

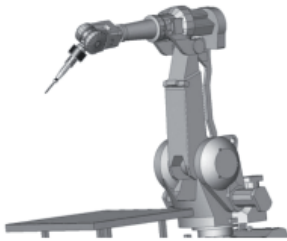
# Control difuso de fuerza en robótica industrial

J. Norberto Pires, Tiago Godinho

Universidade de Coimbra. Portugal

Departamento de Engenharia Mecânica

norberto@robotics.dem.uc.pt



## RESUMEN

*En este artículo se presentan los conceptos básicos relacionados con el control de fuerza en robótica industrial. Se presenta una aplicación de control de fuerza basada en una estrategia de lógica difusa, permitiendo una breve discusión sobre los requerimientos del sistema necesarios para su implementación industrial. Se discuten brevemente los resultados obtenidos poniendo énfasis sobre las aplicaciones industriales, en virtud de que en las pruebas el robot mostró siempre una buena capacidad de seguimiento para los diferentes perfiles de fuerza utilizados.*

## PALABRAS CLAVE

Robots industriales, control de fuerza, software distribuido, programación.

## ABSTRACT

*This article introduces basic concepts about force control on industrial robotics. An application implemented through a fuzzy-PI strategy is developed, enabling a brief discussion on system requirements necessary for industrial implementation. The obtained results are briefly discussed putting emphasis on industrial applicability, namely because several force profiles were used and the robot always showed good tracking capabilities.*

## KEYWORDS

Industrial robots, force control, distributed software, programming.

## INTRODUCCIÓN

Dada su enorme flexibilidad, los robots son por excelencia, equipos típicos en los sistemas flexibles de producción, siendo esa la principal razón de su utilización en las estructuras actuales de producción.<sup>1</sup> En la mayoría de las tareas desempeñadas por robots manipuladores industriales, tales como pintura y posicionamiento, los controladores de posición permiten un desempeño adecuado. Sin embargo, en el caso de la verificación del contacto entre una herramienta y el medio que lo rodea, la fuerza de interacción debe ser debidamente controlada, evitando así, daños en las piezas o en la estructura del robot.<sup>2,3</sup> La mayoría de los robots industriales existentes en el mercado están controlados solamente en cuanto a posición. Pero, un control de fuerza de contacto es deseable en un gran número de tareas industriales.<sup>4,5</sup> Ejemplos típicos de tareas que exigen control de fuerza e interacción son: montaje de componentes mecánicos, seguimiento de aristas,



Artículo publicado originalmente en portugués en la *Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica*, Vol. 10, No. 3, traducido y publicado con autorización del autor.

lijado, desbaste, pulimiento, etc.<sup>2,6</sup> Las fuerzas de contacto generadas que dependen de la rigidez de la superficie de contacto de las herramientas, deben ser debidamente controladas, o minimizados sus efectos, pudiendo ser utilizadas dos estrategias para controlar las fuerzas de contacto: el control activo de fuerza y el control pasivo de fuerza.<sup>1</sup>

### CONTROL PASIVO DE FUERZA

En el control activo de fuerza, las fuerzas de contacto deben ser controladas para que las tareas sean ejecutadas con éxito, bastando que éstas se mantengan dentro de un determinado rango de valores seguros, no siendo necesario conocer su valor exacto. En este caso las fuerzas de contacto son un efecto “indeseado”, inherente a las tareas.<sup>10</sup> En el control pasivo no existe medición de fuerza, siendo la trayectoria del elemento final modificada por las fuerzas de interacción.<sup>7</sup> En esta situación la estrategia usada es normalmente la de agregar alguna flexibilidad en el elemento terminal, con el objeto de amortiguar los impactos y aumentar la tolerancia a eventuales errores de posicionamiento, complementada con una planeación cuidadosa de la trayectoria y de la aproximación a los objetos.

Este procedimiento implica un conocimiento detallado de todo el espacio de trabajo del robot, teniendo perfectamente identificados todos los posibles obstáculos a su movimiento. Conociendo con exactitud y anticipación la posición de cada elemento de la CFP (celda flexible de producción), es posible definir las trayectorias que los eviten, así como aproximarse con cautela a aquellos con los que es necesario un contacto.<sup>1</sup>

En el control pasivo de fuerza, no es necesario utilizar un sensor de fuerza o introducir alteraciones en la programación del sistema de control.

Este tipo de control es barato y simple, y constituye la aplicación más común en robótica industrial.<sup>1,7</sup> Existen dispositivos en el mercado de tipo RCC (Remote Centre Compliance), que permiten adicionar flexibilidad al elemento terminal protegiendo la herramienta contra impactos y errores de posicionamiento, permitiendo también compensar errores de alineamiento.<sup>1</sup> Un RCC efectúa correcciones cinéticas de las desviaciones del elemento terminal.<sup>7</sup>

### CONTROL ACTIVO DE FUERZA

En el control activo, las fuerzas de contacto deben ser controladas porque de eso depende la eficiencia y el grado de éxito de la tarea a efectuar.<sup>1,6,8,9,10</sup> En este caso, las fuerzas de contacto no son indeseables y son necesarias para el éxito de la tarea.

Una característica de la tarea a efectuar es que las fuerzas de contacto asuman un valor determinado, o que obedezcan a un determinado perfil.<sup>1</sup> En el control activo, el valor de la fuerza de contacto es retroalimentado a un controlador, siendo usado para modificar o generar en línea las trayectorias deseadas.<sup>7</sup>

El control activo de fuerza es fundamental en tareas de pulimento, desbaste y lijado de superficies rígidas (metal, vidrio, cerámica, madera, etc.).<sup>1,2,6</sup>

La manipulación de objetos frágiles o fácilmente deformables, se puede beneficiar grandemente con este método, centrándose especialmente en tareas tecnológicas en las que el factor fuerza/momento de trabajo es esencial.<sup>1</sup>

De manera general todos los procesos tecnológicos que funcionan por abrasión, montaje automático de equipos y compuertas, desbaste de materiales excedentes, seguimiento de superficies, así como también el control de calidad o detección de irregularidades, etc., pueden beneficiarse mucho de un control de fuerza adecuado.

### ARQUITECTURAS DE CONTROL DE FUERZA

Según<sup>8</sup> el estudio del control de fuerza en robots se inició en la década de los 50 y 60 del siglo pasado, surgiendo obviamente grandes problemas de estabilidad de difícil solución.

El avance en los recursos computacionales y en algoritmos sofisticados permitió enfrentar los problemas de estabilidad, desarrollándose así diversas arquitecturas de controladores de fuerza,<sup>8,11</sup> entre los que se encuentran: el control explícito de fuerza, el de impedancia, el implícito de fuerza, el híbrido, el de rigidez, y el de amortiguamiento.

#### Control explícito de fuerza

Las dos principales estrategias para el control de fuerza son: el control explícito de fuerza y el control de impedancia.<sup>16</sup>

Sin embargo se ha demostrado, teóricamente y experimentalmente, que un control de impedancia contiene, o es equivalente, a un controlador explícito de fuerza.<sup>1,5,6</sup> El Control explícito de fuerza, traduce en el comando directo, explícito, la fuerza de referencia o deseada,  $f_d$ , con el objetivo de minimizar la función de error de fuerza:

$$E_f = f_d - f_{md}$$

Donde  $f_{md}$  es la fuerza medida.

Se han propuesto dos tipos de controles explícitos de fuerza: El control explícito directo (basado en fuerza) y el control explícito indirecto (basado en posición).

### Control explícito directo

El control explícito de fuerza directo,<sup>1,5,11</sup> ilustrado en la figura 1, tiene como base un controlador de fuerza,  $F$ , que compara las señales de fuerza deseada,  $f_d$ , con la medida,  $f_{md}$ , y las procesa, suministrando una señal de comando directamente a la planta (robot),  $G$ . Una fuerza de referencia también puede ser retroalimentada positivamente y sumada a la señal de comando de la planta.

El controlador  $F$  normalmente cuenta con un subconjunto controlador PID (i.e. P, I, PD, PI, y PID). Si los resultados son adecuados, no es necesario recurrir a técnicas más sofisticadas y matemáticamente más exigentes.<sup>1,6</sup> En caso de que resulte que el controlador PID (o un subconjunto de este) es inadecuado, la comprensión del sistema de control con PID proporciona información muy útil para análisis más complejos.<sup>6</sup>

### Control explícito indirecto

En el control explícito indirecto de fuerza, se utiliza un lazo exterior de fuerza, que suministra comandos de posición a un lazo interior, constituido por un controlador de posición.<sup>1,6</sup> El control explícito indirecto de fuerza fue el primero en ser implementado, por razones prácticas, en la medida que la mayoría de los robots comerciales no permiten el acceso directo a los actuadores.<sup>6</sup>

En este tipo de control se consideran dos alternativas las cuales se describen a continuación.<sup>1</sup> La primera alternativa,<sup>1,6</sup> ilustrada en la figura 2, el lazo exterior suministra referencias de posición a un lazo interior, constituido por un controlador

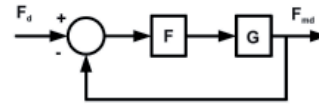


Fig. 1. Control explícito directo de fuerza (G representa la planta y F es un controlador).

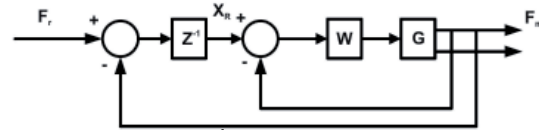


Fig. 2. Control explícito indirecto usando relación de admitancia (W es el controlador, G es la planta a controlar: robot).

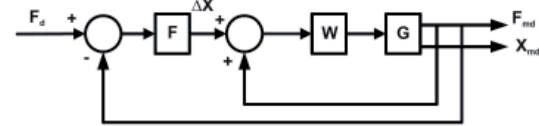


Fig. 3. Controlador explícito indirecto usando un controlador de fuente en el lazo exterior (F es el controlador de fuerza,  $\Delta X$  es el error de posición, W es el controlador de posición, G es la planta a controlar: robot).

basado en posición,  $W$ . La fuerza de referencia es transformada en una posición de referencia a través de una admitancia, la cual es descrita por la inversa de la impedancia de segundo orden:

$$A = Z^{-1} = (m_f s^2 + c_f s + k_f)^{-1}$$

Donde  $m_f$ ,  $c_f$ ,  $k_f$  son la masa, la constante de amortiguamiento y la rigidez de contacto.

En la segunda alternativa,<sup>1</sup> ilustrada en la figura 3, el lazo exterior incluye un controlador de fuerza, el que permite suministrar referencias de posición al controlador,  $G$ , del sistema de control del robot. Normalmente las referencias de posición son suministradas en la forma de error de posición.

Los métodos de control explícito indirecto de fuerza, pueden ser reescritos como métodos de control explícitos directos de fuerza.<sup>1</sup> En realidad los métodos indirectos, basados en posición, difieren de los métodos directos, basados en fuerza, por la adición de rigidez a la planta.<sup>6</sup>

### Controlador PI-Difuso

Para poder compensar las incertidumbres del medio ambiente, resultantes de los modelos de contacto, imprecisos o simplificados, y de la formulación dinámica de contacto adoptada, se opta por utilizar un controlador basado en lógica difusa (*Fuzzy Logia*).<sup>1,3,4,12,13</sup>

Debido al hecho de que el modelo dinámico de un robot es un conjunto de ecuaciones no lineales, es difícil construir un sistema de control de fuerza no lineal sin retroalimentación.<sup>4</sup> La información proveniente del sensor de fuerza/momento contiene ruido, e, incluso recurriendo al uso de filtros para procesar la señal del sensor, no es posible eliminar las incertidumbres relacionadas con las fuerzas medidas. El modelo matemático del proceso a controlar también es difícil de obtener. Para los controladores PI convencionales, utilizados en operaciones de control de fuerza, los parámetros del controlador tienen que ser ajustados, con el fin de obtener la actuación pretendida, sin embargo, es difícil de parametrizar correctamente los valores de ganancia.<sup>4</sup> Estas dificultades vuelven difícil la aplicación de un controlador PI clásico en procesos industriales. Recuérdese que los ambientes industriales son claramente incompatibles con los *setups* complejos y requerimientos de una elevada especialización del operador.<sup>1</sup>

Un controlador PI clásico exhibe una gran dependencia del modelo utilizado para representar el controlador de posición, el robot y el sensor de fuerza/momento, limitando sus aplicaciones. Se propone así la utilización de un controlador PI basado en lógica difusa, tal como se presenta en.<sup>1,4,14</sup>

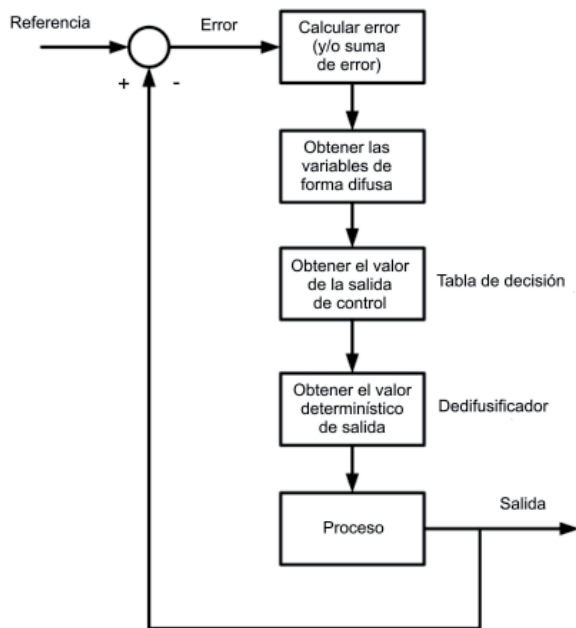


Fig. 4. Arquitectura general para el sistema de control

En el proyecto de un controlador difuso, no es necesario recurrir a modelos matemáticos detallados. El control es hecho en base a un conjunto de reglas heurísticas, cuyo establecimiento se basa en la experiencia humana. Los controladores difusos son más robustos a pequeñas variaciones de los parámetros del sistema. Específicamente, los controles PI difusos empiezan a ser implementados con éxito en diversas aplicaciones industriales, mostrando mejores resultados que los controladores clásicos.<sup>4</sup>

Un controlador de lógica difusa (CLD) se basa en:<sup>1,3,15</sup>

- 1.- Una base de conocimiento definida por reglas simples de tipo “If <condición> Then <acción>”, utilizando variables definidas o caracterizadas vagamente.
- 2.- Un mecanismo de inferencia que permite obtener las salidas de control.

En la figura 4 se representa la arquitectura general propuesta para el sistema de control.<sup>1,12,14</sup>

Los sistemas difusos son aproximaciones universales, o sea si un sistema es controlable, puede ser implementado un controlador difuso equivalente a un controlador lineal. En el caso estudiado el controlador tiene tres variables: dos variables de

Tabla I. Tabla de entradas y salidas.

	Definición de variable	Variable lingüística
Entradas	Error de fuerza $\Rightarrow e(k)=f_a(k)-f_d$ Variación de error $\Rightarrow de(k)=e(k)-e(k-1)$	ERRO DERRO
Salidas	Variable de control $\Rightarrow du(k)$	DU

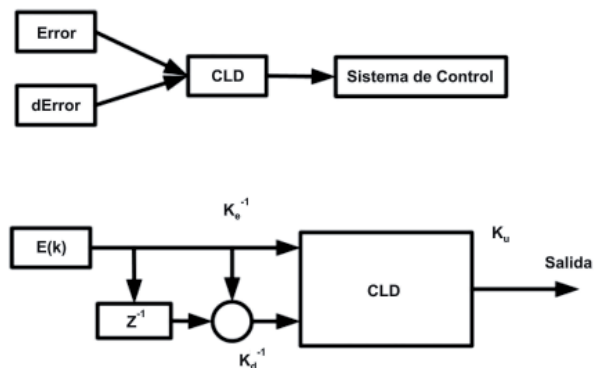


Fig. 5. Controlador de fuerza basado en lógica difusa.

Tabla II. Niveles del sensor de fuerza/momento (JR3).<sup>16</sup>

$e(k)/fd\%$	$de(k)/fd\%$	nivel
<-75	<-50	-9
[-50, 75[	[-40, -50[	-8
[40, 50[	[-35, -40[	-7
[-30, -40[	[-30, -35[	-6
[-25, -30[	[-25, -30[	-5
[-20, -25[	[-20, -25[	-4
[-15, -20[	[-15, -20[	-3
[-10, -15[	[-10, -15[	-2
[b1, -10[	[-b2, -10[	-1
]a1, b1[	]a2, b2[	0
[a1, 10[	]a2, 10[	1
[10, 15[	]10, 15[	2
]15, 20[	]15, 20[	3
]20, 25[	]20, 25[	4
]25, 30[	]25, 30[	5
]30, 40[	]30, 35[	6
]40, 50[	]35, 40[	7
]50, 75[	]40, 50[	8
>75	>50	9

entrada y una variable de salida,<sup>1,3,4,14</sup> de acuerdo a lo presentado en la tabla I y en la figura 5.

### Desarrollo de un controlador PI difuso

Considerando el sensor de fuerza/momento utilizado en el trabajo presentado en,<sup>10</sup> se divide la gama total del sensor en 19 zonas obtenidas en función de los cocientes porcentuales de error,  $e(k)/f_d$ , y de la diferencia del error,  $de(k)/f_d$ , en función de la fuerza deseada (ver tabla II). La zona muerta, que se verifica cuando las entradas asumen el valor cero, pueden ser ajustadas variando a1, a2, b1, b2. Así:

Zona muerta para  $e(k)/f_d \rightarrow ]a1, a2[$

Zona muerta para  $de(k)/f_d \rightarrow ]b1, b2[$

Utilizando el toolbox de fuzzy logic de Matlab se desarrollaron tres tablas de decisión, siendo una de ellas presentada en la tabla III.<sup>1</sup> Ésta fue obtenida como se describe en<sup>1</sup>, utilizando un conjunto de reglas optimizadas para este tipo de aplicaciones, y que se basan en una tabla de decisión clásica extendida para las condiciones verificadas en este trabajo.

Tabla III. Tabla de decisión difusa PI. (Se presentan los valores redondeados para efecto de aplicación gráfica).

	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8
8	0	-1	-2	-2	-2	-3	-4	-4	-4	-4	-6	-6	-6	-6	-7	-7	-7
7	1	0	-1	-1	-2	-3	-3	-3	-4	-4	-5	-5	-6	-6	-6	-6	-7
6	2	1	0	-1	-2	-2	-2	-3	-4	-4	-4	-5	-6	-6	-6	-6	-7
5	2	1	1	0	-1	-1	-2	-3	-3	-3	-4	-5	-4	-4	-6	-6	-6
4	2	2	2	1	0	-1	-2	-2	-2	-3	-4	-4	-4	-5	-6	-6	-6
3	3	3	2	1	1	0	-1	-1	-2	-3	-3	-3	-4	-4	-5	-5	-6
2	4	3	2	2	2	1	0	-1	-2	-2	-2	-3	-4	-4	-4	-5	-6
1	4	3	3	3	2	1	1	0	-1	-1	-2	-3	-3	-3	-4	-5	-5
0	4	4	4	3	2	2	2	1	0	-1	-2	-2	-2	-3	-4	-4	-4
-1	5	5	4	3	3	3	2	1	1	0	-1	-1	-2	-3	-3	-3	-4
-2	6	5	4	4	4	3	2	2	2	1	0	-1	-2	-2	-2	-3	-4
-3	6	5	5	5	4	3	3	3	2	1	1	0	-1	-1	-2	-3	-3
-4	7	6	6	5	4	4	4	3	2	2	2	1	0	-1	-2	-2	-2
-5	7	6	6	5	5	5	4	3	3	3	2	1	1	0	-1	-1	-2
-6	7	6	6	6	6	5	4	4	4	3	2	2	2	1	0	-1	-2
-7	7	6	6	6	6	5	5	5	4	3	3	3	2	1	1	0	-1
-8	7	7	7	6	6	6	6	5	4	4	4	3	2	2	2	1	0

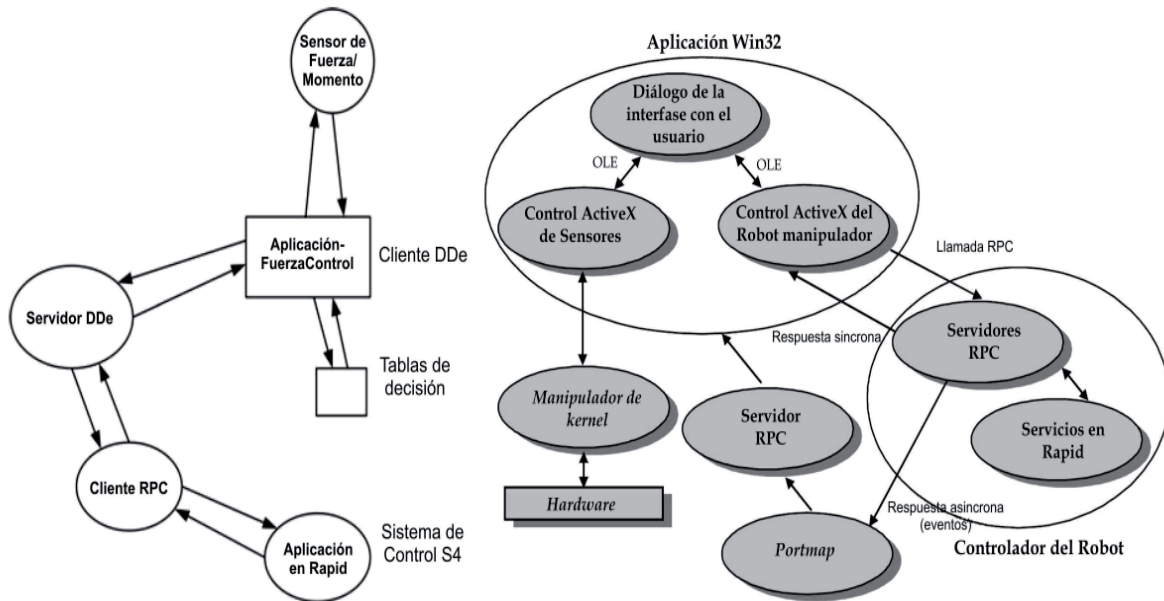


Fig. 6. Arquitectura del sistema implementado.

### APLICACIÓN DESARROLLADA

En este trabajo además de haberse tenido que implementar un controlador de fuerza, se elaboró un sistema de ensayo de los diferentes factores que influyen en un sistema de este tipo. El software desarrollado obedece a una filosofía de software de arquitectura distribuida cliente-servidor. Específicamente consiste en una aplicación cliente basada en API Win 32, que corre en PC, esta aplicación hace lecturas de los valores de la fuerza del momento verificado con una razón de 10 ms. El sensor utilizado es un sensor de fuerza/momento JR3.<sup>16</sup> Paralelamente fue desarrollado un servidor que corre en el controlador del robot ABB IRB 2400,<sup>8</sup> utilizando un lenguaje de programación RAPID. La comunicación y la sincronización entre el servidor que corre en el robot, y la aplicación cliente que corre en la PC (figura 6), fueron realizados recurriendo a un servidor RPC (Remote Procedure Calls).

El programa cliente que corre en la PC calcula el valor de la corrección a efectuar en la posición actual del robot, teniendo en cuenta el valor de la fuerza pretendida y el valor actual. El valor de la corrección, en la posición que el manipulador tiene que efectuar, es enviado a través de una llamada remota hecha a través de la red disponible (Ethernet).

Esta instrucción de corrección sólo es enviada cuando la aplicación servidor, recurriendo a eventos RPC, envía, para la aplicación cliente la información de que ya efectuó la corrección solicitada en el ciclo anterior; o sea, siempre que el robot termina una corrección solicitada, le será enviado un nuevo valor de corrección de posición. Se verificó que el sistema implementado permita efectuar una corrección cada 100 ms, lo que permite velocidades lineales considerables por parte del manipulador.

El sistema implementado permite efectuar diferentes pruebas, obteniéndose así información útil para aplicaciones industriales. Los ensayos efectuados consistieron en la utilización de un lápiz en la punta de la herramienta, soportado por un muelle amovible, efectuándose trayectorias de contacto del lápiz con un plano (figura 7). Fueron elaborados ensayos para varios valores de rigidez de contacto, usando para ello muelles de diferentes constantes de elasticidad.

La aplicación desarrollada (figura 8) permite también efectuar ensayos de trayectorias, siendo la fuerza de contacto pretendida constante, o exigiendo que la fuerza de contacto obedezca a un determinado perfil deseado. Para ambos casos la superficie de contacto puede presentar varias inclinaciones. Con

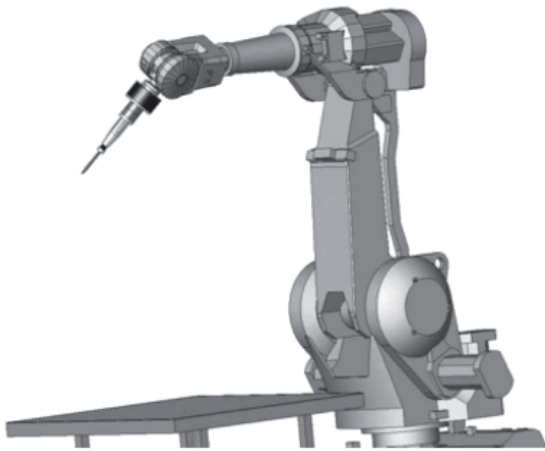


Fig. 7. Sistema de prueba empleado.

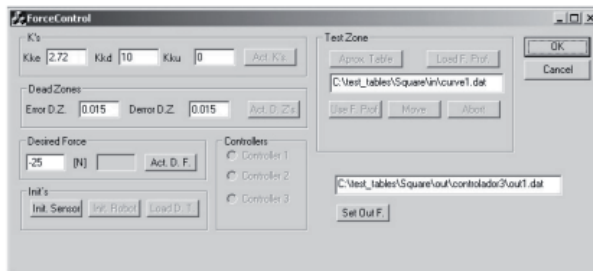


Fig. 8. Aplicación desarrollada (PC).

el fin de poder obtener una mejor configuración del funcionamiento de los controladores desarrollados, es permitido al usuario configurar la “zona muerta” así como las constantes que afectan las variables del controlador PI-difusos ( $k_e$ ,  $k_d$ , y  $k_u$ ), ver figura 5.

Los resultados obtenidos demuestran la utilidad práctica del sistema desarrollado, en virtud de los excelentes resultados mostrados en el seguimiento de perfiles de fuerza.

Algunos de esos perfiles (triangulares, cuadrados, sinusoidales, etc.) son muy exigentes desde el punto de vista de control, por lo que los resultados obtenidos son particularmente significativos (figura 9). Los ejemplos de la figura 9, se refieren a los casos en que fueron impuestos perfiles triangulares (diente de sierra) unidimensionales, en los cuales variaron ligeramente las constantes del controlador (ver detalles en la figura).

La onda triangular que funciona como referencia de fuerza, varía entre 20 y 30 Newtons (los valores de fuerza representados en la figura son lecturas de

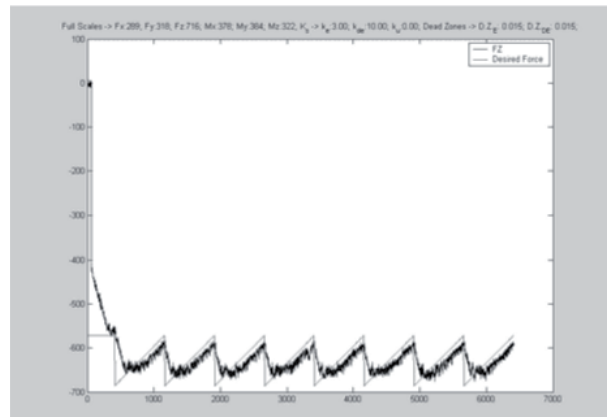
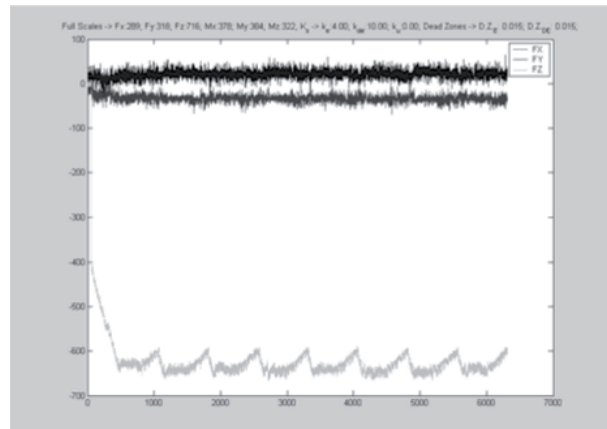


Fig. 9. Prueba con el perfil de fuerza deseado triangular.

ADC de 16 bits). La medida de la fuerza es obtenida en ciclos de 10 ms (unidades de tiempo de la figura 9), y el ciclo de control es inferior a 100 ms (ciclos en que es actualizada la posición del robot).

## CONCLUSIONES

En este artículo se presenta una breve revisión del problema del control de fuerza en robótica industrial. Se describe el desarrollo y realización de una arquitectura de control indirecto de fuerza basada en un controlador difuso-PI. Se desarrolló también un sistema de pruebas que consiste de un manipulador, una herramienta de rigidez variable y un sensor de fuerza/momento.

El sistema permite realizar trayectorias de contacto sobre varias superficies, imponiendo diversas condiciones a la fuerza deseada. La arquitectura de control propuesta fue probada con resultados significativos que justifican sea de interés para aplicaciones industriales.

## REFERENCIAS

1. J. N. Pires, "Realização de Controlo de Força em Robôs Manipuladores Industriais", Tese de Doutoramento, Coimbra (1999).
2. S. Chiaverini e B. Siciliano, "The Parallel Approach to force/Position Control of robotic Manipulators", IEEE Transactions on Automatic Control, Agosto (1993).
3. S. T. Lin e A. K. Huang, "Hierarchical Fuzzy Force Control for Industrial Robots", IEEE Transactions on Automatic Control, Agosto (1998).
4. K. T. Song e H. P. Li, "A Fuzzy Adaptive Control Design for Compliant Motion of a Manipulator", Proceed-ings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, Minneapolis, Abril (1996).
5. R. Volpe e P. Khosla, "A Theoretical and Experimental Investigation of Impact control for manipulators", The International Journal of Robotics Research, Agosto (1993).
6. R. Volpe e P. Khosla, "A Theoretical and Experimental Investigation of Explicit Force Control Strategies for Manipuladores", IEEE Transactions on Automatic Control, Novembro (1993).
7. J. De Shutter, J. Katupitiya, P. Vanherck e H. Van Brussel, "Active Force Feedback in Industrial Robotic Assembly: A Case Study", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2 (4) (1987).
8. ABB IRB1400 Users Manual, ABB Flexible Automation (1997).
9. J. De Shutter e H. Van Brussel, "Compliant Robot Motion I. A Formalism for specific Compliant Motion Tasks", The International Journal of Robotics Research, 7(4), Agosto (1988).
10. J. De Shutter e H. Van Brussel, "Compliant Robot Motion II. A Control Approach Based on External Control loops", The International Journal of Robotics Research, 7 (4), Agosto (1988).
11. B. Siciliano, L. Villani; Robot Force Control, Kluwer Academic Publishers, (1999).
12. H. X. Li e H. B. Gatland, "A new methodology for designing a fuzzy logic controller", IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Março (1995).
13. K. T. Song e H.P. Li, "A fuzzy adaptive control, design for compliant motion of a manipulator", Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Minneapolis, Abril (1996).
14. G. M. Abdelnour, C.H. Chang, F.H. Huang e J. Y. Cheung, "Design of a fuzzy controller using input and output mapping factors", IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics, Setembro/Outubro (1991).
15. E. Cox, "Fuzzy Fundamentals", IEEE Spectrum, Outubro (1992).
16. Sensores de Força/Momento JR3, <http://www.jr3.com>
17. D. E. Whitney, "Historical Perspective and State of Art in Robot force Control", The International Journal of Robotics Research, 6(1), Spring (1987).
18. K. Nilson, "Industrial Robot Programming", Ph.D. Thesis, Department of Automatic Control, Lund Institute of Technology, Maio (1996).
19. K. Ogata, Modern Control Engineering, Prentice-Hall Inc. (1970).