

# Teleoperación de Robots con Reflexión de Fuerza y Control de Impedancia: Un Controlador Manual

José F. Postigo, Vicente A. Mut, Ricardo O. Carelli, Luis A. Baigorria y Benjamín R. Kuchen

Instituto de Automática (INAUT), Universidad Nacional de San Juan  
Av. San Martín (oeste) 1109  
J5400ARL, San Juan, Argentina  
Tel. +54-264-4213303. Fax: +54-264-4213672  
e-mail : jpostigo@inaut.unsj.edu.ar

*Artículo recibido en agosto 25, 1999; aceptado en julio 30, 2000*

## Resumen

*En este trabajo se presenta el desarrollo y experimentación de un controlador manual (hand-controller), de tres grados de libertad, dos de fuerza y uno de par, con reflexión de fuerza en dos de sus ejes y de par en el restante. Este controlador manual se desarrolló tanto para su uso en sistemas de teleoperación de robots manipuladores como de robots móviles. Se han efectuado experimentos utilizando, como manipulador remoto, una garra robótica, con buenos resultados de desempeño del dispositivo construido.*

*Asimismo, se ha implementado un control de impedancia en el sistema remoto que permite realizar tareas de interacción con el medio (pulido, inserción, desbaste, etc.) en las cuales sea necesario controlar y "acomodar" las fuerzas y pares de interacción cuidando de no dañar al robot remoto ni al objeto con el que se interactúa.*

*Finalmente, los ensayos realizados muestran un correcto ajuste del controlador manual a las tolerancias especificadas para las tareas mencionadas.*

**Palabras clave:** Controlador Manual, Robótica, Teleoperación de Robots, Interfase Hombre-Máquina, Control de Fuerza-Posición.

## 1 Introducción

La teleoperación de manipuladores robóticos ha experimentado un crecimiento considerable en las últimas dos décadas. Las principales razones para esta tendencia son la necesidad de mayor seguridad para el ser humano y a su vez costos más bajos en los procesos automáticos. Algunas tareas, en las cuales se pueden aplicar los principios de la teleoperación robótica, abarcan un amplio espectro: reparaciones en reactores nucleares, reparaciones de elementos en naves espaciales comandadas desde tierra, reparación de satélites en órbita, manejo de sustancias radiactivas, desactivación de artefactos explosivos, búsquedas submarinas, extinción de fuegos a distancia, tareas mineras en túneles peligrosos, reparaciones de líneas eléctricas, aplicaciones en agricultura, telecirugía, telemedicina, etc. (Kuleshov, V.S., et al., 1988)

Los sistemas de teleoperación están constituidos, en general, por dos manipuladores robóticos (uno local y otro remoto), un canal de comunicación, el medio ambiente con el que interactúa el robot remoto y el operador humano. Los manipuladores están parcialmente controlados por el operador humano y por sus propios algoritmos de control local, en una estructura de control compartido (Das, et al., 1992; Guo, C., et al., 1995; J. Postigo, et al., 1998).

En la telemanipulación de objetos, el ser humano necesita tener control o una presencia efectiva en el sitio remoto. Para ello necesita sistemas de teleoperación que le permitan "transportar" sus capacidades y destrezas, como así también su inteligencia, al sitio remoto. En las tareas de teleoperación, el operador utiliza principalmente dos de sus sentidos: la visión y la percepción de fuerzas. Uno de los objetivos principales de la telemanipulación u operación remota es la transparencia

total de la interfase que se utilice. Para ello, los actuadores de los manipuladores robóticos ejecutan sus comandos, los sensores realimentan la información adquirida y el operador siente como si estuviera realmente operando el dispositivo en el lugar remoto (Sheridan, T. B., 1992).

En este trabajo se presenta el desarrollo de un controlador manual local (hand-controller), de tres grados de libertad, dos de posición y uno de par, con reflexión de fuerza en dos de sus ejes y de par en el restante, para su uso en sistemas de teleoperación de robots manipuladores o de vehículos autoguiados. Se utiliza una computadora de tipo IBM-PC Pentium como interfase entre el manipulador local y el dispositivo remoto del sistema de teleoperación. La computadora se encarga del manejo de las comunicaciones y a través de ella, el usuario tiene la información de lo que sucede en ambos extremos del sistema de teleoperación: en el manipulador local y en el sitio remoto. El sistema permite la modificación de distintos parámetros del sistema de control de los manipuladores, tales como las ganancias de los lazos de control, la velocidad de transmisión, etc. La comunicación se realiza de forma bidireccional ("full duplex"), la cual se administra con un programa residente en la PC implementado en lenguaje C++ (Pappas, C.H., et. al., 1993).

En la estructura de control, definida en el presente trabajo, el manipulador local refleja las fuerzas y pares que se producen por interacción del robot remoto con el medio. La estrategia de control permite conmutar entre algoritmos de control de posición o algoritmos de control de fuerza en cada eje de movimiento independientemente, dependiendo si se trata de movimiento libre o movimiento restringido del dispositivo

remoto. El manipulador remoto opera en control de posición, recibiendo como referencia la posición sensada en el manipulador local. Cada eje del controlador manual opera con dicha configuración de manera independiente del resto.

El artículo se organiza de la siguiente manera: en la Sección 2 se proporcionan las características de funcionamiento y de configuración generales del controlador manual para teleoperación robótica. En la Sección 3 se describe la estructura de control propuesta, mientras que en la Sección 4 se muestran los experimentos realizados utilizando el controlador manual en un sistema de teleoperación. Finalmente, en la sección 5 se extraen las conclusiones y se plantean los trabajos futuros.

## 2 Controlador Manual (Hand-Controller) para Teleoperación Robótica

A continuación se describirá en detalle el controlador manual (hand-controller) desarrollado y construido para la teleoperación de manipuladores robóticos o de robots móviles.

### 2.1 Funcionamiento del Controlador Manual

Para realizar el control del manipulador local (hand-controller), cumpliendo con los planteamientos iniciales de versatilidad, entorno amigable al usuario y optimización de los circuitos electrónicos, se establece el siguiente esquema general de funcionamiento según se indica en la figura 1.

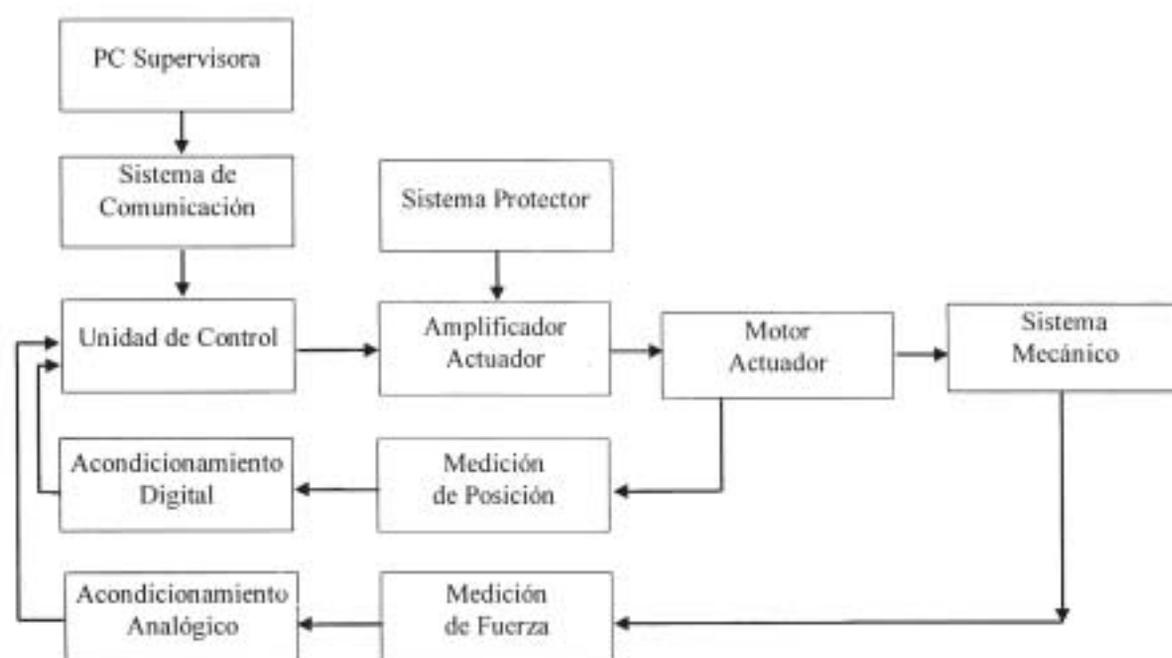


Figura 1: Esquema general de funcionamiento del controlador manual

En esta figura, se destacan los siguientes bloques funcionales:

- **PC supervisora:** Es la interfaz gráfica con el usuario. Se encarga de administrar la comunicación entre el manipulador local (hand-controller) y el manipulador o dispositivo remoto.
- **Sistema de comunicación:** Se encarga de la transmisión de las señales digitales de información a la velocidad especificada. El protocolo que se emplea es RS-232C (BlackBox, 2001).
- **Unidad de control:** Conformar el elemento principal de la operación del controlador manual, y radica en el microcontrolador 80C196KC. Su tarea consiste en ejecutar los algoritmos en lenguaje ensamblador que constituyen la estructura de control de posición y de fuerza. Esta unidad genera las señales eléctricas de Modulación por Ancho de Pulso ("PWM", en inglés), sentido de giro (las acciones de control que comandan al actuador a través del bloque amplificador), etc. En este bloque se han programado algoritmos de control de cada una de las variables a controlar; opera con señales de realimentación provenientes de diferentes bloques de circuitos electrónicos de medición, y señales provenientes del PC supervisor.
- **Amplificador-Actuador:** Realiza la adaptación de señales de acción de control originadas en el bloque de control, para aplicarlas al motor-actuador. Este sistema se encarga de generar las señales que comandan los motores en base a la información proveniente del bloque de control.
- **Sistema de protección:** Protege los motores de los tres ejes del controlador manual durante su operación, para no rebasar la corriente nominal de los mismos.
- **Motor-Actuador:** Soporta los pares y las fuerzas resistentes que se aplican sobre el extremo operativo del controlador manual; se encarga de transmitir los movimientos al sistema mecánico, así también la fuerza reflejada desde el sitio remoto.
- **Sistema Mecánico:** Está formado por la estructura de transmisión de movimiento al extremo operativo y por la carcasa de soporte.
- **Bloque de Medición de Fuerzas:** Está constituido por los dispositivos encargados de obtener las señales provenientes de los puentes de Wheatstone.
- **Acondicionamiento Analógico:** Da el formato eléctrico adecuado a las señales de fuerza sensadas.
- **Medición de Posición:** Realiza la función de sensado de posición de cada uno de los 3 ejes del controlador manual.
- **Acondicionamiento Digital:** Después de obtenerse, las señales del bloque de medición de posición se procesan

en el bloque de acondicionamiento digital, dándoles un formato adecuado para su interpretación en la unidad de control. Este bloque genera señales de sentido de giro y frecuencia de cada uno de los motores.

La vinculación de todos los grupos funcionales descriptos, permite realizar el control del controlador manual, cumpliendo con los requisitos planteados de funcionalidad deseados.

## 2.2 Configuración de Comunicación del Controlador Manual

Están previstas varias configuraciones de conexión del controlador manual (bajo ciertas limitaciones que mencionaremos cuando se describan cada una de ellas). Las configuraciones son:

- **Controlador Manual - Ambiente Simulado:** el controlador manual se conecta a una PC que contenga un programa que simule un entorno virtual remoto. La limitación de este esquema es que el programa debe administrar la comunicación con el controlador manual, respetando el protocolo que se definió para las aplicaciones desarrolladas. Este esquema se aprecia en la figura 2.

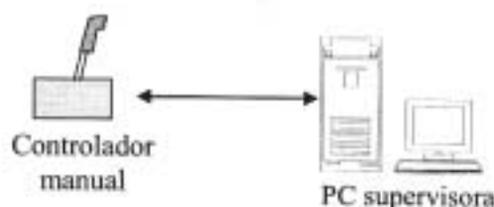


Figura 2: Configuración controlador manual - ambiente simulado

- **Controlador Manual-PC - PC-Dispositivo remoto:** En este modo el controlador manual está conectado a la PC que actúa como supervisor y desde allí la información fluye hacia otra PC remota la cual está manejando otro dispositivo (ya sea un manipulador robótico o un robot móvil). Este esquema no tiene limitaciones en cuanto al sistema local ya que el programa, desarrollado en lenguaje C++ para la PC, se adapta a esta función. Se debe prever que la PC que maneja el dispositivo remoto cumpla con el protocolo de comunicación que se describe más adelante.

Este esquema se muestra en la figura 3.

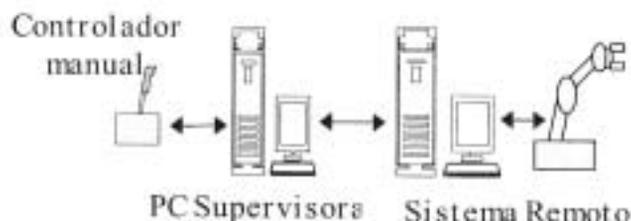


Figura 3: Configuración controlador manual-PC - PC-dispositivo remoto

- Controlador Manual-PC - Dispositivo Remoto: en este caso ambos: el controlador manual y el dispositivo remoto están conectados a la PC. La PC administra la comunicación y actúa de interfase con el usuario. Este esquema es el que se ha empleado para el desarrollo y la experimentación con el controlador manual que se presenta en este trabajo. Se debe notar, que el sistema remoto emplea el protocolo de comunicación que utiliza el controlador manual. Este esquema se muestra en la figura 4.

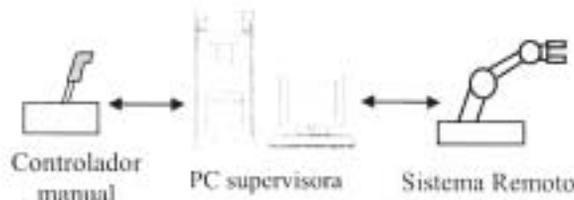


Figura 4: Configuración controlador manual-PC - dispositivo remoto

- Controlador Manual - Manipulador Remoto: El controlador está conectado directamente al manipulador remoto sin intervención de la PC supervisora. En este caso, no dispondremos de la visualización de información que tendríamos al disponer de un PC supervisor, como en los esquemas anteriores. El manipulador remoto será encargado de administrar la comunicación con el controlador manual respetando su protocolo. Este esquema se visualiza en la figura 5.

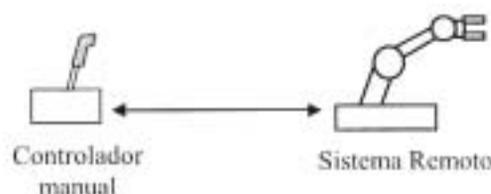


Figura 5: Configuración controlador manual - dispositivo remoto

## 2.3 Características Mecánicas y Electrónicas

El equipo construido consta de una base de acero sobre la que se disponen todos los componentes mecánicos. Este dispositivo permite, de acuerdo a dichos componentes mecánicos, realizar movimientos en tres ejes ( $x, y, z$ ), lo que permite disponer de un controlador manual de tres grados de libertad. En la fotografía de la figura 6 se observan los componentes mecánicos y electrónicos del controlador manual.

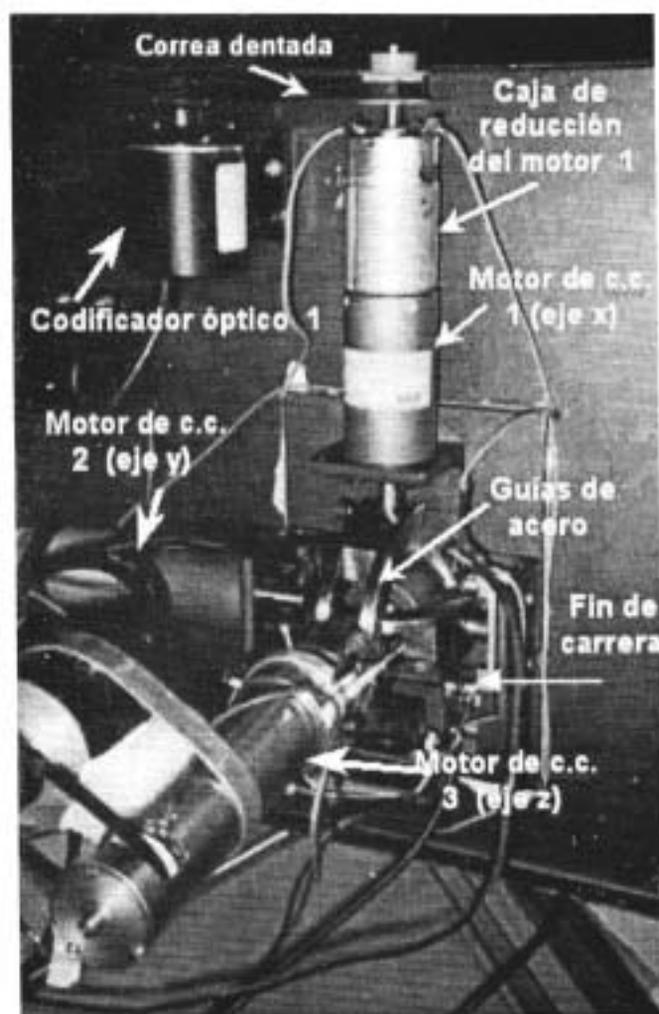


Figura 6: Vista superior de la estructura mecánica del controlador manual desarrollado

La unión mecánica para realizar el movimiento en los ejes  $x$  e  $y$  se realiza mediante un par de guías de acero en forma semicircular. Las guías disponen también de un par de orificios en su extremo que permiten unir mecánicamente cada una al eje de los motores de c.c.

La unión mecánica de la empuñadura del controlador manual, para el movimiento en los ejes  $x$  e  $y$ , se realiza a través de un par de guías de acero con forma de media-luna. Estas guías poseen un par de agujeros en sus extremos, para su conexión con los ejes motores de C.C. (Figura 6). Cada guía de acero puede tener un desplazamiento angular limitado ( $\pm 300^\circ$ ) y está conectada a un motor CC., que es el encargado de generar la fuerza de reflexión (fuerza de compensación por oposición) en cada eje  $x$  e  $y$ , respectivamente. La empuñadura está directamente unida a un tercer motor de CC., que refleja el par del eje  $z$  sobre la mano del operador humano (teniendo un desplazamiento angular limitado de  $\pm 53^\circ$ ).

Las guías difieren en tamaño para ambos ejes ( $x$  e  $y$ ), lo que permite que se encuentren ubicados uno por debajo del otro de manera concéntrica, pero con una diferencia en orientación de  $90^\circ$ . Cada motor posee una caja reductora de elevada relación de reducción: 314:1 en los motores de los ejes  $x$  e  $y$  y 2500:1 en el motor del eje  $z$ . Para sensar la posición del controlador manual, se dispone de codificadores ópticos incrementales, montados en soportes, dispuestos de manera tal que cada motor y su codificador óptico correspondiente tienen sus ejes en paralelo. Sobre los ejes del motor y del codificador se montan un par de poleas dentadas y se mantiene la distancia entre ambos, de manera que permitan mantener la tensión más conveniente en la correa dentada que los une mecánicamente. Cada eje del controlador manual posee fines de carrera, los que actuarán en caso que el motor se acerque a la posición extrema y trate de superarla. Los fines de carrera sirven tanto como protección para el motor, como para acotar el movimiento en cada eje del controlador manual.

La reflexión de la fuerza sensada en el sitio remoto hacia la empuñadura del controlador manual local se realiza a través de la modificación de las referencias de fuerza al control de los motores de cada eje ( $x, y, z$ ). Dicha modificación es proporcional (a través de una ganancia de fuerza) a la magnitud de la fuerza sensada en la garra remota. Asimismo, es posible generar referencias de fuerza, desde el controlador manual hacia la garra remota, cuando el operador humano ejerce una fuerza sobre la empuñadura. Esta fuerza ejercida es sensada por las galgas extensiométricas colocadas en la celda de carga y se transmite como referencias de posición y/o fuerza al sistema de control de la garra remota.

En la figura 7 se aprecia un diagrama general de funcionamiento de los componentes mecánicos, eléctricos y electrónicos asociados para el controlador manual.

## 2.4 Extremo Operativo

El extremo operativo del controlador manual se conforma con una celda de carga y una empuñadura montada sobre ella. La celda de carga es del tipo viga en voladizo de aluminio precocido. Las dimensiones y forma geométrica de la viga se muestran en la figura 8.

En la figura 8 se pueden distinguir las tres zonas importantes de la viga:

- La zona izquierda: destinada a la fijación de la celda de carga al eje que produce los movimientos del controlador manual. Esta zona posee un orificio con rosca que permite mejorar su fijación a la viga de aluminio.
- La zona central: donde se han reducido las dimensiones de la sección transversal, con el objeto de concentrar y aumentar las deformaciones superficiales que se producen en la viga, cuando se le aplican fuerzas o pares. En esta zona existen a su vez dos nuevas subsecciones: una zona de sección cuadrada, donde se encuentran adheridas las bandas extensométricas que miden la deformación en los ejes  $x$  e  $y$ , continuando una sección cilíndrica destinada



Figura 7: Diagrama funcional del controlador manual

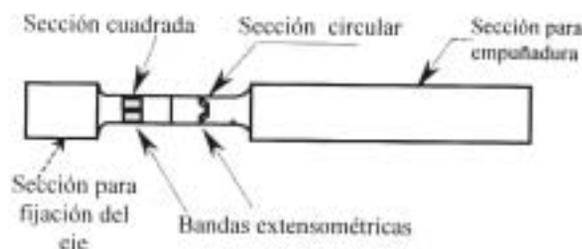


Figura 8: Celda de carga

a medir las torsiones o pares aplicados a la celda de carga, cuyas bandas extensométricas se disponen a 45° (pares en el eje  $z$ ). Se demuestra que tal disposición en las bandas extensométricas es apta para medir torsiones en secciones circulares. De esta forma y con la geometría descrita, el dispositivo de la celda de carga permite sensor fuerzas en dos ejes ( $x$  e  $y$ ) y par en el restante (eje  $z$ ).

- La zona derecha: es de mayor longitud; sobre ella se sitúa la empuñadura que determina la zona de agarre del extremo operativo, para que el operador humano manipule el dispositivo.

Para sensor las fuerzas y pares sobre los ejes, se montan sobre las caras de la sección central, como se mencionó, un conjunto de bandas extensométricas, las cuales se conectan

eléctricamente conformando un puente de Wheatstone. El puente se forma con las bandas extensométricas dispuestas en las caras opuestas de la zona de sección cuadrada, de manera de obtener una mayor sensibilidad en el sentido de las deformaciones en los ejes  $x$  e  $y$ . Para la sección circular se han colocado bandas extensométricas construidas especialmente para este tipo de aplicaciones. Las bandas extensométricas conforman un medio puente de Wheatstone. Las bandas están ubicadas a 45° respecto del eje de la viga, pero con 90° de diferencia en la orientación de ambas bandas que conforman el medio puente de Wheatstone.

La figura 9 muestra el esquema de sensado de fuerza y par del controlador manual (para un solo eje) y una vista ampliada del acople mecánico entre cada motor de c.c. y su correspondiente codificador óptico incremental.

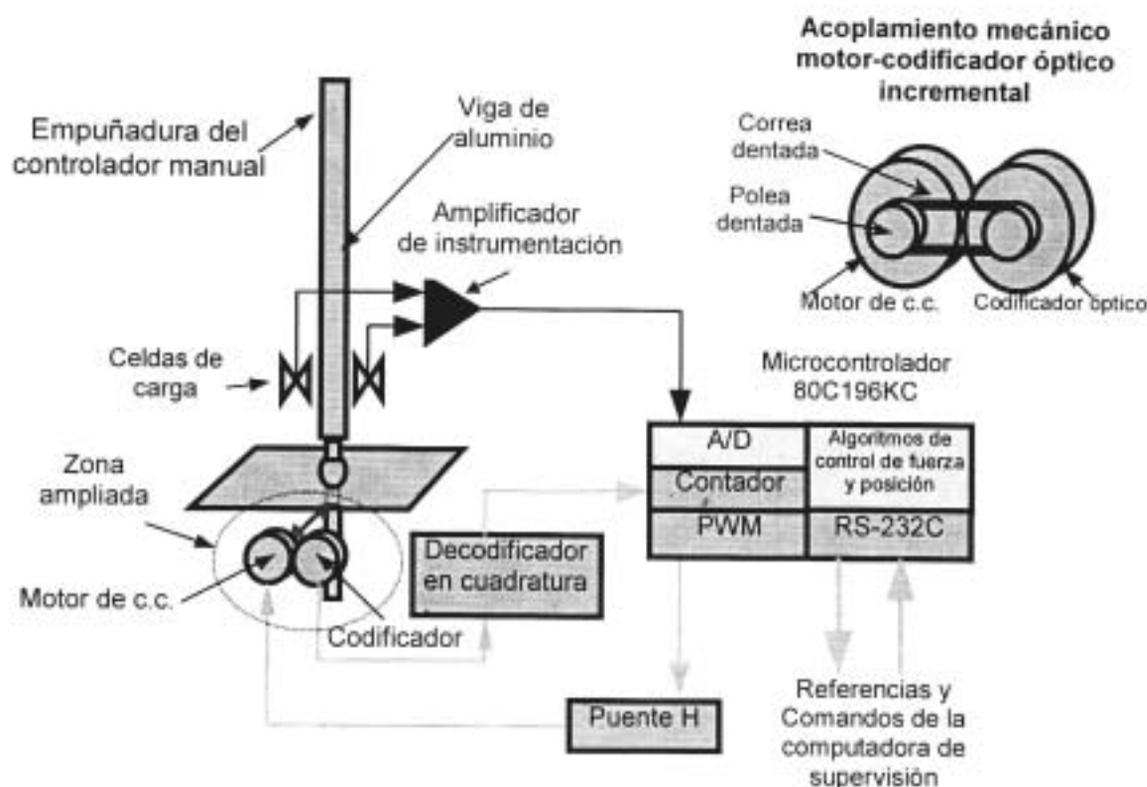


Figura 9: Diagrama del sensado de fuerza y par, actuación de los motores y comunicación con la computadora supervisora

### 3 Estructura de Control

En la presente sección se describirá brevemente la estructura propuesta para el funcionamiento del controlador manual, en tareas de teleoperación de robots. La computadora supervisora se encarga de definir en qué modo operará el controlador manual. El sistema controla inicialmente la posición, hasta establecer la conexión de ambos sistemas (sistema

remoto y sistema local). Una vez que se tienen las referencias de posición sensadas y retroalimentadas por el sistema remoto, el sistema local se encarga de cumplirlas, para posicionar el controlador manual. Al mismo tiempo, la computadora supervisora verifica que las posiciones de ambos sistemas estén lo suficientemente próximas. En caso de que las posiciones del robot local y remoto estén próximas, la computadora supervisora habilita, al operador humano, para que conmute el controlador manual a modo de control de

fuerza. El controlador manual permanecerá en este último modo, hasta que el operador humano le indique a la computadora supervisora que conmute nuevamente, al controlador manual, a control de posición.

En la figura 10 se muestra el esquema de control utilizado para el controlador manual, el cual es básicamente un control de posición con conmutación a control de fuerza.

El esquema planteado consta de dos lazos de control conectados al actuador, según una lógica contenida en el bloque denominado *módulo de supervisión*. El módulo de supervisión es una aplicación, en tiempo real, que muestra el funcionamiento del controlador manual en el monitor de la computadora. El programa desarrollado permite modificar las ganancias de los controladores, la velocidad de transmisión del sistema, los ejes de referencia ubicados en el sistema remoto y la relación de proporcionalidad entre los desplazamientos, tanto en el sistema local como en el sistema remoto. El programa realiza la transmisión de datos, entre el controlador manual y el sistema que se esté utilizando como elemento remoto (manipulador robótico o robot móvil), a través del protocolo

de comunicación RS-232C (BlackBox, 2001). El enlace físico entre la estación local (controlador manual) y la estación remota del sistema de teleoperación se realiza a través de un cable coaxial blindado. El módulo de supervisión trabaja de la siguiente manera: mientras la fuerza de interacción con el medio  $f_m$  es menor que un umbral predeterminado, entonces el módulo de supervisión mantiene la llave S en la posición 2, con lo cual el sistema se comporta como un controlador de posición; pero si en algún momento la  $f_m$  iguala o supera el valor del umbral, el módulo de supervisión hace conmutar la llave S a la posición 1, resultando que ahora el sistema se comporta como un controlador de fuerza. Si en un instante cualquiera, la fuerza se hace menor que el umbral, permaneciendo así por un cierto tiempo, entonces el módulo de supervisión colocará nuevamente la llave S en la posición 2, con lo que el sistema regresará a comportarse como un control de posición. En el controlador manual se utiliza, para cada eje ( $x$ ,  $y$  o  $z$ ), una estructura de control como la descrita. Los lazos de control operan simultáneamente, siendo totalmente independientes uno del otro.

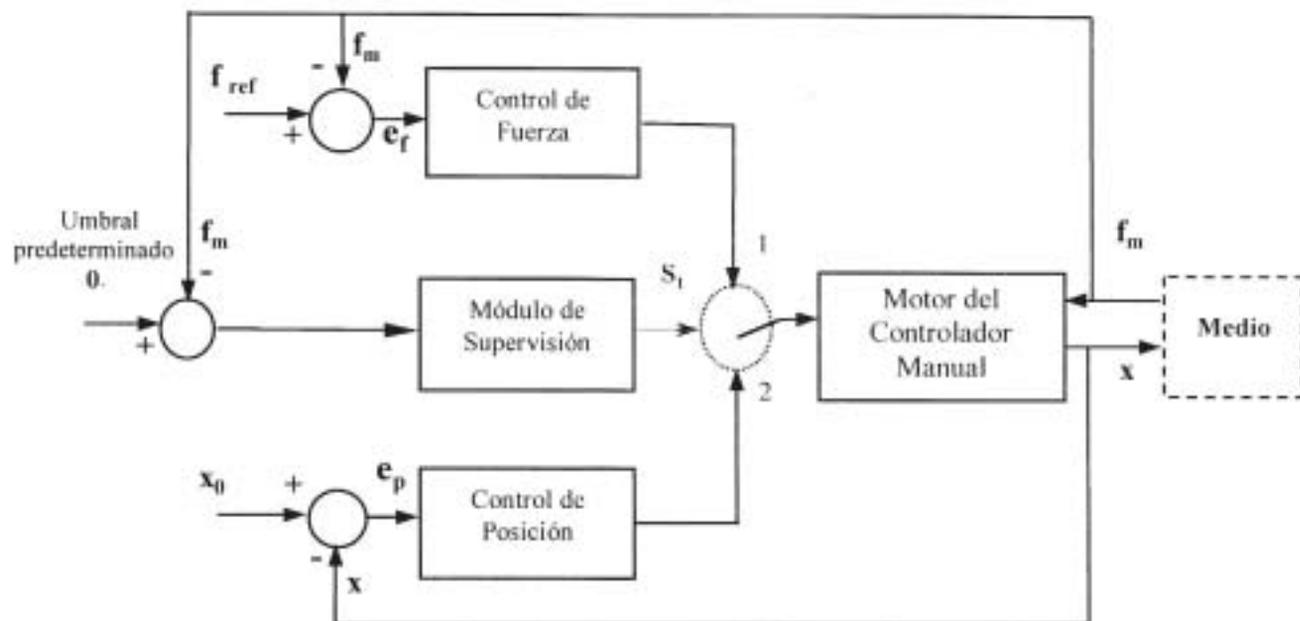


Figura 10: Esquema de control de movimiento que conmuta a control de fuerza

### 3.1 Algoritmos de Control

Los algoritmos de control, que se utilizan para generar las acciones de control en cada lazo, son del tipo PI convencional. Dichos algoritmos se programaron en el lenguaje ensamblador (Assembler) provisto para el microcontrolador 80C196KC (Lage, A., 1994). Además, se desarrolló un algoritmo en lenguaje

C++ cuya función es actuar como interfaz, entre el usuario y el resto del sistema de teleoperación robótica, desde la computadora servidor. La interfaz permite visualizar el estado de las variables que se están controlando, como la posición y la fuerza del manipulador remoto. También se pueden modificar, en línea, las constantes de las ganancias de los lazos de control, así como la velocidad de transmisión de datos en forma

bidireccional entre las estaciones local y remota. A continuación se describen los algoritmos desarrollados.

### 3.2 Implantación en Lenguaje Ensamblador

El programa desarrollado consta básicamente de un programa principal y de varias subrutinas que realizan tareas específicas, los que se mencionan en las siguientes secciones.

#### 3.2.1 El Programa Principal

En el programa principal para el control del controlador manual se realiza la función de procesar los algoritmos de los tres lazos independientes de control implantados en cada eje. En este programa se actualizan las posiciones de los tres motores que manejan el controlador manual; además se realiza la conmutación de control de posición a control de fuerza, o viceversa; asimismo, se controla la secuencia en que cada uno de los algoritmos operan.

#### 3.2.2 Método para Conmutar entre los Tres Lazos de Control

Debido a que el algoritmo principal debe procesar los tres lazos de control, es necesario controlar la evolución del programa, de forma tal que dichos lazos actúen de manera secuencial y periódica, independientemente del modo de operación del controlador manual. Para realizar esta función se provee al programa de una variable denominada "eje", que servirá como indicador, para saber cuál es el eje que debe trabajar a continuación (en función de valores hexadecimales, previamente establecidos). Cuando el programa termina de procesar un lazo de control correspondiente a cualquier eje, y antes de ingresar al siguiente lazo de control, el programa verifica el valor de "eje", realizando el salto al lazo de control que la variable le indique. Una vez que ha ingresado al lazo y lo ha procesado, antes de salir del mismo, coloca en la variable "eje" el valor que corresponde al siguiente eje de la secuencia. De esta manera el programa realiza el procesamiento de cada algoritmo de control de manera secuencial y periódica.

#### 3.2.3 Método para Conmutar entre Control de Posición y Control de Fuerza

El método que se utiliza para conmutar, de control de posición, a control de fuerza (y viceversa) en el controlador manual, se basa en la utilización de una variable denominada "modo". Esta variable le indica, de acuerdo con un valor hexadecimal predeterminado, al programa principal, si debe procesar un algoritmo de control de posición o un algoritmo de control de fuerza, para el eje en cuestión. Inicialmente, el programa comienza controlando posición, debido a que se

debe posicionar el controlador manual hasta que la comunicación, con el sistema remoto, se haya establecido. La conmutación de un modo de control al otro dependerá de la computadora supervisora.

El controlador manual cuenta, además, con una protección en caso de interrupción de la comunicación. La protección se activa si se interrumpe la comunicación, por cualquier motivo, entre la estación local y la estación remota. En tal caso, el controlador manual quedará controlando en posición permanentemente, según la última posición que recibió como señal de referencia.

### 3.3 Implantación en C++

La comunicación entre el sistema local y el sistema remoto del sistema de teleoperación robótica se realiza a través de una computadora. El programa realizado también tiene a cargo el manejo de errores, la supervisión del cambio de variables y la realización de algunas otras tareas específicas. Este programa se desarrolló en C++, debido a la potencia de este lenguaje para generar funciones tales como el manejo de interrupciones de la computadora, el procesamiento de ecuaciones matemáticas, la disponibilidad de programar en bajo nivel y la posibilidad de implantar funciones de visualización de información de manera sencilla.

La figura 11 muestra un esquema del funcionamiento de los algoritmos diseñados para el controlador manual.

El programa implantado en la computadora hace uso del puerto serie 1 (COM1) de la PC para comunicarse con el controlador manual, debido a que el microprocesador 80C196KC se comunica utilizando un protocolo serie que se adapta al RS-232C. Se ha optado también por seleccionar el COM2 para comunicarse con el sistema remoto, el cual podrá cambiarse por algún otro adaptador para realizar la comunicación, tal como una tarjeta de comunicación en red, el puerto paralelo de la computadora, etc.

El programa desarrollado en C++ hace uso de las interrupciones de recepción del adaptador, serie/paralelo de la PC, para administrar todo el esquema de comunicación del sistema de teleoperación robótica. El programa realiza, de manera periódica, la secuencia de eventos que se mencionan a continuación: se determina si se presionó alguna tecla del teclado de la PC; enseguida se realiza alguna de las distintas clases de comunicación posibles; finalmente, se procede a visualizar los datos en pantalla de la computadora.

## 4 Experimentación

En la fase de experimentación se ensayó el funcionamiento del controlador manual construido conectándolo a una garra robótica desarrollada en el Instituto de Automática (INAUT). La garra se consideró como un dispositivo remoto (robot remoto), conformando un sistema de teleoperación con

reflexión de fuerza. Las características constructivas y de electrónica asociada de dicha garra se describen en detalle en el trabajo de Tramontín, J. (1997). Se utilizó la garra como soporte de un nuevo algoritmo de control, el cual funciona de manera similar al implantado en el controlador manual. El algoritmo también contempla conmutar entre control de posición y control de fuerza, o viceversa, si se habilita dicha función modificando su programa de control. Además, se utilizó el mismo sistema de comunicación que se desarrolló para el controlador manual, basado en interrupciones y transmisión de datos "full duplex", para obtener una mayor velocidad de transferencia de datos entre el controlador manual y la garra remota.

El sistema de teleoperación bilateral robótica funciona de la siguiente manera: el PC servidor recibe los datos desde el controlador manual por el puerto serie Com1 y desde la garra remota por el puerto serie Com2. Las señales de posición y fuerza provenientes desde la garra, son enviadas como señales

sensadas hacia el controlador manual y las señales provenientes del controlador manual son enviadas hacia la garra remota como consignas de referencia. Así, cada una de las señales se utiliza como consignas de cada uno de los lazos de control implantados (local y remoto). Se debe aclarar que el sistema de teleoperación planteado tiene ciertas limitaciones: una de las más importantes es que no se considera el retardo de tiempo en la comunicación entre el sitio local y el sitio remoto. Esta simplificación obedece a que ambos sitios se conectan a la PC de supervisión mediante un cable multifilar blindado utilizando el protocolo RS-232C; a pesar de ello, sus posibilidades de aplicación son variadas. Por ejemplo, se puede utilizar este esquema de teleoperación en aplicaciones donde se manipulen sustancias peligrosas en una habitación (sitio remoto) y a pocos metros (hasta 15m) se encuentre el sitio local con el controlador manual y el operador humano. En este caso, el retardo de tiempo no es significativo por la cercanía de ambos sitios y los resultados que se obtienen son válidos.

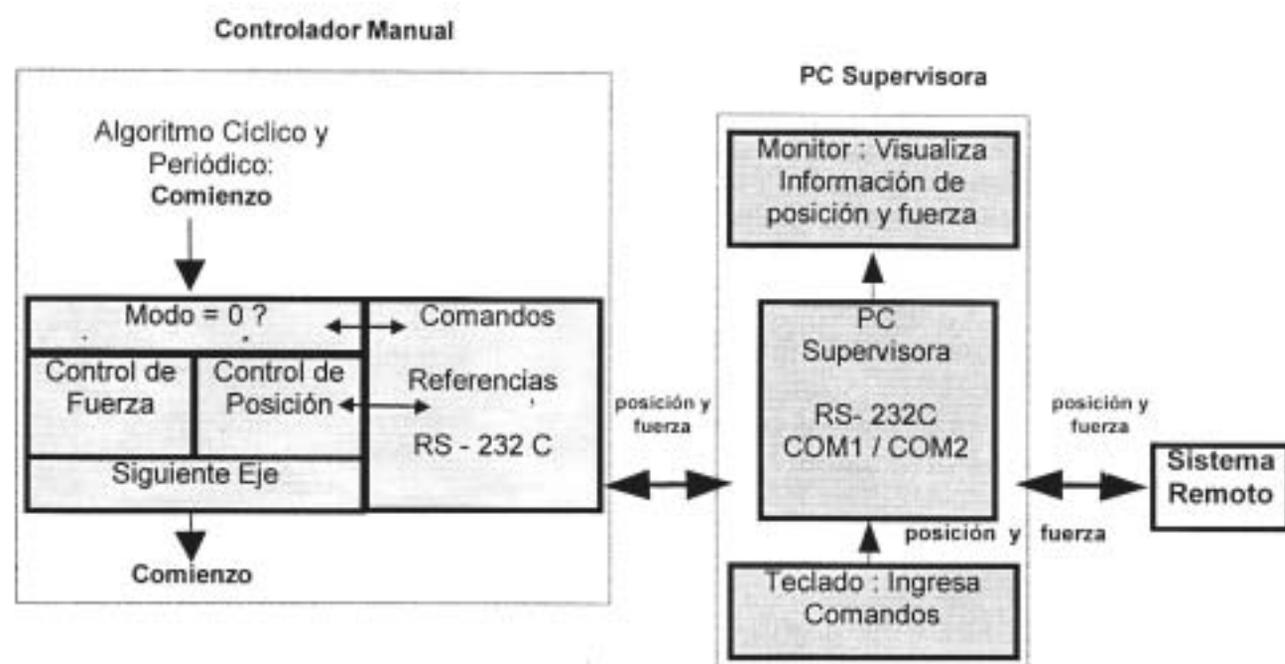


Figura 11: Esquema de control de movimiento que conmuta a fuerza

#### 4.1 Resultados Experimentales

Se ensayó el sistema de teleoperación bilateral robótico con comunicación a distintas velocidades entre las estaciones

local y remota. Asimismo, se variaron los valores de elasticidad del control de impedancia implantado en la garra remota. La figura 12 muestra una foto del sistema utilizado.

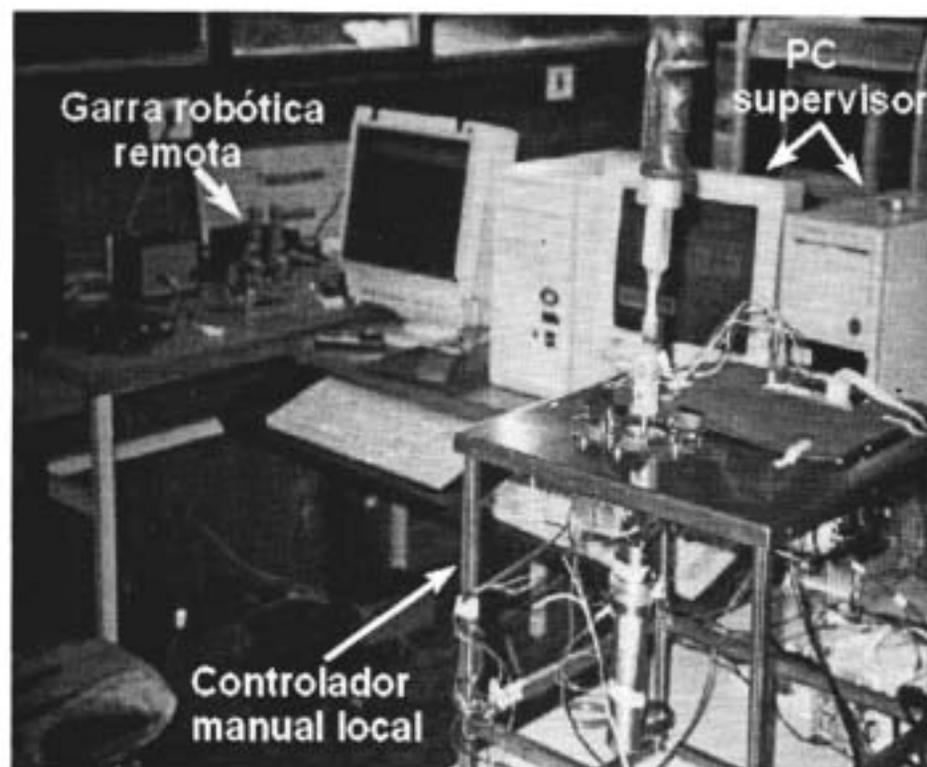


Figura 12: Equipo de teleoperación robótica experimental

A continuación se muestran los resultados de algunos de los experimentos que se llevaron a cabo.

#### 4.1.1 Distintas Velocidades de Transmisión de Datos

En este experimento se debe destacar que, a pesar que el controlador manual posee 3 grados de libertad, la garra remota se puede controlar solamente en una dirección del espacio (ya que sólo posee un grado de libertad). Por ello se eligió la dirección del controlador manual para controlar en ella fuerza y posición. Asimismo, se comprobó que, con una constante proporcional mayor en el lazo de control de fuerza, el sistema de teleoperación respondió a una menor fuerza aplicada, por el operador humano, en los movimientos libres. Si la constante proporcional era demasiado elevada, en el momento del choque el sistema tendía a ser más inestable. Para mejorar tanto esta situación, como también la respuesta del sistema de teleoperación y otorgarle cierta autonomía al mismo, se incorporó un lazo de control de impedancia simple (Hogan, N., 1985), considerando sólo la constante elástica del término de impedancia, en el sistema remoto (garra robótica inteligente). Se mencionarán brevemente algunos conceptos y definiciones importantes al respecto.

La impedancia de un sistema mecánico se define como la relación dinámica entre la fuerza aplicada y la velocidad de desplazamiento del mismo,

$$\mathbf{f}(t) = Z(p)v(t) \quad (1)$$

donde  $\mathbf{f}(t)$ ,  $v(t)$  y  $Z(p)$  representan la fuerza, la velocidad y la impedancia del sistema mecánico, respectivamente; y  $p = d/dt$  es el operador derivada respecto del tiempo. En términos de la posición actual del extremo operativo del robot  $\mathbf{x}(t)$ , la ecuación (1) se puede escribir como:

$$\mathbf{f}(t) = Z(p)p\mathbf{x}(t) \quad (2)$$

En este caso, se especifica una trayectoria de movimiento deseado  $\mathbf{x}_d(t)$  para el manipulador robótico remoto y la impedancia del robot está definida por:

$$\mathbf{f}(t) = Z(p)p\mathbf{x}(t) ; \quad (3)$$

donde:  $f(t)$  es la fuerza aplicada por el extremo operativo del robot remoto sobre el medio con el que interactúa y  $\bar{x}(t) = x_d(t) - x(t)$  es el error de movimiento del robot.

Se debe especificar una *impedancia deseada* para establecer el comportamiento del robot en una estructura de control de impedancia. Por simplicidad, resulta natural definir una relación lineal de impedancia. Además, como el comportamiento dinámico (modelo linealizado) del manipulador robótico es de segundo orden, resulta lógico definir una impedancia deseada de segundo orden,

$$f(t) = (Mp^2 + Dp + K)\bar{x}(t) \quad (4)$$

donde  $f$  representa la *fuerza aplicada* por el extremo operativo sobre el medio ambiente con el cual interactúa. La matriz  $M$  se denomina matriz de inercia,  $D$  es la matriz de amortiguamiento y  $K$  es la matriz de elasticidad. Las matrices  $M$ ,  $D$  y  $K$  son matrices de diseño que se especifican de acuerdo al comportamiento dinámico del robot.

En el lazo de impedancia, utilizado más adelante en los experimentos (ver sección 4.1.2), se consideró sólo la matriz  $K$  de elasticidad en el sistema remoto (garra robótica). La figura 13 muestra los resultados obtenidos para una velocidad de transmisión de 57600 baudios (entre las estaciones local y remota) en a) posición y b) fuerza. En la figura 14 se muestra el mismo experimento, sin variar los parámetros de los controladores ni la impedancia remota, pero para una velocidad de transmisión de 300 baudios.

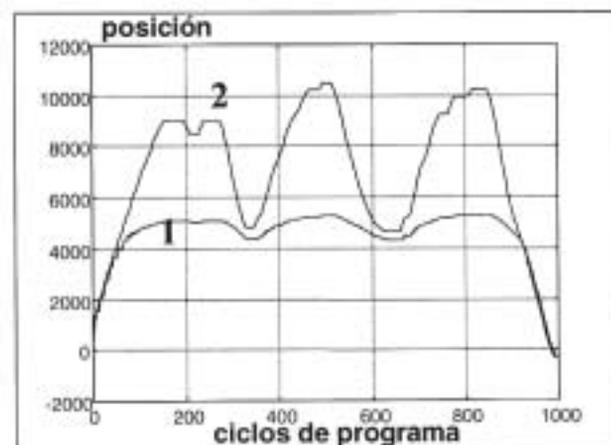
Se hace notar, para el correcto entendimiento de la escala temporal, todas las figuras (desde la figura 13 hasta la 18 inclusive) están codificadas en ciclos de programa, siendo la equivalencia:

1 ciclo de programa = 0.506 seg., para una velocidad de transmisión de 300 baudios;

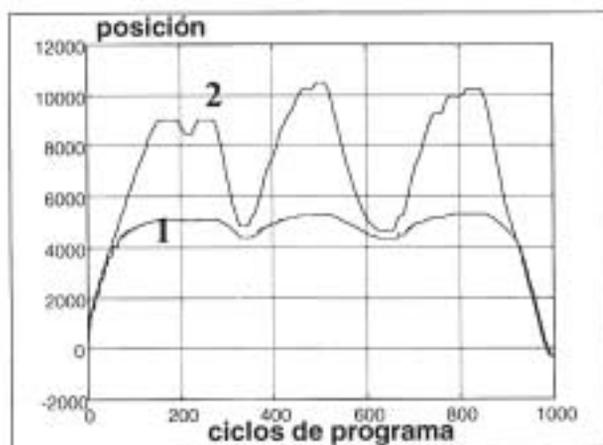
1 ciclo de programa = 15.8 mseg., para una velocidad de transmisión de 9600 baudios;

1 ciclo de programa = 2.63 mseg., para una velocidad de transmisión de 57600 baudios.

Dichas conversiones deberán ser tenidas en cuenta para la comparación de todas las figuras abajo mencionadas.

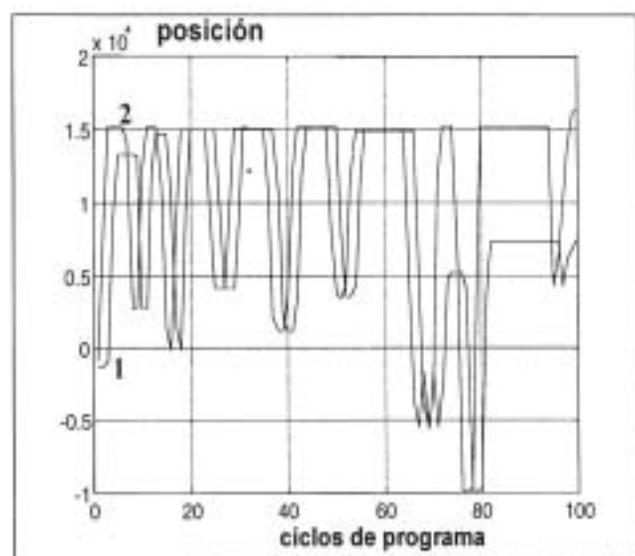


a)

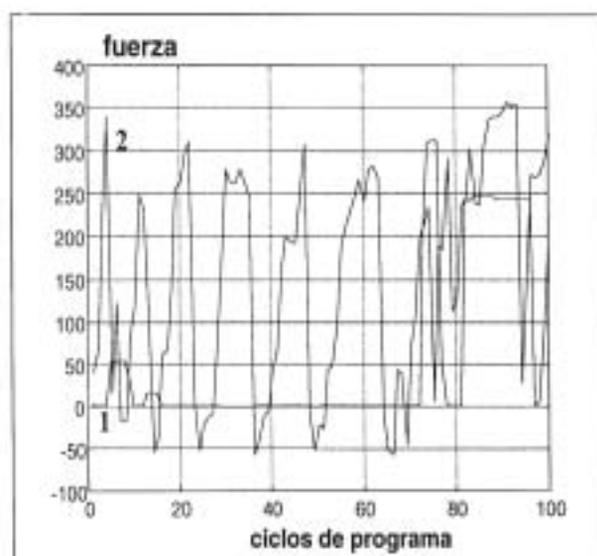


b)

Figura 13: a) 1: Posición de la garra robótica remota, 2: Posición del controlador manual local (eje  $Y$  solamente). b) 1: Fuerza sensada en los dedos de la garra robótica remota, 2: Fuerza sensada en el controlador manual local (eje  $Y$  solamente). Constante elástica de la impedancia de la garra remota  $K = 32$ , constante proporcional del controlador de fuerza  $K_{pf} = 40$ , velocidad de transmisión: 57600 baudios



a)



b)

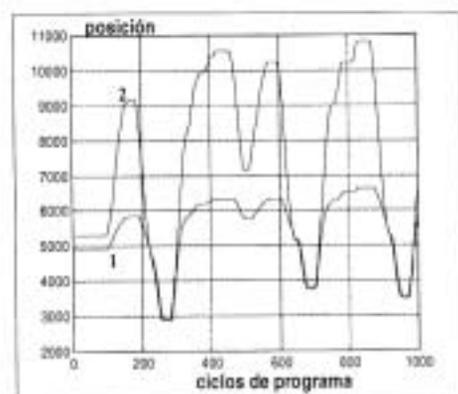
Figura 14: a) posición y b) fuerza, con parámetros idénticos a los del experimento de la Fig. 13 a) y b). Constante elástica de la impedancia de la garra remota  $K = 32$ ,  $K_{pf} = 40$ , velocidad de transmisión: 300 baudios

Si se analizan las dos últimas figuras (figuras 13 a) y b) y 14 a) y b)), se observa que a una menor velocidad de transmisión (300 baudios), como era de esperar, el sistema responde de manera interrumpida debido al alto tiempo de muestreo generado en la comunicación. Al aumentar las velocidades de comunicación se logró aumentar la estabilidad del sistema y obtener así una mayor fluidez en los movimientos libres reflejados en el sistema de teleoperación. En cuanto a los movimientos restringidos (contacto del sistema remoto con un objeto) se comprobó que el sistema de teleoperación era inestable a bajas velocidades de transmisión. Este

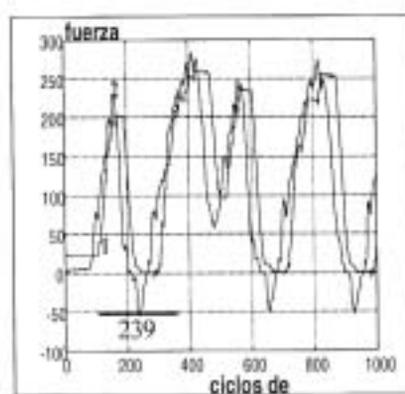
inconveniente se solucionó al aumentar la velocidad de comunicación a 57600 baudios.

#### 4.1.2 Distintos Valores de la Impedancia Remota

Las condiciones de experimentación fueron las mismas de la Sección 4.1, pero se varió, para la misma velocidad de transmisión entre las estaciones local y remota (57600 baudios), la constante de elasticidad de la impedancia ficticia implantada en la garra robótica remota. En las Figs. 15 a) y b) y 16 a) y b) se muestran los resultados del experimento realizado.



a)



b)

Figura 15: 1: Posición de la garra robótica remota, 2: Posición del controlador manual local (eje  $Y$  solamente). b) 1: Fuerza sensada en los dedos de la garra robótica remota, 2: Fuerza sensada en el controlador manual local (eje  $Y$  solamente). Velocidad de transmisión:

57600 baudios, constante elástica de la impedancia de la garra remota  $K = 16$ ,  $K_{pf} = 40$

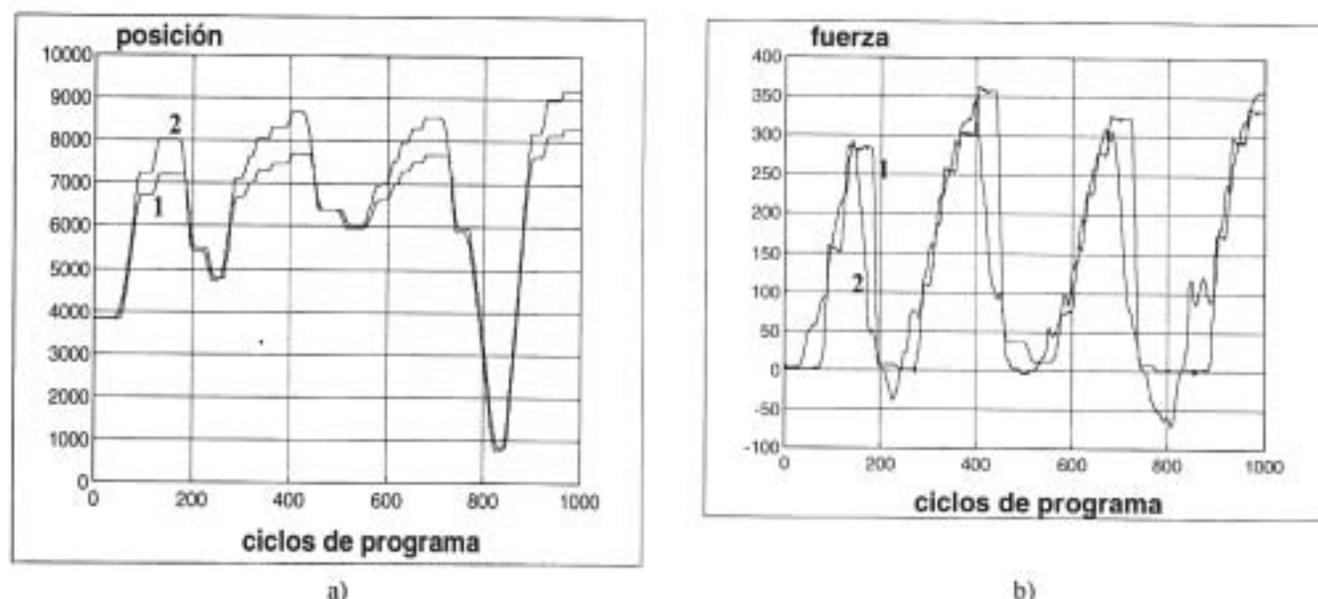


Figura 16: a) 1: Posición de la garra robótica remota, 2: Posición del controlador manual local (eje  $Y$  solamente), b) 1: Fuerza sensada en los dedos de la garra robótica remota, 2: Fuerza sensada en el controlador manual local (eje  $Y$  solamente).

Velocidad de transmisión: 57600 baudios, constante elástica de la impedancia de la garra remota  $K = 2$ ,  $K_{if} = 40$

Experimentalmente se comprobó que los sucesos producidos en momentos de choque del sistema remoto con algún objeto se veían mejorados en la respuesta, permitiendo una mejor manipulación de los mismos. A mayores valores de la constante  $K$ , el sistema respondió de manera más estable como lo muestran las figuras 15 y 16.

Por último, en las figuras 17 y 18 se muestran los resultados experimentales para un mismo valor de dicha elasticidad, el comportamiento y desempeño del controlador manual empeora cuando disminuye la constante proporcional del controlador PID de fuerza implantado en el mismo ( $K_{pf}$ ), siendo la constante integrativa  $K_{if} = 0$  en ambos casos.

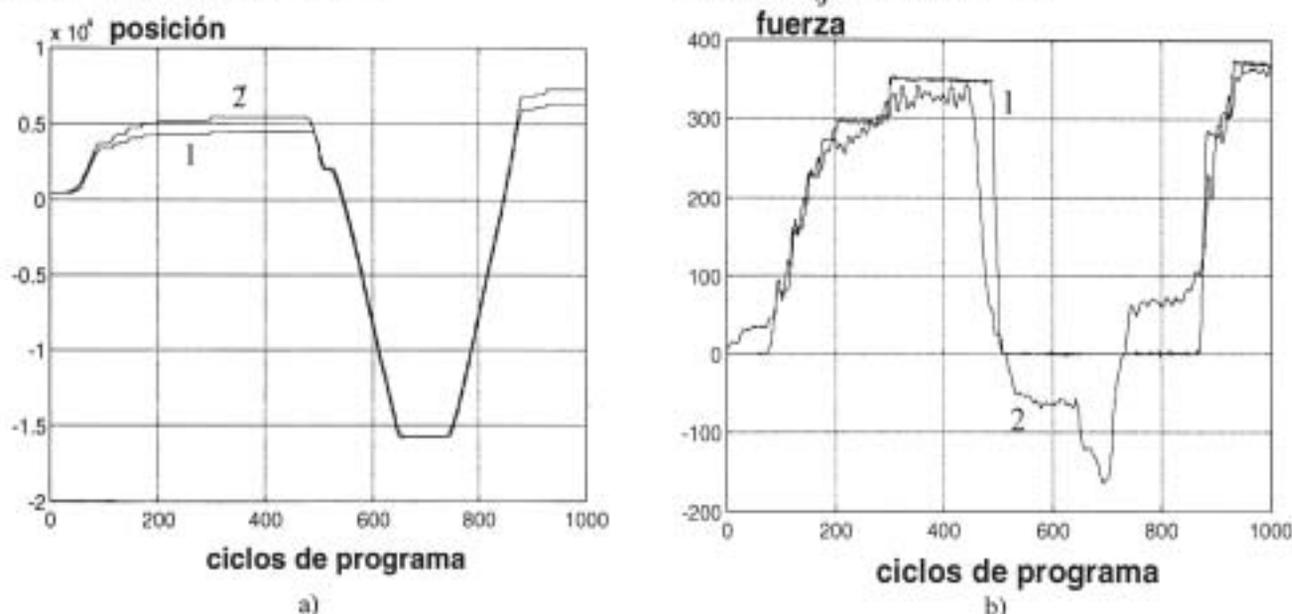


Fig. 17. a) 1: Posición de la garra robótica remota, 2: Posición del controlador manual local (eje  $Y$  solamente), b) 1: Fuerza sensada en los dedos de la garra robótica remota, 2: Fuerza sensada en el controlador manual local (eje  $Y$  solamente). Velocidad de transmisión: 57600 baudios, constante elástica de la impedancia de la garra remota  $K = 2$ , constante proporcional del

controlador de fuerza  $K_{pf} = 80$

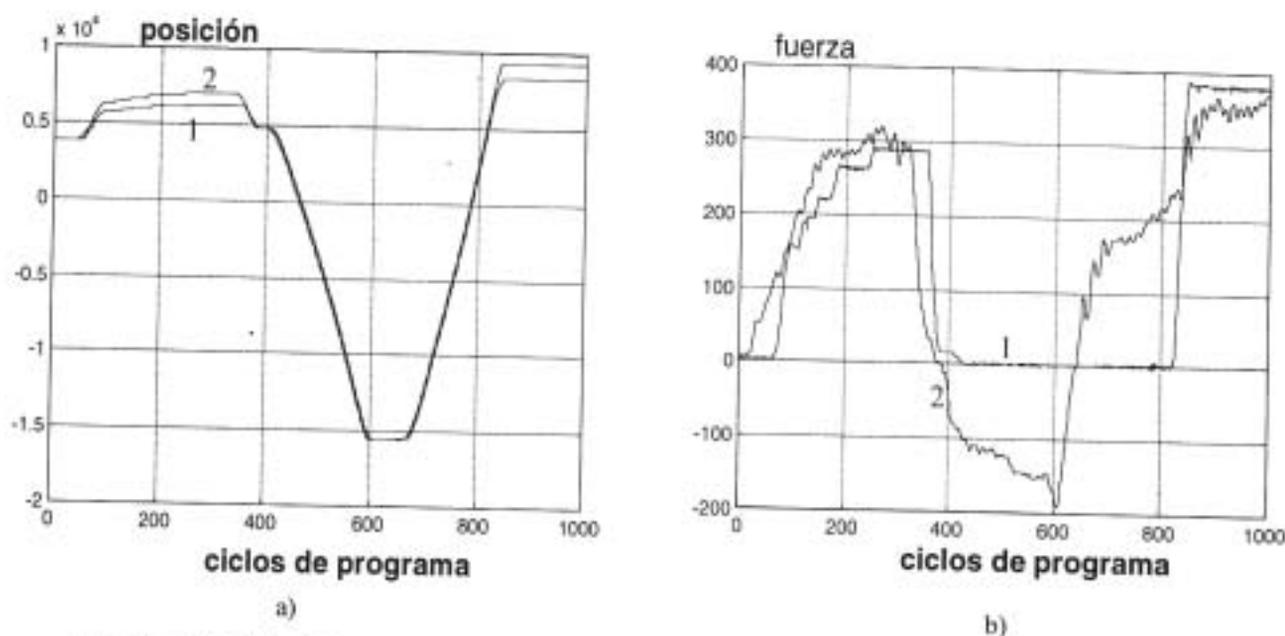


Fig. 18: a) 1: Posición de la garra robótica remota, 2: Posición del controlador manual local (eje  $Y$  solamente). b) 1: Fuerza sensada en los dedos de la garra robótica remota, 2: Fuerza sensada en el controlador manual local (eje  $Y$  solamente). Velocidad de transmisión: 57600 baudios, constante elástica de la impedancia de la garra remota  $K = 2$ , constante proporcional del controlador de fuerza  $K_{pf} = 20$

## 5 Conclusiones

En este trabajo se ha presentado el diseño, la construcción y la implementación de un controlador manual de tres grados de libertad (fuerzas en los ejes  $x$ - $y$  y par en el eje  $z$ ) para teleoperación experimental de manipuladores robóticos.

El sistema de control para teleoperación se diseñó de tal modo que el operador humano, actuando sobre el manipulador, envíe comandos de posición y fuerza al sistema remoto a través de un canal de comunicación. A la vez reciben las señales de posición y fuerza que el sistema remoto refleja cuando sensa su interacción con el ambiente remoto (información bidireccional en el canal de comunicación) en tareas de movimiento restringido.

Se diseñaron y elaboraron los algoritmos en lenguaje ensamblador del microcontrolador MC80196KC para el control de los 3 motores del controlador manual, como también los programas necesarios para visualizar el entorno gráfico de interfaz entre el usuario, el controlador manual construido y el ambiente remoto sobre el cual se realiza la teleoperación. La información gráfica provista al operador humano (agregada al lazo de control como retroalimentación visual de fuerza y posición), permite que se establezcan con precisión los valores de fuerza de interacción del dispositivo remoto con el medio.

Finalmente, se montó un esquema de teleoperación utilizando como sistema remoto una garra robótica con un lazo de control de impedancia, que permitió poner de manifiesto las propiedades de reflexión de fuerzas y pares que posee el controlador manual diseñado. En este sentido se lograron

buenos resultados en cuanto al desempeño del controlador manual tanto en fuerza como en posición en tareas de interacción, específicamente al tomar con la garra objetos, posicionarlos y ejercer sobre ellos una determinada fuerza.

En relación con las posibles prestaciones del controlador manual, se concluyó que, mientras mayor es la velocidad de transmisión entre las estaciones local y remota, mejor es el desempeño del controlador manual, pues dicho controlador es más estable y presenta una mayor fluidez para realizar tareas en interacción (movimiento restringido). Este hecho resulta muy interesante para el caso de tener que considerar retardos de tiempo en la comunicación.

El sistema de teleoperación de laboratorio planteado (que incluye el controlador manual desarrollado) permite realizar el análisis y diseño de esquemas avanzados de control tanto de robots manipuladores como de robots móviles. Además, el controlador manual se puede utilizar para entrenar operadores humanos en tareas que involucren movimientos restringidos del robot remoto (por ejemplo en tareas para robots manipuladores como pulido de piezas, inserción, soldadura, etc.; y para robots móviles en el caso de movimiento en ambientes parcialmente estructurados, detección de obstáculos, etc.).

Como trabajos futuros se plantean el reemplazo de la garra robótica remota de un sólo grado de libertad por un robot Bosch SR 800 industrial de 4 g.d.l (Dölling, E. y O. Márquez, 1996), el cual se pretende teleoperar con el controlador manual presentado en este trabajo, utilizando inicialmente una Intranet disponible en el INAUT. Posteriormente, se ensayarán

esquemas de control avanzado para teleoperación a través de Internet, para considerar los efectos del retardo de comunicación en el desempeño y en la estabilidad del sistema de teleoperación completo.

## Agradecimientos

Los autores desean expresar el agradecimiento al Ing. Carlos M. Schugurensky por el diseño del sistema de sensado basado en bandas extensométricas y por sus consejos tecnológicos, como también al Ing. Alberto García Brizuela por sus útiles sugerencias. Este trabajo fue financiado parcialmente por el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) y por la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCyT).

## Referencias

**BlackBox**, "Black Box Network Services", Reference manual and download from: <http://www.blackbox.nl/techweb/intrface/rs232.html>; 2001.

**Das, H., H. Zak, W.S. Kim, A.K. Bejczy y P.S. Schenker**, "Operator performance with alternative manual control modes in teleoperation", *Presence*. Vol. 1, N° 2, pp. 201-218, 1992.

**Dölling, E. y O. Márquez**, "Diseño e implementación de una arquitectura de control abierta para el robot BOSCH SR-800". *Trabajo final de la Carrera Ingeniería Electrónica*, Biblioteca del Inaut, UNSJ. Public. TF N° 127, 1996.

**EV80C196KB- KC Microcontroller Evaluation Board - User's Manual**. Intel Corp. 1989.

**Guo, C., T.J. Tarn, N. Xi y A.K. Bejczy**, "Fusion of human and machine intelligence for telerobotic systems", *Proc. IEEE Int. Conf. On Rob. and Automation*, pp. 3110-3115, 1995.

**Hogan, N.**, "Impedance control: An approach to manipulation, Part I: Theory" *Journ. of Dyn. Syst., Meas. And Control*, Vol. 107, pp. 1-7, 1985.

**Kuleshov V.S. y N.A. Lakata**, "Remotely Controlled Robots and Manipulators", Mir Publishers, Moscow. 1988.

**Lage, A.**, "Sistema de Teleoperación Robótica". Tesis de Maestría. INAUT, Universidad Nacional de San Juan, San Juan, Argentina, 1994.

**Pappas, C.H. and William H. Murray III**, "Manual de Borland C++, versión 3.1". Editorial Osborne/ McGraw- Hill. 1993.

**Postigo, J., Lage, A. Carelli, R.**, "Sistema de Teleoperación de Robots con Realimentación Kinestésica y Visual de Fuerza". *Anales del VIII Congreso Latinoamericano de Control Automático*. Vol. 1, pp. 85-90. Viña del Mar, Chile. 9-13 de Noviembre de 1998.

**Sheridan, T.B.**, "Telerobotics, Automation and Human Supervisory Control", MIT Press, USA. 1992.

**Tramontín, J.**, "Garra robótica sensible - GR11". Biblioteca del Inaut, UNSJ, San Juan, Argentina. Pub. TF N° 141. 1997.

*José F. Postigo desarrolló su tesis de Doctorado en Ingeniería en la UNSJ en el tema de teleoperación de manipuladores robóticos con referencias de movimiento y fuerza, finalizando en 1998. El Dr. Postigo se desempeña como Investigador en la Carrera del Investigador Científico y Tecnológico del CONICET. En 1997 realizó una estancia de investigación trabajando en temas de telerobotica basada en Internet, en el Jet Propulsion Laboratory (JPL) - NASA, California Institute of Technology, California, USA. Es Profesor del Departamento de Electrónica y Automática, de la Facultad de Ingeniería, UNSJ. En la actualidad desarrolla sus tareas de investigación y de docencia de posgrado en el Instituto de Automática (INAUT), UNSJ. Ha sido calificado como Investigador Clase II en la Categorización para el programa de incentivos a los investigadores-docentes del Ministerio de Cultura y Educación de la República Argentina. José F. Postigo es miembro del Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) desde 1990. Sus áreas de interés son la robótica, la teleoperación bilateral de manipuladores robóticos y robots móviles, los sistemas no-lineales y el control automático de procesos industriales*





**Vicente A. Mut** se graduó con diploma de honor al mejor promedio como Ingeniero Electrónico en la Universidad Nacional de San Juan en 1987. Entre 1990 y 1995 desarrolló su doctorado en Ingeniería de Sistemas de Control en la Universidad Nacional de San Juan, Argentina con una tesis sobre control de robots con movimiento restringido. Actualmente es profesor en la Universidad Nacional de San Juan, desarrollando actividades de investigación y de docencia de posgrado en el Instituto de Automática y de docencia de grado en el Departamento de Electrónica y Automática. Además es investigador del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Ha sido calificado como Investigador Clase II en la Categorización para el programa de incentivos a los investigadores-docentes del gobierno argentino. Vicente Mut es miembro de IEEE. Sus áreas de interés son: control de robots, control adaptable, control de procesos industriales y técnicas de inteligencia artificial aplicadas al control automático.



**Ricardo O. Carelli** en 1981 realizó una estancia de investigación en el Politécnico de Torino, Italia, sobre el control adaptable de robots con algoritmos de predicción de horizonte múltiple y entre 1987 y 1989 desarrolló su doctorado en Ingeniería Eléctrica en la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) con una tesis sobre control adaptable de robots. Actualmente es profesor en la Universidad Nacional de San Juan, desarrollando actividades de investigación y de docencia de posgrado en el Instituto de Automática y de docencia de grado en el Departamento de Electrónica y Automática. Además es investigador del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) y subdirector del Instituto de Automática de la Universidad Nacional de San Juan. Ha sido calificado como Investigador Clase A en la Categorización para incentivos a los investigadores-docentes del gobierno nacional. Ricardo Carelli es miembro de IEEE y de AADECA-IFAC. Sus áreas de interés son: control de robots, sistemas de manufactura, control adaptable y técnicas de inteligencia artificial aplicadas al control automático.



**Luis A. Baigorria** nació en San Juan, Argentina el 2 de Octubre de 1972. Se graduó como Ingeniero en Electrónica en la Universidad Nacional de San Juan (UNSJ) en 1998. Desarrolló su tesis de graduación en el Instituto de Automática (INAUT), UNSJ, en temas de hardware y software de controladores manuales para teleoperación de robots. En la actualidad se encuentra desarrollando su tesis de Maestría en Ingeniería de Sistemas de Control en el área de Control de Sistemas usando Técnicas de Telecontrol en la UNSJ. Luis A. Baigorria es miembro del Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) desde 1998. Sus áreas de interés son la robótica, el telecontrol de procesos industriales, las redes industriales y el control automático de procesos industriales.



**Benjamín R. Kuchen** nació el 01 de octubre de 1941 en Santa María, Prov. de Santa Fe, Argentina. Se graduó como Ingeniero Electrónico en la Universidad Católica de Córdoba en 1967. Durante 1968 realizó estudios de especialización en el Philips International Institute de Eindhoven, Países Bajos, sobre temas de electrónica de potencia. Durante el periodo comprendido entre marzo de 1971 a octubre de 1974 realizó su doctorado en la Universidad Renano Westfalica del Norte en Aquisgrán (RWTH Aachen), Alemania, con una tesis sobre la obtención del modelo adaptable del hombre como controlador de procesos (canal visual-manual). Actualmente es Profesor en la Universidad Nacional de San Juan, desarrollando actividades de investigación y de docencia de posgrado en el Instituto de Automática y docencia de grado en el Departamento de Electrónica y Automática. Es director del Instituto de Automática (INAUT) desde 1983, Profesor Titular Ordinario en la Universidad Nacional de San Juan (categoría A del programa de incentivos) e Investigador Independiente del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Es miembro de IEEE y de AADECA-IFAC. Sus áreas de interés son: Control de Robots, Sistemas de Manufactura y Control de Sistemas Electrónicos de Potencia

