



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y CONTROL BILATERAL
DE UN SISTEMA TELEOPERADO**

T E S I S
Que para obtener el título de
INGENIERO MECATRÓNICO
P R E S E N T A N:

JORGE ARTURO ALVAREZ RUIZ
OMAR OSORIO FIGUEROA

DIRECTOR DE TESIS:
DR. EDMUNDO GABRIEL ROCHA CÓZATL



MÉXICO D.F.

SEPTIEMBRE 2012



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.

Índice

1.- Introducción

- 1.1.- Resumen
- 1.2.- Objetivos
- 1.3.- Alcances
- 1.4.- Justificación

2.- Antecedentes

- 2.1.- Teleoperación
- 2.2.- Robots manipuladores
- 2.3.- Sistemas hápticos
- 2.4.- Datos históricos
- 2.5.- Marco Teórico
 - 2.5.1.- Robots de servicio y teleoperados
 - 2.5.2.- Elementos de los manipuladores
 - 2.5.3.- Elementos de un sistema de control teleoperado
 - 2.5.4.- Tipos de control teleoperado
 - 2.5.5.- Amplificador operacional
 - 2.5.6.- Etapas de potencia

3.- Diseño conceptual

- 3.1.- Misión del proyecto
- 3.2.- Interpretación de las necesidades del alumno
- 3.3.- Jerarquización de las necesidades del alumno
- 3.4.- Lista de especificaciones
- 3.5.- Diagrama funcional
- 3.6.- Árbol de clasificación de conceptos
- 3.7.- Morfología del diseño mecánico
- 3.8.- Matriz de selección de conceptos
- 3.9.- Matrices de selección de los elementos principales
 - 3.9.1.- Selección de sensores de posición angular
 - 3.9.2.- Selección de actuadores
 - 3.9.3.- Selección del material de la estructura
- 3.10.- Introducción a los sensores de fuerza
- 3.11.- Propuesta de diseño

4.- Construcción del sistema mecánico

- 4.1.- Robots
- 4.2.- Motores
- 4.3.- Sensores para medir posición angular
- 4.4.- Acoplamientos

5.- Control

- 5.1.- Arquitecturas de control básicas
 - 5.1.1.- *Force Reflection* (FR)
 - 5.1.2.- *Position Error* (PR)
 - 5.1.3.- *Shared Compliance Control* (SCC)
- 5.2.- Control bilateral de un sistema teleoperado
 - 5.2.1.- Implementación de la arquitectura de control *FR*
 - 5.2.2.- Esquema general del sistema de control
 - 5.2.3.- Etapa de acondicionamiento
 - 5.2.4.- Adquisición de datos y sistema de control
 - 5.2.5.- Etapa de potencia
 - 5.2.6.- Programación de la arquitectura de control *FR*
 - 5.2.7.- Interfaz de usuario de la arquitectura de control *FR*
- 5.3.- Control bilateral con entorno virtual
 - 5.3.1.- Esquema general del sistema de control con entorno virtual
 - 5.3.2.- Programación del control con entorno virtual
 - 5.3.3.- Interfaz de usuario del control con entorno virtual

6.- Implementación de la electrónica y sistema de control

- 6.1.- Circuitos
- 6.2.- Caja de encendido y apagado de motores
- 6.3.- Sistema de control

7.- Resultados

- 7.1.- Análisis del control de seguimiento
- 7.2.- Análisis de la retroalimentación de fuerza
- 7.3.- Análisis de la retroalimentación de fuerza del entorno virtual

8.- Conclusiones

9.- Referencias

Apéndices

- A.- Planos

1.- Introducción

1.1.- Resumen

En el presente trabajo se reporta el diseño conceptual y construcción de mecanismos, así como el diseño e implementación del control bilateral que conforman un sistema de teleoperación.

El diseño conceptual se realizó mediante una metodología basada en la obtención de requerimientos y en la identificación de las funciones principales o críticas del sistema. Con base en éstas se realizó la selección de los componentes que las resuelven, así como de la configuración o morfología de los robots más adecuada.

Se programó e implementó una arquitectura de control bilateral básica, *Force Reflection* y se plantearon objetivos de control. Además también se programó e implementó un control con entorno virtual. Ambos controles permiten retroalimentación de fuerza.

El sistema maestro – esclavo se puso en funcionamiento y fue analizado con base en los objetivos de control. Para esto se utilizaron gráficas de posición, voltaje y error, así como el análisis visual directo.

1.2.- Objetivos

Objetivo general

Diseñar y fabricar un sistema mecánico el cual pueda ser utilizado para hacer demostraciones de control teleoperado con una aplicación simple.

Objetivos particulares

- Diseñar y fabricar un sistema maestro-esclavo conceptual
- Realizar el control de seguimiento de los movimientos del maestro por parte del esclavo
- Implementar la retroalimentación de la fuerza percibida en el esclavo hacia el maestro

1.3.- Alcances

En este proyecto se pretenden aplicar los conocimientos adquiridos durante la carrera de Ingeniería Mecatrónica, como lo son metodologías de diseño de productos y diseño mecatrónico, para desarrollar y construir un sistema maestro-esclavo con una aplicación simple. Se considera de mayor importancia para este trabajo el control de seguimiento y sobretodo la implementación de la

retroalimentación de fuerza, donde se aplicarán conocimientos de control automático, instrumentación y electrónica. Se presentará una introducción a las arquitecturas de control bilateral básicas aunque solamente se implementará la llamada *Force Reflection*.

1.4.- Justificación

Desde tiempos muy remotos, el hombre ha utilizado múltiples herramientas para aumentar su capacidad de alcance, manipulación y precisión así como para evitar riesgos y mantener su seguridad. Como por ejemplo, para alcanzar objetos en un estante, tirar una manzana de un árbol, manipular metales calientes, etc. [1]

Actualmente existen sistemas de teleoperación que permiten manipular o realizar acciones a kilómetros de distancia. Sobre todo gracias a los avances en las tecnologías de telecomunicaciones, electrónica, robótica y control automático. Estos desarrollos han desembocado finalmente en lo que se conoce como sistemas de teleoperación maestro-esclavo, en los que un dispositivo denominado esclavo reproduce los movimientos de otro llamado maestro, controlado a su vez manualmente por un operador humano. A partir de la creación de estos sistemas, la teleoperación cobra importancia como tecnología. [1]

Existen aplicaciones actuales importantes de este tipo de sistemas de teleoperación en distintas áreas. En la industria nuclear se utilizan para manipular sustancias radiactivas, así como moverse por entornos contaminados, sin peligro para el ser humano. En el sector médico existen dispositivos muy avanzados tecnológicamente que permiten realizar una cirugía remotamente. También desarrollos de prótesis y aparatos que auxilian a personas en rehabilitación. Las aplicaciones espaciales quizá son las más reconocidas. Robots móviles de exploración y brazos robóticos teleoperados para hacer reparaciones en la estación espacial. Como estas aplicaciones existen un sin número de ellas en muchas otras áreas. [1], [14]

La creación de dispositivos especiales, para que el operador perciba de mejor manera el entorno en el que se mueve el dispositivo esclavo, complementan ahora la información visual y auditiva que normalmente proporcionan estos sistemas. Además el apoyo en entornos de realidad virtual, como lo pueden ser simuladores hacen más notables las aplicaciones de los sistemas teleoperados, permitiendo cada vez mayor efectividad y precisión en las tareas realizadas.

2.- Antecedentes

En este capítulo se mencionan algunos conceptos que son necesarios para comprender como se conforma de manera general el sistema teleoperado que se implementará en este trabajo, como lo son: *teleoperación, robots manipuladores, sistemas hápticos*, así como algunos *datos históricos*. Además se entra más a detalle en los *elementos que conforman a un robot manipulador*, los *elementos que conforman a un sistema de teleoperación* e incluso la configuración de los *amplificadores operacionales y etapas de potencia*.

2.1.- Teleoperación

El origen etimológico de la palabra teleoperación viene de: la raíz griega **τηλε (tele)** que significa, *lejos*, o a distancia y **“ópera”**, palabra patrimonial italiana que viene del verbo en latín “operari” (operar, trabajar) y que quiere decir *“un trabajo”*.

Entonces **teleoperar** es la acción que realiza un ser humano de operar o gobernar a distancia un dispositivo, el cual le permita lograr un objetivo o un trabajo deseado.

2.2.- Robots manipuladores

La *Asociación de Industrias Robóticas (RIA)* define un robot industrial como [3]:

- Un manipulador multifuncional reprogramable, capaz de mover materias, piezas, herramientas o dispositivos especiales, según trayectorias variables, programadas para realizar tareas diversas.

Esta definición, ligeramente modificada, ha sido adoptada por la *Organización Internacional de Estándares (ISO)* que define al robot industrial como:

- Manipulador multifuncional reprogramable con varios grados de libertad, capaz de manipular materias, piezas, herramientas o dispositivos especiales según trayectorias variables programadas para realizar tareas diversas.

Cabe hacer notar que en esta definición se incluye la necesidad de que el robot tenga varios grados de libertad. La *Asociación Francesa de Normalización (ANFOR)* define primero el manipulador y, basándose en dicha definición, el robot [3]:

- *Manipulador*: mecanismo formado generalmente por elementos en serie, articulados entre sí, destinado al agarre y desplazamiento de objetos. Es multifuncional y puede ser gobernado directamente por un operador humano o mediante un dispositivo lógico.

- *Robot*: manipulador automático servocontrolado, reprogramable, polivalente, capaz de posicionar y orientar piezas, útiles o dispositivos especiales, siguiendo trayectorias variables reprogramables, para la ejecución de tarea variadas. Normalmente tiene la forma de uno varios brazos terminados en muñeca. Su unidad de control incluye un dispositivo de memoria y ocasionalmente de percepción del entorno. Normalmente su uso es el de realizar una tarea de manera cíclica, pudiéndose adaptar a otra sin cambios permanentes en su material. [3], [14].

2.3.- Sistemas hápticos

La háptica se deriva del griego “απτο” (hpto), que significa tocar, relativo al tacto. Háptica en tecnología, es la ciencia que estudia las aplicaciones de interacción entre las personas en ambientes reales, virtuales o tele-operados. Las interfaces hápticas permiten al usuario manipular objetos en cualquiera de estas variantes, por lo que es necesario utilizar dispositivos de entrada (sensores) y salida (actuadores) especiales, los cuales permitan lograr la percepción.

Se han diferenciado tres modos de procesar la información a través del sentido del tacto. Estos tres modos son: percepción táctil, kinestésica y háptica [4].

Percepción táctil. Se hace referencia exclusivamente a la información adquirida a través del sentido cutáneo. Permiten detectar el primer contacto con el entorno, conocer la geometría de la superficie, su rugosidad y su temperatura.

Percepción kinestésica o de fuerza. Es la sensación de una resistencia al avance o una fuerza. Hace referencia a la excitación de los sensores colocados en los músculos y tendones, unidos a huesos y articulaciones y que transmiten las tensiones y las fuerzas que se producen durante el movimiento (inerciales o de contacto). Receptores de poco ancho de banda.

Percepción háptica. Es la sensación de contacto, ya sea de tipo táctil o de fuerza. Se combinan para proporcionar información válida de los objetos. Es la forma habitual de percibir el entorno cuando utilizamos el sentido del tacto de manera activa y voluntaria.

La implementación de este tipo de sistemas en un diseño robótico teleoperado le permitiría tener una mejor percepción del entorno al operador, de lo que el esclavo siente. Esto aumentaría el desempeño y la precisión con que se realizan las tareas, siempre y cuando se implemente un buen sistema de control.

2.4.- Datos históricos

Las investigaciones en torno a la telemanipulación de objetos nacieron en los laboratorios de la industria nuclear, debido al alto riesgo que presenta estar en contacto directo con los elementos radiactivos.

En 1947 comenzaron las primeras investigaciones, lideradas por Raymond Goertz del Argonne National Laboratory en Estados Unidos, encaminadas al desarrollo de algún tipo de manipulador de fácil manejo a distancia mediante el uso por parte del operador de otro manipulador equivalente. En 1948 se desarrolló el primer manipulador teleoperado mecánico, denominado *M1*. **Figura 2.1.** Este mecanismo permitía que la pinza situada en el extremo del manipulador esclavo reprodujera de forma fiel los movimientos hechos por la mano del operador al extremo del manipulador maestro. Ambos manipuladores eran prácticamente iguales de tal manera que el extremo de ambos describiese la misma trayectoria. [1], [2], [14]

Fue en 1954 cuando Goertz presentó el primer manipulador maestro-esclavo con accionamiento eléctrico y servocontrol en ambos manipuladores llamado *E1*. **Figura 2.2.**



Figura 2.1 Primer manipulador mecánico teleoperado.

Fuente: [1] Nuño Ortega E., Basañez Villaluenga L. (2004) **Teleoperación: técnicas, aplicaciones, entorno sensorial y teleoperación inteligente**

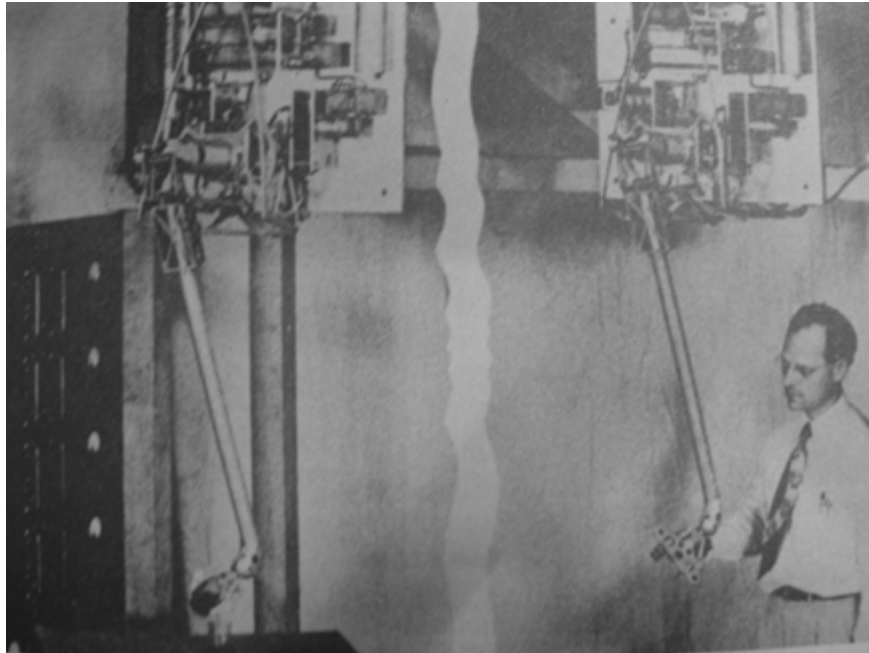


Figura 2.2 Primer manipulador maestro-esclavo.

Fuente: [1] Nuño Ortega E., Basañez Villaluenga L. (2004) **Teleoperación: técnicas, aplicaciones, entorno sensorial y teleoperación inteligente**

En los años sesenta se extendieron las investigaciones hasta el campo de las aplicaciones submarinas, siendo los sistemas cada vez más sofisticados, especialmente por la inclusión de cámaras y demás dispositivos para aumentar la telepresencia del operador.

A finales de los años sesenta y principios de los setenta, la tecnología de la teleoperación alcanzó su madurez con su utilización en aplicaciones espaciales. [1], [14]

La incorporación de los desarrollos de la robótica y la tecnología multimedia han permitido incrementar las capacidades del sistema remoto, especialmente en lo que se refiere a su autonomía o control realizado de manera directa en la zona remota, mejorando fundamentalmente las prestaciones de la interfaz hombre máquina.

2.5.- Marco Teórico

2.5.1.- Robots de servicio y teleoperados

Los robots de servicio se definen como [3]:

- Dispositivos electromecánicos móviles o estacionarios, dotados normalmente de uno o varios brazos mecánicos independientes, controlados por un programa de ordenador y que realizan tareas no industriales de servicio.

En esta definición entrarían entre otros, los robots dedicados a cuidados médicos, educación, domésticos, uso en oficinas, intervención en ambientes peligrosos, aplicaciones espaciales, aplicaciones submarinas y agricultura. Sin embargo, esta definición de robots de servicio excluye los telemanipuladores, pues éstos no se mueven mediante el control de un programa de ordenador, sino que están controlados directamente por el operador humano.

La definición de robot teleoperado incluye tanto a los robots de servicio como a los telemanipulados. Según la *Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio* (NASA), los robots teleoperados son [3]:

- Dispositivos robóticos con brazos manipuladores y sensores y cierto grado de movilidad, controlados remotamente por un operador humano de manera directa o a través de un ordenador.

Este trabajo se centra en los robots telemanipulados, es decir controlados de manera remota a través de un operador humano. **Figura 2.3.**

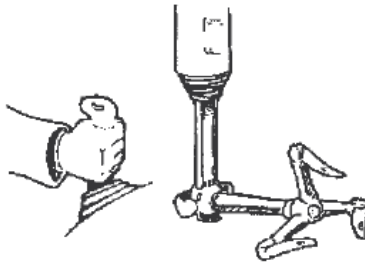


Figura 2.3 Telemanipulador

Fuente: [3] Barrientos A., Peñin L. F., Balaguer C., Santoja R. A. *Fundamentos de Robótica*

2.5.2.- Elementos de los manipuladores

A continuación se hace una revisión breve de los diferentes elementos que constituyen a los manipuladores [3]:

- Articulaciones
- Actuadores
- Elementos de transmisión
- Sensores

Articulaciones

Un robot está formado mecánicamente por una serie de elementos llamados **eslabones** unidos mediante **articulaciones**, las cuales permiten el movimiento relativo entre dos eslabones consecutivos. Éstas permiten movimientos de giro, de desplazamiento lineal o una combinación de ambos. Existen 6 diferentes tipos de articulaciones. **Figura 2.4**

A cada uno de los **movimientos independientes** que puede realizar una articulación se le llama **grado de libertad**. El número de grados de libertad del robot viene dado por la suma de grados de libertad de cada una de sus articulaciones. [3]

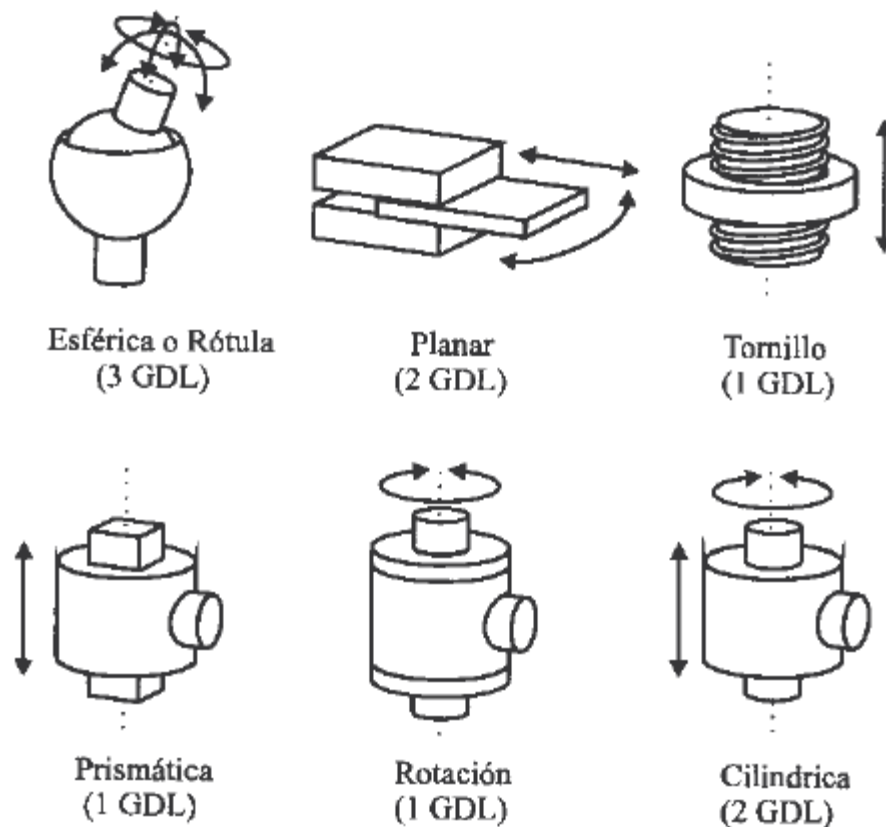


Figura 2.4 Tipos de articulaciones

Fuente: [3] Barrientos A., Peñin L. F., Balaguer C., Santoja R. A. *Fundamentos de Robótica*

Existen distintos tipos de configuraciones para un manipulador según los tipos de articulaciones con el que se diseñe. Para poder **posicionar** el extremo en cualquier lugar del área de trabajo de tres dimensiones, son necesarias **tres articulaciones** con un grado de libertad cada una. Si es necesario **orientar** además el extremo hacia cualquier dirección, son necesarios **otros tres grados de libertad**. [3]

A continuación se muestran las configuraciones básicas de un robot manipulador. **Figura 2.5**

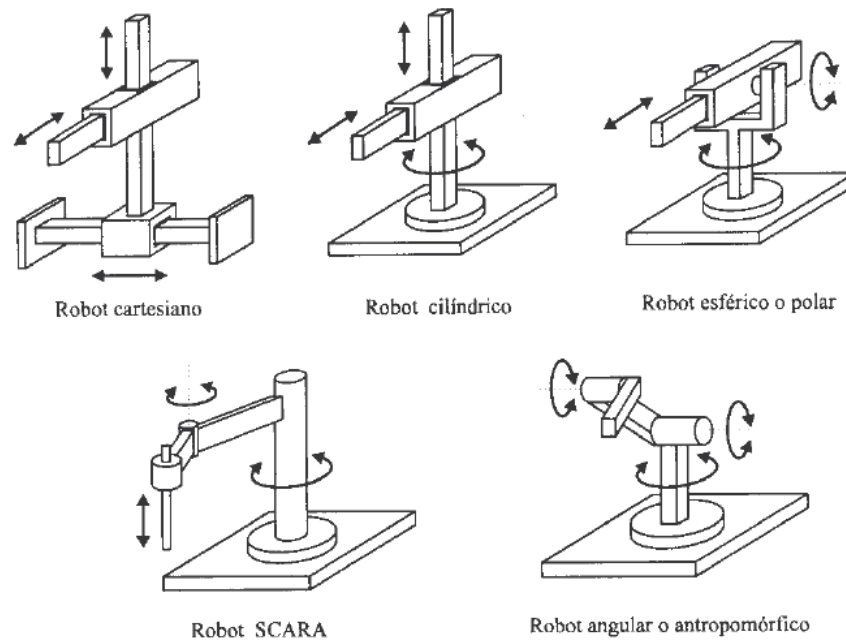


Figura 2.5 Configuraciones básicas de un robot manipulador

Fuente: [3] Barrientos A., Peñin L. F., Balaguer C., Santoja R. A. *Fundamentos de Robótica*

Actuadores

Los actuadores son los elementos encargados de generar el movimiento en las articulaciones del robot a partir de una señal de control, por lo general de tipo eléctrico.

Existen tres principales tipos de actuadores, que se distinguen por el tipo de energía que utilizan para producir el movimiento [3]:

- Neumáticos
- Hidráulicos
- Eléctricos

Actuadores neumáticos

Este tipo de actuadores utiliza como fuente de energía aire comprimido el cual convierten en trabajo mecánico. Existen 2 tipos de actuadores neumáticos [6]:

- Cilindros neumáticos
- Motores neumáticos

En general, con los actuadores neumáticos no se consigue una buena precisión en el posicionamiento debido a la compresibilidad del aire. Sin embargo, su sencillez y robustez los hacen muy adecuados para casos donde se necesite el posicionamiento en solamente dos posiciones.

Se debe de tomar en cuenta también que el empleo de actuadores de tipo neumático siempre deberán de contar con una instalación de aire comprimido que incluye: compresor, sistema de distribución, como lo son tuberías y válvulas, filtros, secadores, etc.

Actuadores hidráulicos

Estos actuadores no difieren mucho en los neumáticos, existen también cilindros y motores de aletas y pistones. A diferencia de los neumáticos trabajan a presiones mucho mayores, entre 50 y 100 bar, ya que utilizan como fluidos de trabajo aceites minerales. Debido a que no existe la compresibilidad como en el aire, se puede lograr mayor precisión y por tanto un control continuo, pudiendo posicionar a lo largo de un intervalo grande de valores. Permiten además mayores fuerzas y pares debido a las presiones con las cuales trabajan. La desventaja es que son lentos en comparación con otros actuadores. [3]

Actuadores eléctricos

Son aquellos que transforman la energía eléctrica en trabajo mecánico. Se pueden distinguir tres tipos:

- Motores de corriente directa
- Motores de corriente alterna
- Motores a pasos

Motores de corriente directa

Existe una gran variedad de este tipo de motores utilizados en robótica, de distintos tamaños, formas y potencias, pero todos se basan en el mismo principio de funcionamiento. Los motores de CD constan de dos elementos principales llamados inductor e inducido. [7], [8]

El **inductor** situado en el estator del motor se encarga de crear un campo magnético de dirección fija, denominado de excitación. Este campo magnético puede ser producido por un devanado interno o bien por medio de un imán permanente.

El **inducido** es un devanado situado en el rotor, el cual gira debido a la fuerza de Lorentz que aparece como combinación de la corriente que circula por él y el campo magnético de

excitación. Mientras gira, éste recibe la corriente de alimentación por medio de un conmutador o colector de delgas (láminas de material conductor) apoyado sobre unas escobillas de carbón.



Figura 2.6 Estator de un motor de CD

Fuente: página electrónica <<http://www.puntoflotante.net/motor.htm>>

Existen dos maneras de controlar los motores de corriente directa: control por excitación y control por inducido. El primero consiste en variar el campo magnético en el inductor, es decir en el estator, y mantener la corriente en el inducido constante. El segundo consiste en mantener el campo de excitación constante y variar la corriente en el inducido.

Al aplicarle un voltaje a un motor de CD, éste girará continuamente, al variar este voltaje, solamente provocará que tanto la velocidad como el par varíen. Para poder controlar la posición es necesario utilizar un lazo de retroalimentación midiendo continuamente su posición. Se aplica una acción de control que depende del error entre la posición real y deseada, es decir un voltaje de control.

Elementos de transmisión

El extremo de un robot se mueve en ocasiones con aceleración elevada, por lo que es de gran importancia reducir su momento de inercia. Así mismo la fricción estática que los actuadores deben de vencer depende directamente de la distancia de éstos a los centros de masa de las articulaciones. Por esto, se recomienda o se procura colocar los actuadores, lo más cerca de la base del robot para que su peso no influya demasiado. Esto hace necesario en ocasiones utilizar sistemas de transmisión que trasladen el movimiento hasta las articulaciones, especialmente a las situadas en el extremo del robot. Se utilizan para convertir, si es necesario, movimiento circular en lineal o viceversa. También en casos donde se necesite reducir o aumentar tanto par como velocidad en una articulación. [3]

A continuación se muestra en la **Tabla 2.1** una clasificación de elementos de transmisión según la entrada y salida del tipo de movimiento, así como algunas ventajas y desventajas, ya que al utilizar un sistema de este tipo, se deben tomar en cuenta características básicas como peso y

tamaño reducidos, que se eviten holguras o juegos, que no afecten los movimientos por rozamientos y que su rendimiento sea el adecuado.

Entrada - Salida	Denominación	Ventajas	Inconvenientes
Circular - Circular	Engranaje	Pares altos	Holguras
	Corea dentada	Distancia grande	-
	Cadena	Distancia grande	Ruido
	Paralelogramo	-	Giro limitad
	Cable	-	Deformabilidad
Circular - Lineal	Tornillo sin fin	Poca holgura	Rozamiento
	Cremallera	Holgura media	Rozamiento
Lineal - Circular	Paralelogramo articulado	-	Control difícil
	Cremallera	Holgura media	Rozamiento

Tabla 2.1 Clasificación de elementos de transmisión según la entrada-salida. [3]

Sensores

Un robot necesita desempeñar su tarea con precisión, velocidad e inteligencia. Para poder lograrlo es preciso tener conocimiento del estado del robot, tanto del estado de su entorno. Esta información se obtiene a partir de sensores, los cuales se pueden clasificar en dos [3]:

- **Sensores internos**, los cuales proveen la información relacionada con el estado del robot, principalmente posición y velocidad.
- **Sensores externos**, los cuales adquieren la información del entorno en el cual se desempeña el robot. Como por ejemplo, sensores de temperatura, de presión, de concentración química, etc.

A continuación la **Tabla 2.2** muestra una clasificación de los principales sensores internos utilizados en robótica de manipuladores.

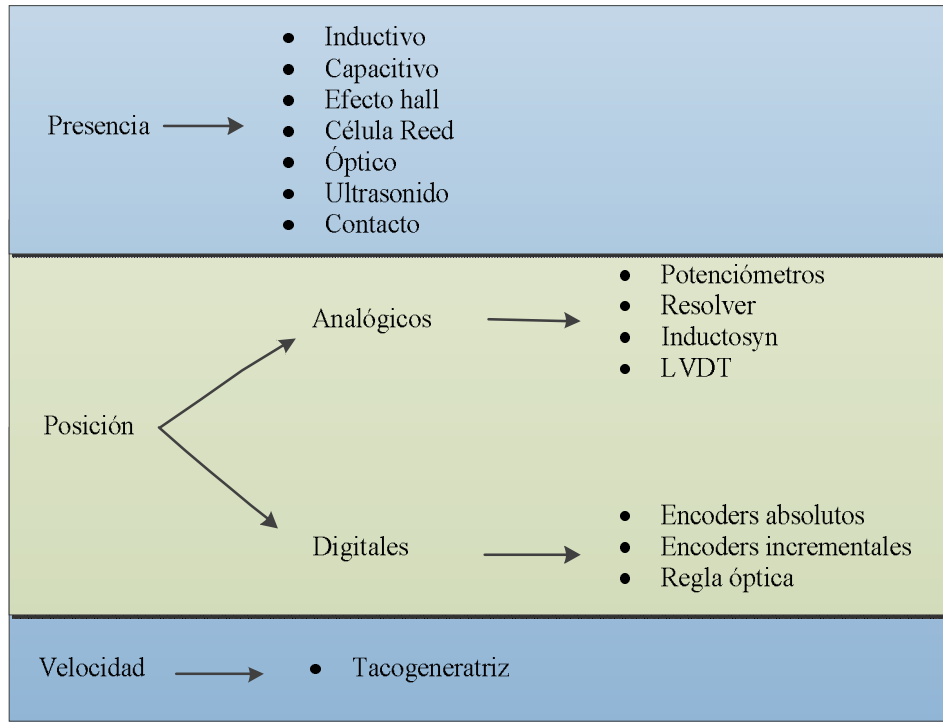


Tabla 2.2 Principales sensores internos utilizados en robótica. [3]

Sensores para medir la posición angular de una flecha

Existen distintos tipos de dispositivos para poder realizar la medición de la posición angular de una flecha o un elemento rotatorio [11], [12], [13]:

Potenciómetro

Es un resistor cuyo valor de resistencia puede ser ajustado. De esta manera, indirectamente, se puede controlar la intensidad de corriente que fluye por un circuito si se conecta en paralelo, o la diferencia de potencial al conectarlo en serie.

Para medir la posición angular, se acoplan a un eje de rotación, de manera que se pueda obtener una señal analógica (voltaje) proporcional al giro del motor.

Potenciómetro de precisión multivoltas

Para un ajuste fino de la resistencia existen potenciómetros multivuelta, en los que el cursor va unido a un tornillo desmultiplicador, de modo que para completar el recorrido necesita varias vueltas del órgano de mando. Esto les proporciona mayor resolución. Son lineales en casi todo su recorrido y proporcionan una señal de salida con muy poco ruido.

Codificador rotatorio (Encoder)

Incremental

Cuentan simplemente el paso de una división del círculo y entregan salidas pulsantes que permiten almacenar la cuenta y conocer el sentido de rotación. Este método es conocido como sistema de salida "A Quad B". Los encoder incrementales producen estas salidas a partir de dispositivos fotoeléctricos.

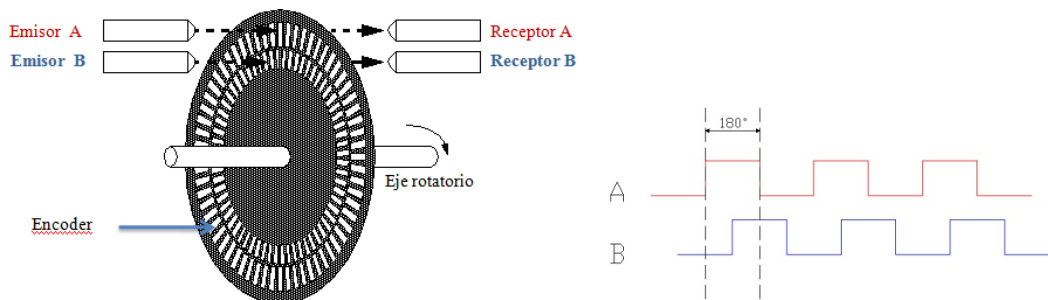


Figura 2.7 Encoder y su salida digital

Fuente: página electrónica <<http://www.romanblack.com/trackball.htm>>

Absoluto

Proporcionan una salida digital paralelo que es generada por un patrón situado sobre un disco rotativo acoplado al eje. Los sensores empleados en este caso pueden ser contactos eléctricos o un sistema fotoeléctrico. Pueden utilizarse diversos códigos, siendo el binario y el Gray los más corrientes y es posible alcanzar resoluciones y precisiones muy altas, del orden de 16 bits (20 segundos de arco) y superiores.

Resolver

Un resolver es un transductor de tipo eléctrico que se utiliza para medir grados de rotación. Formado de un par de bobinas que se excitan con una señal externa. Las bobinas están colocadas en posiciones ubicadas 90° entre sí, de modo que, según su orientación, captan con distinta intensidad la señal de corriente alterna (CA) aplicada a una bobina móvil o rotor.

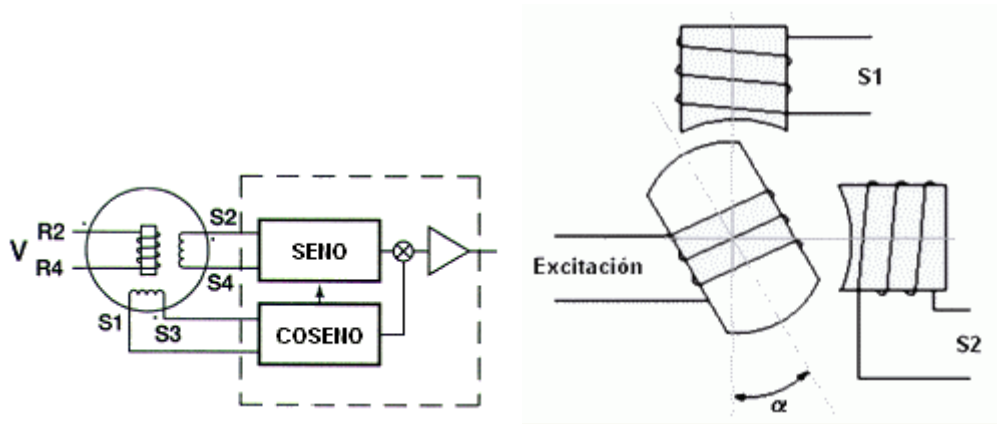


Figura 2.8 Configuración del resolver

Fuente: página electrónica <http://axxon.com.ar/rob/MotorCC_circuitosrealimentados.htm>

Esta configuración da como resultado salidas seno y coseno que tienen una relación con el ángulo en que está el eje de rotación del resolver con respecto a la señal de CA. Es necesario convertir las señales analógicas a digitales por medio de un convertidor resolver / digital.

2.5.3.- Elementos de un sistema de control teleoperado

En un sistema de control teleoperado un operador proporciona comandos hacia un dispositivo remoto el cual ejecuta las órdenes recibidas y genera información tanto de su estado como de su entorno. Esta información es retroalimentada hacia el operador para cerrar el lazo de control. Dentro del ciclo existen diversos elementos cuyas funciones forman el sistema de control teleoperado. [14]. **Figura 2.9.**

Un sistema de este tipo se puede dividir básicamente en tres:

- Zona local
- Zona remota
- Canal de comunicación

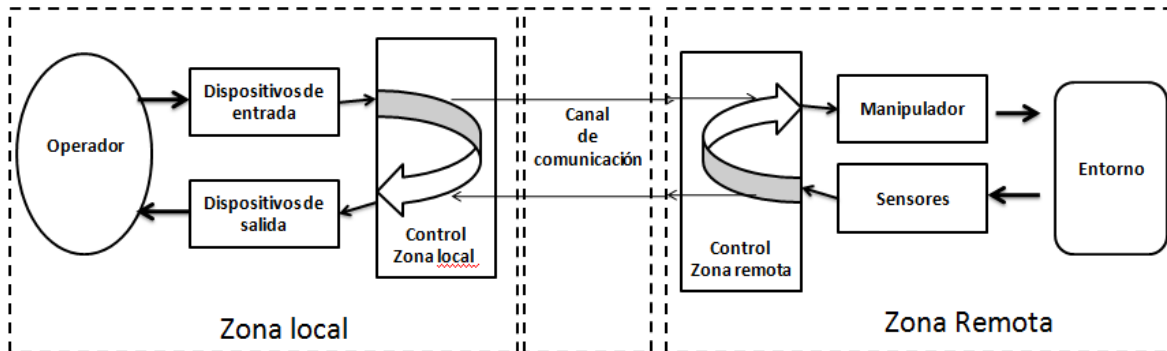


Figura 2.9 Elementos de un sistema de control teleoperado

Zona local

En la zona local se encuentra el operador, que se encarga de controlar las tareas ejecutadas en la zona remota. Cuenta con dispositivos de entrada que le permitan manipular o enviar las ordenes. También se le proporcionan dispositivos de salida o de retroalimentación por medio del cual obtiene información acerca de lo que sucede en la zona remota. Puede existir un lazo de control local que auxilie al operador para lograr una mejor manipulación en la zona remota o para mejorar el funcionamiento en la zona local por ejemplo por cuestiones de retardo en la comunicación.

Operador

Es la persona encargada de realizar la tarea desde la zona local. Dependiendo de la aplicación puede realizar un control absoluto, es decir controlar cualquier movimiento del sistema remoto desde la zona local, enviar simplemente órdenes o un control compartido entre la zona local y la remota.

Dispositivos de entrada

Son aquellos dispositivos que permiten al operador capturar o generar los comandos, para así transmitirlos hacia el manipulador en la zona remota. Existe una gran variedad de dispositivos capaces de realizar esta función, como lo son joysticks, manipuladores maestros, teclados, pantallas táctiles, pedales, etc.

Dispositivos de salida

Estos dispositivos son aquellos que se encargan de presentarle al operador cualquier tipo de información relacionada con el desempeño y desarrollo de la tarea que se está realizando en el entorno remoto. Es indispensable que el operador pueda ver lo que esta haciendo, así que en aplicaciones donde la zona local está muy alejada de la zona remota, un monitor presenta imágenes del entorno de trabajo. En casos donde exista retroalimentación de fuerza, actuadores como motores pueden proporcionar la fuerza proporcional de contacto a la que el robot siente en la zona remota. También es posible el uso de altavoces para emitir información auditiva.

Control de la zona local

Este control forma un lazo cerrado local para mejorar la calidad de la operación, desempeño o combatir adversidades propias, como lo son los retardos en la comunicación. Es un control local el cual puede presentar ayuda al operador como displays predictivos o simulaciones en las cuales el operador tenga conocimiento del comportamiento del manipulador ante comandos que aún no se llevan a cabo. También pueden ayudar a mejorar la tarea presentando por ejemplo, fuerzas que impidan salir de una trayectoria o que indiquen un obstáculo, etc.

Zona remota

Es el entorno remoto en el cual se ubica el robot esclavo encargado de ejecutar las tareas. El entorno de trabajo de un robot utilizado como manipulador teleoperado no está estructurado, es variable y puede ser incluso desconocido. Es por eso que sus movimientos no necesitan ser necesariamente muy precisos en algunas aplicaciones, ya que el operador al cerrar el lazo de control realizará las correcciones necesarias.

Robot

Es el dispositivo a través del cual se llevan a cabo las tareas en el entorno remoto y es controlado por el operador desde la zona local. Puede ser un manipulador o un vehículo.

Sensores

Son los dispositivos cuya función es adquirir la información tanto del estado del robot esclavo, como del entorno y la tarea realizada. Esta información es utilizada en el control remoto y además transmitida hacia la zona local para ser utilizada por el control local y por el operador.

Entorno

Es el área que circunda al robot esclavo y en el cual se lleva a cabo la tarea. Puede ser hostil, variante y desconocida, precisamente por lo cual es necesario aplicar la teleoperación, ya que la automatización puede ser extremadamente difícil de lograr.

Canal de comunicación

Es el medio a través del cual se transmiten los comandos enviados desde la zona local a la zona remota y la información del robot o del entorno de la zona remota a la zona local. Se puede implementar de diversas maneras, como por ejemplo, a través de Internet, ondas de radio, eléctricamente, fibras ópticas, etc. Cualquiera de estos medios posee un ancho de banda, es decir la cantidad de información que pueden manejar y un retardo temporal al enviar la información de una zona a otra.

2.5.4.- Tipos de control teleoperado

Control bilateral

Existe un lazo cerrado de traspaso de información. Además de que el maestro genere las referencias para mover el sistema esclavo, el esclavo también transmite cierta información hacia el maestro.

Por ejemplo la retroalimentación de esfuerzos al operador. El sistema convierte la fuerza de contacto del esclavo en una fuerza aplicada sobre el operador. El principal problema a resolver en estos casos, es que se debe de transmitir la información de la fuerza en un medio de comunicación con ciertos retardos.

La retroalimentación de esfuerzos al operador permite disminuir las fuerzas de contacto entre el esclavo y el entorno, se disminuye el número de errores del operador al manipular desde la zona local y por lo tanto se logra realizar la tarea en un menor tiempo. La reflexión de esfuerzos a las articulaciones del manipulador maestro permite acoplar el operador kinestésicamente al entorno,

sin embargo cuando existen retardos en la comunicación como en el caso de la realimentación de esfuerzos puede afectar de forma negativa a la teleoperación.

Existen además otros tipos de control teleoperado, los cuales no se abordarán en este trabajo:

- Control unilateral
- Control coordinado
- Control supervisado

2.5.5.- Amplificador operacional

El amplificador operacional es un circuito electrónico, normalmente en forma de circuito integrado. **Figura 2.10.** Está diseñado para sensar la diferencia entre los voltajes aplicados a sus dos terminales de entrada y multiplicarla por una ganancia, resultando en el voltaje que aparece en la terminal de salida. [15]

$$V_o = A(vp - vn)$$

Donde:

A \Rightarrow ganancia de lazo abierto

vp \Rightarrow voltaje de la terminal de signo positivo

vn \Rightarrow voltaje de la terminal de signo negativo

V_o \Rightarrow voltaje de salida del amplificador

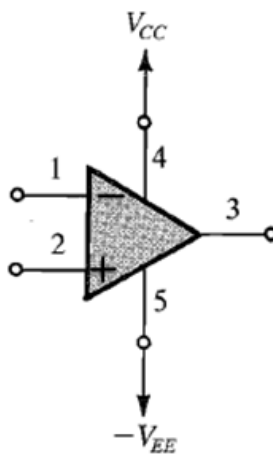


Figura 2.10 Esquema de un amplificador operacional

En el amplificador operacional ideal no hay paso de corriente en ninguna de sus terminales de entrada, es decir *la impedancia de entrada del amplificador operacional ideal es supuestamente infinita.*

La terminal de salida funciona como una fuente ideal de voltaje. Es decir, que el voltaje entre esta terminal y tierra siempre será igual a $A(vp-vn)$, independientemente de la corriente que suministre hacia la carga conectada a la salida. Por lo tanto se puede decir que la *impedancia de salida de un amplificador operacional es supuestamente igual a cero*.

Una característica importante de los amplificadores operacionales es que son amplificadores de DC o de acoplamiento directo, es decir pueden amplificar señales de frecuencia tan baja como cero. Hablando de ancho de banda, el amplificador operacional ideal puede amplificar señales desde frecuencia cero hasta infinita. Es decir tienen un *ancho de banda infinito*.

A la ganancia A , se le llama *ganancia diferencial* o *ganancia de lazo abierto*. Pero cabe mencionar que un amplificador operacional casi nunca se utiliza con sus terminales en lazo abierto.

La ganancia de lazo cerrado se logra al retroalimentar la salida hacia una de las terminales de entrada de múltiples maneras según la aplicación. Esta ganancia está definida por:

$$G = \frac{V_o}{V_i}$$

Donde:

$G \Rightarrow$ ganancia de lazo cerrado

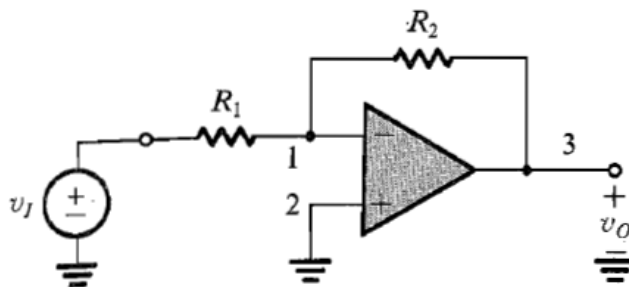
$V_o \Rightarrow$ voltaje de salida

$V_i \Rightarrow$ voltaje de entrada

Algunas de las configuraciones más utilizadas son las siguientes:

Configuración inversora

Esta configuración tiene una ganancia negativa y una relación de amplificación que depende de los valores de las resistencias R_1 y R_2 . **Figura 2.11**.



$$V_o = -\frac{R_2}{R_1} V_i$$

Figura 2.11 Amplificador operacional en configuración inversora

Configuración no inversora

La ganancia para esta configuración es positiva y depende de los valores seleccionados para las resistencias R_1 y R_2 . **Figura 2.12.**

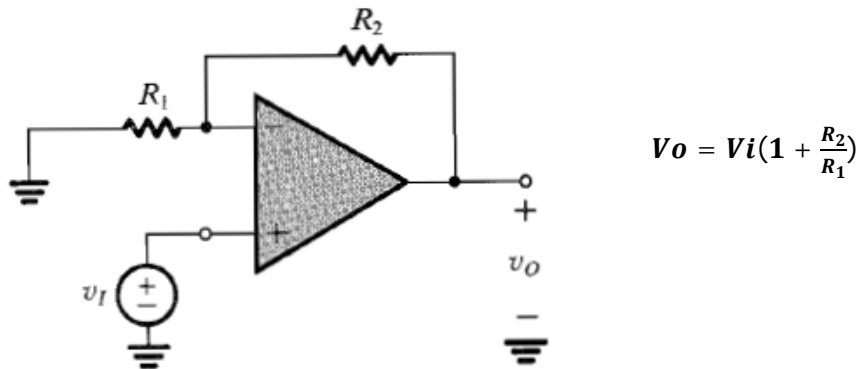


Figura 2.12 Amplificador operacional en configuración no inversora

La ganancia para esta configuración es positiva y depende de los valores seleccionados para las resistencias.

Seguidor de voltaje

Este circuito utiliza la propiedad de alta impedancia de entrada para conectar una carga de baja impedancia. Se utiliza en diversas aplicaciones donde no se necesita ganancia de voltaje, más bien como un transformador de impedancia o como amplificador de potencia. **Figura 2.13.** La configuración como seguidor de voltaje posee una ganancia unitaria, es decir $V_o = V_i$

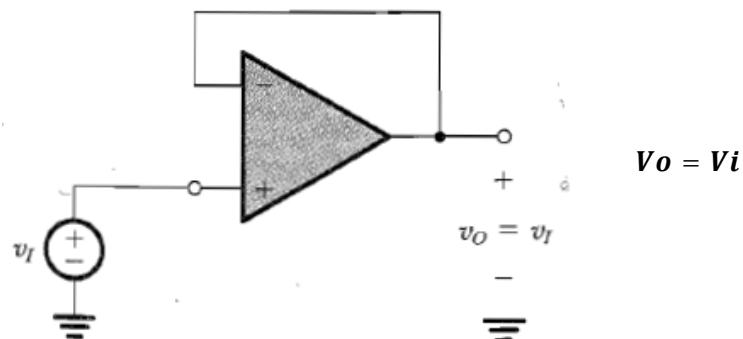


Figura 2.13 Seguidor de voltaje

2.5.6.- Etapas de potencia

Las señales de salida que proporciona un sistema de control, por lo general están limitadas en la intensidad de corriente que pueden proporcionar. Esto quiere decir que transfieren potencias muy bajas a las cargas conectadas a la salida. En aplicaciones de robótica los motores eléctricos que se utilizan pueden demandar intensidades de corriente que superan a las que el sistema de control puede proporcionar, teniendo como resultado un funcionamiento inadecuado así como el riesgo de dañar el equipo. Para solucionar esto se utilizan las etapas de salida, cuyo objetivo es entregar la suficiente potencia a la carga de manera eficiente. Esto implica que la cantidad de potencia disipada en los transistores de salida debe ser la menor posible. [15]

Las etapas de potencia de salida se clasifican de acuerdo a la forma de onda de la corriente de colector al aplicarle una señal de entrada, por ejemplo, una señal sinusoidal.

Etapa clase A

El circuito de una etapa clase A está diseñado para polarizar o situar la señal de salida en un punto de operación de corriente directa I_C mucho mayor a la amplitud de corriente de la señal de entrada. El transistor de salida conduce corriente para el ciclo entero de la señal de entrada, por lo que tiene la capacidad de responder a señales de cualquier polaridad. Su principal desventaja es que aún con señal de entrada nula, disipa una cantidad considerable de potencia. **Figura 2.14.**

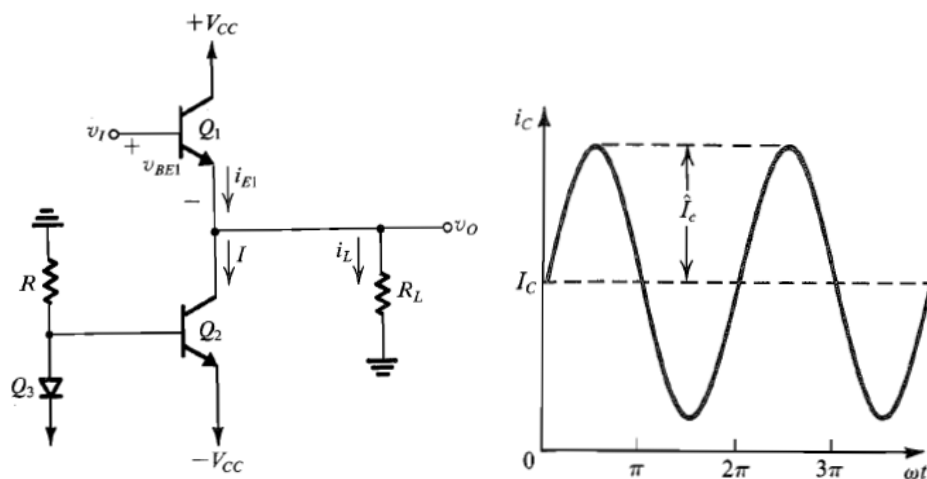


Figura 2.14 Etapa de potencia clase A

Etapa clase B

El punto de operación de esta etapa de potencia está localizado en el origen, por lo tanto el transistor de salida de una etapa clase B conduce solamente para la mitad del ciclo de la señal de entrada. Para corregir esto, se utiliza un segundo transistor que conduzca cuando la señal de entrada se encuentre en el ciclo negativo. En esta etapa no se produce disipación de potencia cuando la señal de entrada es nula. Existe una zona muerta cercana a cero, es decir, cuando la señal de entrada es muy pequeña, con valores muy cercanos a cero, no hay conducción y esto puede representar un problema según la aplicación, ya que se presenta una distorsión en la señal. **Figura 2.15.**

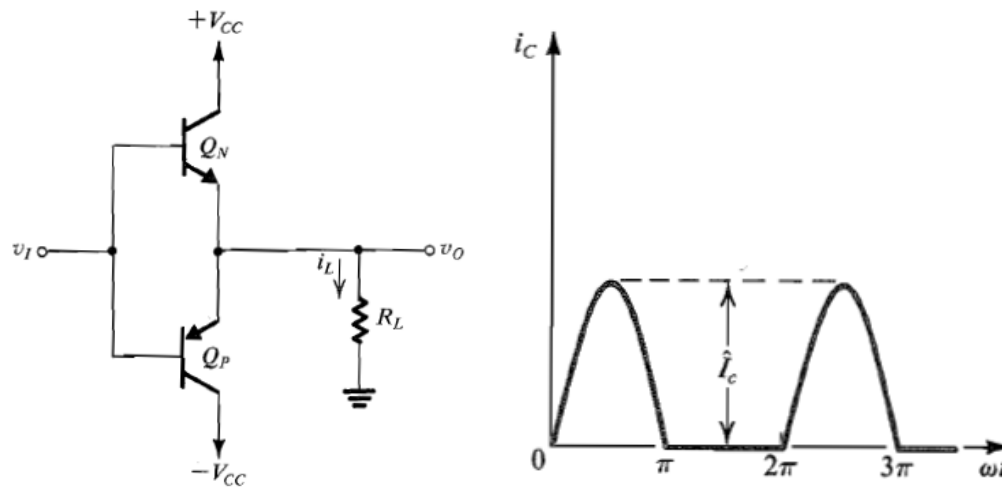


Figura 2.15 Etapa de potencia clase B

Etapa clase AB

Es una aproximación entre las clase A y B. Esta etapa sitúa el punto de operación del transistor en una zona de corriente cercana a cero y mucho menor al pico de corriente de la señal de entrada. Como resultado el transistor conduce en un intervalo un poco mayor a la mitad del ciclo de la señal de entrada. De igual manera que en la clase B, se utiliza otro transistor para que conduzca donde el otro no lo puede hacer. En intervalos cercanos a cero, los dos transistores conducen. Se sacrifica un poco de mayor disipación de potencia por un mejor funcionamiento en la zona muerta. **Figura 2.16.**

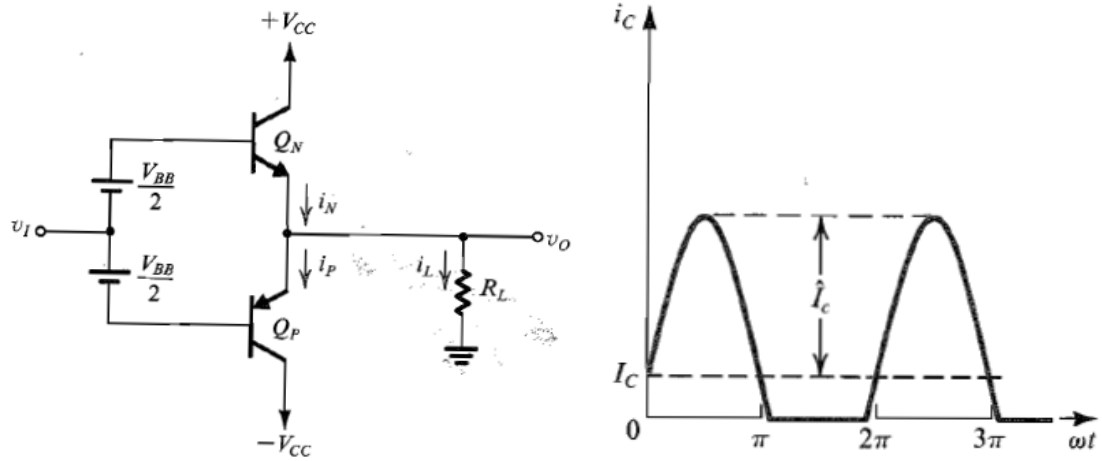


Figura 2.16 Etapa de potencia clase AB

Etapa clase C

El transistor conduce solamente durante un intervalo más pequeño que el de la mitad de un ciclo. Como resultado se obtiene una especie de forma de corriente pulsante. Para lograr obtener la forma sinusoidal completa, la corriente se hace pasar a través de un circuito LC paralelo, sintonizado a la frecuencia de la señal de entrada. Este circuito actúa como filtro paso banda y proporciona una señal de voltaje de salida proporcional a la amplitud de la componente fundamental de la serie de Fourier que representa a la señal de corriente. **Figura 2.17.**

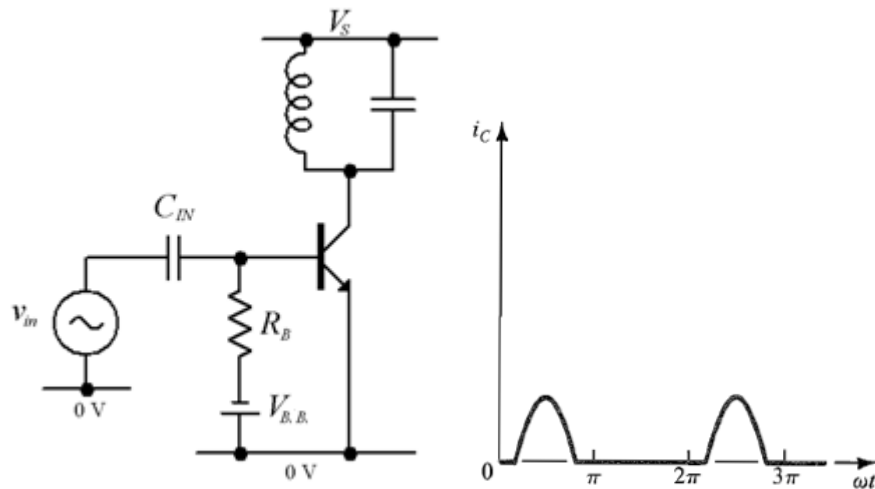


Figura 2.17 Etapa de potencia clase C

3.- Diseño conceptual

En este trabajo se utilizó una metodología de diseño y desarrollo de nuevos productos para poder generar el concepto de los robots que forman el sistema maestro – esclavo. [16]

La metodología utilizada consta de varios pasos, los cuales se presentan a continuación:

1. *La misión del proyecto*
2. *Identificación e interpretación de necesidades.*
3. *Jerarquización de las necesidades.*
4. *Lista de especificaciones del sistema.*
5. *Diagrama funcional y árbol de clasificación de conceptos*
6. *Morfología del sistema*
7. *Selección de concepto*
8. *Selección de elementos principales, materiales, sensores de posición y actuadores.*

3.1.- Misión del proyecto

La **Tabla 3.1** muestra la misión del proyecto, constituida por una breve descripción, la propuesta de valor y algunas suposiciones y restricciones.

Descripción del proyecto	<ul style="list-style-type: none">• Control de los movimientos del robot esclavo a partir del movimiento manual del robot maestro• Retroalimentación de la fuerza percibida en el esclavo hacia el robot maestro
Propuesta de valor	<ul style="list-style-type: none">• Diseño y construcción de los robots con 2 grados de libertad• Diseño y construcción de pinzas mecánicas como elementos terminales para tomar objetos• Control del seguimiento con retroalimentación de fuerza
Suposiciones y restricciones	<ul style="list-style-type: none">• Fines didácticos• Facilidad para transportar• Ligero y de dimensiones pequeñas• Manufactura simple• Fácil de usar

Tabla 3.1 Misión del proyecto

3.2.- Interpretación de las necesidades del usuario

Tomando en cuenta que el sistema maestro - esclavo que se va a diseñar es para uso por parte de alumnos en un laboratorio. Se identificaron las necesidades principales que éste tendrá para utilizarlo de manera adecuada y se muestran en la **Tabla 3.2**.

Enunciado del alumno	Necesidad interpretada
Que el sistema sea fácil de manejar.	El maestro se mueve de manera manual.
Que el material sea resistente al uso de los alumnos.	El material no sufre daños antes caídas y golpes.
Que sea fácil de transportar de un lugar a otro.	Los robots son de un material ligero.
Que sea fácil de acceder al programa que se utilizó para controlarlo	El programa de control está disponible y con explicaciones sobre su funcionamiento.
Que luzca bien.	El sistema tiene un aspecto atractivo.
Que las partes que se usaron para su construcción sean visibles.	Los elementos que lo constituyen son visibles.
Que sea modular.	Los robots constan de partes sencillas y fáciles de ensamblar
Que no ocupe mucho espacio.	Los robots tienen dimensiones adecuadas para el uso en un salón de clases.
Que ayude a la comprensión de la materia de control automático.	El sistema ayuda a la comprensión de la materia de control automático.
Que despierte el interés de los alumnos.	El funcionamiento es dinámico para que atraiga la atención de los alumnos.

Tabla 3.2 Interpretación de las necesidades de usuario

3.3.- Jerarquización de las necesidades del alumno

Una vez interpretadas las necesidades hacia las características o funciones específicas que tendrá el diseño del sistema, se les asignó un grado de importancia para que de esta manera se tenga más claro a qué aspectos se les debe de tomar más en cuenta o abordar primero al momento de llegar a la generación de conceptos o soluciones. La **Tabla 3.3** muestra la jerarquización de las necesidades.

Nº	Necesidad	Importancia
1	<i>El maestro se mueve de manera manual.</i>	4
2	El material es resistente a las caídas y golpes.	3
3	Los robots son de un material ligero.	3
4	<i>El programa de control está disponible y con explicaciones sobre su funcionamiento.</i>	4
5	El sistema tiene un aspecto atractivo.	1
6	Los elementos que lo constituyen son visibles.	2
7	<i>Los robots constan de partes sencillas y fáciles de ensamblar</i>	5
8	Los robots tienen dimensiones adecuadas para el uso en un salón de clases.	3
9	<i>El sistema ayuda a la comprensión de la materia de control automático.</i>	5
10	El funcionamiento es dinámico para que atraiga la atención de los alumnos.	2

Tabla 3.3 Jerarquización de las necesidades del alumno

Los valores de jerarquización van del 1 al 5. Donde un valor de 5 indica un mayor grado de importancia.

3.4.- Lista de especificaciones

A partir de la lista de necesidades se obtuvieron las especificaciones principales que debe poseer el sistema. A algunas de estas es posible establecerles una métrica. La **Tabla 3.4** muestra la lista de especificaciones.

No. de especificación	No. de necesidad	Descripción	Importancia	Unidades
1	1	Fuerza y torque máximos	4	[N] y [N m]
2	2	Resistencia al impacto	3	[J]
3	3	Peso	3	[kg]
4	4 y 9	Control	4 y 5	Subjetiva
5	5	Estética	1	Subjetiva
6	6	Estructura del sistema	2	[No. de elementos]
7	7	Manufactura y ensamble	5	Subjetiva
8	8	Dimensiones	3	[mm]
9	10	Dinámico	2	No. de grados de libertad

Tabla 3.4 Lista de especificaciones

3.5.- Diagrama funcional

En el diagrama de la **Figura 3.1** se identifican 6 funciones principales que debe de realizar el sistema maestro – esclavo.

1. Producir movimiento en el robot maestro
2. Medir la posición del maestro
3. Medir la posición del esclavo
4. Comunicar maestro y esclavo
5. Transformar energía a movimiento en el esclavo
6. Tomar objetos
7. Transformar energía a fuerza en el maestro

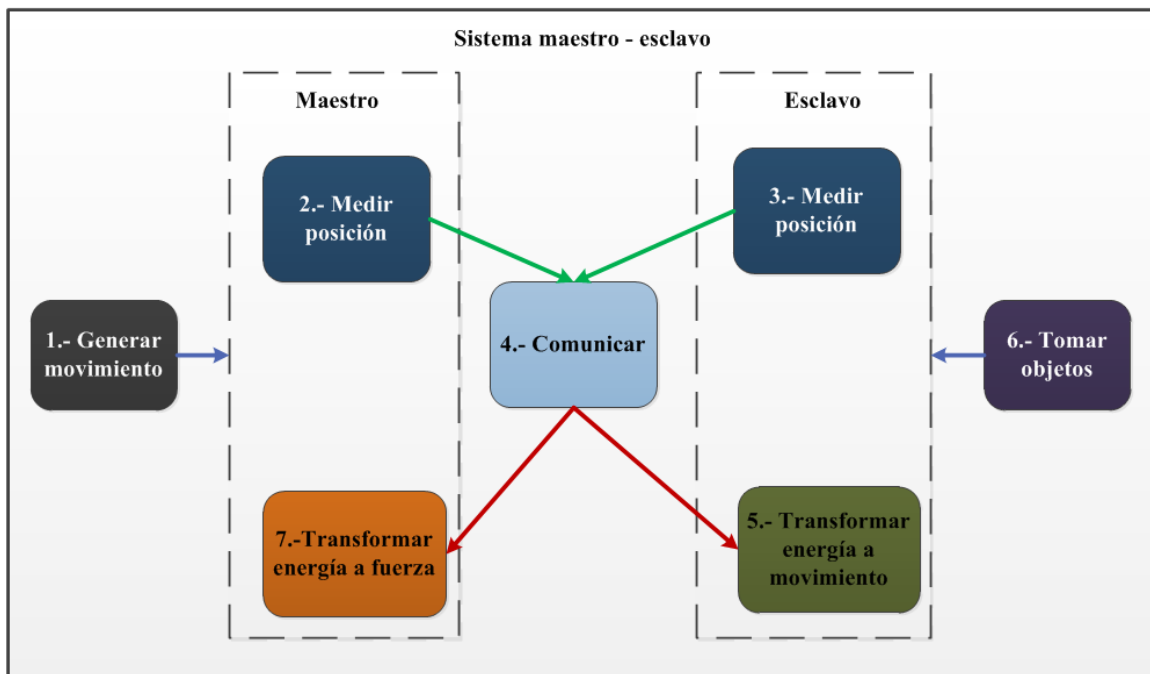


Figura 3.1 Funciones principales del sistema maestro-esclavo

3.6.- *Árbol de clasificación de conceptos*

El árbol de clasificación de la **Figura 3.2** permite visualizar como se van a lograr cumplir o solucionar las funciones principales que requiere el sistema maestro – esclavo que se va a diseñar.

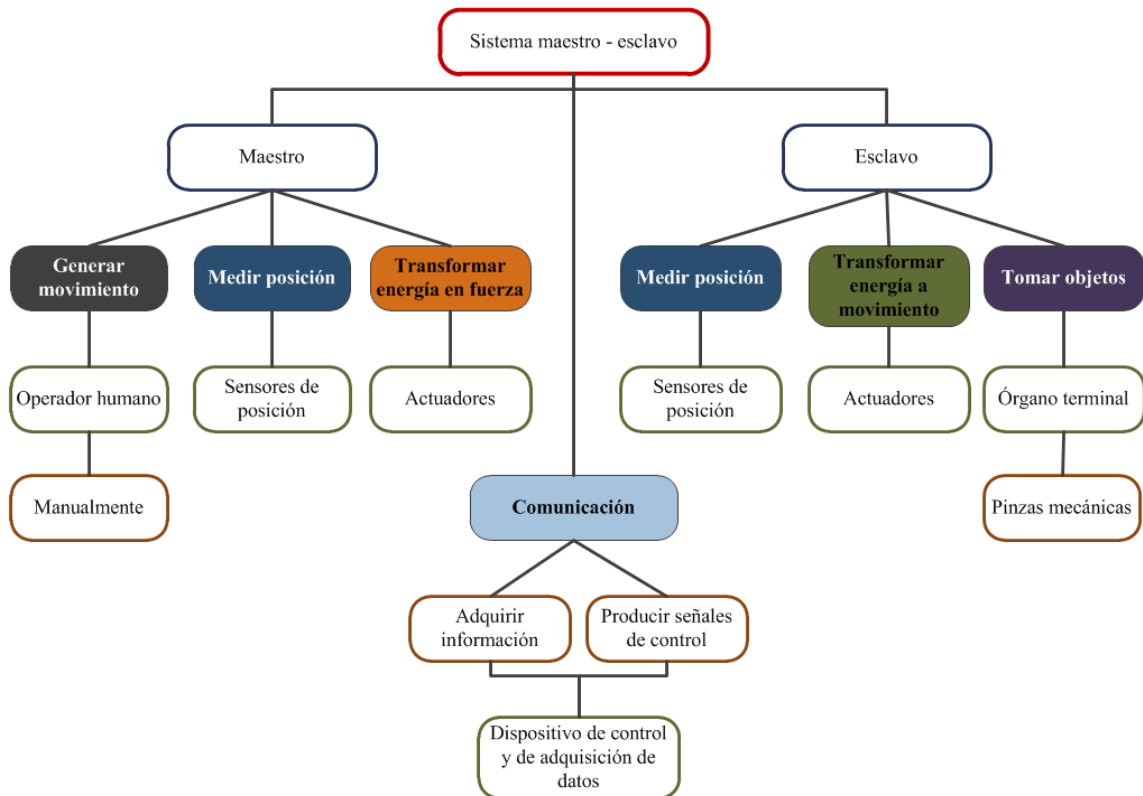


Figura 3.2 *Árbol de clasificación de conceptos*

La selección entre distintos tipos de **sensores de posición** y **actuadores** para el sistema, se presenta más adelante.

3.7.- Morfología del diseño mecánico

La morfología se refiere a las distintas configuraciones que puede tener el sistema mecánico de 2 grados de libertad. En cada configuración que se propone se representa el tipo de movimiento para cada uno de los grados. El primer grado se define por el nombre de *base* y el segundo grado como *brazo*. El órgano terminal como ya se mencionó anteriormente consiste en una *pinza* mecánica con la cual se tomarán objetos.

Primera configuración

La primera configuración se representa en la *Figura3.3*. Se muestra la vista sobre el plano XY y se puede apreciar que cuenta con un grado de libertad que permite desplazamiento lineal de la base sobre el eje Y. El brazo además posee un movimiento rotacional de 180 grados sobre el eje Z.

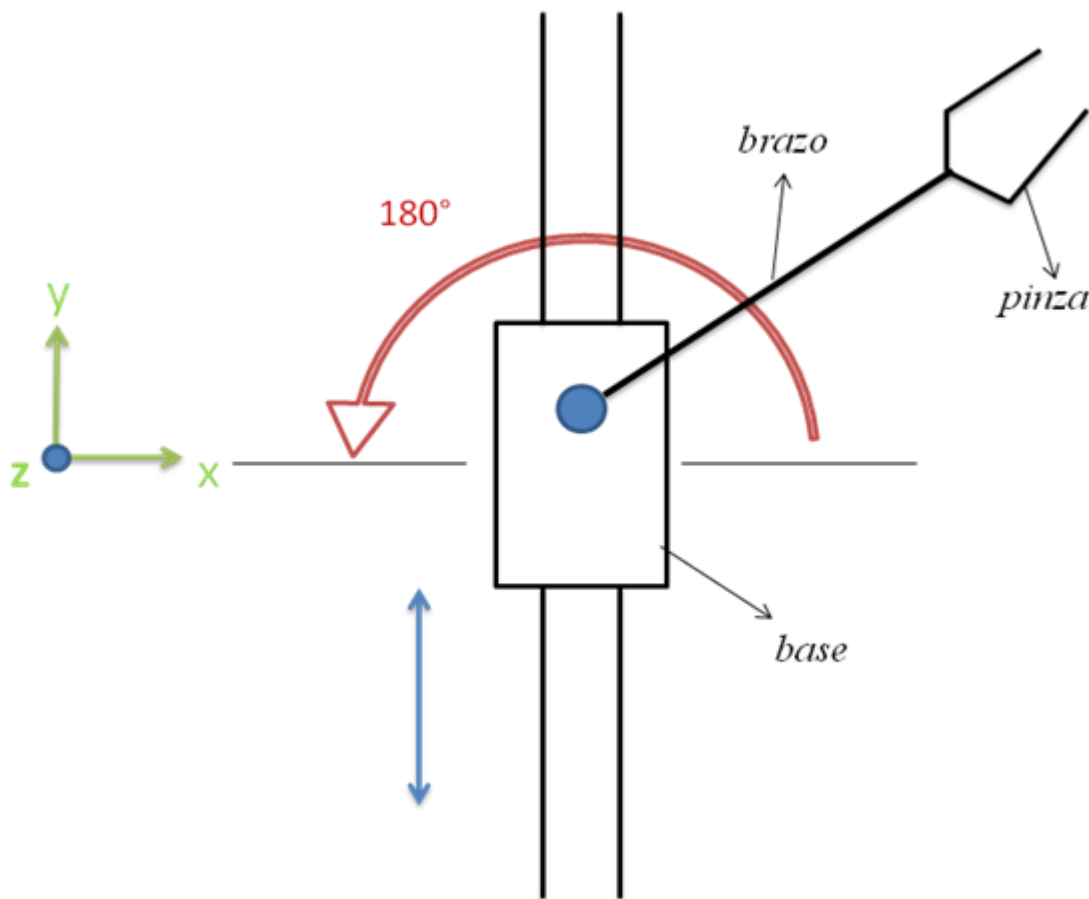


Figura 3.3 Primera configuración propuesta

Segunda configuración

La **Figura 3.4** corresponde a la segunda configuración propuesta. Al igual que la primera se muestra la vista sobre el plano XY, pero en esta ocasión el desplazamiento lineal de la base es sobre el eje X. El brazo mantiene un movimiento rotatorio de 180° sobre el eje Z.

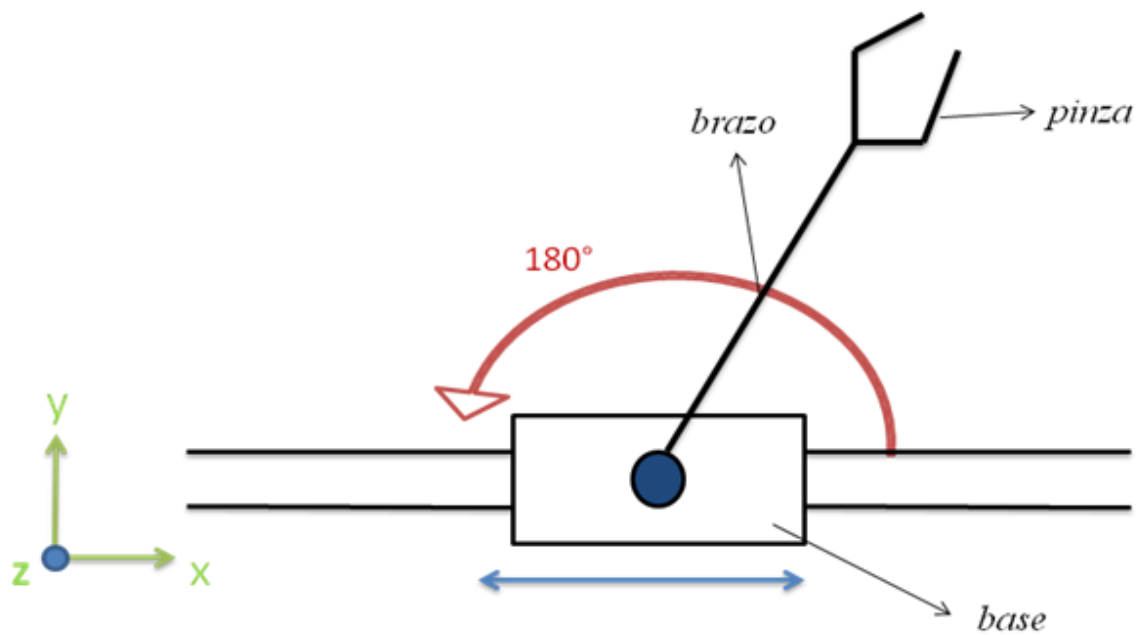


Figura 3.4 Segunda configuración propuesta

Tercera configuración

La **Figura 3.5** representa la tercera propuesta de configuración. Se muestran dos vistas, la del plano XZ, donde se aprecia el desplazamiento lineal de la base sobre el eje X y el plano YZ, donde se muestra el movimiento rotacional del brazo de 180° sobre el eje X.

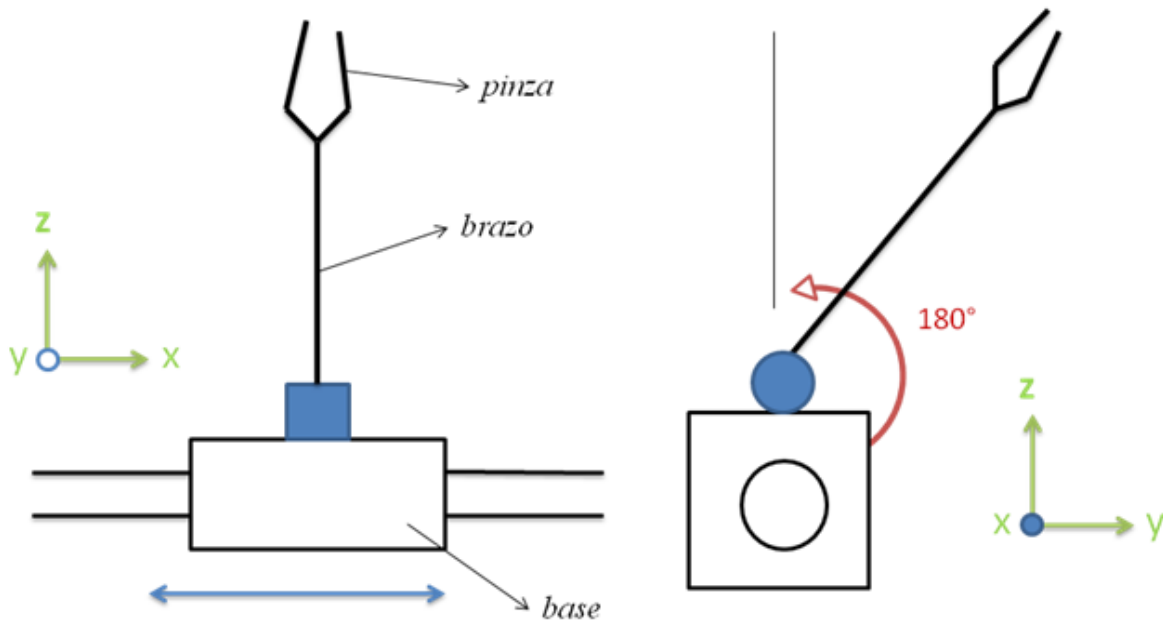


Figura 3.5 Tercera configuración propuesta

Cuarta configuración

La cuarta y última configuración propuesta se representa en la **Figura 3.6**. Por medio de la vista del plano YZ se pueden apreciar dos movimientos rotacionales. El primero sobre el eje Z para mover la base y dirigir el brazo hacia un punto. El segundo sube o baja el brazo junto con el órgano terminal. Ambos giran solamente 180° .

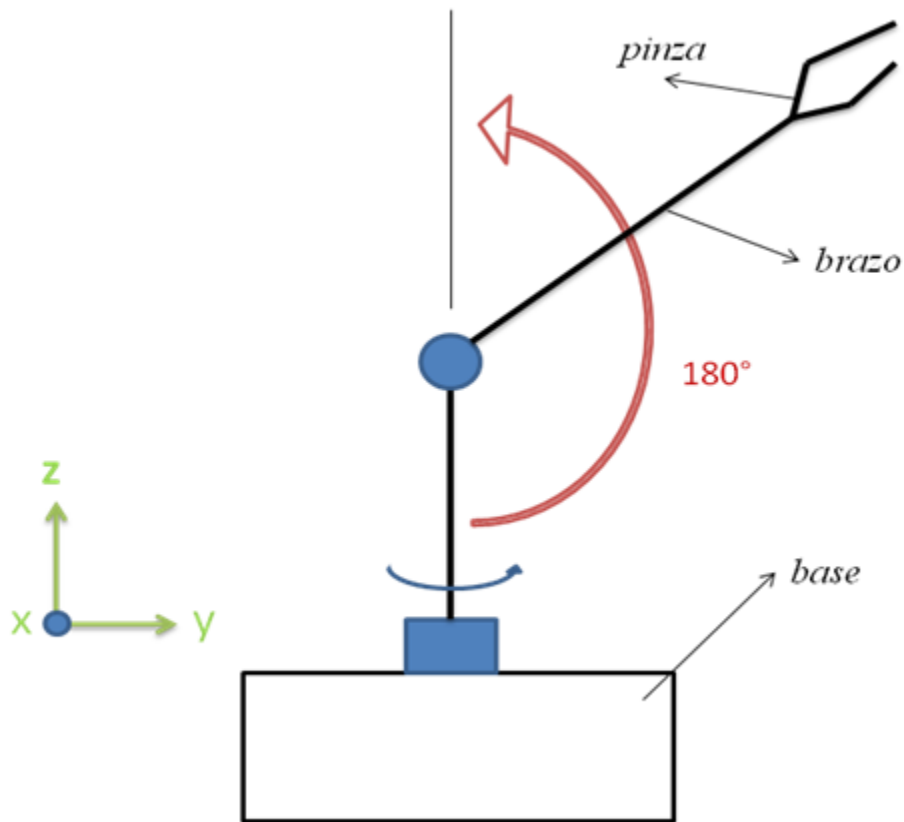


Figura 3.6 Cuarta configuración propuesta

3.8.- Matriz de selección de conceptos

Las tres configuraciones están limitadas en su capacidad de movimiento en el espacio, debido a que solamente poseen dos grados de libertad, pero hay que recordar que el objetivo del proyecto es aplicar el control y la retroalimentación de fuerza. De esta manera se seleccionó la mejor configuración con base en la facilidad de conseguir o manufacturar los elementos para construirla, la simplicidad en éstos, así como también en cuál de ellas se pueden aplicar mejor movimientos que desempeñen algún objetivo en particular.

A continuación se describen las comparaciones entre las características de las distintas configuraciones. Con base en estas se generó la matriz de selección representada en la ***Tabla 3.5***.

- La primera y segunda configuración, son prácticamente iguales, solo varía el eje en el que se mueve linealmente la base.
- La tercera configuración es mejor que las primeras dos debido a que desempeñaría una mejor función al poder subir y bajar el brazo, como por ejemplo, al tomar un objeto y transportarlo linealmente hacia otro lugar. La primera y la segunda necesitarían de un objeto de dimensiones específicas para poder tomarlo.
- Estas tres primeras configuraciones poseen un grado de libertad lineal, por lo que es más costoso y más difícil manufacturar los elementos de transmisión para poder realizar ese movimiento, como lo puede ser el mecanismo piñón – cremallera.
- Implementar los sensores necesarios para poder conocer la posición en cualquier momento en las primeras tres configuraciones sería más complicado que en la cuarta configuración, donde se poseen los dos grados de libertad rotacionales, lo cual permite acoplar sensores, motores y elementos de transmisión más sencillos de conseguir o fáciles de manufacturar.
- La estructura de soporte si sería más resistente en las configuraciones que poseen un grado lineal, pero no es un criterio definitivo, ya que se puede conseguir la resistencia suficiente en la cuarta configuración.

Criterios de selección	Configuraciones			
	A 1° configuración (Referencia)	B 2° configuración	C 3° configuración	D 4° configuración
Facilidad de manufactura de los elementos	=	=	=	+
Costo de los elementos	=	=	=	+
Facilidad de construcción	=	=	+	+
Mejor función	=	=	+	+
Mejor soporte de la estructura	=	=	=	-
Simplicidad de los elementos	=	=	=	+
Suma de +	0	0	2	5
Suma de =	6	6	4	1
Suma de -	0	0	0	0
Evaluación Neta	0	2	2	5
Posición	4	4	2	1
Evaluación	No	No	No	Si

Tabla 3.5 Matriz de selección de conceptos

La configuración seleccionada es la *cuarta*, que posee dos grados de libertad rotacionales.

Figura.3.7

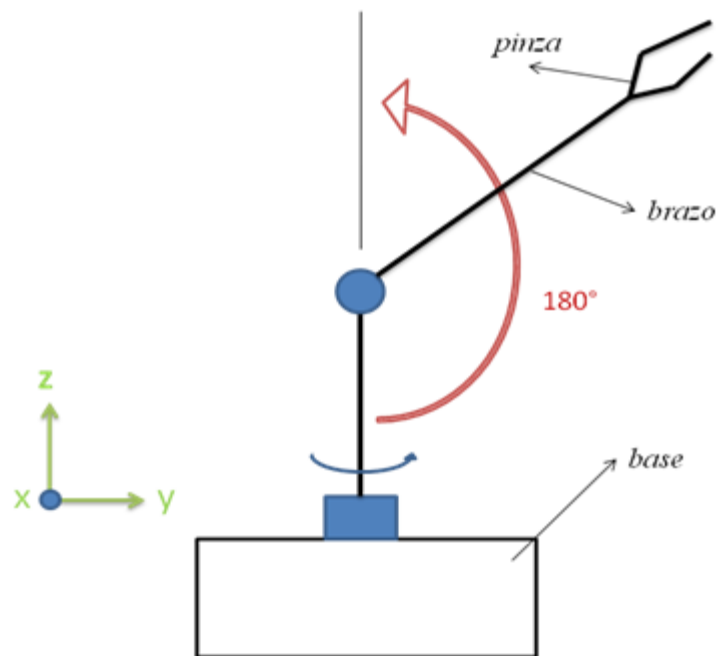


Figura 3.7 Configuración seleccionada

3.9.- Matrices de selección de los elementos principales

Una vez elegido el concepto que se va a diseñar, es necesario hacer una selección de los elementos que lo van a conformar, según las funciones que van a cumplir y las características que se requieren en los dispositivos. Estos elementos principales son:

- Sensores para medir posición angular
- Actuadores
- Materiales

3.9.1.- Selección de sensores de posición angular

Estos sensores se utilizarán para poder monitorear en todo tiempo la posición angular de los eslabones del sistema mecánico, tanto en la parte maestra como en la parte del esclavo. Se han considerado cuatro tipos de sensores que pueden cumplir con esta función:

- Potenciómetro
- Potenciómetro de precisión multivuelta
- Encoder
- Resolver

Se evaluaron los distintos sensores mencionados con base en que se tiene que medir la posición de un eje de rotación con un eslabón acoplado en la ***Tabla 3.6***.

Criterios de selección**	Sensores			
	A Potenciómetro (Referencia)	B Potenciómetro de precisión multivuelta	C Encoder	D Resolver
Resolución	=	+	-	+
Linealidad	=	+	+	+
Desgaste	=	=	+	+
Ruido	=	+	-	+
Fricción	=	+	+	=
Acoplamiento	=	=	+	=
Manejo de señal	=	=	-	-
Velocidad de respuesta	=	=	-	=
Menor costo	=	-	-	-
Facilidad para conseguirlo	=	=	-	-
Suma de +	0	4	4	4
Suma de =	10	5	0	3
Suma de -	0	1	5	3
Evaluación Neta	0	3	-1	1
Posición	3	1	4	2
Evaluación	No	Si	No	No

Tabla 3.6 Selección de sensores

** Se asignó un (+) cuando el criterio afecta menos a la medición y un (-) cuando le afecta más

La evaluación resulta favorable para el potenciómetro de precisión, sobre todo por su manejo de señal, su resolución, linealidad, baja fricción y la facilidad para conseguirlo. Aunque será necesario diseñar un acoplamiento mecánico para poder utilizarlo y poder así medir la posición del movimiento de los eslabones.

3.9.2.- Selección de los actuadores

Se definió anteriormente que a partir de la medición constante de las posiciones angulares tanto en el robot maestro como en el esclavo, se tendrán como resultado acciones de control para actuar sobre los eslabones del esclavo produciendo así su movimiento y conseguir el seguimiento de los movimientos del maestro. De la misma manera actuadores de las mismas características producirán la fuerza retroalimentada en los eslabones del maestro.

Para conseguir esto se consideraron cuatro tipos de motores eléctricos:

- Motor de corriente directa (DC)
- Motor a pasos
- Motorreductor de corriente directa
- Servomotor

En la **Tabla 3.7** se evaluaron los motores mencionados tomando en cuenta los criterios principales como torque, precisión y baja velocidad, entre otras. Los servomotores por ejemplo están limitados en su movimiento, pero esto no es perjudicial para las características del sistema, ya que los eslabones de los robots nunca se mueven más de los 180 grados en ninguno de sus grados de libertad.

Criterios de selección**	Motores eléctricos			
	A Motor DC (Referencia)	B Motor a pasos	C Motorreductor DC	D Servomotor
Par	=	+	+	+
Baja velocidad	=	+	+	+
Precisión de movimiento	=	=	=	+
Resolución de movimiento	=	-	=	+
Facilidad de control	=	-	=	-
Baja Inercia	=	+	+	+
Acoplamiento	=	=	=	=
Menor costo	=	-	-	-
Facilidad para conseguirlo	=	-	=	-
Suma de +	0	3	3	5
Suma de =	9	2	5	1
Suma de -	0	4	1	3
Evaluación Neta	0	-1	2	2
Posición	3	4	1	1
Evaluación	No	No	Si	Si

Tabla 3.7 Selección de motores

De la evaluación resulta que el servomotor y el motorreductor son los que tendrían que ser seleccionados. Cabe mencionar que un servomotor ya posee una reducción, pero a diferencia del motorreductor se controla a través de la modulación de ancho de pulso o PWM, lo cual lo hace más complejo pero a la vez más preciso. En el presente proyecto consideramos buena la opción de seleccionar el servomotor como actuador y posteriormente al diseñar el control, se evaluará si es viable utilizarlo a través de la generación de PWM o simplemente utilizarlo como motorreductor.

3.9.3.- Selección del material de la estructura

Al hablar de la estructura del sistema, hablamos de los eslabones que hay que mover, acoplamientos, las bases donde se fijan los motores y sensores, así como la base que soporta todo el peso. Se tomaron en cuenta los siguientes materiales:

- PVC espumado
- Acrílico
- Aluminio
- Madera

Para seleccionar el material, se tomaron en cuenta criterios como: que sea ligero, fácil de manufacturar y resistente, entre otros. La **Tabla 3.8** muestra la evaluación de los materiales.

Criterios de selección	Materiales			
	A Madera (Referencia)	B Acrílico	C Aluminio	D PVC espumado
Ligero	=	+	+	+
Fácil de manufacturar	=	-	-	+
Resistente al impacto	=	+	+	-
Menor costo	=	-	-	-
Estética	=	+	+	+
Vida útil	=	+	+	=
Suma de +	0	4	4	3
Suma de =	6	0	0	1
Suma de -	0	2	2	2
Evaluación Neta	0	2	2	1
Posición	4	1	1	3
Evaluación	No	Si	Si	No

Tabla 3.8 Selección de materiales

El acrílico y el aluminio fueron seleccionados como las mejores opciones debido a que son materiales ligeros, resistentes al impacto y además proporcionan buena estética al diseño, quizá más el acrílico que el aluminio. Hay que mencionar que los dos necesitan de procesos de manufactura especializados, como los son corte por laser, torneado o fresado. Se consideran viables los dos materiales, según el elemento a diseñar, por ejemplo aluminio para los acoplamientos y acrílico para la estructura, y eslabones.

3.10.- Introducción a los sensores de fuerza

Para implementar la retroalimentación de fuerza del esclavo hacia el maestro, es necesario, según algunas estructuras de control, poder medir el par que están sintiendo las articulaciones del robot esclavo al moverse sus eslabones, por lo cual es necesario algún tipo de sensor que pueda realizar esta función.

Los sensores que existen para medir fuerza, se enfocan más en medirla cuando ésta se aplica a una superficie o para medir el par aplicado a una estructura estática, como por ejemplo la galga extensiométrica. Este tipo de sensor podría funcionar para la pinza mecánica que se utilizará como órgano terminal.

Una opción para conocer el par en las articulaciones es midiendo la corriente de los motores que mueven cada uno de los eslabones. Esta corriente es proporcional al par.

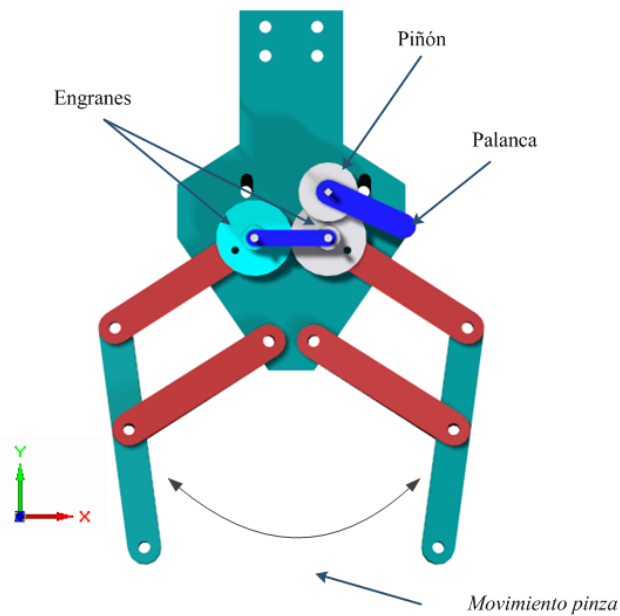
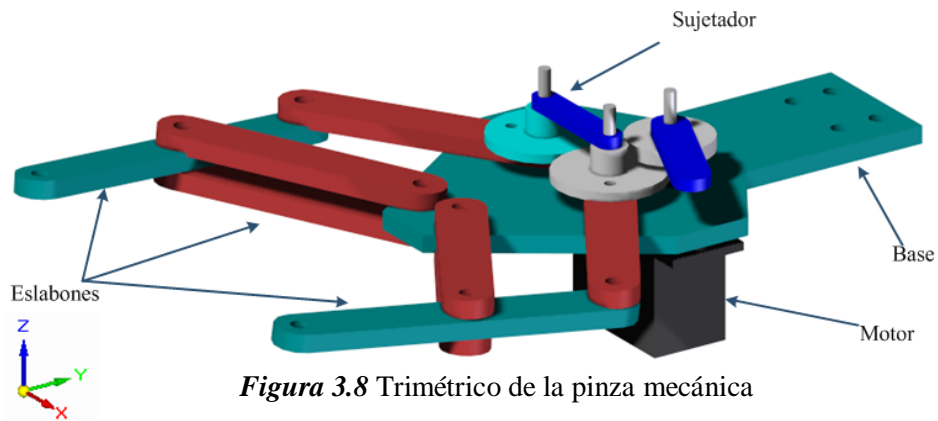
Como el esquema de control a implementar no requiere de mediciones de éste fuerza, en este trabajo no se discute la selección de este tipo de sensores.

3.11.- Propuesta de diseño

Antes de construir los robots, mediante un software de Diseño Asistido por Computadora (CAD) se dibujó cada uno de los elementos y posteriormente se realizó el ensamble, de esta manera se pudo visualizar mejor que apariencia tendría el diseño final del modelo propuesto. El programa utilizado fue Solid Edge ST2.

Pinza mecánica

Se muestran dos perspectivas del modelo de la pinza mecánica en CAD, trimétrico, **Figura 3.8** y vista superior o de planta, **Figura 3.9**. Es posible apreciar la disposición de los elementos que la conforman y el movimiento que está genera.



Robot manipulador

Del robot generado y ensamblado en CAD se muestran 4 perspectivas: Proyección trimétrica, la cual se muestra en la **Figura 3.10**. Proyección en isométrico en la **Figura 3.11**, una proyección de la vista superior o de planta en la **Figura 3.12** donde se aprecia el movimiento del primer grado de libertad, es decir de la *base móvil del robot*. Y finalmente una proyección de la vista lateral **Figura 3.13**, donde es posible apreciar el movimiento del segundo grado de libertad, es decir el del *brazo del robot*.

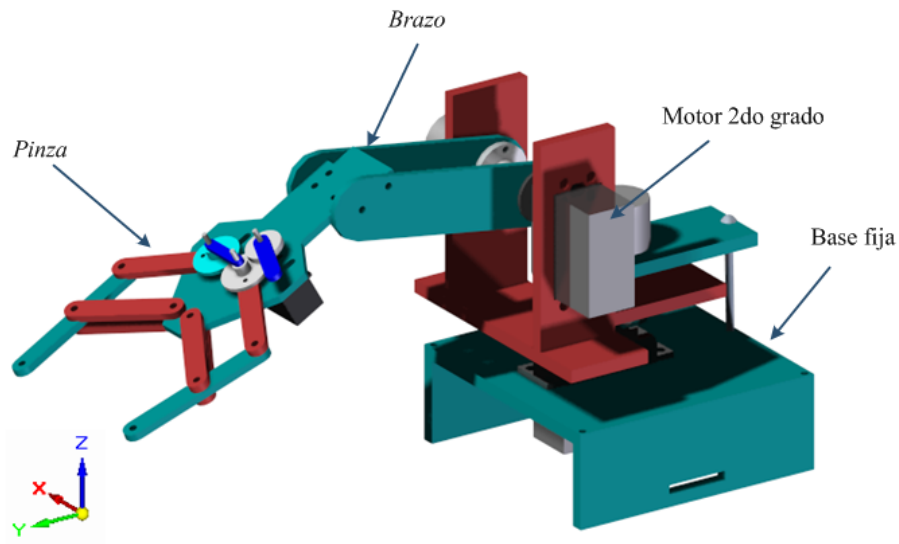


Figura 3.10 Trimétrico del robot manipulador

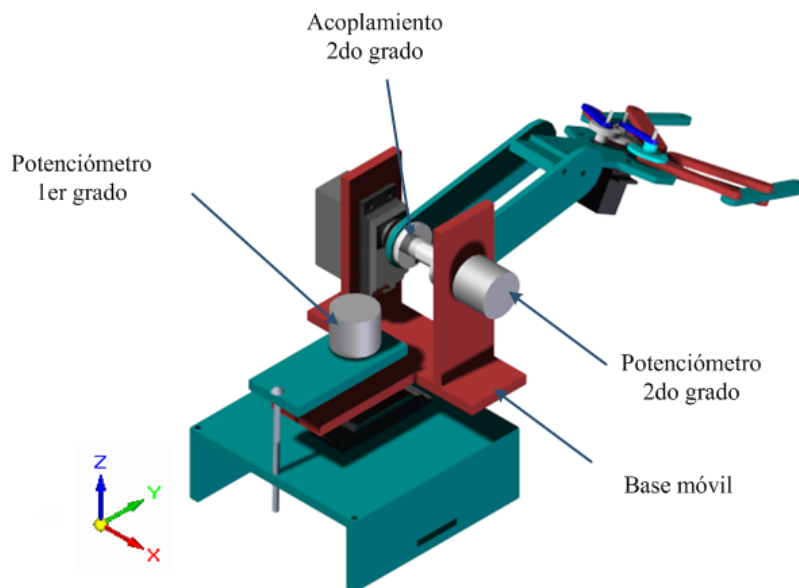


Figura 3.11 Isométrico del robot manipulador

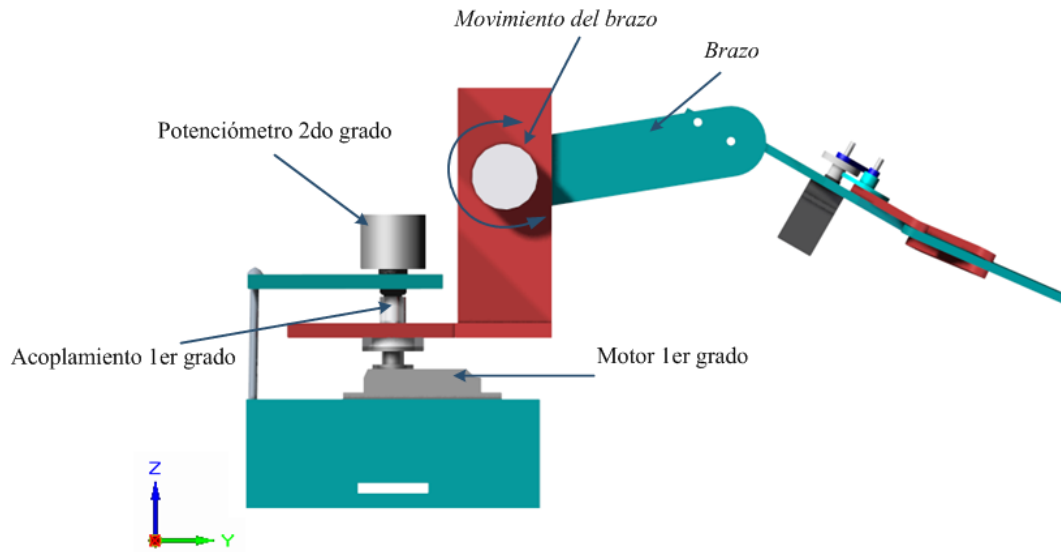


Figura 3.12 Vista lateral del manipulador

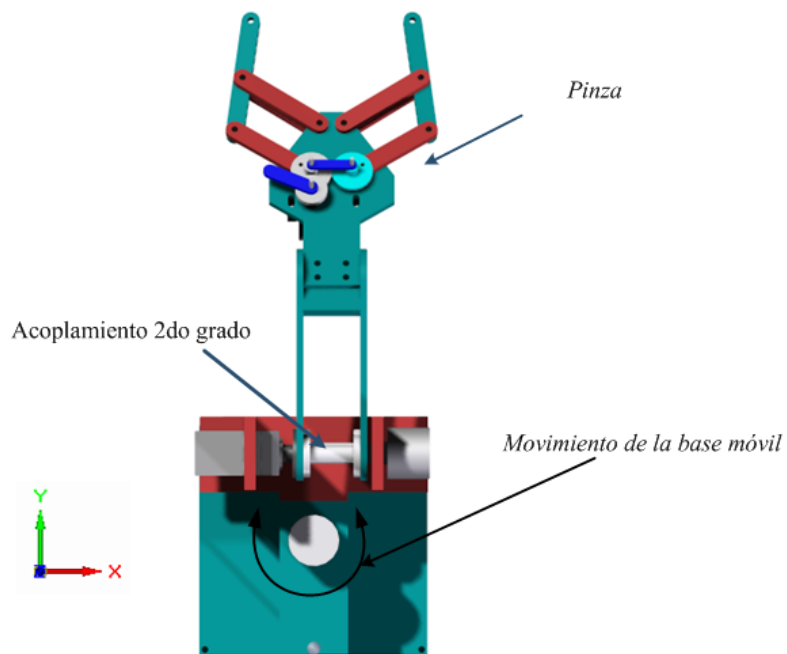


Figura 3.13 Vista de planta del manipulador

Sistema maestro – esclavo

El sistema maestro – esclavo final se muestra en las siguientes proyecciones del diseño en CAD. La **Figura 3.14** muestra a los dos robots montados sobre una base fija, donde se puede apreciar la separación entre ellos mediante una proyección trimétrica. La **Figura 3.15** los muestra en una proyección en isométrico.

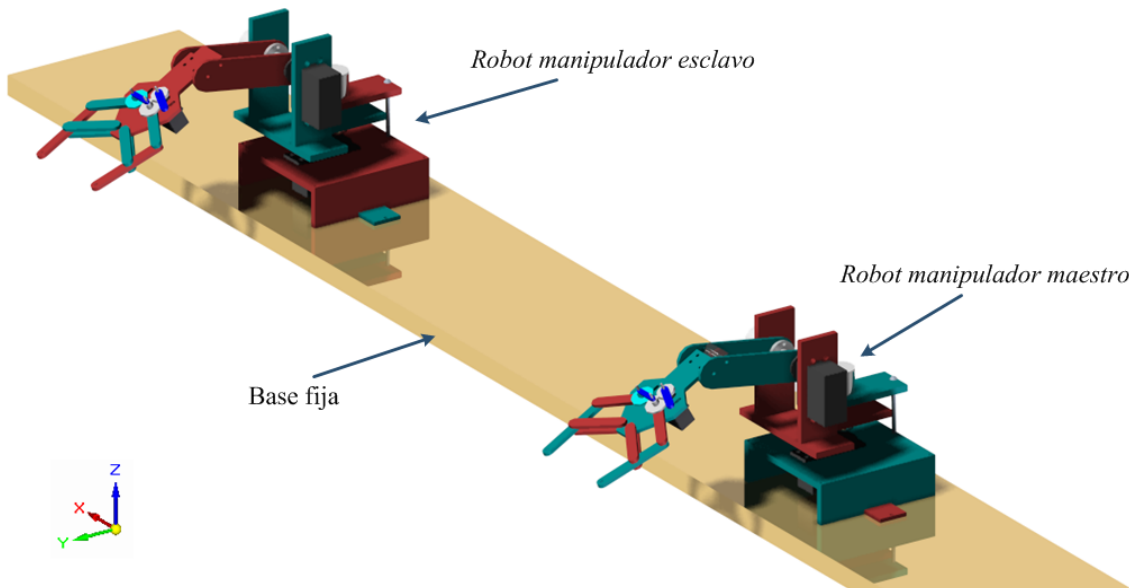


Figura 3.14 Trimétrico de los robots manipuladores

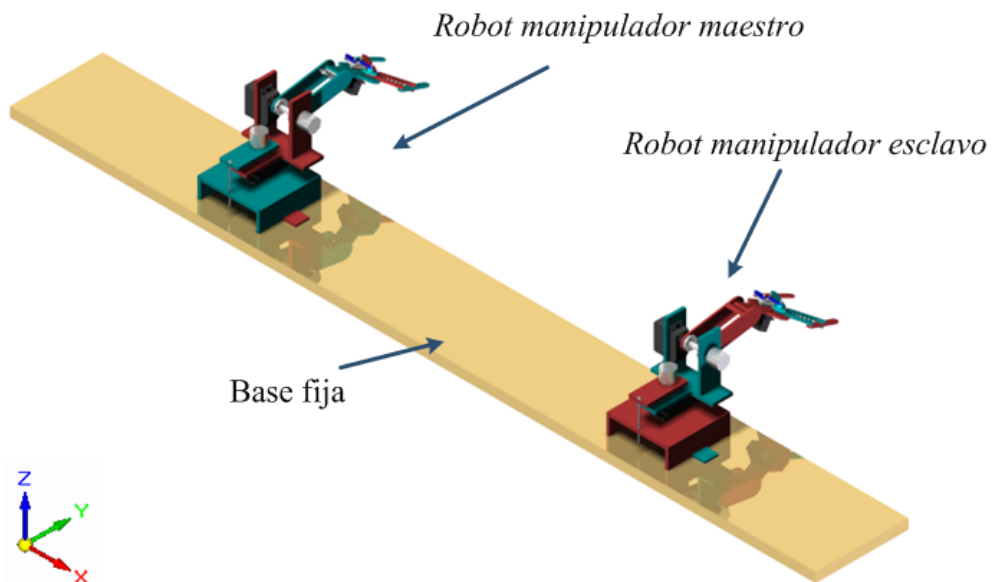


Figura 3.15 Isométrico de los robots manipuladores

4.- Construcción del sistema mecánico

4.1.- Robots

Las piezas principales que forman la estructura de cada uno de los robots fueron hechas de acrílico, siguiendo la selección de material realizada en la etapa de diseño. A partir de las dimensiones logradas en CAD, se manufacturaron mediante corte láser. Estas piezas constituyen las bases, los brazos y las pinzas mecánicas. A continuación se muestran los robots ensamblados.

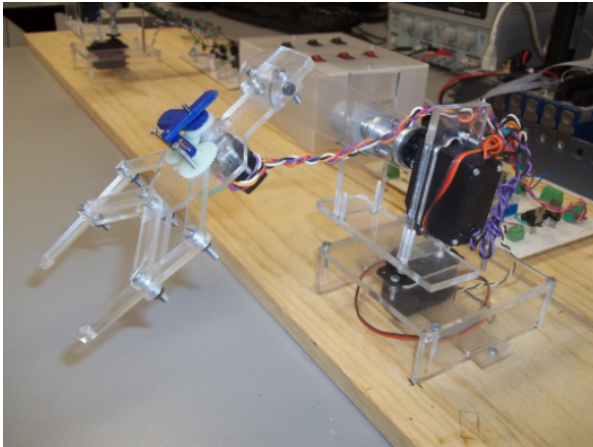


Figura 4.1 Ensamble del robot esclavo

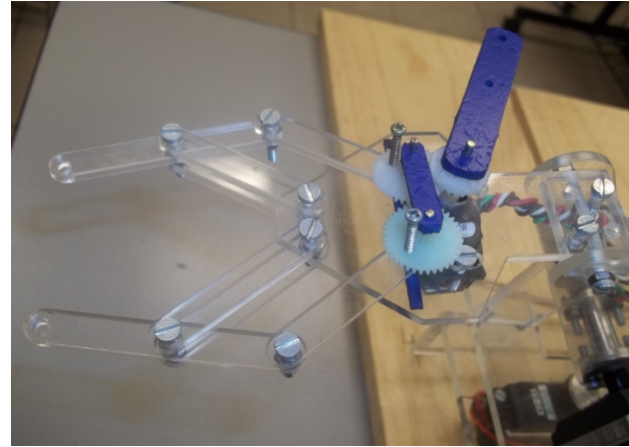


Figura 4.2 Pinza mecánica del robot maestro

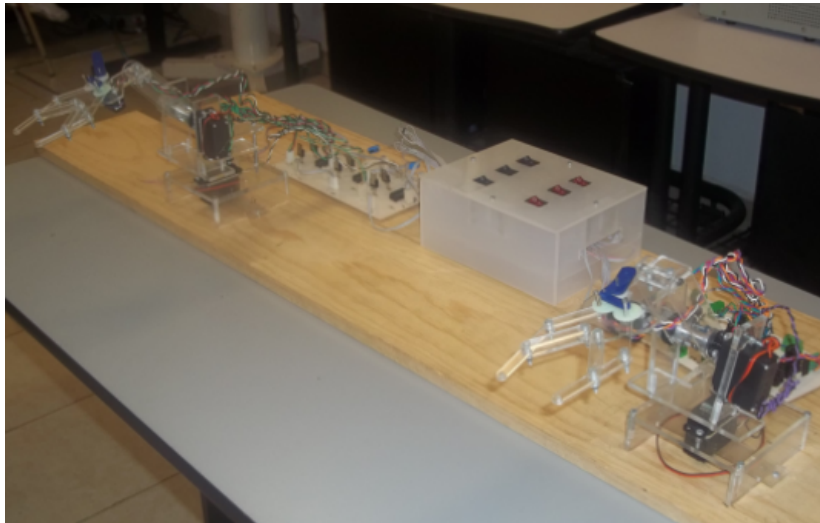


Figura 4.3 Presentación final del sistema maestro - esclavo

4.2.- Motores

Con base en el peso de los eslabones y de las pinzas mecánicas se seleccionaron servomotores adecuados para mover los robots.

La pinza del robot pesa 55 [g], por lo que genera un par de 0.66 [kg.cm] aproximadamente.

Como se mencionó en la etapa de diseño, se utilizan simplemente como motores de DC. En total se utilizan 4.

Las características de los motores son:

- **Marca: VIGOR** **Modelo: VS-2**
A 6.0 [V]:
Par máximo : 5 [kg.cm] (69.44 [oz.in])
Velocidad : 0.17 [s / 60°] sin carga

Ofrecen un par suficiente para poder vencer el generado por la pinza.



Figura 4.4 Servomotor para mover bases y brazos



Figura 4.5 Servomotor ensamblado en la base del motor

Para generar los movimientos de las pinzas se utilizan servomotores más pequeños (mini servomotores). En total se utilizan 2 y al igual que los de los eslabones, como motores de DC.

Las características de los mini servomotres son:

- **Marca: VIGOR** **Modelo: VS-5**
A 6.0 [V]:
Par máximo : 1.2 [kg.cm] (16.66 [oz.in])
Velocidad : 0.17 [s / 60°] sin carga

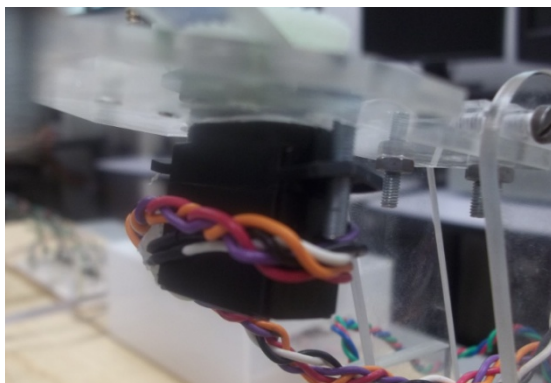


Figura 4.6 Mini servomotor ensamblado en la pinza mecánica

4.3.- Sensores para medir posición angular

En la etapa de diseño se seleccionaron potenciómetros de precisión como sensores para medir la posición de los eslabones. En total se utilizan 4.

Las características de los potenciómetros de precisión son:

- Valor de resistencia: 10 [K Ω]
- 10 vueltas



Figura 4.7 Potenciómetro de precisión

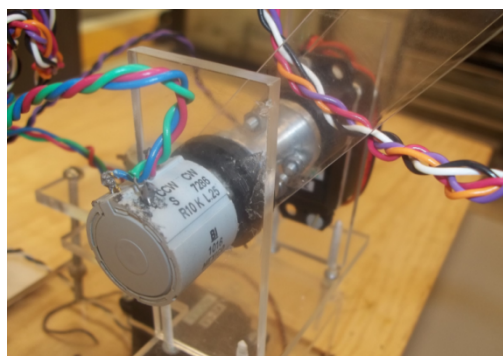


Figura 4.8 Potenciómetro acoplado al brazo del robot

Para medir la posición de las pinzas, se utilizaron los potenciómetros que vienen integrados en los mini servomotores utilizados como actuadores en cada robot. En total se utilizaron 2.

4.4.- Acoplamientos

Fue necesario manufacturar en aluminio, mediante un torno los acoplamientos que se utilizan para unir los potenciómetros a sus respectivos eslabones y motores. Se manufacturaron dos tipos diferentes de acoplamientos, para el primer eslabón, la base, y para el segundo, el brazo. En total 4 acoplamientos.

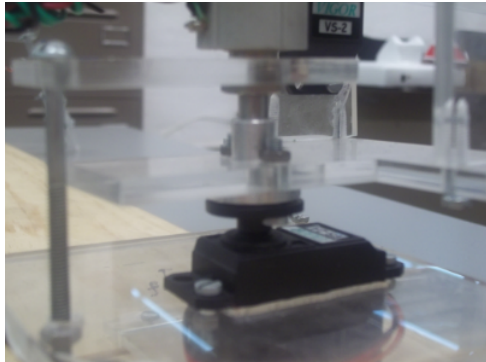


Figura 4.9 Acoplamiento de la base del robot

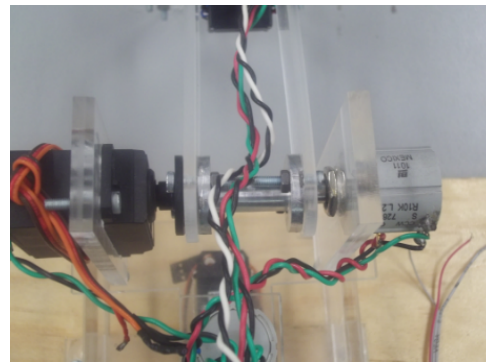


Figura4.10 Acoplamiento del brazo del robot

5.- Control

En este capítulo se presentara una *breve introducción a las Arquitecturas de control bilateral más básicas*, y posteriormente como fue que se implementó la arquitectura de control **Force Reflection**, la *etapa de acondicionamiento* y la *etapa de potencia*. Se detalla también cómo está conformado el *proyecto de LabVIEW®* donde se realizó la programación y como se implementó el *control bilateral con un entorno virtual*.

5.1.- Arquitecturas de control bilateral básicas [17]

Sistema de teleoperación genérico

Con base en la **Figura 5.1**, se genera el siguiente esquema más a detalle, de donde se plantean las arquitecturas a aplicar:

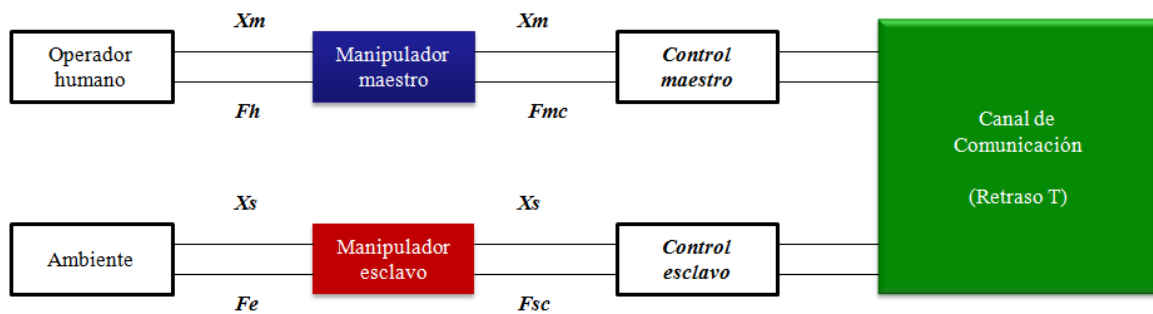


Figura 5.1 Sistema de teleoperación genérico

Para un sistema de manipuladores maestro y esclavo de un grado de libertad [17], se puede plantear la ecuación de cada robot.

$$F_m = (M_m s^2 + B_m s)x_m \dots\dots\dots(1)$$

$$F_s = (M_s s^2 + B_s s)x_s \dots\dots\dots(2)$$

Donde:

$$F_m = F_h - F_{mc} \dots\dots\dots(3) \text{ Fuerza total en el maestro}$$

$$F_s = F_e + F_{sc} \dots\dots\dots(4) \text{ Fuerza total en el esclavo}$$

y:

$$F_h = \text{Fuerza del operador}$$

$$F_e = \text{Fuerza del ambiente}$$

$$F_{mc} \text{ y } F_{sc} = \text{Fuerzas del algoritmo de control, del maestro y esclavo respectivamente}$$

A continuación se muestran las ecuaciones y parámetros de las arquitecturas de control teleoperado bilateral más básicas, que serán las consideradas en este trabajo.

5.1.1.- Force Reflection (FR)

En esta arquitectura, **Figura 5.2** dos señales son transmitidas unidireccionalmente. La posición del maestro x_{md} es transmitida hacia el entorno remoto, para que junto con la posición del esclavo x_s se calcule el error de posición. Un control proporcional es entonces aplicado mediante el parámetro K_c para obtener así la acción de control F_{sc} que mueve al esclavo. La acción de control en el maestro, es decir la fuerza retroalimentada F_{mc} , es proporcional a la fuerza de control del esclavo ya transmitida hacia la zona local F_{sd} . Y se controla mediante el parámetro G_c .

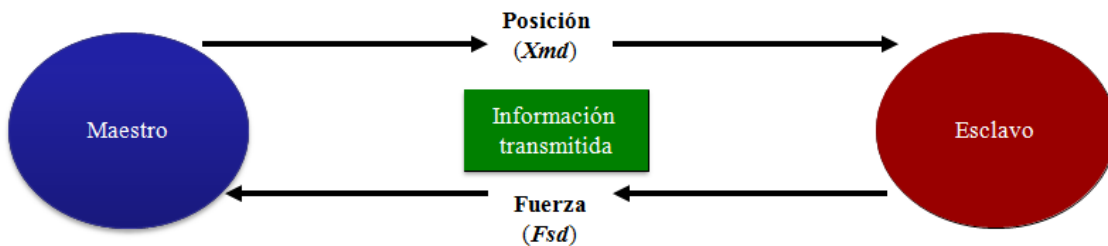


Figura 5.2 Esquema Force reflection

$$F_{mc} = G_c F_{sd} \dots \dots \dots (5)$$

$$F_{sc} = K_c (x_{md} - x_s) \dots \dots \dots (6)$$

Donde:

G_c, K_c son parámetros de control

F_{sd} y x_{md} son variables (Fuerza y posición) de información transmitida con retraso

$$x_{md} = e^{-sT} x_m$$

$$F_{sd} = e^{-sT} F_{sc}$$

Donde:

T es el tiempo de retraso en la transmisión.

e^{-sT} denota ese retraso en el dominio de Laplace.

5.1.2.- Position Error (PE)

En esta disposición, *Figura 5.3*, la señal de la posición de cada zona, es transmitida hacia la otra, es decir, tanto la posición del maestro x_m como la del esclavo x_s . En cada zona es calculado el error de posición y posteriormente un control proporcional es aplicado. En la zona remota la fuerza de control F_{sc} se controla mediante el parámetro K_c . La acción de control del maestro F_{mc} depende de dos parámetros de control, K_c , es decir el mismo de la zona remota, y G_c .

La fuerza aplicada al manipulador esclavo no es tomada en cuenta para calcular la del maestro, a diferencia de la arquitectura anterior, ésta es calculada a partir de la posición del esclavo transmitida x_{sd} y la posición del maestro x_m . Se aprecia que si el tiempo de retardo en la transmisión es muy pequeño y no afecta, las dos arquitecturas, *Force Reflection* y *Position error* serían prácticamente la misma.

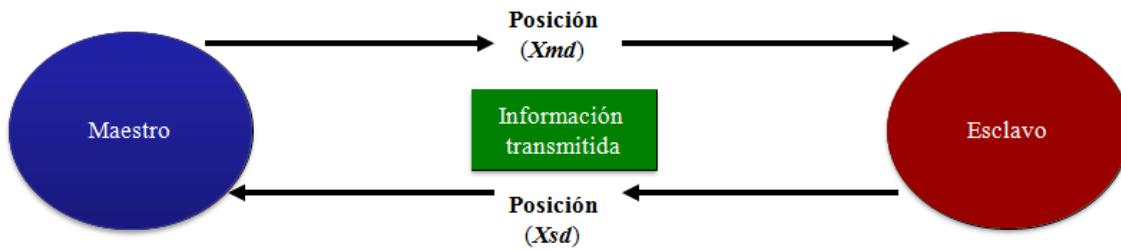


Figura 5.3 Esquema *Position error*

$$F_{mc} = G_c K_c (x_m - x_{sd}) \dots \dots \dots (7)$$

$$F_{sc} = K_c (x_{md} - x_s) \dots \dots \dots (8)$$

Donde:

G_c, K_c son parámetros de control

$$x_{md} = e^{-sT} x_m$$

$$x_{sd} = e^{-sT} x_s$$

Para el caso de un robot manipulador de dos grados de libertad, se aplica la misma ecuación para cada uno, es decir, se aplica por separado la arquitectura de control a cada grado. Al ser teleoperación se puede manejar de esta forma, ya que no es necesario ningún cálculo de trayectoria y por lo tanto tampoco análisis cinemáticos.

5.1.3.- Shared Compliance Control (SCC)

Esta arquitectura, la **Figura 5.4** se asemeja a *Force Reflection* pero ahora se toma en consideración la acción que ejerce el ambiente F_e sobre el esclavo.

De la misma manera se transfiere de la zona local a la remota la posición del maestro x_{md} . Al cálculo del error de posición se le agrega un factor que involucra la fuerza ejercida por el ambiente $G_f(s)F_e$. Donde $G_f(s)$ es un filtro paso bajas que se controla por medio de los parámetros K_f y τ_s . Una vez agregado este factor al cálculo del error, se aplica una acción proporcional K_c para obtener la fuerza de control F_{sc} para mover el esclavo, la cual es transmitida hacia el entorno local F_{sd} , donde también se le aplica una acción proporcional G_c para obtener la fuerza de control en el maestro F_{mc} .

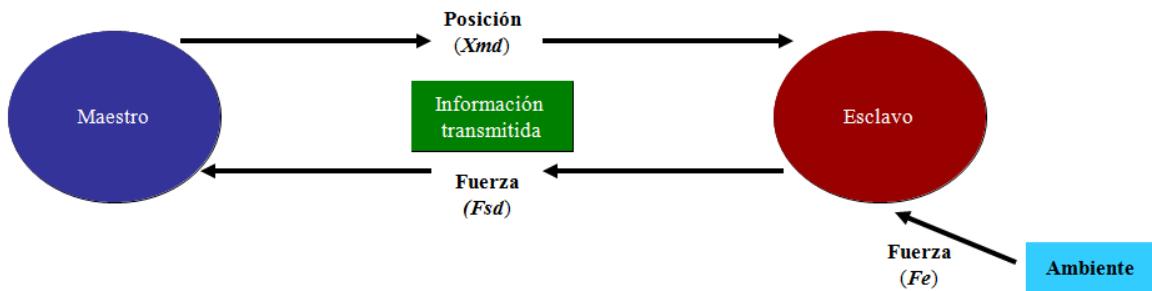


Figura 5.4 Esquema Shared Compliance Control

$$F_{mc} = G_c F_{sd} \dots \dots \dots (9)$$

$$F_{sc} = K_c (x_{md} - x_s + G_f(s)F_e) \dots \dots \dots (10)$$

Donde:

G_c y K_c son parámetros de control

$$G_f(s) = \frac{K_f}{1 + \tau_s s} \text{ es un filtro paso bajas con parámetros } K_f \text{ y } \tau_s$$

5.2.- Control bilateral de un sistema teleoperado

Se repite la **Figura 5.5** para una mejor explicación de la implementación de las arquitecturas de control y para una mejor visualización de cómo se conforma.

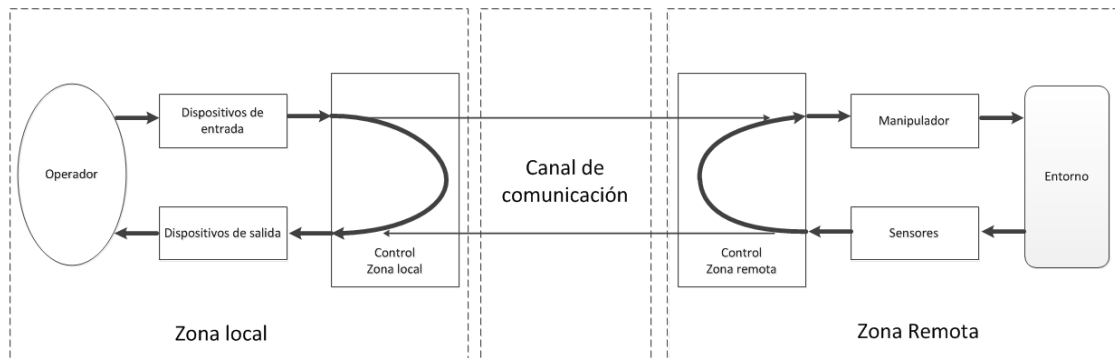


Figura 5.5 Arquitectura de control bilateral

5.2.1.- Implementación de la arquitectura de control FR

Para la implementación de un control bilateral, son necesarias varias etapas:

1. Etapa de acondicionamiento de los sensores.
2. Dispositivos que adquieran la información ya acondicionada de los sensores, tanto del entorno local como del entorno remoto.
3. Un canal de comunicación que transfiera la información entre las dos zonas.
4. Sistemas o dispositivos donde se programen o implementen los controles local y remoto.
5. Etapas de potencia para los actuadores de la zona local y la zona remota.

Para el sistema que se controla, el esquema de control sufre algunos cambios que se ajustan a sus características particulares, mostrada en la **Figura 5.6**.

1. Etapa de acondicionamiento para los sensores en zona local y remota.
2. Un solo dispositivo para adquirir la información ya acondicionada de las dos zonas.
3. El mismo dispositivo sirve como canal de comunicación.
4. Otro dispositivo para implementar las acciones de control tanto de la zona local, como de la remota.
5. Etapas de potencia independientes para los actuadores de cada zona.

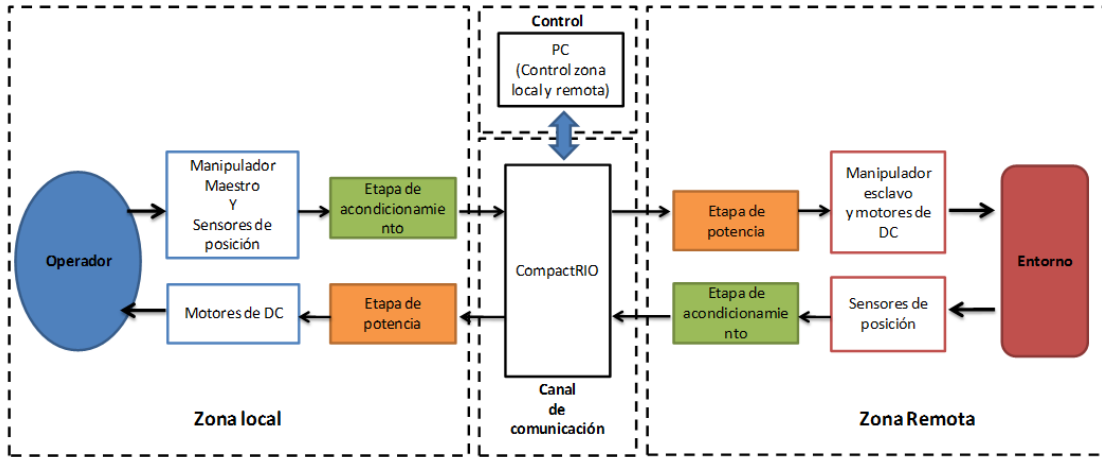


Figura 5.6 Arquitectura de control bilateral con los dispositivos usados

5.2.2.- Esquema general del sistema de control

El esquema de control implementado, la **Figura 5.7** consiste en:

1. Un operador
2. Dos robots manipuladores, maestro y esclavo, de dos grados de libertad.
3. Dos circuitos con acondicionamiento y etapas de potencia para cada robot
4. El CompactRIO, para la adquisición y envío de señales.
5. Una PC que sirve como sistema de control.

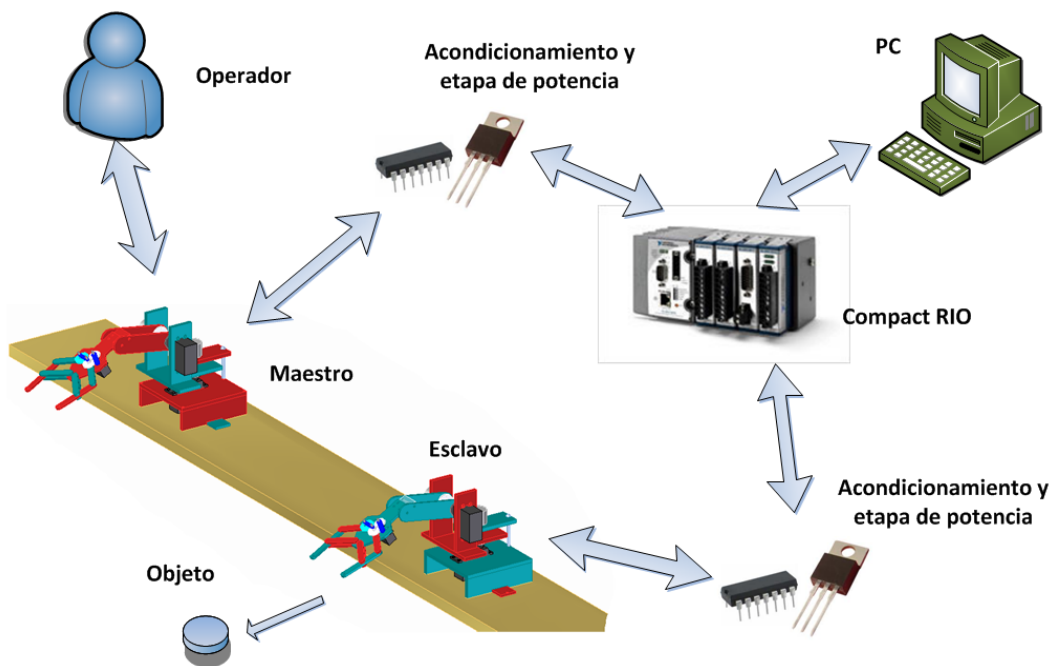


Figura 5.7 Esquema general del sistema de control

5.2.3.- Etapa de acondicionamiento

Los potenciómetros de precisión elegidos para medir la posición de los eslabones de los manipuladores son de 10 vueltas y el movimiento de los eslabones está restringido a un ángulo de giro máximo de 180°. Los potenciómetros son polarizados con 6V por lo que el rango de voltaje que proporcionan de 0° a 180° es muy pequeño, aproximadamente de 0 a 0.3 V, es decir una señal débil y muy pequeña para procesarla de manera confiable. Si se utilizara la señal con esas características, podría ser afectada al conectar los motores de DC, que pueden provocar ruido y esto desestabilizaría el sistema de control.

La señal es entonces amplificada 11 veces, para obtener una señal más confiable y fácil de procesar. La amplificación se realiza por medio de un amplificador operacional con una *configuración no inversora*. **Figura 5.8.**

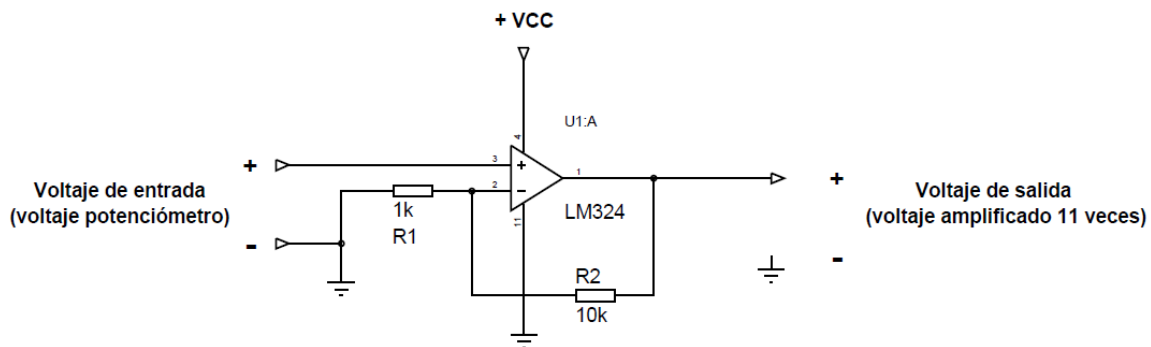


Figura 5.8 Amplificación de la señal de los potenciómetros

Para medir la posición de la pinza, se usan los potenciómetros que están integrados en el servomotor. Éstos si se utilizan directamente sin la etapa de acondicionamiento, ya que son de una sola vuelta, por lo que proporcionan una señal adecuada para trabajar.

5.2.4.- Adquisición de datos y sistema de control

En el sistema bilateral en particular que se controla, la zona remota y la local, están a una distancia muy pequeña, aproximadamente 30 cm. Los objetivos del control son poder apreciar un buen seguimiento por parte del esclavo y sobretodo la implementación de la retroalimentación de fuerza hacia el maestro. Es por eso que es posible adquirir la información tanto del esclavo como del maestro mediante el mismo dispositivo y posteriormente implementar el control de las dos zonas a través de un mismo dispositivo o sistema de control, en este caso una PC. En el caso de que se quisiera investigar más acerca de cómo afectan los retrasos en la información y probar otro tipo de arquitecturas, éstos se pueden simular mediante el software de control.

Requerimientos esenciales del dispositivo de adquisición
6 entradas analógicas
6 salidas analógicas

La adquisición de datos se realiza por medio de un **CompactRIO de National Instruments (NI)**. El CompactRIO es un sistema embebido de control y adquisición. Combina una arquitectura robusta de hardware con módulos de entradas y salidas, un chasis reconfigurable con un FPGA (por sus siglas en inglés *Field Programmable Gate Array*) y un controlador embebido con un procesador en tiempo real.

Se utilizan 6 entradas analógicas para obtener la información que proporcionan los potenciómetros acerca de la posición de los 2 grados de libertad de los dos manipuladores, maestro y esclavo, así como de sus respectivas pinzas mecánicas.

El control se implementa en la PC. Las acciones de control calculadas, es decir los voltajes para mover los motores de DC que proporcionan el movimiento a los eslabones y a las pinzas de los dos manipuladores, maestro y esclavo, se obtienen por medio de 6 salidas analógicas del CompactRIO.

5.2.5.- Etapa de potencia

En la etapa de selección de actuadores, se eligió al servomotor como la mejor opción. Un servomotor ya posee un control proporcional interno, de manera que por medio de un PWM con cierto ciclo de trabajo se le indica a qué posición debe moverse. Es decir, el PWM es la referencia. Para el caso de una arquitectura de control bilateral, la referencia es la posición del maestro. El problema está a la hora de querer retroalimentar la fuerza, ya que la referencia para el motor del maestro dependería de qué manera se calcule la acción de control hacia el maestro. El hecho de tener el motor ya un control proporcional interno complicaría un poco lograr adecuadamente la retroalimentación de fuerza, además de que el servomotor siempre estaría energizado y se dificultaría mover el eslabón. Por eso se decidió utilizar el servomotor sin su control interno, es decir como motor de DC pero aprovechando la reducción que posee.

Las señales de control están limitadas por las intensidades de corriente que puede proporcionar el CompactRIO. No poseen la suficiente potencia para poder mover las cargas, es decir, los motores. Por eso es necesaria una etapa de potencia que proporcione la suficiente corriente a cada motor.

La etapa diseñada, mostrada en la **Figura 5.9** consta de dos partes, un seguidor de voltaje y una etapa de potencia clase B apoyada con un amplificador operacional. Éste provee la alta ganancia en el lazo de retroalimentación para reducir no linealidades y la distorsión en la señal debido a la zona muerta de la etapa de potencia.

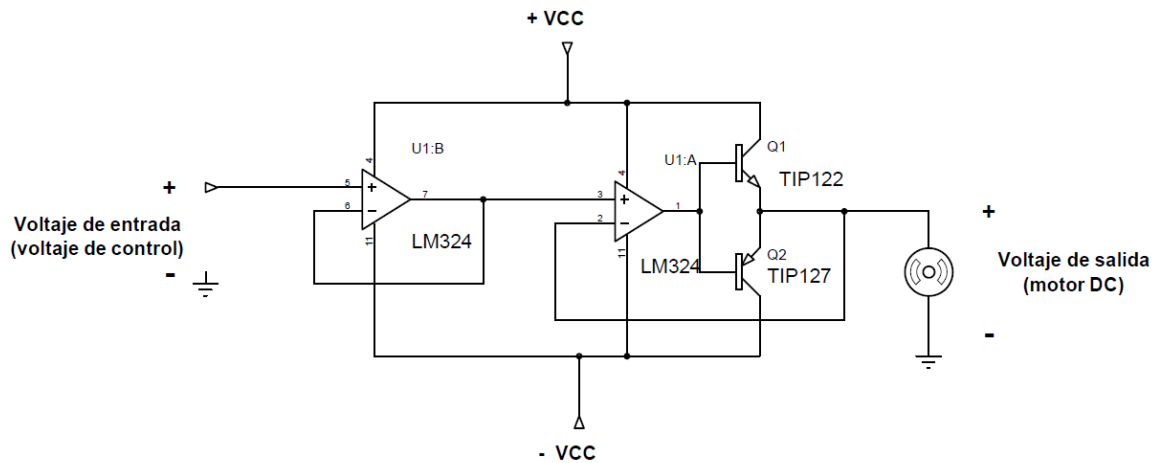


Figura 5.9 Etapa de potencia clase B para mover los motores de DC

El seguidor de voltaje se utiliza para aislar el CompactRIO de la etapa de amplificación de corriente para el motor.

Como ya se mencionó en el marco teórico, en esta etapa se aprovecha la característica de la alta impedancia a la entrada de un amplificador operacional para conectar una carga con baja impedancia como lo es un motor de DC.

5.2.6.- Programación de la arquitectura de control *FR*

La programación del control en la PC está hecha en LabVIEW® 10.0. de National Instruments (NI). LabVIEW® es un entorno gráfico de programación para desarrollar sistemas de control, pruebas y mediciones utilizando iconos gráficos intuitivos.

En un proyecto de LabVIEW® se genera la aplicación de control de manera que se ejecute en el módulo de tiempo real del CompactRIO. El programa que se encarga de adquisición y envío de señales directamente de los robots se graba directamente en el FPGA. La estructura del proyecto se aprecia en la *Figura 5.10*

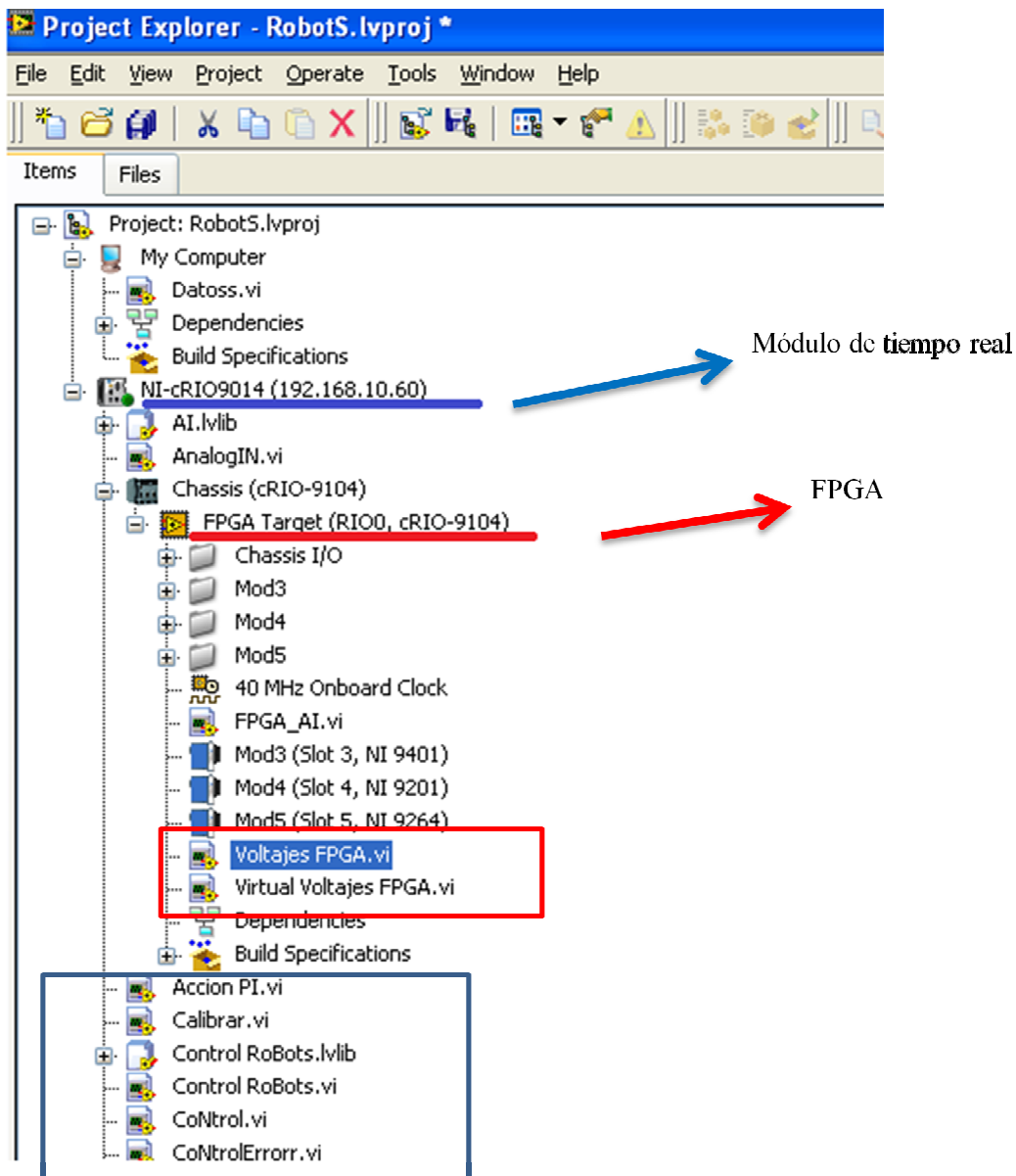


Figura 5.10 Estructura del proyecto en LabVIEW®

Programa en módulo de tiempo real

La *Figura 5.11* muestra el diagrama de bloques de LabVIEW® en el módulo de tiempo real, donde es posible identificar la secuencia de programación, que consta de tres partes principales:

1. Inicialización
2. Comunicación y control
3. Finalización

Inicialización

En la parte de inicialización se programó una rutina de calibración, para poder ajustar la relación entre voltajes y posiciones de cada uno de los eslabones de los dos robots, maestro y esclavo.

Comunicación y control

El bloque de comunicación y control está formado por tres ciclos temporizados que corren de manera independiente y ajustados al tiempo de escaneo del FPGA.

- a. Ciclo de comunicación, escritura y lectura de entradas y salidas
- b. Ciclo de control y adquisición
- c. Ciclo de actualización del Panel Frontal

Finalización

En la última etapa de finalización se cierra la comunicación con el FPGA y además las variables globales que representan los voltajes de control se reinician a cero, para detener los robots.

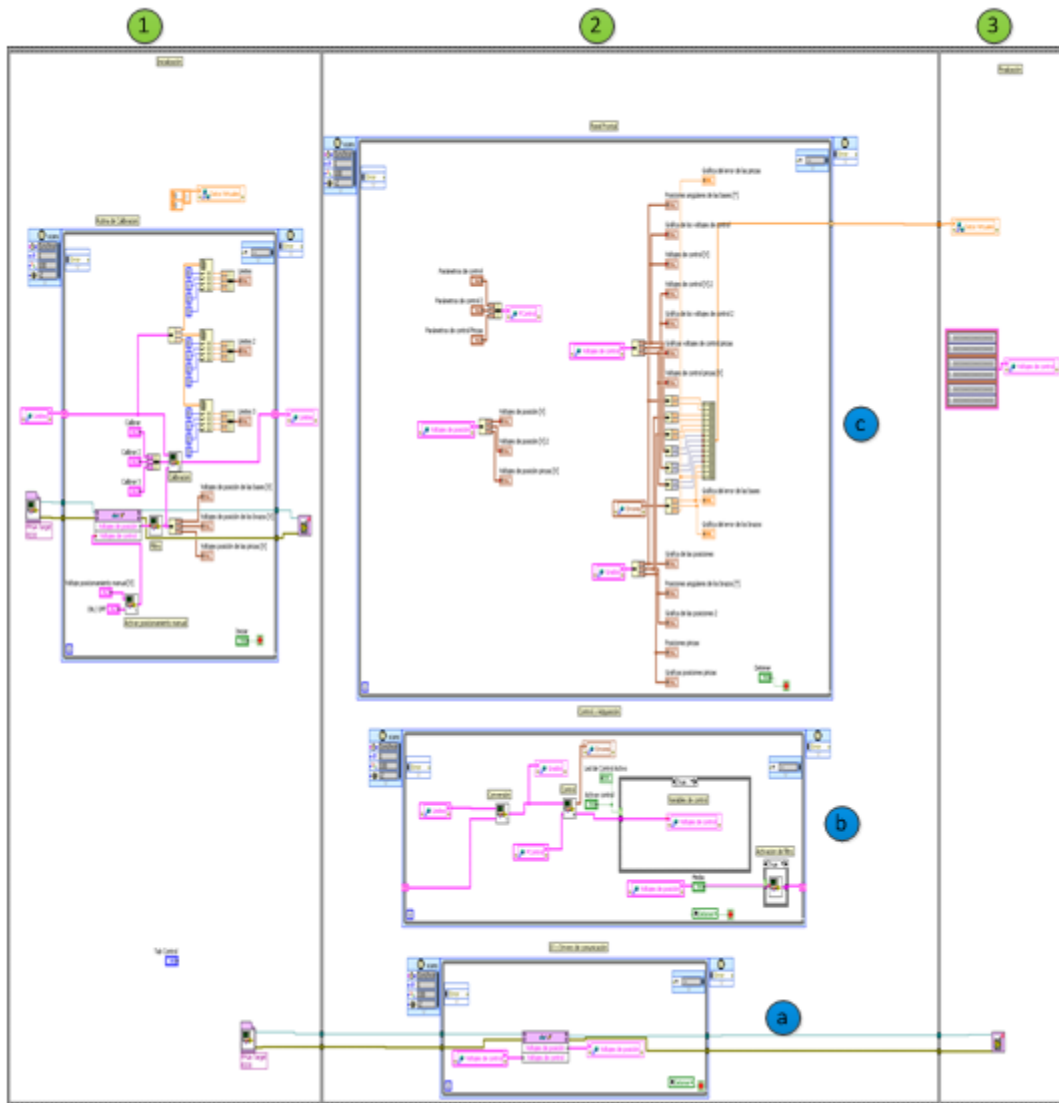


Figura 5.11 Diagrama de bloques de LabVIEW®

Ciclo de comunicación, escritura y lectura

El ciclo establece la comunicación a través de variables globales entre el programa que se ejecuta en el módulo de tiempo real y el programa que corre directamente en el FPGA del Compact RIO.

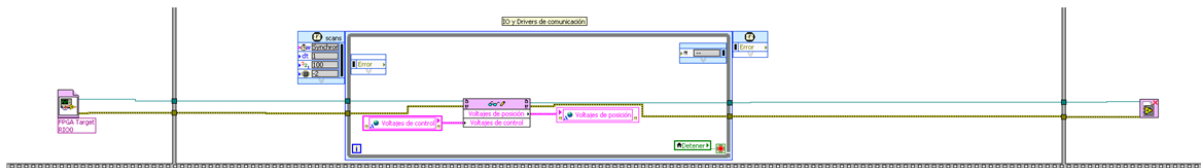


Figura 5.12 Ciclo de comunicación, escritura y lectura

Ciclo de control y adquisición

Este ciclo se comunica también por medio de variables globales con el ciclo de comunicación, así obtiene los voltajes de posición de cada eslabón, realiza el algoritmo de control y obtiene los voltajes de control, los cuales son enviados de vuelta al bloque de comunicación. Además contiene un bloque donde se puede activar un filtro para la señales de los voltajes de posición. Este bloque obtiene la media a partir de un muestreo constante con el objetivo de atenuar el ruido en las señales.

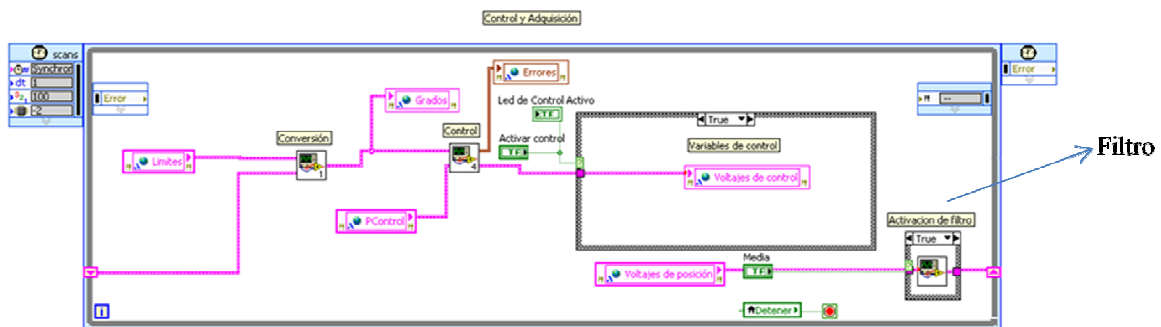


Figura 5.13 Ciclo de control y adquisición

Ciclo de actualización del Panel Frontal

En este ciclo solamente se actualiza constantemente la información de todos los indicadores que aparecen en el Panel Frontal o Interfaz de Usuario.

Por cada grado de libertad del sistema maestro – esclavo está programado un lazo de control de tipo *FR* y de la misma manera para la pinza mecánica, Es decir, en total hay 3 lazos de control de tipo *FR* programados.

La **Figura 5.14** muestra el diagrama que representa la parte de control en LabVIEW®.

Secuencia de la programación

1. Los *voltajes proporcionales a las posiciones* del maestro V_{xm} y esclavo V_{xs} son adquiridos mediante *entradas analógicas* en el CompactRIO.
2. En LabVIEW® se programa un bloque que convierte dichos *voltajes a grados* xm y xs .
3. Se calcula el *error de posición* ($xm - xs$).
4. Se aplica una acción de control proporcional mediante el parámetro Kc para obtener el *voltaje de control del esclavo* V_{sc} .
5. Al voltaje de control del esclavo se le aplica otra acción de control proporcional mediante el parámetro Gc y se obtiene el *voltaje de control del maestro* V_{mc} . En este punto es donde se proporciona la **retroalimentación de fuerza** del esclavo hacia el maestro.
6. Se realiza una *saturación* a los voltajes de control, para limitar sus valores de $-6V$ a $+6V$ ya que es el intervalo de voltajes con el que trabajan los motores de DC utilizados.
7. Mediante *salidas analógicas* del CompactRIO se proporcionan los *voltajes de control saturados a los motores*. En el caso del esclavo para **generar el movimiento** que siga los pasos del maestro. En el caso del maestro para **proporcionar la retroalimentación de fuerza**.

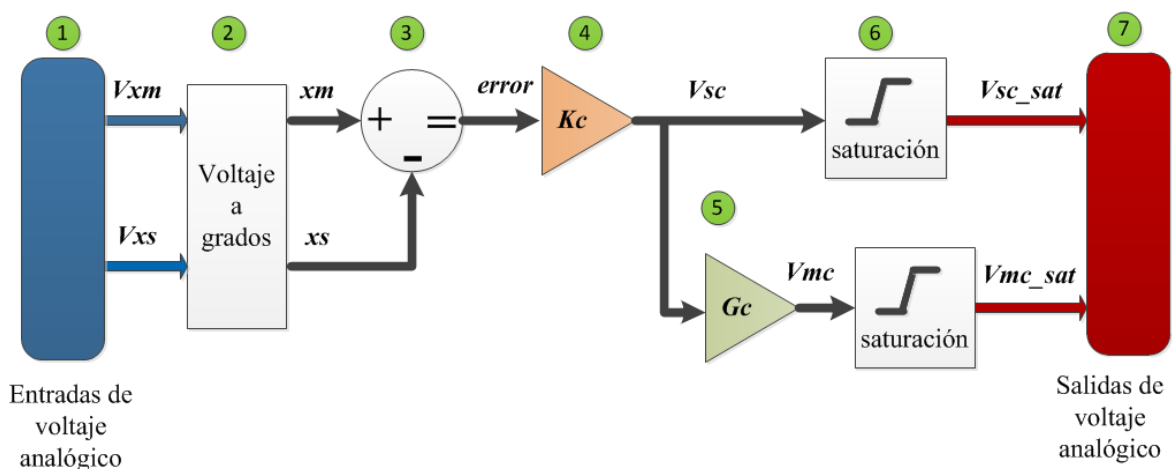


Figura 5.14 Diagrama de bloques de la programación

Donde:

V_{xm} y V_{xs} \Rightarrow voltajes proporcionales a las posiciones del maestro y esclavo respectivamente.

x_m y x_s \Rightarrow posiciones del maestro y esclavo respectivamente.

$error$ \Rightarrow error de posición entre maestro y esclavo ($x_m - x_s$).

K_c y G_c \Rightarrow parámetros de control.

V_{sc} y V_{mc} \Rightarrow voltajes de control del esclavo y maestro respectivamente.

V_{sc_sat} y V_{mc_sat} \Rightarrow voltajes saturados de control del esclavo y maestro respectivamente.

Programa en el FPGA

El programa que se carga al FPGA se muestra en la **Figura 5.15**. Se ejecuta un código para medir y controlar el tiempo de ejecución, de manera que cada ciclo dure lo mismo de acuerdo al tiempo de muestreo seleccionado el cual divide la frecuencia de trabajo del reloj del FPGA.

El siguiente código en ejecutarse es para leer y escribir directamente los módulos de entradas y salidas del CompactRIO con los voltajes de posición y los voltajes de control respectivamente.

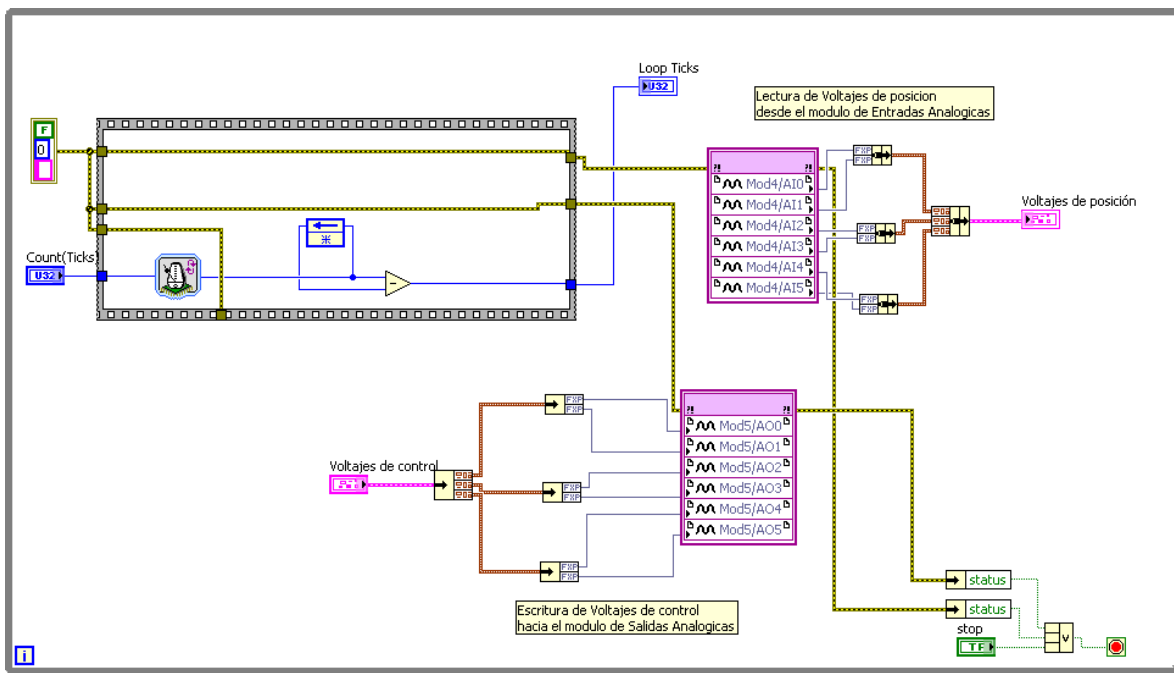


Figura 5.15 Diagrama de bloques del programa en el FPGA

5.2.7.- Interfaz de usuario de la arquitectura de control FR

Se generó una interfaz en LabVIEW® con el propósito de visualizar las variables de control, controlar los parámetros y evaluar en tiempo real el desempeño de los robots. *Figura 5.16*

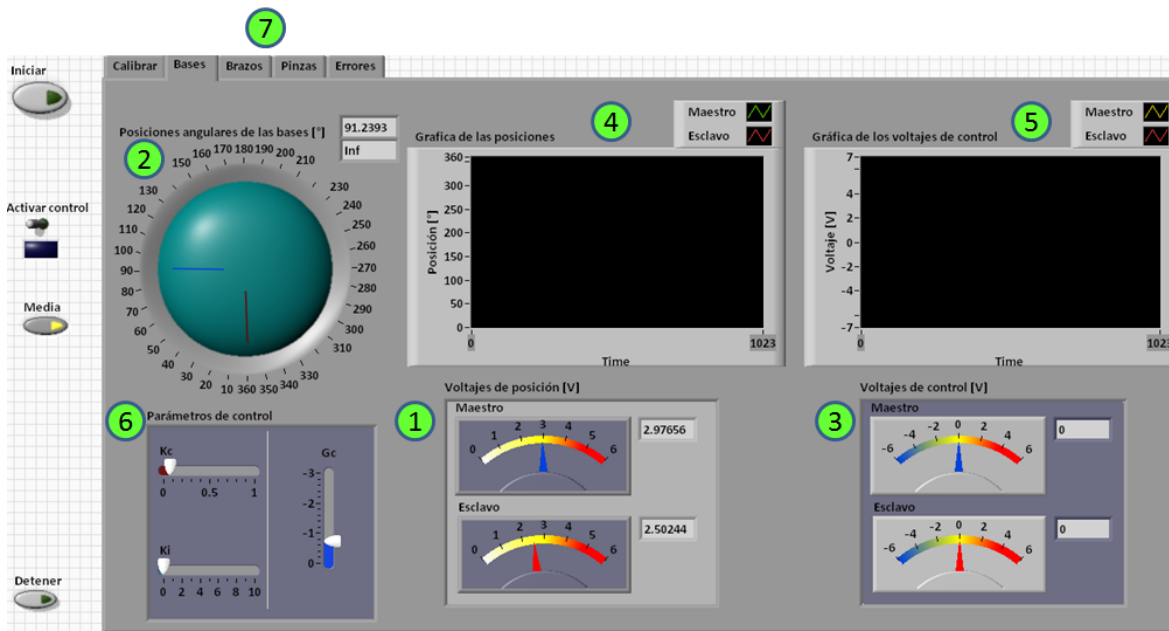


Figura 5.16 Interfaz de usuario en LabVIEW® para FR

La información que se presenta es:

1. Voltajes de posición
2. Posiciones angulares
3. Voltajes de control
4. Gráficas del comportamiento de las posiciones en tiempo real
5. Gráficas del comportamiento de los voltajes de control en tiempo real
6. Ajuste de los parámetros de control K_c y G_c .
7. Mediante pestañas diferentes es posible visualizar la información respectiva para cada uno de los eslabones y las pinzas mecánicas, tanto para el robot maestro como para el esclavo. También se puede elegir una pestaña donde aparecen las gráficas del error de cada eslabón.

5.3.- Control bilateral con entorno virtual

Una aplicación de control bilateral diferente es la simulación virtual o entrenamiento virtual. Se pueden representar situaciones a las que el operador se enfrentaría al telemanipular un robot en un ambiente real, es decir, se manipularía en un entorno virtual, donde la principal ventaja es que no existe el riesgo de pérdidas económicas o de cualquier otra índole. Por eso se pensó en implementar un control bilateral de este tipo.

Mediante un esclavo o entorno virtual se puede implementar también un control con retroalimentación de fuerza, es decir, al operar el robot manipulador maestro, se genera movimiento virtualmente. Si se establece un límite al movimiento en el entorno virtual, se genera también una retroalimentación de fuerza hacia el robot maestro, de manera que se perciba la oposición al movimiento.

El siguiente esquema de la **Figura 5.17** presenta el esquema de control con los cambios que sufre al convertirse en un control bilateral con entorno virtual

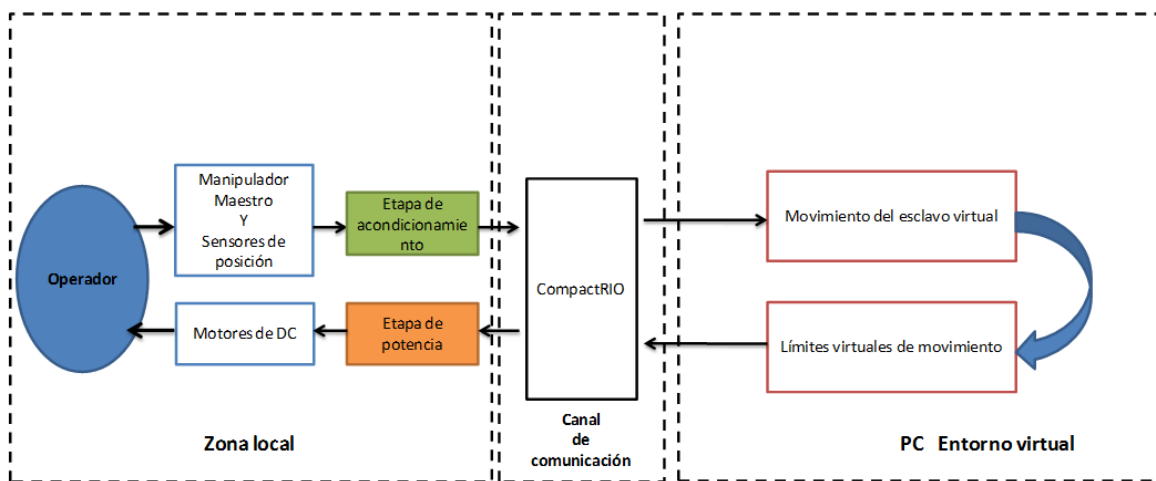


Figura 5.17 Esquema de control bilateral con entorno virtual

Se sustituye la zona remota por un entorno virtual, por lo que ya no se utilizarán sensores y actuadores en esa parte del sistema, simplemente se establecen los límites de movimiento y así se retroalimenta la fuerza hacia el maestro mediante salidas analógicas del CompactRIO.

5.3.1.- Esquema general del sistema de control con entorno virtual

El esquema de control implementado en la *Figura 5.18* consiste en:

1. Un operador.
2. Un robot manipulador maestro.
3. Un circuito con acondicionamiento y etapa de potencia para el robot maestro.
4. El CompactRIO, para la adquisición y envío de señales.
5. Una PC que sirve como sistema de control.
6. En la misma PC se representa el entorno o esclavo virtual.

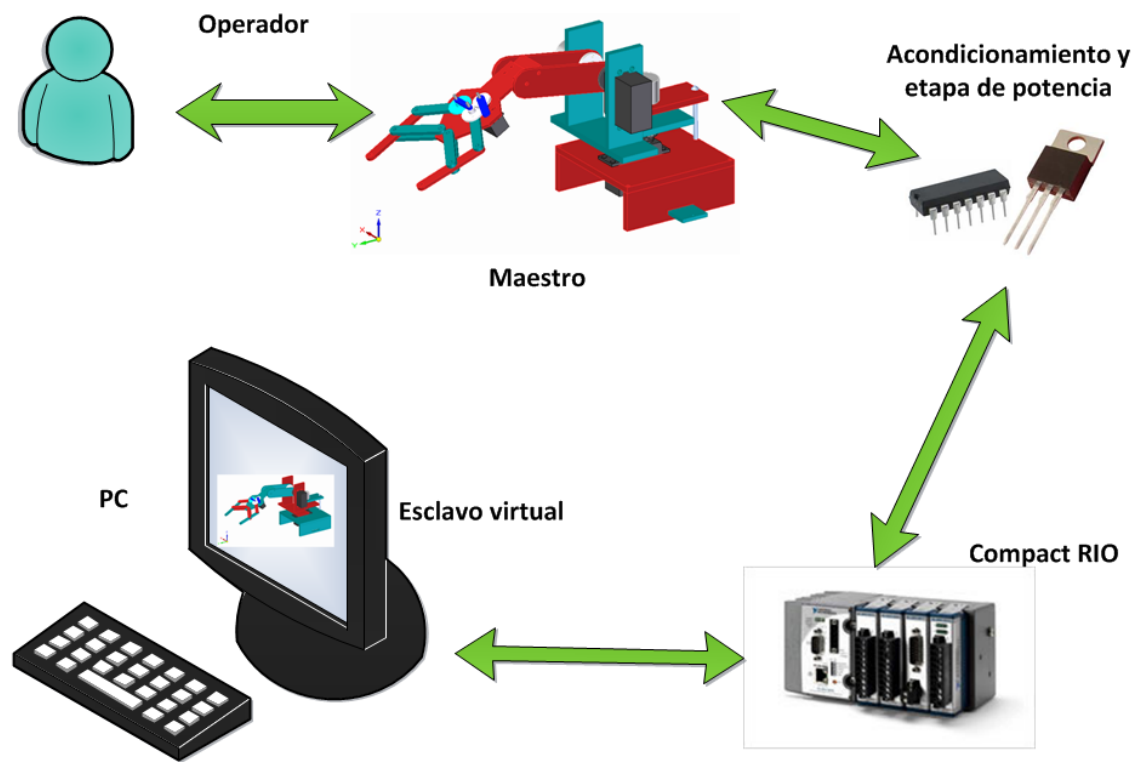


Figura 5.18 Esquema general de control con entorno virtual

5.3.2.- Programación del control con entorno virtual

La estructura del proyecto es básicamente la misma que la de *FR*, así como las partes en las que se dividen los programas tanto del módulo de tiempo real como en el FPGA.

Están programados 3 lazos de control, por cada grado de libertad del robot maestro y la pinza mecánica, con las debidas modificaciones para lograr el control en el entorno virtual.

La **Figura 5.19** muestra el diagrama de bloques que representa lo que está programado en el ciclo de control de LabVIEW®.

Secuencia de la programación

1. El *voltaje proporcional a la posición* del maestro V_{xm} es adquirido mediante una entrada analógica del CompactRIO.
2. Se realiza una conversión de *voltaje a grados*, xm .
3. La posición del maestro xm , en grados, entra a un *bloque de comparación*, **Figura 5.20**, en el cual se averigua si está *dentro o fuera de los límites* de movimiento establecidos, $limI$ y $limS$.
 - a. Se leen *la posición del maestro*, xm y los límites establecidos, $limI$ y $limS$
 - b. Se compara la *posición del maestro* con el *límite inferior*, ($xm \leq limI$).
 - c. Si está fuera del rango, se compara ahora con el *límite superior*, ($xm \geq limS$).
 - d. En base a estas comparaciones, se establece la salida correspondiente, $limI$, $limS$ o xm .
4. La *salida* del bloque de comparación es la *posición del esclavo virtual* xs_v .
5. Se calcula entonces el *error de posición* ($xm - xs_v$).
6. Mediante el parámetro Gc se calcula una acción de control proporcional al error, con el que se obtiene el *voltaje de control del maestro* V_{mc} , y por lo tanto la **retroalimentación de fuerza** del esclavo virtual hacia el maestro.
7. Se realiza una *saturación* al voltaje de control, para limitar sus valores de **-6V a +6V**.
8. Mediante una *salida analógica* del CompactRIO se proporciona el *voltaje de control saturado al motor del maestro*, para proporcionar así la **retroalimentación de fuerza**, que se opone al movimiento debido a los límites virtuales establecidos.

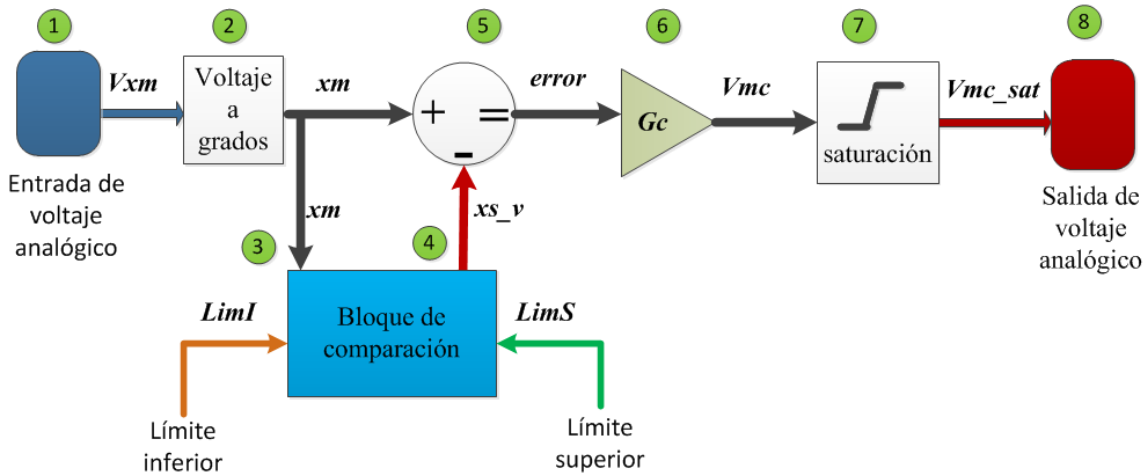


Figura 5.19 Diagrama de bloques de la programación con entorno virtual

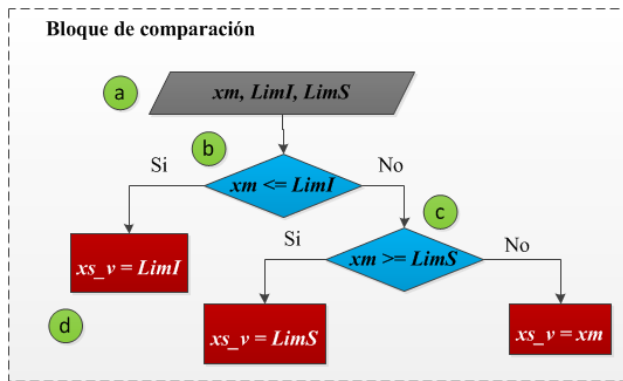


Figura 5.20 Bloque de comparación

donde:

- V_{xm} \Rightarrow voltaje proporcional a las posición del maestro.
- xm y xs_v \Rightarrow posiciones del maestro y esclavo virtual respectivamente.
- $error$ \Rightarrow error de posición entre maestro y esclavo virtual ($xm - xs_v$).
- Gc \Rightarrow parámetro de control.
- Vmc \Rightarrow voltaje de control del y maestro.
- Vmc_{sat} \Rightarrow voltaje saturado de control del maestro.

5.3.3.- Interfaz de usuario del control con entorno virtual

En este caso la interfaz en LabVIEW® cambia, como se muestra en la *Figura 5.21*. Además del propósito de visualizar las variables de control y permitir modificar los parámetros de control K_c y G_c , más importante aún, permite visualizar la posición en tiempo real de los eslabones del robot maestro y establecer límites a su movimiento, los cuales es posible variar en tiempo real.

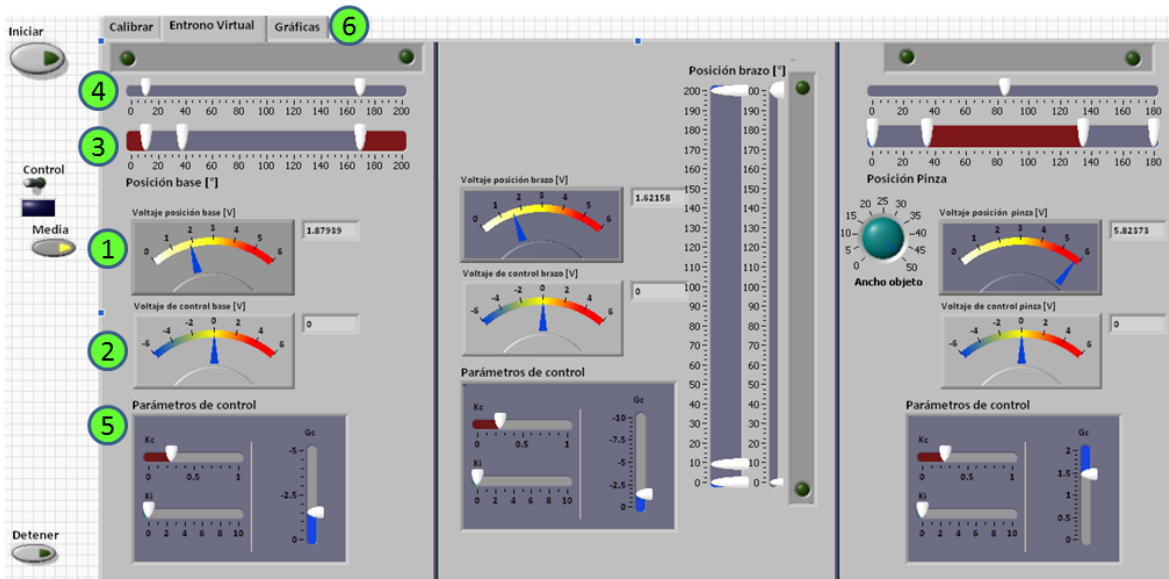


Figura 5.21 Interfaz de control

La interfaz de usuario muestra en tiempo real lo siguiente:

1. Voltajes de posición
2. Voltajes de control
3. Posiciones de los eslabones
4. Controlar los límites virtuales
5. Ajuste de los parámetros de control K_c y G_c .
6. Una pestaña donde se muestran las gráficas en tiempo real de las distintas variables, posiciones, voltajes de control y errores de posición

6.- Implementación de la electrónica y sistema de control

6.1.- Circuitos

Para implementar los circuitos de acondicionamiento y etapa de potencia de cada uno de los robots se utilizaron los siguientes elementos:

- 6 LM324 (Amplificador operacional)
- 4 resistencias de 1 [k Ω]
- 4 resistencias de 10 [k Ω]
- 6 TIP 122 (Transistor de potencia Darlington NPN)
- 6 TIP 127 (Transistor de potencia Darlington PNP)

Se generó así una tarjeta para cada uno de los robots.

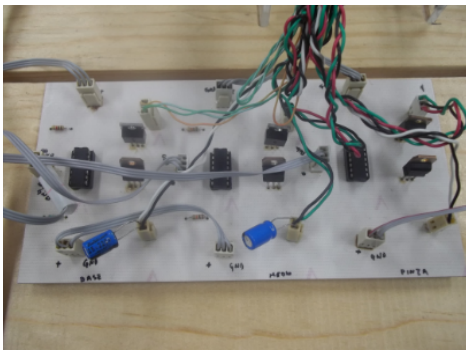


Figura 6.1 Circuito del robot maestro

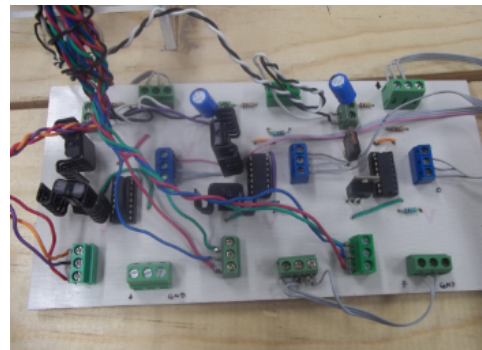


Figura 6.2 Circuito del robot esclavo

6.2.- Caja de encendido y apagado de motores

Esta caja permite encender y apagar cada uno de los motores de cada uno de los robots. Muy útil cuando se calibran los robots antes de ponerlos a funcionar mediante el control bilateral o para que dejen de funcionar cuando se requiera.

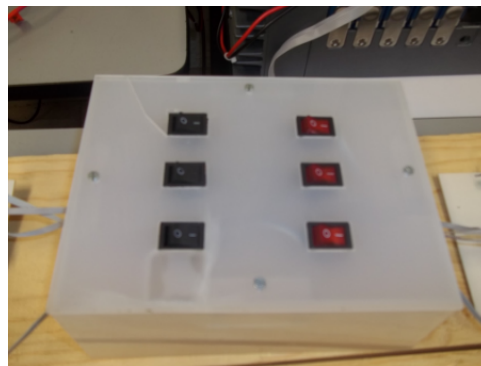


Figura 6.3 Caja para controlar el encendido y apagado de motores

6.3.- Sistema de control

Como dispositivo de adquisición de datos se utiliza el CompactRIO de National Instruments, conectado directamente a la PC para proporcionar y recibir las variables de control. Se encuentra también conectado a los respectivos tarjetas con los circuitos de los robots.

Una PC (Computadora Personal) se utiliza para implementar y programar el control bilateral. Se utiliza el software LabVIEW® 10 de National Instruments.

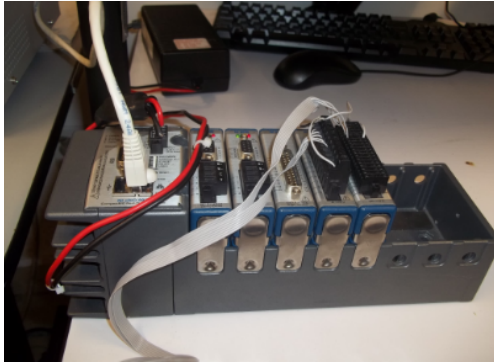


Figura 6.4 CompactRIO de NI

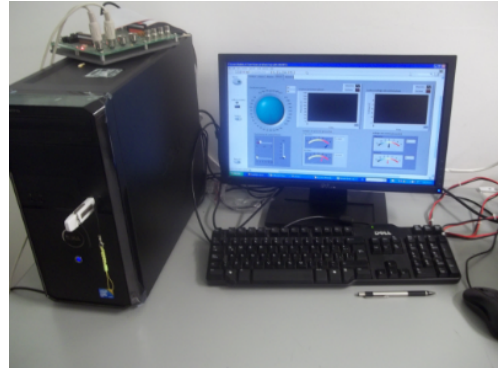


Figura 6.5 PC con LabVIEW®

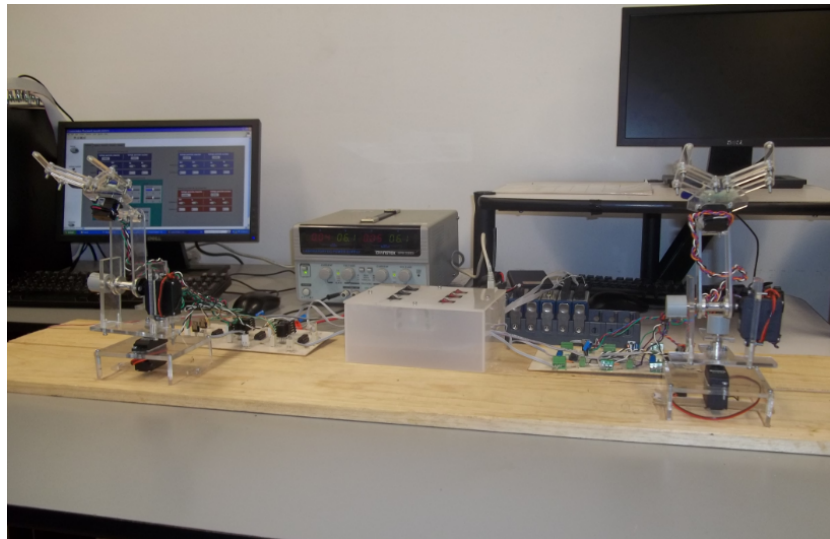


Figura 6.6 Presentación final del sistema maestro – esclavo Interconectado con las tarjetas de circuitos y sistema de control

7.- Resultados

Una vez construidos los dos robots, maestro y esclavo que conforman el sistema teleoperado, e implementado el control bilateral, las etapas de potencia y el acondicionamiento de los sensores, se procedió a ponerlo en funcionamiento y a analizar su comportamiento.

Se retoman los objetivos de control que se plantearon en el Cap. 1:

- **Control de seguimiento** de los movimientos del maestro por parte del esclavo.
- **Retroalimentación de la fuerza** percibida en el esclavo hacia el maestro

Se realizaron experimentos con el fin de evaluar el comportamiento del sistema actuando bajo la arquitectura de control FR y en qué grado se cumplió con los objetivos planteados. Los parámetros de control G_c y K_c se obtuvieron mediante sintonización, es decir, manipulándolos gradualmente y evaluando el comportamiento, hasta que éste fuera aceptable.

7.1.- Análisis del control de seguimiento

En el *Video 1*[20] podemos apreciar cómo el robot maestro es sometido a movimientos continuos en sus dos grados de libertad y en la pinza. Se puede apreciar también cómo se comporta el esclavo y como repite los movimientos en tiempo real. También existen ciertos instantes en los que se detiene alguno de los eslabones, ya sea la base, el brazo o la pinza. Los análisis presentados a continuación representan gráficamente el comportamiento de lo que se aprecia en este video.

1.- **Movimientos continuos** de los eslabones del maestro provocados por el operador, de manera que se produjera un constante seguimiento por parte del esclavo.

Primer caso: Bases

En este primer caso se presenta la gráfica con la comparación entre la posición del maestro y del esclavo para el primer grado de libertad al realizar movimientos continuos y la gráfica del error de posición. *Figura 7.1*

Se aprecia en la gráfica como **el esclavo va siguiendo la posición del maestro con un ligero retraso**, el cual produce un error entre las posiciones. En la gráfica del error se puede observar como oscila **alrededor de los 5°** presentando una magnitud **máxima de aproximadamente 10°**. Este error de posición se mantiene mientras el movimiento continúa y **disminuye rápidamente (aproximadamente tarda 250 [ms] en corregir) cuando el maestro realiza un cambio de dirección**.

Los valores de los parámetros para este experimento fueron: $K_c = 0.08$ y $G_c = 1.8$

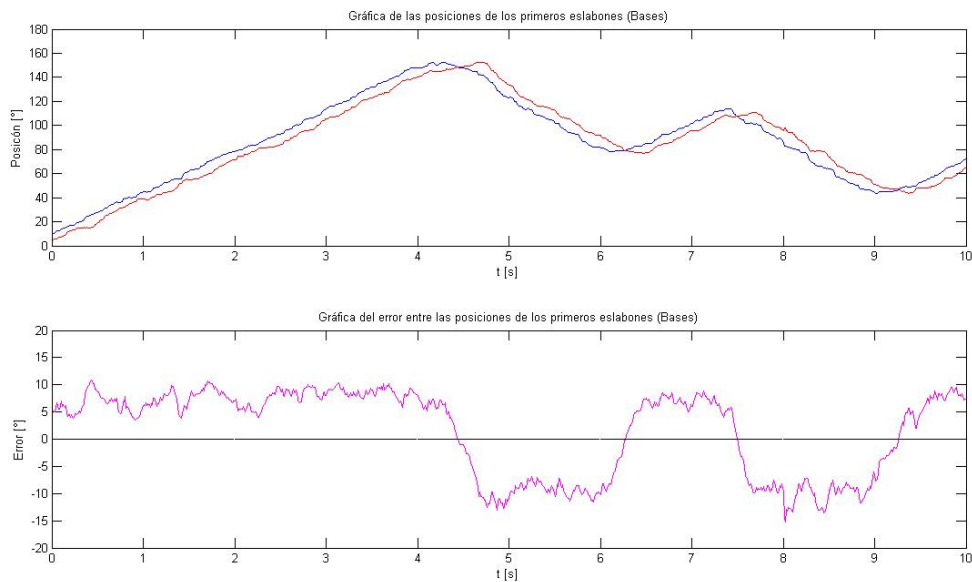


Figura 7.1 Movimientos continuos de las bases (*Maestro - Esclavo*)

Segundo caso: Brazos

Ahora se presentan como segundo caso, las gráficas del movimiento continuo del segundo grado de libertad de los robots. **Figura 7.2**

En este experimento se aprecia una **mayor magnitud del error de posición**, sobre todo cuando la dirección es positiva, es decir en los **movimientos ascendentes**. Recordemos que para este caso existen circunstancias diferentes a los movimientos de las bases, principalmente la **influencia de la fuerza de gravedad**. Es por eso que se presenta un mayor rango de error cuando los brazos se mueven hacia arriba. Se aprecia un **error máximo de 25°** así como **mayores oscilaciones** en los movimientos del esclavo. Al moverse hacia abajo el error es considerablemente menor. Aún así se aprecia un buen seguimiento por parte del esclavo, el cual **no tarda en corregir los cambios de dirección**.

Los valores de los parámetros para este experimento fueron: $Kc = 0.09$ y $Gc = 1.2$

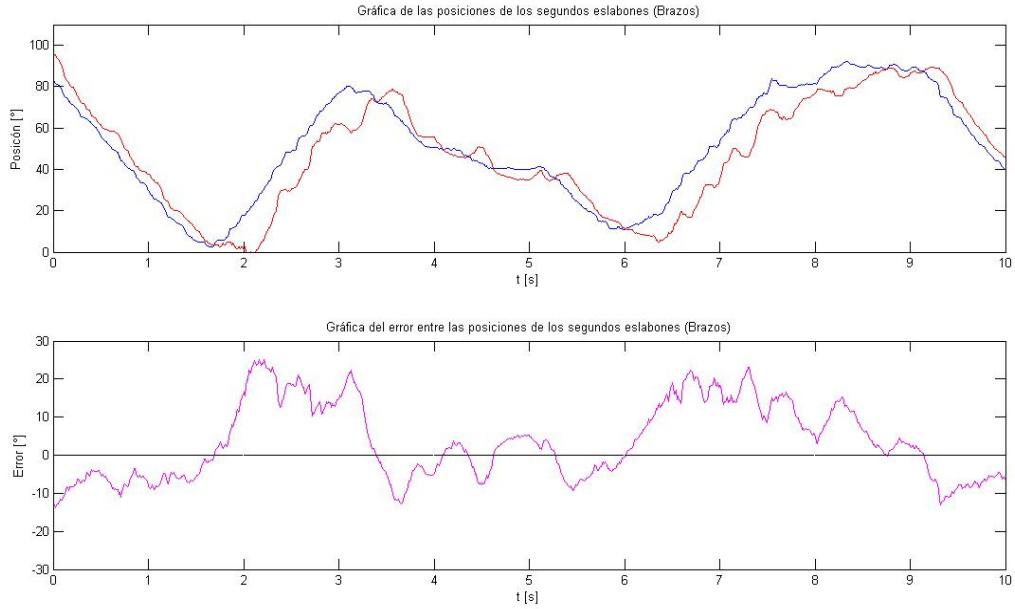


Figura 7.2 Movimientos continuos de los brazos (*Maestro - Esclavo*)

Tercer caso: Pinzas

Por último son mostradas las gráficas con el comportamiento de las pinzas durante el experimento de movimientos continuos. **Figura 7.3**

La gráfica claramente muestra como se logró un **buen control de seguimiento**. Mientras se está en movimiento, **el error es aproximadamente de 5°**, un error pequeño, bastante aceptable y prácticamente imperceptible para la velocidad con que se abren y cierran las pinzas. Al cambiar de dirección, el esclavo **corrige y disminuye rápidamente el error**, (100 [ms] aproximadamente es lo que tarda en corregir).

Los valores de los parámetros para este experimento fueron: $Kc = 0.269$ y $Gc = 0.367$

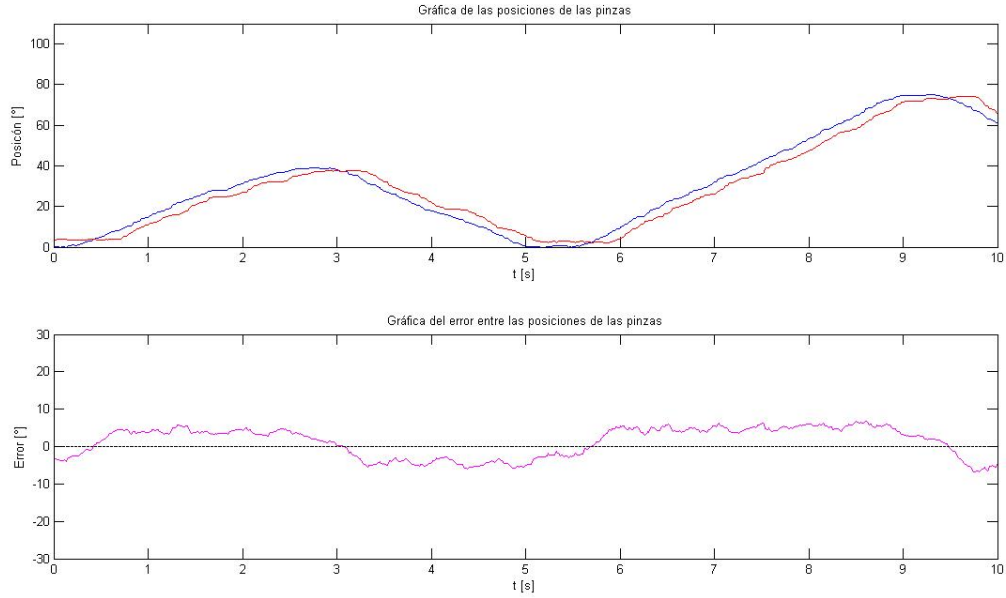


Figura 7.3 Movimientos continuos de las pinzas (*Maestro - Esclavo*)

2.- **Alto total.** Se evaluó el comportamiento de los eslabones tanto como de las pinzas, al momento detenerse totalmente. Los parámetros K_c y G_c son respectivamente los mismos que se utilizaron en las pruebas anteriores.

Primer caso: Bases

El primer caso de este experimento corresponde a las Bases. Se muestra la gráfica de las posiciones como la del error de posición. **Figura 7.4**

A partir del momento en el que la base del maestro empieza a detenerse, se aprecia en la gráfica como el **esclavo tarda aproximadamente 800[ms]**, un poco menos de un segundo en corregir el error y detenerse también. **Una respuesta bastante rápida considerando las velocidades de movimiento de los robots.**

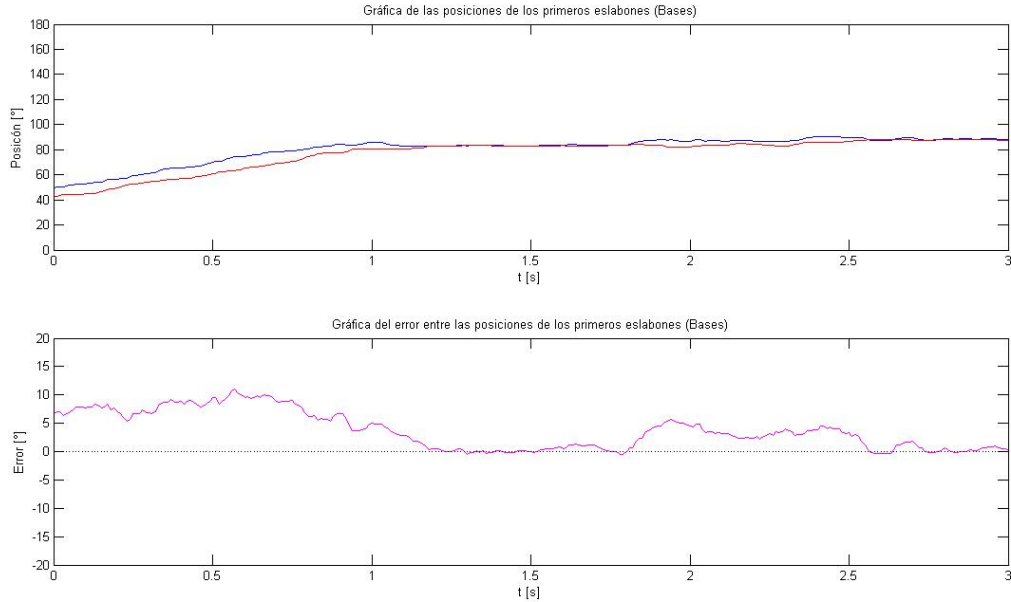


Figura 7.4 Alto total de las bases (*Maestro - Esclavo*)

Segundo caso: Brazos

De la misma manera, a partir de las gráficas de posición y error se analiza como segundo caso, el comportamiento de los brazos del sistema maestro - esclavo. **Figura 7.5**

El brazo del esclavo responde un poco más rápido que la base cuando el maestro se detiene. **Tarda aproximadamente 0.5 [s] en corregir la posición**, pero presenta un **error constante** una vez que se detienen. Esto **debido a la fuerza de gravedad**, que es la suficiente como para vencer un poco al brazo y hacerlo bajar un poco. **Este error producido es muy pequeño y prácticamente imperceptible.**

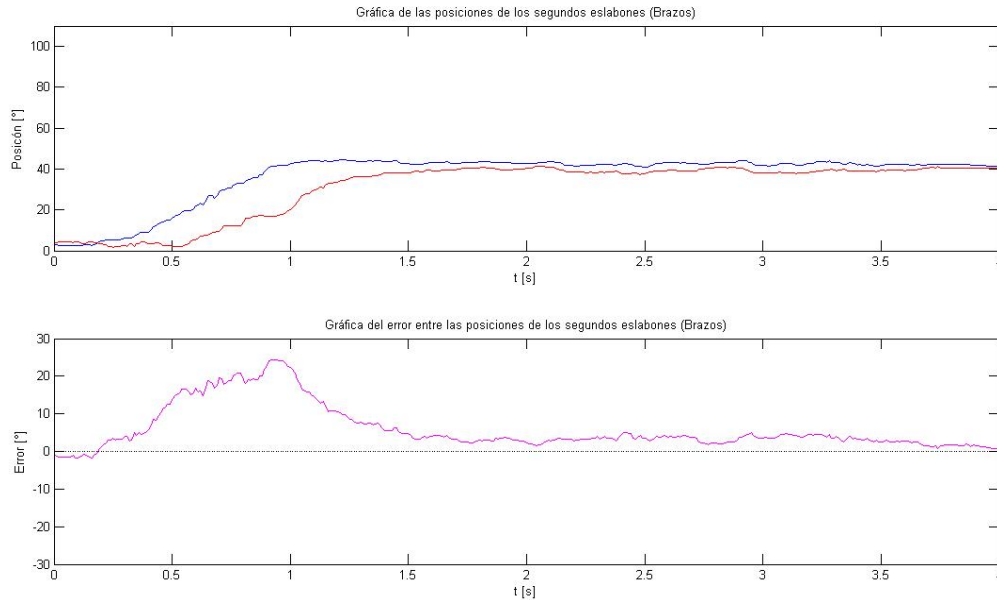


Figura 7.5 Alto total de los brazos (*Maestro - Esclavo*)

Tercer caso: Pinzas

Por último se presenta el análisis de las pinzas al someterse a movimiento y posteriormente un alto total. Las gráficas representan el comportamiento de las posiciones como el error entre maestro y esclavo. **Figura 7.6**

La pinza del esclavo **corrige aun más rápido** que sus dos eslabones, pero en este caso se aprecia que se mantiene un error constante cuando ya no hay movimiento. **Un error despreciable ya que es muy pequeño** y al observar el robot en funcionamiento no se alcanza a apreciar.

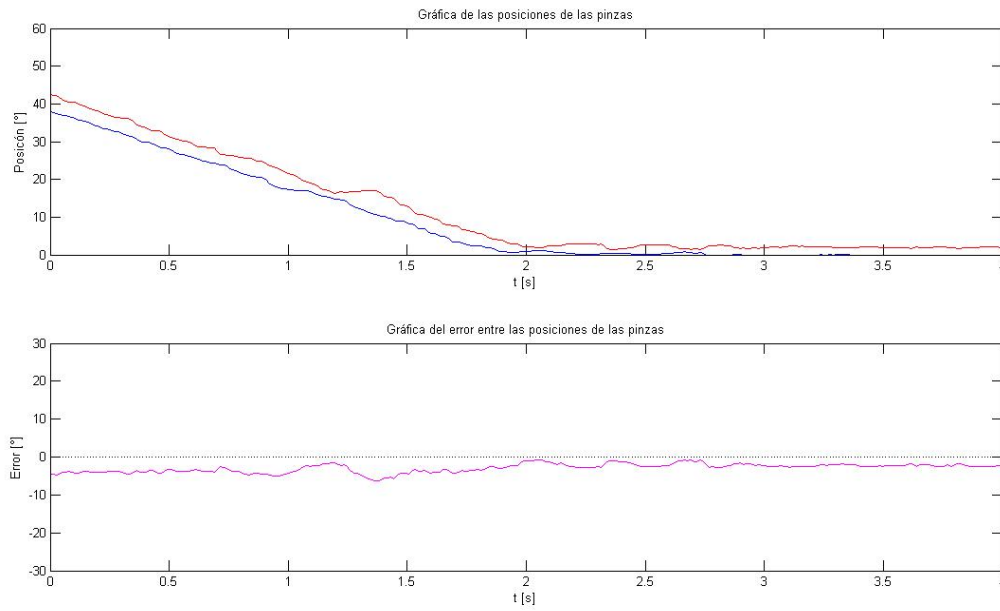


Figura 7.6 Alto total de las pinzas (*Maestro - Esclavo*)

7.2.- Análisis de la retroalimentación de fuerza

Para evaluar este objetivo de control simplemente **se impide el movimiento de los eslabones y de las pinzas del esclavo**, de manera que se pueda sentir la **oposición al movimiento en el maestro**. Las gráficas muestran cómo se comportan los voltajes de control ante el error que se produce al impedirle los movimientos al esclavo. También que tan rápido reacciona el maestro para impedir esos movimientos. Tomando como punto de referencia que la posición puede ir de 0 a 180°, los voltajes de control en el maestro significan lo siguiente:

1. Si el valor de la posición del maestro es **ascendente**, un **voltaje negativo** representa una **oposición al movimiento**.
2. Si el valor de la posición del maestro es **descendente**, un **voltaje positivo** representa una **oposición al movimiento**.

Primer caso: Bases

El primer caso de este experimento muestra el comportamiento de las bases. Durante 1.5 segundos el sistema está en reposo. Posteriormente se intenta mover la base del robot maestro, pero la del esclavo es detenida hasta los 7 segundos. En ese momento se suelta. Se muestran las gráficas de las posiciones, de los voltajes de control y del error de posición. **Figura 7.7**

Se aprecia en las gráficas cómo el **maestro reacciona para impedir el movimiento** de su base cuando el **error de posición es aproximadamente 10°**. Y lo hace casi instantáneamente mediante un **voltaje de control de aproximadamente 2.5 [V] negativos**. Lo sigue haciendo mediante una serie de pulsos de **voltaje con la magnitud suficiente para claramente sentir la oposición**. Se mantiene así durante el tiempo que se sigue intentando mover al maestro, por lo cual se muestra un error constante alrededor de los 15° durante ese intervalo de tiempo. **Una vez que se deja de mover al maestro o se mueve en el sentido contrario, el error disminuye y el voltaje de control vuelve a cero**.

Los parámetros de control para esta prueba fueron: $Kc = 0.08$ y $Gc = 1.8$

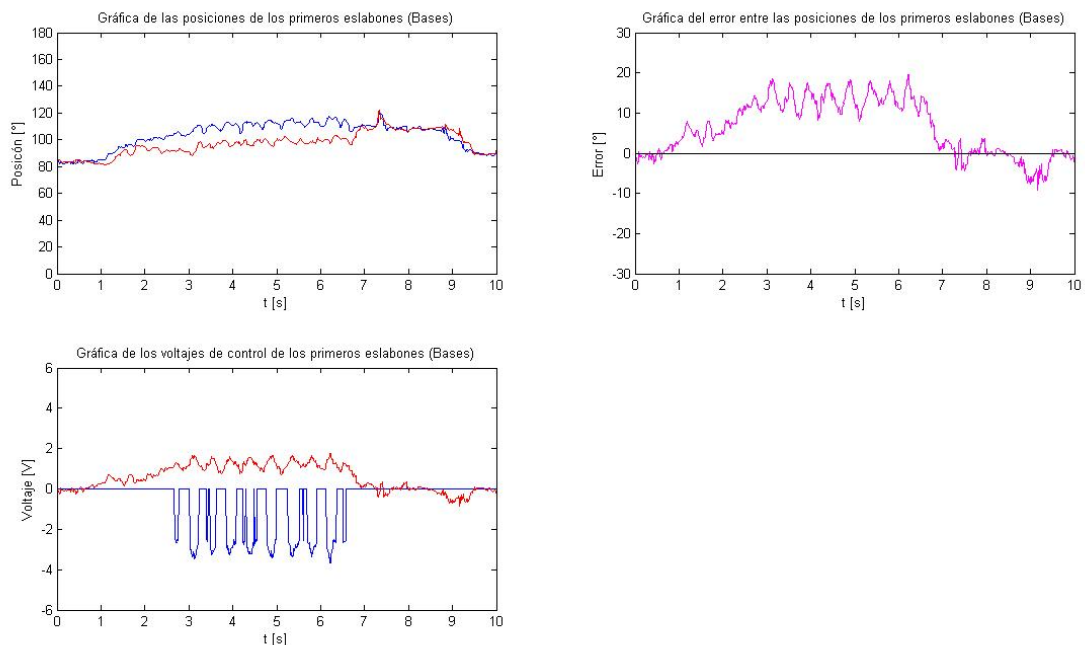


Figura 7.7 Retroalimentación de fuerza en las bases (**Maestro – Esclavo**)

Segundo caso: Brazos

El segundo caso corresponde al experimento en los brazos de los robots. Durante los primeros 4.5 segundos, se realizan movimientos continuos. Después se impide el movimiento del

esclavo hasta los 10 segundos. Las gráficas representan el comportamiento durante el experimento, se muestran gráficas de posición, voltajes de control y error de posición. **Figura 7.8**

Para este experimento se aumentó el valor de G_c para poder retroalimentar la fuerza de gravedad, poder apreciarla y percibirla al momento de subir el brazo en el maestro. $K_c = 0.09$ y $G_c = 1.2$

Es claro en las gráficas de posiciones como al mover **el brazo del maestro hacia arriba**, se presentan ligeras **oscilaciones en el esclavo**. Éstas se deben a la **acción de la fuerza de gravedad**, la cual se percibe en el maestro también, como lo demuestran las gráficas de voltaje de control, donde se presentan **varios pulsos de voltaje que dificultan un poco el movimiento**.

También se puede apreciar en la gráfica que a partir de 4.5 segundos aproximadamente se **obstaculiza el movimiento del esclavo**, el cual ya **no puede pasar de 20°**. Esto es inmediatamente **percibido en el maestro**, como se demuestra en la gráfica de voltajes de control, donde se puede apreciar como durante ese intervalo en el cual se le sigue tratando de mover **un voltaje está tratando de regresarlo**. Por eso también el error casi de 40° que se muestra, quizá demasiado sobrado, pero el cual se puede mejorar. *Cabe mencionar que en la programación de control se restringió el voltaje de control V_{mc} del maestro y regulado por el parámetro G_c , para que actué siempre y cuando sea mayor que 2.5 en magnitud.*

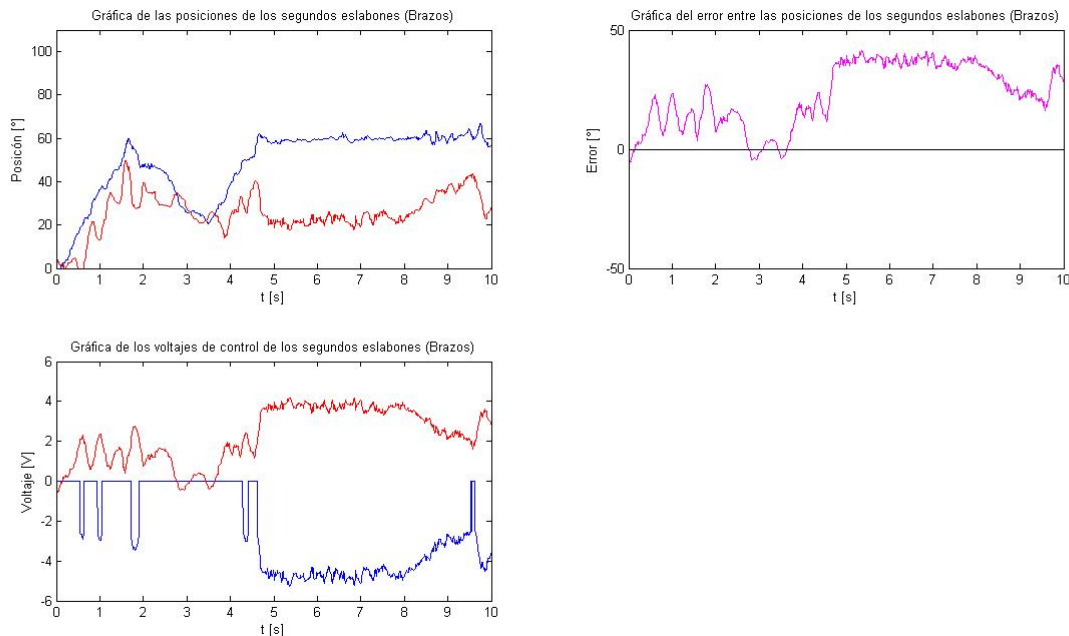


Figura 7.8 Retroalimentación de fuerza en los brazos (**Maestro - Esclavo**)

Tercer caso: Pinzas

Por último, en el tercer caso, se realizan movimientos continuos de las pinzas, hasta los 5 segundos, donde se impide que la pinza del esclavo se siga cerrando y se mantiene así hasta los 10 segundos, donde se libera. Las gráficas muestran el comportamiento de las pinzas durante el experimento. Se representan las posiciones, voltajes de control y error de posición. **Figura 7.9**

Al igual que en las pruebas para los dos primeros eslabones, bases y brazos, **se impide cerrar más la pinza del esclavo a partir de cierto punto**, lo cual produce una reacción en el maestro provocada por el voltaje de control. Este momento se aprecia claramente en las gráficas, ya que se mantiene un error constante y durante este tiempo **actúa un voltaje positivo que impide seguir cerrando la pinza del maestro**.

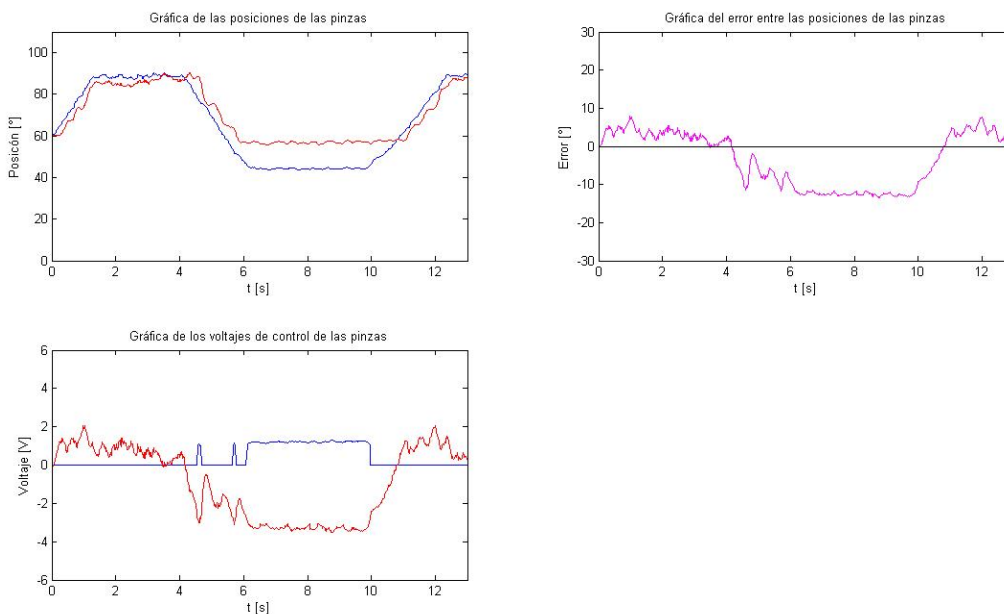


Figura 7.9 Retroalimentación de fuerza en las pinzas

El **Video 2** [21] muestra como se le impide el movimiento al brazo del esclavo y como se refleja esto directamente en el robot maestro a través de la retroalimentación de fuerza. También demuestra cómo funciona en ambos sentidos, lo gráficamente representa el signo positivo o negativo del voltaje de control.

El **Video 3** [22] demuestra como la fuerza de gravedad actúa sobre el esclavo y reflejándose en el maestro. Se observa en el video una primera parte donde no es posible apreciar en el maestro alguna prueba de esta fuerza. Posteriormente se modifica el parámetro G_c , que es precisamente el que controla la acción de retroalimentación de fuerza, por lo que al mover el brazo ya es posible notar y sentir ciertas vibraciones en el maestro provocadas por la acción de control que reflejan la acción de la fuerza de gravedad sobre el brazo esclavo.

7.3.- Análisis de la retroalimentación de fuerza del entorno virtual

El control que se implementó con un entorno virtual tiene como principal objetivo poder obtener la retroalimentación de fuerza a partir de límites virtuales de movimiento. Para evaluarlo se realizaron pruebas para cada eslabón y pinza del robot maestro.

Primer caso: Base

El primer caso corresponde a la base del robot. Se muestra su comportamiento mediante las gráficas de posición, error de posición y voltaje de control. El experimento consiste en mover la base libremente, para así poder percibir la retroalimentación de fuerza cuando el movimiento sobre pasa los límites establecidos de manera virtual. **Figura 7.10**

De la misma manera que los experimentos de retroalimentación de fuerza con el sistema de robots maestro – esclavo, se toma como punto de referencia que la posición puede ir de 0 a 180° y los voltajes de control en el maestro significan lo siguiente:

1. Si el valor de la posición del maestro es **ascendente**, un **voltaje negativo** representa una **oposición al movimiento**.
2. Si el valor de la posición del maestro es **descendente**, un **voltaje positivo** representa una **oposición al movimiento**.

Los **límites establecidos virtualmente** se aprecian en la gráfica de posiciones como **rectas horizontales y simulan límites físicos que impiden el movimiento del robot maestro**. Cuando la posición del maestro alcanza y llega a pasar esos límites, rápidamente se produce un **voltaje en el maestro que le impide pasar más allá y lo regresa**. Las magnitudes del error que se producen llegan a mantenerse muy bajas. Como se puede apreciar en la gráfica, es **más baja la magnitud al pasar del límite inferior que del superior**.

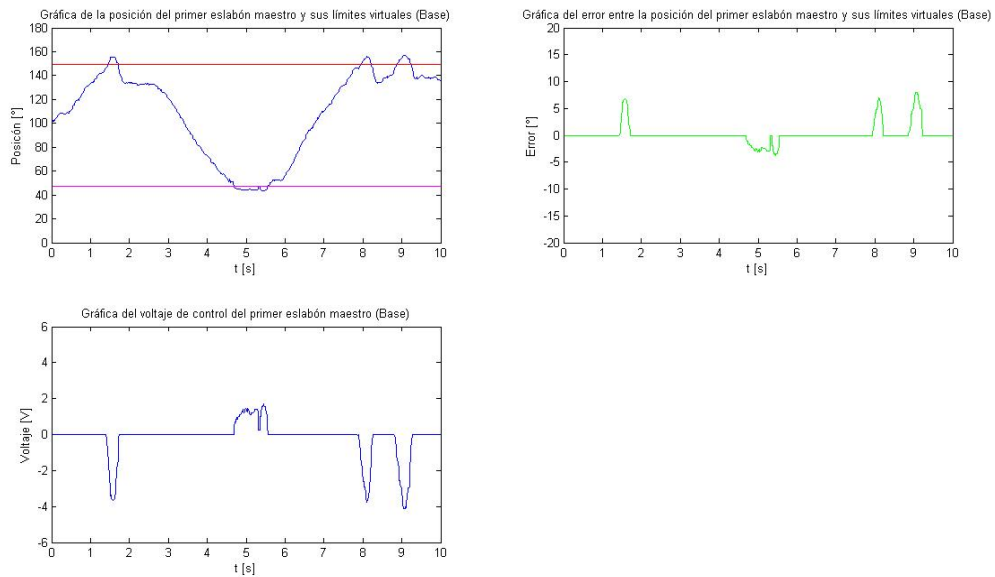


Figura 7.10 Retroalimentación de fuerza de la base con entorno virtual
 Base (*Maestro*) Entorno Virtual (*Límite virtual superior* – *Límite virtual inferior*)

Segundo caso: Brazo

El segundo caso de este experimento corresponde a los movimientos del brazo del robot maestro y la respuesta a límites establecidos en el entorno virtual. De la misma manera, se muestran gráficamente las posiciones, error de posición y voltaje de control. **Figura 7.11**

El brazo maestro es impedido de igual manera por medio de voltajes que se producen al **sobrepasar los límites**. Es clara la **rapidez en que se corrige el error**, más cuando se trata de pasar el límite inferior.

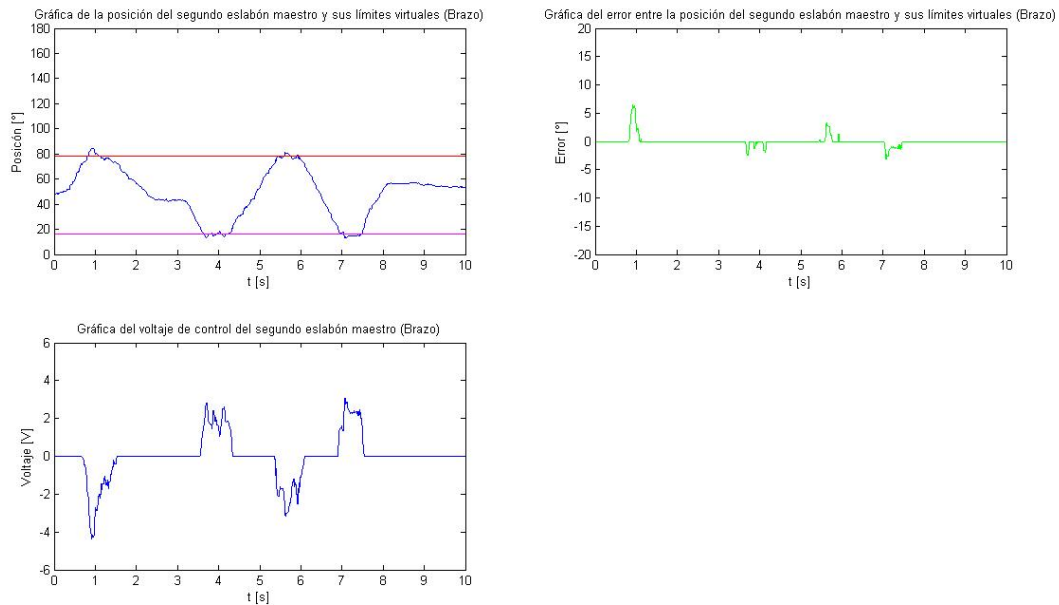


Figura 7.11 Retroalimentación de fuerza del brazo con entorno virtual
 Brazo (**Maestro**) Entorno Virtual (**Límite virtual superior** – **Límite virtual inferior**)

Tercer caso: Pinza

En el tercer caso del experimento, el cual corresponde a la pinza del robot. Se establece solamente un límite virtual y se muestra su comportamiento mediante las gráficas de posición, error de posición y voltaje de control. **Figura 7.12**

El entorno virtual simula un objeto a partir de un límite en la posición, éste **impide a la pinza del maestro cerrar más cuando se le sobrepasa**. Se aprecia cómo un **poco menos de 2 [V]** son suficientes para detener el movimiento de la pinza mientras se le sigue intentando cerrar.

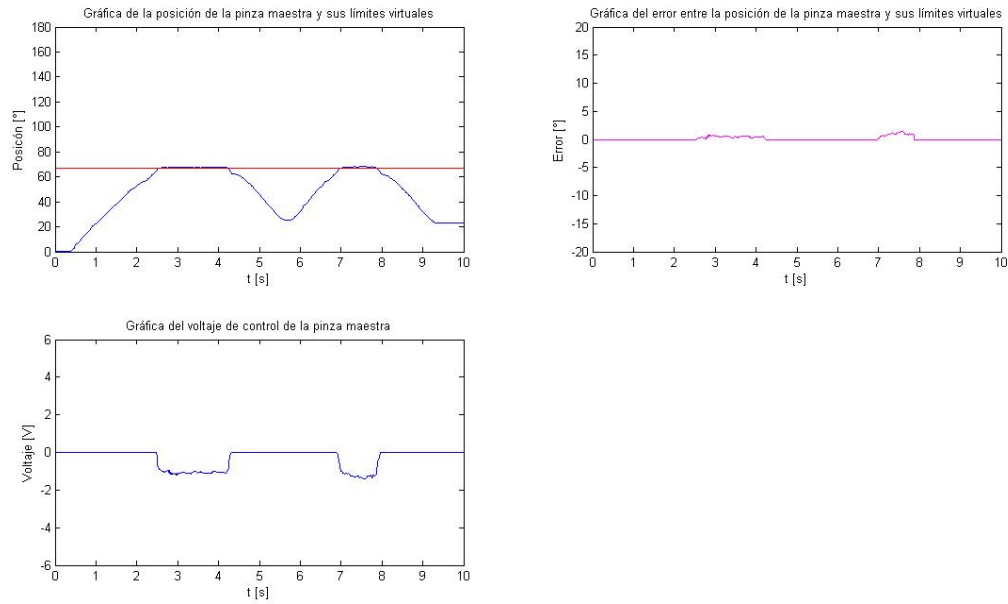


Figura 7.12 Retroalimentación de fuerza con entorno virtual de la pinza
Pinza (Maestro) Entorno Virtual (Límite virtual)

En el **Video 4** [23] se muestra cómo funciona el robot maestro al controlar un entorno virtual. En la pantalla se pueden apreciar los límites virtuales y como se reflejan estos directamente en el maestro al querer sobrepasarlos. Los límites establecidos virtualmente provocan oposiciones al movimiento mediante acciones de control sobre los motores de los eslabones del maestro, tanto en la base, el brazo y la pinza.

8.- Conclusiones

Se diseñó un sistema de robótico maestro – esclavo siguiendo una metodología basada en requerimientos y necesidades. La identificación de las funciones principales que realiza el sistema fue crítica para que a partir de ellas se procediera a encontrar la mejor manera de lograrlas: 1) Generar movimiento, 2) Medir posición, 3) Comunicar, 4) Transformar energía a movimiento, 5) Tomar objetos, 8) Transformar energía a fuerza.

Mediante el estudio de varias morfologías que el sistema podía tener, se seleccionó la más adecuada según las necesidades encontradas y la misión planteada.

A partir de matrices, se llevó a cabo un proceso de selección para poder elegir los componentes críticos que resolvieron las funciones principales del sistema maestro – esclavo. Estos componentes principales fueron: Potenciometro de precisión, servomotor utilizado como motorreductor, pizas de acrílico y aluminio.

Se realizó un Diseño Asistido por Computadora (CAD) para poder visualizar mejor el diseño final y posteriormente manufacturar las piezas de los robots maestro y esclavo.

Se realizó una introducción a las arquitecturas de control más básicas: *Position Error*, *Force Reflection* y *Shared Compliance Control*. Pero el trabajo se limitó a solamente implementar la arquitectura *Force Reflection*. En el caso particular, donde maestro y esclavo estarían a una distancia relativamente cercana y debido a que el control tanto de la zona local como de la zona local se hicieron en la misma PC, *Position Error* y *Force Reflection* se comportarían de la misma manera.

Mediante el software LabVIEW® 10 de NI se programó el control bilateral Force Reflection y se evaluaron los objetivos de control planteados: control de seguimiento y retroalimentación de fuerza.

En el control de seguimiento se produjeron errores de posición relativamente pequeños para la velocidad con que es capaz de manipularse el robot maestro. Al moverlo continuamente y realizar cambios de dirección en los eslabones, se producía un rápido ajuste por parte del esclavo y continuar así con el seguimiento. Donde se apreció un mayor error, pero aún así no tan significativo, fue al mover los brazos de los robots y esto debido a la acción constante que produce la aceleración de la gravedad sobre los mismos. Se consiguió un buen control de seguimiento y es más apreciable si se observa el funcionamiento de los robots, donde se puede afirmar con mayor seguridad que los errores que se aprecian en las gráficas son bastante aceptables.

Al analizar las gráficas de retroalimentación de fuerza en cada eslabón, se aprecia la reacción que se produce en el maestro mediante voltajes de control, la cual es bastante rápida. También se aprecia en las gráficas que si se seguía intentando moverlo, el error se puede mantener, pero llega a un punto donde el maestro ya no lo permite. Donde más se llegó a incrementar este error fue en los brazos.

Una clara muestra de la retroalimentación de fuerza se dio al tratar de subir el brazo del maestro y sentir como era un poco más difícil ya que el esclavo se oponía un poco. La acción de la aceleración de la gravedad sobre el robot esclavo era retroalimentada en cierto grado hacia el maestro. En las pinzas era mucho más claro cómo ya no se podía seguir cerrando la del robot maestro.

Este objetivo se logró adecuadamente, ya que era muy clara la percepción de la oposición al movimiento en los eslabones del robot maestro al obstaculizar al esclavo. Al igual que en el control de seguimiento, es mucho más fácil evaluar la retroalimentación de fuerza manipulando directamente el maestro y sintiendo la oposición que simplemente analizando las gráficas.

Esta arquitectura de control puede ser suficiente para retroalimentar la fuerza de aplicaciones donde se necesite manipular objetos que no sean muy frágiles, que se puedan tomar mediante un manipulador sin miedo a causarles daño. Para objetos frágiles se necesitaría una mejora o un control más complejo de manera que se obtuviera una reacción mucho más rápida y que permita una mayor sensibilidad en el maestro, quizá complementado con percepción táctil.

Se realizó un control con un entorno virtual, es decir mediante una interfaz en la computadora, se podían establecer límites a las posiciones de los eslabones del maestro, que simularan límites físicos. Esto hacía que al tratar de sobrepasarlos inmediatamente se producía una reacción en los motores de los eslabones del maestro los cuales impedían seguir moviéndolo. En este control se produjo una reacción más rápida y por lo tanto errores en magnitud más pequeños. Este control resultó muy interesante ya que abre la opción a un sin número de aplicaciones como lo pueden ser en simuladores, videojuegos o para entrenamiento antes de usar un equipo especial; y puede bastar con un control básico como el que se implementó ya que funcionó adecuadamente y con un poco de mejoras podría funcionar perfectamente.

La etapa de amplificación de señal proveniente de los potenciómetros para medir la posición funcionó adecuadamente, aunque fue necesario realizar algunas medidas para disminuir el ruido en la señales provocado al conectar los motores. Físicamente en el circuito se colocó un condensador de 220 [μ F] en las terminales de cada motor para filtrar y eliminar esa variación en la señales. En el programa de control, inmediatamente al leer la señal de los potenciómetros, se podía realizar una especie de “filtro” que en realidad solamente muestreaba la señal y obtenía la media. Esto eliminaba el ruido, pero sacrificaba un poco de velocidad dependiendo del número de muestras. Aún se podrían lograr mejoras en éste aspecto mediante el diseño de filtros más complejos.

La etapa de potencia tipo B implementada, apoyada con amplificador operacional para eliminar distorsión en la señal por la zona muerta funcionó de manera correcta permitiendo el paso de voltajes negativos y positivos hacia los motores y suministrando la corriente necesaria.

En general el sistema de control bilateral funcionó adecuadamente y se cumplieron satisfactoriamente con los objetivos de control que se plantearon. Faltó realizar un poco más de pruebas para conocer cómo afectaría un mayor retraso en la información, lo cual sería importante si

por ejemplo se piensa en una comunicación inalámbrica entre maestro y esclavo, y además que las zonas local y remota estuvieran a una distancia mucho mayor. Este retraso en la información se podría simular en la programación.

Los robots construidos se pueden utilizar como fines didácticos y hacer demostraciones a los estudiantes de una aplicación de control automático y teleoperación. Pero se encontraron puntos que pueden hacer que se mejore su funcionamiento.

La pinza mecánica que se utilizó como órgano terminal, puede ser rediseñada un poco y manufacturada con mayor precisión para evitar “juego” al mover los eslabones que la forman. Este problema se identificó al ver como al empezar a moverse el motor, los eslabones tardaban un poco más en empezar a hacerlo.

Para ampliar un poco el área de trabajo se podría hacer otro rediseño y poder así agregarle un grado de libertad más.

Quizá una de las conclusiones más importantes o mejoras que se identificaron y que mejorarían en gran medida el funcionamiento del sistema y le podrían proveer mayor capacidad para realizar tareas adecuadamente es que el maestro debe de ser distinto al esclavo. Construir maestro y esclavo de igual forma y características sirve para poder evaluar y comprobar mejor el control de seguimiento, ya que se debe apreciar cómo los robots se mueven de idéntica manera. Pero al tratar de manipular al maestro, su forma y su configuración no ayuda para poder hacerlo cómodamente y de manera más precisa. Si se diseña una configuración para el maestro más ergonómica para el operador, permitiría una mayor facilidad para moverlo y más importante, el operador podría tener una mayor sensibilidad para percibir la retroalimentación de fuerza, lo cual permitiría tener una mayor precisión en las tareas que se realicen con el robot esclavo.

Es claro que entre más información posea el operador mayor la precisión y la eficiencia con la que podrá realizar las tareas en la zona remota. Esta información puede ser visual, auditiva y háptica. Y mediante ésta, el operador es capaz de adaptarse a las características del sistema esclavo que manipula desde la zona local. El operador es capaz de compensar los errores que él aprecie directamente y mediante la práctica puede lograr una teleoperación adecuada y llevar a cabo la tarea. El ser humano posee su propia sensibilidad y capacidad de adaptación. En un sistema teleoperado la práctica es importante.

Estas ideas, de diseñar una configuración ergonómica para el maestro, junto con la implementación y prueba de otras arquitecturas de control, como lo son las que necesitan medir directamente la fuerza del ambiente sobre el esclavo y sobre todo la práctica del operador para utilizar el sistema pueden lograr el control de un sistema bilateral capaz de funcionar con alta precisión y con la más alta comodidad para el operador humano.

9.- Referencias

- [1] Nuño Ortega E., Basañez Villaluenga L. (2004). **Teleoperación: técnicas, aplicaciones, entorno sensorial y teleoperación inteligente**. Instituto de Organización y Control de Sistemas Industriales de la Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona, España, abril del 2004.
- [2] Hokayem Peter F., Spong Mark W. (2006). **Bilateral teleoperation: An historical survey**. Coordinated Science Laboratory, University of Illinois. Automatica, Volume 42 (2006), pp. 2035-2057.
- [3] Barrientos A., Peñin L. F., Balaguer C., Santoja R. A. **Fundamentos de Robótica**. Primera edición. McGraw-Hill. España, 1997.
- [4] Ballesteros S. **Percepción háptica de objetos y patrones realizados: una revisión**. Departamento de Psicología Básica, Universidad Nacional de Educación a Distancia. Psicothema, 1993, Volumen 5, Número 2, pp. 311-321.
- [5] Sclater N., Chironis N. P. **Mechanisms and Mechanical Devices Sourcebook**. Third edition. McGraw-Hill. USA, 2001.
- [6] AUTOMATAS, **Actuadores neumáticos**. Página electrónica consultada en noviembre del 2010, disponible en < <http://automatastr.galeon.com/a-actuador.htm>>.
- [7] Chapman, S. J. **Máquinas Eléctricas**. Cuarta edición. McGraw-Hill Interamericana. México, 2005.
- [8] Todorobot, **Motores de corriente continua (DC)**. Página electrónica consultada en noviembre del 2010, disponible en < <http://www.todorobot.com.ar/documentos/dc-motor.pdf>>.
- [9] Scribd, **Motor de corriente alterna**. Página electrónica consultada en noviembre del 2010, disponible en < <http://es.scribd.com/doc/15980578/Motor-de-Corriente-Alterna>>.
- [10] Brushless, **Motores Brushless**, características. Página electrónica consultada en noviembre del 2010, disponible en < <http://www.brushless-rc.com.ar/Caracteristicas.html>>.
- [11] Electrónica Unicrom, **Resistencia variable: Potenciómetro, reóstato**. Página electrónica consultada en noviembre del 2010, disponible en <http://www.unicrom.com/Tut_resistenciavariable.asp>.
- [12] ROBOTS, **Control de motores de CC, Circuitos con realimentación**, Página electrónica consultada en noviembre del 2010, disponible en < http://axxon.com.ar/rob/MotorCC_circuitosrealimentados.htm>.

- [13] ISA (Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad de Valladolid), **Sensores**. Página electrónica consultada en noviembre del 2010, disponible en <<http://www.isa.cie.uva.es/~maria/sensores.pdf>>
- [14] Bogado Torres J. M. (2007) **Control bilateral de robots teleoperados por convergencia de estados**, Tesis Doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Universidad Politécnica de Madrid. España, 2007.
- [15] Sedra A. S., Smith K. C. **Microelectronic Circuits**. Fifth edition. Oxford University Press. USA, 2004.
- [16] Ulrich K. T., Eppinger S. D. **Diseño y desarrollo de productos**. Cuarta edición. Mc Graw-Hill. México, 2009.
- [17] Acara P., Melchiorri C. (2002). **Control schemes for teleoperation with time delay: A comparative study**. Departamento de Electrónica Informática y Sistemas (DEIS), Universidad de Bolonia. Robotics and Autonomus Systems, Volumen 38 (2002), pp. 49-64.
- [18] Drake Moyano J. M., Departamento de Electrónica y Computadores. **Amplificadores de potencia**. Escuela Técnica de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación, Universidad de Cantabria. Santander, España 2005
- [19] National Instruments. **CompactRIO Developers Guide**. December 2009.
- [20] Video 1. **Tesis control bilateral 1**. Página electrónica YouTube.
<<http://www.youtube.com/watch?v=E8xVRxmL61Q&feature=g-upl>>
- [21] Video 2. **Tesis control bilateral 2**. Página electrónica YouTube
<http://www.youtube.com/watch?v=tc_ai-2iWb0&feature=g-upl>
- [22] Video 3. **Tesis control bilateral 3**. Página electrónica YouTube
<<http://www.youtube.com/watch?v=tH0qbg5ohjc&feature=g-upl>>
- [23] Video 4. **Tesis control bilateral 4**. Página electrónica YouTube
<<http://www.youtube.com/watch?v=bEBONAZSV-k&feature=g-upl>>

Apéndices

A.- Planos

