

# SISTEMA INTEGRADO DE SIMULACIÓN Y CONTROL, SISC

John Alexander Cortés Romero\*

*En el área de control convergen conocimientos de diferentes disciplinas: matemáticas, procesos y computación. Un buen ingeniero de control debe manejar una gran variedad de conceptos técnicos estando en capacidad de aplicarlos a los problemas reales de la industria; tareas típicas incluyen modelaje matemático, análisis, simulación, diseño e implementación; la habilidad para solucionar estos problemas depende en gran parte del dominio de conceptos como realimentación, estabilidad y robustez. También se hace necesario tener un buen entendimiento sobre el comportamiento de sistemas dinámicos. Este conjunto de necesidades dieron origen al desarrollo del software de análisis, simulación y control en tiempo real de procesos industriales, el cual se ha denominado SISC.*

## Justificación

Se hace necesaria la creación de un ambiente integrado en el cual puedan desarrollarse tareas de análisis, diseño, simulación e implementación; así mismo, la implementación de sistemas de control en tiempo real utilizando diferentes estrategias de control, bien sea mediante métodos de diseño clásicos o modernos. Finalmente, la utilización de estrategias de control inteligentes: controladores difusos y/o utilización de redes neuronales para modelamiento o control.

En la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia, específicamente en su programa de Postgrado en Automatización Industrial, se han venido desarrollando trabajos en el área de control, simulación de sistemas dinámicos y comunicaciones, los cuales han hecho un aporte significativo a la investigación en el área de “Control y Simulación de Procesos Industriales”. La idea de obtener un software que integrara todas estas herramientas dentro de un único ambiente de simulación y control fue la que, precisamente, motivó el desarrollo de este proyecto.

Con esta herramienta se pretende dar al usuario (desde estudiantes hasta ingenieros de control) el soporte necesario para el desarrollo de todas las tareas que involucran, de una parte, el análisis y diseño de un sistema de control, tareas en las cuales la simulación es fundamental; de otra parte, su implementación, etapa en la cual la comunicación con sensores y dispositivos actuadores es parte esencial del sistema, para su funcionamiento en tiempo real.

## Características del Programa

El programa SISC (Sistema Integral de Simulación y Control) tiene por propósito brindar al usuario un ambiente de trabajo adecuado para la simulación y el control de sistemas dinámicos.

\* Ingeniero Electricista Universidad Nacional de Colombia, Magister en Automatización Industrial. Profesor Tiempo Completo, adscrito a la Facultad Tecnológica de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

La herramienta dispone de varias opciones de selección de bloques y parámetros de simulación o de operación en tiempo real, reuniendo las siguientes características:

- Permite la simulación de procesos dinámicos continuos, discretos o una combinación de estos
- Facilidad de uso
- Posee una interfaz gráfica de entrada, y un diseño que permite especificar y simular el sistema por medio de diagramas de bloques
- Provee de una interfaz gráfica de salida de las variables del sistema para su análisis posterior
- Contiene los medios necesarios para almacenar la planta de diseño y los resultados de la simulación, tanto gráficos como numéricos
- El paquete puede ser adecuado a nuevas necesidades de implementación, dada la posibilidad de aumentar la variedad de bloques de simulación y control
- Permite la comunicación con un controlador lógico programable de marca Klockner Moeller
- Permite implementar diferentes estrategias de control, incluso inteligentes
- Permite visualizar las tendencias de las variables medidas y/o controladas del sistema en tiempo real
- Provee al usuario de un único ambiente integrado de desarrollo para operaciones de simulación y control
- Utiliza controladores digitales y continuos, modelados e implementados por medio de funciones de transferencia continuas y discretas<sup>1</sup>
- Maneja redes neuronales, interactuando con los archivos de diseño generados por UN-NEURO<sup>2</sup>
- Permite iniciar y parar el proceso de simulación en cualquier momento, con la posibilidad de volver a reiniciar
- Muestra la evolución de la simulación o control en tiempo real mediante gráficas, en cualquier bloque que sea seleccionado
- Captura gráficas de simulación o control en el momento deseado durante el desarrollo de la operación

- Accede a las entradas y salidas análogas del PLC conectado
- Lee las entradas análogas del PLC para tareas de supervisión de un proceso
- Escribe sobre las salidas análogas del PLC para tareas de control sobre un proceso
- Configura las entradas y salidas del PLC utilizado
- Conecta las entradas y salidas análogas del PLC con los sistemas de control diseñados
- Funciona con sistemas de control diseñados en tiempo real
- Utiliza estrategias de control difuso, mediante el uso de controladores difusos
- Para el diseño de controladores difusos utiliza todas las funcionalidades de programa UNFUZZY<sup>3</sup>. Por lo tanto SISC se encuentra en capacidad de leer e interpretar los archivos de diseño de sistemas de lógica difusa diseñados por este programa
- Permite la interconexión de los bloques de controladores difusos previamente diseñados con UNFUZZY, con los demás bloques que provee el sistema.

Los bloques disponibles para esta versión son:

- a) **Bloques lineales:** sumador, integrador, funciones de transferencia de primero y segundo orden, función de transferencia de orden "n", variables de estado, compensadores y controlador P.I.D.
- b) **Bloques no lineales:** histéresis, saturación, zona muerta, sensor polinomial, retardo, nivel ON-OFF y redes neuronales
- c) **Bloques discretos:** función de transferencia discreta y variables de estado discretas.
- d) **Bloque de comunicaciones:** comunicación con Controlador Lógico Programable marca Klockner Moeller
- e) **Generador de funciones:** seno, coseno, ruido blanco, función programada, triángulo y cuadrada.

## Ejemplos de Aplicación

A continuación se muestran algunos ejemplos de sistemas de control que se pueden desarrollar con SISC.

1 Utilización de la transformada de Laplace en el caso continuo o transformada Z en el caso discreto. Para el caso de controladores continuos se discretiza su función de transferencia. Para profundizar en el tema se recomienda ver Chen C. T. «Analog and Digital Control System Design: Transfer-function, State-Space, and Algebraic Methods». Nueva York. Saunders College Publishing, 1993.

2 Programa de análisis diseño y simulación de redes neuronales, para mas detalles ver: Gómez J., González F. «UN Neuro». Bogotá. Tesis de grado para optar por el título de ingenieros de sistemas de la Universidad Nacional de Colombia.

3 UNFUZZY- Software para el diseño, análisis, simulación e implementación de sistemas de lógica difusa. Tesis de grado Maestría en Automatización Industrial, presentada por Oscar G. Duarte v.

## Implementación de un operador XOR por medio de una red neuronal

Se pretende simular una función XOR por medio de una red neuronal. El diseño del sistema se muestra en la Figura 1.

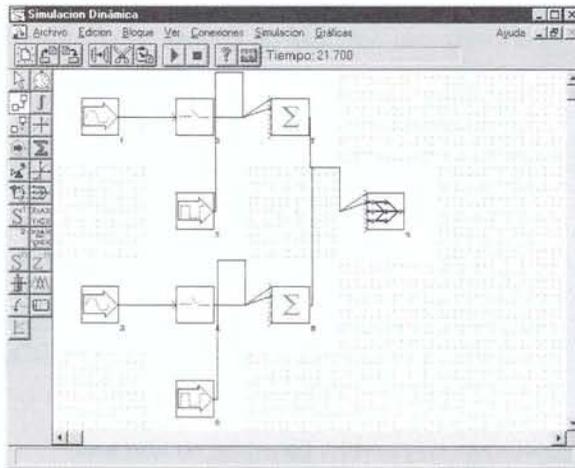


Figura 1. Diagrama de Bloques de Sistema.

Aunque las entradas de la red neuronal se podrían haber hecho con funciones cuadradas, se prefirió el arreglo mostrado para ilustrar la forma de diseñar sistemas en SISC. Se usaron dos funciones seno de periodo 14 s (bloque 1) y 20 s (bloque 2) de amplitud 1 y offset nulo. Luego se colocaron dos funciones on-off con nivel de on-off igual a 0.45, para convertir las funciones seno en funciones cuadradas de amplitud 0.9 centradas en el eje del tiempo. Para hacer que las funciones de entrada de la red sean positivas (porque se entrenó con valores positivos) se sumó a cada función un escalón de amplitud 0.45 y periodo grande (comparado con el tiempo de simulación). Las entradas de la red neuronal se muestran en la Figura 2 como las salidas correspondientes a los bloques Nos. 7 y 8. La salida de la red neuronal, es decir, el resultado de efectuar la operación XOR entre las dos entradas es la correspondiente al bloque No. 9. Las tres gráficas de salida se han superpuesto con la finalidad de comprobar fácilmente la validez de la red neuronal implementada.

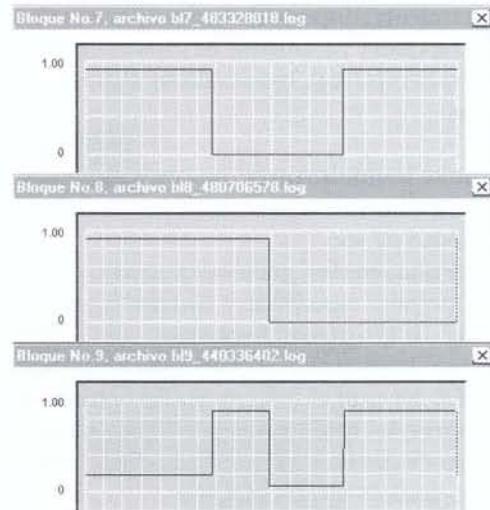


Figura 2 Gráficas de salida de los bloques.

En la Figura 2 se muestra el diseño de la red neuronal en UN-Neuro Editor

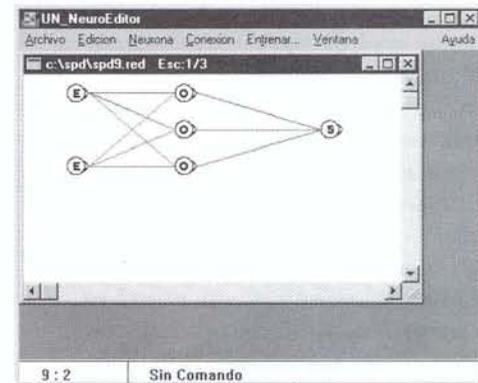


Figura 3 Arquitectura de la red neuronal utilizada

En la Figura 4 se muestra el proceso de entrenamiento de la red neuronal.

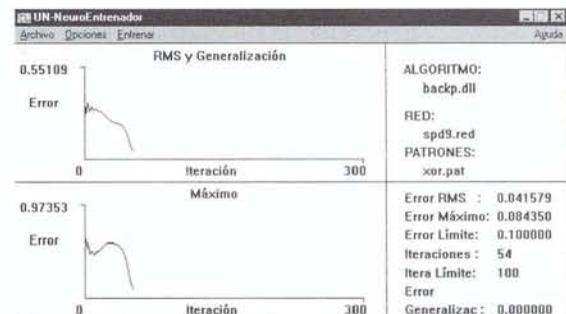


Figura 4 Resultados de entrenamiento de la red neuronal

## Control digital para el rastreo de una rampa

Este ejemplo pretende mostrar el uso de bloques discretos con bloques continuos. Se pretende simular el sistema que se muestra en la Figura 5, que corresponde a un control digital para una planta continua

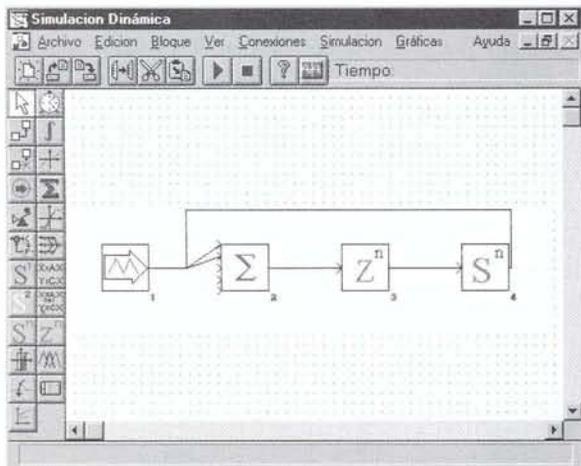


Figura 5 Diagrama de bloques sistema de control digital

La onda triangular se está tomando como una rampa de pendiente unitaria (en el intervalo de simulación), la realimentación de la salida es negativa (se tomó un peso de -1 en el bloque de suma para esa entrada). La planta continua tiene una función de transferencia:

$$G(s) = \frac{1}{s(s+1)}$$

La función de transferencia del control digital obtenida mediante un diseño de control digital, es:

$$\frac{E_2(z)}{E_1(z)} = \frac{3.81z^2 - 3.637z + 0.827}{z^2 - 0.4z - 0.6}$$

El tiempo de muestreo es de 1 s.

La respuesta de la simulación se muestra en las Figuras 6 (la señal de error), 7 (la salida del controlador) y 8 (la salida de la planta continua). Como se esperaba del diseño, la planta sigue rampas.

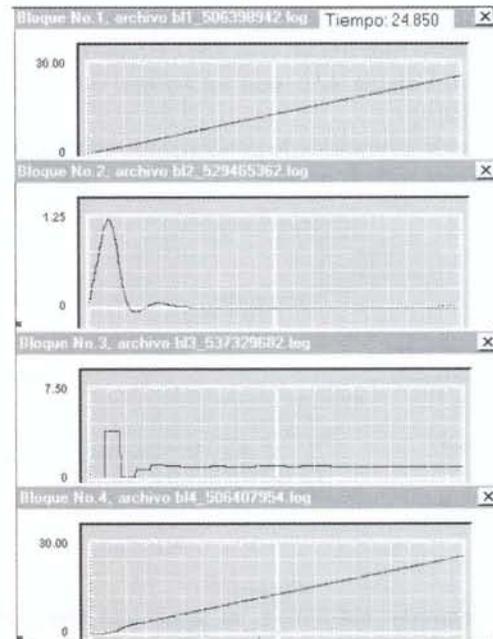


Figura 6 Gráficas de respuesta.

## Control de posición de un cilindro hidráulico y su funcionamiento en tiempo real.

Esta parte del documento se constituye en un ejemplo de utilización del software SISC como control en tiempo real; en ningún momento se busca llegar a la sintonización de un controlador PID, ni mucho menos buscar el punto más eficiente de trabajo para la planta, el único propósito es mostrar un ejemplo práctico de control en tiempo real como es el control de posición en un cilindro hidráulico, por lo que es más descriptivo que analítico.

Para cumplir con este propósito se utilizó como set point una señal cuadrada por considerar que esta implica el mayor esfuerzo, no sólo para el control sino también para el mismo cilindro; se constituye en el cambio más brusco que debe afrontar todo el sistema. La prueba se hace con la planta en vacío y bajo carga.

### Descripción del sistema

Se seleccionó por facilidad y precisión el sistema de posicionamiento hidráulico conformado por los siguientes elementos:

Un montaje hidráulico constituido por:

- Cilindro hidráulico: con una carrera de 20 cm
- Servo-Válvula 4/3: con un voltaje de control  $-10,10$ [v]
- Válvula limitadora de presión: ajustada a 25 bares durante toda la prueba.

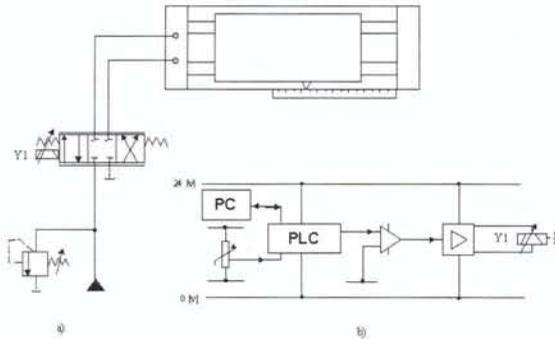


Figura 7

a) Esquema hidráulico, b) Diagrama eléctrico

Un montaje eléctrico o de control constituida por:

- Reostato lineal: indica la posición. 0 [cm] corresponde a 0.21 [v] y 20 [cm] a 8.25 [v].
- PLC: encargado de recibir la señal de posición del reostato y enviar a la válvula la señal de voltaje necesaria para el movimiento; estas señales son de 0 a 10[v]
- Adecuación de señal: conformado por dos operacionales que cambian un nivel de voltaje de 0-10[v] a  $-10,10$ [v] necesarios para el voltaje de control de la servoválvula
- PC: constituido por el software de control, cumple la tarea de hacer el control en tiempo real comparando la señal actual de posición con la que se desea o set point.

### Descripción del esquema de control

- Bloque 1: señal de error que sirve como alimentación para el controlador
- Bloque 2: indica la posición del cilindro en el momento
- Bloque 3 y 4: sirven para adecuar la señal de manera que la salida esté entre 0 y 10[v]
- Bloques 5, 6, 7 y 8: constituyen el controlador PID así; 5=Integral, 6=Diferencial, 7=Proporcional, 8=PID
- Bloque 9: es la señal de set point o referencia para el sistema

Los bloques 3 y 4 se hacen indispensables porque la señal que proviene del reostato no está exactamente entre 0 y 10 [v] sino entre 0.21 y 8.25 [v]. Esto hace necesaria la correspondencia de las señales, para que cuando se requiera por señal de referencia 0 [cm] en posición el control entregue 0.21[v]; de la misma forma si se desean 20 [cm] en posición, el controlador debe responder enviando una señal de 8.25 [v]

Las gráficas que se utilizarán para comparación son precisamente la salida del bloque 9, es decir la señal de referencia y la salida del bloque 2 correspondiente a la posición actual en el cilindro. Estas dos permiten de manera directa y casi que sin cálculos determinar la eficiencia del controlador; la filosofía de todo control plantea que la salida (en este caso la señal en el bloque 2) debe ser lo más parecida posible a la señal de entrada, representada en este caso como la salida del bloque 9.

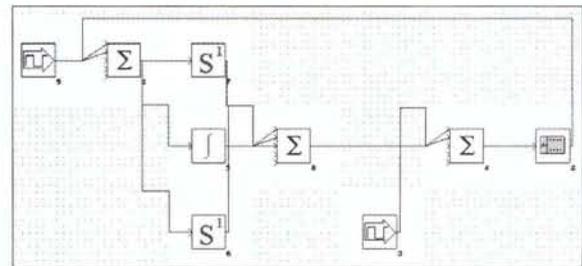


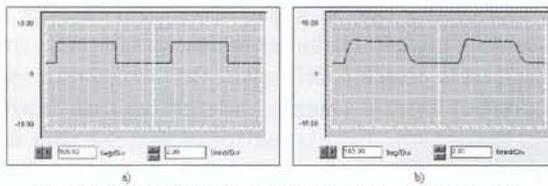
Figura 8. Implementación de controlador y esquema de bloques

### Resultados

- Onda cuadrada con control proporcional y sin carga

Se puede apreciar la fidelidad del cilindro en cuanto a la señal de referencia. Además es posible ver cómo el cilindro, en un primer momento, sobrepasa la señal de referencia para luego volver al punto indicado. Desde el momento en que se da la orden de cambio hasta que la señal se estabiliza, pasan 2 segundos.

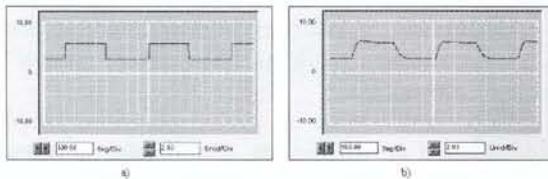
En la gráfica correspondiente a la salida es evidente la diferencia en tiempos para la estabilización del cilindro dependiendo del sentido en que se deba hacer el movimiento; esto se debe a su relación de áreas internas. Es de utilidad en este caso, por ejemplo, medir la relación de tiempos, la cual será también la correspondiente a áreas internas en el cilindro.



**Figura 9** Control proporcional, sistema sin carga. a) Señal de entrada, b) Respuesta del cilindro

- Onda cuadrada con control proporcional y con carga

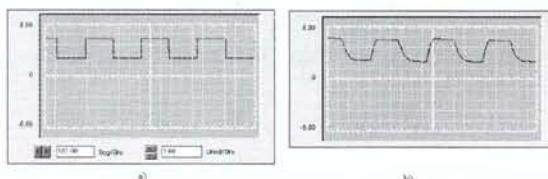
La influencia que presenta la carga sobre el sistema es clara; en este caso la señal de posición en ningún momento sobrepasa la señal de referencia. Adicionalmente se hace un poco más largo el tiempo en que el cilindro llega a la posición deseada. El período de la onda usada en este caso fue de 15 segundos y la amplitud es de 3 [v] correspondiente a una carrera aproximada de 7.5 [cm].



**Figura 10** Control proporcional, sistema con carga  $m=25$  Kg. a) Señal de entrada, b) Respuesta del cilindro

- Onda cuadrada con control PID y sin carga

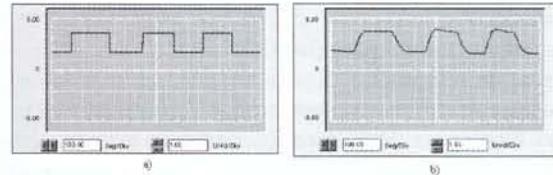
El ajuste de las constantes o ganancias para cada parte del controlador no corresponde a un proceso de sintonización total, sino que se constituyen en un ejemplo para ver la influencia y eficacia del software en este caso. La constante proporcional se ajustó en 0.1, la constante integral en 0.05, la constante diferencial en 0.5. Aunque no son los valores de sintonización, se puede ver el gran efecto que éstos tienen sobre el comportamiento de la planta. En este momento el cilindro nunca sobrepasa la señal de referencia, aún sin carga, pero el tiempo de estabilización de la señal se ve aumentado en casi 1 segundo.



**Figura 11** Control PID, sistema sin carga. a) Señal de entrada, b) Respuesta del cilindro

- Onda cuadrada con control PID y con carga

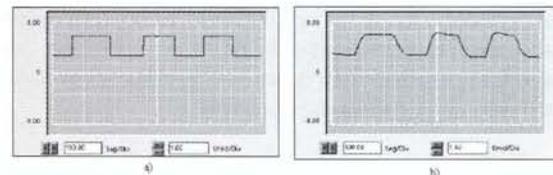
La diferencia entre las señales de posición para el caso actual y el anterior, en el cual no existía carga, no son muy diferentes; se observa así la efectividad en la implementación y seguimiento del algoritmo simulador del controlador. Las constantes o ganancias son las mismas de la medición anterior, así como el periodo y amplitud de la señal de referencia, con el fin de poder lograr comparaciones adecuadas.



**Figura 12** Control PID, sistema con carga  $m=25$  kg. a) Señal de entrada, b) Respuesta del cilindro

- Seguimiento de una onda triangular con controlador PID

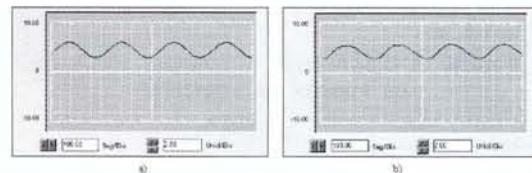
Se presenta el sistema con su controlador, siguiendo una señal de referencia que varía en forma triangular. Es notorio el retardo que presenta la planta con respecto a la señal de referencia, el cual se acerca a los dos segundos.



**Figura 13** Seguimiento de una señal triangular. a) Señal de entrada, b) Respuesta del cilindro

- Seguimiento de una onda sinusoidal con controlador PID

Un último ejemplo lo constituye el seguimiento de una onda sinusoidal, donde nuevamente se puede ver la diferencia en tiempo, o desfase entre la señal de referencia y la de posición del cilindro.



**Figura 14** Seguimiento de una señal sinusoidal. a) Señal de entrada, b) Respuesta del cilindro **Sistema de control de posición utilizando un controlador difuso**

- Sistema de control de posición utilizando un controlador difuso

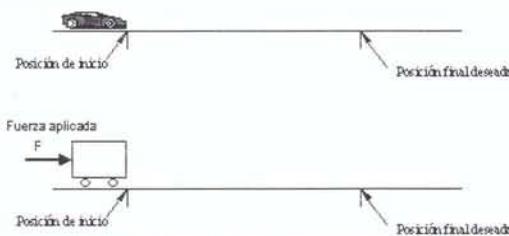
Dado un móvil de masa  $m$  que puede moverse libremente de forma rectilínea, sin rozamiento, se le aplica una fuerza externa en la misma dirección de la trayectoria recta de tal forma que pueda llegar a un punto de referencia.

Puede asociarse el problema al movimiento de un automóvil, el cual desea parquear en un punto determinado. Por lo tanto se deben manipular los controles del automóvil para dirigirlo al punto de parqueo (señal de referencia). Los controles que se disponen en un automóvil son: acelerador (en sentido positivo), freno para desacelerar (aceleración negativa para el caso de la velocidad positiva) y cambio de reversa en conjunto con el acelerador (aceleración negativa para el caso de la velocidad negativa).

Cabe anotar que el comportamiento de un automóvil es diferente del de un móvil, pero en este caso sirve de analogía para entender cual es el objetivo del control que se desea implementar. Desde el punto de vista físico, el problema consiste en determinar qué fuerza se debe aplicar para lograr que el móvil llegue a la posición especificada con una velocidad cero.

Las variables que se manejan dentro del sistema planteado son: la velocidad del móvil, su posición con respecto a posición final deseada y la aceleración como resultado de la fuerza externa aplicada.

El comportamiento del sistema está gobernado por la segunda ley de Newton, según la cual la fuerza aplicada es directamente proporcional a la aceleración del móvil, donde la constante de proporcionalidad es la masa del mismo.



**Figura 15 Disposición inicial del problema de control de posición<sup>4</sup>**

<sup>4</sup> Se muestra también la analogía del control de parqueo del automóvil.

<sup>5</sup> Para el caso del control del automóvil si es completamente necesario contar con la asesoría de un experto conductor para capturar su experiencia en el control del movimiento del automóvil.

<sup>6</sup> Se incluye el rango  $[0-1]$  para tener en cuenta también los valores negativos.

El controlador que se implemente para efectuar el control de posición debe ser realimentado como mínimo con la posición del móvil. Para realizar un mejor control sobre el sistema y además ser más ilustrativo, se toma también la variable velocidad para conocer el estado completo del móvil en cada momento. De esta forma quedan completamente definidas las variables de entrada/salida que debe manejar el controlador difuso.



**Figura 16. Variables de entrada/salida del controlador difuso.**

Ahora se hace necesario capturar la experiencia operativa de un físico o en general de un experto en el manejo de móviles sin rozamiento. En realidad no se requiere un experto, pues su comportamiento ha sido bastante estudiado y por lo tanto resulta natural la forma de controlarlo.<sup>5</sup>

Para facilidad de manejo de magnitudes se trabaja por unidad; de esta forma todo está escalizado dentro del rango  $[-1, 1]$ <sup>6</sup>.

- Diseño del controlador difuso en UNFUZZY

A continuación se describe el controlador difuso que se implemento en UNFUZZY

Universo de Entrada

Número de Variables de Entrada: 2

Nombre de la Variable de Entrada 1: Distancia

Universo de Discurso de la Variable Distancia:  $[-1, 1]$

Número de Valores Lingüísticos para la Variable Distancia: 3

Nombre de los Valores Lingüísticos para la Variable Distancia: Larga -, Media, Cero, Media +; Larga +.

Funciones de Pertenencia de la Variable Distancia: ver figura 17

Difusor de la Variable Distancia: Singleton.

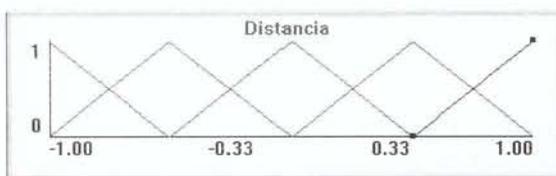


Figura 17 Funciones de Pertenencia para la Variable Distancia

Nombre de la Variable de Entrada 2: Velocidad  
 Universo de Discurso de la Variable Distancia: [-1,1]

Número de Valores Lingüísticos para la Variable Velocidad: 3

Nombre de los Valores Lingüísticos para la Variable Velocidad: Alta, Media, Cero, Media +, Alta +.

Funciones de Pertenencia de la Variable Velocidad: ver figura 18

Difusor de la Variable Velocidad: Singleton

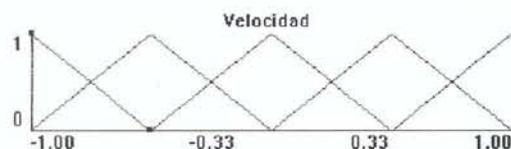


Figura 18 Funciones de pertenencia para la variable Velocidad

Universo de Salida

Número de Variables de Salida: 1

Nombre de la Variable de Salida 1: *Fuerza Aplicada*

Universo de Discurso de la Variable Fuerza Aplicada: [-1,1]

Nombre de los Valores Lingüísticos para la Variable Fuerza Aplicada: Alta- (A-), Media - (M-), Cero (O), Media + (M+), Alta + (A+). Se han utilizado las abreviaciones que aparecen dentro de los paréntesis por facilidad de edición.

Nombre de los Valores Lingüísticos para la Variable Fuerza Aplicada: Negativo, Cero y Positivo.

Concretor de la Variable Fuerza Aplicada:

- Centro de gravedad
- Altura

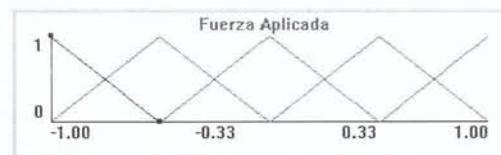


Figura 19 Funciones de Pertenencia para la Variable Fuerza Aplicada

Máquina de Inferencia

Operador AND: Mínimo

Operador de Implicación: Mínimo

Operador de Composición: Mínimo

Operador de Unión: Máximo

Base de Reglas

Número de reglas: 25<sup>7</sup>.

Las reglas se condensan dentro de la tabla siguiente, dentro de la cual donde el antecedente de cada regla se forma al aplicar el operador AND entre las dos proposiciones atómicas correspondientes cada una a un valor lingüístico de las variables distancia y velocidad.

El consecuente se forma a partir del valor lingüístico de la variable de salida Fuerza Aplicada, que se encuentre dentro de la celda que coincida con los dos valores lingüísticos de las variables de entrada.

		DISTANCIA				
		Larga -	Media -	Cero	Media +	Larga +
VELOCIDAD	Alta -	O	M +	A +	A +	A +
	Media -	M -	O	M +	A +	A +
	Cero	A -	M -	O	M +	A +
	Media +	A -	A -	M -	O	M +
	Alta +	A -	A -	A -	M -	O

Tabla 1. Configuración del sistema de control en SISC

7 Base de reglas completa dado 5 valores lingüísticos por cada variable.

Las condiciones iniciales del sistema se suponen iguales a cero (velocidad y posición). El punto de referencia de llegada del móvil se encuentra a un valor que pueda ser configurado. También en este caso se trabajan todos los valores de las variables por unidad para facilidad de configuración.

Con las consideraciones mencionadas, el móvil sin rozamiento se puede modelar por medio de dos integradores. El primero recibe la variable de fuerza aplicada, que es proporcional a la aceleración<sup>8</sup> y lo transforma en la variable velocidad; el segundo, toma la variable velocidad y la transforma en la variable posición. La posición debe ser restada a la señal de referencia (punto de llegada del móvil) para obtener la variable distancia; esta con la variable velocidad son las entradas del controlador difuso.

El controlador difuso debe ser configurado con el nombre del archivo que almacena el diseño realizado en el paso anterior. En la Figura 20 se muestra los bloques descritos junto con sus conexiones.

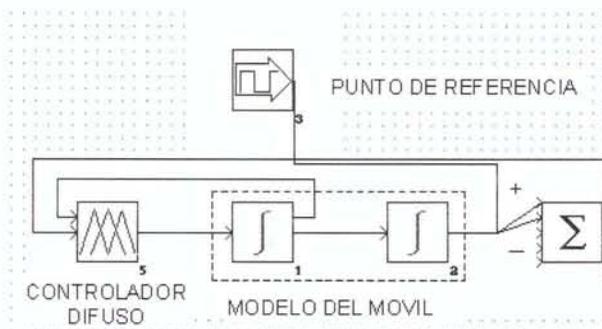


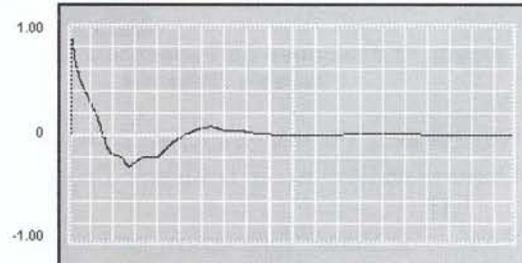
Figura 20 Diagrama de bloques para la implementación del control de posición

## Simulación del sistema de control en SISC

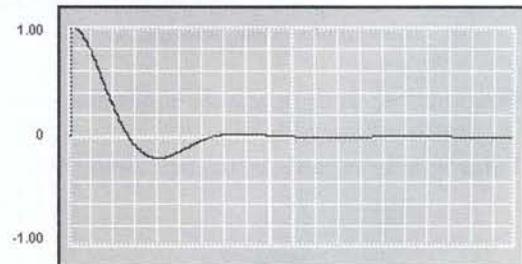
Se realiza la simulación utilizando los métodos de concreción centro de gravedad y altura<sup>9</sup>. Por lo tanto se necesitan dos archivos de diseño del controlador difuso, cada uno configurado con su respectivo método. Se toma como referencia el valor 1, lo que quiere decir que el valor inicial de la distancia es 1. Se toma como intervalo de simulación  $h = 0.1s$ .

Las gráficas de respuesta para cada método de concreción se muestra en la figura 21

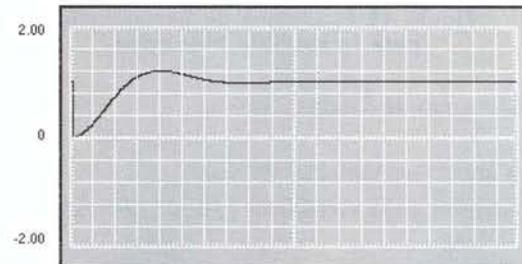
Bloque No.5. archivo bl5\_511639570.log Tiempo: 19.800



Bloque No.4. archivo bl4\_525795346.log



Bloque No.2. archivo bl2\_503775250.log Tiempo: 19.800



Bloque No.1. archivo bl1\_506920978.log

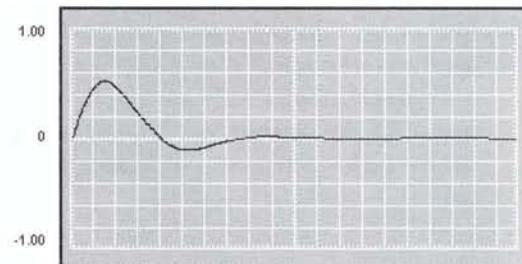


Figura 21 Gráficas de respuesta utilizando método de concreción Centro de gravedad

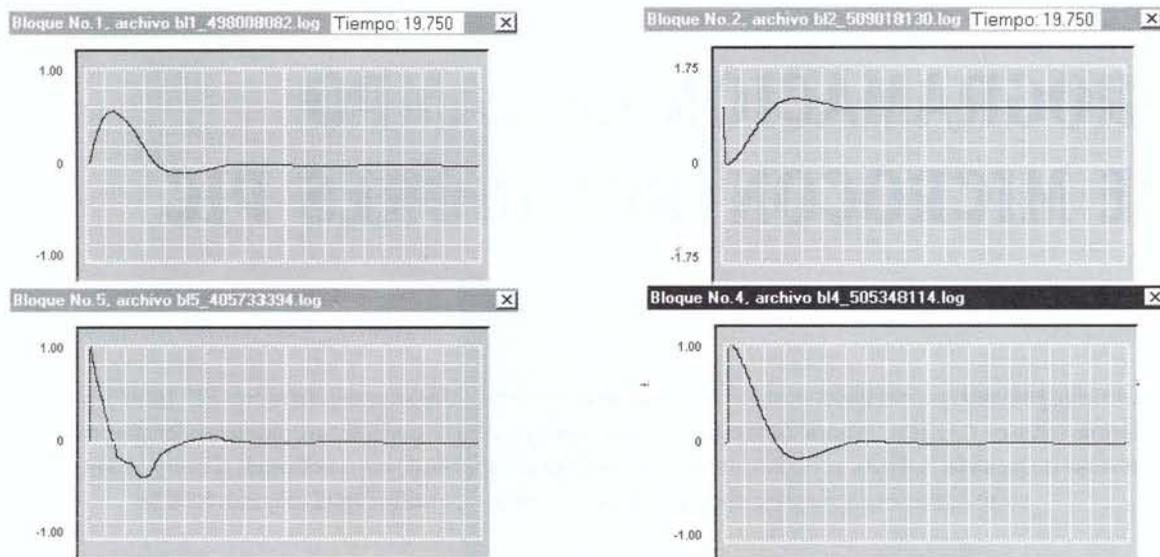


Figura 22 Gráficas de respuesta utilizando método de concreción Altura

Las gráficas corresponden a la salida de cada bloque, donde por ejemplo la salida del bloque No. 4 corresponde a la variable distancia, de la cual se espera que alcance el valor de cero, preferiblemente en el menor tiempo posible.

Si se comparan las gráficas de la variable distancia correspondiente a cada método de concreción, se observa que ambos controladores realizan un control de posición satisfactorio, puesto que la señal llega al

valor cero en un tiempo relativamente corto, teniendo el menor tiempo de respuesta el controlador difuso implementado con el método de concreción altura.

No se realiza aquí un análisis exhaustivo de las gráficas de respuesta, ya que el único fin del ejemplo es mostrar la utilización de SISC para el manejo de sistemas de lógica difusa.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CORTÉS R., John A. Desarrollo de Software de Análisis, Simulación y Control en Tiempo Real de Procesos Industriales. Santafé de Bogotá. Tesis de Maestría en Automatización Industrial. Universidad Nacional de Colombia. 1999.
- DÍAZ R., Turca W. Simulador de Procesos Dinámicos Continuos. Bogotá. Tesis de grado para optar por el título de ingenieros electricistas de la Universidad Nacional de Colombia. 1993.
- DUARTE V, Oscar G. Unfuzzy . Software para el Diseño, Análisis, Simulación e Implementación de Sistemas de Lógica Difusa. Santafé de Bogotá. Tesis de Maestría en Automatización Industrial. Universidad Nacional de Colombia. 1997.
- GÓMEZ J., González F. «UN Neuro». Bogotá. Tesis de grado para optar por el título de ingenieros de sistemas de la Universidad Nacional de Colombia
- MACIADO M, Diego E. JIMENEZ B, Daniel A. Implementación de los Protocolos para la Comunicación con diferentes Controladores Lógico-Programables desde un Computador Personal. Santafé de Bogotá. Proyecto de grado. Universidad Nacional de Colombia. 1993
- RODRIGUEZ P, Cristo A. TOLEDO M, Wilson E. Plataforma Gráfica para el Desarrollo de Aplicaciones de PLC's Mediante Diagramas de Escalera. Santafé de Bogotá. Proyecto de grado. Universidad Nacional de Colombia. 1995.