

**DESIGN OF A CONTROL SYSTEM BASED ON ARTIFICIAL CLONING****DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL BASADO EN CLONACIÓN  
ARTIFICIAL****MSc. Mariela Muñoz Añasco\*, PhD. Antonio Faustino Muñoz Moner\*\*****\*Universidad del Cauca**, Grupo en Automática Industrial, Popayán, Colombia.

E-mail: mamunoz@unicauca.edu.co

**\*\*Universidad Autónoma de Bucaramanga,**

Grupo de Investigación en Control y Mecatrónica, Bucaramanga, Colombia.

E-mail: amunoz@unab.edu.co

**Abstract:** This work shows the process of design and development of a control system based on the methodology of engineering artificial cloning. This methodology is supported in the application of intelligent techniques under the concept of natural evolution in order to obtain reproduction of systems. The scope of this work is the achievement of a working replica of a control system for the pressing of a homokinetic axle, whose current assembly process does not comply with technical standards created for this operation. The functional replica is a system that is capable of responding to the variables defined in the technical requirements based on the identification of the process state. Results allow validate this methodology upon a simulated stuffing box that verifies correctly the technical standards.

**Keywords:** Functional replica, adaptive fuzzy controller, membership function parameters.

**Resumen:** El presente trabajo muestra el proceso de diseño y desarrollo de un sistema de control a partir de una metodología de clonación artificial en ingeniería. Esta metodología está soportada en la aplicación de técnicas inteligentes basadas en el concepto de evolución natural con el objeto de obtener réplicas de sistemas. El alcance del trabajo consistió en la consecución de una réplica funcional de un sistema de control para el proceso de prensado de un eje homocinético de la industria automotriz, cuyo proceso de ensamble actual no cumple con la norma técnica generada para esta operación. La réplica funcional consiste en un sistema que es capaz de responder a las variables definidas en los requerimientos técnicos a partir de la identificación del estado del proceso. Los resultados permitieron validar la metodología sobre una prensa simulada la cual verifica el cumplimiento de la norma.

**Palabras clave:** Réplica funcional, controlador difuso adaptativo, parámetros de funciones de membresía.

**1. INTRODUCCIÓN**

En la automatización de procesos industriales se usan múltiples técnicas de inteligencia artificial tales como sistemas expertos, redes neuronales,

agentes, etc., y en muchos casos se integran elementos de computación evolutiva tales como mapeo genético, entre otras, con el fin de desarrollar sistemas inteligentes para el control de procesos (Feng, 2006).

El uso e integración de esas técnicas permite obtener componentes modulares, flexibles, reproducibles y disponibles que permiten desarrollar y adaptar herramientas y medios de automatización que satisfagan aspectos de modularidad y flexibilidad de los sistemas de control acorde a la necesidad de los procesos industriales de hoy día. Con base en lo anterior, el Grupo de Investigación en Control y Mecatrónica de la Universidad Autónoma de Bucaramanga, desarrolla una metodología que aplica la teoría de la evolución para la resolución de problemas de automatización, aplicando técnicas de inteligencia artificial, como una alternativa científica para el desarrollo de medios de medición y sistemas de control avanzado que permitan responder a las exigencias de la industria a través de réplicas funcionales (clones) de sensores, controladores y actuadores (Muñoz, 2004).

Esta metodología denominada “Metodología de clonación artificial en ingeniería”, ha sido aplicada para la clonación de un sensor de viscosidad (Muñoz, 2005) y para el desarrollo de un prototipo de sistemas inteligentes para el control mecatrónico de una prótesis bioeléctrica de miembro inferior para discapacitados (Muñoz, 2007), en las cuales se obtuvieron excelentes resultados.

El presente documento contiene los resultados de la aplicación por primera vez de esta metodología en el diseño de un sistema de control para un proceso de ensamble que se realiza de manera manual, con inspección visual de los operarios y sin el cumplimiento de normas técnicas, obteniendo una réplica funcional del sistema de control de la operación de prensado del proceso de ensamble de ejes homocinéticos para vehículos.

El presente documento está organizado de la siguiente manera: en el capítulo 2 se presenta el desarrollo de la metodología propuesta para la consecución de la réplica funcional del controlador, en el capítulo 3 se muestra la aplicación de la metodología a un caso de estudio, en el capítulo 4 se presentan los resultados de la aplicación y por último en el capítulo 5 aparecen las conclusiones.

## **2. METODOLOGÍA DE CLONACIÓN ARTIFICIAL EN INGENIERÍA EN UN PROCESO DE MANUFACTURA**

La metodología de clonación artificial en ingeniería parte de un sistema basado en conocimiento. Se fundamenta en la teoría de los

sistemas expertos; puede partir de información cualitativa, pero igual la base de conocimiento puede estar generada por información de sensores sobre variables físicas del proceso en cuyo caso las reglas son el resultado de la interacción de los datos de entrada – salida.

El procedimiento propuesto consta de cinco pasos a través de los cuáles se aplica y comprueba la validez de la metodología para el control de procesos de manufactura.

### **2.1 Identificación y modelación del patrón**

El patrón es el sistema que se desea replicar. La modelación implica la generación de la información del sistema a partir de datos experimentales. Es la etapa de reconocimiento del proceso, en la cual se recolecta la información del sistema a través de la instrumentación sensorica, a través de los sentidos o a partir de la información técnica del proceso.

Se debe definir la información de entradas y salidas del sistema; es decir definir qué es lo que se busca con el sistema de control, con el objeto de aumentar la eficiencia del proceso, incrementando la velocidad, la precisión y la calidad, o la disminución de riesgos para el operario.

La identificación de las variables de entrada y salida del sistema así como los parámetros que las definen implica la configuración del sistema sobre la base de conocimiento del sistema.

Teniendo en cuenta la aplicación a procesos, se asume que los procesos implican secuencia en el tiempo, por lo que es importante definir dentro de las variables cuál es la que determina la secuencia en los estados del proceso; esto puede conllevar a generar diferentes subsistemas que relacionen variables de entrada con variables de salida.

### **2.2 Representación formal de la base de conocimiento del sistema**

La técnica empleada para la representación formal de los datos del sistema es la clasificación difusa. Se proponen los modelos difusos adaptativos para la obtención de un modelo de identificación entrada-salida del sistema o subsistema no lineal variante en el tiempo; el cual aproxima un comportamiento del proceso a identificar, a partir de la adaptación constante de las funciones de membresía de sus variables sobre todo el universo de discurso, a partir del siguiente procedimiento:

- Estimación del número de clústeres y su vector de centros, para cada subsistema involucrado en el proceso.
- Proyección de los centros sobre un plano ortogonal hacia las variables de salida.
- Definir el método de clusterización pues hay diferentes algoritmos de agrupamiento y la aplicación de cada uno de ellos por lo general produce resultados diferentes (Yona, 2009).
- Proyección de las funciones de pertenencia de las variables respuesta del sistema al plano ortogonal.
- Definición de los parámetros para las funciones de membresía convirtiéndolas a funciones conocidas.
- Definición de las funciones de membresía con error mínimo, frente al comportamiento de entrada – salida de los datos. Se propone representar todos los conjuntos difusos a través de las mismas funciones de pertenencia con el objeto de realizar de manera menos compleja el proceso de evolución, tratado más adelante.

### 2.3 Representación de los subsistemas como sistemas difusos

Esta representación define la forma cómo la información de entrada se transforma en respuesta del sistema; está representada en forma de reglas, el mecanismo de inferencia es el interpretador de reglas y actúa en forma cíclica (Boukroune, 2010).

Bajo este enfoque se propone el diseño de un controlador difuso para cada subsistema generado del proceso, cuya estructura sea la representada en la Fig. 1.

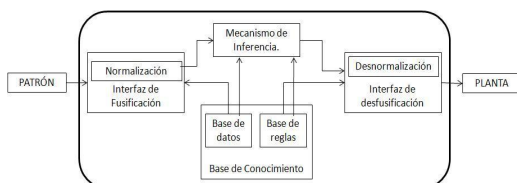


Fig. 1. Estructura del controlador difuso

### 2.4 Obtención del genoma

El genoma del sistema es la colección completa del material genético, puede estar representado por el conjunto de parámetros expresados en cromosomas (genotipo) como a partir del conjunto de genes, través del fenotipo del sistema que define sus características físicas (Craig Venter Institute, 2004).

Para obtener el genoma del objeto de control se definen las condiciones iniciales del sistema, como relaciones funcionales completas con todo el desempeño del objeto de control.

El genotipo es el conjunto de parámetros para la codificación del algoritmo, el cual trabaja sobre los datos del problema para obtener el fenotipo.

La información de cada subsistema entrada – salida mapeada genéticamente, es decir convertida a cromosomas, constituye las unidades operativas que representan las partes de la operación del controlador y por ende las partes del genoma, lo que permitirá estudiar y optimizar la repercusión de cada variable en el desempeño del sistema.

El perfil del genoma se puede ver como puntos multidimensionales en el espacio, con la dimensionalidad dada por el número de mediciones. Los puntos en el espacio se agrupan a través de clústeres representados por las funciones anteriormente definidas y se pueden visualizar a través de la proyección sobre los planos con el objeto de disminuir su dimensionalidad. Estos grupos definen un hiperplano que es el que identifica el algoritmo genético para realizar la evolución del genoma.

Lo anterior significa que el genoma del controlador está compuesto por unidades operativas, expresadas en código genético con una estructura de antecedentes – consecuentes, definida a través de la generación de las reglas por su forma “*si... entonces*”.

El código genético utiliza la estructura de cromosomas y éste se diseña a través de las siguientes etapas:

- División del cromosoma en antecedentes y consecuentes (Fig. 2). La aplicación de esta estructura del cromosoma se realiza teniendo en cuenta la base de reglas lingüísticas del sistema difuso.
- Codificación del cromosoma basada en números enteros en donde cada dígito de los parámetros representa un alelo, el conjunto de los alelos para cada parámetro corresponde a un gen del cromosoma, el conjunto de genes de la variable de entrada corresponde a los antecedentes y el conjunto de genes de la variable de salida corresponde a los consecuentes. La integración de los dos forman un cromosoma.

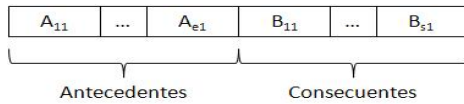


Fig. 2. Estructura del cromosoma

## 2.5 Evolución del genoma

Consiste en la replicación del genoma para que sea funcionalmente compatible en cuanto a amplitud, frecuencia, capacidad de respuesta, tiempo de establecimiento y otras características dinámicas propias del objeto de control. Las características estáticas aparecen representadas en el clon a través de los parámetros estructurales, dimensionales, de interconexión de las partes mecánicas, electrónicas, neumáticas, etc. (Muñoz, 2004).

En la presente investigación se proponen los Algoritmos Genéticos (AGs), para la aplicación e interpretación del mapeo genético, que contiene los códigos de la estructura funcional de la operación. Cada unidad operativa está formada por elementos unitarios que representan una parte de la operación del dispositivo lo que permitirá estudiar y optimizar la repercusión de cada variable en el desempeño del sistema. El algoritmo genético se encargará de encontrar los parámetros de las funciones de membresía, a partir de la optimización de las reglas del sistema difuso generado en el paso anterior.

La réplica funcional del controlador (clon) la constituye el grupo de unidades operativas funcionales expresadas en conjuntos difusos con parámetros óptimos, encontrados a partir de la evolución a través de algoritmos genéticos.

## 3. APLICACIÓN A UN CASO DE ESTUDIO

El caso de estudio es un proceso de ensamble de un eje homocinético<sup>1</sup> para la industria automotriz.

Un eje homocinético está constituido por dos juntas, una en cada extremo: junta móvil y junta fija, que están interconectadas por un eje macizo o tubular que se denomina eje de interconexión o intereje. La aplicación se realizó específicamente en el ensamble del intereje a la junta fija que se hace en una prensa neumática<sup>2</sup>, operación que en el

<sup>1</sup> Elemento de transmisión de potencia utilizado en los vehículos de tracción delantera, en los que la potencia es transferida desde la caja de cambios a cada una de las llantas.

<sup>2</sup> Emplea el aire comprimido como modo de transmisión de la energía necesaria para mover y hacer funcionar mecanismos. El aire es un material elástico y por tanto, al aplicarle una fuerza,

momento no responde a los requerimientos técnicos de calidad en el ensamble de los ejes homocinéticos, pues parte del proceso se realiza de manera manual obedeciendo a criterios y esfuerzos del operario de la máquina.

## 3.1 Identificación y modelación del patrón

En el proceso de ensamble es importante controlar la fuerza (F), la velocidad lineal (VL) y la rotación angular (RA). Cada una de estas variables tiene requisitos técnicos que se deben cumplir y que cambian dependiendo del instante en que se encuentre el proceso.

Teniendo en cuenta que las variables son independientes se proponen tres subsistemas: Desplazamiento – Fuerza (D–F), Desplazamiento – Rotación Angular (D–RA) y Desplazamiento – Velocidad Lineal (D–VL).

## 3.2 Representación formal de la base de conocimiento del sistema

Aplicando el procedimiento propuesto en el ítem 2.2, se identificaron 15, 9 y 9 clústeres para las variables F, VL y RA respectivamente, utilizando el algoritmo “*subtractive clustering*”, el cual encuentra el número de grupos y sus ubicaciones en un conjunto de datos. Para la clusterización se aplicó la técnica de “*fuzzy C- means*” para los subsistemas: D–F y D–RA; y para D–VL se utilizó el algoritmo Gustafson-Kessel (Sivaraman, 2009), obteniéndose los conglomerados en cada uno de los subsistemas.

Para realizar el proceso de clusterización se basó en el producto cartesiano entre los grupos de la variable de entrada con los de la de salida, con el objeto de establecer las relaciones entre cada una de ellas.

Para la definición de los parámetros en el desarrollo del controlador, se experimentó con diferentes tipos de funciones. Debido a la facilidad de su descripción paramétrica y funcional, se propone iniciar con una función gaussiana hasta encontrar la más adecuada. La propuesta para el trabajo es utilizar funciones *gauss2mf* (doble gaussiana).

se comprime, mantiene esta compresión y devuelve la energía acumulada cuando se le permita expandirse, según la ley de los gases ideales.

### 3.3 Representación de los subsistemas como sistemas difusos

Se generaron los tres sistemas difusos. Los resultados para D – F, se muestran en la Fig. 3.

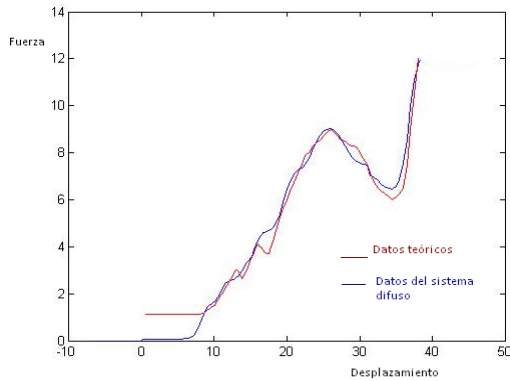


Fig. 3. Respuesta de D - F en el sistema difuso

Cómo se puede observar el resultado obtenido (línea azul) sigue la trayectoria del requerimiento; pero no presenta buena precisión sobre todo al inicio de la curva, por eso se requiere de un aprendizaje a partir de algoritmos genéticos.

### 3.4 Obtención del genoma

La estructura del genoma propuesto para la operación de prensar se muestra en la Fig. 4, en donde se pueden observar las tres unidades operativas de manera independiente, relacionadas a través del desplazamiento.

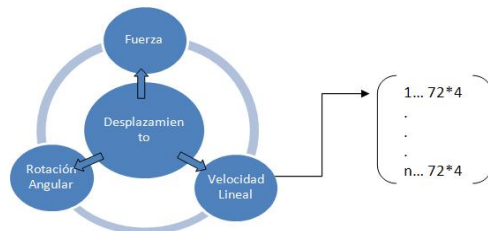


Fig. 4. Genoma para el proceso de ensamble

Cada unidad operativa es un conjunto difuso cuyos parámetros se representan en un conjunto de cromosomas de la siguiente forma. Por ejemplo el subsistema D–VL está representado por nueve conjuntos difusos en el antecedente más nueve conjuntos difusos en el consecuente, por cuatro parámetros de cada conjunto difuso: dos medias y dos desviaciones. Cada parámetro se representa por cuatro dígitos cada uno en un alelo;  $n$  representa el tamaño de la población inicial.

### 3.5 Evolución del genoma

La evolución del genoma se realizó utilizando algoritmos genéticos, la representación es el código genético del genoma y éste representa la población inicial, la cual evoluciona de manera aleatoria sobre el concepto de fenotipo y luego se transforma a genotipo para continuar con el proceso de evolución. La función de *fitness* mide la capacidad de supervivencia de un individuo, sus posibilidades de procrear y transferir la información de sus genes a la próxima generación, se calcula sobre el fenotipo a través de la identificación del error de precisión de la respuesta del sistema difuso obtenido frente al sistema real, se seleccionan los padres que mejor respuesta hayan obtenido y se utilizan operadores genéticos como cruce, mutación y elitismo para evolucionar.

### 3.6 Réplica funcional

La réplica funcional es el genoma evolucionado; para el subsistema D–F se muestra en la Fig. 5.

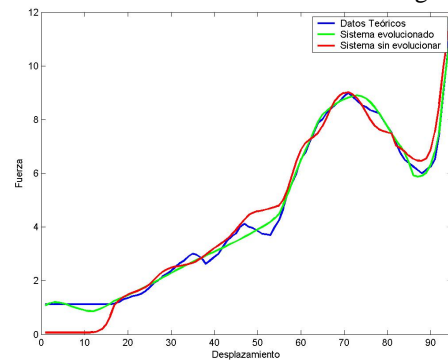


Fig. 5. Subsistema D – F evolucionado

La línea en rojo muestra el resultado del genoma sin evolucionar, la línea en verde el genoma evolucionado y la línea en azul los datos reales.

## 4. VALIDACIÓN DE RESULTADOS

Verificada la capacidad predictiva del controlador difuso en bucle abierto, éste puede ser insertado dentro del sistema completo de la operación de prensado.

La representación funcional del sistema de control para el proceso de ensamble de la junta fija con el interje se presenta en la Fig. 60, en el cual cada bloque muestra el comportamiento de cada variable involucrada en el sistema y cuyo resultado es el estado del ensamble el cual está relacionado con la posición del interje en el instante del ensamble.



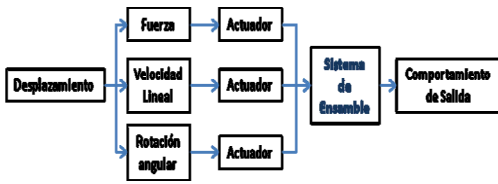


Fig. 6. Representación funcional del sistema de control del proceso de ensamblaje

Para la validación de la metodología se recurrió a la emulación del modelo a través de una representación mecánica del sistema, realizada en Solid Edge®, software de ingeniería asistida por computador, el diseño mecánico se observa en la Fig. 7.

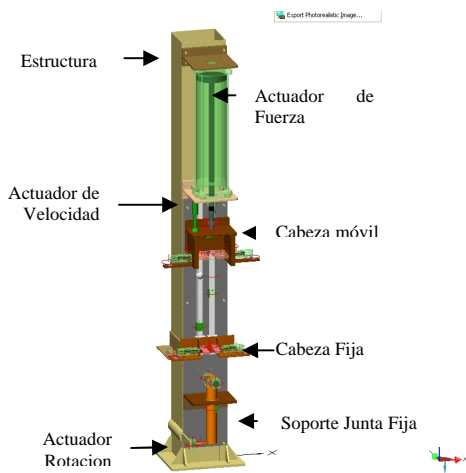


Fig. 7. Diseño mecánico de la prensa

Para cumplir con los requisitos técnicos del proceso de ensamblaje, se diseñó una máquina compuesta por cuatro módulos: estructura, soporte de junta fija, cabeza móvil y el módulo cabeza fija, además se adicionaron tres actuadores que permiten controlar cada una de las variables involucradas en el proceso.

Estructura. es el soporte de todos los demás sistemas del mecanismo de ensamblaje.

Soporte de junta fija. Este sistema permite la localización y sujeción de la junta fija, además del movimiento de rotación de la junta en el proceso de ensamblaje.

Hay que destacar que para el diseño de este sistema se tienen en cuenta las especificaciones físicas de la junta fija, tales como el diámetro y la longitud (Fig. 8).

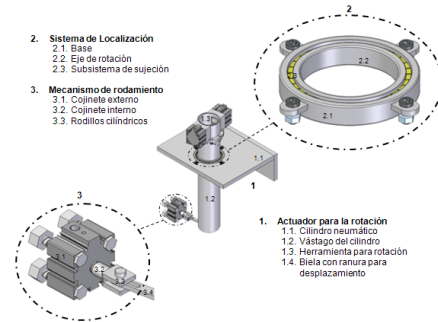


Fig. 8. Soporte de junta fija

- **Cabeza móvil.** Este sistema es el encargado de permitir la aplicación de la fuerza del actuador sobre el interjeje para lograr el ensamblaje. Permite la unión física con el actuador, puede moverse en dirección de la fuerza y sujetar y alinear el interjeje para la transmisión de dicha fuerza (Fig. 9).

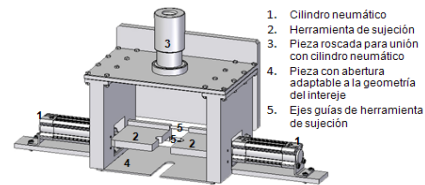


Fig. 9 Cabeza móvil

- **Cabeza fija,** este sistema es el encargado de la sujeción o retención del interjeje, mantiene este último alineado con la junta fija para su respectivo ensamblaje (Fig. 10).

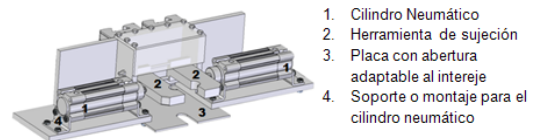


Fig. 10. Cabeza fija

El anterior diseño se llevó a una herramienta software de ingeniería asistida por computador (CAE), como lo es Visual Nastran4D® para realizar simulación dinámica y ésta se integró a Simulink® (Fig.11).

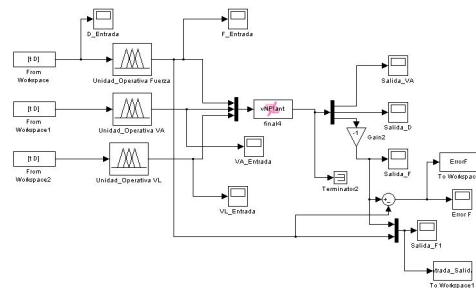


Fig. 11. Integración en Simulink

La variable de entrada es el desplazamiento, esta variable alimenta cada una de las unidades operativas del genoma resultado del proceso de evolución, de las cuáles sale fuerza, rotación angular y velocidad lineal que alimentan los actuadores definidos en el sistema mecánico. Los resultados obtenidos se muestran en la Fig. 12.

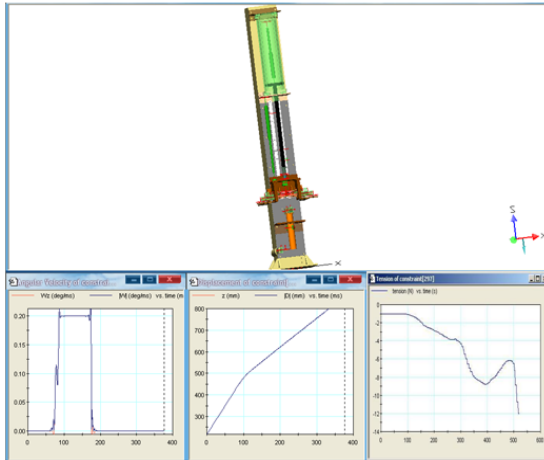


Fig. 12. Comportamiento de las variables en el modelo emulado

En las gráficas de la parte inferior de la Fig.12, se observa el comportamiento de la velocidad angular, primero cero luego toma un valor de 0.2 grados por segundo y nuevamente cero, verificando que en la primera etapa del proceso la rotación es cero luego rota y luego el actuador se detiene. En la curva de desplazamiento se observa un cambio en la pendiente comprobando un cambio de velocidad lineal de alta a baja y la curva de fuerza tiene un comportamiento similar al exigido; siendo ésta la variable más crítica del proceso. En la 0. 13, se observa el comportamiento de la fuerza que entra (línea azul) frente a la fuerza de salida (línea roja).

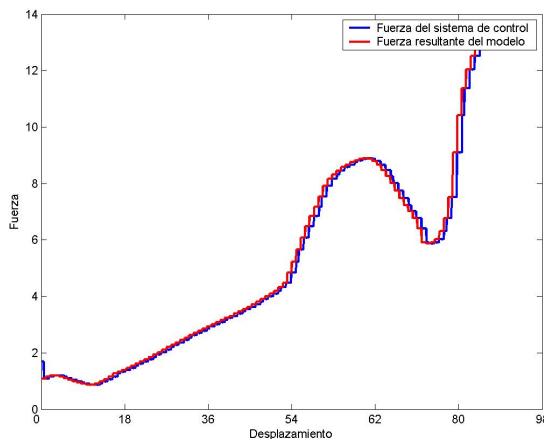


Fig. 13. Comportamiento de la fuerza en validación

## 5. CONCLUSIONES

Se comprobó la metodología de clonación artificial en ingeniería aplicada a una operación dentro de un proceso de manufactura y se obtuvo el genoma funcional.

Este genoma representa funcionalmente la operación, pues permite definir el valor de las variables a partir de la identificación de la etapa del proceso.

Esta identificación se obtuvo a partir de requerimientos técnicos en el cual se detallan como variables principales de la operación: la fuerza, la velocidad lineal y rotación angular; relacionadas a partir del desplazamiento que determina el estado en el que se encuentra la operación.

El algoritmo desarrollado en Matlab® representa la metodología de clonación artificial en todas sus etapas, y partir de la aplicación en una operación de manufactura se comprueba su validez en la aplicación a procesos.

El AG implementado evolucionó el sistema difuso diseñado, permitiendo encontrar los parámetros óptimos de las funciones de membresía que conforman el genoma de la operación en sus distintas unidades operativas.

Para ello se codificó el fenotipo “características físicas del proceso” en forma de cromosomas y luego se pasó a genotipo que representan los “parámetros de codificación del algoritmo”.

A partir de la evaluación del genoma en el diseño mecánico de la prensa se concluye que además de las variables denotadas anteriormente, es importante tener en cuenta las propiedades mecánicas de los cuerpos involucrados en la operación como son: densidad, fricción, inercia.

Los resultados obtenidos con esta investigación posibilita trabajos futuros relacionados con: aplicación de la metodología al diseño de un sistema de control en lazo cerrado basado en datos experimentales; profundización en procesos de validación virtual en tiempo real, a través de la integración de herramientas software y estudios orientados a complementar el genoma obtenido, adicionando variables y restricciones de comportamiento mecánico de la prensa, no solo funcional.

## REFERENCIAS

- Feng G. (2006). "A Survey on Analysis and Design of Model-Based Fuzzy Control Systems", IEEE Transactions on Fuzzy Systems, Vol. 14, No 5, pp 676 - 697.
- Muñoz F., Pardo A., (2004). "The technology of advanced control of applied artificial cloning to highly precise". IEEE International Symposium on Intelligent Control, pp 714 – 718.
- Muñoz F., (2005). *Sistemas de control inteligentes de la planta de viscorreducción basados en la clonación artificial de un sensor de viscosidad y parámetros asociados*, Universidad de Pamplona, Colombia:  
[http://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/hermesoft/portalIG/home\\_2/recursos/investigacion/contenidos/01102007/sistemas\\_control\\_inteligente.jsp](http://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/hermesoft/portalIG/home_2/recursos/investigacion/contenidos/01102007/sistemas_control_inteligente.jsp). (Consultado: 3 febrero 2009).
- Muñoz F., Pardo A., Díaz J., (2007) "Investigación y Desarrollo de Nuevos Sistemas Inteligentes para el Control Mecatrónico de una Prótesis Bioeléctrica". Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzadas, Vol. 1, No. 9, pp. 17 – 21.
- Yona G., Dirks W., Rahman S., (2009) "Comparing algorithms for clustering of expression data: how to assess gene clusters." Computational Systems Biology; Vol. 541, No. 21, pp 1 - 31.
- Boukroune A., Tadjine M., M'Saad M., Farza M. (2010) "Fuzzy adaptive controller for MIMO nonlinear systems with known and unknown control direction" Fuzzy Sets and Systems, No. 161, pp 797 – 820.
- Craig Venter Institute, GNN Genome News Network (2004):  
<http://www.genomenewsnetwork.org>.  
(Consultado: 26 de mayo 2010).
- Sivaraman E., Arulselvi S., (2009) "Gustafson-kessel (G-K) clustering approach of T-S fuzzy model for nonlinear processes". Proceedings of 21th International Conference on Chinese Control and Decision Conference, pp. 791 - 796.