (1)

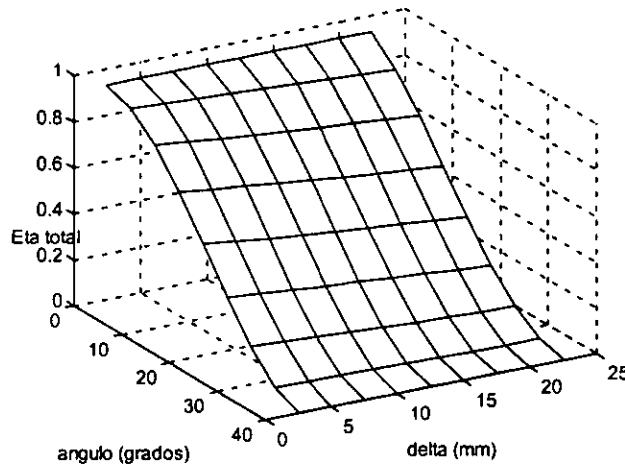
Habiendo determinado la función que rige el comportamiento del transductor, se encuentran dos parámetros geométricos que controlan el modelo, S, que es como ya se mencionó la distancia entre el emisor y el receptor a lo largo de la lámina flexible, y δ , que es la distancia entre el eje óptico de los componentes y la lámina flexible. Se puede hacer que estos parámetros varíen para buscar la manera de controlar la linealidad del transductor a partir de su construcción geométrica.

Lo primero que se determinará es el mejor valor para S. Para esto se construye la gráfica 3.8 con los rangos para el ángulo de 0 a 40° y para S de 5 a 20 mm.

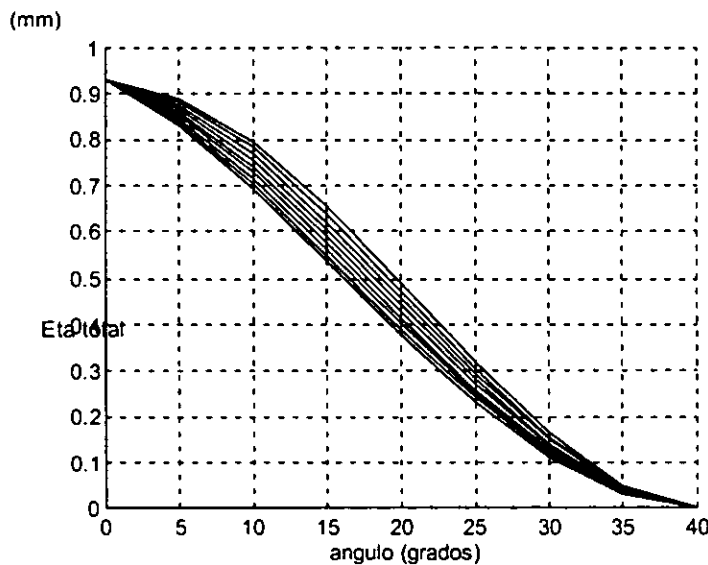


Gráfica 3.9. Modelo del transductor en función a S (distancia inicial entre IRED y PT) con $\delta=2.5$.

De la gráfica anterior se puede concluir que la mejor construcción es la que tiene menor S , en este caso 5 mm, que representa la mínima distancia entre el IRED y el PT. Sin embargo, se puede obtener mayor información si se hace variar δ desde su valor mínimo, 2.5 mm hasta algún valor, como 85 mm por ejemplo (gráficas 3.9 a y b).



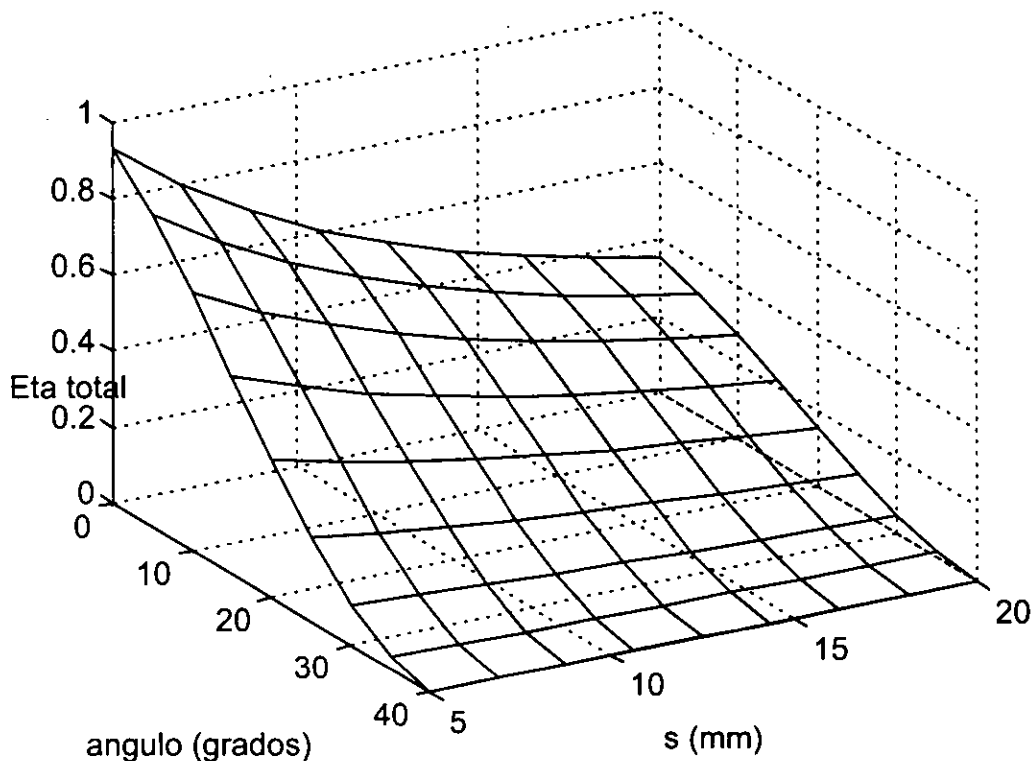
Gráfica 3.10 a. Modelo del transductor en función a δ (distancia entre el soporte flexible y el IRED/PT).



Gráfica 3.10 b. Modelo del transductor en función a δ (vista lateral)..

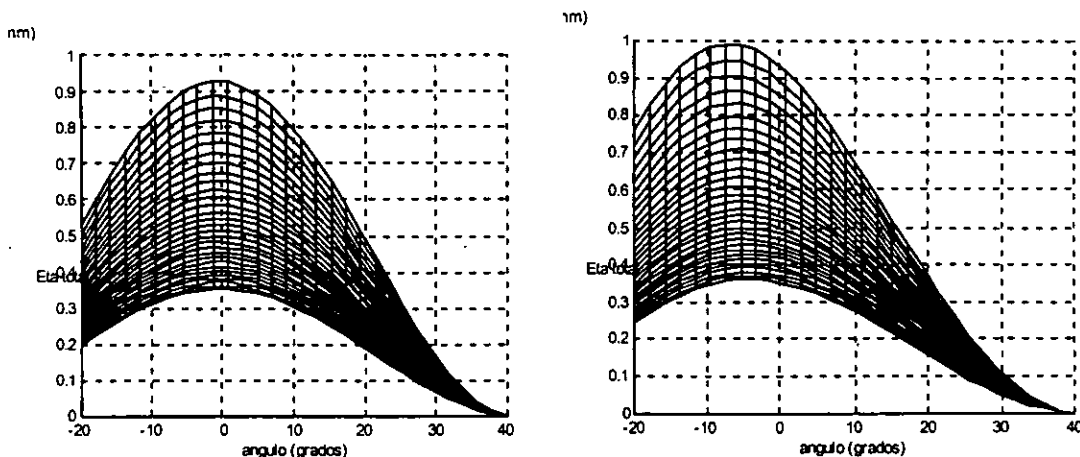
En esta gráfica se puede observar que al aumentar δ la función del transductor tiene una mayor componente axial que angular, y la función tiende a convertirse en la función radial. En algún punto intermedio la función se “linealiza”, y se encuentra este valor cerca a 20 y 25 mm. Debido a que este

valor produce un transductor demasiado grande, y por facilidad de construcción, se consideró un valor de 2.5 como base para la construcción. Se presenta de cualquier modo la gráfica 3.10., para $\delta=25$ mm, para aclarar lo que ocurre con este proceso de linealización.



Gráfica 3.11. Modelo del transductor en función a S (distancia inicial entre IRED y PT) con $\delta=25$.

A continuación haremos una comparación respecto a los modelos de los transductores para $\delta=2.5$ mm y $\delta=25$ mm, para determinar lo que ocurriría en caso de sobrepasar el ángulo para el cual se encuentran alineados los ejes ópticos de los componentes, es decir 0° . Lo que se observa es que el punto máximo se desplaza hasta -8° para el caso de $\delta=25$ mm, por lo que esta configuración podría solucionar el problema de medir ángulos de sobreextensión de los dedos.



Gráfica 3.12 a y b. Comparación del desplazamiento del punto máximo de la función para medir ángulos de sobreextensión.

La verificación experimental se llevo a cabo mediante un dispositivo que simula la acción del dedo humano. El dispositivo consiste en dos elementos, a manera de falanges, los cuales se encuentran montados en la caja y en la perilla de un potenciómetro, de modo que un ángulo entre las falanges representa un valor de división de voltaje en el potenciómetro, es decir, se tiene un método para medir el ángulo de manera lineal. El transductor se montó del mismo modo que en el guante. La finalidad del experimento es determinar el error que se presenta en el transductor, y caracterizar la resolución y repetibilidad de la medición. El procedimiento consiste en medir los voltajes del transductor y del potenciómetro por medio de multímetros para relacionarlos en una tabla de voltajes, que a continuación se muestra :

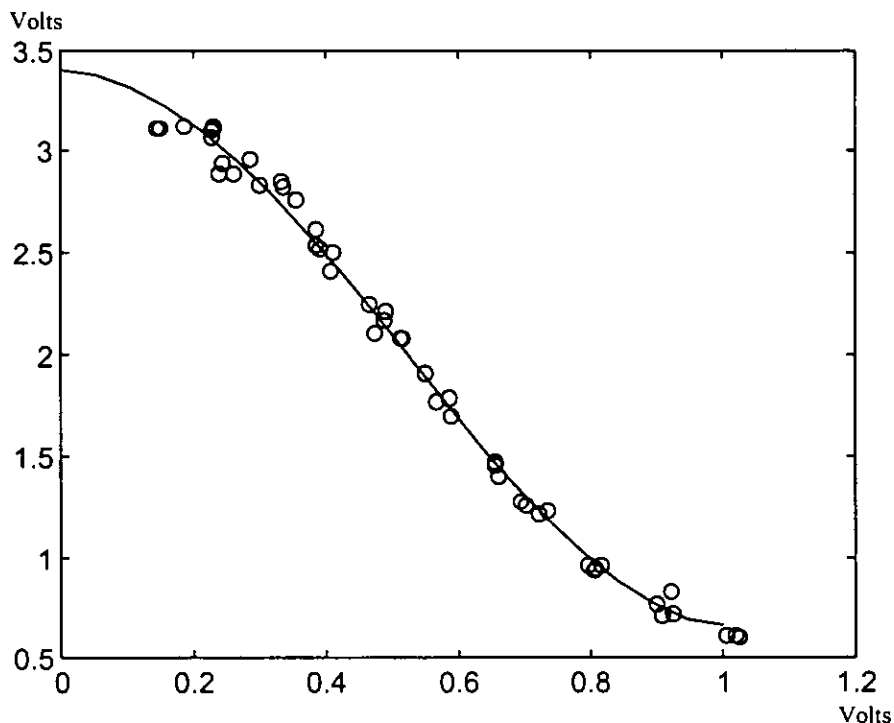
Pot	Tran	0.334	2.821	0.516	2.076	0.797	0.963
0.187	3.120	0.355	2.764	0.552	1.906	0.806	0.933
0.226	3.103	0.384	2.535	0.569	1.769	0.808	0.938
0.227	3.071	0.386	2.613	0.588	1.791	0.817	0.963
0.229	3.112	0.391	2.515	0.589	1.700	0.902	0.762
0.231	3.121	0.407	2.406	0.657	1.476	0.909	0.708
0.239	2.889	0.410	2.496	0.657	1.459	0.922	0.828
0.245	2.940	0.465	2.247	0.662	1.398	0.925	0.719
0.261	2.889	0.474	2.106	0.695	1.274	1.007	0.612
0.286	2.961	0.488	2.164	0.705	1.255	1.019	0.608
0.298	2.829	0.491	2.212	0.724	1.212	1.025	0.603
0.333	2.855	0.512	2.081	0.737	1.234		

Con estos valores experimentales se puede caracterizar un modelo basado en tres parámetros según la función que a continuación se muestra :

$$V_s = V_{pol} + \Delta V \left[\frac{535.91 \left(\cos \left(\frac{9K_r V_r}{4} \right) \right)^{1.75}}{\left(2 \left(\frac{900}{\pi K_r V_r} + 2.5 \right) \text{sen} \left(\frac{K_r V_r}{2} \right) + 24 \right)} \right] \dots(16)$$

en donde V_{pol} , y ΔV son parámetros del amplificador, y K_r es la constante que relaciona linealmente el voltaje del potenciómetro con el ángulo presente en el transductor.

Por medio de una minimización del error entre el modelo teórico y los datos experimentales basada en el método simplex, incorporado al paquete Matlab, con el cual se efectuaron los procedimientos numéricos, se buscó el vector de parámetros para dicho modelo, obteniéndose $V_{pol}=0.3938$ V, $\Delta V=3.1111$ V y $K_r=35.7656$ (°/V), de modo que el error mínimo cuadrático es de 0.1576 (V²), con un coeficiente de correlación de 0.9974. A continuación se muestran en la gráfica 3.12. los datos experimentales y el modelo teórico para los parámetros dados :



Gráfica 3.13. Valores experimentales y función ajustada para el transductor en función a un potenciómetro lineal.

4

PROCESAMIENTO DE LAS SEÑALES.

Este capítulo describe el subsistema que maneja las señales provenientes de los transductores antes de enviarlas al convertidor A/D del microcontrolador. Para que la capacidad de conversión del A/D se aproveche al máximo hay que introducir señales en el rango de 0 a 3 V, por lo que se necesita amplificar la señal. Además hay que seleccionar 4 de un máximo de 16 señales distintas para capturar el vector de posiciones completo, por lo que se requiere un selector analógico controlado por el microcontrolador.

4.1. Justificación de la selección del amplificador selector utilizado.

Una vez identificada la necesidad de incluir un sistema que acondicione y seleccione la señal, hay que escoger la configuración que mejor se ajuste a las necesidades del sistema solución: costo bajo y buen desempeño.

Hay dos configuraciones básicas: Amplificar y seleccionar o seleccionar y amplificar. En el primer caso se tienen 4 circuitos con 4 amplificadores cada uno y 2 multiplexores analógicos 8x2, mientras que en el segundo se tienen 2 multiplexores 8x2 y 1 circuito con 4 amplificadores. La ventaja en reducción de componentes, y por lo tanto en costo, del segundo caso presenta un problema: el ruido debido al paso a través del multiplexor antes de la amplificación también se amplifica. Por ello se optó por amplificar y luego seleccionar las señales.

4.2. Sistema de amplificación y selección de la señal.

El sistema de amplificación y selección es el sistema de compensación que permite adecuar las señales de los transductores para convertirlas en información digital, aprovechando al máximo la resolución del convertidor. Esta basado en un preamplificador, el LM324, que puede ser alimentado con 5 Volts, con la ventaja de que se puede eliminar una fuente adicional, alimentando con el mismo voltaje de los transductores, en la parte de los emisores. A continuación se muestra un esquema del circuito en el diagrama 4.1.

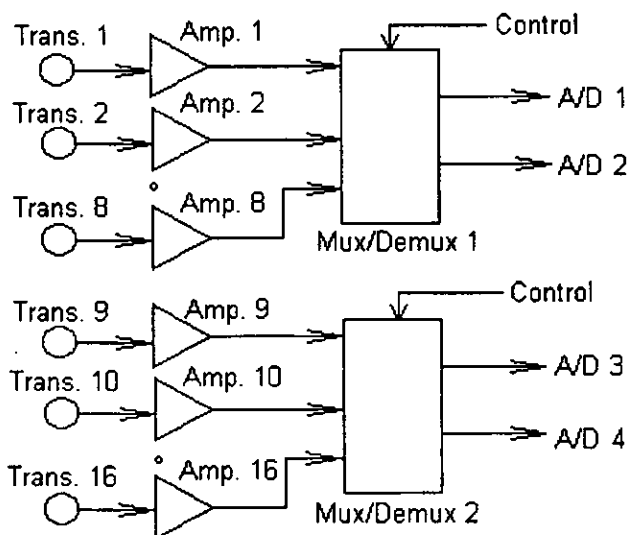


Diagrama 4.1. Amplificación y Multiplexado de la señal.

Dado que la corriente que puede suministrar el PT es muy baja, se decidió utilizar un amplificador que transformara la corriente en un voltaje. A continuación se muestra un esquema de este amplificador, del tipo inversor, en el diagrama 4.2. Este amplificador funciona de la siguiente manera. En la terminal (+) se suministra un voltaje flotante, controlado por medio de un potenciómetro como divisor de voltaje. Este voltaje se refleja en la terminal (-), como un voltaje virtual que polariza al fototransistor, y debido a que no puede suministrar corriente, ésta es suministrada a través de la rama de retroalimentación. La resistencia de retroalimentación funciona a la vez como un limitador de corriente, sin embargo, es el fototransistor el que regula la corriente en función a la potencia luminosa recibida.

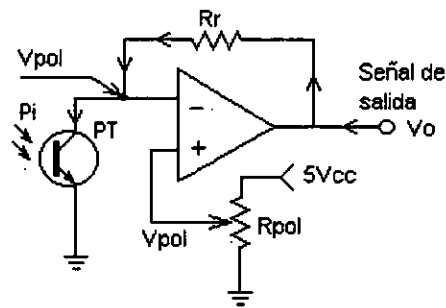


Diagrama 4.2. Amplificador inversor para el PT.

Las corrientes de los dispositivos están dadas por

$$i_{Rr} = \frac{(V_0 - V_{(-)})}{Rr} \dots (4.1)$$

$$i_{PT} = K_{PT} P_i \dots (4.2)$$

Por otro lado, la característica del amplificador operacional se puede resumir en :

$$V_{(-)} = V_{(+)} = V_{pol}$$

$$i_{Rr} = i_{PT}$$

de donde se obtiene :

$$V_0 = V_{pol} + RrK_{PT}P_i \dots (4.3)$$

La ganancia del amplificador está dada por

$$G = \frac{\Delta V_{salida}}{\Delta P_{entrada}} = \frac{V_0 - V_{pol}}{P_i} \dots (4.4)$$

de la ecuación (4.3), en la forma de (4.4) se tiene

$$G = RrK_{PT}$$

La principal ventaja de este arreglo es que permite eliminar la resistencia de polarización de $10\text{ k}\Omega$ que normalmente se incluye, además de que se puede alimentar con una fuente unipolar de 5V . El ajuste de la ganancia de este amplificador depende del valor de la resistencia, y de la constante del fototransistor. Para eliminar el ruido de frecuencia alta (más de 100 Hz) se incluyó un capacitor en paralelo con la resistencia de retroalimentación. Se seleccionó el valor de 100Hz como frecuencia de corte, puesto que los movimientos de la mano no son más rápidos que unos cuantos ciclos por segundo. Se puede ver que el voltaje ΔV que aparece en la ecuación (1) en el capítulo anterior es la variación del voltaje máxima menos el voltaje de polarización. Es por eso que el voltaje de polarización V_{pol} se mantiene con un valor bajo, sólo lo suficiente para encender el PT. El valor de ΔV es próximo a los 3.5 V , de modo que se tienen variaciones entre 0.5 y 4 V .

Para la selección de las señales amplificadas, se utilizan dos MUX/DEMUX analógicos CMOS 4052 para conformar un DEMUX de 16 por 4, controlado por medio de una palabra de 2 bits que selecciona la información antes de amplificarla. Los bits que controlan estos multiplexores son los bits 4 y 5 del puerto A del MC68HC11.

5

CONTROL Y CALIBRACIÓN DE LAS SEÑALES.

En este capítulo se explicarán las configuraciones de hardware y el programa principal utilizados para capturar y transmitir información consistente con las demás partes del manipulador. La filosofía considerada para la programación busca mantener la adaptabilidad del sistema a distintos usuarios.

El sistema de control de las señales consiste en una plataforma que coordina la captura y el envío de información desde la mano del usuario hasta el guante. Este sistema se basa en un microcontrolador MC68HC11E1 de Motorola, que cuenta con cuatro convertidores A/D de 8 bits multiplexados en 8 canales, además de un UART programable para realizar la transferencia de información por el puerto serial. Este miembro de la familia M68HC11 tiene además una configuración de 512 bytes en EEPROM y 512 en RAM. Esta misma plataforma ha permitido también realizar distintos tipos de pruebas de los transductores con el fin de ajustar los parámetros de amplificación de la señal. Existen tres partes diferenciables. La digitalización de la señal, el procesamiento y la transmisión serial.

5.1. Digitalización.

Las señales amplificadas se conducen a sólo 4 de las 8 terminales del convertidor A/D del microcontrolador. El convertidor funciona mediante aproximaciones sucesivas por medio de un arreglo de capacitores, obteniéndose un byte, que representa un valor interpolado entre los voltajes de referencia máximo y mínimo, que se almacena en una serie de registros para posteriormente ser procesado y transmitido. La lectura de los puertos por software se realiza de manera secuencial, capturándose un vector de igual

número de componentes que el número de grados de libertad que interesa controlar, menor o igual a 16, que es la entrada de datos principal del programa.

La arquitectura del MC68HC11 está basada en una serie de registros de 8 bits, en los cuales están contenidas las funciones de entrada y salida del microprocesador. Para utilizar el sistema de conversión A/D se tiene que indicar por medio del registro OPTION (\$1039), colocando un 1 en el bit ADPU (bit 8) del registro. Esto enciende el convertidor A/D y lo conecta con el puerto E del microprocesador (terminales 43 a 50). A continuación se tiene que configurar el convertidor. Existen cuatro modos de operación, controlados por los bits MULT y SCAN (4 y 5) del registro ADCTL (\$1030).

Cuando MULT es cero, el sistema A/D está configurado para realizar cuatro conversiones consecutivas en el canal especificado por los cuatro bits de selección de canal, CD, CC, CB y CA (bits 3 a 0 respectivamente) del registro ADCTL. Cuando MULT es uno, el sistema A/D está configurado para realizar conversiones en cada canal en el grupo de cuatro canales seleccionado por los bits CD y CC. En este modo multicanal, cada canal está asociado con un registro de resultado específico. En el caso particular del sistema de medición, MULT=1.

Cuando SCAN es cero, las cuatro conversiones se realizan, una a la vez, hasta llenar los cuatro registros de resultado. Cuando es uno, las conversiones continúan, comenzando un nuevo ciclo de lectura al terminar el anterior, lo cual actualiza los registros conforme se puede acceder a nueva información. En el caso particular del sistema de medición, SCAN=1.

Como sólo se tienen cuatro canales de entrada, que contienen las señales de los 16 canales a los que se puede acceder, CD=CC=CB=CA=0. De este modo, el valor que debe contener el registro ADCTL es \$30.

5.2. Procesamiento de información.

Esta etapa está conformada por las etapas de calibración e interpolación y formato de la información.

5.2.1. Calibración e interpolación.

La calibración, implementada por software, permite que se extiendan los rangos percibidos por el microcontrolador a lo largo del rango total de movimiento del manipulador de manera automática. Este sistema actúa sin necesidad de dispositivos externos, evitando la necesidad de modificar valores de amplificación o ajustar los transductores del guante. Su principal objetivo es

el facilitar el control, por medio de la extensión o contracción del rango para que concuerde con el movimiento del usuario.

La rutina de interrupción del SCI recibe los caracteres de control del sistema de visualización y a continuación asigna un valor a un registro global que almacena el estado de los canales. Al salir de la rutina de interrupción se retoma el punto en donde se dejó la rutina principal. La manera de implementar esta rutina es característica del compilador utilizado, y se basa en el uso de operadores PRAGMA, definidos en el ANSI C. Se puede consultar el apéndice D2 para ver con más detalle la sintaxis de la rutina de interrupción.

El funcionamiento del programa de control permite calibrar grados específicos del guante, restablecer los rangos de todo el guante o fijar los valores de los rangos.

El principio de calibración está basado en los siguiente. Se planteará a continuación una analogía mecánica para explicar el fundamento de la rutina de calibración. Supóngase que la variación de interés está dada por la posición de un sólido a lo largo de un eje. Interesa conocer un valor entre 0 y 1 que sea indicativo de su posición, representado por la variable n . Para esto hace falta saber la posición de dos puntos, que corresponden a dichos valores. Supóngase que estos puntos pertenecen a sólidos también. En el diagrama se muestran los tres cuerpos sobre una recta.

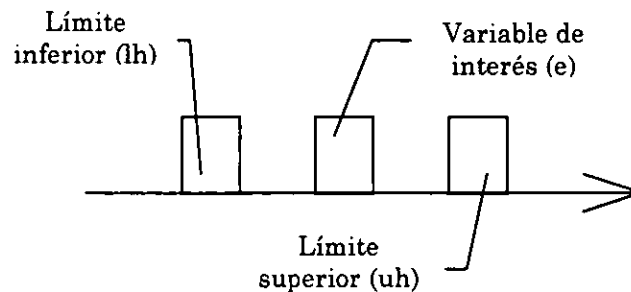


Diagrama 5.1. Analogía mecánica de la rutina de calibración.

Para el caso en que n es 0 y 1, e es igual a lh y uh y se tienen las siguientes configuraciones respectivas :



Si lh y uh están fijos, entonces e no puede exceder dichos valores. El proceso de calibración consiste en permitir el movimiento libre de lh y uh , a partir del movimiento de e , es decir, e empuja a lh y uh .

Si el rango de movimiento de e es desconocido, el procedimiento para inicializar la calibración consiste en colocar lh , uh y e en contacto, o por lo menos muy próximos, dado la singularidad que se podría generar en la interpolación al hacer $lh=uh$. En este estado inicial, se permite el movimiento de lh y uh , y el movimiento de e ajustará el rango para que corresponda con su rango de movimiento. Una vez que se considera adecuada esta correspondencia se fijan lh y uh , de modo que además de realizarse la interpolación entre 0 y 1, se limita el rango de movimiento.

Una vez determinadas las variables y el modo en que interactúan, hay que modelarlas a través de una función de interpolación limitada. La interpolación está basada en la función siguiente :

$$n=\max(0,\min(1,(e-lh)/(uh-lh)))$$

se puede ver que si $lh=uh$, $n=1$. Sin embargo, para evitar errores de división entre cero se evitará que esta condición ocurra.

Definimos tres modos de operación : N que corresponde a lh y uh fijos, C que corresponde a lh y uh sueltos y R que consiste en colocar lh y uh junto a e , dejando lh y uh libres. Por medio de un diagrama de estados se puede establecer la secuencia de operación del sistema de calibración.

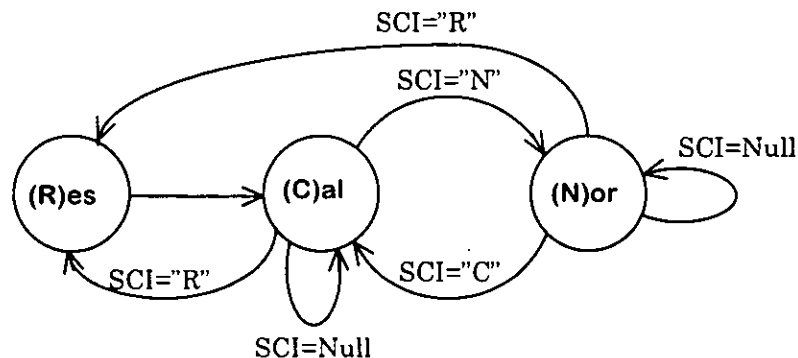


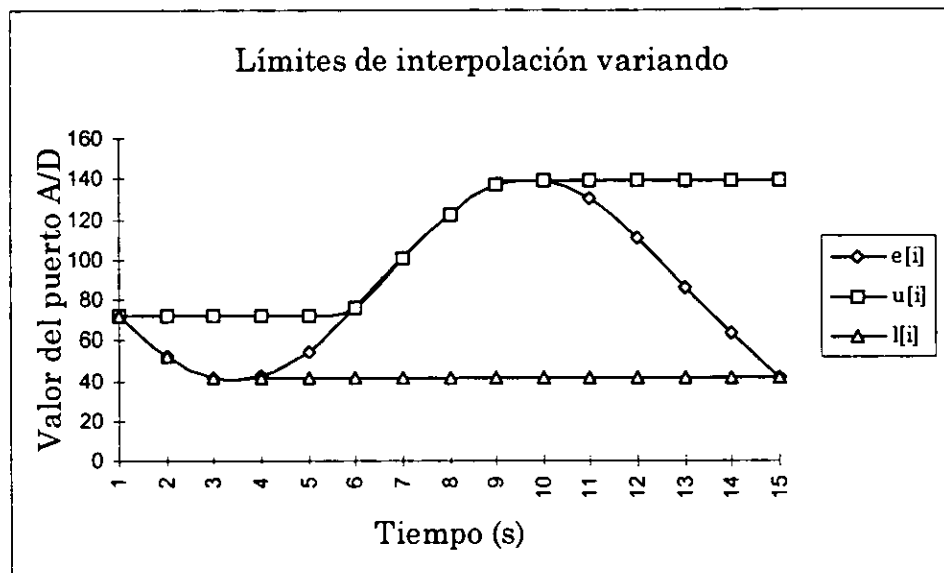
Diagrama 5.2. Diagrama de estados de la rutina de calibración.

En el diagrama 5.2. se considera un estado inicial R. Este estado conduce, después de inicializar lh y uh , al estado C de calibración, en el cual se modifican los límites. Este estado se mantiene hasta que se recibe la instrucción de cambiar al estado N, en el cual ya no varían los límites, y este estado nuevamente se mantiene hasta que se recibe una instrucción para calibrar nuevamente o inicializar el sistema.

Una característica importante que proporciona la calibración por software es que no es necesario que un usuario mueva en un rango amplio los dedos para que se puedan alcanzar los valores extremos del manipulador o en la visualización. Además se produce que la resolución sea independiente del rango de los valores. Un caso extremo sería que el movimiento del usuario esté tan restringido que sólo se puedan distinguir 3 valores. Estos valores se ajustarían a 0° , 45° y 90° para el manipulador, lo cual le proporciona la misma capacidad de control que un manipulador de robot convencional.

En la implementación de la rutina de calibración se define un registro de estado que permite que cada canal se modifique de manera individual. De este modo las variables individuales e , lh , y uh se convierten en vectores de hasta 16 elementos. El elemento genérico se refiere por medio del índice i .

Al poner en marcha el sistema de medición se tiene para todos los canales el estado R, después del cual sigue un modo de calibración automático (Modo C, gráfica 5.1.). En este modo todos los canales recibidos modifican los rangos de calibración. Posteriormente se pueden fijar los valores extremos (Modo N), enviando un byte de control preestablecido. En caso de necesitarse nuevamente una calibración, se pueden seleccionar canales particulares o todos los canales para calibrar borrando los límites anteriores (Modo R) o sin borrarlos por medio de una secuencia de dos bytes.



Gráfica 5.1. Variación de las variables $e[i]$, $lh[i]$ y $uh[i]$ con el tiempo en el modo C de operación

En el modo de calibración automático se compara el valor de entrada de cada canal con los valores máximos y mínimos correspondientes. En caso de que el valor recibido salga del rango, el límite máximo o mínimo, según sea el caso, toma el valor del canal recibido. De este modo se tiene un procedimiento

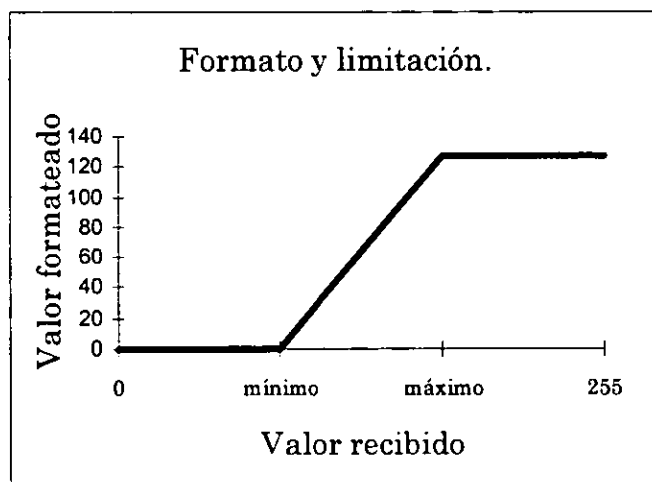
análogo a abrirse paso empujando. Las expresiones que determinan este comportamiento son las siguientes :

$$\begin{aligned} &\text{if (lh[i]>e[i]) then lh[i]= e[i]} \\ &\text{if (uh[i]<e[i]) then uh[i]= e[i]} \end{aligned}$$

En el modo normal esta parte del programa es omitida a través de una condición que involucra al registro de estado de los canales, y esto produce que los límites no varíen, por lo que no existe ningún ajuste de límites.

En el modo de restablecimiento, como al inicio, el límite máximo toma el valor del canal recibido más 1, y el mínimo el valor del canal recibido menos 1. Esto estrecha el rango y la resolución a solo 3 valores, por lo que para aumentar la resolución es necesario cambiar al modo C después del restablecimiento.

Una vez que se tienen los valores de los límites y la señal de entrada hay que interpolar un valor para enviar en formato el vector de posiciones de la mano. La interpolación consiste en el acondicionamiento de la señal de modo tal que el valor máximo corresponda a un valor 7Fh y el mínimo a 0. Estos dos valores son los límites para enviar bytes de datos, ya que se decidió dar un formato que asignara al bit más significativo el valor 0 para bytes de dato y el valor 1 para bytes de control.



Gráfica 5.2. Transformación del rango recibido al rango del formato.

Para el modo de operación N es necesario que los valores interpolados que sobrepasen los límites se consideren iguales a los límites, como se puede observar en la gráfica anterior, para evitar problemas en el envío de información, pues un valor extrapolado podría ocasionar que se reconociera el byte de dato como byte de control, y se perdiera la secuencia de transferencia del vector de posiciones. Con este fin se utiliza una función limitadora (Gráfica 5.2.).

5.2.2 Formato.

En esta etapa se conforma una secuencia de bytes que pueda ser reconocida por las demás plataformas de control del manipulador, es decir, el sistema de control y el sistema de visualización, con el fin de hacer llegar la información capturada. El formato en realidad se compone de la interpolación y la limitación de los datos.

El formato consiste en una transformación de modo que el valor mínimo corresponda a 0 y el valor máximo a 127. Estos valores establecen la resolución máxima del sistema en 128 valores diferenciables. La rutina de interpolación da como resultado una recta que podría tomar valores menores que cero y mayores que 127 en el modo de operación N, por lo cual es necesario limitar la señal a estos valores.

5.3. Protocolo de comunicación serial.

El sistema de control del manipulador se puede dirigir desde el programa de visualización o directamente desde el sistema de medición. La información que entra al sistema de despliegue se transfiere por un puerto de tipo THRU, de modo que la presencia del sistema de despliegue no modifica el flujo de información, aún cuando se puede controlar y procesar. Esto significa que se debe contar con un protocolo común entre medición, control y despliegue.

5.3.1. Configuración del puerto serial.

La transmisión serial se hace a 9600 bauds, a través de una conexión RS-232, con un formato de bytes de control y datos. El sistema puede sin embargo trabajar a velocidades más altas, cambiando los valores de configuración de los puertos.

Para configurar el UART del SCI (Serial Communications Interface) del microprocesador se requiere, en primer lugar, indicar a través del registro BAUD (\$102B) la velocidad de transmisión. Por medio de una tabla en la que se muestra la correspondencia entre los valores de BAUD y las velocidades de transmisión, proporcionada por el fabricante, se encuentra que para 9600 baud, y un reloj de 8 MHz $BAUD = \$30$.

A continuación hay que activar la interfaz de comunicación serial, por medio del registro SCCR2 (\$102D). En este registro se encuentran los bits TE y RE (bits 3 y 2) que controlan la transmisión y recepción, las interrupciones correspondientes y otros modos de operación. En este caso también se requiere

habilitar la rutina de interrupción del puerto serial para la recepción, por medio del bit RIE, de modo que en conjunto se tiene $SCCR2=\$2C$.

Del resto de los registros del SCI se encarga el compilador cruzado ICC11 utilizado en la programación, por lo que no hay necesidad de leer ni escribir en ellos.

5.3.2. Cadena transmitida

Una vez que se tiene la información formateada, se transmite en una cadena con la siguiente secuencia:

[0xF7] [ch0] [ch1]... [ch9] [chA].... [chC][0xF0]

Esta secuencia corresponde al protocolo utilizado por los instrumentos con implementación MIDI, clasificado como un mensaje exclusivo en tiempo real. En este protocolo los bytes de control se caracterizan por tener un 1 en la posición más significativa, mientras que los bytes de datos tienen un 0 en la misma posición. Esta es la razón por la cual se dio formato a los datos entre 0 y 127. Después del byte de control cabecera 0xF7 en este caso, se transmiten los datos de todos los canales de interés. En este caso se transmiten sólo 13 de los 16 valores capturados, pues el manipulador sólo cuenta con 13 grados de libertad. Sin embargo para la puesta en marcha se discriminaron 3 grados de libertad más, por lo que se transmitieron los canales del 0 al 9 más tres caracteres falsos fijados en 123d, que en etapas posteriores serán implementados. Después del envío de datos se envía el carácter convenido para el fin de cadena 0xF0.

6

CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE MEDICIÓN.

6.1. Montaje de los transductores en el guante de soporte

La construcción del guante fue conduciendo por medio de un proceso iterativo al uso de un guante de algodón con placas de hule flexibles, adheridas por medio de silicón. La resistencia del montaje de los transductores es buena, debido a la porosidad tanto del guante como del plástico. En estas placas se colocan los pares IRED-PT, de modo que lo que en realidad se está midiendo es una flexión elástica del material, provocada por el movimiento de los dedos. Las placas tienen un espesor de 2 mm, cortadas en forma de rectángulos, de 30 por 10 mm aproximadamente.

El guante se tensa por medio de anillos del mismo plástico en las puntas de los dedos, para mantener una tolerancia cerrada; por un refuerzo en la muñeca ajustable, que contrarresta el efecto de los anillos. Para dar libertad de movimiento sin disminuir la tensión de las placas flexibles se unieron los extremos por medio de tramos de elástico, de longitudes entre 10 y 15 mm en vez de unirlos directamente al guante. Esto permite un desplazamiento relativo (diagrama 6.1.) con respecto al guante, de modo que las deformaciones lineales las absorbe el elástico y no la lámina flexible, que no podría alargarse demasiado.

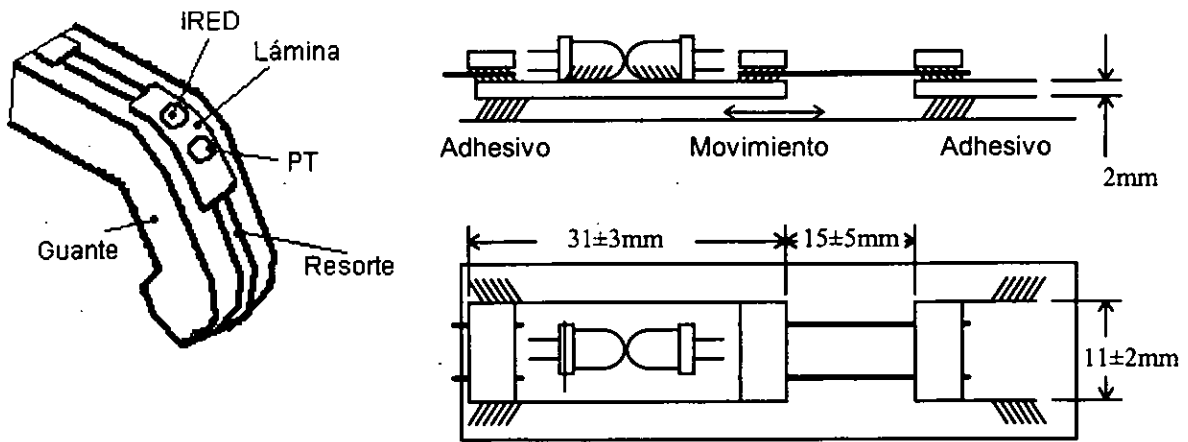


Diagrama 6.1. Montaje del soporte flexible del transductor en el guante.

Una vez colocados los pares y tensadas las placas flexibles se soldaron las resistencias de los IREDs y se conectaron la tierra común a todos, alimentación de IREDs y canales de los PTs. Se sellaron las conexiones con silicón y se conectaron los cables con la etapa de amplificación y selección. En el diagrama 6.2. se muestran las posiciones de los transductores en el guante.

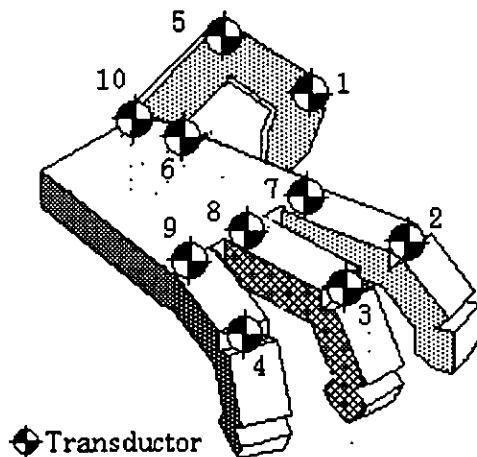


Diagrama 6.2. Ubicación de los transductores en el guante.

Estos transductores corresponden a los 10 grados de libertad que inicialmente se usarán para controlar el manipulador. Posteriormente se integrarán los tres grados restantes para el movimiento de apertura de los dedos, característico de la manipulación esférica.

6.2. Amplificador y selector.

El Amplificador se construyó pensando en alimentarlo con una fuente sencilla de 5V, de modo que no se requiriera una alimentación simétrica. Además este voltaje puede alimentar también el sistema de selección y puede obtenerse de la tarjeta de soporte del sistema.

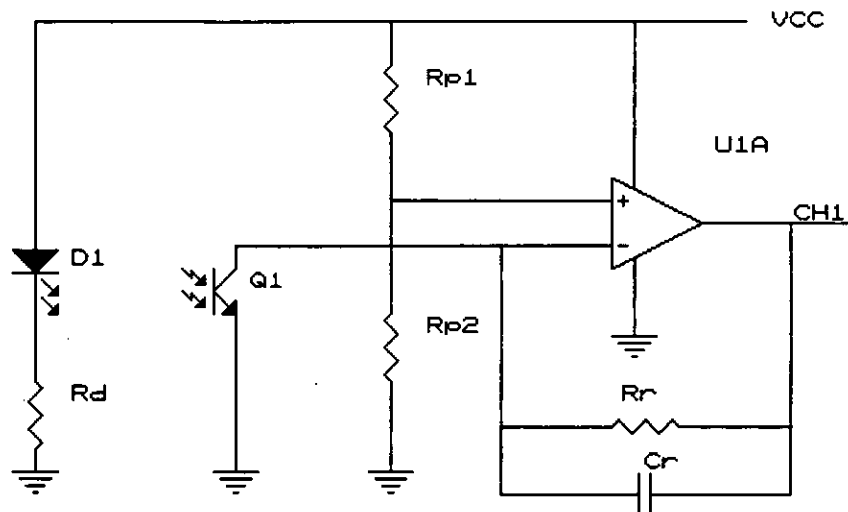


Diagrama 6.3. Circuito del Amplificador del transductor.

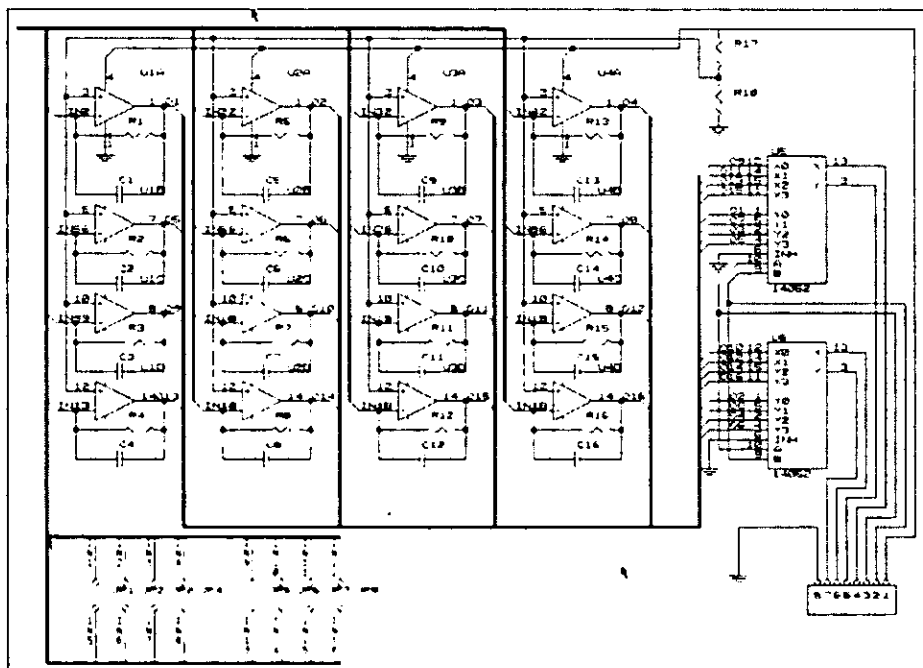


Diagrama 6.4. Circuito del amplificador selector del sistema de medición.

Los amplificadores son los LM324, que vienen en un empaquetado DIP 14, con 4 amplificadores en cada uno. Las resistencias se fijaron en un valor de 33 k Ω , que proporciona una salida de 0.5 a 3.5 V. Los capacitores de filtrado se fijaron en un valor de 100 nF, y son del tipo monolítico. El valor de las resistencias de polarización es de 1k Ω y 10 k Ω , para obtener un voltaje de 0.1 Vcc, en este caso 0.5 V. Se utilizaron jumpers para la conexión del cableado con la placa.

El selector está construido con dos multiplexores analógicos CMOS 4052, de 8 a 2 líneas, controlados por medio de 2 bits, A y B para acceder a los canales respectivos.

6.3. Tarjeta del MC68HC11 y programación.

La plataforma sobre la cual se diseñó el sistema es un Microcontrolador de Motorola MC68HC11E9, que cuenta con un reloj interno de 2MHz, comunicación asíncrona y conversión Analógico/Digital de 8 bits. Para el desarrollo de los programas se utilizó un compilador cruzado ICC11 que compila código en lenguaje C. El listado total del programa se encuentra en los apéndice D1 y D2.

Esta misma plataforma se utilizó desde un principio para realizar algunas pruebas sobre los componentes de los sensores, para conocer los efectos de ruido presentes en el sistema completo, de modo que se pudieran atacar inmediatamente problemas que hubieran aparecido al construir el sistema.

El convertidor A/D es un convertidor de redistribución de carga proporcional, de modo que el voltaje presente en las terminales se convierte en un número de 8 bits, es decir de 0 a 255. El convertidor utiliza como referencia dos voltajes VRL, de 5 V y VRH de 0 V, de modo que al presentarse 5 V en la entrada se asigna el valor de FFh o 255d en el registro correspondiente, mientras que 0 V producen el valor 0.

La configuración de hardware del HC11 permite varios modos de operación en lo que se refiere al convertidor A/D. Existe un modo que lee los voltajes presentes en las terminales una sola vez, mientras que otro modo actualiza constantemente los registros del convertidor. Además existe una selección de multicanal, que permite leer 4 canales en secuencia, y otra de un solo canal, que escribe en los 4 registros el mismo canal. La configuración para este caso es la de lectura continua de cuatro canales.

La tarjeta de desarrollo se diseñó en el Laboratorio de Mecatrónica, y funciona en modo expandido, de modo que se cuenta con una memoria EEPROM 2864A que permite la programación de 8 Kbytes de programa, además de una RAM 6264, que permite manipular variables con una capacidad de 8 Kbytes, lo cual

facilita el uso de rutinas para operar sobre vectores y funciones matemáticas del lenguaje.

El control del sistema de amplificación y selección se hace a través de 2 bits (PA6 y PA7, puerto A del microprocesador), configurados como sólo salidas. Estos bits se encuentran en puerto físico J9, correspondiendo a las terminales 17 y 18 respectivamente. Se utilizan los puertos E0, E1, E2 y E3, en J9 también, terminales 10, 9, 8 y 7. Además de estas 6 líneas, se envían las terminales 1 y 2 de J9 al amplificador selector, 0V y 5V respectivamente, haciendo un total de 8 líneas. Los 16 canales están colocados en la tarjeta del amplificador selector en una matriz de 4 por 4, de modo que se pueden conectar los canales en una secuencia determinada.

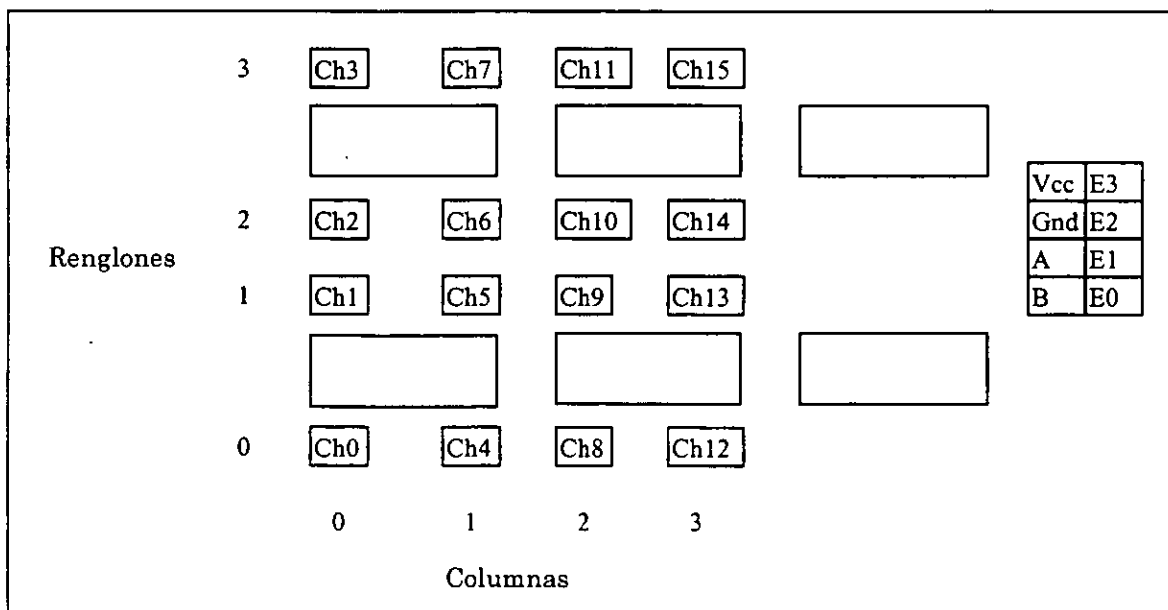


Diagrama 6.5. Esquema de la tarjeta de Amplificación y Selección

A continuación se muestra la correspondencia entre los canales, la dirección de acceso y el grado de libertad al que se refiere.

Canal	PA7(B)	PA6(A)	PORT E	Ubicación	Grado
0	0	0	E0	(0,0)	Pulgar 1
1	0	0	E1	(0,1)	Indice 1
2	0	0	E2	(0,2)	Medio 1
3	0	0	E3	(0,3)	Anular 1
4	0	1	E0	(1,0)	Pulgar 2
5	0	1	E1	(1,1)	Pulgar 3
6	0	1	E2	(1,2)	Indice 2
7	0	1	E3	(1,3)	Medio 2
8	1	0	E0	(2,0)	Anular 2
9	1	0	E1	(2,1)	Pulgar 4
10	1	0	E2	(2,2)	N.C.
11	1	0	E3	(2,3)	N.C.
12	1	1	E0	(3,0)	N.C.
13	1	1	E1	(3,1)	N.C.
14	1	1	E2	(3,2)	N.C.
15	1	1	E3	(3,3)	N.C.

Una vez determinado el hardware, se programó la tarjeta mediante el compilador cruzado, incorporando las rutinas de calibración como se describieron en el capítulo anterior (Apéndices D1 y D2). El diagrama de flujo se muestra a continuación.

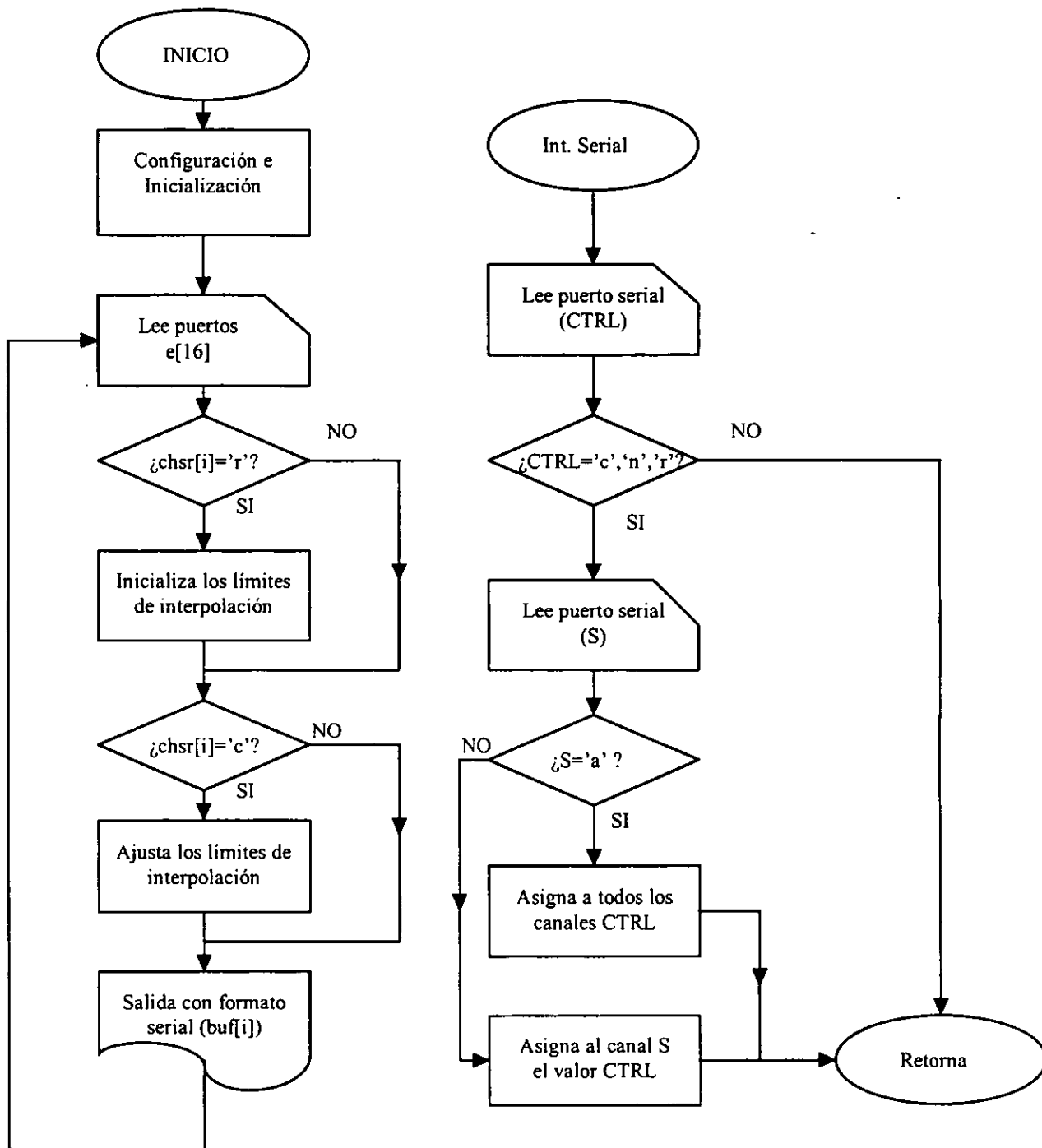


Diagrama 6.6. Diagrama de flujo del programa del sistema de medición.

7

RESULTADOS DEL SISTEMA DE MEDICIÓN.

7.1. Respuesta del sistema de medición.

La respuesta del sistema de medición se limita en este caso a la caracterización de la frecuencia de muestreo. Esto se debe, como ya se ha establecido, a que la respuesta dinámica del transductor en el rango de frecuencias de operación no es significativa. El efecto de la frecuencia de muestreo no es el único factor que interviene en el retardo del movimiento entre la acción del usuario y la respuesta del manipulador o del sistema de despliegue, sino también el tiempo que tardan las plataformas de estos sistemas en procesar la información recibida.

7.1.1. Retardo del movimiento.

El retardo de movimiento es un efecto que provoca que la representación gráfica no responda en tiempo real bajo el mando del usuario. Este retardo de movimiento depende principalmente de los tiempos de procesamiento de información. Actualmente para obtener respuestas en tiempo real se requieren equipos de alta velocidad. Sin embargo, una tarea se puede desempeñar con eficiencia si el periodo entre imágenes en el despliegue es mayor a 14 cuadros por segundo. Esto significa que en el peor de los casos se debe enviar el vector de posiciones de la mano en 71.4 ms.

Para evaluar el retardo del sistema de medición se recurrió a medir el estado del puerto de comunicación serial por medio de un osciloscopio digital, para el modo C de operación de la tarjeta, que corresponde a la calibración continua. A continuación se muestra un esquema de los tiempos encontrados.

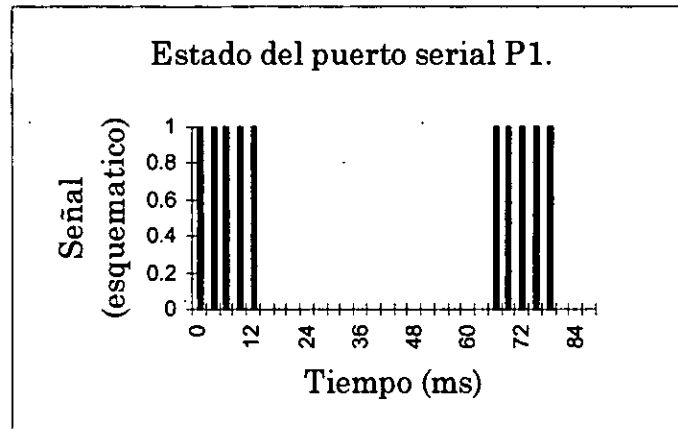


Diagrama 7.1. Operación del puerto serial.

Dado que el vector de posiciones consiste en 15 bytes, a 9600 baud, con bits de inicio y parada se tienen 10 bits por byte transmitido, lo cual significa un total de 150 bits transmitidos. Esto en tiempo equivale a 15.6 ms empleados en la transmisión en cada ciclo de lecturas. Se puede ver que el tiempo total del ciclo es de 64.8 ms. Esto significa que el tiempo empleado en la transmisión es el 24.1% del ciclo de lecturas, por lo que con el fin de aumentar la frecuencia de muestreo hay que minimizar el tiempo de procesamiento.

Como ejemplo, haciendo el cálculo del efecto de cambiar la velocidad de transmisión de 9600 a 31250 baud, se tiene un tiempo de transmisión de 4.8 ms, con un tiempo de procesamiento de 49.2 ms. Esto da un tiempo total del ciclo de 54 ms, lo cual representa una disminución del 16.7%. Esto indica que es más significativo el tiempo de procesamiento de la información que la velocidad de transmisión.

Suponiendo que el tiempo de procesamiento fuera 0, se tiene para 9600 baud una frecuencia de muestreo de 64 Hz. Para los sistemas en el mercado este valor está en 100 Hz, que en nuestro caso requerirían una velocidad de transmisión de al menos 15000 baud. Sin embargo, con la configuración actual, tiempo de procesamiento 49.2 ms y de transmisión de 15.6 se tiene una frecuencia de muestreo de 15.43 Hz, que está por arriba de los 14 Hz para que el despliegue permita manipular eficientemente objetos.

7.1.2. Mejoramiento del control percibido por el usuario

Para mejorar el control percibido por el usuario se puede recurrir a minimizar el tiempo de procesamiento, extendiendo el código del programa, de modo que no haya pérdidas de tiempo causadas por variables intermedias. Un programa de este tipo se muestra en el apéndice D2.

En este programa fue posible disminuir el tiempo de procesamiento de manera dramática. A continuación se muestra el diagrama 7.2., en donde se muestra la salida serial en función al tiempo del programa mejorado.

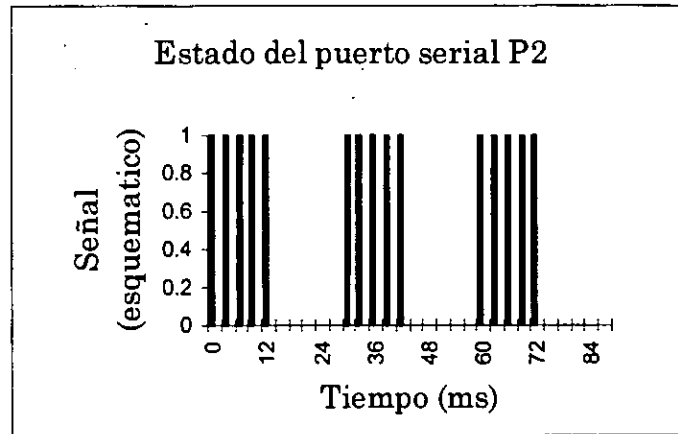


Diagrama 7.2. Operación del puerto serial para el programa 2.

Se puede observar que mientras el tiempo de transmisión sigue siendo de 15.6 ms, el tiempo de procesamiento ha disminuido a 11.6 ms, con un tiempo total de 27.2 ms. Esto representa una frecuencia de muestreo de 36.7 Hz, mucho mayor que la del programa 1. Entre otras cosas, se evitaron las operaciones redundantes, los pasos de variables entre funciones y los cálculos, limitando el programa sólo a los grados de libertad que actualmente se encuentran en el guante.

Cabe notar que para este programa el cambio de 9600 a 31250 en la velocidad de transferencia mejoraría la frecuencia de muestreo a 60.24 Hz, por lo que en este caso sí es importante acelerar la transmisión. Para la máxima velocidad de transmisión del 68HC11, 125 kbaud, se tiene un tiempo de transmisión de 1.2 ms, por lo que el tiempo total del ciclo en este caso es de 12.8 ms, de este modo se tiene la frecuencia máxima de muestreo, de 78.12 Hz, para 10 grados de libertad. Esta frecuencia se aproxima bastante al desempeño de los sistemas actuales. Sin embargo cabe mencionar que al aumentar los grados de libertad del guante disminuye la frecuencia de muestreo.

7.2. Especificaciones en comparación con sistemas actuales.

A continuación se explican los principales parámetros de especificación bajo los cuales se puede caracterizar el sistema de medición.

7.2.1. Resolución.

La resolución de este sistema es variable, dependiendo de la calibración del sistema y de la región del transductor utilizada, pero se puede considerar actualmente cercana a 1°. El valor máximo de resolución que se puede obtener con un rango de 90° y un convertidor A/D de 8 bits es de 21 minutos de grado, que resulta de dividir el rango entre 256 niveles diferenciables por el convertidor. Sin embargo, dado el protocolo utilizado, de 7 bits de dato, este valor máximo de resolución es del doble, es decir, de 42 minutos de grado, o casi un grado.

7.2.2. Linealidad.

El sistema de medición se basa en un transductor no lineal, pero se puede restringir el rango de operación de modo que se pueda considerar como lineal. En el tratamiento de la información de los programas se consideró una rutina para un transductor lineal, por resultar más simple su implementación.

Por otro lado, el introducir rutinas de función inversa, o modelos de procesamiento más complejos conduce a mayores tiempos de procesamiento, y no está plenamente justificada la necesidad de contar con un sistema lineal, dado que el control se hace por medio del usuario. Como consecuencia se tiene que la controlabilidad y sensación de inmersión en la visualización para la teleoperación no depende de la linealidad del sistema de medición, tanto como de su monotonía, siendo ésta última menos restrictiva que la primera. A este criterio es al que se ha apegado la primera fase del proyecto, por considerar de mayor importancia la implementación y aplicación de las tecnologías empleadas que el estricto comportamiento lineal ideal en cualquier componente.

7.2.3. Velocidad de muestreo

Este parámetro es el más importante para permitir el control del manipulador. A continuación se muestra la tabla 7.3., en la cual se muestra el efecto que tiene el número de actualizaciones por segundo en el desempeño de una tarea, según [2].

Frecuencia (s)	Mínimo (s)	Promedio (s)	Máximo (s)
1	10	17	24
2	6	9.	13
3	4	7	9.5
7	3	5	7
14	2.5	3.5	4.5
28	2	3	4

Tabla. 7.3. Desempeño en función al tiempo de muestreo visual.

Esta tabla se obtuvo por medio de un sistema de realidad virtual en donde se asignó a un grupo de voluntarios una tarea de manipulación virtual. Esta tarea consistió en sujetar una pelota deformable y deformarla hasta un cierto porcentaje de su volumen original. Los resultados de este experimento indican que una frecuencia de 28 imágenes por segundo es suficiente para que la tarea del asimiento se desempeñe muy cerca del valor óptimo, mientras que una frecuencia de una imagen por segundo presenta un deterioro importante en el control del proceso de manipulación.

En el sistema de medición se logró con el programa en el apéndice D2 una frecuencia de muestreo de 36.7 Hz, muy por arriba del valor bajo el cual comienza a aparecer un error en el desempeño.

7.3. Continuidad del proyecto.

7.3.1. Desarrollo de funciones inversas paramétricas y transformaciones.

Una de las posibles siguientes etapas de desarrollo de la parte de medición del manipulador antropomórfico teleoperado es el desarrollo de funciones paramétricas y rutinas de calibración que eliminen el efecto no lineal del transductor. Además, dado que algunos movimientos, como el movimiento de oposición-reposición y la abducción radial del pulgar presentan interferencias entre sí en la medición, se tienen que desarrollar transformaciones del espacio de posiciones de la mano al espacio de mediciones de los transductores, para obtener procedimientos inversos que permitan aislar los grados de libertad.

7.3.2. Incremento en la velocidad de la plataforma de desarrollo.

Otra mejora a corto plazo es el uso de otra plataforma de desarrollo basada en dispositivos más rápidos, como es el caso de los Procesadores Digitales de Señales (DSP). El uso de estos procesadores permitiría ampliar los grados de libertad del guante sin afectar la velocidad de transmisión de la información, además de acelerar los procedimientos para el cálculo de funciones inversas, permitiendo su implementación.

7.3.3. Incorporación de retroalimentación de fuerzas.

Una etapa a mediano o largo plazo consiste en diseñar un sistema que permita retornar información al usuario acerca de las fuerzas que se presentan en el manipulador, transformándolas en fuerzas aplicadas directamente en la mano.

Esto haría mucho más fácil su control al utilizar un sentido más del usuario, y produciría una mayor sensación de conexión con la manipulación remota.

7.3.4. Reconocimiento de instrucciones

Esta aplicación consiste en programar una red neuronal o algún sistema similar para que pueda transformar ademanes o señas de la mano en instrucciones concretas para un ordenador. Estas instrucciones podrían tener algún significado especial para un sistema de realidad virtual o para el control de un proceso real.

El reconocimiento de instrucciones también se podría utilizar para el entrenamiento de la mano en el aprendizaje del lenguaje para sordomudos, y en la modificación de ritmo, modalidad o temperamento en la composición de música asistida por computadora.

7.3.5. Transformaciones geométricas para el control de otros manipuladores.

Esta aplicación consiste en actuar sobre manipuladores de geometría distinta, transformando los movimientos de algunos grados de libertad de la mano en movimientos en otros ejes de movimiento.

Por ejemplo, se podría utilizar la información del pulgar e índice para controlar un manipulador de pinza de un robot distinto, o bien transformar la extensión del índice en la activación de la punta de un robot soldador.

CONCLUSIONES.

Este trabajo es un ejemplo de aplicación teórica al diseño y construcción. Cabe mencionar que cuando se trata de construir un prototipo no sólo se requiere el trabajo de escritorio, o teórico, sino un gran esfuerzo en la técnica para llevar a la realidad las ideas. Sin embargo, los resultados son mucho más significativos en este caso que cuando únicamente se teoriza un funcionamiento o la relación entre componentes.

Algo que es importante enfatizar es que, así como los sistemas de teleoperación requieren del ser humano para el funcionamiento del control, el proceso de diseño en la ingeniería también requiere de un factor difícilmente cuantificable, que es la creatividad. En este caso hay que hacer notar que la creatividad se incrementó por medio del proceso iterativo. Este proceso se basa en la evolución, a partir de una idea, que conduce a mejoramientos sucesivos, al mismo tiempo que permite una comprensión gradual del problema.

La conclusión más importante, quizás, es que los sistemas auxiliares en la teleoperación no se encuentran tan lejos tecnológicamente, ya que se mostró cómo con componentes relativamente baratos, —por lo menos al alcance de nuestra economía— se pueden desarrollar sistemas funcionales y prototipos completos. Vale la pena comparar el costo de desarrollo de estos prototipos contra el costo de un sistema comercial, y eso sin tomar en cuenta que se posee toda la tecnología para integrarlos a sistemas en operación, a través de microcontroladores.

Una conclusión importante es que se demostró que el uso de componentes optoelectrónicos, normalmente usados para la comunicación digital, en aplicaciones que utilizan la región de ganancia es una solución efectiva para la medición de cantidades angulares con una resolución moderada. Por otro lado la integración del sistema por medio de un microcontrolador MC68HC11 resultó buena, y se tienen resultados que apuntan, como era de esperarse, hacia un mejoramiento de la velocidad de transmisión mediante el uso de procesadores digitales de señales.

En la etapa de amplificación y selección de la señal se comprobó que la selección de componentes para este sistema fue la adecuada, y que la señal se ve mejorada notablemente en comparación con el sistema equivalente en el que primero se selecciona y luego se amplifica.

Se verificó lo ventajoso que resulta el contar con un compilador cruzado para programar el microprocesador, ya que permite hacer cambios sin necesidad de modificar rutinas en ensamblador, que pueden resultar a veces muy abstractas. Además de la facilidad para compilar el programa, se tiene una gran ventaja al programar memorias EEPROM, las cuales no requieren un ciclo de borrado lento.

Por otro lado se pretendió probar que los métodos y conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera son suficientes para integrar proyectos de desarrollo e innovación tecnológica. El resultado de este trabajo, en conjunto con los que componen la totalidad del proyecto corroborarán la certeza de esta afirmación siempre y cuando sean de utilidad en futuros proyectos, no estrictamente en el área de la teleoperación.

En este proyecto se realizaron varias iteraciones sobre cada una de las partes; pero se trata solamente de la primera iteración con respecto a todo el sistema de teleoperación. La primera iteración responde la siguiente pregunta: ¿Vale la pena el desarrollo en esta dirección?. De ser negativa la respuesta se busca otra solución, pero en el caso del manipulador antropomórfico teleoperado se encuentra que no sólo vale la pena la configuración seleccionada, sino que para los casos en los que la complejidad de manipulación aumenta, no se tiene otra opción sino acoplar el control de la manera más directa e intuitiva para el usuario. Sin embargo, las próximas evoluciones deben ir en busca de sistemas con mejor desempeño, no tanto en lo que respecta a la precisión de las mediciones como en el mejoramiento de la sensación de inmersión en la manipulación. Es notable el avance que han tenido los sistemas en ingeniería por la introducción generalizada de las computadoras, y en particular es importante determinar cuales son las fronteras de la expansión tecnológica que vivimos, y hacia donde se dirigen. La teleoperación es una de las últimas consecuencias del empleo de los sistemas informáticos y las telecomunicaciones. Es por eso que se necesita investigar más en esta dirección, para construir los sistemas que imperarán en el entorno de la actividad humana y anticipar el impacto que tendrán en la solución de las futuras crisis que se enfrentarán.

BIBLIOGRAFÍA.

1. Doebelin, Ernest O., 1990, "Measurement Systems, application & design", edit McGraw-Hill, 4th edition.
2. Burdea, Grigore; Coiffet Philippe, 1996, "Tecnologías de la realidad virtual", Edit. Paidos, 1^a edición.
3. Hand, C., 1994, "A survey of 3-D Input Devices", Technical Reports CS TR94/2, Department of Computer Science, De Montfort University, Leicester, UK.
4. Bueche J., Frederick, Física General, edit. McGraw-Hill, 1991.
5. Norton N., H., 1982, "Sensores y analizadores", ed. Gustavo Gili., Barcelona.
6. Sanders & McCormick, 1992, "Human factors in engineering & design", edit. McGraw-Hill. 7^a edición.
7. Venkataraman, S.T. y Iberal, 1990, T., Dextrous Robot Hands, edit. Springer-Verlag, USA.
8. Rumsey, F., Midi systems & control, edit. Focal Press, UK, 1994.
9. Motorola semiconductor technical data, M68HC11 reference manual, Rev 1, Motorola Inc. 1990.
10. Motorola semiconductor technical data, MC68HC11E9 Advanced information, Motorola Inc., 1988.
11. National semiconductor corporation, Linear databook Vol. 1.: operational amplifiers, Santa Clara california, N. S. Corp., 1988.
12. National semiconductor corporation, Linear databook Vol. 1.: analog switches & multiplexers, Santa Clara california, N. S. Corp., 1988.

13. Texas Instruments, Optoelectronics & image sensores data book, Rev 1, 1990.
14. Holman, P., Métodos experimentales para ingenieros, Cuarta edición, Edit. McGraw Hill, 1988.
15. Hanselman, Littlefield, Mastering Matlab, Primera edición, Edit. Prentice Hall, 1996.

APÉNDICES.

APÉNDICE A1. ELEMENTOS PARA MEDICIÓN DE POSICIÓN.

Transductores de desplazamiento capacitivos.

En éstos transductores se presenta un cambio de capacitancia proporcional al desplazamiento en el eje principal. Existen distintas clasificaciones, según se trate de una de las placas o el dieléctrico el que se desplace. Dentro de estas clasificaciones están las siguientes: dieléctrico móvil; rotor móvil sin contacto; rotor móvil, estator único, acoplado; y rotor móvil, estator hendido acoplado.

Transductores de desplazamiento inductivos.

Este tipo se basa en la conversión de un desplazamiento en variaciones de voltaje alterno mediante el cambio de reluctancia entre dos o más devanados. Dentro de éste tipo de transductor está el LVDT (transformador lineal variable diferencial). Los transductores de desplazamiento angular del tipo de transformador diferencial tienen limitado su rango lineal, del orden de $\pm 40^\circ$.

En el synchro el devanado primario del rotor, que se mueve con el desplazamiento angular a medir, interactúa con un estator trifásico. En muchas aplicaciones se utilizan dos synchros de modo que uno mide el ángulo, el synchro sensor, y el otro se utiliza en la visualización del ángulo.

Transductores de desplazamiento potenciométricos.

Este tipo de dispositivo es más simple que los anteriores. Consiste en el desplazamiento de un elemento deslizante, o escobilla, sobre una resistencia. Existen tanto lineales como angulares. En el caso de los angulares pueden ser de menos de una vuelta, o de varias, por medio de resistencias helicoidales. También se pueden fabricar limitados por topes o de vueltas continuas. Se pueden encontrar potenciómetros cuantizados, que se fabrican bobinando un alambre en torno a un núcleo. Estos tienen valores altos de resistencia, de 5 k Ω a 10 k Ω . También se fabrican con plástico conductor, película de carbón, película metálica o mezclas metal-cerámica (cermet).

Transductores de desplazamiento por galgas extensométricas.

Son raramente usados como transductores de desplazamiento, siendo utilizados preferentemente para evaluar estados de esfuerzos en elementos mecánicos. Están basados en la utilización de haces elásticos a los que están unidas las galgas, una en tensión y otra en compresión, para conformar un semipunto de dos elementos activos. Algunas se fabrican por medio de semiconductores piezorresistivos, mientras que otros utilizan la tecnología empleada en grabado de circuitos impresos para conformar espiras.

Transductores de desplazamiento electroópticos.

Con la excepción de los codificadores electroópticos, estos son los sensores más utilizados sin contacto. Su aplicación principal es el calibrado dimensional, por medio de ocultación. Se pueden usar para medir desplazamientos pequeños por medio de un par emisor-receptor y la reflexión del haz en alguna superficie. La respuesta típica es la misma modelada en el apéndice B.

Un tipo de fuente muy utilizada es el láser debido a que ofrece un haz coherente, monocromático, y colimado. Por medio de este tipo de luz se pueden hacer mediciones interferométricas, que permiten la medición con elevada precisión.

Codificadores lineales y angulares.

Se pueden medir desplazamientos por métodos que generan una señal digital, sin necesidad de usar un convertidor analógico/digital. Se basan en tres métodos de transducción: ópticos, magnéticos o conductivos. Dependiendo del tipo de codificación existen del tipo incremental y absoluto.

Dispositivos radar y sonar, sensores de distancia.

Estos sensores emiten un pulso de energía hacia un cuerpo, determinando la distancia a partir del tiempo de retardo entre la emisión del pulso y la recepción del pulso reflejado. En la medida de distancias entre 0.3 y 5 metros se utilizan ondas de sonido.

APÉNDICE A2.

CARACTERÍSTICAS DE SISTEMAS EXISTENTES EN EL MERCADO.

Los guantes sensitivos en el mercado están diseñados para resolver el problema del control intuitivo empleado en la interacción con la realidad virtual. Entre los más destacados se encuentran el VPL DataGlove, el Vertex CyberGlove, el Mattel PowerGlove y el Exos Dextrous Hand Master.

El DataGlove.

Este es el más utilizado de manera comercial, ya que fue el primero en introducirse al mercado en 1987. Se debe al inventor Thomas Zimmerman, cuya investigación al respecto fue respaldada por la NASA, que luego lo confió a VPL para patentarlo (US Patent 4.542.291). El DataGlove incorpora fibras ópticas montadas sobre un guante ligero en plástico y lycra y un sistema Polhemus Isotrack 3D como sensor de posición absoluta de la mano. La medición se realiza a través de un bucle de fibra en cada articulación.

El principio de operación consiste en la atenuación del haz que viaja por la fibra óptica por medio de un tratamiento especial de la fibra que hace que la flexión produzca pérdidas. Un LED emisor envía un haz que se recibe en un fototransistor. El valor del ángulo es función del voltaje del fototransistor.

Los errores intrínsecos de la calibración en este guante condujeron a una nueva patente de Scott Wright en 1990 para un "sistema de detección del movimiento de atenuación óptica". En lugar de colocar los LED en una unidad particular, los colocó encima del guante, aún acoplados por una fibra óptica. De este modo, la fibra óptica es mucho más corta que la empleada en el DataGlove y posee un movimiento de traslación dentro de un tubo reflector metálico. La cantidad de luz detectada depende de la amplitud de la curvatura del dedo. Con el dedo extendido el extremo de la fibra óptica se encuentra más cerca del LED y se

transmite al fototransistor la máxima intensidad lumínica, mientras que al doblar el dedo se aleja la fibra, llegando menos luz del LED.

El CyberGlove

Jim Kramer inventó este guante para reconocimiento de gestos basada en una red neuronal. Actualmente aplicado a sistemas de realidad virtual supera al DataGlove.

Este guante se vale de pequeños medidores de esfuerzo montados en un tejido elástico de nylon. Los sensores son rectangulares para la flexión y en forma de U para la aducción/abducción. Hay entre 16 y 24 sensores, tres por dedo para la flexión, uno para cada abducción, uno para la rotación del pulgar, uno para la del dedo meñique y finalmente dos para el movimiento de guiñada y cabeceo de la muñeca. La resolución es de 0.5 grados y permanece constante en toda la amplitud del movimiento. La concepción de este guante obtuvo el premio del Annual Design Review de 1989.

El PowerGlove.

Se trata de una alternativa económica, estando su precio en el orden de las centenas de dólar. Su principal aplicación es en los videojuegos. Para controlar su costo el diseño de este guante incorpora tecnologías económicas. Su principio de operación es la variación de resistividad en sensores de tinta conductora. Cuando el guante se dobla aumenta la resistividad del sensor. Esta resistividad se transforma mediante un proceso de calibración en un ángulo.

El DHM (Dextrous HandMaster).

Introducido por Exos Inc. En 1990, se trata de un mecanismo exoesquelético metálico que se monta en el dorso de la mano. Posee cuatro sensores de posición por dedo, es decir, hasta 20 sensores en la versión para 5 dedos. Cada ángulo articular se mide con sensores de efecto Hall ubicados en las articulaciones del mecanismo. Se ajusta a la mano del usuario por medio de tiras de velcro. Sistemas adicionales permiten la adaptación a distintos tallas de manos. Es el más caro de los guantes sensitivos. Sin embargo tiene problemas, como todos sus antecesores, con la calibración y precisión. Además con un peso de 350 gramos, cansa fácilmente al usuario, y las sujeciones de velcro se tienen que cambiar con frecuencia.

APÉNDICE A3.

SOLUCIONES PROPUESTAS PARA EL ELEMENTO DE MEDICIÓN PRIMARIO

A continuación una lista de las soluciones que se generaron para seleccionar el sistema de medición, y las causas por las que se discriminaron.

Medidores capacitivos o inductivos.

El principio de operación es la variación de la reactancia por medio de un capacitor o inductor variable angular normal. El sensor, formando parte de un circuito, podría generar una frecuencia variable, que se modulara con una frecuencia fija de calibración. El resultado sería una frecuencia del orden de los Hz proporcional al ángulo en el sensor. Se descartó por la elevada fricción de estos componentes, además del complicado circuito de compensación que requiere.

Medidores resitivos.

Este tipo de sensor, utilizado en el sistema de control de movimiento del manipulador, no es el adecuado en este caso, pues a pesar de ser lineal presenta también fricción elevada como para mover la mano con la suficiente comodidad. Además se requiere un acoplamiento mecánico complicado para relacionar el movimiento de los dedos con la rotación del potenciómetro.

Medidores de esfuerzo

Acoplados directamente a un guante flexible podrían convertir un esfuerzo de flexión en un voltaje. El voltaje debe ser amplificado por medio de un puente. La desventaja es el costo de las galgas extensométricas, que no está justificado por los alcances actuales del proyecto.

Exoesqueleto.

Aún cuando esta idea está muy generalizada, y puede soportar futuras expansiones, como retroalimentación de fuerzas, la dificultad para construir la estructura mecánica motiva que se discrimine cualquier solución de esta clase, debido a los alcances actuales del proyecto.

Sensor óptico de CdS.

El principio de este sensor es la variación de la luz recibida por una resistencia variable con la luz de CdS, regulada por medio de la polarización de placas. En este caso la cantidad de luz que pasa es una función senoidal del ángulo entre las placas polarizadas. La desventaja de este sensor es que no es fácil acoplarlo a la mano, y que la mayoría de los grados de libertad medidos, de flexión, no está en condición de permitir un montaje directo, debido a la interferencia que puede haber entre los dedos; aún así es una buena opción para los grados de abducción entre dedos. Por otro lado, el resistor de CdS tiene "memoria", es decir, en términos de sus características presenta un comportamiento dinámico significativo por debajo de 100 Hz, que es la frecuencia de operación del sistema.

Esta idea fue la que presentó al sensor óptico como la mejor línea de desarrollo para la solución del problema de medición, pues no presentan fricción y pueden ser movidos fácilmente por la mano de un usuario.

Pérdidas en fibra óptica.

Consiste en utilizar el principio de operación de los sistemas comerciales en una escala de prototipo. Sin embargo, existen problemas para conseguir la fibra óptica que tenga pérdidas inducidas por flexión, por lo que se descarto el uso de fibra óptica.

Variación de potencia luminosa recibida por cambios geométricos.

Este es el principio de operación del transductor propuesto, aún cuando es un principio no se había modelado el comportamiento ni se tenía idea de cómo acoplar y transformar de manera sencilla el movimiento de la mano del usuario con el sensor.

APÉNDICE B

MODELO DE FUENTE LUMINOSA ISOTRÓPICA.

Supóngase que en un punto del espacio se coloca una fuente luminosa que irradia con una potencia P_L , (W), y que el medio es transparente para la transmisión de ésta potencia irradiada. Para cualquier superficie cerrada de control que contenga a la fuente se tiene un flujo total ϕ_L igual a una diferencial de potencia que atraviesa un área diferencial, de modo que:

$$\Phi_L = \frac{dP_L}{dA} \dots (1b)$$

Por otro lado, la potencia es irradiada por igual en todas direcciones, lo cual significa que la potencia que pasa por una superficie P_s (W) es proporcional al ángulo sólido ω (sr) que abarca dicha superficie desde la fuente, con lo que se puede definir una potencia por estereorradián I (W/sr) tal que:

$$I = \frac{P_s}{\omega} \dots (2b)$$

Reescribiendo (2a) y sabiendo que para un ángulo sólido de 4π se recibe la potencia total, se puede escribir lo siguiente

$$P_s = P_L \cdot \frac{\omega}{4\pi} \dots (3b).$$

Tomando finalmente como superficie de control una esfera con centro en la fuente, con área A_S se tiene

$$A_S = 4\pi \cdot r^2 \dots (4b).$$

$$\Phi_L = \frac{P_L}{A_S} = \frac{4\pi \cdot I}{4\pi \cdot r^2} = \frac{I}{r^2} = \frac{P_S}{\omega \cdot r^2} \dots (5b).$$

Para variaciones en la distancia muy pequeñas se tiene que el ángulo sólido se puede considerar como constante, de modo que se puede aproximar P_S por medio de P_L multiplicado por una constante k . Ahora si se considera que la fuente se encuentra en el punto $-x_0$ sobre un eje de referencia se tiene la siguiente expresión

$$\Phi_L = \frac{k \cdot P_L}{(x + x_0)^2} \dots (6b).$$

Ahora contemplando desde el punto de vista del receptor, Se tiene que la potencia recibida en un punto ubicado en x , P_R es igual al flujo total atravesando un área de recepción A_R , y es modulada por el ángulo entre el vector normal del área y la línea visual α . de modo que

$$P_R = \frac{\Phi_L}{A_R} \cdot \cos(\alpha) \dots (7b).$$

combinando (7a) con (6a) se llega a la expresión que regula la transferencia de potencia desde un emisor puntual hasta un receptor puntual

$$P_R = \frac{k \cdot P_L \cdot \cos(\alpha)}{A_R \cdot (x - x_0)^2} \dots (8b)$$

que se puede resumir en la ecuación siguiente

$$P_R = P_L \cdot \frac{k_t}{(x - x_0)^2} \dots (9b)$$

donde la constante k_t y x_0 caracterizan las condiciones de transmisión particulares de las cuales se trate.

APÉNDICE C. TABLAS Y GRÁFICAS EXPERIMENTALES PARA EL MODELO DEL TRANSDUCTOR.

A continuación se describirá el procedimiento empleado para obtener el comportamiento experimental del transductor.

Debido a que la medición se realiza a través de un convertidor A/D en el 68HC11, se utilizó éste para capturar la información. Además se construyó una plataforma basada en motores de pasos para controlar las posiciones entre los componentes.

La primera prueba para determinar el comportamiento axial del transductor se realizó usando una base metálica, sobre la cual se colocaron los componentes montados en soportes magnéticos. De este modo se podían colocar en cualquier posición dentro de un plano, para determinar el comportamiento en el plano del par infrarrojo. Por medio de un nonio y un transportador, se obtuvo la geometría del par, y utilizando un voltímetro se midió el voltaje de la resistencia de polarización del PT.

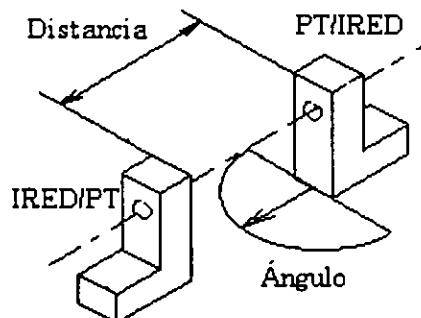


Diagrama D1.1. Soportes utilizados para la caracterización del IRED y del PT.

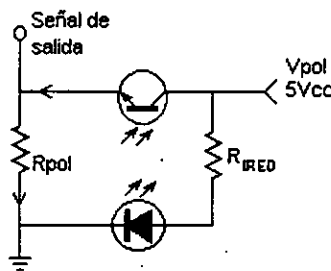


Diagrama D1.2. Circuito utilizado para la caracterización.

La tabla siguiente se obtuvo mediante el método mencionado.

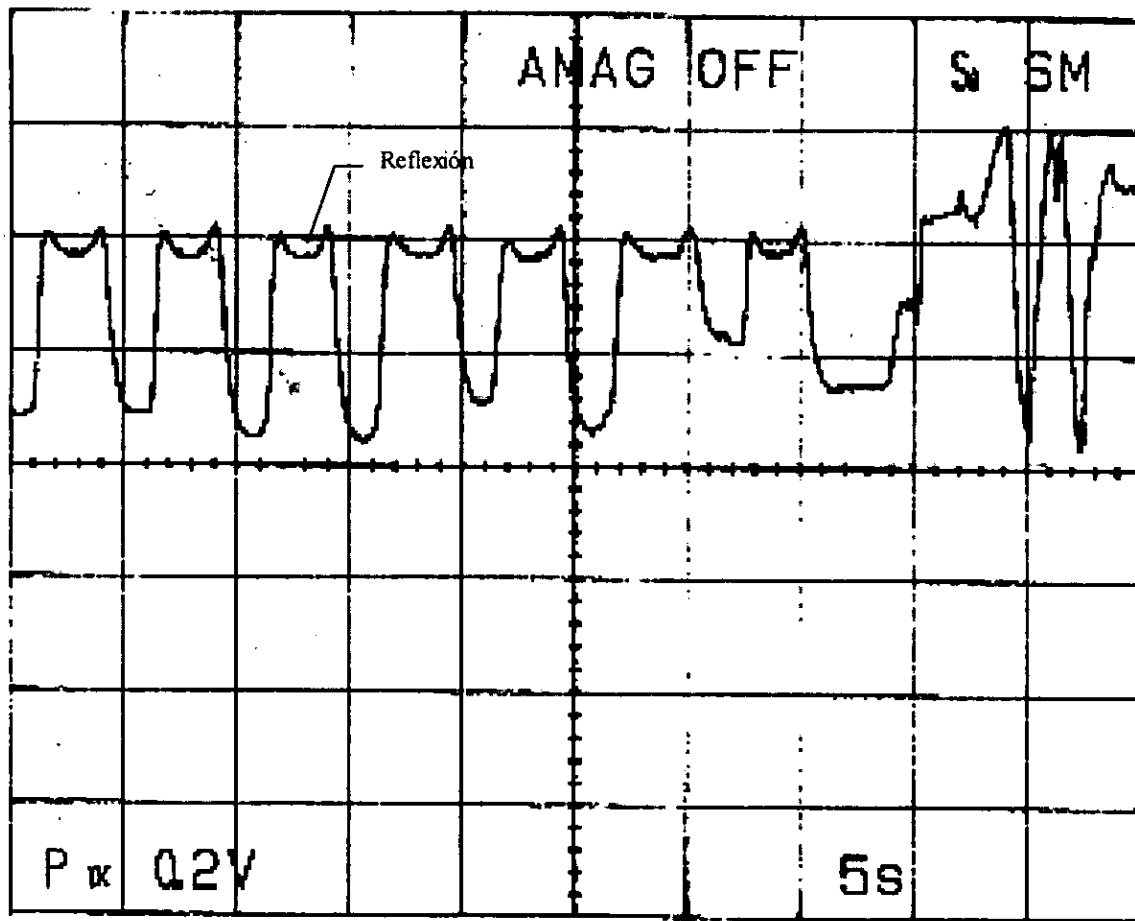
Radial (mm)	(mV)	Angular IRED	(mV)	Angular PT	(mV)
5	950	-20	10	-20	39
10	660	-15	35.5	-15	95
15	480	-10	69.7	-10	142.5
20	360	-5	105.4	-5	123.3
25	280	0	128.5	0	117.6
30	220	5	88.9	5	124.7
35	170	10	47.6	10	142.5
40	140	15	22.7	15	124.4
45	120	20	3.5	20	87.7

Tabla D1.3. Valores medidos de voltaje para la caracterización del transductor.

La prueba para distancia se hizo alineando los ejes ópticos de los componentes, para variar únicamente la separación entre ellos. La prueba para IRED y PT se realizó a una distancia de 50 mm.

Las gráficas del modelo se obtuvieron normalizando los valores, dividiendo los valores entre el mayor encontrado.

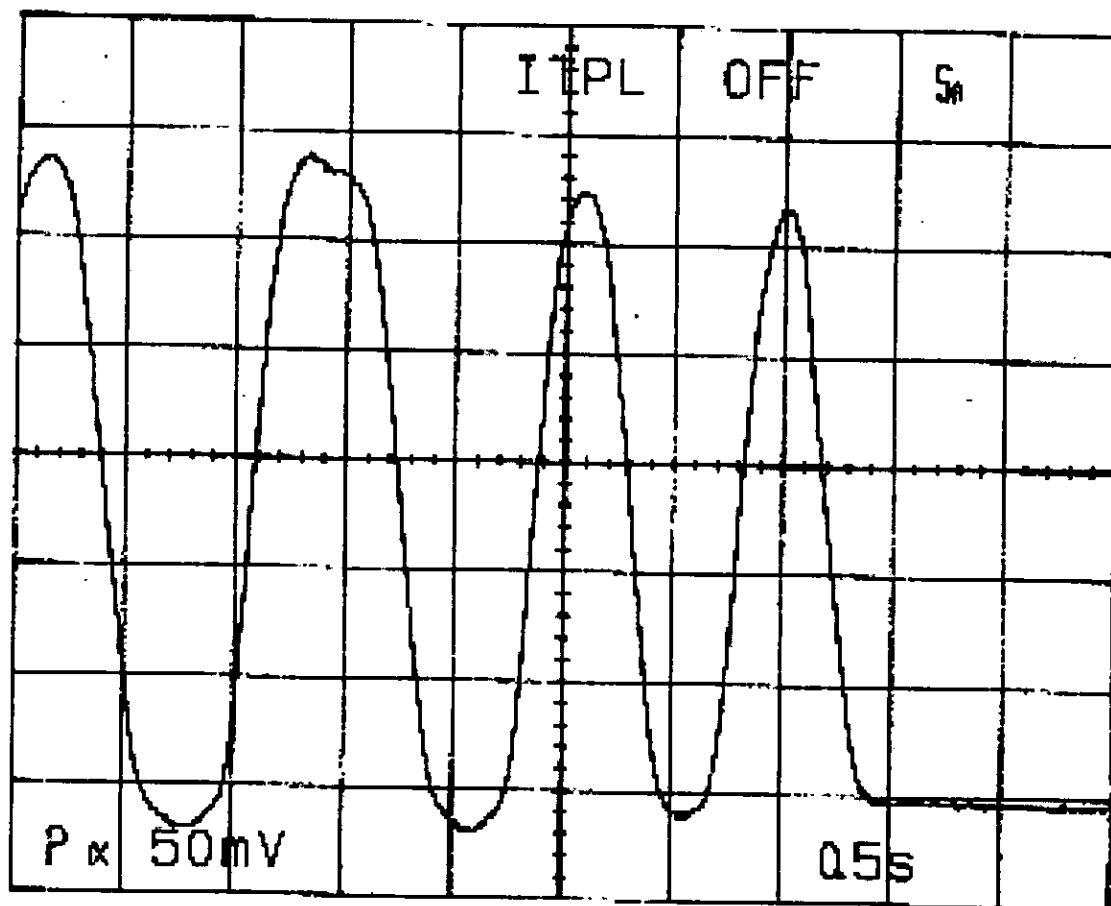
Una vez que se obtuvo el modelo de los componentes y se obtuvo el modelo del transductor, se hicieron pruebas por medio de un osciloscopio para verificar de una manera cualitativa el tipo de señal y el control que permite el transductor. Para esto se montó un transductor en la articulación media del dedo índice. La gráfica siguiente muestra la señal a través del tiempo.



Gráfica D1.4. Medición del movimiento del transductor.

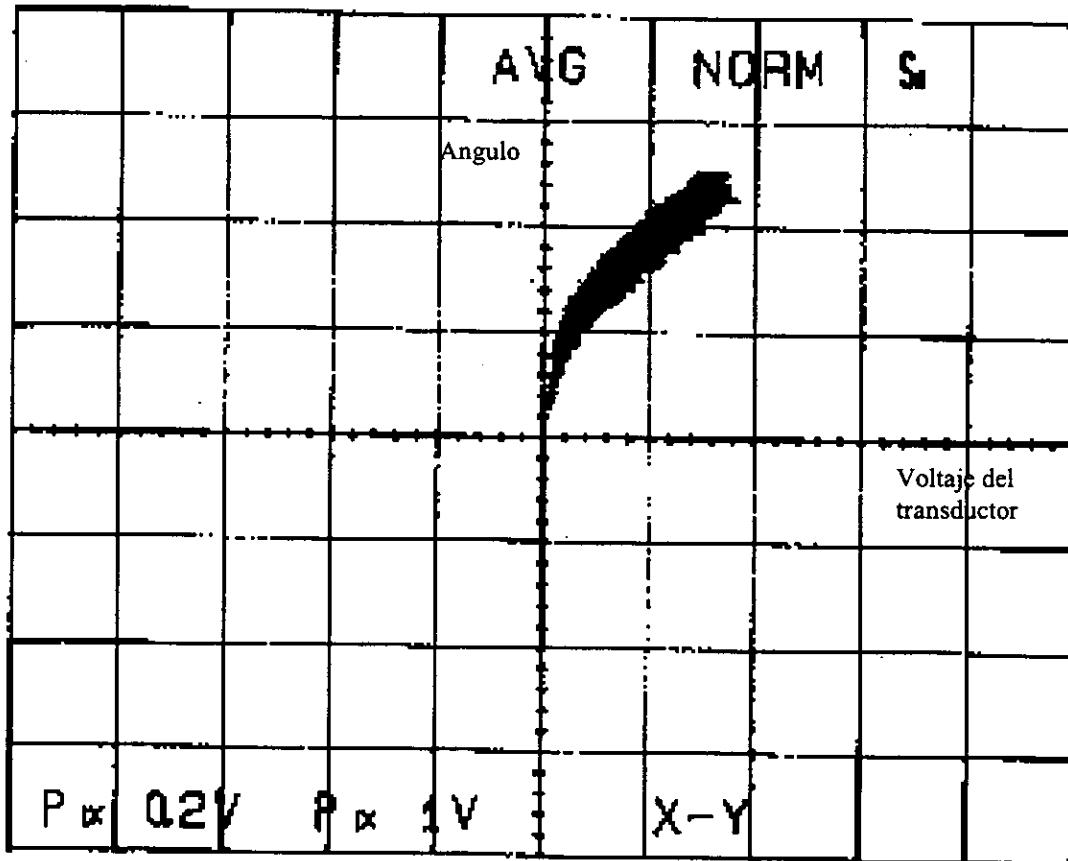
Esta gráfica permitió corregir un defecto mecánico en el montaje del transductor, que originó la reflexión de la función en la zona superior del rango de movimiento.

Al corregir el problema de la reflexión, evitando que los componentes excedieran el ángulo 0, se obtuvo el siguiente comportamiento :



Gráfica D1.5. Medición del movimiento del transductor evitando exceder la alineación de los ejes ópticos.

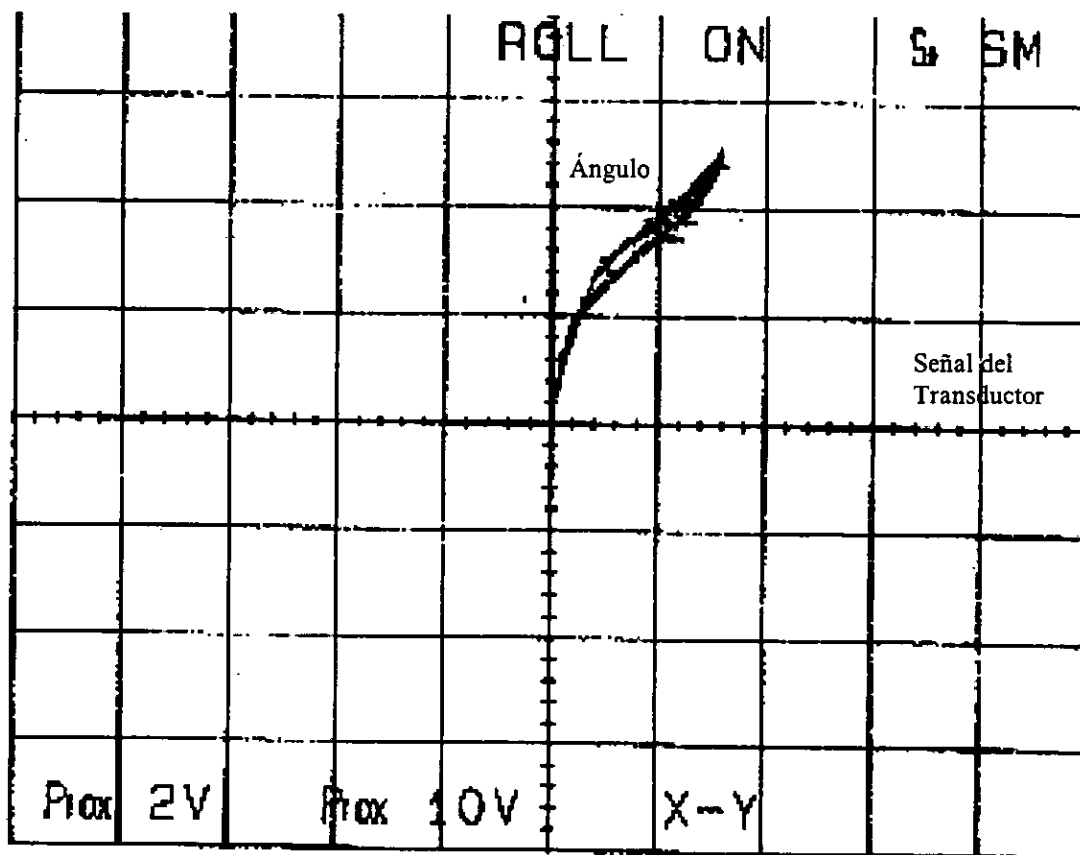
La siguiente prueba consistió en la determinación experimental de la función del comportamiento del transductor montado en un dedo simulado por medio de un motor de pasos. En esta prueba se produjo una señal por medio de un generador de señales para controlar la posición de motor de pasos a través de la tarjeta 68HC11. Tanto el voltaje del generador como el voltaje del transductor se enviaron al osciloscopio para obtener la gráfica X-Y siguiente.



Gráfica D1.6. Función del comportamiento del transductor.

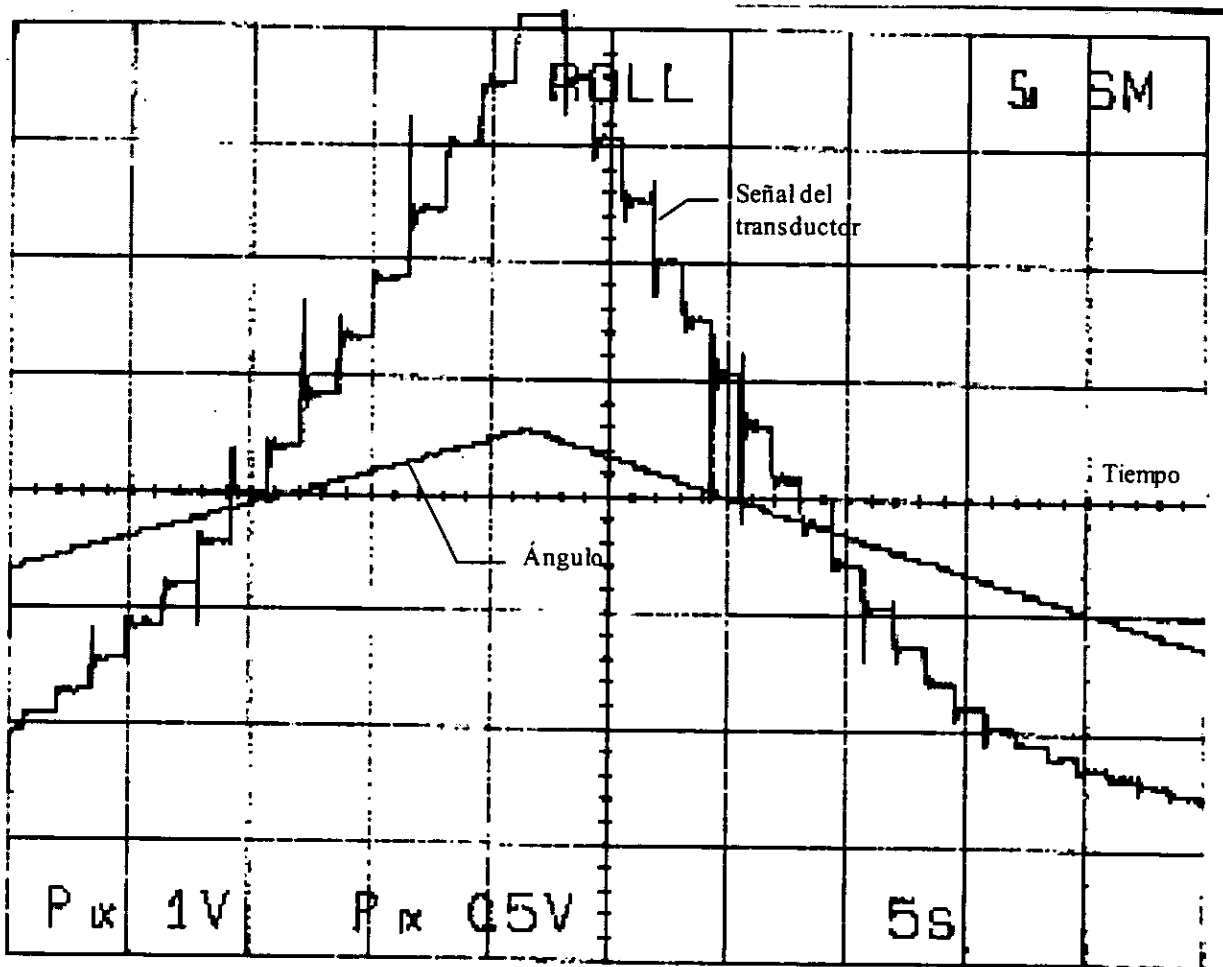
Esta gráfica es en realidad la función inversa, que permite conocer el ángulo a partir del valor de conversión del puerto. El efecto de histéresis se produjo por el uso de un plástico como soporte, además de que en el programa de control se utiliza un ciclo de histéresis para evitar la vibración del motor, causada por la conversión A/D. El valor máximo del rango corresponde a la extensión del dedo, mientras que el mínimo a la flexión. Se puede notar la gran cantidad de ruido mecánico presente en la medición.

La eliminación del ruido mecánico se logró disminuyendo la velocidad del motor, de modo que la medición realizada por el osciloscopio tuviera un menor nivel de ruido por la componente transitoria mecánica.



Gráfica D1.7. Función del comportamiento del transductor con disminución del ruido.

La gráfica siguiente presenta ambas señales variando en el tiempo. En esta gráfica se puede observar el ruido mecánico del motor de pasos, y el tiempo en que se estabiliza la señal del transductor. También es notable la presencia de escalones, equivalentes a una resolución de 1.8° del motor de pasos.



Gráfica D1.8. Señales del transductor y del generador de señales variando con el tiempo.

APÉNDICE D1

PROGRAMA PRINCIPAL DEL SISTEMA DE MEDICIÓN

El programa que a continuación se lista fue hecho para el compilador IDE ICC11, que es un compilador cruzado de ANSI C a ensamblador de 68HC11.

```

#include <hc11.h>
#include <stdio.h>
#include <string.h>
#include <math.h>
/**** DEFINICION DE RUTINAS
****/
int clip(double a, double
min, double max);
double intrpl(double
a,double min, double max);
double maximo(double
a,double b);
double minimo(double
a,double b);
void readports(int n);
void send(void);
void senddebug(void);
void filter(int p,int r);
void sci_svc(void);
/**** DEFINICIÓN DE
VARIABLES GLOBALES ****/
extern void _start();
char sci;
short int
chsr[16],e[16],ea[16],eb[16]
,lh[16],uh[16];
#pragma interrupt_handler
sci_svc()
void sci_svc(void)
{
int i;
sci=getchar();
if(sci=='r' || sci=='c' || sci=='
'n')
{
switch(getchar())
{
case
'0':chsr[0]=sci;
break;
case
'1':chsr[1]=sci;
break;
case
'2':chsr[2]=sci;
break;
case
'3':chsr[3]=sci;
break;
case
'4':chsr[4]=sci;
break;
case
'5':chsr[5]=sci;
break;
case
'6':chsr[6]=sci;
break;

```

```

        case
'7':chsr[7]=sci;
    break;
    case
'8':chsr[8]=sci;
    break;
    case
'9':chsr[9]=sci;
    break;
    case
'A':chsr[10]=sci;
    break;
    case
'B':chsr[11]=sci;
    break;
    case
'C':chsr[12]=sci;
    break;
    case
'D':chsr[13]=sci;
    break;
    case
'E':chsr[14]=sci;
    break;
    case
'F':chsr[15]=sci;
    break;
    case
for(i=0;i<=15;i++)
chsr[i]=sci;
    break;
}

printf("\nChannel      Status
Register (CHSR):");
for(i=0;i<=15;i++)putchar
(chsr[i]);
SCCR2=0x2C;
}
main(void)
{
/****      DEFINICION      DE
VARIABLES *****/
int con,val,ret;
char o,op,c;
short int i,s,a;

/****      CONFIGURACION      DE
HARDWARE *****/
OPTION=OPTION|0x80;
CNTRLX=0x80;
BAUD=0x30;
SCCR2=0x2C;
ADCTL=0x30;
PACTL=0x80;
/**** MENU PRINCIPAL *****/
puts("\nOK.\n");
asm("cli");
readports(20);
/**** inicialización de los
limites de interpolación
*****/
for(i=0;i<=15;i++)chsr[i]='r
';
for(;;)
{
    for(i=0;i<=15;i++)
    {
        if(chsr[i]=='r')
        {
            lh[i]=e[i]-1;
            uh[i]=e[i]+1;
            ea[i]=e[i];
            eb[i]=e[i];
            chsr[i]='c';
        }
    }
    filter(4,3);
}

/**** FUNCION DE LECTURA DE
PUERTOS A/D *****/
void readports(int n)
{
int i;
short int a,ret;
for(i=0;i<=15;i++)e[i]=0;
for(i=0;i<n;i++)
{
    for(a=0;a<=3;a++)
    {
        PORTA=a*64;
    }
}
}

```

```

        for (ret=0;ret<50;ret++)
;
        e[0+a*4]=e[0+a*4]+ADR1;
        e[1+a*4]=e[1+a*4]+ADR2;
        e[2+a*4]=e[2+a*4]+ADR3;
        e[3+a*4]=e[3+a*4]+ADR4;
        }
    }
for (i=0;i<=15;i++)
    {
        e[i]=e[i]/n;
    }
for (i=0;i<=15;i++)
    {
        if (chsr[i]=='c')
            {
                uh[i]=(uh[i]<e[i])?e[i]
:uh[i];

                lh[i]=(lh[i]>e[i])?e[i]
:lh[i];
            }
    }
}
/****  FUNCIÓN  DE  FORMATO
SERIAL ****/
void send(void)
{
double a;
int b,c;
putchar(0xF7);
for (c=0;c<=8;c++)
    {
        a=intrpl(e[c],lh[c],uh[
c]);
        b=clip(a,0,127);
        putchar (b);
    }
a=intrpl(e[11],lh[11],uh[11]
);
b=clip(a,0,127);

        putchar (b);
a=intrpl(e[15],lh[15],uh[15]
);
b=clip(a,0,127);
putchar(125);
putchar(125);
putchar(0xF0);
}
int clip(double a, double
min, double max)
{
int o;
o=(int) (maximo(min, (minimo(a
,max))));
return o;
}
double maximo(double
a,double b)
{
double o;
if(a>b)o=a;
else o=b;
return o;
}
double minimo(double
a,double b)
{
double o;
if(a<b)o=a;
else o=b;
return o;
}
double intrpl(double
a,double min, double max)
{
double o;
o=127*(a-min)/(max-min);
return o;
}
void filter(int p,int r)
{
int t,j;
double f;
for (t=0;t<=15;t++)ea[t]=eb[t
];
readports(r);

```

```

for(t=0;t<=15;t++)eb[t]=e[t]
;
for(j=0;j<=p;j++)
    {
        for(t=0;t<=15;t++)
            {
                f=((double)(j))/((double)
e)(p));
                e[t]=(1-
f)*ea[t]+f*eb[t];
            }
        send();
    }
}
void senddebug(void)
{
int c;
int k;
k=2;
c=clip(intrpl(e[k],lh[k],uh[
k]),0,127);
printf("\nc=%d,
resol=%d",c,(int)(uh[k]-
lh[k]));
}
#pragma abs_address:0xffd6
void
(*interrupt_vectors[])() =
{
    (void (*)()) (sci_svc),
    /* SCI */
    _start, /* SPI */
    _start, /* PAIE */
    _start, /* PAO */
    _start, /* TOF */
    _start, /* TOC5 */
    _start, /* TOC4 */
    _start, /* TOC3 */
    _start, /* TOC2 */
    _start, /* TOC1 */
    _start, /* TIC3 */
    _start, /* TIC2 */
    _start, /* TIC1 */
    _start, /* RTI */
    _start, /* IRQ */
    _start, /* XIRQ */

```

APÉNDICE D2

PROGRAMA CON MINIMIZACIÓN DE LA FRECUENCIA DE MUESTREO

En este listado no se incluyen las rutinas que ya se definieron en el listado del apéndice D1.

```

#include <hcl1.h>
#include <stdio.h>
#include <string.h>
#include <math.h>
/**** DEFINICION DE RUTINAS
****/
double      intrpl(double
a,double min, double max);
double      maximo(double
a,double b);
double      minimo(double
a,double b);
void sci_svc(void);
/**** DEFINICIÓN DE
VARIABLES GLOBALES *****/
extern void _start();
char sci;
short      int
buf[16],chsr[16],e[16],ea[16
],eb[16],lh[16],uh[16];
#pragma interrupt_handler
sci_svc()
void sci_svc(void)
{
int i;
sci=getchar();
if(sci=='r' || sci=='c' || sci=='
'n')
{
switch(getchar())
{
case
'0':chsr[0]=sci;
break;
case
'1':chsr[1]=sci;
break;
case '2':chsr[2]=sci;
break;
case
'3':chsr[3]=sci;
break;
case
'4':chsr[4]=sci;
break;
case
'5':chsr[5]=sci;
break;
case
'6':chsr[6]=sci;
break;
case
'7':chsr[7]=sci;
break;
case
'8':chsr[8]=sci;
break;
case
'9':chsr[9]=sci;

```

```

        break;
        case
'A':chsr[10]=sci;
        break;
        case
'B':chsr[11]=sci;
        break;
        case
'C':chsr[12]=sci;
        break;
        case
'D':chsr[13]=sci;
        break;
        case
'E':chsr[14]=sci;
        break;
        case
'F':chsr[15]=sci;
        break;
        case
for(i=0;i<=15;i++)
chsr[i]=sci;
        break;
    }
printf("\nChannel      Status
Register (CHSR):");
for(i=0;i<=15;i++)putchar
(chsr[i]);
SCCR2=0x2C;
}
main(void)
{
/****      DEFINICION      DE
VARIABLES *****/
int con,val,ret;
char o,op,c;
short int i,s,a,b;
double aa;
/****      CONFIGURACION      DE
HARDWARE *****/
OPTION=OPTION|0x80;
CNTRLX=0x80;
BAUD=0x30;
SCCR2=0x2C;
ADCTL=0x30;
PACTL=0x80;
        puts("\nOK.\n");
        asm("cli");
/**** inicialización de los
limites de interpolación
*****/
for(i=0;i<=15;i++)chsr[i]='c
';
/**** ciclo principal *****/
for(;;)
    {
        PORTA=0;
        for(ret=0;ret<50;ret++)
;
        e[0]=ADR1;
        e[1]=ADR2;
        e[2]=ADR3;
        e[3]=ADR4;
        PORTA=64;
        for(ret=0;ret<50;ret++)
;
        e[5]=ADR1;
        e[6]=ADR2;
        e[7]=ADR3;
        e[8]=ADR4;
        PORTA=128;
        for(ret=0;ret<50;ret++)
;
        e[9]=ADR1;
        e[10]=ADR2;
        for(i=0;i<=9;i++)
            {
                if(chsr[i]=='c')
                    {
                        uh[i]=(uh[i]<e[i])?e[i]
:uh[i];

                        lh[i]=(lh[i]>e[i])?e[i]
:lh[i];
                    }

                buf[i]=(int)(maximo(0,(
minimo(127*(e[i]-
lh[i])/(uh[i]-
lh[i]),127)))));
            }
    }

```

```
    putchar(0xF7);
    putchar(buf[0]);
    putchar(buf[1]);
    putchar(buf[2]);
    putchar(buf[3]);
    putchar(buf[4]);
    putchar(buf[5]);
    putchar(buf[6]);
    putchar(buf[7]);

    putchar(buf[8]);
    putchar(buf[9]);
    putchar(125);
    putchar(125);
    putchar(125);
    putchar(0xF0);
}
```