

Autómata por redes neuronales para evitar colisiones de robots

Francisco Aguayo González y Narciso Moreno Alfonso

En este artículo se desarrolla una aplicación de redes de neuronas artificiales para gestionar la seguridad en sistemas donde intervengan robots en movimiento, empleando un método de procesamiento jerárquico, estructurado en varios niveles, para distinguir distintos escenarios de riesgo. Este sistema de procesamiento se divide en niveles de actuación razonada e instintiva, en función de la importancia requerida en las acciones.



Narciso Moreno Alfonso, nacido en Sevilla (1971), es ingeniero técnico industrial, sección electrónica, por la E.U.I.T.I. de Sevilla (1994). Asiste a cursos y jornadas de Automatización Industrial (UNED, Avila), Seguridad e Higiene en el Trabajo (E.U.I.T.I. de Sevilla), y realiza trabajos sobre telemandos durante 1994, en la Compañía Sevillana de Electricidad, S.A.

Francisco Aguayo González, profesor del Departamento de Ingeniería del Diseño de la Escuela Universitaria Politécnica de Sevilla, es el director del proyecto que ha dado lugar a este trabajo.

En todo proceso de fabricación, puesto en marcha para elaborar unos objetivos productivos, el producto en desarrollo y su entorno se ven inmersos en una serie de riesgos, que de no controlarse convenientemente, indudablemente afectarán negativamente a los objetivos fundamentales de un proceso de fabricación:

- Calidad total.
- Bajos costes.
- Seguridad.

Debe concebirse, por tanto, un sistema de procesado, capaz de gestionar la seguridad en cualquier entorno automatizado que cuente con una estructura de análisis y actuación,

de nivel superior a la empleada en el propio proceso a controlar, y de forma que sea capaz de procesar todas las situaciones de riesgo susceptibles de plantearse, independientemente del sistema físico o proceso de fabricación en que intervenga. Para obtener la solución conceptual de este planteamiento, hemos desarrollado la siguiente secuencia de acciones (**figura 1**):

- Análisis de necesidades.
- Determinación del estado del arte y análisis de los puntos débiles que presentan las implementaciones actuales.
- Propuesta de nuevas soluciones.

- Valoración de soluciones y especificación de operaciones.

El producto final del desarrollo, es un autómata implementado en Redes Neuronales, flexible y modular.

Estudio de Necesidades

En esta fase de desarrollo debemos analizar en qué situaciones se dan los riesgos principales y en qué afectan al proceso de elaboración del producto. Con ello podremos determinar las especificaciones funcionales, consistentes en la generación y articulación de funciones abstractas que cubren los objetivos y necesidades que habrá de satisfacer el autómata de control neuronal.

Consideremos una planta de fabricación flexible, en la cual se realizan tareas donde intervienen distintas células de trabajo interaccionando entre sí y cuyo funcionamiento se basa en el agrupamiento sinérgico de máquinas auxiliares, robots y eventualmente personal humano. En escenarios como éste, pueden deducirse las causas típicas de accidentes, a partir del conocido *árbol de fallos*. Este organigrama constituye una recopilación de las principales causas de accidentes: en resumen, és-

Sugimoto y Kawaguchi:
“Sólo cuando los robots sean capaces de detectar la presencia de humanos y realizar acciones para evitar accidentes, estará garantizada la seguridad”

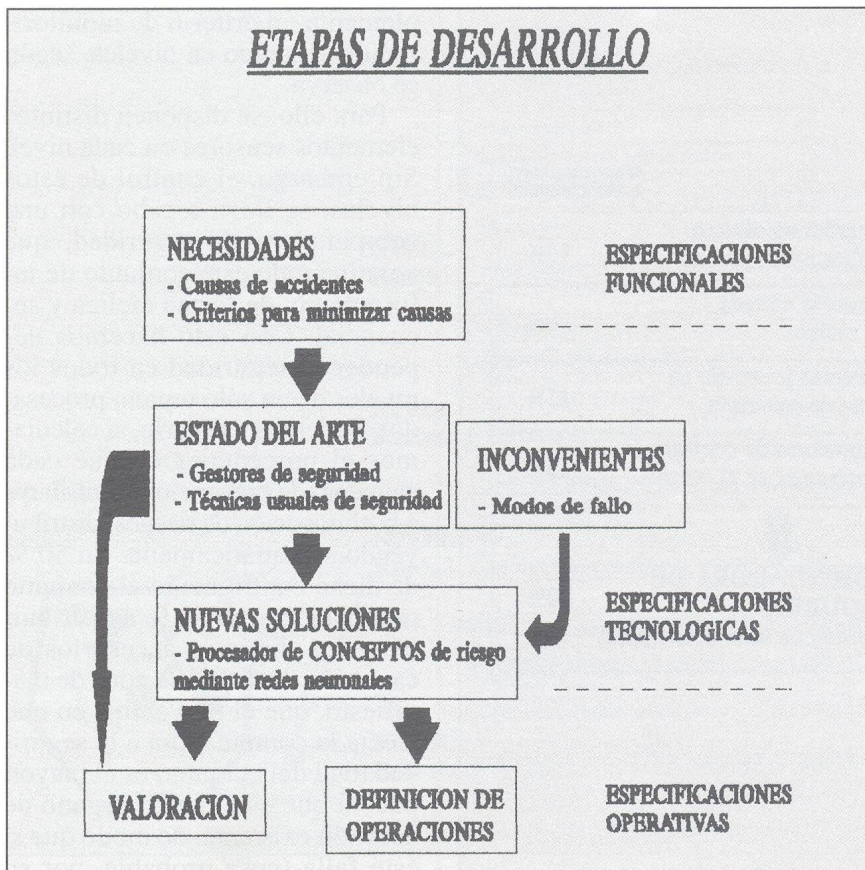


Figura 1. Etapas para el desarrollo de un automatismo.

- FS4. Controlar permanencia de obstáculos en zona de coberturas.
- FS5. Controlar intercepción obstáculo-trayectoria de robot.
- FS6. Controlar llegadas a zonas de atrape.
- FP3. Controlar ritmos de movimiento.
 - FS7. Controlar zonas de intercepción de robot-robot.
 - FS8. Controlar movimientos dirigidos por gestor de seguridad.
- FP4. Controlar contactos y fallos graves.
 - FS9. Detectar contactos.
 - FS10. Detectar defecto de energía.
 - FS11. Detectar fallo de presión en gripa.
 - FS12. Detectar movimientos bruscos.
 - FS13. Detectar límites de movimiento.

Con esto, se pretende poner de manifiesto que sería conveniente controlar los eventos del entorno

tas pueden ser debidas, bien a errores de control, a errores cinemáticos o dinámicos, o bien debidas a errores de apreciación humanos. Con un análisis exhaustivo de este esquema, definimos las premisas de actuación del sistema de control, y concluimos que el objetivo fundamental (o función global a satisfacer) del automatismo de control será la de *eliminar riesgos*, y las funciones (subfunciones) primarias, encaminadas a cumplir con aquélla se orientarán al control de las situaciones que se muestra en la figura 2 y que se resume como sigue:

FG. Eliminar riesgos

- FP1. Controlar perímetro de trabajo.
 - FS1. Impedir transferencia de objetos involuntaria con recinto.
 - FS2. Controlar entradas y salidas.
 - FS3. Controlar velocidad de aproximación.
- FP2. Controlar zona de cobertura de robots.

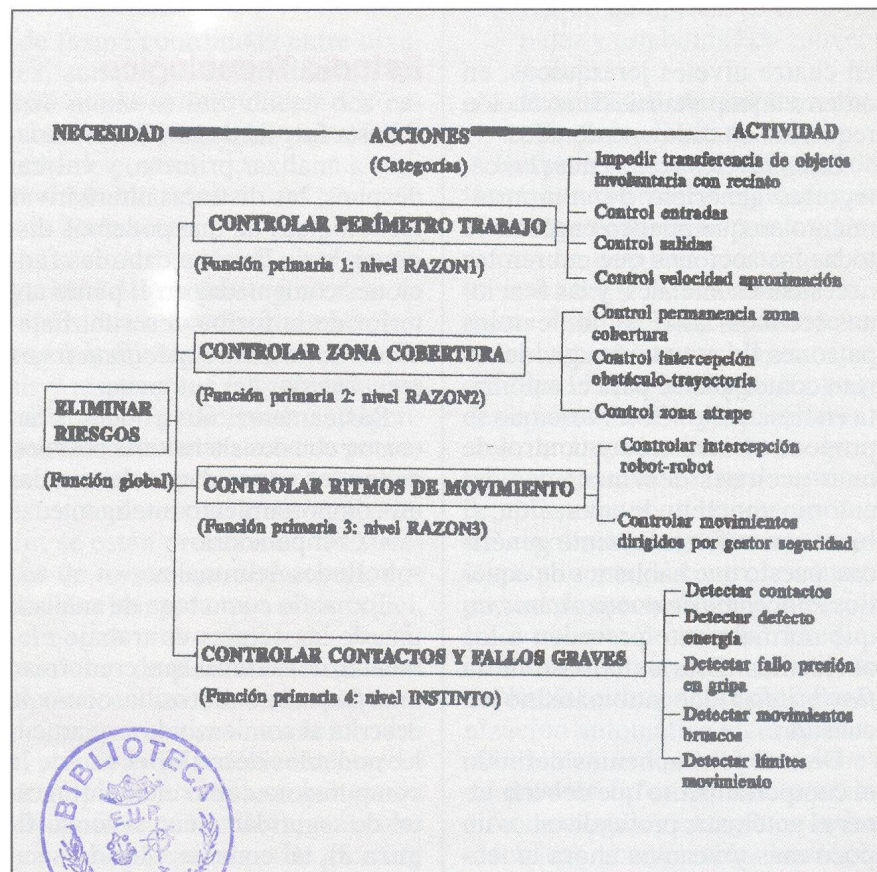


Figura 2. Jerarquía de control.

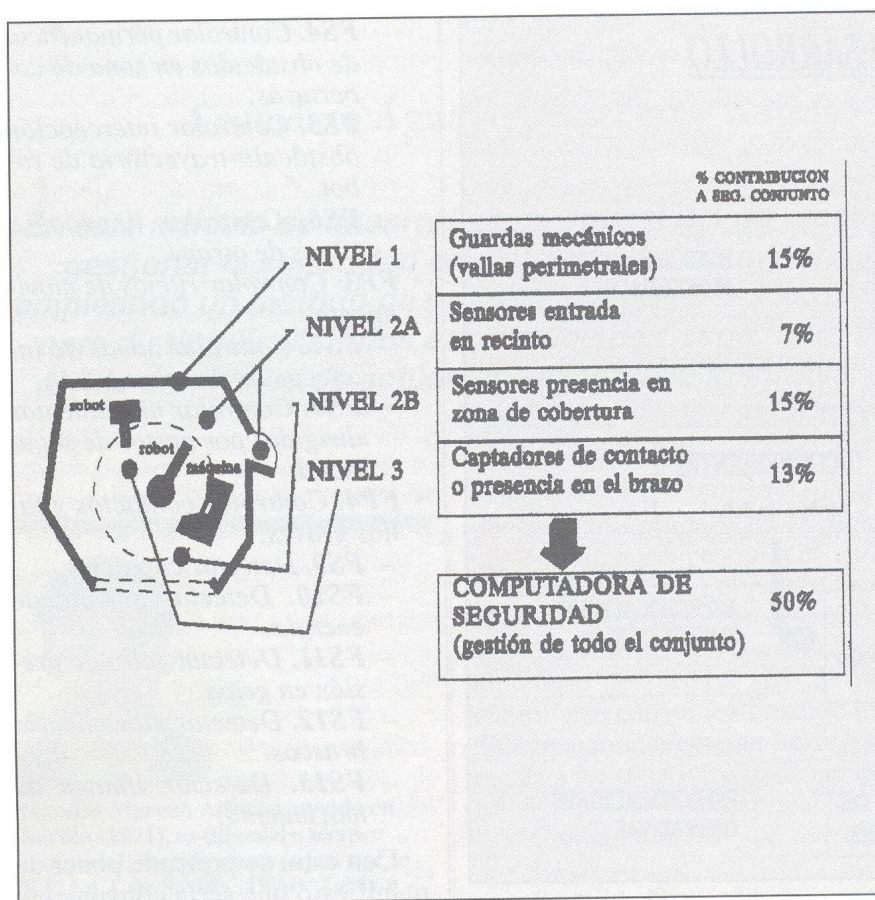


Figura 3. Técnica de detección mediante computador.

en cuatro niveles jerárquicos, en orden a la importancia de actuación requerida en cada uno de ellos.

Estos niveles representan las categorías genéricas de comportamiento en que pueden englobarse todas las acciones que cubren las necesidades iniciales, y las funciones secundarias (FS), indican los patrones de actuación que deberían contemplarse para el autómata en desarrollo. Obsérvese que se propone el muestreo y control de unas acciones desvinculadas del entorno concreto de operación, si bien, son suficientemente genéricas, puesto que hablamos de aquellos *conceptos de comportamiento* que normalmente preceden a los accidentes. Esta es la base de la *flexibilidad* del automatismo en cuestión.

De esta forma, hemos definido el comportamiento que debería tener el autómata: profundicemos un poco más y veamos ahora la tecnología disponible para implementar un sistema de este tipo.

Estudio Tecnológico

En esta fase de desarrollo, entraríamos a analizar primero, y valorar después, las distintas alternativas tecnológicas de que podemos disponer, para llevar a cabo las funciones comentadas en el punto anterior de la forma descrita. Estableceríamos, las *especificaciones tecnológicas* del autómata.

Básicamente, nos podemos encontrar con dos alternativas posibles, dadas sus capacidades de simular un comportamiento inteligente;

- Computadora.
- Redes neuronales.

Tomando como base de análisis, una de las células de trabajo elemental, de entre las que conforman una factoría robotizada como la descrita al comienzo de este artículo, podemos describir el uso de la computadora como elemento gestor de seguridad en un sistema (**figura 3**), tal como es llevado a cabo en buena parte de las factorías actuales. En algunos casos, se im-

plementa un criterio de monitorización separado en niveles, según se observa.

Para ello, se disponen distintos elementos sensores en cada nivel. Sin embargo, el control de estos niveles, se lleva a cabo con una computadora de seguridad, que aglutina todo este conjunto de información, de forma cíclica y secuencial. Con esto hacemos depender la seguridad en todos los niveles de un sólo órgano procesador. Podemos valorarlo, si calculamos el porcentaje en que cada elemento de prevención, contribuye a la eliminación de riesgos, distribuyendo sistemáticamente un 50 % de dicha contribución al conjunto procesador, y un 50 % a distribuir entre los distintos accesorios de captación de datos. Se pone de manifiesto, que el porcentaje en que afecta la computadora a la seguridad total del conjunto es el mayor, puesto que es el único órgano de decisión existente, de modo que si éste falla (cosa probable, por su complejidad) falla *todo* el sistema de seguridad. El uso de la computadora de seguridad, presenta las siguientes desventajas:

- El chequeo de las situaciones del entorno es de forma cíclica y secuencial. El control, por tanto NO es en tiempo real.
- Existe la necesidad de disponer librerías extensas y emplear mucho tiempo en programación, cuando se maneja gran volumen de datos en el entorno. Además, surgen equipos de un coste y complejidad considerables.
- No existe posibilidad alguna de actuación, cuando se presentan situaciones de comportamiento nuevas, no contempladas en la programación inicial. Por tanto, escasa o nula adaptabilidad.

Nueva técnica de procesado

El sistema de gestión jerárquico del entorno propuesto, presenta unas relaciones con la célula de trabajo, como la mostrada en la **figura 4** compuesto por:

- *Procesador de Nivel 1 (Razón 1), que gestiona:*

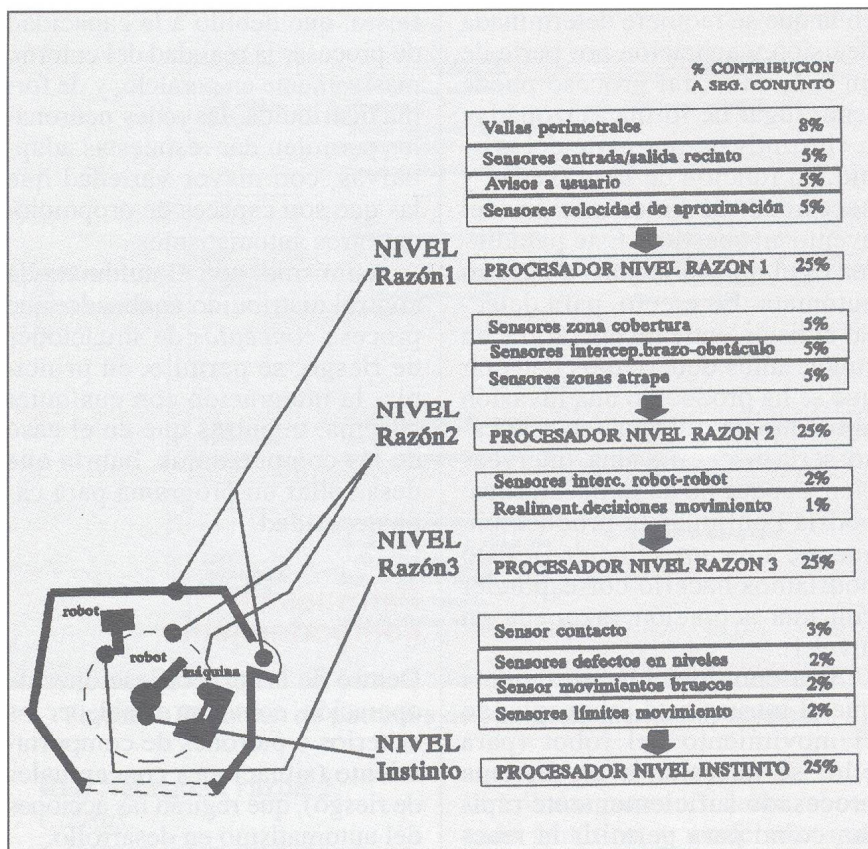


Figura 4. Ejemplo de interconexión, con sistema de procesamiento distribuido.

- Vallas perimetrales.
- Sensores de entrada/salida a recinto.
- Avisos a usuarios.
- Sensores de velocidad de aproximación de intrusos.
- Procesador de Nivel 2 (Razón 2), que gestiona:
 - Sensores de la zona de cobertura.
 - Sensores intercepción brazo-obstáculo.
 - Sensores zona de atrape.
- Procesador de Nivel 3 (Razón 3), que gestiona:
 - Sensores de intercepción robot-robot.
 - Realimentación decisiones.
- Procesador de Nivel 4 (Instinto), que gestiona:
 - Sensores de contacto.
 - Sensores de defecto de nivel.
 - Sensores de movimientos anómalos.
 - Sensores de límite de movimiento.

En este caso, con un control realmente distribuido, se tiene auténtica jerarquía en el procesamiento

(de forma coordinada entre niveles, aunque no subordinada). De este modo se introducen dos características esenciales para un sistema de control:

- Modularidad
- Robustez

La contribución al nivel de seguridad del conjunto gestor, se ve repartida en los distintos niveles. Así mismo, la velocidad de análisis y respuesta es más elevada que en el caso tradicional (independientemente del sistema de procesamiento usado), porque se tiene una estructura *macroparalela*. Es decir, se están procesando los sucesos de forma «paralela» en todos los niveles, para que actúe aquel, en que se provoquen todas las situaciones de alarma determinadas a priori, en función de los patrones de comportamiento mencionados al principio del artículo. La manera de implementar esta arquitectura de control, puede llevarse a cabo con múltiples técnicas de proceso: computadoras, lógica cableada, automatismos, redes neuronales, etc.

El caso que nos ocupa, es el empleo de las redes neuronales, las cuales presentan múltiples características para ser usadas en sistemas de clasificación de patrones y situaciones donde se requiere;

- Adaptación.
- Gran velocidad de procesamiento y respuesta.

En resumen, las ventajas principales que presentan las redes de neuronas artificiales, son las siguientes:

- Gran velocidad de computación.
- Estructura masivamente en paralelo.
- Adaptación a cambios o insuficiencias en los datos.
- Capacidad de procesar información incompleta.
- Funcionamiento asíncrono: ausencia de reloj central.

Por contra, los principales inconvenientes que nos encontramos con el empleo de redes neuronales son:

- Dificultad para encontrar un método que asegure convergencia total.
- Existe compromiso entre rapidez y estabilidad de convergencia.
- Posibilidad de implementación física limitada.

Respecto al funcionamiento de los sistemas basados en Redes de Neuronas Artificiales, no lo trataremos en detalle, puesto que es un tema en sí mismo suficientemente extenso, para dedicarle un artículo centrado exclusivamente en ellos. En la bibliografía pueden encontrarse algunas referencias de interés. Podemos decir que, en general, existen multitud de aplicaciones en las que pueden ser empleadas las redes neuronales, como son, el control en tiempo real de mecanismos complejos (movimiento de robots), predicción del tiempo, reconocimiento del habla, o de manuscritos, organización automática en el aparcamiento de camiones, aplicaciones de enrutar información, predicción de cargas y energía en redes eléctricas, conversión analógico/digital, procesamiento de señales, etc. Cabe aclarar, que un

ámbito donde es aceptable considerar la implementación de un sistema de redes neuronales, es aquel donde intervienen la *toma de decisiones*, debido a que esas tareas no son simples, principalmente por el gran volumen de datos que se ven implicados en situaciones prácticas, cuya forma de procesamiento puede ser crucial en la obtención de una decisión al respecto. Otro problema que presentan estas aplicaciones es la interpretación en *tiempo real* de tales datos, lo que sugiere un sistema de procesamiento masivamente en paralelo para la captación y procesamiento, como pueden ser las redes neuronales.

En nuestro caso, la aplicación es clara: *clasificación de patrones*.

Especificaciones operativas

Hasta ahora hemos visto unas necesidades por satisfacer, un criterio para satisfacerlas, y hemos descrito brevemente una de esas tecnologías (RN). Como resumen, podríamos decir que las RN tienen casi la flexibilidad de un computador y casi la robustez de la lógica cableada o relés.

A continuación veremos las *especificaciones operativas*, es decir, los parámetros a tener en cuenta para definir las operaciones del autómata, y la descripción en sí de tales operaciones en términos de la tecnología empleada.

En primer lugar, centrémonos en las operaciones que éste debería realizar, analizando las necesidades primarias comentadas al principio del artículo, que debíamos abordar para satisfacer nuestra función global, resumida en *eliminar riesgos*. Con esto, y con la idea de implementar un *sistema de procesamiento distribuido, de forma jerárquica*, planteamos la solución de llevarlo a cabo mediante cuatro RN, una para cada nivel. Estos niveles de procesado, se pueden englobar dentro de dos subniveles: de *razón* y de *instinto*. Este esquema, tiene su base en el propio comportamiento animal. Cuando se da una situación

en la que se requiere determinada decisión y actuación por parte de un individuo, tal proceso puede tener lugar de forma «razonada» o «instintiva», por parte del mismo, en función de la gravedad y necesidad de intervención del evento en cuestión. Este paradigma es el que aplicamos a nuestro autómata. En efecto, para detectar colisión entre un operario y un robot, antes deberíamos detectar que se ha producido una invasión al recinto de trabajos (en este caso sería necesaria una intervención, aunque no de forma drástica: podría continuar la producción, aunque a menor velocidad). Esto podríamos hacerlo corresponder con una actuación razonada en nivel 1.

Si a continuación, se detecta que el intruso está interceptando el movimiento del robot (para ello, se necesitaría un sistema procesado suficientemente rápido, como para permitir la reacción del sistema); podría incluso continuarse la producción, después de hacer una parada de seguridad, advertir al intruso de su retirada de esa zona, y continuar con la marcha, cuando éste reiniciara manualmente el movimiento. Esto, correspondería con una intervención razonada en nivel 2. Ya es conveniente una rapidez de respuesta mayor en el caso anterior. Así, podríamos ir procesando situaciones de mayor gravedad, hasta, por ejemplo, darse el caso de que se detectase contacto entre el intruso y el robot. Esto requeriría de una acción rápida y precisa: frenada de emergencia del sistema. En este nivel no habría lugar a decisiones complejas, por lo que podríamos hacerlo corresponder con una actuación instintiva.

Técnicas neuronales versus computacionales

En la *figura 5*, se representa una comparación de funcionamiento e integración de las dos técnicas que se han tratado: Computadoras y Redes Neuronales.

Básicamente, se pone de mani-

fiesto, que debido a la capacidad de procesar la realidad del entorno masivamente en paralelo, y de forma distribuida, las redes neuronales permiten dar respuestas adaptativas, con mayor variedad que las que son capaces de proporcionar otros automatismos.

Asimismo, con el autómata de control distribuido analizado, que procesa *conceptos* de situaciones de riesgo, se permite, en principio, la integración con cualquier sistema, mientras que en el caso de las computadoras, habría que desarrollar un programa para cada necesidad.

Patrones de comportamiento

Dentro de las especificaciones de operación, conviene establecer los criterios o patrones de comportamiento (situaciones conceptuales de riesgo), que regirán las acciones del automatismo en desarrollo.

Estas pueden resumirse como sigue en la *figura 6*, y son:

Red neuronal, razón 1.

Causas:

- *Entrada de personal en recinto de robots.*
- *Intruso dirigiéndose hacia robots, superando el límite de velocidad.*
- *Intruso penetrando en zona de cobertura.*

Efectos:

- *Reducción de velocidad, del sistema.*
- *Avisos al intruso.*

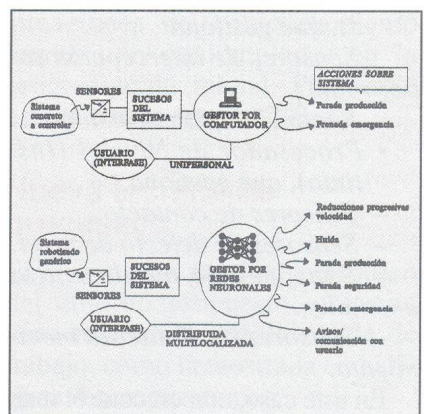


Figura 5. Comparativa de métodos.

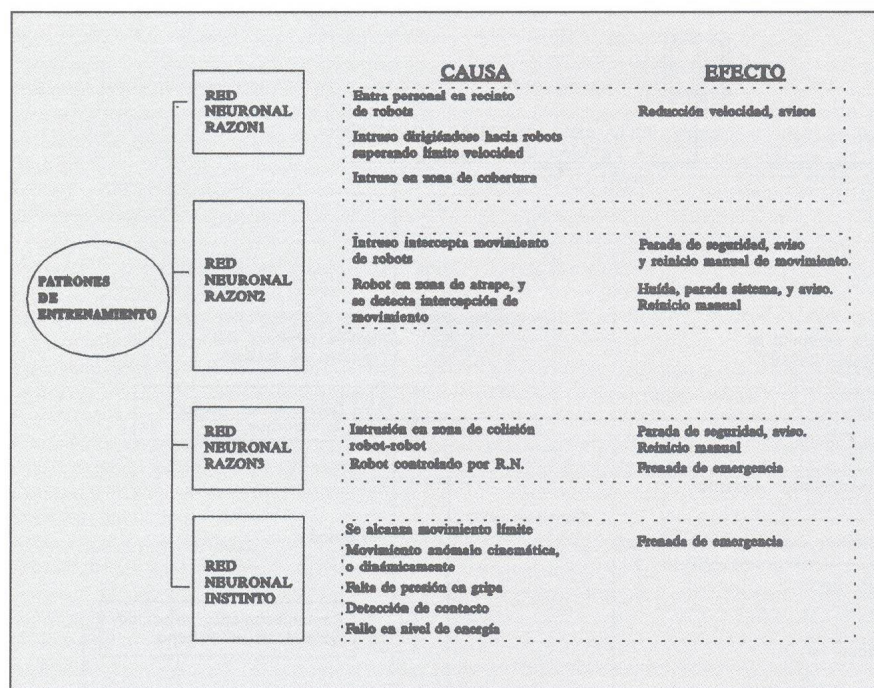


Figura 6. Resumen de patrones de comportamiento por niveles.

Red Neuronal, razón 2.

Causas:

- Intruso intercepta movimiento de robots.
- Robot en zona de atrape, y se detecta intercepción de movimiento.

Efectos:

- Parada de seguridad, avisos y reinicio manual de movimiento.
- Huida, parada del sistema, y aviso. Reinicio manual.

Red neuronal, razón 3.

Causas:

- Intrusión en zona de colisión de robot-robot.
- Robot controlado mediante red neuronal.

Efectos:

- Parada de seguridad, aviso. Reinicio manual.
- Frenada de emergencia.

Red neuronal, instinto.

Causas:

- Se alcanza movimiento límite.
- Existe movimiento anómalo, cinemática o dinámicamente.
- Falta presión en gropa.
- Detección de contacto con robot.

- Fallo en nivel de energía.

Efectos:

- Frenada de emergencia.

Tales operaciones han sido de-

sarrolladas para un sistema robotizado genérico, y modeladas mediante GRAFCET. Se ha usado esta técnica, frente a Redes de Petri, u otros métodos, por ser de amplia difusión en el ámbito de los autómatas industriales.

En las figuras 7 y 8, se muestran algunos modelos de funcionamiento del autómata global. Algunas de las decisiones del autómata implementado mediante redes neuronales, se apoyan con una lógica cableada auxiliar, como comprobación, y con objeto de descargar al sistema principal de proceso de acciones simples y mecánicas. De este modo, se sigue con el rigor del paradigma del control distribuido.

Conclusiones

En resumen, la metodología para el desarrollo del sistema descrito, podría constar de las etapas siguientes:

- Modelo de situaciones de riesgo.
- Simulación.
- Implementación hardware.

Las situaciones conceptuales de riesgo, se moldearon en unas matrices de entrenamiento para las distintas redes, en la que se contemplaron todos los patrones de

entrenamiento independientes entre sí.

Los resultados en el entrenamiento de las redes con estos patrones, y empleando el algoritmo genérico de contrapropagación (Widrow-Hoff), es bastante satisfactorio y rápido, obteniéndose finalmente que cada red converge convenientemente, y se comportan como *memorias asociativas*, en las que ante la presentación de cualquier patrón de entrada, se obtiene como respuesta uno de los patrones de respuesta deseada. En la figura 9, se representa a título ilustrativo una de las *curvas de convergencia*. Esta curva indica el Error Cuadrático Medio de las salidas obtenidas, respecto a las deseadas, de forma que cuando se hace cero, se dice que la red converge, para todos los patrones, y la red neuronal queda entrenada para responder por sí sola.

En lo que se refiere a la fase de implementación física, cabe decir que se está trabajando en la elección y diseño del tipo físico de red neuronal a emplear, considerando básicamente dos métodos:

- Diseño de las redes neuronales a medida, mediante:
 - Métodos ópticos.
 - Métodos electrónicos.
- Empleo de chips comerciales de redes neuronales.

Para una fase posterior de desarrollo, consideramos también la posibilidad de realizar las redes neuronales mediante software, apoyándonos fundamentalmente en la idea de usar el microprocesador como «juez», que determina qué algoritmo debe actuar, simulando una neurona, y a qué otro algoritmo debe enlazar sus resultados. Cada uno de estos algoritmos (de diseño simple), se corresponderían con un elemento de proceso o neurona, y el conjunto de algoritmos, comandados por las decisiones globales del microprocesador simularía el comportamiento neuronal.

Para finalizar, cabría reflexionar acerca de la conclusión apuntada por dos investigadores (Sugimoto y Kawaguchi; Robot Safety, pág. 83, 238) a partir de un minucioso

Autómata por redes neuronales

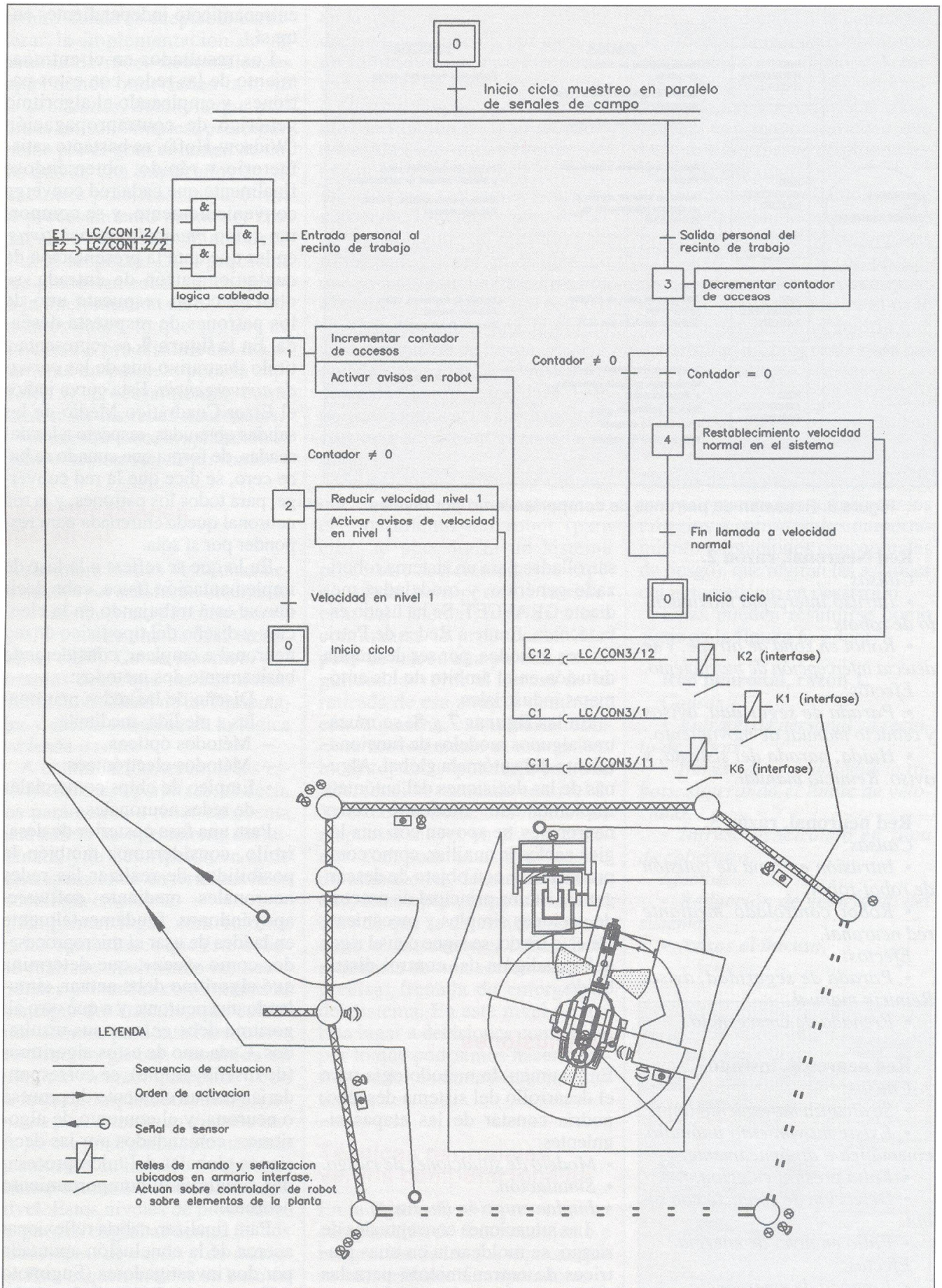


Figura 7. Modelo de operaciones de lógica cableada.

Autómata por redes neuronales

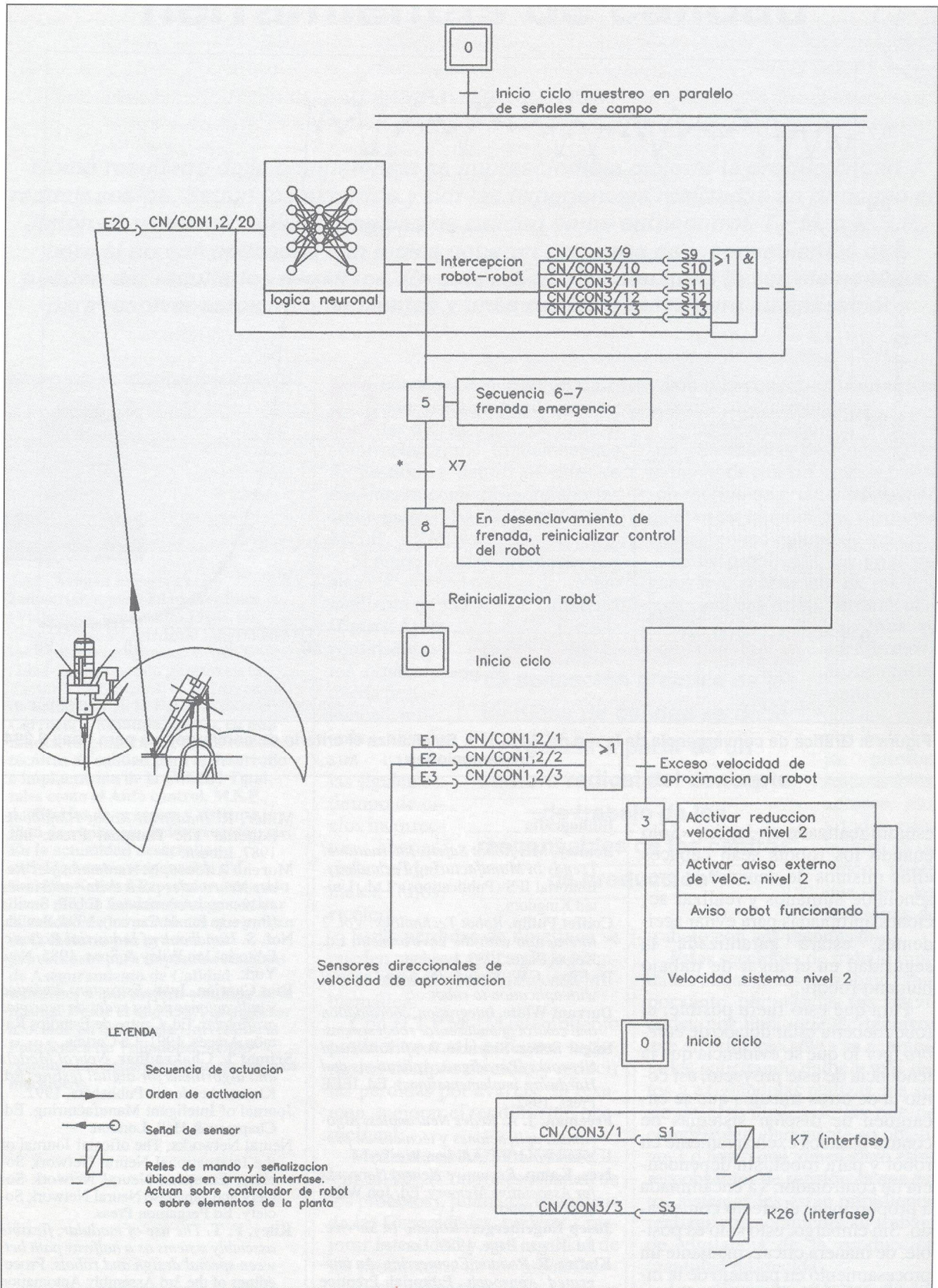


Figura 8. Modelo de operaciones de lógica neuronal.

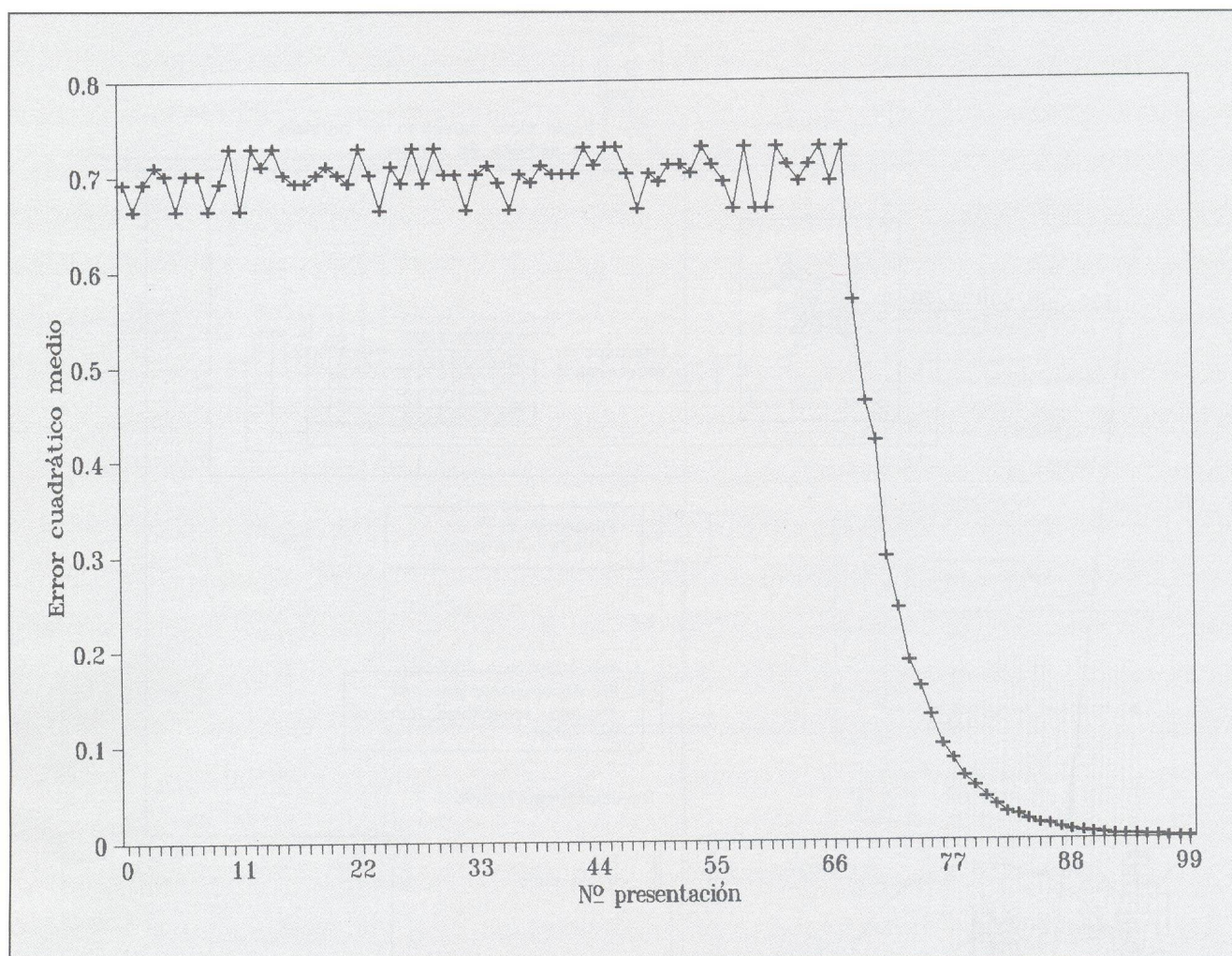


Figura 9. Gráfica de convergencia de la red de RAZON 1. Se alcanza el criterio de convergencia para unas 3.294 presentaciones.

estudio realizado en Japón; «Sólo cuando los robots sean capaces ellos mismos de detectar la presencia de humanos y realizar acciones apropiadas para evitar accidentes, estará garantizada la seguridad en el lugar de trabajo humano-robot».

Para que esto fuera posible, el robot debería estar dotado de *cerebro*, por lo que se evidencia que la tendencia de este proyecto, así como la de otros trabajos que se encarguen de diseñar sistemas de control basados exclusivamente en robot y para robot, sin dependencia de controlador, va encaminada a proporcionar el efecto comentado. Sin embargo, esto sólo es posible, de manera eficaz, mediante un procesamiento en paralelo de la información que proporciona la realidad que se pretende controlar. ■

Bibliografía

- Bonney, Mc.** *Robot Safety. International Trends in Manufacturing Technology.* Editorial IFS (Publications), Ltd., United Kingdom.
- Coiffet Philip.** *Robot Technology: Vol. 2 Interaction with the environment.* Ed. Kogan Page, 1983, London.
- De Silva, CW.** *Knowledge based control with application to robot.*
- Durrant White.** *Integration, coordination and control of multisensor robot systems.*
- Edgar Schez. Sinencio.** *Artificial Neural Networks (Paradigms, Applications and Hardware implementations).* Ed. IEEE Press, 1992.
- Freeman, J. A.** *Redes Neuronales, Algoritmos, aplicaciones y técnicas de programación.* Ed. Adisson Wesley.
- Ives, Kamp.** *Recursive Neural Networks for Associative Memory.* Ed. Jon Wiley & Sons, 1990.
- Josep Engelberger.** *Robotic In Service.* Ed. Kogan Page, 1989, London.
- Klafter, R.** *Robotic Engineering. An integrated Approach.* Editorial Prentice Hall International, Inc., 1989, New Jersey.
- Kozgrew, Yn.** *Robot work cells.*

Miller, R. *Industrial Robot Handbook.* Editorial The Fairmont Press, Inc., 1987, Liburn.

Moreno Alfonso, N. *Autómatas por Redes Neuronales para evitar colisiones en sistemas robotizados.* E.U.P. Sevilla (Proyecto Fin de Carrera), 1994, Sevilla.

Nof, S. *Handbook of Industrial Robotics.* Editorial Jon Wiley & Sons, 1985, New York.

Ríos Carrión, Juan. *Estructura dinámica y aplicaciones de las redes de neuronas artificiales.* Ed. Centro de Estudios Ramón Areces, 1991, La Coruña.

Srimat T. Chakradhar. *Neural Models and algorithms for digital testing.* Ed. Kluwer Academic Publishers, 1991.

Journal of Intelligent Manufacturing. Ed. Chapman & Hall, London.

Neural Networks. The official Journal of the International Neural Network Society, European Neural Network Society and Japanese Neural Network Society. Ed Pergamon Press.

Riley, F. T. *The use of modular, flexible assembly systems as a halfway path between special design and robots.* Proceedings of the 3rd Assembly Automation Conference, May 1982, Stuttgart, West Germany, pp. 445-452.