

# #Gstacg

REVISTA ESPECIALIZADA EN INGENIERÍA

ISSN: 2346 - 139X


EDICIÓN 8



*cun*

Corporación Unificada Nacional  
de Educación Superior

VIGILADA MINEDUCACIÓN



Lo peor no es cometer un error, sino tratar de  
justificarlo, en vez de aprovecharlo como aviso  
providencial de nuestra ligereza o ignorancia.

SANTIAGO RAMÓN Y CAJAL



# #GshTag

REVISTA ESPECIALIZADA EN INGENIERÍA

EDICIÓN 8



**Jaime Alberto Rincón Prado**

*Rector*

*Corporación Unificada Nacional de Educación Superior - CUN*

**Javier Duván Amado Acosta**

*Vicerrector Académico*

**Jorge Enrique Murcia Gutiérrez**

*Vicerrector de Investigación, Desarrollo e Innovación*

**José Fernando López Quintero**

*Vicerrector de Planeación y Calidad*

**Delfín Soto Chaves**

*Director Nacional de Investigaciones*

**María del Carmen Anacona Sterling**

*Editor General*

**Rocío Olarte Dussán**

*Unidad de Publicaciones*

#ashtag

---

Edición 8

© Agosto, 2016. Corporación Unificada Nacional de Educación Superior CUN  
Bogotá, Colombia.

Corrección de estilo:  
Guillermo Andrés Castillo Quintana  
Daniela Lorena Rojas Galván

Diseño de tapa y diagramación: Lina Guevara Buitrago

Primera edición: febrero de 2013  
ISSN 2346 - 139X

Reservados todos los derechos.  
Se prohíbe el uso comercial y sin autorización del material intelectual contenido  
en esta obra. Ninguna parte de esta publicación puede ser reproducida,  
almacenada o transmitida por ningún medio sin permiso del editor.

## Comité Científico

### **Yury Vanessa Nieto**

Corporación Unificada Nacional de Educación Superior - CUN  
Magíster en Tecnologías de la Información

### **Yesid Díaz Gutiérrez**

Corporación Unificada Nacional de Educación Superior - CUN  
Magíster en Ingeniería de Software

### **Juan Carlos Figueroa**

Universidad Distrital Francisco José de Caldas  
Doctor en Ingeniería

### **Hernando Javier Artega Silva**

Institución Tecnológica del Sur  
Magíster en Tecnologías de la Información

### **Roberto Ferro Escobar**

Universidad Distrital Francisco José de Caldas  
Doctor en Ciencias de la Computación

### **Jorge Enrique Portella Cleves**

Universidad Nacional Abierta a Distancia  
Magíster en Ingeniería Web

## Comité Editorial

### **Rocío Olarte Dussán**

Corporación Unificada Nacional de Educación Superior - CUN  
Magíster en Literatura

### **María del Carmen Anacona Sterling**

Corporación Unificada Nacional de Educación Superior - CUN  
Magíster en Didácticas de las Ciencias

### **Luz Elena Cediél Bravo**

Corporación Unificada Nacional de Educación Superior - CUN  
Magíster en Didácticas de las Ciencias

### **Ricardo Alfredo López Bulla**

Corporación Unificada Nacional de Educación Superior - CUN  
Magíster en Informática Aplicada

### **Fanny León Chávez**

Corporación Unificada Nacional de Educación Superior - CUN  
Magíster en Didácticas de las Ciencias

## - CONTENIDO -

- 1. Control de posición de un sistema hidráulico mediante un controlador por realimentación de estados**  
*Fernando Martínez, Edwin Cortes y Edgar Moreno* ..... 11
- 2. Control difuso tipo Mamdani para un brazo-robot con tres grados de libertad**  
*Dante Sterpin, Camilo Giraldo y David Cañón* ..... 33
- 3. Domótica: genealogía del concepto e integración con ambientes naturales**  
*Said Pinzón Castañeda* ..... 43
- 4. Aplicación de sistemas programables para los sistemas computacionales y robóticos *animatronics***  
*Jeison Andrés Orjuela Parra* ..... 55
- 5. Modelamiento y simulación del sistema de suspensión activa**  
*Diana M. Galeano Viasus y Mauricio A. García* ..... 67

# Editorial

En esta edición, la revista *#ashtag* de la Corporación Unificada Nacional de Educación Superior (CUN) presenta reflexiones acerca de las tecnologías de la cuarta revolución industrial y también sobre tecnologías clásicas que permiten resolver problemas cotidianos y configurar nuevos estándares de vida de las personas. Esta publicación ve la luz gracias al esfuerzo conjunto de la Unidad de Publicaciones, la Dirección de Investigación y el Programa de Ingeniería Electrónica, que trabajan mancomunadamente en la transferencia escrita de trabajos y avances de estudiantes y docentes de nuestra institución y de otras entidades externas, con el fin de visibilizar sus hallazgos y buenas prácticas académicas aplicadas al bienestar de la sociedad.

Dentro de las tecnologías de la cuarta revolución industrial, las comunicaciones seriales en tiempo real son parte fundamental de la interacción de las interfaces de usuario (HMI) y el hardware. La robustez de estos protocolos seriales a lo largo de las últimas décadas se ejemplifica en la propuesta SERCOS (*serial real time communication system*), que actualmente permite la operatividad e interacción de las HMI con los entornos industriales y de servicios.

El hecho anterior se evidencia, por ejemplo, con la introducción de algoritmos de control robustos y la aplicación del control difuso para mejorar la robustez de manipulación de los robots industriales –gracias a la gestión de la incertidumbre de la aproximación del efector final al objetivo–. Con estrategias como las anteriores se puede interactuar con el entorno de una manera más precisa y firme, mientras los robots manipuladores cumplen sus tareas y evitan los problemas mecánicos y de control clásico.

Por su parte, las viviendas inteligentes migran desde la domótica hasta el internet de las cosas (IoT), con lo que se consolida la integración de las nuevas tecnologías con el fin de mejorar la calidad de vida de las personas, por medio de la tecnología de automatización sintetizada para los hogares.

En el escenario del entretenimiento y la interacción con el usuario, se emplea tecnología robótica para crear entornos animatrónicos, con el ánimo de extender y darle dinamismo a los eventos, enlazar de manera natural al usuario con la tecnología, generar impacto social en lo que refiere a la interacción hombre-robot, romper paradigmas y promover nuevos estilos de vida, entretenimiento y educación.

Finalmente, los clásicos sistemas de pistón neumáticos contribuyen a distintas aplicaciones que incluyen apertura y cierre de puertas corredizas, disparadores de elementos a distancia, entre otras aplicaciones de uso cotidiano en entornos diversos. Adicionalmente, los dispositivos robotizados que se han diseñado para funcionar como herramientas didácticas para el aprendizaje y la práctica de distintas disciplinas de ingeniería y ciencias, cada vez más cerca y al alcance de estudiantes y docentes, son una muestra plena de que la tecnología ya está al alcance de las manos de cualquier persona.

Mario Arbulú  
Editor en jefe

# Control de posición de un sistema hidráulico mediante un controlador por realimentación de estados

*Fernando Martínez\**

*Edwin Cortes\*\**

*Edgar Moreno\*\*\**

## Resumen

En este artículo se presenta el diseño de un controlador para un sistema hidráulico compuesto por una servoválvula, un sensor de posición y unidad lineal de 200 mm de carrera, que usa realimentación de estados. Para esto, se obtuvieron muestras de los valores de la salida y entrada real del sistema, mediante una tarjeta de adquisición de datos de National Instruments (USB-6211) y el Data Acquisition Toolbox de Matlab. Con los datos adquiridos y el uso del System Identification Toolbox de Matlab, se estableció un modelo adecuado que describe un comportamiento similar al del sistema hidráulico real, para el cual es diseñado un controlador por realimentación de estados y ubicación de polos, cuya función es controlar el sistema hidráulico a través de la tarjeta de adquisición de datos y el PC en tiempo real.

**Palabras clave:** adquisición de datos, identificación de sistemas, retroalimentación de estados, ubicación de polos

## Abstract

This article shows the controller design for a hydraulic system, which consists of a servo-valve, a position sensor, a linear cylinder, a filter, and a hydraulic unit. Data samples are obtained from the real system input and output using a data acquisition board from National Instruments (USB-6211) and Matlab's Data Acquisition Toolbox. These data are processed with the System Identification Toolbox of Matlab, to provide a suitable model that describes a similar behavior to the real hydraulic system, for which is designed a state feedback controller and root locus, that works to control the hydraulic system through the data acquisition board and a PC on real time.

**Keywords:** Data Acquisition, Root Locus, State Feedback, System Identification

\* Docente en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Contacto: [fmartinezs@udistrital.edu.co](mailto:fmartinezs@udistrital.edu.co)

\*\* Tecnólogo en Electricidad de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Contacto: [edwincortes\\_07@hotmail.com](mailto:edwincortes_07@hotmail.com), [edfemoro@gmail.com](mailto:edfemoro@gmail.com)

\*\*\* Tecnólogo en Electricidad de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

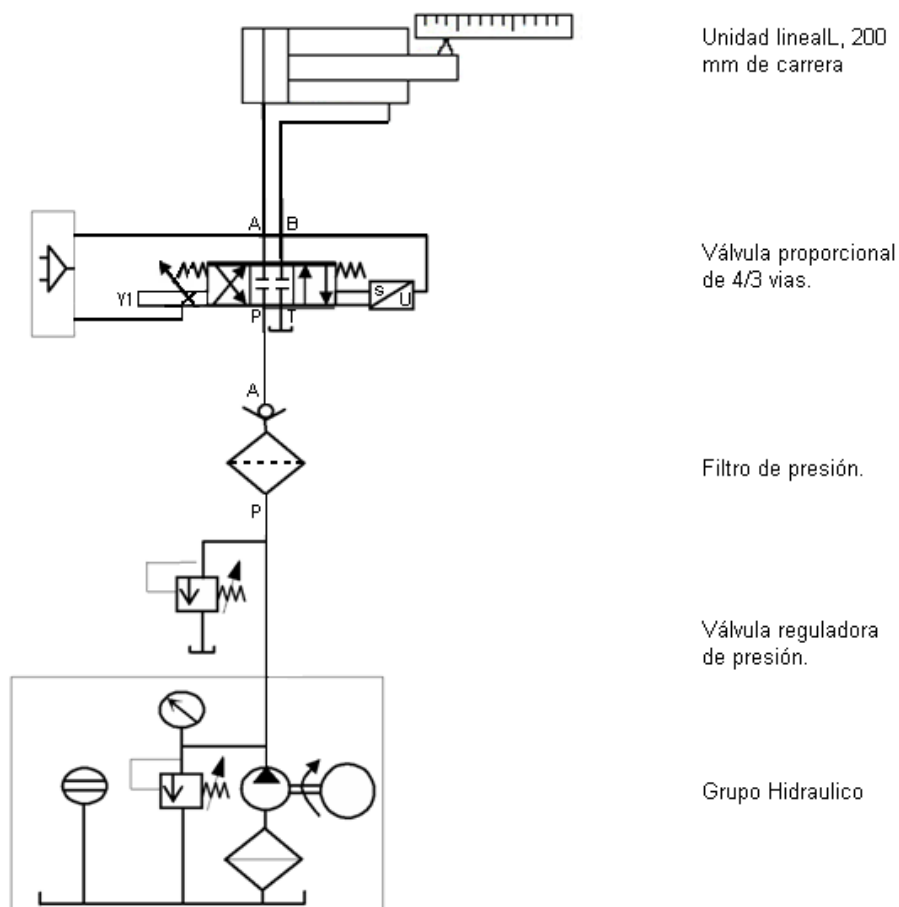


## Introducción

El presente documento está dividido en seis secciones. La segunda y tercera tratan de la adquisición de datos e identificación de un modelo del sistema hidráulico respectivamente; la cuarta, sobre el diseño del controlador por realimentación de estados y los resultados del controlador en el modelo. En la quinta sección se presentan los resultados de la utilización del controlador en el sistema real. Finalmente, se presentan resultados y se dan conclusiones del proyecto.

En este artículo se muestra el diseño de un controlador por realimentación de estados para un sistema hidráulico, como se muestra en la figura 1. Se trata de controlar una unidad lineal de 0,2 metros de carrera, cuyo elemento final de control es una servoválvula distribuidora 4/3 vías, la cual se controla mediante el voltaje de la tarjeta de adquisición de datos. Para la realimentación se tiene un sensor de desplazamiento que entrega una señal de voltaje de 0 a 10 V. También se tiene una unidad abastecedora de energía, un filtro de presión y manómetros (Martínez y Rairán, 2001).

Figura 1. Sistema hidráulico



## System Identification Toolbox

La herramienta de Matlab que realiza la identificación se denomina System Identification Toolbox (SIT). Esta caja de herramientas de identificación de sistemas permite construir modelos matemáticos de sistemas dinámicos lineales, que parten de la medición de los datos de entrada-salida del sistema.

Este enfoque basado en los datos ayuda a describir los sistemas que no son fácilmente modelados desde leyes físicas (caudal-presión, presión-fuerza, velocidad-fuerza) o de las especificaciones, tales como los procesos químicos y la dinámica del motor. También ayuda a simplificar los modelos detallados por principios físicos, tales como modelos de elementos finitos de las estructuras y los modelos de dinámica de

vuelo, mediante el ajuste de modelos más sencillos a sus respuestas simuladas (Ljung, 2008). Los modelos obtenidos con el SIT son muy adecuados para la simulación, la predicción y diseño de sistemas de control (Ljung, 2008).

Estructuras de modelos disponibles se incluyen en los modelos de procesos de orden inferior, las funciones de transferencia, el modelo de espacio-estados, los modelos lineales con no linealidades estáticas en las entradas o salidas, y los modelos no lineales autorregresivos. Si se cuenta con un modelo matemático de la dinámica del sistema, se pueden ajustar estos parámetros para adaptarse mejor a los datos experimentales (Ljung, 2008).

### Espacio-estados

El estado en las ecuaciones de variable-estado forman un espacio lineal, llamado espacio. Por lo tanto, el diseño usando ecuaciones de variables-estado es también denominado *llamada diseño por espacio-estado*.

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

$$y = Cx + Du$$

(Ecuación 1)

En la ecuación 1, A, B, y C son respectivamente las matrices  $n \times n$ ,  $n \times 1$  y  $1 \times n$ . La constante D es un escalar. La ecuación 1 se dice es controlable si se puede transferir cualquier estado a cualquier otro estado en un tiempo finito, aplicando una entrada. La ecuación dice ser observable si se determina el estado inicial desde el conocimiento de la entrada y la salida sobre un intervalo finito de tiempo.

### Ubicación de polos

Al considerar la ecuación 1, la técnica conocida de ubicación de polos asume que todas las variables de estado son accesibles y medibles mediante la realimentación. Si el sistema en cuestión es de estado completamente controlable, los polos del sistema en lazo cerrado se pueden ubicar en cualquier posición deseada haciendo uso de

una matriz de ganancias de la realimentación del estado (Katsuhiko, 1998).

Si (A, b) es no controlable, entonces la matriz característica es no singular y la ecuación correspondiente no puede ser transformada de forma controlable (Rairán, Guerrero y Mateus, 2010).

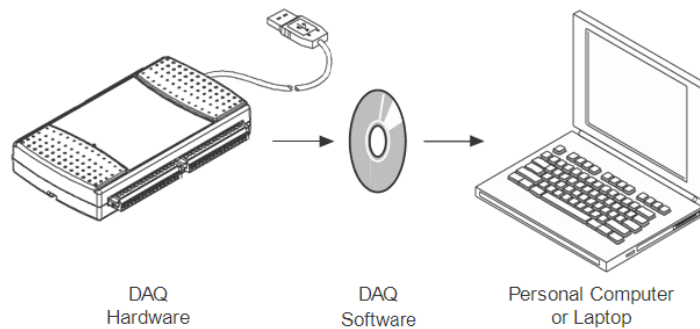
En este caso, no es posible asignar arbitrariamente cualquier valor de polos ( $A-bK$ ). Sin embargo, es posible asignar algunos de ellos.

Ahora, suponiendo que los polos deseados en lazo cerrado estén en  $s=\mu_1, s=\mu_2, \dots, s=\mu_3$ , y una

vez seleccionada una matriz de ganancias apropiada para una realimentación del estado, es posible obligar al sistema a que tenga los polos en lazo cerrado en las posiciones deseadas, bajo la condición de que el sistema original sea de estado completamente controlable (Katsuhiko, 1998).

## Adquisición de datos del sistema hidráulico

Figura 2. Componentes de un típico sistema de adquisición de datos



Fuente: National Instruments (2009, p. 21)

Para realizar la adquisición de datos, mostrada en la figura 2, se utiliza el *hardware* NI-USB 6211 de National Instruments. El *software* para la tarjeta es NI-DAQmx 8.9.5 DVD; y el software empleado en el PC es Matlab R2008a, que contiene Simulink, y el Data Acquisition Toolbox, esenciales para llevar a cabo la adquisición de datos reales del sistema hidráulico. La adquisición se realiza desde la tarjeta de adquisición de datos NI USB-6211 (National Instruments, 2009), con la cual se obtienen, desde Simulink, tanto la señal de control a la servoválvula (salida) como la señal del sensor de desplazamiento (entrada).

Se genera desde Simulink una señal de tensión entre:  $[0; 10]$  V,  $[0; -10]$  V o  $[-10; 10]$  V, dependiendo del modelo a establecer: de avance, de retroceso o con cambios de dirección, respectivamente. La señal de control es consignada en una salida análoga referenciada de la tarjeta de

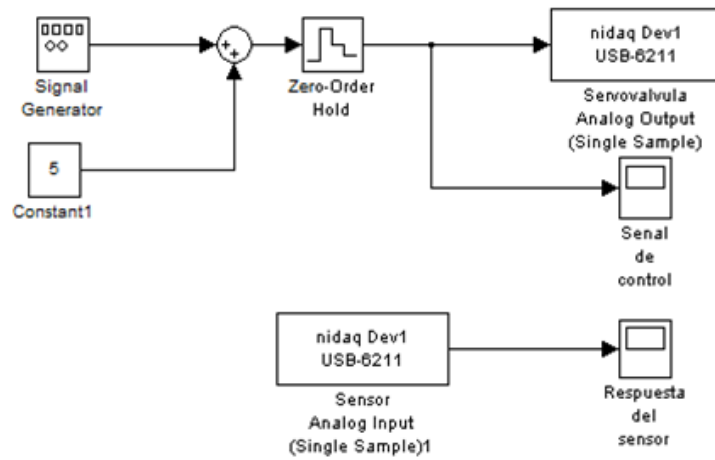
adquisición, conectada a la servoválvula (salida). La señal del sensor de desplazamiento está en una entrada análoga en modo diferencial, porque esta mide la diferencia entre dos entradas análogas y permite una correcta visualización de la señal. Las entradas y las salidas análogas convierten las señales a formato digital de 16-bit, con un muestreo de 25000 muestras por tiempo de simulación.

$$\text{Tiempo Muestreo} = \frac{\text{Tiempo Simulación}}{\text{Número Muestras}}$$

(Ecuación 2)

El tiempo de muestreo se configura en Zero-Order Hold y en Analog Input. En la figura 3 se muestra el diagrama de adquisición en el que se genera la señal de control de la servoválvula, y se adquieren los datos del sensor de posición y de control.

Figura 3. Montaje del sistema de adquisición de datos en Simulink



Fuente: elaboración propia

Se alimenta la servoválvula con diferentes señales (diente de sierra, seno, cuadrada y *random*), para observar cada uno de los comportamientos

de la servoválvula y para iniciar la caracterización más apropiada del sistema.

### Identificación de un modelo del sistema hidráulico

Para la identificación se necesitan los datos adquiridos anteriormente. Al estimar el modelo, el Toolbox habilita la opción *model output*, que permite observar la respuesta adquirida, la respuesta del modelo y el porcentaje de coincidencia o *best fit*. El porcentaje de coincidencia está relacionado con el criterio de información de Akaike ( $\Delta IC$ ) y el error final de la predicción de Akaike (*FPE*, por su sigla en inglés). Este criterio proporciona una medida de la calidad del modelo mediante la simulación de la situación en que se prueba el modelo en un conjunto de datos. Después de calcular varios modelos diferentes, se comparan con este criterio y –según la teoría de Akaike– el modelo más preciso tendría la menor *FPE* (MathWorks).

$$FPE = V \left( \frac{1 + d/N}{1 - d/N} \right)$$

(Ecuación 3)

En la ecuación 3, *V* es la función perdida, *d* es el número de parámetros estimados y *N* es la cantidad de datos utilizados en la estimación (MathWorks). Es necesario seleccionar un modelo del sistema hidráulico, tanto para cuando la unidad avanza como para cuando retrocede, dadas las siguientes razones:

- Existe una diferencia marcada entre el tiempo de avance ( $t_a$ ) y el de retroceso ( $t_r$ ) de la unidad lineal del sistema hidráulico, la cual no debería presentarse en un sistema lineal, pues en los dos casos la electroválvula se alimenta con la misma amplitud de voltaje. Dicha diferencia es entonces causada por la diferencia en las áreas interiores del cilindro, y al definir el caudal definen también la velocidad (Rairán y Urrego, 2006).

- El porcentaje de coincidencia obtenido en la identificación para el sistema completo (avance y retroceso) es menor comparado con

los porcentajes obtenidos para los modelos de avance y de retroceso por separado.

**Tabla 1.** Porcentajes de coincidencia de los modelos identificados.

Señal	A(v)	F(Hz)	Tm (s)	Fit (%)	Modelo
R	5	5	1E-4	60.89	P2Z
R+	10	60	1E-4	93.0	P2Z
R+	10	60	1E-4	92.42	P1Z
R-	-10	60	1E-4	89.21	P1Z
S				87.49	P2Z
S+	1	1E5	1E-7	97.9	P2Z
S-	-1	1E5	1E-7	97.87	P2Z
C	1	500	1E-5	90.36	P2Z
C+	5	5000	1E-4	92.95	P2I
C-	-5	5000	1E-4	93.13	P2I
D	5	100	1E-4	86.1	P2Z
D+	1	9000	1E-5	94.33	P2I
D-	1	9000	1E-5	95.36	P3IZ

\*Acá, R: random, S: seno, C: cuadrada, D: diente, +: avance, -: retroceso, P: polos, Z: ceros, I: integradores

Fuente: elaboración propia

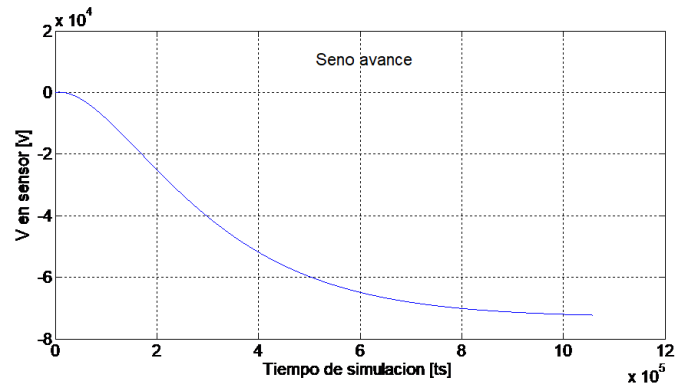
Para seleccionar un modelo adecuado se debe tener en cuenta lo siguiente:

- El porcentaje de coincidencia (Fit) debe superar el 88 %, según la tabla 1.
- La respuesta de cada modelo deber ser similar a la del sistema real, al aplicar una señal de 1 V. a lazo abierto, como se muestra en figura 4. En ocasiones, las identificaciones con mayor

porcentaje no son las más apropiadas para un modelamiento del sistema ya que no tienen un comportamiento afín con el real.

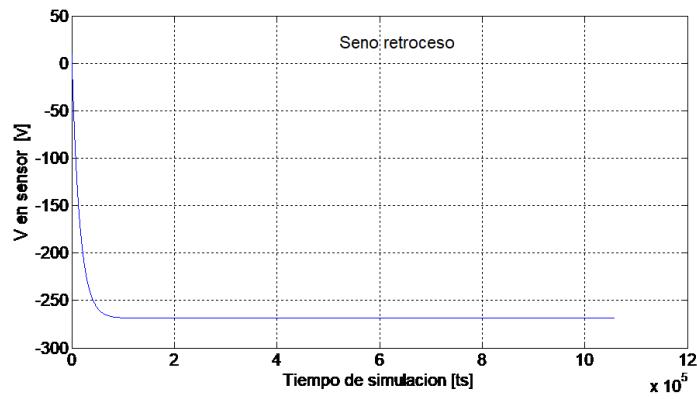
Se determina que la señal seno (97,95 % y 97,87 %, avance y retroceso r/mente) es la de mayor porcentaje de coincidencia, pero al realizar el modelo en Simulink su respuesta no es la apropiada para caracterizar el sistema. Como se ve en las figuras 4 y 5.

Figura 4. Respuesta a lazo abierto del modelo seno de avance



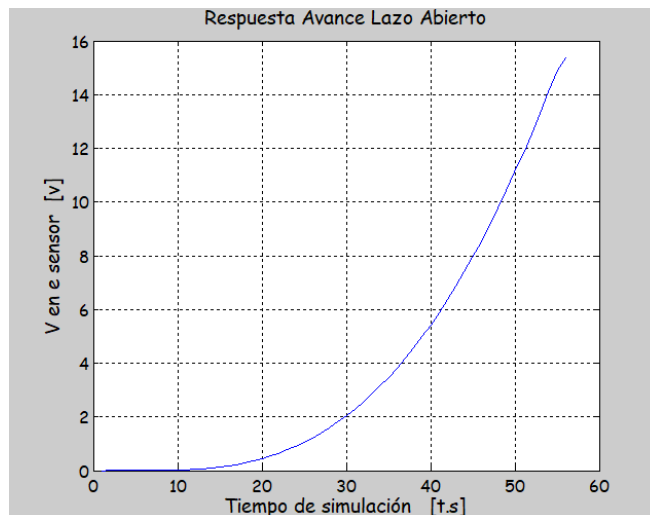
Fuente: elaboración propia

Figura 5. Respuesta a lazo abierto del modelo seno de retroceso



Fuente: elaboración propia

Figura 6. Respuesta del modelo de avance en lazo abierto



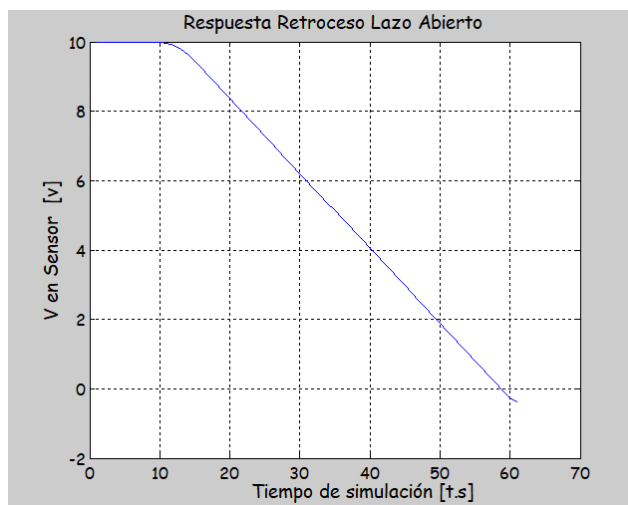
Fuente: elaboración propia

Al caracterizar los sistemas tanto de avance como de retroceso con la señal cuadrada, se conoce que el modelo está caracterizado por 2 polos y un integrador (P2I). De avance se tiene un porcentaje de coincidencia con respecto a la señal el sensor de avance 92,95 % y de retroceso 93,13 %. En la figura 6 se muestra la respuesta

del modelo escogido ante una señal de 1 V, la cual concuerda con la señal del sistema real.

En la figura 7 se muestra la respuesta del modelo de retroceso ante una señal de -1 V., la cual concuerda con la respuesta del sistema real.

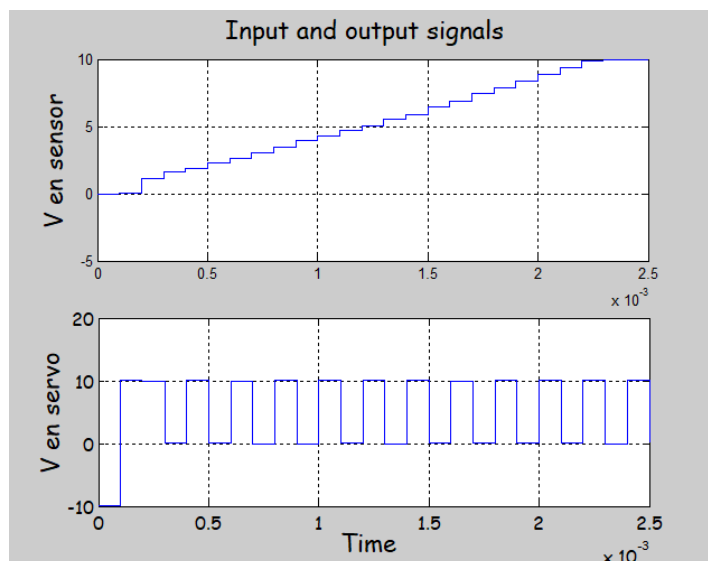
**Figura 7.** Respuesta del modelo de retroceso en lazo abierto



Fuente: elaboración propia

En la figura 8 se muestra la señal aplicada al sistema de avance con su respectiva respuesta.

**Figura 8.** Voltaje aplicado a la servoválvula y respuesta del sensor

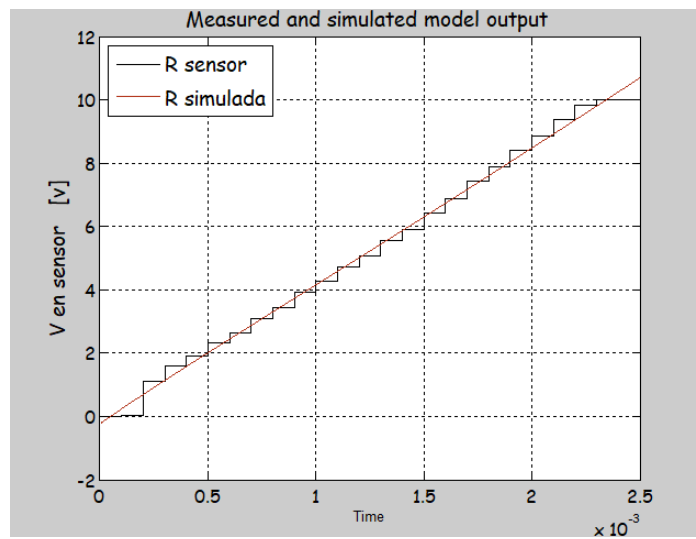


Fuente: elaboración propia

La figura 9 muestra la respuesta del sistema y del modelo con 2 polos y un integrador. Al elegir este modelo se busca que la respuesta en lazo abierto del modelo, al aplicarle una señal de 1 V, sea parecida a la del sistema. Para esto se exporta

el modelo al *workspace* y se halla el espacio-estados del sistema, mediante matrices con las que se puede establecer el modelo en Simulink, y así observar su respuesta ante la señal de 1 V.

Figura 9. Respuesta del sistema y del modelo encontrado

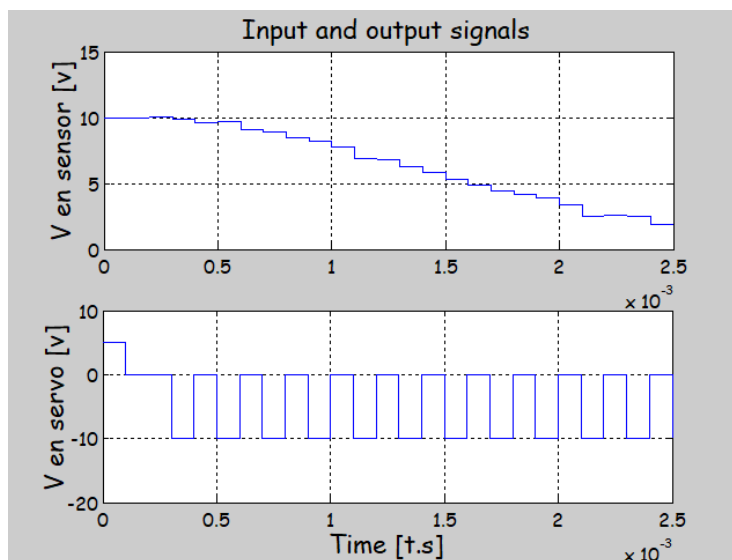


Fuente: elaboración propia

Ahora se realiza el mismo procedimiento para el modelo de retroceso. En la figura 10 se muestra

la señal aplicada al sistema de retroceso con su respectiva respuesta.

Figura 10. Voltaje aplicado a la servoválvula y respuesta del sensor en retroceso



Fuente: elaboración propia



La figura 11 muestra la respuesta del sistema en retroceso y del modelo con 2 polos y un integrador.

Las funciones de transferencia de los modelos elegidos se detallan en las ecuaciones 4 y 5.

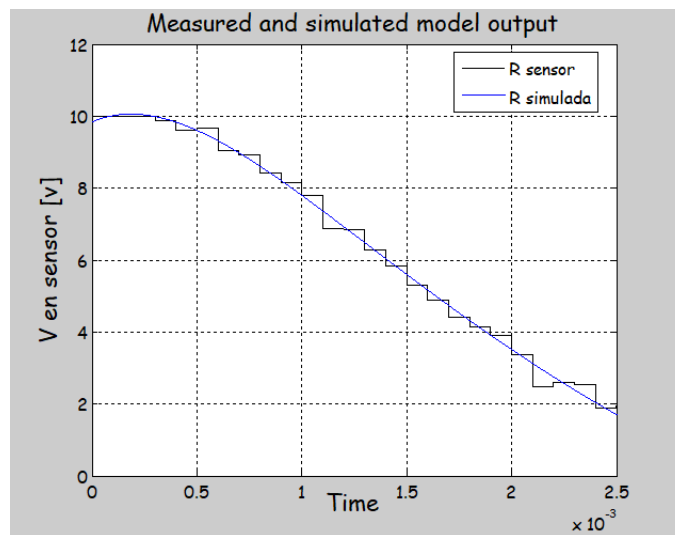
$$\frac{940633780.256}{s^*(s+1000)^2}$$

(Ecuación 4)

$$H_s = \frac{k}{s(s+p1)(s+p2)} = \frac{212827988.9475}{s(s+985.1)(s+999.9)}$$

(Ecuación 5)

Figura 11. Respuesta del sistema y del modelo encontrado de retroceso



Fuente: elaboración propia

Una vez obtenidas las funciones de transferencia de los modelos, se procede a diseñar el controlador por realimentación de estados.

### Controlador por realimentación de estados y ubicación de polos

Las diferentes velocidades de avance y retroceso del sistema a un mismo voltaje de alimentación hacen al sistema no lineal. Entonces, se diseña un controlador para avance y otro para retroceso, lo que permite trabajar con dos sistemas

lineales. En esta sección se presenta el diseño del controlador por ubicación de polos, el cual parte de conocer el espacio-estados del modelo identificado anteriormente, en los términos de la ecuación 1.

### Modelo de avance

Para determinar las matrices del espacio-estado con Matlab se usa la función de la ecuación 4, pues ese es el modelo identificado para el avance.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1000 & 1 \\ 0 & 0 & -1000 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 32770 \end{bmatrix}$$

$$C = [28710 \quad 0 \quad 0]$$

$$D = [0]$$

(Ecuación 6)

El procedimiento para designar la ubicación de los polos es el siguiente.

1) Se determina el polinomio característico de la matriz A para determinar los coeficientes:

$$\Delta(s) = (sI - A)$$

$$\Delta(s) = s^3 + 2 * 10^3 s^2 + 1 * 10^6 s$$

$$a_0 = 1; a_1 = 2 * 10^3;$$

$$a_2 = 1 * 10^6; a_3 = 0$$

(Ecuación 7)

2) Se determina la ubicación de los polos deseados, y su polinomio característico con sus coeficientes.

Para la ubicación de los polos se tienen en cuenta los siguientes aspectos:

- El tiempo de establecimiento ( $t_s$ ), que corresponde al tiempo que toma la señal en entrar en una oscilación igual al 1 % del valor estacionario (Rairán, 2007).
- El sobrepico ( $M_p$ ), que expresa la diferencia entre el punto más alto de la señal de salida y el valor de estado estacionario (Rairán, 2007).
- El tiempo de elevación ( $t_r$ ), que equivale al tiempo que la señal tarda en pasar del 10 % al 90 % del valor de estado estacionario (Rairán, 2007).

Se usa la función *rlocus* para observar en el plano S, en donde se pueden ubicar los polos de tal manera que se cumplan los requerimientos de ( $t_s$ ,  $M_p$  y  $t_r$ ), usando los criterios de la ecuación 8.

Se eligen como criterios de diseño:

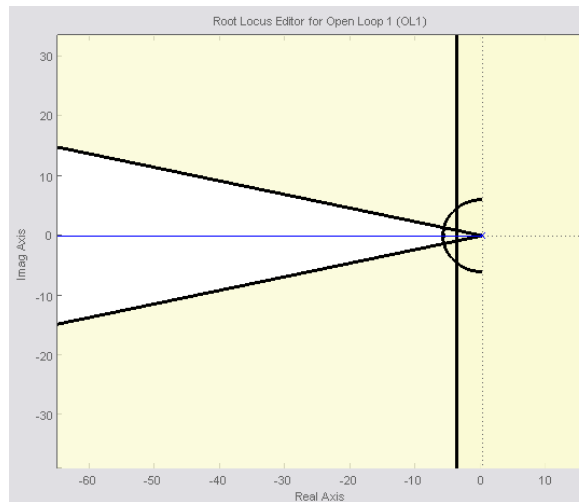
$$t_s = 1 [s]; \quad t_r = 0.3 [s]$$

$$M_p = 0.0001 = 0.01 \%$$

(Ecuación 8)

En la figura 12 se observa el *rlocus* (plano s) aplicado al sistema (P2I), sobre el que se decide la ubicación de los polos. Allí, la línea vertical da la restricción por tiempo de estabilización ( $t_s$ ), las líneas diagonales dan la restricción por sobrepico ( $M_p$ ), y el semicírculo da la restricción por tiempo de elevación.

Figura 12. Rlocus para el modelo de avance



Fuente: elaboración propia

Es importante cumplir con los tres criterios de respuesta, por tanto, debe garantizarse la ubicación de los polos en la zona de color blanco.

Como se requiere que el máximo sobreimpulso sea cero, se escogen los siguientes polos reales:

$$s_1 = -100 ; s_2 = -200$$

$$s_3 = -300$$

$$s^3 + 600s^2 + 110 * 10^3 s + 6 * 10^6$$

$$\alpha_0 = 1; \alpha_1 = 600;$$

$$\alpha_2 = 110 * 10^3 \alpha_3 = 6 * 10^6$$

(Ecuación 9)

3) Se determinan los valores de las matrices W y M para hallar la matriz de transformación T:

$$W = \begin{bmatrix} 1 * 10^6 & 2 * 10^3 & 1 \\ 2 * 10^3 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

(Ecuación 10)

$$M = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 32770 \\ 0 & 32770 & -6.554e + 007 \\ 32770 & -3.277 * 10^7 & 3.277 * 10^{10} \end{bmatrix}$$

(Ecuación 11)

$$T = \begin{bmatrix} 32770 & 0 & 0 \\ 0 & 32770 & 0 \\ 0 & 32770000 & 32770 \end{bmatrix}$$

(Ecuación 12)

4) Se determina la ganancia de realimentación:

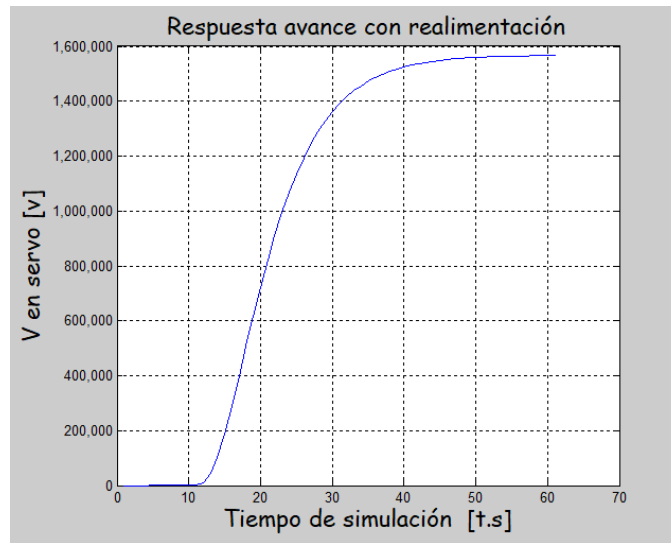
$$k = [\alpha_3 - a_3 \alpha_2 - a_2 \alpha_1 - a_1] * T^{-1}$$

$$k = [183.09 \quad 15.563 \quad -0.042722]$$

(Ecuación 13)

Al aplicar  $k$  al sistema, se obtiene la respuesta detallada en la figura 13. Allí se ve que al realimentar el sistema, este se estabiliza en un valor alto. Es necesario agregar una ganancia de prealimentación, para que la respuesta de salida sea igual a la señal de control.

Figura 13. Respuesta del modelo de avance con realimentación de estados

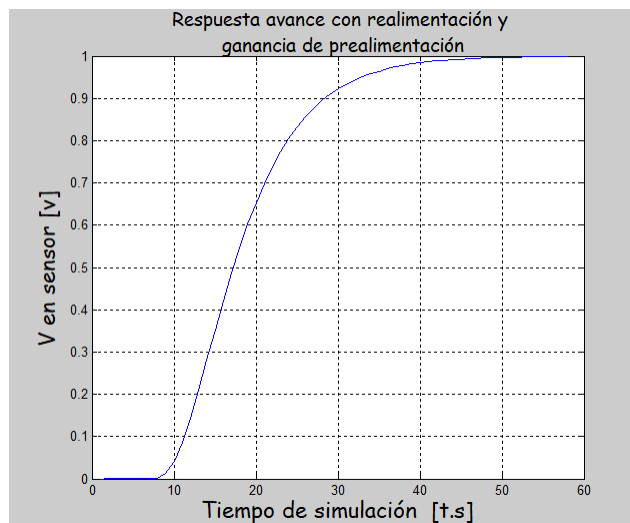


Fuente: elaboración propia

$$G_p = \frac{1}{1.57 * 10^5}$$

(Ecuación 14)

Figura 14. Respuesta del modelo de avance con realimentación de estados y prealimentación

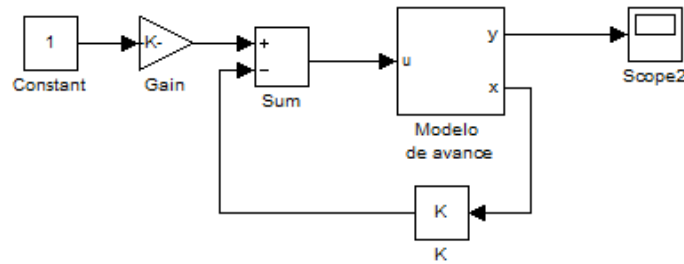


Fuente: elaboración propia

En la figura 14 se muestra la respuesta del sistema con prealimentación. El modelo con la matriz de realimentación K se muestra en la figura

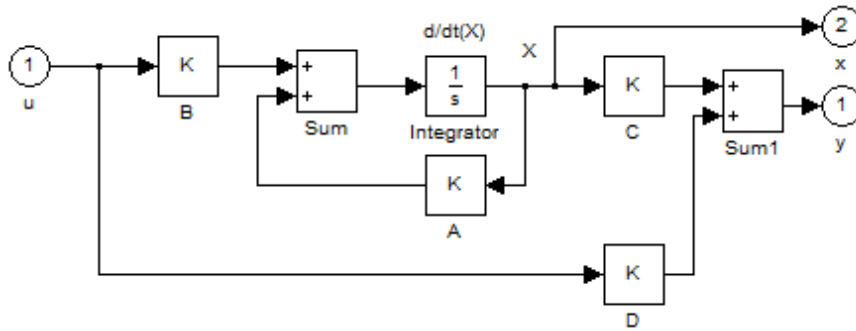
15, mientras que en la figura 16 se detalla el interior del modelo de avance.

Figura 15. Controlador de avance



Fuente: elaboración propia

Figura 16. Modelo de avance



Fuente: elaboración propia

### Observador de estado (avance)

En la práctica no se cuenta con los estados de realimentación  $x$ , por lo que es indispensable diseñar un *observador* de estados (Katsuhiko, 1998), el cual toma la señal de salida ( $y$ ), además de la señal de control  $U$ , y proporciona los estados de realimentación, para multiplicarlos por la matriz de ganancias.

Como el observador es una copia de la planta, emplea la misma entrada y normalmente tiene la misma función de transferencia, pero con un término extra compara la salida actual ( $y$ ) con cierta salida estimada ( $\hat{y}$ ). Así, los estados estimados se aproximan a los valores reales de los estados  $x$ . Para diseñar el observador de estados de orden completo es necesario hallarle una ganancia de realimentación, así:

- 1) Se determina el polinomio característico de  $A$ , mediante la ecuación 7.
- 2) Se determina el polinomio característico del observador.

$$s_{1o} = -1000 ; s_{2o} = -2000$$

$$s_{3o} = -3000$$

$$\bar{a}_0 = 1 ; \bar{a}_1 = 6 * 10^3 ; \bar{a}_2 = 11 * 10^6$$

$$\bar{a}_3 = 6 * 10^9$$

(Ecuación 15)

3) Se determina el  $K_e'$  del observador mediante la ecuación 16.

$$K_e' = [\bar{a}_1 - a_1 \bar{a}_2 - a_2 \bar{a}_3 - a_3]$$

(Ecuación 16)

4) Se determina la matriz de transformación equivalente.

$$T^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ a_1 & 1 & 0 \\ a_2 & a_1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ CA \\ CA^2 \end{bmatrix}$$

(Ecuación 17)

5) Se calcula el  $K_e'$  aplicando las ecuaciones, desde la 18 hasta la 21.

$$K_e = K_e' T^{-1}$$

(Ecuación 18)

$$Nc = [C \ CA \ CA^2]$$

(Ecuación 19)

$$T = Nc * W$$

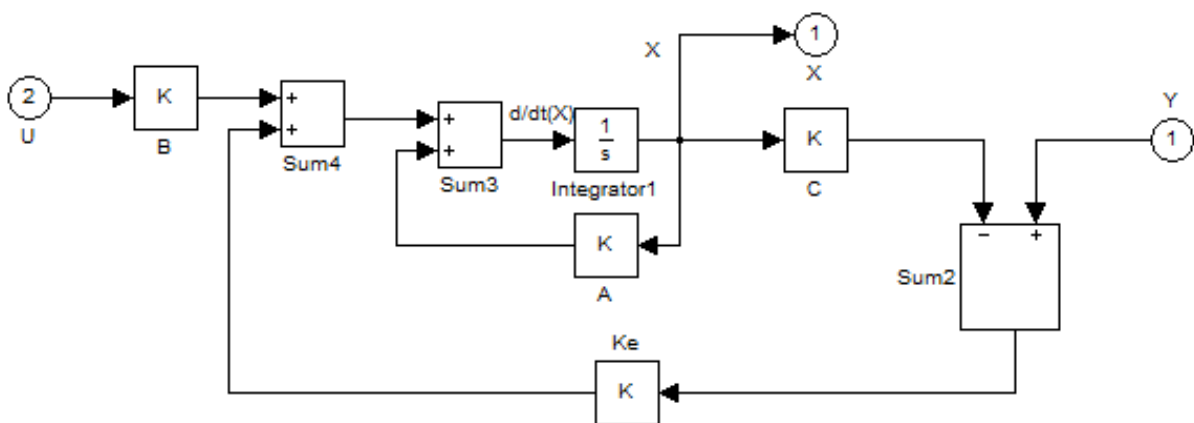
(Ecuación 20)

$$Ke = \begin{bmatrix} 0.1393 \\ 69.6621 \\ 0 \end{bmatrix}$$

(Ecuación 21)

En la figura 17 se presenta un diagrama del interior del observador de estados:

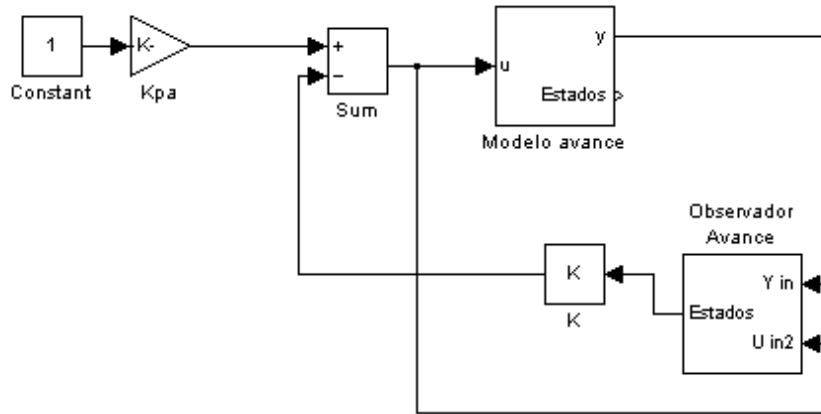
Figura 17. Observador de estados



Fuente: elaboración propia

En la figura 18 se muestra el modelo con el observador adaptado.

**Figura 18.** Modelo de avance con el observador de estados

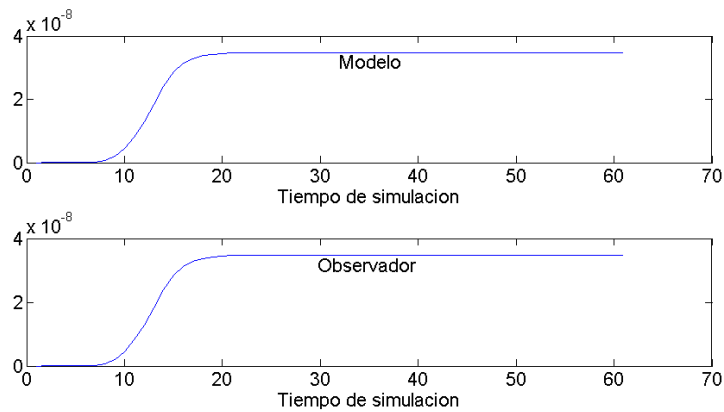


Fuente: elaboración propia

Para ver que el observador funciona correctamente, se realizan dos gráficas. La primera, en la figura 19, muestra un estado de la señal estados

en el bloque observador, y el mismo estado de la señal estados del bloque modelo, que son iguales.

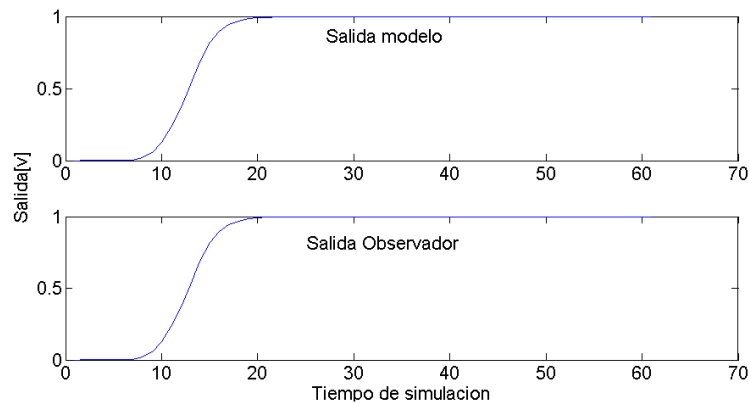
**Figura 19.** Comparación de un estado en el modelo y en el observador



Fuente: elaboración propia

En la segunda de dichas gráficas (figura 20), se observa la señal de salida tanto del observador como del modelo.

Figura 20. Comparación de la señal de salida del modelo y del observador



Fuente: elaboración propia

### Modelo de retroceso

Para este otro modelo se determinan las matrices de igual manera como se hizo para el modelo de avance:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -985.07 & 1 \\ 0 & 0 & -999.87 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 16384 \end{bmatrix}$$

$$C = [12990 \quad 0 \quad 0]$$

$$D = [0]$$

(Ecuación 22)

El procedimiento para designar la ubicación de los polos es el siguiente:

1) Se determina el polinomio característico de la matriz A para determinar los coeficientes:

$$\Delta(s) = (sI - A)$$

$$\Delta(s) = s^3 + 1985s^2 + 9.849 * 10^5 s$$

$$a_0 = 1; a_1 = 1985;$$

$$a_2 = 9.849 * 10^5; a_3 = 0$$

(Ecuación 23)

2) Se determina la ubicación de los polos deseados, y su polinomio característico con sus coeficientes:

Para la ubicación de los polos se tienen en cuenta los valores de la ecuación (8). Los polos seleccionados son los mismos que se indican en la ecuación (9).

3) Se determinan las matrices W, M y T:

$$W = \begin{bmatrix} 9.8494 * 10^5 & 1984.9 & 1 \\ 1984.9 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

(Ecuación 24)



$$M = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 16384 \\ 0 & 16384 & -3.2521 * 10^7 \\ 16384 & -1.6382 * 10^7 & 1.638 * 10^{10} \end{bmatrix}$$

(Ecuación 25)

$$T = \begin{bmatrix} 16384 & 0 & 0 \\ 132.95 & 16384 & 0 \\ -941.45 & 1.6139 * 10^7 & 16384 \end{bmatrix}$$

(Ecuación 26)

4) Se determina la ganancia de realimentación:

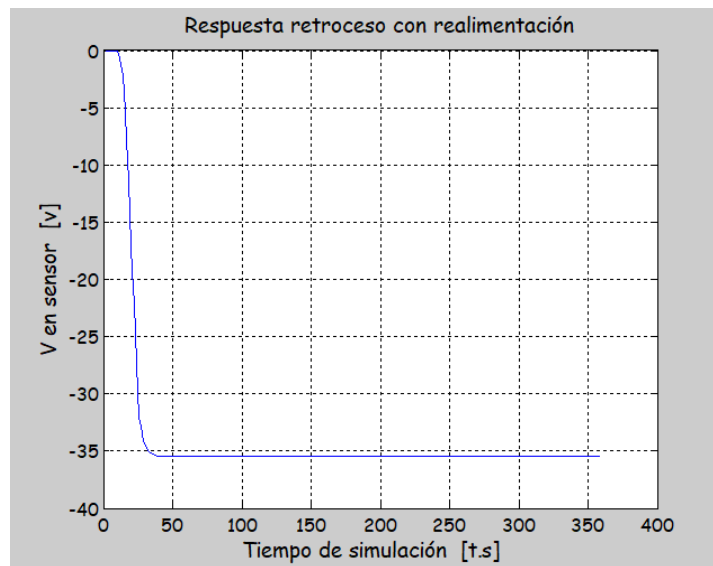
$$k = [\alpha_3 - a_3 \quad \alpha_2 - a_2 \quad \alpha_1 - a_1] * T^{-1}$$

$$k = [365.96 \quad 29.872 \quad -0.084534]$$

(Ecuación 27)

Al aplicar k al sistema se obtiene la siguiente respuesta:

Figura 21. Respuesta del modelo de retroceso con realimentación de estados



Fuente: elaboración propia

En la figura 21 se nota que, al realimentar el sistema, este se estabiliza en un valor alto. Por lo tanto es necesario agregar una ganancia de realimentación de tal manera que la respuesta de salida sea igual a la señal de control.

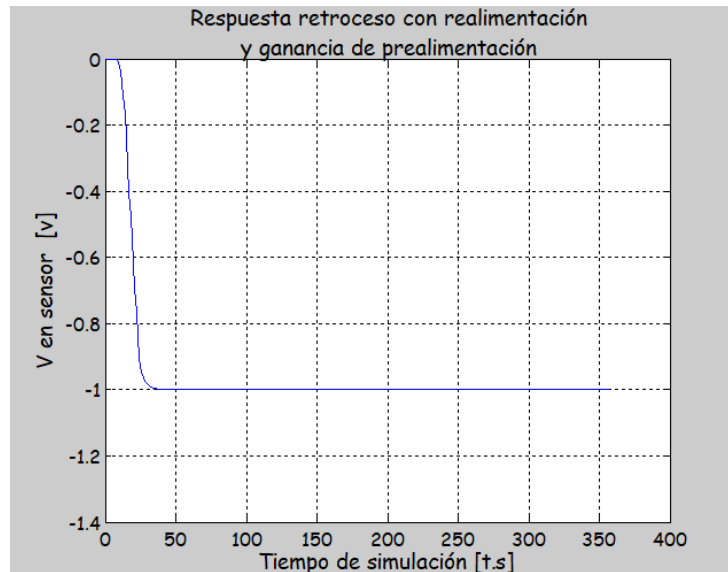
$$Gp = \frac{1}{35.5}$$

(Ecuación 28)

En la figura 22 se nota que al aplicarle una ganancia de prealimentación al sistema se obtiene la respuesta deseada que sigue la señal de referencia de -1v.

El modelo con la matriz de realimentación K en Simulink es igual al de la figura 15, cambia es el valor de las matrices que caracterizan el comportamiento del sistema en retroceso.

Figura 22. Respuesta del modelo de retroceso con realimentación de estados y prealimentación



Fuente: elaboración propia

### Observador de estado (retroceso)

Para diseñar el observador de estados para el modelo de retroceso, es necesario hallar una ganancia de realimentación para el observador de estados. Se calcula  $N_c$  y luego se calcula el valor de  $T$  para calcular el  $K_e$ , empleando el mismo procedimiento aplicado en el diseño del observador de estados para el modelo de avance.

$$N_c = [C \ CA \ CA^2]$$

(Ecuación 29)

$$T = N_c * W$$

(Ecuación 30)

$$K_e = \begin{bmatrix} -0.014242 \\ 34.851 \\ -4653 \end{bmatrix}$$

(Ecuación 31)

Los esquemas para el modelo de retroceso son similares a las figuras 15, 16, 17 y 18, aunque las matrices del sistema son diferentes.

### Resultados

Se obtuvieron dos modelos del sistema hidráulico, uno para el comportamiento del avance de la unidad lineal y otro para el retroceso. Así se obtuvo un porcentaje de coincidencia de identificación aproximado de 93 %, usando como referencia una señal cuadrada.

El modelo total del sistema, avance y retroceso combinados, presenta un error promedio de 9 % con respecto a la respuesta real del sistema ante las señales cuadrada, diente de sierra y triangular.

Se implementó un controlador por realimentación de estados para cada uno de los modelos estimados, cumpliendo siempre en la simulación con los parámetros de diseño establecidos. Sin embargo, una vez realizadas las pruebas sobre la

planta real y el sistema de adquisición de datos, se presentó un error del 20 %, debido principalmente a los tiempos de retardo de la comunicación USB.

## Conclusiones

Para seleccionar un modelo adecuado para iniciar la identificación del sistema, es necesario conocer muy bien el tipo de respuesta entregada por el sistema ante una entrada arbitraria. Sin embargo, es necesario además realizar fases de prueba y error para encontrar el modelo que más se ajuste al sistema real.

La identificación de sistemas se realiza generalmente con un único par de señales de entrada y salida, por lo que es posible que sistemas de ordenes diferentes entreguen respuestas similares ante una misma entrada, resultando así modelos con altos porcentajes de coincidencia. Pero, en ocasiones, estos modelos no describen correctamente el comportamiento real del sistema. Lo anterior implica que se deben realizar múltiples fases de identificación ante entradas diferentes para reducir el error producido.

La manera más adecuada de identificar un modelo es aplicar señales tipo escalón como lo son la señal cuadrada y la señal *random*, dado que tienen cambios bruscos de nivel. La identificación realizada con la señal cuadrada caracteriza el sistema hidráulico, porque el modelo responde

de forma similar al comportamiento de la planta y los porcentajes de coincidencia en el Toolbox de identificación son altos.

La herramienta de identificación de sistemas utilizada permite identificar sistemas estrictamente lineales, por lo cual las no linealidades conocidas del sistema tuvieron que ser tenidas en cuenta después del proceso de identificación, lo cual aumentó el error en la estimación del modelo del sistema.

Al utilizar una tarjeta de adquisición de datos USB, se presenta un tiempo muerto en la comunicación, el cual produce un retardo de la señal de control hacia el sistema. Dependiendo del sistema que se esté controlando dicho retardo puede comprometer el funcionamiento en tiempo real del sistema de control.

El controlador calculado por medio de realimentación de estados y localización de polos presenta un error en la simulación de orden aceptable, por lo que cumple con los criterios de diseño tales como máximo sobre-impulso, tiempo de estabilización y levantamiento.

## Recomendaciones

Es posible utilizar otros métodos de identificación de sistemas, que tengan en cuenta algunas de las no linealidades presentes en el sistema, tales como banda muerta y saturación. Una posibilidad es utilizar algoritmos genéticos como método de optimización, considerando que su función objetivo puede contener no linealidades.

Se pueden utilizar control óptimo para el cálculo de las constantes de realimentación, o también técnicas de inteligencia artificial como redes neuronales, lógica difusa y algoritmos genéticos.

Es necesario utilizar un medio diferente de adquisición de datos para lograr control en tiempo real propiamente dicho, por ejemplo, una tarjeta de adquisición de datos por puerto PCI.

## Referencias

- Katsuhiko, O. (1998). *Ingeniería de control moderna*. Minnesota: Universidad de Minnesota, Prentice Hall.
- Ljung, L. (2008). *System Identification Toolbox 7: Getting Started Guide*. Nueva York: The MathWorks.
- Martínez, M. y Rairán, D. (2001). Control de posición de un sistema hidráulico mediante un controlador PID digital. *Tecnura*, 5(9), 28-36.
- MathWorks. Accelerating the Pace of Engineering and Science [recurso en línea]. Recuperado de <https://bit.ly/2QsPxxB>
- National Instruments. (2009). NI USB-621x User Manual. 2009. Austin, Texas: National Instruments Corporation. Recuperado de <https://bit.ly/3jncSNY>
- Rairán, J. (2007). *Análisis de sistemas dinámicos y control PID*. Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Rairán, J., Guerrero, C. y Mateus, J. (2010). Diseño de controladores de tipo proporcional integral derivativo (PID) y difuso para la posición de un motor de corriente continua (DC). *Ingeniería y Universidad*, 14(1), 137-160. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3243802>
- Rairán, J. y Urrego, L. (2006). Implementación de un controlador difuso para la regulación de posición de un cilindro hidráulico lineal. *Tecnura*, 10(19), 18-28. Recuperado de <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/Tecnura/article/view/6212/7734>

# Control difuso tipo Mamdani para un brazo-robot con tres grados de libertad

Dante Sterpin\*

Camilo Giraldo\*\*

David Cañón\*\*\*

## Resumen

Los sistemas de razonamiento difuso pretenden simular la capacidad humana de tomar decisiones para actuar en condiciones ambiguas, como, por ejemplo, el hecho de extender el brazo *un poco* para alcanzar un objeto *cercano*. El cerebro ejecuta a diario este tipo de acciones sin necesidad de calcular exactamente cuán *poco* debe extenderse el brazo ni cuán *cercano* está el objeto. En este artículo se presenta el diseño y los resultados experimentales de un brazo robótico realizado como actividad de semillero de investigación en control difuso. Los resultados muestran que pueden especificarse secuencias de posiciones  $(x, y)$  y automáticamente el brazo ejecutará las acciones necesarias para lograrlas.

**Palabras clave:** brazo-robot, lógica difusa, razonamiento difuso

## Abstract

Fuzzy reasoning systems are intended to simulate the human capacity to make decisions to react in ambiguous situations, such as extending *a little* the arm to reach something *close*, a decision that is executed daily by the brain without having to find out exactly how *little* the arm should extend or how *close* the object is. This paper presents the design and experimental results of a robotic arm performed as a research seedbed activity in fuzzy control. The results show that a user can specify certain position sequences  $(x, y)$ , and automatically the robotic arm will execute the necessary actions to achieve them.

**Keywords:** Fuzzy Logic, Fuzzy Reasoning, Robot-Arm

\* Ingeniero Electrónico de la Universidad Santo Tomás, Especialista en Docencia Universitaria de la Universidad Militar Nueva Granada y Docente en la Corporación Unificada Nacional de Educación Superior. Contacto: dante\_sterpin@cun.edu.co

\*\* Ingeniero Electrónico de la Corporación Unificada Nacional de Educación Superior. Contacto: asinxmr@hotmail.com

\*\*\* Ingeniero Electrónico de la Corporación Unificada Nacional de Educación Superior. Contacto: david\_a.c.s@hotmail.com

## Introducción

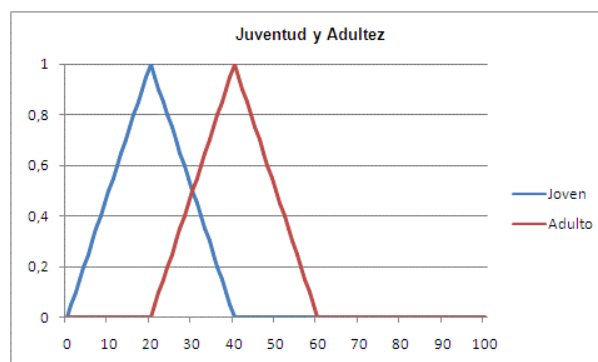
La lógica difusa considera todos los posibles valores de verdad existentes entre los dos valores absolutos de la lógica binaria. Por esta razón, la lógica difusa puede considerarse como una generalización de la lógica binaria. En la teoría clásica de conjuntos, se relacionan los valores de verdad binarios con la pertenencia de un elemento a la característica general de un conjunto, por lo cual es verdadero afirmar que, por ejemplo, una persona de 26 años clasifica como mayor de edad, pero existe cierta dificultad para clasificarla como joven o como adulta.

Dicha dificultad se debe a la ambigüedad lingüística que implica la representación formal de cuestiones tales como la juventud o la adultez. Por tanto, en esta situación resulta apropiado emplear conjuntos difusos, los cuales son funciones matemáticas utilizadas para definir grados de pertenencia, mediante posibles grados de verdad difusos. Teniendo en cuenta la equivalencia entre {Verdad; Falsedad} y los valores {1; 0}, se dice que los valores de verdad difusos corresponden al rango  $[0,0; 1,0]$ . Así, para el ejemplo de la persona de 26 años, se pueden emplear los conjuntos difusos detallados en la figura 1 y de esta manera puede afirmarse que dicha persona es 0,7 joven y 0,3 adulta.

Esta herramienta permite representar conceptos ambiguos del mundo real mediante la definición de variables lingüísticas, en las cuales se identifica, para cierta cantidad de elementos con alguna característica general, una distribución de conjuntos difusos con el fin de formalizar la concepción de algunos de sus posibles términos. Dichos elementos se agrupan de forma clásica a manera de conjunto universal, denominado universo-de-discurso en el contexto de la lógica difusa. La característica general identifica lo representado por la variable lingüística, mientras que los términos identifican los conjuntos difusos distribuidos en el universo-de-discurso.

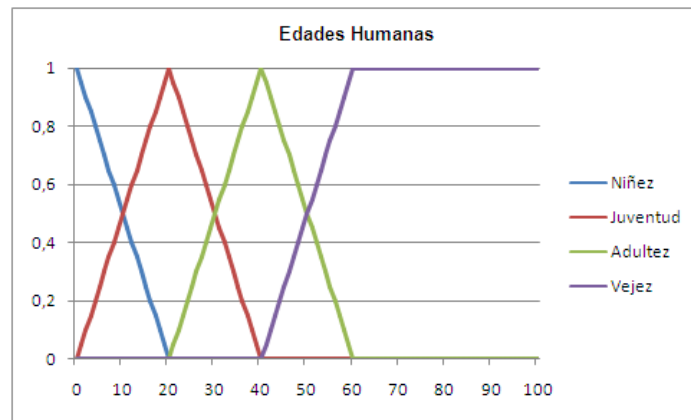
Considérese un escenario en el que se tenga que representar las edades humanas. En dicha situación debería agruparse a todas las personas con algún valor de edad en el rango  $[0; 100]$  años y se podrían considerar niños, jóvenes, adultos o viejos, como algunas de sus clasificaciones más relevantes. Ese rango de años corresponde al universo-de-discurso, mientras que las cuatro categorías corresponden a los términos cuyos respectivos conjuntos difusos se detallan en la figura 2.

**Figura 1.** Conjuntos difusos para representar juventud y adultez



Fuente: elaboración propia

Figura 2. Conjuntos difusos para representar edades humanas



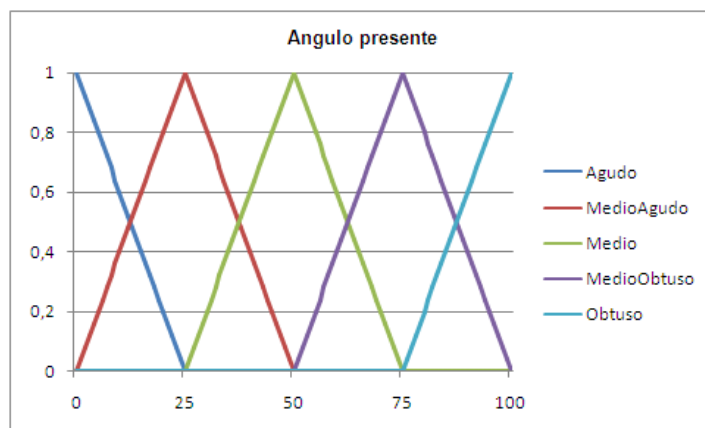
Fuente: elaboración propia

## Controlador difuso

Entre las varias aplicaciones de los sistemas basados en lógica difusa está el control de procesos industriales. El sistema descrito en este artículo controla el posicionamiento de un brazo tipo retroexcavadora, en el cual, cada uno de sus tres grados de libertad está determinado por un servomotor cuyo ángulo varía en el rango [0; 100]

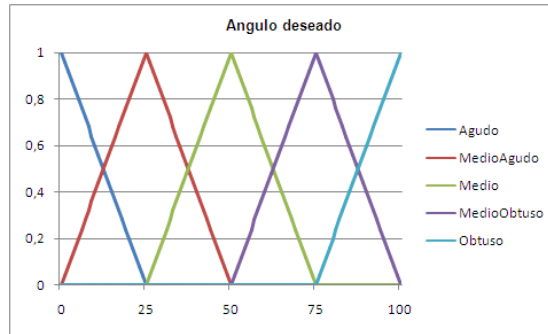
grados. Como en esta situación la característica implicada corresponde a la medida de ese ángulo, presente o deseado, los términos apropiados para definir las variables lingüísticas de entrada son: agudo (A), medio-agudo (mA), medio (m), medio-obtuso (mO) y obtuso (O), tal como se indica en las figuras 3 y 4.

Figura 3. Conjuntos difusos para representar el ángulo presente o medido del servomotor



Fuente: elaboración propia

Figura 4. Conjuntos difusos para representar el ángulo deseado para el servomotor



Fuente: elaboración propia

La medida del ángulo presente es obtenida mediante un sensor resistivo tipo reóstato y la medida del ángulo deseado es definida por el usuario vía teclado. De esta manera se tiene el valor real de cada variable lingüística de entrada, con lo que el sistema de control analiza la situación presente y la deseada mediante *fuzzyficación*. Esto último consiste en calcular los grados de pertenencia correspondientes a los conjuntos difusos de cada variable según su respectivo valor real.

A continuación se muestran las ecuaciones utilizadas para el ángulo presente (\$\theta\_p\$), las cuales se aplican de la misma forma para el ángulo deseado (\$\theta\_d\$). En las ecuaciones, 1 a la 5, se detallan las expresiones difusas de los términos lingüísticos, mostrados en las figuras 3 y 4.

$$\mu_A(\theta_s) = \begin{cases} \frac{25 - \theta_s}{25} & ; \text{para } \theta_s < 25 \\ 0,0 & ; \text{para } \theta_s \geq 25 \end{cases}$$

(Ecuación 1)

$$\mu_{MA}(\theta_s) = \begin{cases} \frac{\theta_s}{25} & ; \text{para } \theta_s \leq 25 \\ \frac{50 - \theta_s}{25} & ; \text{para } 25 < \theta_s < 50 \\ 0,0 & ; \text{para } \theta_s \geq 50 \end{cases}$$

(Ecuación 2)

$$\mu_M(\theta_s) = \begin{cases} 0,0 & ; \text{para } \theta_s \leq 25 \\ \frac{\theta_s - 25}{25} & ; \text{para } 25 < \theta_s < 50 \\ \frac{75 - \theta_s}{25} & ; \text{para } 50 \leq \theta_s < 75 \\ 0,0 & ; \text{para } \theta_s \geq 75 \end{cases}$$

(Ecuación 3)

$$\mu_{MO}(\theta_s) = \begin{cases} 0,0 & ; \text{para } \theta_s \leq 50 \\ \frac{\theta_s - 50}{25} & ; \text{para } 50 < \theta_s < 75 \\ \frac{100 - \theta_s}{25} & ; \text{para } \theta_s \geq 75 \end{cases}$$

(Ecuación 4)

$$\mu_O(\theta_s) = \begin{cases} 0,0 & ; \text{para } \theta_s \leq 75 \\ \frac{\theta_s - 75}{25} & ; \text{para } \theta_s > 75 \end{cases}$$

(Ecuación 5)

Adicionalmente, deben definirse las variables de salida necesarias, según sea el tipo de reacción que permita al ángulo presente acercarse al deseado. Esto se lograría al rotar el eje del servomotor cierta "cuantía", con respecto a su posición actual. Dicha cuantía puede ser: muy negativa (MN), negativa (N), medio negativa (mN), poco negativa (PN), zero (Z), poco positiva (PP), medio positiva (mP), positiva (P), y muy positiva (MP). Al considerar que el rango de posibles



variaciones es [-80; +80], se define una variable lingüística de salida, empleando los conjuntos difusos detallados en la figura 5.

Como cada uno de los tres servomotores tiene la necesidad de rotar cierta *cuantía*, según la

### Razonamiento difuso

Todo sistema racional debe disponer de cierto conocimiento para poder decidir el cómo actuar en cada posible situación. Como el controlador presentado en este artículo tiene [(101 x 101) x 3] posibles situaciones de ángulo presente ( $\theta_p$ ) y deseado ( $\theta_d$ ), sería obsoleto programar explícitamente una reacción apropiada en cada una de ellas, para lo cual puede utilizarse la agrupación mediante los conjuntos difusos de las figuras 3 y 4. Dado lo anterior, se logra representar todo el problema de control con solo [(5 x 5) x 3] posibles combinaciones.

Cada una de dichas combinaciones condiciona una regla difusa de comportamiento, que, formalmente, es una implicación difusa compuesta por una condición y su respectiva reacción, según el tipo de comportamiento esperado para el controlador. Por ejemplo, si en determinada situación el ángulo presente es mA y el ángulo deseado es mO, entonces la reacción necesaria

diferencia existente entre sus respectivos ángulos, presente y deseado, entonces se decidió componer el sistema de posicionamiento angular con tres subcontroladores difusos, cada uno con dos variables de entrada y una variable de salida, comentadas previamente.

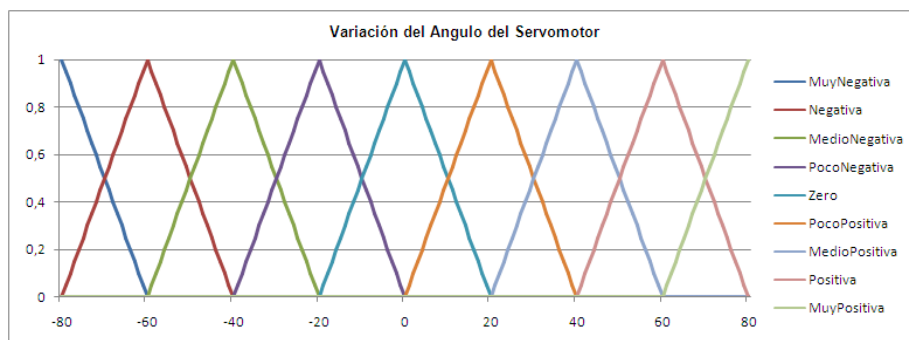
es aumentar *más o menos* la posición angular del motor.

Lo anterior podría parecer una forma muy imprecisa de representar el buen funcionamiento del controlador. Sin embargo, el procesamiento numérico de los grados de pertenencia es el garante de la precisión necesaria en la ambigua elasticidad del término *medio*. Dicho proceso numérico se conoce como *inferencia fuzzy* y su propósito es calcular un conjunto difuso de decisión-parcial  $\mu_{DP}(v)$ , en cada regla difusa (R), usando la ecuación 6. Allí,  $\mu_{E \rightarrow S}(\mathbf{U}; v)$  es la relación de implicación entre las entradas y la salida; mientras que  $\mu_{SP}(\mathbf{U})$  es el grado de cumplimiento de la situación en la parte condicional de la regla difusa (R), dada la información percibida ( $\mathbf{U}$ ) por el controlador difuso.

$$\mu_{DP}(v) = \sup_{u \in \mathbf{U}} \{ \mu_{E \rightarrow S}(\mathbf{U}; v); \mu_{SP}(\mathbf{U}) \}$$

(Ecuación 6)

Figura 5. Conjuntos difusos para representar la variación angular del servomotor



Fuente: elaboración propia

Tras calcular dichos conjuntos difusos, se procede a *defuzzyficar* una decisión de actuación, es decir, obtener un valor de salida compatible con el mecanismo mediante el cual se modifica el comportamiento del sistema controlado. Para el controlador expuesto en este artículo, la acción consiste en modificar la variable de la cual depende el ángulo de cada servomotor, es decir, el ancho de pulso aplicado, el cual se obtiene mediante la *defuzzyficación* indicada en la ecuación 7.

$$v = \frac{\sum_R [\bar{v} * \mu_{DP}(v)]_R}{\sum_R [\mu_{DP}(v)]_R}$$

(Ecuación 7)

## Conocimiento conductual

Dado que cada entrada tiene 5 términos, a continuación se especifican las [5 x 5] reglas difusas (R), utilizadas en cada subcontrolador. En cada regla, [u1] simboliza el ángulo presente, [u2] simboliza el ángulo deseado, y [v] simboliza la variación del ángulo.

- R1 : Si [u1] es (A) y [u2] es (A), entonces [v] es (Z).
- R2 : Si [u1] es (mA) y [u2] es (A), entonces [v] es (PN).
- R3 : Si [u1] es (m) y [u2] es (A), entonces [v] es (mN).
- R4 : Si [u1] es (mO) y [u2] es (A), entonces [v] es (N).
- R5 : Si [u1] es (O) y [u2] es (A), entonces [v] es (MN).
- R6 : Si [u1] es (A) y [u2] es (mA), entonces [v] es (PP).
- R7 : Si [u1] es (mA) y [u2] es (mA), entonces [v] es (Z).
- R8 : Si [u1] es (m) y [u2] es (mA), entonces [v] es (PN).
- R9 : Si [u1] es (mO) y [u2] es (mA), entonces [v] es (mN).
- R10 : Si [u1] es (O) y [u2] es (mA), entonces [v] es (N).

Estos dos procedimientos pueden simplificarse mediante la definición de dos matrices, una con los valores de estimulación en cada regla y la otra con los valores de actuación necesaria en cada regla. La primera matriz se calcula escogiendo el mínimo grado de pertenencia entre los calculados para cada combinación de términos en cada posible situación. La segunda matriz se obtiene especificando el valor en el cual está *centrado* el conjunto difuso del respectivo término de salida definido en cada regla difusa. En la sección donde se aborda la toma de decisión –para la actuación del controlador difuso–, se presentará explícitamente un ejemplo numérico para el controlador presentado en este artículo.

- R11 : Si [u1] es (A) y [u2] es (m), entonces [v] es (mP).
- R12 : Si [u1] es (mA) y [u2] es (m), entonces [v] es (PP).
- R13 : Si [u1] es (m) y [u2] es (m), entonces [v] es (Z).
- R14 : Si [u1] es (mO) y [u2] es (m), entonces [v] es (PN).
- R15 : Si [u1] es (O) y [u2] es (m), entonces [v] es (mN).
- R16 : Si [u1] es (A) y [u2] es (mO), entonces [v] es (P).
- R17 : Si [u1] es (mA) y [u2] es (mO), entonces [v] es (mP).
- R18 : Si [u1] es (m) y [u2] es (mO), entonces [v] es (PP).
- R19 : Si [u1] es (mO) y [u2] es (mO), entonces [v] es (Z).
- R20 : Si [u1] es (O) y [u2] es (mO), entonces [v] es (PN).
- R21 : Si [u1] es (A) y [u2] es (O), entonces [v] es (MP).
- R22 : Si [u1] es (mA) y [u2] es (O), entonces [v] es (P).

R23 : Si [u1] es (m) y [u2] es (O), entonces [v] es (mP).

R24 : Si [u1] es (mO) y [u2] es (O), entonces [v] es (PP).

R25 : Si [u1] es (O) y [u2] es (O), entonces [v] es (Z).

Tras considerar los conjuntos de la figura 3 y el término de salida detallado en cada regla (R), en la tabla 1 se establecen los valores-centro ( $\bar{V}$ ) que se emplean en la ecuación 7 para calcular la respuesta del controlador.

**Tabla 1.** Matriz de centros según el término de salida en cada regla difusa.

A	0	-20	-40	-60	-80
mA	20	0	-20	-40	-60
M	40	20	0	-20	-40
mO	60	40	20	0	-20
O	80	60	40	20	0
u2/u1	A	mA	m	mO	O

Fuente: elaboración propia

## Decisión de actuación

Para detallar un ejemplo sobre cómo el controlador difuso toma una decisión de actuación, se asumirá una posible situación asignando estos valores para las entradas: {u1 = 29; u2 = 64}, Al *fuzzyficarlos* se obtienen los grados de pertenencia con respecto a cada término en cada variable

de entrada. En la tabla 2 se detallan dichos valores y además se muestran los valores de estimulación en cada regla escogiendo el mínimo valor entre los respectivos grados de pertenencia en u1 y u2.

**Tabla 2.** Ejemplo de la matriz de estimulación para u1 = 29 y u2 = 64

0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,44	0,0	0,44	0,16	0,0	0,0
0,56	0,0	0,56	0,16	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
u2/u1	0,0	0,84	0,16	0,0	0,0

Fuente: elaboración propia

Aplicando la ecuación 7 a las tablas presentadas arriba, se obtiene una salida de 23,76. Dicho valor es la decisión de actuación, con cuya ejecución se espera poder aumentar el ángulo presente desde 29° hasta (29 + 23,76)°, procurando así acercarse

a los deseados 64°. El efecto real depende del movimiento realizado por el respectivo servomotor y el nuevo ángulo presente se conoce mediante el respectivo sensor de realimentación.

Este procedimiento corresponde a una iteración para un sólo grado de libertad en el brazo, por lo tanto deben ocurrir más iteraciones hasta cuando  $u_1$  se iguale a  $u_2$ , en cada grado de

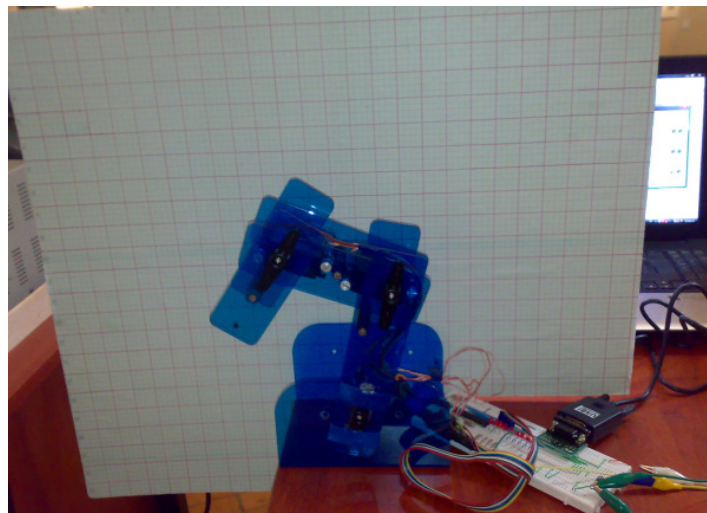
libertad, con lo cual el brazo alcanza cierta postura necesaria a partir de la postura en la que se encuentre inicialmente.

## Mapeo entre los ángulos del brazo y su alcance en 2D

El sistema descrito anteriormente es capaz de posicionar el brazo siempre que conozca los ángulos deseados en cada grado de libertad. Sin embargo, desde el punto de vista del usuario, el brazo debe llegar a cierta coordenada  $(x, y)$  desde cualquier otra posición en un espacio 2D. Por lo tanto, el hecho de representar este requerimiento mediante coordenadas es mucho más sencillo en comparación con definir el valor necesario en cada grado de libertad.

De esta manera debe disponerse de un mapeo capaz de indicarle al brazo-robot los valores de ángulos deseados para alcanzar cierto punto  $(x, y)$ , en una matriz con  $[22 \times 26]$  posibles posiciones 2D. La medida de cada posición se especificó en  $[2 \times 2]$  cm. para lograr abarcar el alcance total del brazo; su estructura física se muestra en la figura 6, y su espacio de posiciones accesibles se muestra en la figura 7.

Figura 6. Estructura física del brazo utilizado

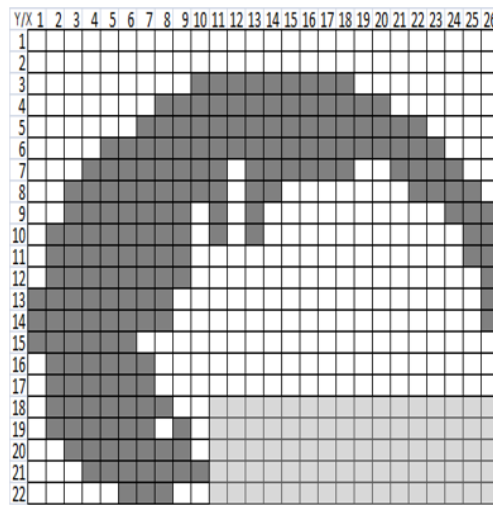


Fuente: elaboración propia

Para obtener la matriz de posiciones 2D realmente accesibles por el brazo, se especificaron 11 valores por cada servomotor: {0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100} y se combinaron entre sí.

En cada una de las combinaciones se midió la coordenada alcanzada por el brazo y en la posición alcanzada mediante varias combinaciones se prefirió la que posicionaba mejor al brazo.

Figura 7. Matriz de posiciones realmente accesibles por el brazo, en 2D



Fuente: elaboración propia

De esta forma se obtuvo la combinación de ángulos necesarios para alcanzar cada una de las coordenadas marcadas con gris oscuro en la

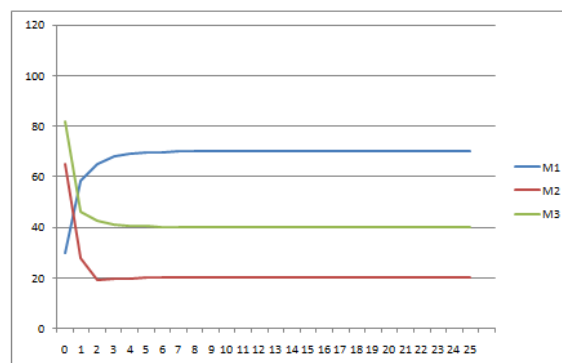
figura 7, y así los tres subcontroladores se encargan de posicionar el brazo completo.

## Resultados

El triple controlador se implementó en hojas de cálculo de Microsoft Excel® y se enlazó con una interfaz realizada en la versión 6.0 de Visual Basic, para utilizar los resultados del razonamiento difuso y hacer mover el brazo mediante el puerto serial del PC. Todo esto se probó con la intención de alcanzar la coordenada (7, 10) a partir de cualquier otra posición.

El brazo alcanza dicha coordenada cuando los ángulos de los tres motores miden {70°, 20°, 40°} respectivamente, pues se definieron esos valores como ángulo deseado al respectivo subcontrolador y cada motor mostró el comportamiento detallado en la figura 8.

Figura 8. Comportamiento de los tres motores del brazo-robot



Fuente: elaboración propia

Esta gráfica muestra que los motores del brazo inician en  $\{30^\circ, 65^\circ, 82^\circ\}$ , y al cabo de 24 iteraciones terminan en  $\{70^\circ, 20^\circ, 40^\circ\}$ , con lo que se logra la posición deseada. En realidad no importa cuál haya sido la posición inicial, siempre

y cuando se definan los valores  $\{70^\circ, 20^\circ, 40^\circ\}$  como ángulos deseados, el brazo se posiciona en  $(7, 10)$ , y a partir de ésta podría reubicarse el brazo a una nueva coordenada, cuantas veces sea necesario.

## Conclusiones

En este artículo se presenta el diseño de un triple controlador difuso tipo Mamdani, capaz de movilizar un brazo-robot constituido por tres servomotores, con el fin de hacerlo alcanzar cierta posición en un espacio 2D. Así puede alcanzar automáticamente secuencias ilimitadas de coordenadas, con el fin de recoger o entregar piezas

en algún proceso automatizado. Sin embargo, en este artículo se asume que dichas secuencias son definidas por algún usuario, y en un trabajo futuro se puede indagar sobre cómo obtenerlas autónomamente, empleando un sistema de planificación artificial, adaptable a procedimientos variables.

## Referencias

- García, J., Medel, J., Sánchez, J. y Tequianez, A. (2009). *Sistemas con lógica difusa*. México: Instituto Politécnico Nacional.
- Martín, B. y Sanz, A. (2006). *Redes neuronales y sistemas borrosos*. Madrid: Alfaomega.
- Ponce, P. (2010). *Inteligencia artificial con aplicaciones a la ingeniería*. Madrid: Alfaomega.
- Robayo, E. (2007). *Control difuso: fundamentos y aplicaciones*. Barranquilla: Editorial de la Universidad del Norte.
- Sterpin, D. (2015). *Apuntes de clase en la asignatura de control difuso* [documento interno de trabajo]. Corporación Unificada Nacional de Educación Superior (CUN).

# Domótica: genealogía del concepto e integración con ambientes naturales

Said Pinzón Castañeda\*

## Resumen

Abordar adecuadamente el tema de la domótica exige centrarse en el concepto, en su evolución a través de los años y en el principio de las aplicaciones que la llevaron a hacerse de un lugar entre la informática, la electrónica, la robótica y las telecomunicaciones como una actividad pensada para proporcionar confort y crear una serie de procesos automatizados e *inteligentes* que mejoran la calidad de vida del ser humano. En la mayoría de los casos, la simplificación de las tareas domésticas es el actor principal de los procesos domóticos; no por ello dejan de ser importantes para la domótica el compromiso con el ambiente, con la utilización adecuada de los recursos naturales y con la posible reutilización de alguno de ellos, tal como ocurre hoy en día con las denominadas viviendas sostenibles.

**Palabras clave:** domótica, sistemas de control, vivienda inteligente

## Abstract

To adequately address the topic of home automation, it is necessary to focus on the concept, how it has evolved through the years and in the beginning of the applications that led to a place between informatics, electronics, robotics and telecommunications, to provide comfort and a series of automated and “smart” processes that improve the quality of human life. Being the main actor of these processes of home automation (which in many cases are the simplification of housework) is important to note that there is a commitment to the environment, with the appropriate use of natural resources and the possible reuse of some of them such as in the currently named sustainable houses.

**Keywords:** Control Systems, Home Automation, Smart Building

\* Licenciado en Electrónica de la Universidad Pedagógica Nacional y especialista en Docencia Universitaria de la Universidad del Bosque. Profesor titular de la Uniagustiniana. Contacto: spc7203@hotmail.com

## Introducción

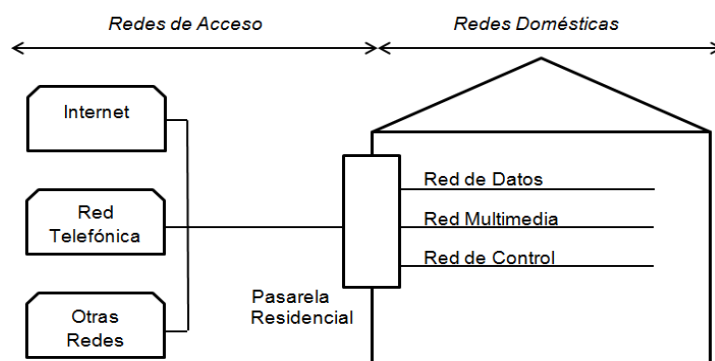
El término *domótica* se relaciona con la ciencia y los dispositivos desarrollados por esta que proporcionan algún tipo de automatización dentro de las viviendas que habitamos; puede tratarse simplemente de encender o apagar automáticamente una lámpara o algún otro artefacto eléctrico en cierto horario, o puede involucrar sistemas complejos con la capacidad de interactuar con cualquier artefacto eléctrico del hogar. En suma, la domótica consiste en integrar dispositivos eléctricos y electrónicos para automatizar su uso diario, mediante el control local o remoto de la casa o del edificio, al cual suele considerársele como *inteligente* (Huidobro y Millán, 2004).

Los sistemas automáticos, que en ciertos contextos son llamados *inteligentes*, forman una red de control centralizada que está vinculada a otras redes que, en conjunto, generan el confort, el entretenimiento, la gestión, la información, la vigilancia (seguridad) y, por supuesto, la misma automatización, que los usuarios adaptan a sus gustos y necesidades particulares. Aunque en muchos estudios se habla de *viviendas inteligentes* o de *edificios inteligentes* (Romero *et al.*, 2011), se

debe tener en cuenta que dichos términos se han empleado de manera errónea, pues la palabra *inteligente* se refiere a los sistemas, denominados *agentes*, con la capacidad de tomar decisiones, similar a como lo hacen los seres humanos: minimizar el error y sin depender de la acción de agentes externos –no como el usuario del sistema, sino del módulo de control en el propio dispositivo–. Sin embargo, en este documento se empleará el término *inteligente* solo porque se trata del más generalizado y el de mayor divulgación a nivel mundial, sobre todo por su amplio uso comercial.

En muy poco tiempo, tal como ya fue anticipado por algunas series de televisión o por la industria cinematográfica a través de películas como *Volver al futuro* –una de las mejores trilogías de ciencia ficción de los últimos tiempos–, existirán ciudades enteras con viviendas de dicha caracterización. En este artículo se dará un vistazo a las redes de dispositivos electrónicos en el hogar y en la vida cotidiana que ya están dirigiéndonos hacia ese futuro.

**Figura 1.** Modelo reticular del hogar domótico



Modelo Reticular del Hogar Domótico. Fuente Telefónica (2003)

Fuente: adaptado de Telefónica (2003, p. 61)



## Genealogía del concepto

Las personas necesitan el cobijo de cuatro paredes a las que puedan llamar hogar. Desde aquellos tiempos remotos de grutas y cavernas el hombre viene moldeando con sofisticación creciente casas que le resguarden de la intemperie, alberguen a sus seres queridos, protejan sus bienes y alojen sus sueños. (Domínguez y Sáez, 2006, p. 3)

En la búsqueda incansable por obtener confort, se han creado incontables dispositivos capaces de satisfacer dicha necesidad primaria del hombre. Pero, antes de llegar a ellos, se hará un breve recorrido a través de la historia con énfasis en la relación entre domótica y arquitectura, de gran importancia para el desarrollo de tales dispositivos. Según Domínguez y Sáez (2006), para el conocido arquitecto francés Le Corbusier, la casa tiene dos finalidades básicas. En primer término, es una *machine à habiter*, es decir,

una máquina destinada a procurarnos una ayuda eficaz para la rapidez y la exactitud en el trabajo, una máquina diligente y atenta para satisfacer las exigencias del cuerpo: la comodidad. Se habla aquí de un producto tecnológico de orden eminentemente práctico, de un trabajo de ingeniería. Pero, por otro lado y en segundo término, la casa es “un lugar útil para la meditación, un lugar donde la belleza existe y aporta al espíritu la calma indispensable: es el fruto de un artista, el trabajo de un arquitecto”. (pp. 3-4)

De acuerdo con lo anterior, se puede observar que desde el horizonte de comprensión de la arquitectura moderna ya se hablaba de la casa como una máquina que ayuda al ser humano a tener una comodidad absoluta y no solamente como un lugar que le permite resguardarse de las condiciones climáticas. Más adelante se verá cómo la arquitectura y la tecnología han ido de la

mano a lo largo de la historia en lo que tiene que ver con el diseño y la planificación de una casa, de una vivienda o un edificio autosuficiente.

En el periodo comprendido entre los siglos xv y xviii se consolidó el término *casa*; fue necesario que pasaran cientos de años para que los diferentes países hicieran sus aportes a lo que hoy en día se llama *hogar*. No obstante, en aquel periodo importaba más el aspecto que el mismo funcionamiento, todo a causa de la falta de electricidad, requisito indispensable para cualquier adelanto tecnológico.

Durante los primeros años siglo xix, y con la llegada de la electricidad, se empezó a ver la necesidad de incluir nuevas tecnologías domésticas mientras avanzaba la Revolución industrial, lo que significó el buen comienzo de la tecnología en los hogares. El arribo de los otros servicios esenciales en ese mismo momento (agua potable y gas), especialmente en Estados Unidos y en Europa, hizo que estas regiones estuvieran a la vanguardia del mundo en tecnología doméstica.

En palabras de Rybcynski (1989), sobre la inclusión de la electricidad a los hogares, “el centro de atención pasó del salón a la cocina, lo cual fue motivo de que, cuando la electricidad entró en la casa, lo hiciera por la puerta de la cocina” (Domínguez y Sáez, 2006, p. 7). Ya en el siglo xx, aunque solo algunos pocos pudieron adquirir estos *lujos*, las empresas de electrodomésticos tuvieron un papel importante en masificar y llevar estos pequeños pasos de la domótica a cada hogar. En ese punto la famosa frase de Le Corbusier, “una casa es una máquina de habitar” (1998, p.73), cobró pleno sentido y se empezó a hablar de confort y comodidad.

Con base en ese breve recorrido y tras entender la influencia de la arquitectura y de los procesos sociales que, como la Revolución Industrial, modificaron sustancialmente el concepto de hogar y vivienda, se puede pasar a hablar de los diferentes dispositivos, redes, conexiones, sistemas

## Dispositivos domóticos

Para que una vivienda pueda convertirse en una vivienda domótica, lo primero que se debe hacer es buscar los dispositivos adecuados que podrán comunicarse entre ellos –es decir, interconectarse–. Luego, habrá de garantizarse que sean compatibles con una pasarela residencial, que, a su vez, generará una conexión entre la parte interna y externa de la casa.

Aparentemente no existen acusadas diferencias entre una vivienda tradicional y otra con equipamiento domótico. Se trata de la misma vivienda, con equipamiento semejante, y con diseño arquitectónico similar. La diferencia solo estriba en la incorporación de una mínima tecnología que permita gestionar de forma más eficiente e integrar

## La pasarela residencial

La pasarela residencial (o *residential gateway*) es el dispositivo que conecta el mundo externo con las redes internas. Básicamente, se trata de un *router* inteligente que, al recibir las señales de redes externas conectadas, las envía a las redes internas y viceversa. Las redes internas del hogar se conocen como HAN (*home area network*) y son redes locales o LAN (*local area network*), que lo único que permiten es la conexión de dichas redes. La HAN, como su nombre lo indica, integra todos los electrodomésticos, sensores y actuadores que permiten tener una casa domotizada.

de control, aplicaciones, etc. que fueron vinculándose paulatinamente en las casas, así como de su integración con el medio ambiente y la necesidad de pensar el problema de las llamadas *viviendas sostenibles*.

los distintos equipos e instalaciones domésticas que conforman la vivienda (es decir, la calefacción, el aire acondicionado, la iluminación, etc.). (Huidobro y Millán, 2010, p. 10)

La domotización de una vivienda o edificio es la incorporación de diferentes dispositivos que permitan la interconexión entre ellos y las redes que se encuentren dentro o fuera del hogar. Para lograr una conexión eficaz de todo el sistema domótico, se requiere de una pasarela residencial (*residential gateway*), una unidad central o sistema de control centralizado, sensores, actuadores e interruptores, y, claro está, de los llamados electrodomésticos inteligentes.

Ahora bien, no se trata solamente de utilizar estos elementos, pues es necesario tener conocimientos en cableado estructurado, así como en redes eléctricas e inalámbricas, para garantizar la cobertura que hoy en día exigen los hogares. Las redes inalámbricas (*wifi*, *bluetooth*, *infrarrojo*, entre otras) facilitan la interconexión entre los diferentes dispositivos de una casa domotizada, tales como los sistemas de entretenimiento (televisores), de datos (computadores, impresoras, cámaras digitales) y sistemas de control (cámaras de seguridad).

**Figura 2.** Pasarela residencial UC-7410-LX Plus, de Moxa

Fuente: Moxa (2014, p. 1)

### **Componentes de la pasarela residencial**

Los puertos físicos generan la conexión entre las diferentes redes internas y externas. Entre las internas se encuentran la red de datos, la red de control y la red de multimedia. La pasarela debe ser capaz de gestionar las redes internas, así como detectar y resolver errores en su programación. A diferencia de la gestión de las redes internas, la pasarela también tiene la misión de gestionar y controlar todos los sensores y actuadores de la casa. No obstante, en algunos casos se requiere de un control centralizado para que los dispositivos tengan una señal que les permita actuar de forma adecuada con los gustos del usuario o ante alguna eventualidad del sistema.

Por ejemplo, con una gestión de servicios internos, realizada principalmente para el sistema de televisión y radio, se pueden proteger los derechos de autor o propiedad intelectual. La pasarela debe operar amparada en todos los protocolos de comunicación, con el fin de conectarse correctamente con los dispositivos seleccionados para el hogar o edificio.

Con respecto al acceso y la privacidad, la pasarela debe tener un control sofisticado que no deje entrar intrusos al sistema; Para ello, dispondrá de claves de seguridad e IP fijas que únicamente conocerá el usuario. No obstante, la pasarela habrá de establecer una conexión adecuada con un computador personal que tenga un sistema operativo en el cual se pueda instalar su *software* (preferiblemente interactivo) para su respectiva gestión, configuración y corrección de fallos.

Según sea el caso, se tendrá o no un computador para la comunicación con la pasarela. Hay otros dispositivos que se ofrecen como una interfaz *web pad*, que establecerá la comunicación que se requiere; también, dado el auge de la tecnología, se puede realizar una conexión al televisor. Además, una simple aplicación en un *smartphone* o *tablet* puede realizar una conexión correcta con el dispositivo de control.

## Sistema de control centralizado

El sistema de control centralizado es el elemento encargado de recoger toda la información proporcionada por los sensores distribuidos en los distintos puntos de control de la vivienda o edificio inteligente, procesarla, y generar las órdenes que ejecutarán los actuadores e interruptores. (Huidobro y Millán, 2004, p. 70)

Los sistemas de control centralizados ya han sido utilizados anteriormente para el control de sistemas de alarma y sistemas de iluminación, apagado y encendido de algunos dispositivos electrónicos. Si, tal como ya se vio, la pasarela realiza la conexión y el envío de datos a los diferentes dispositivos, ¿por qué la unidad y la

pasarela no pueden ser una sola? La respuesta es simple y tiene que ver con el hecho de que la pasarela no puede hacer todo el proceso de gestión y procesamiento de datos o señales emitidas por los diferentes dispositivos actuadores en el hogar, ya que algunos dispositivos funcionan con diferentes protocolos de control –como la tecnología que fue pionera en la domótica y que aún se utiliza con gran éxito, el protocolo X-10 (que será retomado más adelante)–. Así, la pasarela genera una comunicación externa e interna pero el sistema centralizado controla la mayoría de dispositivos conectados en las diferentes redes internas.

### Instalación del sistema de control centralizado

Para la instalación de un sistema domótico hay que tener en cuenta el diseño arquitectónico de los hogares o edificios. Según Huidobro y Millán

(2004), existen dos tipos de arquitecturas de control ideales, bien sean de tipo físico o lógico: la centralizada y la distribuida.

**Figura 3.** Control centralizado con sensores y actuadores



La centralizada es aquella que, a nivel físico, tiene forma de estrella: el sistema de control se ubica en el centro, y los sensores y actuadores en los extremos. No se comunican directamente entre sí, sino que deben pasar primero por el sistema de control. Por su parte, la distribuida, a nivel físico, es una arquitectura en forma de bus en el que se conectan todos los dispositivos. Se puede decir que, para obtener una mayor eficiencia del sistema, resulta mejor la arquitectura distribuida por su mayor flexibilidad para ajustarse en una casa o edificio. No obstante, desde el punto de vista lógico (distribución de las comunicaciones), la arquitectura centralizada es la más adecuada.

## Sensores

En un sistema domótico, la utilización de sensores es esencial para las diferentes funciones o automatismos que se desean implementar en el hogar o los edificios. Los sensores más utilizados son los de temperatura, humedad, de escape de gas o de agua, de proximidad, infrarrojos y de humo. No obstante, los sensores no determinan la acción a tomar en caso de detectar alguna anomalía, ya que este proceso pasa por la unidad centralizada de control y esta (según su

## Electrodomésticos inteligentes

Hoy en día ya se encuentran en el mercado algunos electrodomésticos que realizan funciones avanzadas para el confort (como algunas neveras, hornos y televisores). El sistema domótico o red deberá tener la capacidad de conectar y comunicarse con estos dispositivos. Lo ideal es garantizar la comunicación entre unos y otros, así como la capacidad de manejo desde una plataforma web, aplicación móvil o a través de

Con estas arquitecturas, la interfaz con el usuario puede cambiar de una a otra; es decir, se puede tener una interfaz local desde la cual gestionar el sistema domótico al manipular la unidad central de control. También es posible tener una interfaz de voz, bien sea local o a través de la red telefónica (local o móvil), a la que se integre la interfaz por mensajes de texto (método poco usado), o una interfaz web, bien sea desde un acceso remoto (ingreso mediante una IP fija al sistema, con clave de seguridad e identificación), desde un computador o desde el celular con plan de datos –lo que permite acceder desde cualquier parte del mundo y la posibilidad de trabajar con video en streaming–.

programación) determina la acción o correctivo a realizar, ya sea una simple alarma (por ejemplo, en el caso de intrusos en la casa) o la activación de válvulas (en caso de escape de agua o gas), que reciben el nombre de *actuadores*. Son aquellos que realizarán el proceso para el cual fueron programados con anterioridad. Estos dispositivos serán controlados por el sistema de control centralizado y dependerán únicamente de este para su funcionamiento.

comandos de reconocimiento de voz y de rostro (como en el caso de acceso a áreas restringidas o a una red de datos).

Uno de los ejemplos más prácticos que hay de electrodomésticos inteligente es la nevera. Con el pasar del tiempo, esta ha ido evolucionando en su diseño y sus utilidades. Ahora la nevera no solamente tiene la capacidad de almacenar

y mantener el estado de los alimentos, sino que puede proporcionar al usuario la receta más adecuada dependiendo de lo que haya dentro de ella. También brinda la posibilidad de navegación por internet y la compra de alimentos sin salir de casa. Sin embargo, la función fundamental de estos electrodomésticos inteligentes no es la posibilidad de navegar o brindar la receta adecuada; es más, ni siquiera lo es el hecho de tener el ambiente propicio para nuestros alimentos. Se trata del ahorro energético. En esencia, cada día nos acercamos a electrodomésticos más amigables con el medio ambiente sin que esto mengue su integración en la casa del futuro, una que, al mismo tiempo, se vinculará a la naturaleza con un mínimo de contaminación.

De otro lado, la aplicación de la domótica también se refleja en los sistemas operativos cerrados, los cuales tienen beneficios únicamente para usuarios finales –por usuario final entendemos la persona que utilizará el sistema sin necesidad de modificar su código base–. Esto quiere decir que la domótica y sus diferentes aplicaciones están al servicio del ser humano sin que este tenga que reprogramar cuando se instala un nuevo dispositivo de control o sensor con su respectivo actuador. El éxito de tal sistema de usuario final se evidencia en la seguridad, comodidad, confort, comunicación y ocio, elementos que, en conjunto, demuestran el buen funcionamiento de la integración de todo el sistema domótico en un edificio o casa.

Figura 4. Pantalla interactiva de una nevera



Fuente: Electrolux (2010, s. p.)

## Redes internas

Como ya se ha referenciado anteriormente, las redes internas son las que permiten hacer la conexión de todos los dispositivos domóticos con la ayuda un sistema de control centralizado y una pasarela residencial, que conecta con las redes externas. Es esencial tener en cuenta que el cableado estructural de la red interna depende

de la necesidad o del tipo de red que se requiera (de datos, multimedia, de control). Esta última, a su vez, precisará de un cableado específico para la correcta transmisión de datos o señales.

La red de datos será capaz de brindar la navegación en internet, así como la interconexión con

los diferentes dispositivos (como computadores e impresoras), y permitirá la comunicación telefónica y de elementos informáticos. Por su parte, la red multimedia permitirá la conexión entre los diferentes dispositivos multimedia (televisores, radios, teatro en casa, etc.) desde cualquier lugar de la casa –todo un aliciente para el ocio y el confort–. Finalmente, la red de control será el medio por el cual los sensores se comunicarán con el sistema de control centralizado. Este, a su vez, se comunicará con los actuadores para realizar una función específica.

De seguro, las anotaciones anteriores llevan a considerar la cantidad de cableado que habría

que instalar en un hogar o edificio; no obstante, es preciso recordar que la red multimedia y la red de datos pueden convertirse en una sola red. Así mismo, la red de control (pues ya algunos dispositivos tienen puertos de conexión RJ45) hace más fácil la transmisión de datos, en este caso, las cámaras de seguridad por IP, que facilitan la conexión con la red de datos y la red multimedia. Lo ideal es que en todos los puntos de la casa se cuente con estas conexiones. En todo caso, la integración de las redes determina el costo del sistema por la simplificación del sistema y la interconexión de los dispositivos domóticos.

### Red de datos

Como se señaló anteriormente, la red de datos será capaz de interconectar los dispositivos informáticos no solamente con una estructura

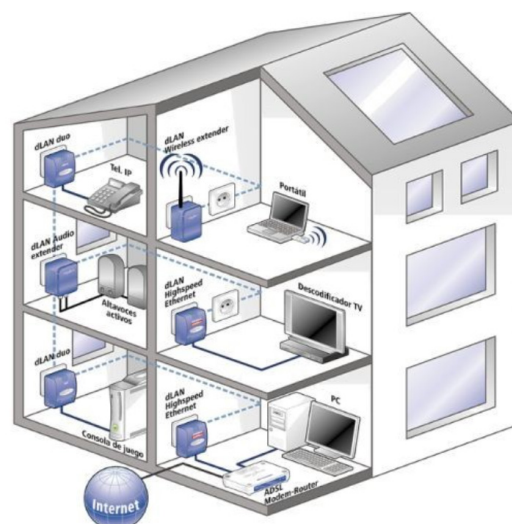
física (cableado), sino con una estructura inalámbrica (wifi, bluetooth, etc.).

### Red multimedia

La red multimedia integra los dispositivos que hacen parte del ocio en la vivienda domótica, tales como televisores, radios, teatros en casa, decodificadores de TV, de sonido, etc. Esta red

permite la interacción con el sistema domótico, el cual puede avisar desde el televisor qué está sucediendo con los demás dispositivos de la casa.

Figura 5. Sistema de la red de datos



Para un funcionamiento correcto, es necesario contar con dispositivos que cumplan con los estándares de compresión digital (de imagen y sonido) que son proporcionados por reproductores de audio, cámaras digitales, DVD, y la inclusión de dispositivos que reciban información como PC o TV digitales. Actualmente, la mayoría de dispositivos tienen una interconexión por medios inalámbricos, hecho que facilita su configuración y posterior manipulación. Hoy se puede

### **Red de control**

La red de control tiene a cargo los dispositivos domóticos tales como sensores y actuadores, cuya función principal es controlar y automatizar la vivienda o el edificio. Además, esta integra electrodomésticos inteligentes, por lo tanto, no requiere de un ancho de banda tan grande como la red de multimedia o la red de datos. La estructura de la red de control es centralizada. Para que un actuador ejerza alguna acción deberá esperar la señal del sistema de control centralizado y este, a su vez, esperará la señal del sensor de la zona específica de trabajo.

El protocolo que se maneja en esta red, que es el más antiguo y que aún se utiliza para la aplicación de sistemas domóticos, es el protocolo X-10, creado en los años setenta por la empresa Pico Electronics. Este utiliza la red eléctrica existente en las viviendas o edificios y envía datos a través de ella para controlar diferentes dispositivos. Esta tecnología sigue usándose por su bajo costo y por la comodidad de no tener que utilizar más cableado si se requiere de un sistema robusto.

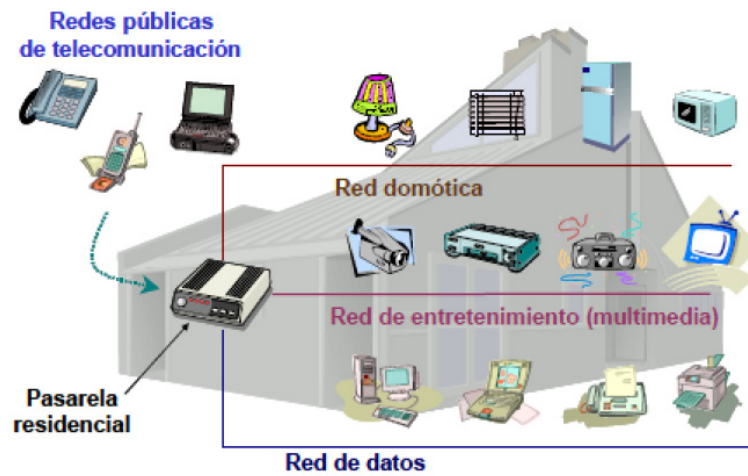
referenciar, por ejemplo, la integración de dispositivos de Apple que acoge desde portátiles, reproductores de música, pasando por *tablets* y teléfonos móviles, hasta TV digitales que cuentan con sistema UPnP (*universal plug and play*), esto es, que no requieren de conexiones físicas. Para una casa o edificio ya construido esto resulta esencial, pues reduce los costos de la instalación de un sistema domótico con red multimedia.

El funcionamiento del protocolo X-10 es sencillo, ya que se sincroniza fácilmente con la señal de la onda sinusoidal de la red eléctrica (que normalmente es entre 50 hz y 60 hz): espera el cruce por cero (0) de esta y envía una ráfaga de señales pequeñas de 0,5 W con una frecuencia de 120 khz, con lo que obtiene un 1 o 0 en sistema binario. Se requieren 11 ciclos de la corriente alterna para generar 11 bits, transmisión necesaria para activar, o no, un dispositivo X-10. Estos se identifican con un código de inicio de dos (2) ciclos, un código de casa de cuatro (4) ciclos y un código numérico o función de cinco (5) ciclos. Este último determinará la función que se necesita para el dispositivo conectado en él.

Los dispositivos X-10 han ido evolucionando con el paso del tiempo: hoy en día se pueden conectar hasta 256 dispositivos en una red de control manejada por una unidad de control centralizada X-10. Existen otros protocolos de control para la implementación en sistemas domóticos que se asemejan al protocolo de mayor penetración en el mundo, ya anteriormente nombrado.



Figura 6. Pasarela residencial y redes internas



Fuente: Millán (2004, p. 98)

## Integración con ambientes naturales

Hoy en día, la preocupación que tiene los países por el medio ambiente se ha enfocado en la postulación de cientos de soluciones amigables con la naturaleza. Por ejemplo, se habla de viviendas sostenibles, que sean adaptables al medio ambiente y que contribuyan al ahorro energético de una ciudad (CEDOM, 2008). La adaptación de la domótica forma parte esencial de esta propuesta de viviendas, pues participará activamente en la optimización del uso de los recursos energéticos, los materiales de construcción, la conservación de la naturaleza y el reciclaje. Así, esa búsqueda de un manejo adecuado de los recursos pasa por automatizaciones cada vez más amigables con el medio ambiente, la elección de materiales correctos para la construcción, el uso de pinturas ecológicas y la implementación de técnicas para el aprovechamiento de energías renovables.

Hay viviendas con paneles solares en el tejado que son capaces de obtener la energía para el sostenimiento de la casa. Hay viviendas que

utilizan las aguas lluvias para el riego automático de las plantas o la limpieza del inodoro. Otras utilizan el viento para generar energía eólica y así proporcionar la electricidad que requiere el sistema de iluminación exterior e interior de la vivienda. Idealmente, en el futuro las viviendas deberán ser capaces de producir la energía necesaria para su funcionamiento sin generar residuos, con el fin integrarse apropiadamente con la naturaleza. En este sentido, la responsabilidad no corre únicamente por cuenta de la tecnología; la arquitectura también cumple un papel importante para lograr que las viviendas o edificios se adapten al entorno natural.

Actualmente, la domótica se aplica muy poco en viviendas sostenibles, ya que su alto costo hace que muy pocos puedan disponer de un hogar dotado con dicha tecnología. Sin embargo, la promoción de las ciudades sostenibles podría facilitar el desarrollo y la integración de las viviendas con el ambiente, lo cual permitiría que los

costos se redujeran en la construcción a gran escala. En este escenario, la domótica desarrollará una función importante en la adaptación e integración de las estructuras humanas con los ambientes naturales, pues será una de las garantes de que estas se tornen amigables y beneficiosas tanto para el ser humano como para el entorno.

Solo el ser humano tiene la responsabilidad y la capacidad de diseñar artefactos que estén en armonía con el planeta y la naturaleza. Así como fue el gestor de los artefactos que durante tanto tiempo los han destruido, hoy se enfrenta a la tarea dual de diseñar para la vida y el confort. De seguro, la domótica hará parte importante de esta nueva y necesaria revolución humana.

## Referencias

- Asociación Española de Domótica (CEDOM). (2008). *Cómo ahorrar energía instalando domótica en su vivienda: gane en confort y seguridad*. Barcelona: Aenor Ediciones.
- Domínguez, H. y Sáez, F. (2006). *Domótica: un enfoque sociotécnico*. España: Fundación Rogelio Segovia.
- Electrolux. (2010). *Electrolux revoluciona la cocina con el I-Kitchen, primer frigorífico interactivo de pantalla táctil*. Recuperado de <https://bit.ly/3biz09b>
- Huidobro, J. y Millán, R. (2004). *Domótica. Edificios inteligentes*. Ciudad de México: Limusa.
- Huidobro, J., Millán, R. (2010). *Manual de domótica*. Madrid: Creaciones Copyright.
- Le Corbusier. (1998). *Hacia una arquitectura. Primera reimpresión en español*. Barcelona: Ediciones Apóstrofe.
- Millán, R. (2004). Dispositivos de la vivienda domótica. *Manual Informativo Acta*, 32, 97-101. Recuperado de <https://bit.ly/2QH7Uz4>
- Moxa. (2014). *UC-7410-LX Plus, RISC-based ready-to-run computer with 8 serial ports, dual LANs, USB [manual]*. Recuperado de <https://bit.ly/32LkXVP>
- Rodríguez, P. (2013). Redes PLC (I): ¿Qué son y para qué sirven? [entrada de blog]. *Xalaka: Smart Home*. Recuperado de <https://bit.ly/3i2YjPn>
- Romero, C., Vázquez, F. y Castro, C. de. (2011). *Domótica e inmótica. Viviendas y edificios inteligentes*. Ciudad de México: Alfaomega.
- Rybczynski, W. (1989). *La casa: historia de una idea*. Madrid: Nerea.
- Telefónica (2003): *Libro blanco del hogar digital y las infraestructuras comunes de telecomunicaciones*. Madrid: Telefónica.

# Aplicación de sistemas programables para los sistemas computacionales y robóticos *animatronics*

*Jeison Andrés Orjuela Parra\**

## Resumen

En este artículo se presentan los resultados obtenidos durante el desarrollo de un sistema que, al reunir diversos componentes tecnológicos, es capaz de generar movimientos articulares similares a los realizados por el cuerpo humano. A su vez, el documento versará sobre la integración de protocolos de comunicación cuya función es controlar remotamente dicho sistema y, aún más, sobre el proceso de incorporación de diferentes unidades electrónicas que dotarían al sistema de robustez tal que lo harían análogo a uno industrial. También tocará el asunto de la implementación de metodologías capaces de adaptarse al diseño estructural mediante componentes gráficos, análisis de comportamientos y simulación mediante aplicaciones virtuales o matemáticas. Dispuesto así, a lo largo de este texto se intentará evidenciar la importancia de la sinergia de diferentes disciplinas del conocimiento, su utilidad, su evaluación y su necesidad comercial en la construcción de *animatronics*, a saber, robots capaces de simular movimientos de la naturaleza que se están incorporando paulatinamente en el mundo contemporáneo.

**Palabras clave:** amplificación, control análogo, fpga, programación, robótica, sistema Scada

## Abstract

This article presents the results obtained during the development of a system that, by bringing together various technological components, is capable of generating joint movements similar to those carried out by the human body. In turn, the document will deal with the integration of communication protocols whose function is to remotely control that system and, even more so, on the process of incorporating different electronic units that would endow the system with robustness such that they would make it analogous to an industrial one. It will also address the issue of the implementation of methodologies capable of adapting to structural design through graphic components, behavioral analysis and simulation through virtual or mathematical applications. Throughout this text, I will try to show the importance of the synergy of different disciplines of knowledge, their usefulness, their evaluation and their commercial need in the construction of animatronics, robots capable of simulating movements of nature that are gradually being incorporated into the contemporary world.

**Keywords:** Amplification, Analog Control, fpga, Programming, Robotic, Scada System

\* Estudiante de Ingeniería Electrónica de la Corporación Unificada Nacional de Educación Superior (cun). Contacto: jeison.orjuela@cun.edu.co

## Introducción

Con el objetivo de establecer la sinergia de diferentes componentes electrónicos y su aplicabilidad en el sector industrial, se realiza la adaptación e incorporación de diversas disciplinas y conocimientos proporcionados por la ciencia computacional, la electricidad y especialmente la electrónica, en la construcción de un robot animado denominado *animatronic* (término usado por las industrias de automatización, producción visual y de efectos especiales). Este será el objeto de estudio de la presente disertación. En esencia, la finalidad es evaluar y analizar los diferentes sistemas que lo integran. Dispuesto así, este proyecto, de un lado, denota el seguimiento a la continuidad de competencias de cada asignatura cursada por separado en la academia, y, de otro, busca adaptarlas y ponerlas en diálogo entre sí en función de un macroproyecto.

Para ello, se mostrará el paso a paso que requiere la elaboración de una máquina animada: diseño de modelamiento gráfico y mecánico; estudio de su comportamiento físico y electrónico; aplicación de los conceptos de programación; uso de sistemas programables (como tarjetas FPGA, microcontroladores, tarjetas comerciales Arduino, PSoC, entre otros elementos); su sincronización para el control de mecanismos, y ajuste de la conectividad de los diversos protocolos de comunicación convencional. Esto permitirá comprender los comportamientos esperados del sistema robótico a la luz de las necesidades planteadas y especialmente ante los retos que conllevó la

inclusión de cada dispositivo, su ensamble y, aún más, garantizar su correcto funcionamiento.

Respecto al *animatronic* presentado en este artículo, es importante mencionar que no solo pretende simular el comportamiento humano, sino también el entorno que lo rodea. Un ejemplo claro que ilustra los logros alcanzados por la robótica son los parques temáticos a nivel mundial, pero, en especial, los de Orlando (Florida), entre ellos, Magic Kingdom, Epcot, Busch Gardens, SeaWorld, etc. Ahora, dos atracciones muy significativas por su extendido uso de *animatronics* que simulan movimientos humanos son A Small World, en Magic Kingdom, y Jurassic Park, en Universal Studios.

Amparado en la guía de autores representativos en la materia como Ollero (2001) o Balcells (1999), en este proyecto se implementaron técnicas de control de diferentes elementos mecánicos a través de la electrónica y la programación, pero aún se deben enfrentar problemas como la falta de un control comercial del sistema de potencia, pues el sistema actualmente implementado no cuenta con un control automático del consumo energético. Con respecto a los sensores y actuadores que regulan el comportamiento del *animatronic*, aún presenta falencias en su estructura física, faltan elementos mecánicos que compongan un rostro con rasgos más humanos, y no cuenta con un sistema de inteligencia artificial por lo que todos sus movimientos son controlados por un operador.

## Formulación del problema

El presente trabajo pretende responder y aportar información a la comunidad académica en relación a la siguiente pregunta: ¿cómo realizar un mecanismo robótico que use sistemas de lógica computacional para el control de dispositivos electro-mecánicos que simulen el cuerpo humano? La pregunta de investigación planteada invita a relacionar los elementos programables disponibles en el mercado convencional, en particular, aquellos que maximizan la funcionalidad y coadyuvan en un sin fin de utilidades. Por

eso, es importante conocer la implementación de cada uno, así como evaluar su desempeño y alcances. Por otra parte, el presente trabajo evidenciará la posibilidad de articular diferentes dispositivos electrónicos en un sistema que permita el desarrollo de una maquina compuesta por diversos elementos mecánicos entrelazados. De esta manera, se mostrará la semejanza con el cuerpo humano y su aplicación a nivel industrial.

## Marco teórico

### *Historia de la animatrónica*

El primer registro que se tiene en la historia de un *animatronic* aparece en 1515: el león autómatas de Leonardo Da Vinci, construido para facilitar las conversaciones de paz entre el rey de Francia y el papa León X. El animal, mediante diversos mecanismos, anduvo de una habitación a otra, hasta donde se encontraba el monarca. Abrió su pecho y todos pudieron comprobar que estaba lleno de lirios y otras flores que representaban un antiguo símbolo de Florencia (el león) y la flor de lis que Luis XII regaló a la ciudad como señal de amistad.

Se dice que la animatrónica fue desarrollada por Walt Disney en los sesenta. El término abreviado fue acuñado originalmente de los *audio-animatronics* de Walt Disney, que luego fue usado para describir a los personajes mecanizados. Algunos ejemplos de los animatrónicos de Disney se encuentran en The Hall of Presidents y en Disneyland. En la feria mundial realizada en Nueva York en 1964, la Disney Company presentó una marioneta del presidente Lincoln cuyo cuerpo,

lenguaje y el movimiento facial cazaban perfectamente con el audio (Hamilton, 1998).

Un hombre clave en la historia de la animatrónica fue el estadounidense Stan Winston, quien empezó su carrera como maquillador para la Disney Company en el año de 1969. Allí aprendió el oficio de la animatrónica. En 1970 se independizó y formó su propia compañía: Stan Winston Studios. Desde entonces se convirtió en protagonista, tras bambalinas, de los efectos especiales más famosos en la historia cinematográfica; es el responsable de los efectos y animatrónicos de la saga *Terminator* (I, II y III) *Alien* (I y II), *Depredador* (I y II), *Jurassic Park* (I, II y un poco en la parte III) y dio vida al oso Teddy en la película *Inteligencia artificial*. A pesar de su fallecimiento en el año 2008, su equipo ha continuado su legado y, de la mano de los avances en técnicas de control y nuevos materiales, ha mantenido su lugar privilegiado con sus animatrónicos en el mundo del espectáculo.

Desde 1977 hasta la actualidad, la empresa californiana Garner Holt Productions INC18 ha fabricado más de 3000 figuras animatrónicas para parques temáticos y museos alrededor del mundo. Sus figuras animatrónicas toman la forma de personajes de caricaturas, personas y animales. Actualmente, su proceso de producción comienza con el diseño tridimensional en Solid Works: escultores especializados con imágenes detalladas se encargan de que el animatrónico se lo más parecido al referente real; logran su funcionamiento mediante sistemas neumáticos, hidráulicos y electrónicos que actúan como

### **Aplicación de la animatrónica**

La principal utilidad de la animatrónica se evidencia en el campo de la cinematografía y los efectos especiales, aunque también se emplea con frecuencia en los parques temáticos y en otras ramas de la industria del entretenimiento. Su principal ventaja respecto a las imágenes generadas por ordenador o la técnica de *stop motion* es que no consiste en una simulación de la realidad, sino que presenta ante la cámara objetos auténticos que se mueven en tiempo real. Con los años, la tecnología que da soporte a la animatrónica se ha ido haciendo más y más compleja, hecho que ha posibilitado la construcción de marionetas cada vez más realistas y aparentemente vivas.

Los muñecos animatrónicos se emplean en cine y televisión para representar personajes que no existen en el mundo real o que están en situaciones de riesgo, así como escenas en las que no

### **Elementos electrónicos. La tarjeta PSoC**

El PSoC (*programmable system-on-chip*) es un sistema que ofrece novedosas capacidades integradas en un solo chip. Estos son fabricados por la

músculos y esqueletos de acero y aluminio; por su parte, los controles computarizados manejan los perfiles de movimiento y sonido.

Hoy por hoy, la animatrónica se ha desarrollado como una carrera que requiere la combinación de talentos en ingeniería mecánica, eléctrica y electrónica; escultura; tecnologías de control; radio control y aerografía. De la mano de la aparición de los efectos digitales, los animatrónicos han hecho parte de la historia cinematográfica.

sería aconsejable el uso de actores o animales, o en las que las acciones a realizar no podrían conseguirse con personas o animales auténticos. La animatrónica de hoy en día emplea dispositivos controlados por ordenador, así como controles por radio o manuales. Los movimientos específicos se consiguen mediante motores eléctricos, cilindros neumáticos o hidráulicos y mecanismos controlados por cable. El tipo de elementos a utilizar se decide en función de los parámetros del personaje, los movimientos concretos que se requieren y las limitaciones del proyecto.

A mediados de los ochenta, se planteó que el uso de robots podría incluirse en las tareas en las que el ser humano asume importantes riesgos o en las que sus capacidades se ven limitadas por factores como la fuerza o la precisión. A estos se les denominó *robots de servicio*.

compañía norteamericana Cypress Semiconductor, con un moderno método de adquisición, procesamiento y control de señales que los dota

de una excelente precisión. Incluyen, además, un arreglo de bloques digitales (UDB) y analógicos que hacen del PSoC una muy buena propuesta para el desarrollo de proyectos de ingeniería, pues le proporcionan al sistema la capacidad de establecer cualquier función, en cualquier terminal del circuito integrado. Son, en resumen, muy versátiles.

Los PSoC emplean una arquitectura configurable para el control del diseño embebido, equivalente a un FP-ASIC (*field programmable application-specific*

### Servomotor SG90

El servomotor SG90 es un servo miniatura de gran calidad y diminutas dimensiones, además es bastante económico. Funciona con la mayoría de tarjetas electrónicas de control con microcontroladores y además con la mayoría de los sistemas de radio control comerciales. Este tipo de servo es ideal para las primeras experiencias de aprendizaje y prácticas con servos, ya que sus requerimientos de energía son bastante bajos y se permite alimentarlo con la misma fuente de alimentación que el circuito de control. (Imperial College, 2016)

### Solución propuesta

En primer lugar, se analizó el comportamiento humano con el fin de realizar un diseño acorde al sistema fisiológico del ser humano. Por lo tanto, con base en trabajos como el de Correa (2007), se realizaron los siguientes pasos para su implementación.

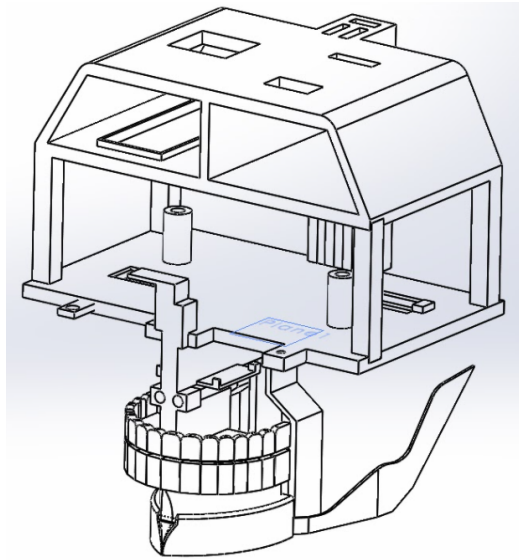
Con el objetivo de realizar un sistema robótico, se planteó desarrollar un sistema capaz de simular

*integrated circuit*) pero con la ventaja del tiempo de implementación. Los dispositivos PSoC integran circuitos digitales y analógicos configurables, controlados por un microcontrolador interno; de modo que proveen tanto una capacidad mejorada para la revisión de los diseños, como la disminución del número de componentes usados. Un solo PSoC puede integrar hasta cien funciones periféricas y ahorrar de esta manera tiempo de diseño, espacio físico y consumo de energía, mientras que mejora la calidad del sistema y reduce su costo (Cypress, 2016).

El objetivo de usar el servo es controlar la posición de la carga mecánica de acuerdo con la posición de referencia mediante un par de potenciómetros que funcionan como un dispositivo de medición de error y convierten las posiciones de entrada  $\theta_r(t)$  y salida  $\theta_c(t)$  en señales eléctricas proporcionales.

La posición angular  $\theta_c(t)$  del potenciómetro de salida genera un potencial eléctrico  $E_c(t)$  que luego alimenta el terminal negativo de un amplificador diferencial dentro del servo para así realizar la comparación con la posición de entrada y cerrar el bucle de control de posición.

el comportamiento humano mediante un rostro humanoide. Este, además, incluiría una parte del sistema cardiaco y torácico. Por otra parte, se elaboró una mano robótica para darle más realismo al *animatronic*. La figura 1 muestra el modelo gráfico empleado para la impresión 3D con ácido poliláctico (PLA, por su sigla en inglés), de los elementos involucrados en el rostro del *animatronic*.

**Figura 1.** Modelo 3D del rostro

Fuente: elaboración propia

Se realizó el modelamiento pensando en las siguientes articulaciones:

1. Ojos: movimiento horizontal y vertical manipulado por protocolo *bluetooth*. Utiliza 2 servomotores SG90 y su control depende de una tarjeta Arduino, así como de una aplicación móvil diseñada por APP Inventor.

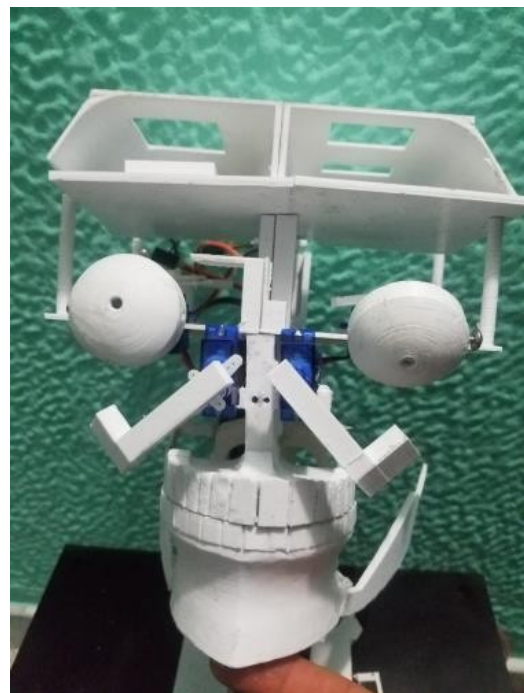
2. Pómulos: los pómulos están controlados por 2 servomotores conectados a la tarjeta FPGA, la cual recibe un pulso microeléctrico adaptado mediante instrumentación industrial para percibir los movimientos del antebrazo humano.

3. Maxilar inferior: el maxilar interior es controlado por un servomotor conectado a un sistema de amplificación y modulado por un micrófono y un circuito 555, el cual controla su apertura mediante PWM, en concordancia con los decibeles captados en el ambiente. Simula el movimiento y gesticulación del habla.

4. Cuello: el cuello está conectado a dos servomotores conectados al controlador Arduino, el cual se comunica vía *bluetooth* mediante una aplicación móvil. Realiza movimientos tanto horizontales como verticales.

5. Párpado: el sistema del párpado está conectado como en los anteriores casos a un servomotor SG90, pero, a diferencia de los demás, su control es independiente y está configurado mediante la tarjeta FPGA, la cual establece dos pulsos en el tiempo (uno con una frecuencia de 20 Hz y otra con una frecuencia de 30 Hz). Cuando se encuentran en el tiempo correcto, generan un pulso o nivel alto relacionado con una señal discreta. Su composición está basada en el uso de las compuertas lógicas (Bouchet, 1979).

La figura 2 muestra los resultados de la implementación de la cabeza del *animatronic*.

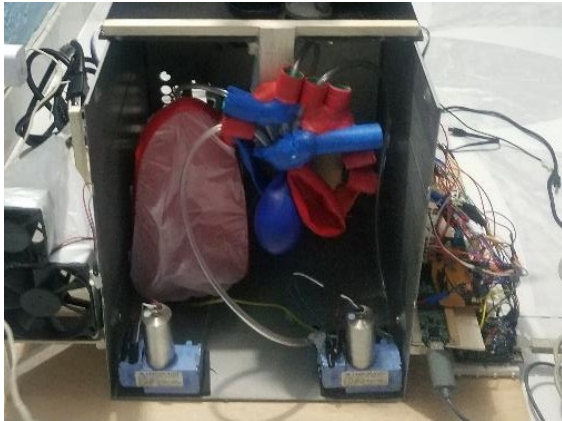
**Figura 2.** Impresión real

Fuente: elaboración propia



6. Corazón: se encuentra visualmente representado en gran tamaño. Es realmente llamativo y simula los procesos cardíacos.

Figura 3. Sistema tórax

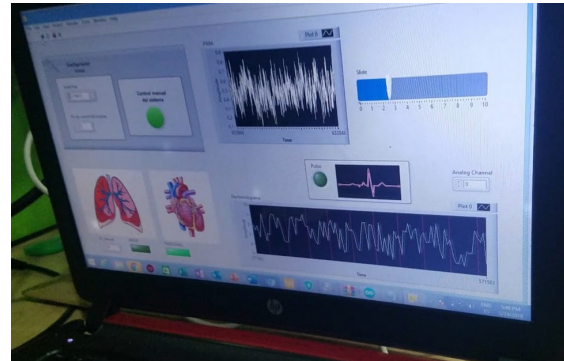


Fuente: elaboración propia

El corazón está controlado mediante dos ciclos en el tiempo a frecuencias diferentes y permite ser controlado, así mismo como la arritmia, mediante un módulo RF. Esto posibilita recibir diferentes pulsos decodificados en la tarjeta FPGA. Este pulso procesado permite generar una salida digital que es enviada a un módulo puente H conectado a dos electroválvulas que simulan el pulso cardíaco. Un sistema similar se encuentra en los ventiladores de 12 v conectados con el pulmón, lo que simula la inhalación y exhalación. La figura 3 muestra la implementación del tórax.

El control se realiza mediante Labview®. Este *software* visualiza un ambiente gráfico en donde se evalúa el comportamiento del sistema conectado, y además de eso genera alarmas dependiendo como esté funcionando.

Figura 4. Interfaz Labview



Fuente: elaboración propia

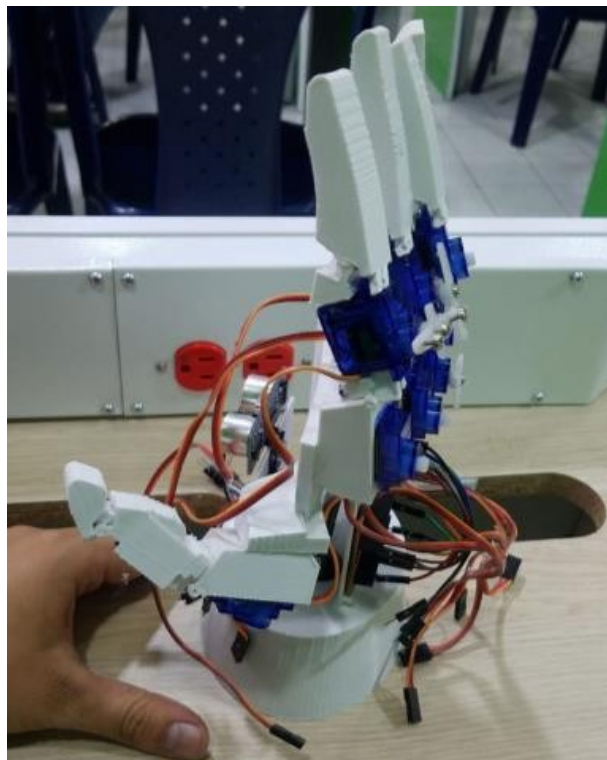
En la figura 4 puede verse el ambiente gráfico disponible para el sistema. Allí se tiene un control mediante PWM del destello de los ojos que controla su luminosidad e incluso el efecto robótico de destello de luz. También se tiene una alarma que evidencia, de color verde, el control cardíaco y el sistema pulmonar. Por otra parte, se tiene una adaptación de la señal mioeléctrica, tomada por el amplificador de instrumentación implementado para la adquisición de señales de pulsos eléctricos corporales, así como la activación o desactivación de emergencia del dispositivo cardíaco y pulmonar, por si presenta alguna falla.

7. Control de seguridad: el sistema de control de seguridad es un teclado matricial de 4x4 conectado a la tarjeta FPGA. Este sistema se encuentra decodificado por esta, lo que permite recibir de manera correcta los números digitados con la salida lógica en el sistema. Por otra parte, el sistema de almacenamiento mediante *flip flop* tipo D almacena una clave mediante programación y permite compararla con la digitada en tiempo real; si la clave es correcta permitirá la activación del sistema, pero, si es equivocada, la tarjeta FPGA informará que es incorrecta mediante el encendido de un testigo de color rojo.

8. Mano robótica: la mano robótica tiene diez servomotores conectados a una tarjeta FPGA, la cual recibe la señal de un microcontrolador que, a su vez, es controlado por un sistema Scada. Este último permite controlar los movimientos de la mano mediante el puerto USB, mientras que

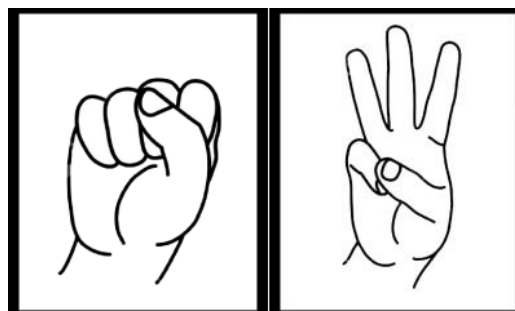
el sistema computacional brinda la posibilidad de controlar los diferentes movimientos posibles (Pérez y Mendoza, 2008). La figura 5 muestra la implementación de la mano pensando en los movimientos de la figura 6.

**Figura 5.** Mano robótica



Fuente: elaboración propia

**Figura 6.** Posibles movimientos de la mano

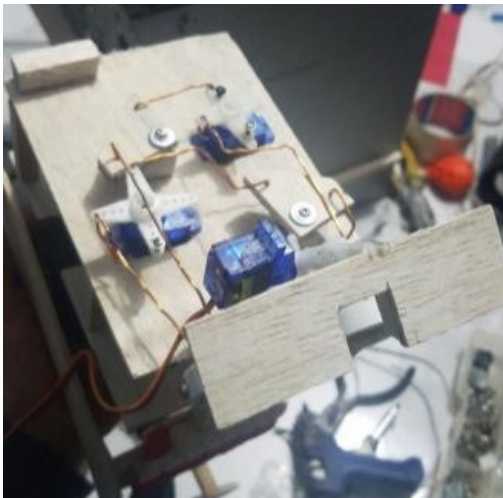


Fuente: elaboración propia

## Pruebas

Una vez construida la estructura física del *animatronic*, se implementó el mecanismo basado en servomotores para controlar la articulación de los ojos (figura 7).

**Figura 7.** Sistema de control de los ojos



Fuente: elaboración propia

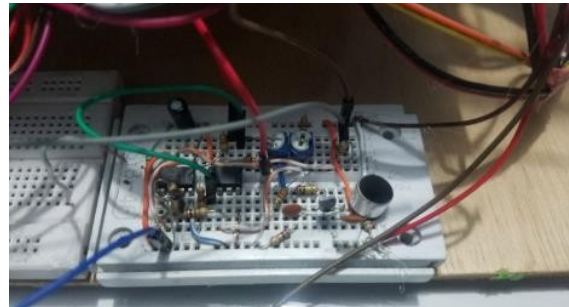
De igual manera, se desarrolló un sistema de control del sistema del puente H conectado a las electro válvulas y los motores DC 12V para el control del tórax, y otro para el control de la mandíbula y la salida de audio (figuras 8 y 9).

**Figura 8.** Control puente H



Fuente: elaboración propia

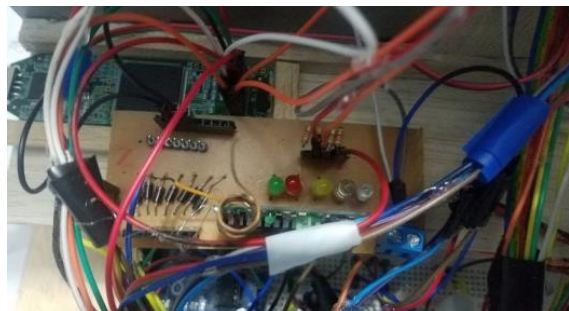
**Figura 9.** Sistema de amplificación para el maxilar inferior



Fuente: elaboración propia

Esto completa el sistema que permite el habla del dispositivo (conectado a un parlante). Este se encuentra asociado a un módulo ISD que permite grabar un sonido y, cada vez que recibe un pulso, lo reproduce para aparentar realismo. Por último, se desarrolló el sistema de control remoto basado en tecnología de radio frecuencia y módulo *bluetooth* (figura 10).

**Figura 10.** Sistema de recepción modulo RF y *bluetooth*



Fuente: elaboración propia

En la fase de pruebas, se evidenció una independencia del robot de hasta 2 metros sin ningún tipo de interferencia en la emisión de las señales por control remoto. Finalmente se integraron todos los sistemas al módulo FPGA (figura 11).

**Figura 11.** Implementación de tarjeta FPGA

Fuente: elaboración propia

Esta tarjeta mostró gran eficiencia en la articulación de los circuitos programados, así como sinergia con otros elementos, y practicidad para la emisión o recepción de señales.

## Conclusiones

Se cumplió el objetivo de realizar un sistema capaz de interactuar con diferentes sistemas lógicos computacionales, para generar diferentes formas de locomoción y con la posibilidad de que sus diferentes mecanismos sean manipulados remotamente.

Se obtuvo respuesta satisfactoria de la sincronización de la tarjeta FPGA y el microcontrolador; un correcto funcionamiento del sistema diseñado en Labview para el monitoreo de sensores y sistemas, y la aplicabilidad de sistema Scada de manera remota, lo que evidenció resultados eficientes. Por otra parte, se obtuvo el correcto

Gracias a las pruebas realizadas podemos determinar que el sistema animatrónico logra cumplir el objetivo, debido a que controla los diferentes mecanismos disponibles en el sistema: mano, pómulos, corazón, ojos, cuello, párpados. Así mismo, se sincroniza mediante la tarjeta Arduino UNO con el *bluetooth* y el módulo RF. Este último recibe los datos emitidos por medio remoto (como aplicación móvil o control RF) y los envía a la tarjeta FPGA para su correcto control. Por otra parte, se sincroniza con los ordenadores a través de un sistema de monitoreo, tipo Scada, capaz de controlarlo enviando señales, analizándolas y controlándolas, incluso remotamente. Para finalizar, el sistema del habla es controlado por los decibeles del ambiente y con las señales mioeléctricas para el control de parpados y otras partes del robot.

ángulo de apertura y cierre de la mano robótica tras ajustarlo con la intención de imitar el movimiento humano. Se demuestra que los protocolos de comunicación como el RF y *bluetooth* reaccionaron eficientemente, lo que permitió tener control inalámbrico del sistema.

Finalmente, se evidenció la aplicabilidad de la tarjeta FPGA para desarrollar el sistema deseado mediante su programación. Se reconoce que la tarjeta de libre desarrollo es de gran utilidad y ofrece ventajas considerables, en contraste con las convencionales que requieren licenciamiento.

---

## Referencias

- Balcells, J. (1999). *Autómatas programables*. Barcelona: Alfaomega.
- Bouchet, C. (1979) *Anatomía de la cara, cabeza y órganos de los sentidos*. Madrid: Editorial Panamericana,
- Correa, D. (2007). *Diseño y construcción de mano animatrónica* [trabajo de grado]. Universidad EAFIT, Medellín, Colombia.
- Cypress Developer Community. (2016). Changing the Target Device (PSoC ® 3/ PSoC 5LP) in PSoC Creator. Recuperado de <https://bit.ly/35cm0kH>
- Hamilton, J. (1998). *Efectos especiales en el cine y la televisión*. Londres: Dorlyng Kindersley Limited.
- Imperial College of London, Department of Electrical and Electronic Engineering. (2016). *Servo Motor SG90 Data Sheet*. Recuperado de <https://bit.ly/3nIkL2Z>
- Ollero, A. (2001). *Robótica, manipuladores y robots móviles*. Barcelona: Alfaomega.
- Pérez, I. y Mendoza, H. (2008). Desarrollo de una mano robótica con capacidad de manipulación. *Telematique. Revista Electrónica de Estudios Telemáticos*, 7(1), 180-207. Recuperado de <https://bit.ly/2F07jGh>

# Modelamiento y simulación del sistema de suspensión activa

*Diana M. Galeano Viasus\**

*Mauricio A. García\*\**

## Resumen

Este artículo detalla las ecuaciones que describen la dinámica del sistema de suspensión activa mediante las expresiones de movimiento de Lagrange. Adicionalmente, se determinan los puntos de operación del sistema y se observa en Simulink la respuesta del modelo obtenido, de acuerdo a variaciones en sus condiciones iniciales.

**Palabras clave:** ecuaciones de estado, Lagrange, puntos de operación, suspensión activa

## Abstract

This paper details the equations that describe the dynamics of the Active Suspension system using Lagrange's motion expressions. Additionally, the operating points of the system are determined, and the response of the obtained model is plotted in Simulink, according to variations in its initial conditions.

**Keywords:** Active Suspension, Equations of state, Lagrange, Operation points

\* Estudiante de Maestría en Ingeniería Electrónica, Pontificia Universidad Javeriana. Contacto: [galeano-d@javeriana.edu.co](mailto:galeano-d@javeriana.edu.co)

\*\* Estudiante de Maestría en Ingeniería Electrónica, Pontificia Universidad Javeriana. Contacto: [mauricio\\_garcia@javeriana.edu.co](mailto:mauricio_garcia@javeriana.edu.co)

## Introducción

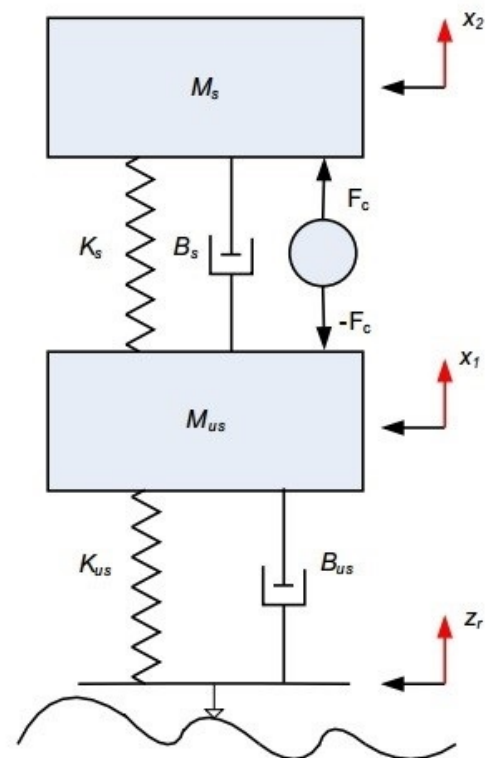
Determinar las ecuaciones que describen la dinámica de un sistema electromecánico permite establecer y simular el comportamiento de un sistema físico. Una de las metodologías usadas para ello es hacer uso de la representación por variables de estado, que surge del análisis del comportamiento mecánico o eléctrico del sistema. Una manera para simplificar ese análisis es hacer uso de las ecuaciones de Lagrange que, a partir de la descripción del sistema con base en su energía potencial y cinética, permiten obtener las ecuaciones de estado simplificando la formulación de las fuerzas inerciales del sistema.

## Procedimiento

Primero, se representa el sistema de suspensión activa a través de un modelo de doble masa-resorte-amortiguador, como el que se muestra en la figura 1. Las entradas del sistema son la posición de la superficie del camino  $z_r(t)$  y el comando de control  $F_c$  (fuerza de control que se ejerce sobre la carrocería y la llanta para contrarrestar la vibración causada por la superficie). Las coordenadas generalizadas del sistema son: el desplazamiento de la carrocería del vehículo  $x_2(t)$  (masa suspendida en el modelo de cuarto de carro) y el desplazamiento de la llanta  $x_1(t)$  (masa no suspendida en el modelo de cuarto de carro), todas ellas referenciadas respecto a tierra, de acuerdo con lo especificado en el manual de Quanser (2010a).

El sistema electromecánico de suspensión activa es un sistema lineal que puede ser analizado mediante el modelo de cuarto de carro (Quanser, 2010b). Dicho modelo permite establecer el comportamiento del sistema alrededor de los puntos de operación (análisis local) mediante los puntos de equilibrio. Este artículo presenta el análisis teórico realizado al sistema de suspensión activa de Quanser, con el fin de obtener su representación en variables de estado, definir sus puntos de operación y simular el comportamiento del sistema.

Figura 1. Modelo de doble masa-resorte-amortiguador



Fuente: (Quanser, 2010, s. p.)

Después de lo anterior, para la formulación de Lagrange, el sistema es analizado en función de su energía cinética y energía potencial (Zak, 2003), cuyas expresiones están definidas de forma general en las ecuaciones 1 hasta la 3.

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2$$

Ecuación 1. Energía cinética, en donde  $m$  es la masa y  $v$  es la velocidad

$$E_p = mgh$$

Ecuación 2. Energía potencial gravitatoria, donde  $m$  es masa,  $g$  gravedad y  $h$  altura

$$E_c = \frac{1}{2}kx^2$$

Ecuación 3. Energía potencial elástica, donde  $k$  es la constante elástica del resorte y  $x$  el desplazamiento, o posición, del resorte

Como existen dos coordenadas, es necesario determinar la energía potencial y cinética para cada una de ellas. Así, se define la energía cinética para las coordenadas generalizadas  $x_2$  y  $x_1$ , a través de la ecuación 4; y la energía potencial para dichas coordenadas, según la ecuación 5.

$$T_2 = \frac{1}{2}M_s(\dot{x}_2)^2$$

$$T_1 = \frac{1}{2}M_{us}(\dot{x}_1)^2$$

Ecuación 4. Expresiones para definir la energía cinética

$$U_2 = \frac{1}{2}k_s(x_2 - x_1)^2 + M_s g x_2$$

$$U_1 = \frac{1}{2}k_{us}(x_1 - z_r)^2 + M_{us} g x_1$$

Ecuación 5. Expresiones para definir la energía potencial

Luego, de acuerdo a la formulación de Lagrange, el lagrangiano del sistema es  $L = T - U$ , donde  $T = T_1 + T_2$  y  $U = U_1 + U_2$ . En ese sentido, el lagrangiano se obtiene mediante la ecuación 6.

$$T = \frac{1}{2}M_s(\dot{x}_2)^2 + \frac{1}{2}M_{us}(\dot{x}_1)^2$$

$$U = \frac{1}{2}k_s(x_2 - x_1)^2 + M_s g x_2 +$$

$$+ \frac{1}{2}k_{us}(x_1 - z_r)^2 + M_{us} g x_1$$

$$L = \frac{1}{2}M_s(\dot{x}_2)^2 + \frac{1}{2}M_{us}(\dot{x}_1)^2 +$$

$$- \frac{1}{2}k_s(x_2 - x_1)^2 - M_s g x_2 +$$

Ecuación 6. Formulación del lagrangiano

Adicionalmente, debido a que el sistema cuenta con elementos que disipan energía (amortiguadores viscosos), es necesario plantear la función de disipación de Rayleigh ( $D$ ) para las coordenadas generalizadas  $x_2$  y  $x_1$  (Ogata, 1987), mediante la ecuación 7.

$$D = \frac{1}{2}B_s(\dot{x}_2 - \dot{x}_1)^2 + \frac{1}{2}B_{us}(\dot{z}_r - \dot{x}_1)^2$$

Ecuación 7. Disipación de Rayleigh



Así, a partir del lagrangiano del sistema y la función de disipación de Rayleigh, se calculan las expresiones de Lagrange para el sistema no conservativo, según la ecuación 8.

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{x}_1} \right) - \frac{\partial L}{\partial x_1} + \frac{\partial D}{\partial \dot{x}_1} = F_{NC} x_1$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{x}_2} \right) - \frac{\partial L}{\partial x_2} + \frac{\partial D}{\partial \dot{x}_2} = F_{NC} x_2$$

Ecuación 8. Expresiones para calcular el lagrangiano

Ahora, aplicando las ecuaciones 8 y 9, se desarrollan las expresiones detalladas en la ecuación 7.

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{x}_1} = M_{us}(\dot{x}_1)$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{x}_1} \right) = M_{us}(\ddot{x}_1)$$

$$\frac{\partial L}{\partial x_1} = k_s(x_2 - x_1) +$$

$$-k_{us}(x_1 - z_r) - M_{us}g$$

$$\frac{\partial D}{\partial \dot{x}_1} = -B_s(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) - B_{us}(\dot{z}_r - \dot{x}_1)$$

$$-F_C = M_{us}(\ddot{x}_1) - k_s(x_2 - x_1) +$$

$$+k_{us}(x_1 - z_r) + M_{us}g +$$

$$-B_s(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) - B_{us}(\dot{z}_r - \dot{x}_1)$$

Ecuación 9. Desarrollo de la expresión  $F_{NC} x_i$ , detallada en la ecuación 7

Finalmente, seleccionando las variables de estado como se indica en la ecuación 10 (Bay, 1998), las expresiones finales de las ecuaciones 8 y 9 pueden reescribirse en función de dichas

variables de estado, tal como se detalla en las ecuaciones 11 y 12, respectivamente.

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{x}_2} = M_s(\dot{x}_2)$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{x}_2} \right) = M_s(\ddot{x}_2)$$

$$\frac{\partial L}{\partial x_2} = -k_s(x_2 - x_1) - M_s g$$

$$\frac{\partial D}{\partial \dot{x}_1} = B_s(\dot{x}_2 - \dot{x}_1)$$

$$F_C = M_s(\ddot{x}_2) + k_s(x_2 - x_1) +$$

$$+M_s g + B_s(\dot{x}_2 - \dot{x}_1)$$

Ecuación 10. Desarrollo de la expresión  $F_{NC} x_2$ , detallada en la ecuación 7

$$x_3 = x_2 - x_1 \quad x_4 = \dot{x}_2$$

$$x_5 = x_1 - z_r \quad x_6 = \dot{x}_1$$

Ecuación 11. Variables de estado

$$-F_C = M_{us}(\dot{x}_6) - k_s(x_3) +$$

$$+k_{us}(x_5) + M_{us}g +$$

$$-B_s(x_4 - x_6) - B_{us}(\dot{z}_r - x_6)$$

Ecuación 12. Reescritura de la expresión final en la ecuación 8

Reescribiendo todo el sistema en función de las derivadas de las cuatro variables de estado:  $\{\dot{x}_3, \dot{x}_4, \dot{x}_5, \dot{x}_6\}$ , se obtienen las ecuaciones de estado con las que se modela el sistema dinámico de suspensión activa, como se indica en la ecuación 13.

$$F_C = M_s(\dot{x}_4) + k_s(x_3) + \\ + M_s g + B_s(x_4 - x_6)$$

Ecuación 13. Reescritura de la expresión final en la ecuación 9

## Modelo con parámetros del fabricante

Una vez se tienen las ecuaciones de estado del sistema, se reemplazan los valores de los parámetros especificados en el manual de Quanser (2010b) para la suspensión activa, como se muestra en la ecuación 14.

$$\dot{x}_3 = \dot{x}_2 - \dot{x}_1 \Rightarrow \boxed{\dot{x}_3 = x_4 - x_6}$$

$$\boxed{\dot{x}_4 = \ddot{x}_2 = -\frac{k_s}{M_s}(x_3) - g + \\ -\frac{B_s}{M_s}(x_4) + \frac{B_s}{M_s}(x_6) + \frac{1}{M_s}F_C}$$

$$\dot{x}_5 = \dot{x}_1 - \dot{z}_r \Rightarrow \boxed{\dot{x}_5 = x_6 - \dot{z}_r}$$

$$\boxed{\dot{x}_6 = \ddot{x}_1 = \frac{k_s}{M_{us}}(x_3) - \frac{k_{us}}{M_{us}}(x_5) + \\ -g + \frac{B_s}{M_{us}}(x_4) - \frac{B_s}{M_{us}}(x_6) + \\ + \frac{B_{us}}{M_{us}}(\dot{z}_r) - \frac{B_{us}}{M_{us}}(x_6) - \frac{1}{M_{us}}F_C}$$

Ecuación 14. Ecuaciones de estado (1)

Los valores:  $y$   $B_s$  y  $B_{us}$ , en la ecuación 15, fueron tomados de la guía de Apkarian y Abdossalami (2012).

$$M_s = 2,45 \text{ Kg. } M_{us} = 1 \text{ Kg.}$$

$$k_s = 490 \frac{N}{m} \quad k_{us} = 1250 \frac{N}{m}$$

Ecuación 15. Parámetros de la suspensión activa, dados por Quanser (2010b)

$$B_s = 7,5 \frac{N \cdot s}{m} \quad B_{us} = 5 \frac{N \cdot s}{m}$$

Ecuación 16. Valores de  $B_s$  y  $B_{us}$

$$g = 9,8 \frac{m}{s^2}$$

$$\frac{k_s}{M_s} = \frac{980}{2,45} \frac{m}{s^2} = 400 \frac{m}{s^2}$$

$$\frac{B_s}{M_s} = \frac{7,5}{2,45} \frac{m}{s^2} = 3,061 \frac{m}{s^2}$$

$$\frac{1}{M_s} = \frac{1}{2,45} \frac{m}{s^2} = 0,408 \frac{m}{s^2}$$

$$\frac{k_s}{M_{us}} = \frac{980}{1} \frac{m}{s^2} = 980 \frac{m}{s^2}$$

$$\frac{k_{us}}{M_{us}} = \frac{2500}{1} \frac{m}{s^2} = 2500 \frac{m}{s^2}$$

$$\frac{B_s}{M_{us}} = \frac{7,5}{1} \frac{m}{s^2} = 7,5 \frac{m}{s^2}$$

$$\frac{B_{us}}{M_{us}} = \frac{5}{1} \frac{m}{s^2} = 5 \frac{m}{s^2}$$

$$\frac{1}{M_{us}} = \frac{1}{1} \frac{m}{s^2} = 1 \frac{m}{s^2}$$

Ecuación 17. Parámetros del modelo

$$\dot{x}_3 = x_4 - x_6$$

$$\dot{x}_4 = -400(x_3) - 9,8 +$$

$$-3,061(x_4) + 3,061(x_6) + 0,408 F_C$$

$$\dot{x}_5 = x_6 - \dot{z}_r$$

$$\dot{x}_6 = 980(x_3) - 2500(x_5) +$$

$$-9,8 + 7,5(x_4) - 7,5(x_6) +$$

$$+5(\dot{z}_r) - 5(x_6) - F_C$$

Ecuación 18. Ecuaciones de estado (2)

## Definición de los puntos de equilibrio

Para encontrar los puntos de equilibrio del sistema de suspensión activa, se evalúa el sistema sin entradas, haciendo las velocidades y aceleraciones igual a cero (Ruiz, 2014). Por esta razón se igualan a cero las derivadas de las variables de estado y las entradas, como se indica en la ecuación 19.

$$\dot{x}_3 = \dot{x}_4 = \dot{x}_5 = \dot{x}_6 = 0 ; \dot{z}_r = F_C = 0$$

$$x_4 = \dot{x}_2 = x_6 = \dot{x}_1 = 0$$

Ecuación 20. Velocidades y entradas cero

A partir de las ecuaciones de estado, en la ecuación 13, se obtienen entonces los puntos de equilibrio, tal como se detalla en la ecuación 21.

Dichas ecuaciones pueden ser expresadas matricialmente, tal como se muestra en la ecuación 18.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \\ \dot{x}_6 \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} x_4 - x_6 \\ -400x_3 - 9,8 - 3,061x_4 + 3,061x_6 \\ x_6 \\ 980x_3 - 9,8 + 7,5x_4 - 2500x_5 - 12,5(x_6) \end{bmatrix}$$

$$+ \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0,408 \\ -1 & 0 \\ 5 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{z}_r \\ F_C \end{bmatrix}$$

Ecuación 19. Ecuaciones de estado (3)

$$-\frac{k_s}{M_s}(x_3) - g - \frac{B_s}{M_s}(x_4) + \frac{B_s}{M_s}(x_6) = 0$$

$$x_3 = -\frac{M_s}{k_s}g$$

$$\frac{k_s}{M_{us}}(x_3) - \frac{k_{us}}{M_{us}}(x_5) - g = 0$$

$$\frac{k_s}{M_{us}}\left(-\frac{M_s}{k_s}g\right) - \frac{k_{us}}{M_{us}}(x_5) - g = 0$$

$$-M_s g - k_{us}(x_5) - M_{us}g = 0$$

$$x_5 = -\frac{(M_s + M_{us})}{k_{us}}g$$

Ecuación 21. Obtención de los puntos de equilibrio

Una vez determinados los puntos de equilibrio del sistema de suspensión activa se puede evidenciar lo siguiente:

- En las ecuaciones de estado que describen la dinámica del sistema es posible asumir despreciable la gravedad  $g$ , es decir, tomarla como cero, puesto que no incide sobre ninguna de las variables de estado del sistema, en otras palabras, cuando el sistema está en movimiento la gravedad no tiene relevancia.
- Por otra parte, al evaluar el comportamiento del sistema en reposo para determinar sus puntos de equilibrio, se observa que la gravedad es un factor que influye en el valor que pueden llegar a tomar, es decir, la gravedad tiene relevancia cuando el sistema está estático.
- Para este sistema se esperaría que los puntos de equilibrio fueran  $x_3=0$  y  $x_5=0$  cuando  $x_1$ ,  $x_2$  y  $z_r$  estuvieran en reposo y los resortes estuvieran en su estado natural sin comprimir. Pero, en realidad no es así. Debido al efecto de la gravedad sobre las masas, existe una compresión sobre los resortes que hace que los

puntos de equilibrio determinen un balance estático entre el peso de las masas y las fuerzas existentes en el resorte. Por esto, los puntos de equilibrio de acuerdo con los valores de los parámetros especificados en el manual de Quanser (2010b) para el sistema Suspensión Activa son:  $x_3=-0,0245$  y  $x_5=-0,0135$ . En la ecuación 22 se presentan los puntos de equilibrio del sistema.

$$Pe = [x_{3e} \quad x_{4e} \quad x_{5e} \quad x_{6e}]'$$

$$Pe = [-0.0245 \quad 0 \quad -0.0135 \quad 0]'$$

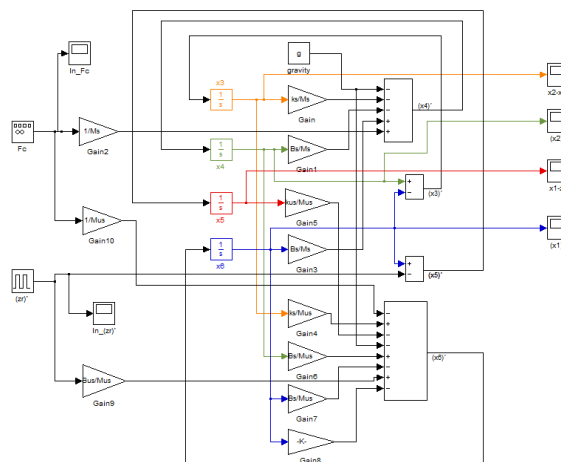
Ecuación 22. Puntos de equilibrio (Pe)

Teniendo en cuenta que el sistema suspensión activa es un modelo lineal, sus ecuaciones de estado son de orden uno y sin expresiones de seno o coseno, por lo que no es necesario linealizar el sistema alrededor de los puntos de equilibrio.

## Simulaciones del modelo lineal y resultados

En la figura 2 se muestra el diagrama simulado en Simulink de MatLab del sistema de suspensión activa, teniendo en cuenta la gravedad.

Figura 2. Diagrama en Simulink del sistema suspensión activa, con gravedad

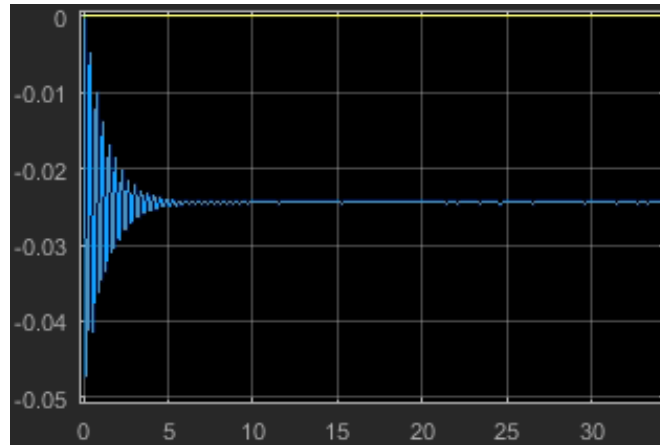


Fuente: elaboración propia

En las figuras 3 y 4 puede observarse el comportamiento del sistema cuando las entradas están en cero. La posición de  $x_2$  respecto a  $x_1$  (desplazamiento de la carrocería respecto a la llanta)

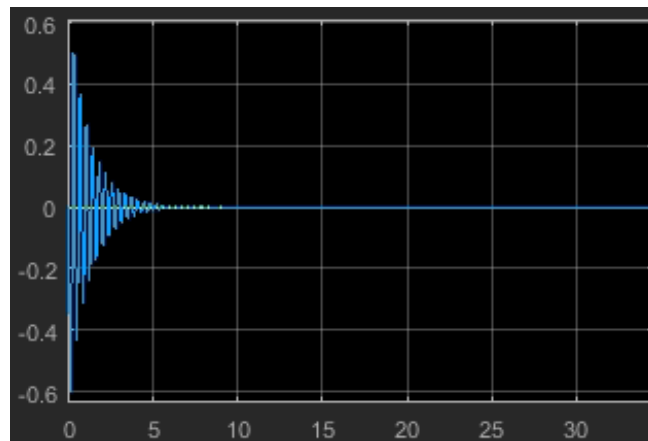
tiene un desplazamiento de  $-0,0245$  m y la velocidad sobre  $x_2$  -la de la carrocería tiene una pequeña oscilación, pero se estabiliza en cero, puesto que el sistema no ha sido excitado.

**Figura 3.** Respuesta del sistema suspensión activa con gravedad en  $x_2$ :  $(x_2 - x_1)$



Fuente: elaboración propia

**Figura 4.** Respuesta del sistema suspensión activa con gravedad en  $x_2$ :  $(x_2)'$



Fuente: elaboración propia

Abajo en las figuras 5 y 6 puede observarse el comportamiento del sistema cuando las entradas están en cero, la posición de  $x_1$  respecto a  $z_r$  -el desplazamiento de la llanta respecto a las irregularidades del terreno, se desplaza  $-0,0135$ m mientras que la velocidad sobre  $x_1$  -la

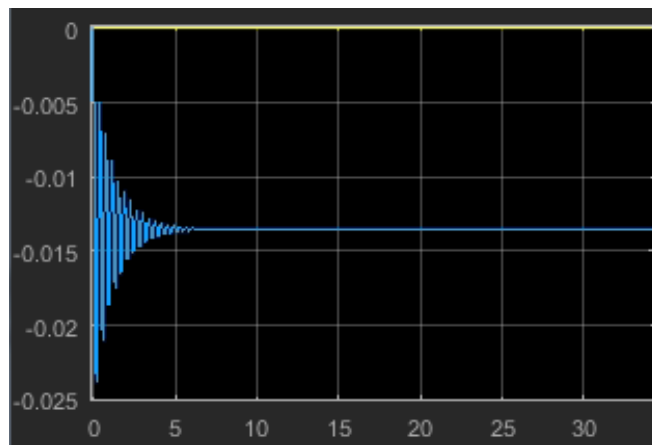
de la llanta tiene una pequeña oscilación, pero se estabiliza en cero, puesto que el sistema no ha sido excitado.

Si se cambia la entrada  $\dot{z}_r$  por un tren de pulsos, los desplazamientos  $(x_2 - x_1)$  y  $(x_1 - z_r)$  oscilan,

pero al estabilizarse se mantienen alrededor de  $-0,0245\text{m}$  y de  $-0,0135\text{m}$  respectivamente. Por otra parte, por cada cambio de nivel en el tren de pulsos de entrada, cambia la velocidad en  $x_2$  y  $x_1$ , teniendo una oscilación mayor en  $x_2$ , así

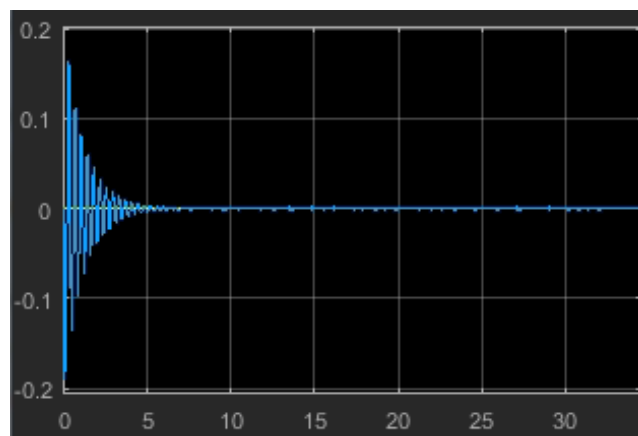
como un mayor tiempo de estabilización. En las figuras 7 hasta la 10, se presentan todas estas variaciones. La señal en azul representa el tren de pulsos de entrada.

**Figura 5.** Respuesta del sistema suspensión activa con gravedad en  $x_1$ :  $(x_1 - z_r)$



Fuente: elaboración propia

**Figura 6.** Respuesta del sistema suspensión activa con gravedad en  $x_1$ :  $(x_1)'$



Fuente: elaboración propia

Tras lo anterior, se simuló el sistema de Suspensión Activa sin tener en cuenta la gravedad, para lo que se describió el sistema lineal mediante el

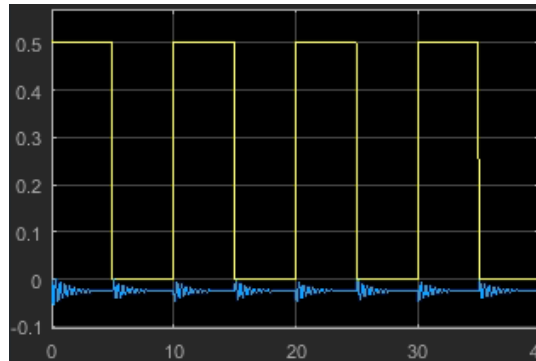
espacio de estado indicado en la ecuación 23. La anterior descripción fue empleada en Simulink de Matlab, tal como se mostrará en la figura 11.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \\ \dot{x}_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & \dots & 0 & -1 \\ -\frac{k_s}{M_s} & -\frac{B_s}{M_s} & & 0 & \frac{B_s}{M_s} \\ 0 & 0 & & 0 & 1 \\ \frac{k_s}{M_{us}} & \frac{B_s}{M_{us}} & & -\frac{k_{us}}{M_{us}} & -\frac{(B_s+B_{us})}{M_{us}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{M_s} \\ -1 & 0 \\ \frac{B_{us}}{M_{us}} & -\frac{1}{M_{us}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{z}_r \\ F_C \end{bmatrix}$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{z}_r \\ F_C \end{bmatrix}$$

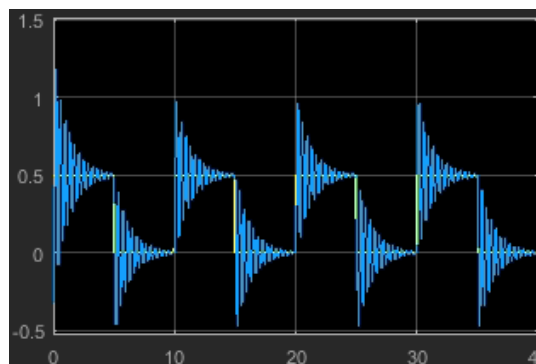
Ecuación 23. Modelo lineal del sistema suspensión activa sin gravedad

**Figura 7.** Respuesta del sistema con gravedad, y  $\dot{z}_r \neq 0$ , en  $x_2$ :  $(x_2-x_1)$



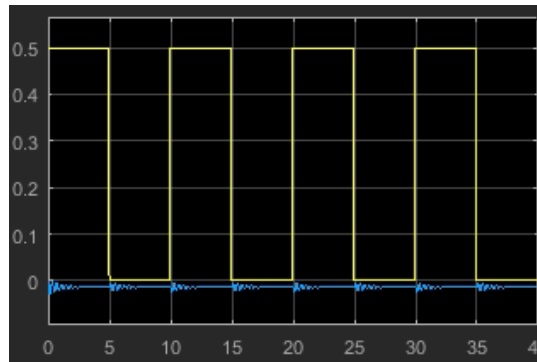
Fuente: elaboración propia

**Figura 8.** Respuesta del sistema con gravedad, y  $\dot{z}_r \neq 0$ , en  $x_2$ :  $(x_2)'$



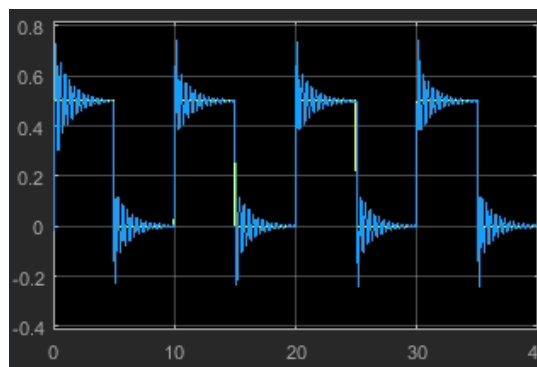
Fuente: elaboración propia

**Figura 9.** Respuesta del sistema con gravedad, y  $\dot{z}_r \neq 0$ , en  $x_1$ :  $(x_1-z_r)$



Fuente: elaboración propia

**Figura 10.** Respuesta del sistema con gravedad, y  $\dot{z}_r \neq 0$ , en  $x_2$ :  $(x_1)'$

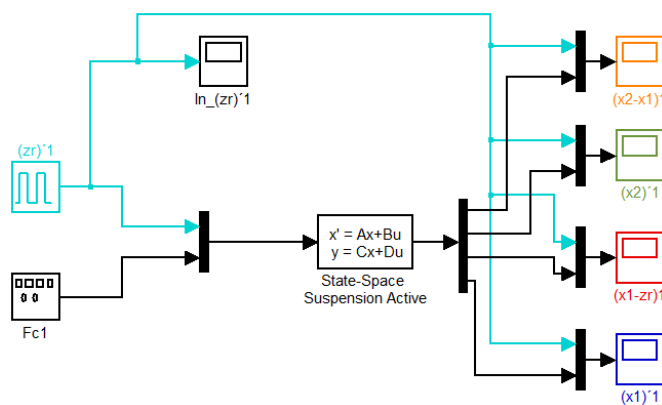


Fuente: elaboración propia

Para simular el sistema de suspensión activa, sin gravedad, se usaron como condiciones iniciales

los puntos de equilibrio, indicados en la ecuación 22.

**Figura 11.** Diagrama Simulink del sistema de suspensión activa, sin gravedad



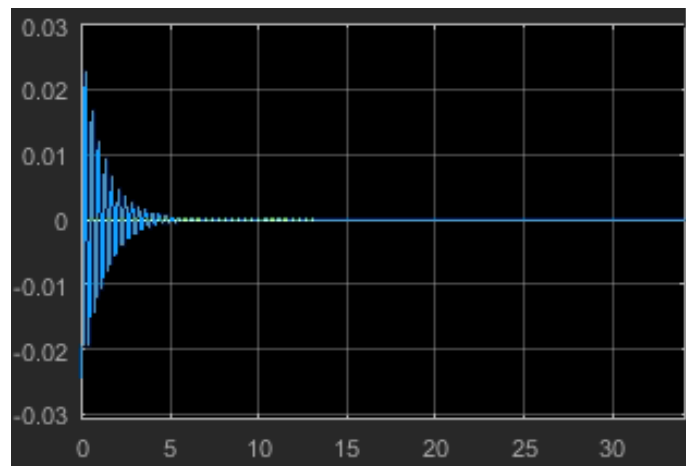
Fuente: elaboración propia



En las figuras desde la 12 hasta la 15, se presenta la respuesta del sistema en espacio de estados cuando todas las entradas son cero. Al igual que el sistema descrito, teniendo en cuenta la gravedad, los desplazamientos  $(x_2-x_1)$  y  $(x_1-z_r)$  y la velocidad en  $x_2$  y  $x_1$  oscilan hasta quedarse estables en un valor –en este caso– para todos igual a cero, lo cual indica que el sistema no ha sido

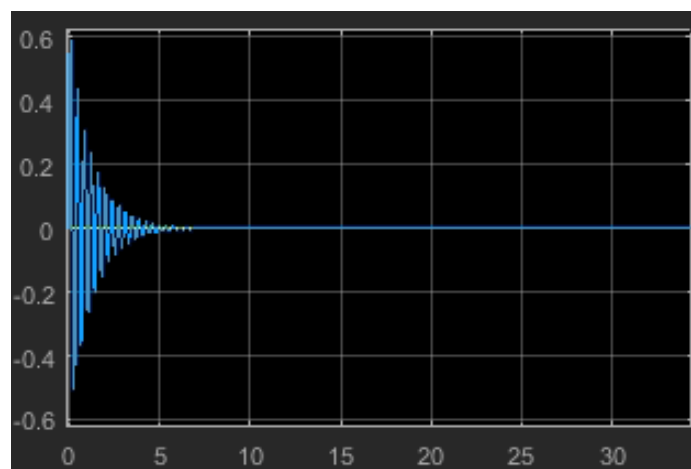
excitado. La diferencia con el sistema que tiene en cuenta la gravedad es que al estabilizarse los desplazamientos no se mantienen alrededor de los puntos de equilibrio, aunque si se amplía la gráfica en las figuras, desde la 16 hasta la 19, se puede observar que inicia su oscilación a partir de los puntos de equilibrio:  $x_3=-0,0245$  y  $x_5=-0,0135$ .

**Figura 12.** Respuesta del sistema sin gravedad en  $x_2$ :  $(x_2 - x_1)1$



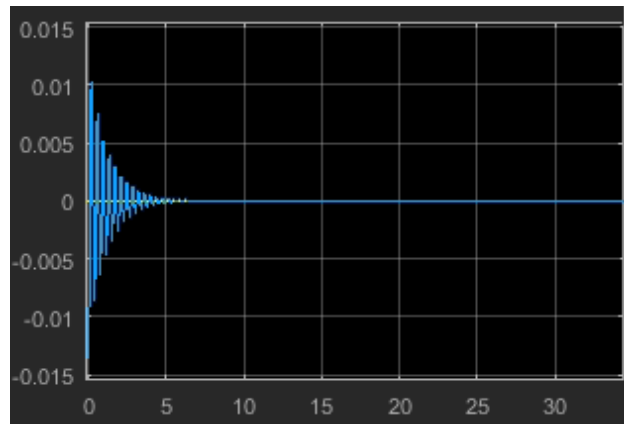
Fuente: elaboración propia

**Figura 13.** Respuesta del sistema sin gravedad en  $x_2$ :  $(x_2)1$



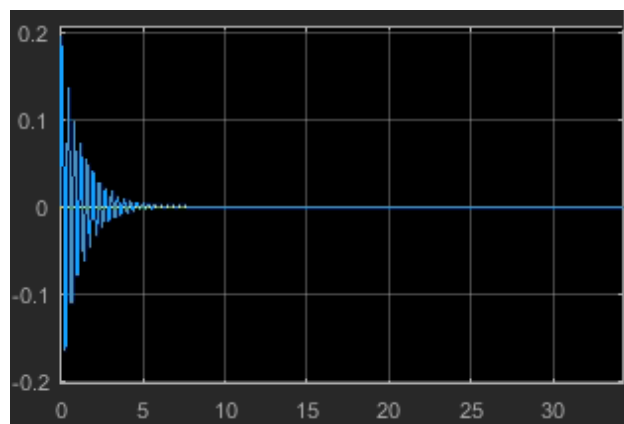
Fuente: elaboración propia

**Figura 14.** Respuesta del sistema sin gravedad en  $x_1$ :  $(x_1 - z_1)1$



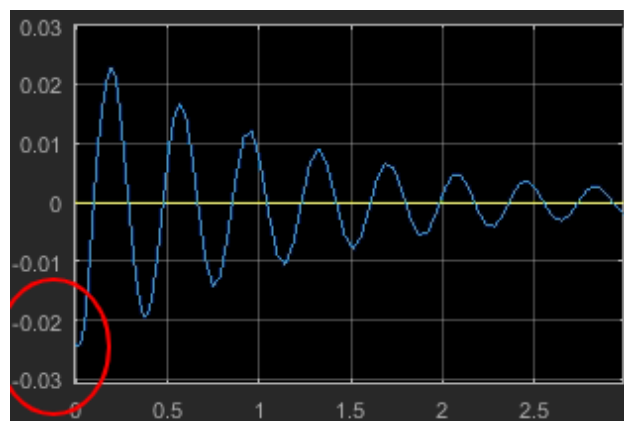
Fuente: elaboración propia

**Figura 15.** Respuesta del sistema sin gravedad en  $x_1$ :  $(x_1)'1$



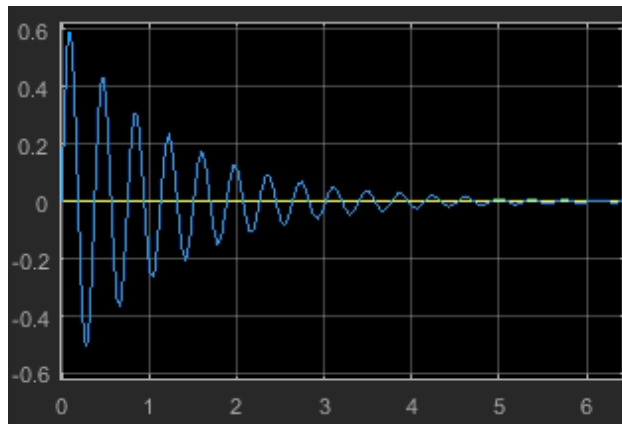
Fuente: elaboración propia

**Figura 16.** Zoom del sistema de suspensión activa sin gravedad en  $x_2$ :  $(x_2 - x_1)1$



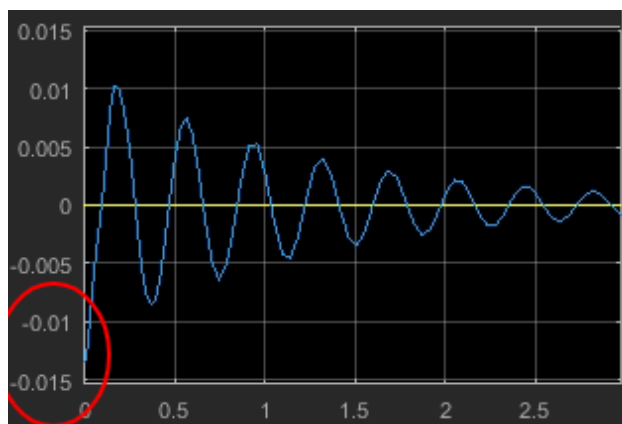
Fuente: elaboración propia

Figura 17. Zoom del sistema de suspensión activa sin gravedad en  $x_2$ :  $(x_2)'1$



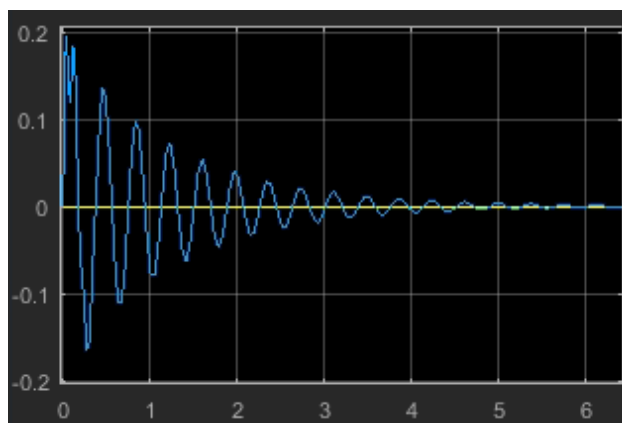
Fuente: elaboración propia

Figura 18. Zoom del sistema de suspensión activa sin gravedad en  $x_1$ :  $(x_1 - z_1)'1$



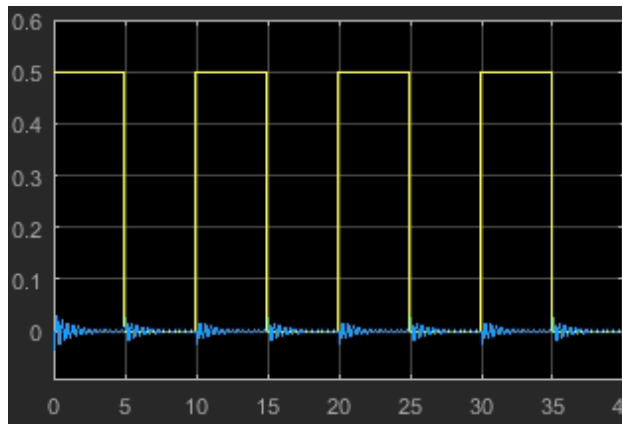
Fuente: elaboración propia

Figura 19. Zoom del sistema de suspensión activa sin gravedad en  $x_1$ :  $(x_1)'1$



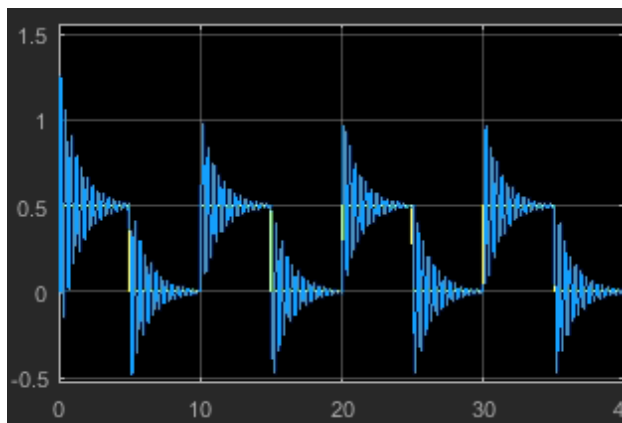
Fuente: elaboración propia

**Figura 20.** Respuesta del sistema sin gravedad, y  $\dot{z}_r \neq 0$ , en  $x_2$ :  $(x_2 - x_1)1$



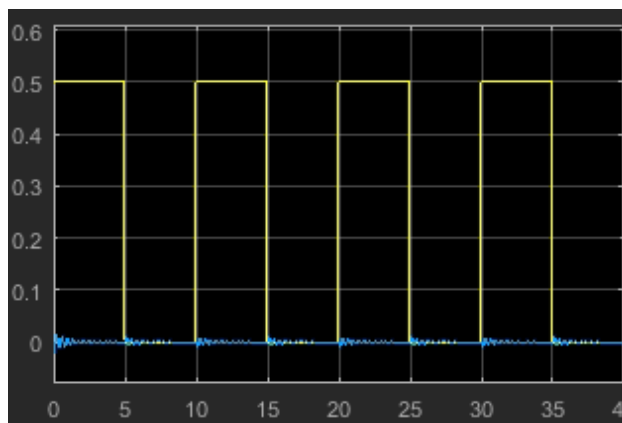
Fuente: elaboración propia

**Figura 21.** Respuesta del sistema sin gravedad, y  $\dot{z}_r \neq 0$ , en  $x_2$ :  $(x_2)1$

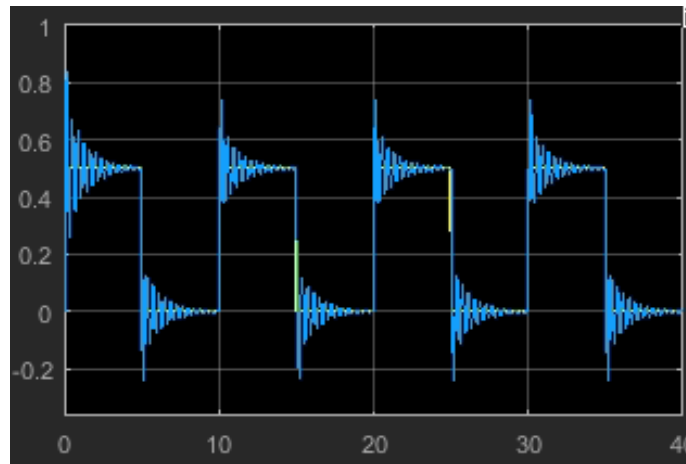


Fuente: elaboración propia

**Figura 22.** Respuesta del sistema sin gravedad, y  $\dot{z}_r \neq 0$ , en  $x_1$ :  $(x_1 - z_r)1$



Fuente: elaboración propia

**Figura 23.** Respuesta del sistema sin gravedad, y  $\dot{z}_r \neq 0$ , en  $x_1: (x_1)'1$ 

Fuente: elaboración propia

Finalmente, se simuló el sistema en espacio de estados sin gravedad cambiando la entrada por  $\dot{z}_r$  un tren de pulsos, como se muestra en las figuras desde la 20 hasta la 23. Al igual que en la simulación en la que se tiene en cuenta la gravedad, los desplazamientos  $(x_2-x_1)$  y  $(x_1-z_r)$  oscilan,

pero al estabilizarse se mantienen alrededor de 0 m. Además, por cada cambio de nivel en el tren de pulsos de entrada la velocidad en  $x_2$  y  $x_1$  cambia, lo que pone en evidencia tanto una oscilación mayor en  $x_2$ , como un mayor tiempo de estabilización.

## Conclusiones

Se evidenció que modelar un sistema real como el de la suspensión activa, mediante la formulación de Lagrange, facilita el modelamiento del sistema y su descripción mediante variables de estado, lo que permite, de hecho, una mejor comprensión del mismo.

Se comprobó que un sistema puede tener más de un punto de equilibrio. La selección del punto de equilibrio más adecuado depende del comportamiento real del sistema, puesto que establece sus limitantes propias.

A través de las simulaciones realizadas se observa que el sistema Suspensión Activa es un sistema lineal. Además, se observa que es posible despreciar la gravedad en el análisis dinámico del sistema, puesto que el comportamiento no cambia al hacerla cero.

También se observa que al trabajar el sistema alrededor de los puntos de equilibrio se mantiene estable. Así se podría llegar a mejorar los tiempos de estabilización si se implementara algún tipo de controlador, a manera de posible trabajo futuro.

---

## Referencias

- Apkarian, J. y Abdossalami, A. (2012). *Active Suspension Experiment for LabVIEW™ Users*. Ontario: Markham.
- Bay, J. (1998). *Fundamentals of Linear State Space Systems*. Boston: McGraw Hill.
- Ogata, K. (1987). *Dinámica de sistemas*. México: Prentice-Hall Hispanoamérica.
- Quanser. (2010a). *Active Suspension LQG Control using QUIARC. Instructor Manual. Revisión 2.0*. Ontario: Quanser Inc.
- Quanser. (2010b). *Active Suspension System. User Manual. Revisión 2.1*. Ontario: Quanser Inc.
- Ruiz, F. (2014). *Capítulo 1. Modelos de sistemas* [material de aula]. Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia.
- Zak, S. (2003). *Systems and Control*. New York: Oxford University Press.



---

# Pautas para publicar en #ashtag

## Revista del programa de Ingeniería de Sistemas

La revista está dirigida a estudiantes, docentes y egresados de la Escuela de Ingenierías de la CUN, de áreas del conocimiento relacionadas de la misma universidad o a investigadores invitados de otras universidades u organismos nacionales o internacionales.

Lineas temáticas:

- Ciencia, tecnología e innovación
- Utilización de las TIC en el aula
- Seguridad informática, gestión de redes y telecomunicaciones
- Inteligencia artificial y sistemas expertos

Tipos de artículos:

**Artículo de investigación científica y tecnológica:** documento que presenta de manera detallada los resultados originales de un proyecto de investigación. Por lo general, la estructura de estos textos está constituida por cuatro apartes importantes: introducción, metodología, resultados y discusión.

**Artículo de reflexión:** documento que presenta resultados de investigación desde una perspectiva analítica, interpretativa o crítica del autor, sobre un tema específico y recurriendo a fuentes originales.

**Artículo de revisión:** documento que surge de una investigación en la que se analizan, sistematizan e integran los resultados de investigaciones, publicadas o no, con el fin de dar cuenta de los avances y tendencias de desarrollo en un área de conocimiento o de la técnica determinada. Se caracteriza por presentar un cuidadosa revisión bibliográfica.

## Pautas de presentación de artículos

Los artículos deben cumplir con los siguientes parámetros:

- a) Extensión entre doce (12) y quince (15) páginas (4500 palabras aproximadamente, esto incluye los pies de página y referencias bibliográficas).
- b) Ser entregado en formato Word, tamaño carta, márgenes de 2,54 cm, espacio y medio de interlineado, letra Times New Román 12 puntos.
- c) Las páginas deben ser numeradas desde la página 1 hasta el final, la ubicación de la numeración debe estar en el margen inferior derecho.



- d) Tener el título y un resumen en español o en el idioma escrito y en inglés. Se recomienda que estas coincidan con las aprobadas por el Tesouro de la Unesco.
- e) El resumen o abstract no debe superar las 150 palabras y debe describir la esencia del artículo.
- f) Tener entre tres y seis palabras clave en el idioma en que esté escrito y en inglés.
- g) Los datos académicos del autor y su filiación institucional deben ser anexados en otro archivo Word.
- h) Todos los cuadros, gráficas, mapas, diagramas y fotografías serán denominados "Figuras". Estas deben ser insertadas en marcos o cajas de línea delgada, numeradas, en orden ascendente, e identificadas y referenciadas en el texto mediante un pie de foto. Asimismo, deben ser enviadas en formato .jpg o .tiff de alta resolución, es decir, de 300 pixeles por pulgada (ppp).
- i) Todos las figuras representadas por mapas deben estar: 1) enmarcadas en una caja de línea delgada, 2) estar geográficamente referenciadas con flechas que indiquen latitud y longitud o con pequeños insertos de mapas que indiquen la localización de la figura principal, y 3) tener una escala en km.
- j) El autor debe emplear los pies de página estrictamente en los casos en los que desea complementar información del texto principal. Los pies de página no se deben emplear para referenciar bibliografía o para referenciar información breve que puede ser incluida en el texto principal. Se exceptúan aquellos casos en los que el autor desea hacer comentarios adicionales sobre un determinado texto o un conjunto de textos alusivo al tema tratado en el artículo.
- k) Cumplimiento de las normas APA. Sexta Edición

## **Pautas de presentación de reseñas**

Las reseñas deben cumplir con los siguientes parámetros:

- a) Extensión entre tres (3) y cinco (5) páginas.
- b) Ser entregada en formato Word, tamaño carta, márgenes de 2,54 cm, espacio y medio de interlineado, letra Times New Román 12 puntos.
- c) Los datos académicos del autor y su filiación institucional deben ser anexados en otro archivo Word.

## **Revisión y ajustes**

Los artículos y reseñas que cumplan con las especificaciones y satisfagan los criterios establecidos por el comité editorial serán preseleccionados. Para lograr que el documento sea finalmente seleccionado y publicado, el autor tendrá que ajustarse al tiempo que los editores de la revista consideren prudente para que haga cambios pertinentes al escrito y luego lo retorne con sus respectivas modificaciones si así se llegare a necesitar.

#GSHtag

REVISTA ESPECIALIZADA EN INGENIERÍA

# #Gstcg

REVISTA ESPECIALIZADA EN INGENIERÍA

ISSN: 2346 - 139X



Corporación Unificada Nacional  
de Educación Superior

VIGILADA MINEDUCACIÓN