

Fuzzy Control with Concretion Based on Boolean Relations and Fuzzy Cognitive Maps built-in Industrial Dynamics

Nelson Javier Rodríguez Cifuentes

Universidad Distrital, Bogotá, D.C., Colombia, njrodriguez@udistrital.edu.co

Jose Jairo Soriano Mendez

Universidad Distrital, Bogotá, D.C., Colombia, josoriano@udistrital.edu.co

Javier Arturo Orjuela

Universidad Distrital, Bogotá, D.C., Colombia, jaorjuela@udistrital.edu.co

ABSTRACT

This paper presents a proposal for Fuzzy Rule Based System (FRBS) by using the Concretion Based on Boolean Relations (CBBR) incorporated in a simulation model of industrial dynamics (ID). It performs the analysis and design of a fuzzy controller for a state variable through CBBR. A state variable is essential information for management control or automatic. The state variable control may represent a material level, the value of a key performance indicator (KPI) of a process or a measure of accumulation inflow. Firstly, we present the design of the controller and then performs Boolean controller design based fuzzy controller Boolean previously done. In this design the control surfaces observed obtained with and without simplifying terms so as to show the features that the methodology proposed. Additionally we analyze the effects of the simplifications made in the control rules and then used hereinafter simplified rules. Then there is the implementation of state variable control and fuzzy cognitive map (FCM) and then incorporated by CBBR control. For each model presented it is shown the implementation in a simulation model of industrial dynamics.

Keywords: Industrial Dynamics, Fuzzy Control, Fuzzy Cognitive Maps

RESUMEN

En este trabajo se presenta una propuesta de Sistema Basado en Reglas Difusas (SBRD) mediante el uso de la Concreción Basada en Relaciones Booleanas (CBBR) incorporado en un modelo de simulación de Dinámica Industrial (DI). Se realiza el análisis y diseño de un controlador difuso para una variable de estado a través de CBBR. Una variable de estado constituye información esencial para el control gerencial o el automático. La variable de estado a controlar puede representar un nivel de material, el valor de un indicador clave de desempeño (ICD) de un proceso o una medida de acumulación de flujo entrante. En primera instancia, se presenta el diseño del controlador Booleano y luego se efectúa el diseño del controlador difuso partiendo del controlador Booleano realizado anteriormente. En este diseño se observan las superficies de control obtenidas con y sin simplificación de términos de manera que se evidencian las características que tiene la metodología propuesta. Adicionalmente se analizan los efectos que tienen las simplificaciones realizadas en las reglas de control para luego usar en adelante las reglas simplificadas. Posteriormente se plantea la implementación del control de variable de estado como Mapa Cognitivo Difuso (MCD) y luego se incorpora el control mediante CBBR. Para cada modelo presentado se muestra la implementación en un modelo de simulación de dinámica industrial.

Palabras claves: Dinámica Industrial, Control Difuso, Mapas Cognitivos Difusos,

1. INTRODUCCIÓN

La Lógica Difusa (LD) tiene gran aplicabilidad en los sistemas de apoyo a la gestión, debido a su flexibilidad para la implementación de estrategias de control gerencial o control automático de procesos (Babuska, 1998), (Yuan et al, 1995) y (Nobre, 2000). Por otro lado, la Lógica Booleana (LB) es una herramienta útil en el diseño de reglas para la automatización (Dougherty et al, 1988), (Ogata, 1987), (Silveira,2010) y (González, 2004). Sin embargo, los sistemas de control basados en LB presentan un desempeño limitado debido a transiciones abruptas de las acciones de control que genera. Una forma de mejorar el desempeño de estos sistemas consiste en reemplazar los Conjuntos Booleanos por Conjuntos Difusos.

En (Rovatti, 1995) se presenta una propuesta para el aprovechamiento de las características del diseño de automatismos basados en álgebra Booleana. Esta propuesta consiste en un método de minimización de expresiones en sistemas de inferencia difusa, empleando LB. Por otro lado, en (Ballén, 2003) y (Soriano, 2003) se presenta un enfoque, de tipo práctico, en el cual se propone una metodología basada en LB, empleando conjuntos difusos para lograr la implementación del proceso asociado a la defuzificación, en (Espitia, 2009) se considera que esta propuesta se puede interpretar como un sistema de inferencia difusa en sí mismo.

La Concreción Basada en Relaciones Booleanas (CBRB) o como se denominó originalmente en inglés Defuzification Based on Boolean Relations (DBR), busca plantear un método de implementación para los sistemas de lógica difusa, tomando como referencia el diseño de automatismos, ya que estos sistemas son muy empleados en control de procesos (Silveira,2010) y (González, 2004) por su facilidad de implementación. Esta técnica de diseño considera los sensores, los actuadores y las Relaciones Booleanas involucradas en las estrategias de control de un proceso industrial y fue denominada CBR por (Soriano, 2003).

Uno de los problemas prácticos y comunes en ingeniería es el control de nivel. El nivel representa un elemento de tipo *stock* en Dinámica Industrial (DI). Un enfoque usado para el control de nivel consiste en la implementación de controladores basados en LD, donde algunos ejemplos de estas aplicaciones se encuentran en (Nobre, 2000), (Acevedo et al, 2007), (Gao et al, 2002), (Kumar et al, 2005) y (Jinqiang et al, 2007). En este documento, se considera el control de un sistema de nivel conceptualmente similar al presentado en (Espitia, 2009). La metodología de diseño empleada, consiste en realizar una aplicación desde la LB y luego emplear conjuntos difusos para tener una implementación con un SBRD del tipo CBR. Este permite emplear los llamados “casos no importa” para el diseño del controlador. El punto clave del uso de esta técnica, incorporada al pensamiento sistémico, consiste en que el concepto de las válvulas virtuales propuesto en (Soriano, 2003) empata con el concepto de flujos manejado en el método de modelado y simulación de DI propuesto por (Forrester, 1961).

En lo concerniente al control gerencial y la causalidad presente en la DI, los Mapas Cognitivos Difusos (MCD) resultan útiles para hacer una representación de relaciones causales basadas en el lenguaje natural del decisor, con un estándar definido de relación entre conceptos (Perusich, 2006), (Carvalho, 2000) y (Laukkanen, 1998). Complementariamente la DI según presenta (Forrester, 1961) permite definir los posibles elementos dinámicos que afectan el comportamiento de un sistema, los cuales pueden aprovecharse para la simulación de los MCD. De esta manera, la metodología de simulación de DI brinda varias herramientas que se pueden utilizar para la simulación de MCD, permitiendo evidenciar retardos, retroalimentaciones, variables de estado y escenarios de simulación dinámica mediante software diseñado para este propósito.

Un MCD se puede utilizar para modelar y controlar un proceso (Driankov et al, 1996) y (Stylios et al, 2000). Esta aplicación del MCD se examina con el fin de plantear su combinación con sistemas dinámicos para realizar el control de los mismos en tanto que se plantea la incorporación de CBR. En este contexto, el conocimiento existente sobre el funcionamiento y el comportamiento de un sistema se puede representar mediante un MCD y CBR resulta útil para plantear reglas lingüísticas de control de una variable de estado, modelando el control del proceso. En general, la utilización de MCD es apropiada si la naturaleza del proceso bajo control es tal que los modelos analíticos no existen o son inadecuados, pero un operador humano puede controlar manualmente el proceso en un grado satisfactorio.

2. CONTROL DE UNA VARIABLE DE ESTADO

Los elementos de la metodología de diseño se presentan como sigue.

2.1 CONTROL DE UNA VARIABLE DE ESTADO EN DINÁMICA INDUSTRIAL

Jay Forrester estableció un paralelo entre los sistemas dinámicos (o en evolución) en la industria y los sistemas hidrodinámicos. Estos sistemas están constituidos por depósitos, intercomunicados por canales con o sin retardos, que varían su nivel mediante flujos e incluyen la participación de fenómenos exógenos.

La DI se plantea en términos de subsistemas análogos a los sistemas hidráulicos tipo tanque. El volumen en cada tanque puede aumentar o disminuir dependiendo de la diferencia entre el flujo total entrante y el flujo total saliente, los cuales son de naturaleza continua. En modelos continuos, el cambio de valores está directamente relacionado con los cambios de tiempo y el control de estos cambios es útil en todo tipo de sistemas.

El control de nivel en sistemas hidráulicos es un problema clásico cuyas técnicas para abordarlo pueden ser de gran utilidad en DI dada la analogía de modelado. En DI el control de nivel es útil para mantener ciertos niveles objetivos en los valores de las variables de procesos clave de los sistemas industriales.

Una forma de abordar el control de nivel ha sido empleando LD. Sin embargo, cuando se desea aplicar LD para complementar los modelos usuales de control de nivel en DI, resulta problemático insertar un Sistema de Inferencia Difusa clásico dados tres aspectos: 1) Las limitantes de herramientas que puede tener el software de simulación de dinámica industrial, 2) La necesidad de programación en algunos casos para insertar un sistema de inferencia difusa y 3) Los problemas de procesamiento en la concreción (también conocida como defuzificación) de las reglas difusas agregadas por la necesidad de realizar la operación división para la normalización.

En esta sección se presenta una aplicación en la cual se parte de un diseño booleano, realizando la segmentación del universo discurso de la manera propuesta por (Soriano, 2001) y complementada por (Soriano et al, 2010).

2.2 MODELO DE SISTEMA DE UNA VARIABLE DE ESTADO CON CARACTERÍSTICAS NO LINEALES

El modelo considerado es análogo al trabajado en (Espitia et al, 2009). El esquema del sistema de inventarios de un pequeño depósito de gasolina desde un enfoque dinámico se presenta en la figura 1. En DI las variables y parámetros del sistema administrado pueden representar La Compra de Combustible (Flujo de Entrada), El Nivel de Inventario en el Depósito (*Stock*), La Capacidad del Depósito y El Flujo de Venta de Combustible que representaría ventas de combustible en promedio (en términos de una constante representativa de la válvula).

Por otro lado, considerando el sistema formado por el tanque cilíndrico de sección constante (ver Figura 1) al que entra un caudal $F_e(t)$ de un cierto fluido (para el ejemplo combustible). El tanque descarga por gravedad un caudal $F_s(t)$, que depende del nivel del fluido almacenado en el tanque, $h(t)$. Las variables y parámetros del sistema dinámico serían, $F_e(t)$: Flujo de entrada, con un máximo de 2,5 L/s ($2,5 \times 10^{-3}$ m³/s); $h(t)$: Altura de nivel de líquido en el tanque, con un máximo de 1m y un deseado de 0,8m; A: Área transversal en el tanque, con un total de 1,26 m², y K: Constante de la Válvula, con un valor de 14×10^{-4} m^{5/2}/s

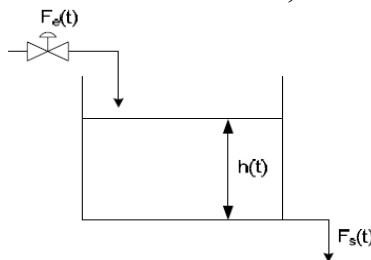


Figura 1: Esquema de representación de un tanque cilíndrico de sección constante

Se conoce el modelo no lineal que relaciona la altura $h(t)$ con el caudal de entrada $F_e(t)$:

$$A \frac{dh}{dt} = F_e(t) - A_o \sqrt{2gh(t)}$$

De otra forma, el modelo del sistema hidráulico se representa como sigue:

$$A \frac{dh}{dt} = F_e(t) - K \sqrt{h(t)}$$

3. DISEÑO DE CONTROL DIFUSO PARA UNA VARIABLE DE ESTADO USANDO CBRB EN DINÁMICA INDUSTRIAL

En esta sección se muestra el procedimiento de diseño booleano y difuso propios de la combinación de dinámica de sistemas con lógica difusa de manera apoyada. Es decir, la dinámica del sistema se representa en términos de diagramas de simulación de Forrester y el modelo conceptual de control del sistema se representa a través de reglas de acción que asocian niveles de pertenencia.

3.1 REGLAS PARA LA ACCIÓN DE CONTROL DE TIPO BOOLEANO EN DI

Un primer paso de diseño consiste en analizar los estados del sistema a través del tiempo y definir reglas de operación para lograr un nivel deseado. Para esto se consideran los diferentes niveles del tanque y sus estados en relación con las acciones a realizar en las válvulas. Como se desea que al llegar a un nivel de referencia alto se mantenga el sistema en ese estado entonces se define que al alcanzarlo la acción del flujo sea nula y al estar por debajo de ese estado entonces la acción del flujo sea proporcional a la lejanía al nivel alto. Los niveles considerados del tanque son: Nivel Bajo, B; Nivel Intermedio, I; y Nivel Alto, A.

De acuerdo al propósito que se persigue se tienen tres inferencias: 1) SI nivel h es Bajo ENTONCES flujo de entrada es Completo, 2) SI nivel h es Intermedio ENTONCES flujo de entrada es Considerable y 3) SI nivel h es Alto ENTONCES el flujo de entrada es Nulo.

La estrategia de control consiste en un controlador del tipo Encendido/Apagado (*ON/OFF*). El diseño del control consiste en encontrar la característica de transferencia del controlador $f_{ent}(u_{alto}, u_{bajo})$ para mantener el error en la altura de referencia 0.8, que está considerada como alta. Las válvulas V_p y V_g se suponen totalmente cerradas o totalmente abiertas, modelando su estado con las variables booleanas v_p y v_g que toman el valor 0 si están cerradas y 1 si están abiertas. Cuando las válvulas están abiertas los flujos $f_p(t)$ y $f_g(t)$ se suponen constantes en esta aplicación e iguales a F_p y F_g . De esta manera, se pueden identificar cuatro estados del f_{ent} dados en la tabla 1 dependiendo de la combinación del estado de las válvulas de entrada. De la misma tabla se puede expresar f_{ent} en función de v_g y v_p como

$$f_{ent} = v_g F_g + v_p F_p$$

Con $v_g, v_p \in \{0,1\}$. La característica de transferencia del controlador se diseña al encontrar v_g y v_p en término de los indicadores u_a y u_b y luego sustituirlos en la ecuación anterior.

Tabla 1: Estados del flujo de entrada al tanque cilíndrico en función de los estados de las válvulas de entrada.

V_g	V_p	f_{ent}	Interpretación
0	0	0	Si V_g está cerrada y V_p está cerrada F_{ent} es NULO
0	1	F_p	Si V_g está cerrada y V_p está abierta F_{ent} es PEQUEÑO
1	0	F_g	Si V_g está abierta y V_p está cerrada F_{ent} es GRANDE
1	1	$F_g + F_p$	Si V_g está abierta y V_p está abierta F_{ent} es COMPLETO

Cada una de las válvulas V_g y V_p tiene asociado un flujo máximo, en este caso 1,5 L/s y 1,0 L/s respectivamente. Para la implementación del controlador se utilizan conjuntos booleanos traslapados. Las funciones de pertenencia propuestas para los conjuntos booleanos empleados en la implementación del sistema de control, se pueden observar en la figura siguiente:

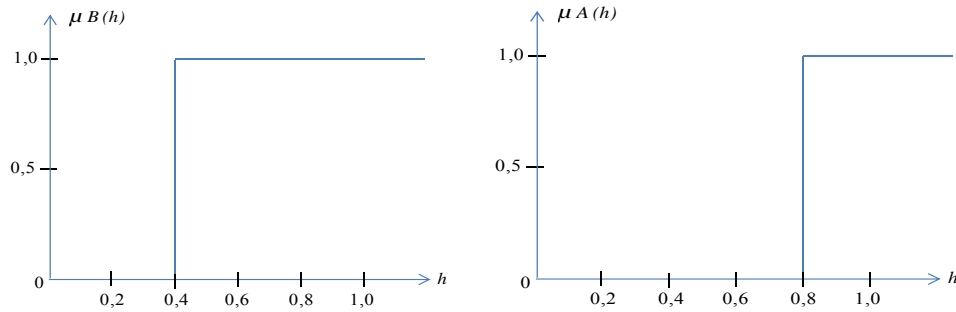


Figura 2: Conjuntos Booleanos Traslapados

Las regiones que se observan con los anteriores conjuntos booleanos son: Baja, con pertenencias $\mu_B(h) = 0$ y $\mu_A(h) = 0$; Media, con pertenencias $\mu_B(h) = 1$ y $\mu_A(h) = 0$, y Alta, con pertenencias $\mu_B(h) = 1$ y $\mu_A(h) = 1$. En la tabla 2 se presenta la respectiva codificación binaria de los estados y de las acciones de control:

Tabla 2: Codificación Booleana de estados y acciones.

μ_B	μ_A	Y_{VG}	Y_{VP}
0	0	1	1
1	0	1	0
1	1	0	0

Las ecuaciones para las funciones de activación se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 3: Ecuaciones para activación en términos de conjuntos, lógica y algebra booleana

Conjuntos	Lógica Computacional	Algebra Booleana
$Y_{VG} = (\bar{B} \cap \bar{A}) \cup (B \cap \bar{A})$	$Y_{VG} = (NOT(B) AND NOT(A)) OR (B AND NOT(A))$	$Y_{VG} = B^1 \cdot A^1 + B \cdot A^1$
$Y_{VP} = (\bar{B} \cap \bar{A})$	$Y_{VP} = (NOT(B) AND NOT(A))$	$Y_{VP} = B^1 \cdot A^1$

Al realizar la simplificación teniendo en cuenta el caso *no importa*¹, se obtienen las ecuaciones que se presentan en la tabla 4.

Tabla 4: Ecuaciones para activación simplificada en términos de conjuntos, lógica y algebra booleana

Conjuntos	Lógica Computacional	Algebra Booleana
$Y_{VG} = \bar{A} \cup \bar{B}$	$Y_{VG} = (NOT(A) OR NOT(B))$	$Y_{VG} = A^1 + B^1$
$Y_{VP} = (\bar{B})$	$Y_{VP} = (NOT(B))$	$Y_{VP} = B^1$

El caso no importa es usado principalmente para simplificar Y_{VP} y Y_{VG} .

3.2 REGLAS PARA LA ACCIÓN DE CONTROL DE TIPO DIFUSO MEDIANTE CBRB

En este tipo de diseño los conjuntos booleanos se reemplazan por unos conjuntos difusos correspondientes en los cuales se considera un valor de α_{corte} . Con los conjuntos difusos ya definidos es posible implementar las relaciones

¹ Cuando la pertenencia de A es 0 y la pertenencia de B es 1 (caso que no se da en la realidad del sistema)

encontradas en el diseño booleano empleando las operaciones definidas por la teoría de conjuntos difusos como lo son el complemento, la intersección y la unión. Un aspecto adicional a considerar en el diseño CBRB es el resultado que se tiene cuando existe una simplificación de términos dependiendo de si se cumplen o no las respectivas premisas requeridas para dicha simplificación.

Los conjuntos difusos se pueden construir con un α_{corte} igual a 0,5 de manera que no se realiza solapamiento para mantener las regiones booleanas. Los conjuntos definidos se observan en la figura 14.3

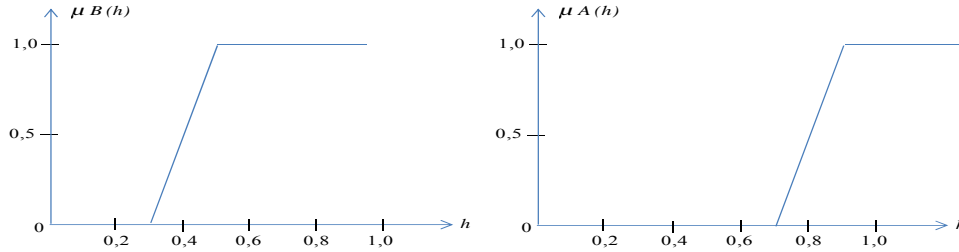


Figura 3: Conjuntos difusos definidos

A continuación se presenta el esquema del modelo mediante dinámica industrial para la representación del sistema de control del nivel de un tanque mediante reglas booleanas. Se ha utilizado para la construcción y simulación del modelo el software de dinámica de sistemas VENSIM. Nótese las características de modelado lingüístico observadas en el modelo que representa el sistema dinámico.

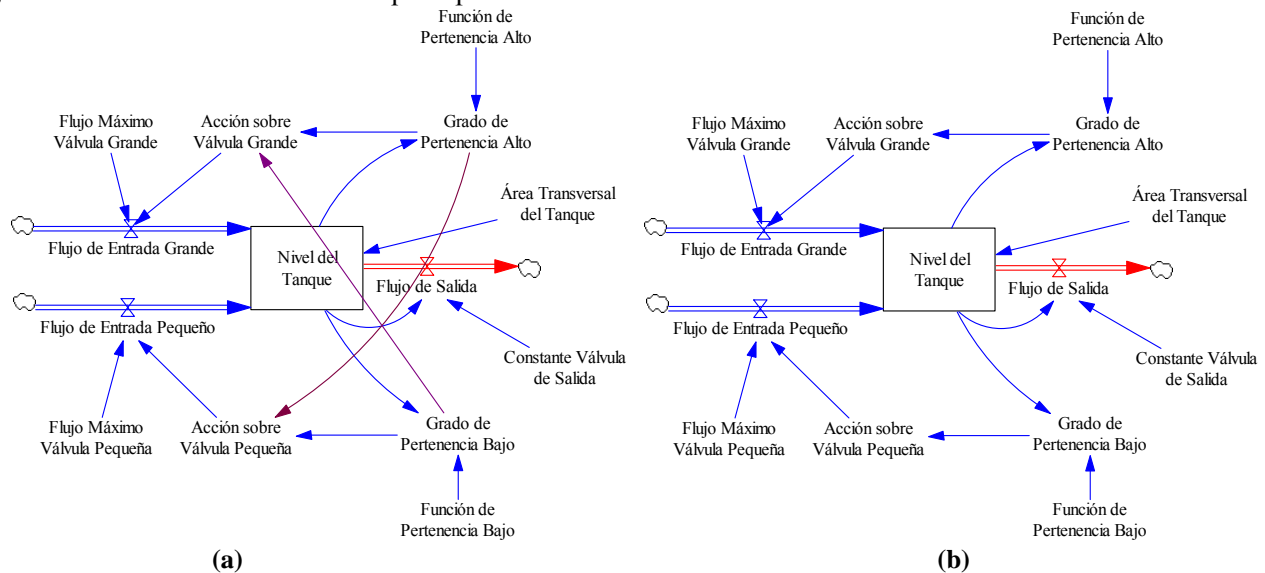


Figura 4: Modelo de Simulación de DI del Sistema Control una variable de estado mediante reglas usando (a) funciones de activación no simplificadas y (b) funciones de activación simplificadas

La configuración de la simulación se muestra en la siguiente figura. En esta se observa básicamente que el tiempo inicial es 0 y el final 60 minutos. El tipo de integración numérica utilizada es el de Euler y el tiempo de paso de simulación es 0,125. Las funciones de pertenencia propuestas para los conjuntos de pertenencia de la figura 3 en el diseño del sistema de control como modelo de simulación de dinámica industrial se implementan en VENSIM a través de funciones del tipo *lookup table*. La respuesta dinámica del sistema considerando las funciones simplificadas son las siguientes:

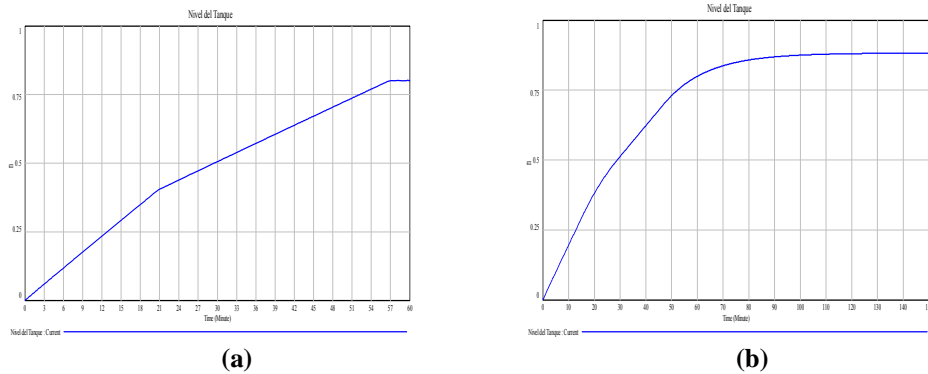


Figura 5: Respuestas dinámicas del sistema considerando funciones de activación simplificadas usando: (a) Funciones de Pertenencia Booleanas, (b) Funciones de Pertenencia Difusas (trapezoidales) mediante CBRB.

Las curvas de respuesta en la figura 5 permiten observar que el comportamiento dinámico de los controladores difusos tipo CBRB es más suavizado, más rápido y con mayor acercamiento al valor deseado (menor error de estado estacionario), que el de un controlador implementado mediante condiciones netamente booleanas. Mediante la simplificación basada en las relaciones booleanas se podría reducir la complejidad de una base de reglas lingüísticas a la vez que se suaviza la acción de control mediante el uso de conjuntos difusos. Esto es precisamente lo que hace de gran utilidad el uso de CBRB.

Vale la pena notar que la curva de respuesta más suave se consigue mediante una estrategia de gestión o control que usa conjuntos difusos en lugar reglas de negocio con condiciones y acciones netamente booleanas. Esto básicamente es porque las transiciones abruptas de las acciones de tipo booleano (crisp) afectan la capacidad de la organización o sistema para alcanzar un claro, coherente y consistente equilibrio dinámico. En la figura 6, se observan las gráficas de acción de control del sistema para mantener un nivel deseado de la variable de estado. Se compara las acciones de control, en términos de flujo de entrada, concebidas mediante conjuntos booleanos en contraste con las de tipo difuso (trapezoidal).

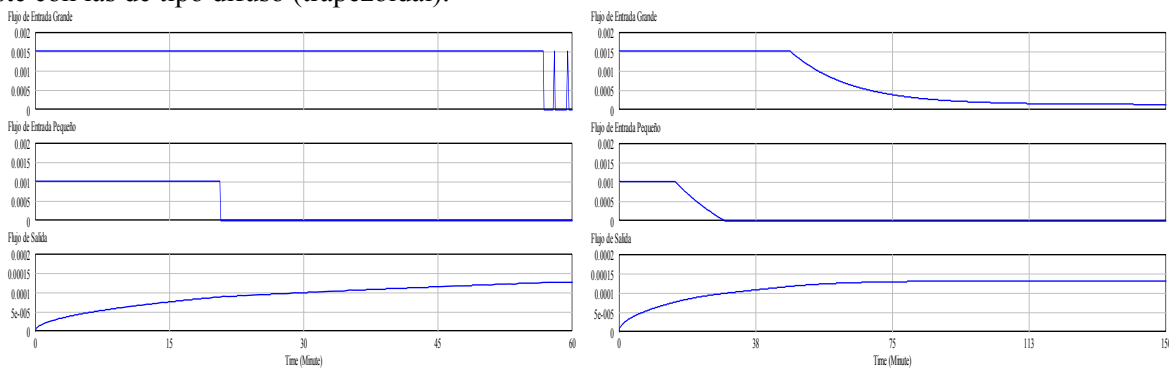


Figura 6: Transiciones de las acciones del sistema considerando acciones de control mediante: a) Funciones de Pertenencia Booleanas, b) Funciones de Pertenencia Difusas (trapezoidales).

Los modelos de gestión o control de sistemas mediante Concreción Basada en Relaciones Booleanas implementados desde la filosofía de Simulación de Dinámica Industrial permiten evidenciar gráficamente las funciones de activación en términos de flujos que afectan niveles (las conocidas *salidas virtuales* de un CBRB son en este contexto las válvulas que afectan los *stocks* de un sistema dinámico industrial). De esta manera también la simplificación de funciones se evidencia de manera gráfica. Por tanto si se tiene un diagrama causal basado en una base de reglas lingüísticas de tipo difuso mediante la implementación tipo CBRB se podrá visualizar simplificado mediante las técnicas de simplificación aplicadas a relaciones booleanas de las funciones de

activación. Teniendo en cuenta las posibilidades que ofrece la CBRB se hace una herramienta útil para la representación y reducción de mapas cognitivos difusos de tipo lingüístico.

Adicionalmente, el modelado de un decisor mediante reglas de negocio de la operación (producción) permite implementar sistemas de administración de procesos de negocio, automatizando a través software dedicado para este efecto. El software para administración de negocios generalmente permite implementar un motor de inferencia que administra la ejecución, disparo, y orden de las reglas basado en las condiciones que se cumplan en ejecución del programa y el estado interno del motor de evaluación. Estas condiciones típicamente son booleanas pero al aplicar CBRB se encuentra una oportunidad de mejora a las acciones abruptas, propias de las condiciones booleanas.

4. PROPUESTA DE MAPA COGNITIVO DIFUSO INVOLUCRANDO CONCRECIÓN BASADA EN RELACIONES BOOLEANAS.

Retomando el sistema presentado en la sección 2, en el cual se realiza un control del nivel de flujo acumulado mediante el actuador que en adelante se denominará válvula 1, se propone la inclusión de concreción basada en relaciones booleanas para determinar un control del nivel de flujo acumulado en el tanque mediante el actuador válvula 1. La CBRB se presentó en la sección 3 y esta permite describir lingüísticamente las reglas de control para el concepto Válvula 1.

Teniendo en cuenta lo anterior y el trabajo desarrollado por (Stylios et al, 2000), se evidencia la utilidad tanto de Mapas Cognitivos Difusos como de Concreción Basada en Relaciones Booleanas para el control de sistemas, planteando un Mapa Cognitivo Difuso Híbrido que combina las características de MCD de tipo Numérico y las características de MCD de tipo lingüístico. Básicamente, la descripción de las reglas de causalidad del concepto válvula 1 se describe mediante Concreción Basada en Relaciones Booleanas (CBRB²) (Soriano, 2001) y las reglas de causalidad inmersas en los conceptos tanque y válvula 2 se representan de manera numérica con grados de relación entre conceptos en el rango [-1, 1].

El primer paso para la construcción del Mapa cognitivo Difuso, que modelará y controlará un nivel, es la determinación de los conceptos del MCD. Los Conceptos se asociaran a las variables y los estados del proceso como por ejemplo el nivel del flujo acumulado en el tanque o el estado de las válvulas. De esta manera se desarrolla un MCD primitivo con tres conceptos y posteriormente se puede añadir cualquier nuevo concepto, que mejore el modelo y el control del sistema.

Concepto 1. La cantidad (Nivel) de flujo que contiene el tanque. Esta cantidad depende del estado de la Válvula 1

Concepto 2. El estado de la válvula 1. La válvula puede estar cerrada, abierta o parcialmente abierta.

Concepto 3. El estado de la válvula 2. La válvula puede estar cerrada, abierta o parcialmente abierta.

Después de haber seleccionado los conceptos que pueden representar el modelo del sistema y su comportamiento operativo, se deben determinar las interconexiones entre los conceptos.

Al principio, los expertos deciden para cada concepto con que otro concepto se va a conectar y determinan el signo y el peso de cada conexión. En la figura 7 se presenta el modelo de MCD construido para esta propuesta que involucra CBRB. Las conexiones entre los conceptos son las siguientes:

Evento 1 y 4. El evento 1 conecta el concepto 2 (válvula 1) con el concepto 1 (cantidad de flujo acumulado en el tanque) y se refiere a la relación entre el estado de la válvula 1 con la cantidad de líquido en el tanque. El evento 4 se refiere al concepto 1 (nivel de flujo en el tanque) relacionado con el concepto 3 (estado de la válvula 2),

² Usualmente esta técnica es conocida con la sigla CBR tal como denominó el autor de la propuesta de Concesor Basado en Relaciones Booleanas. Sin embargo, en este documento se usa la sigla CBRB como una expresión general de la Concreción Basada en Relaciones Booleanas.

cuando el nivel del flujo acumulado en el tanque es muy bajo, entonces la válvula 1 (concepto 2) se abre y el flujo entra en el tanque. La válvula 2 hace que se incremente o no de la cantidad de líquido en el tanque mediante las siguientes reglas descritas en la sección 3. Homologando estas reglas al análisis usual de MCD de tipo numérico se pueden usar las reglas de activación presentadas en la tabla 3 o su versión simplificada presentada en la tabla 4. Adicionalmente usando los conjuntos difusos definidos en la figura 3 se puede implementar el concepto Válvula 1 mediante CBRB.

Evento 2. Este conecta concepto 3 (válvula 2) con el concepto 1; el estado de la válvula 3 provoca la disminución o no de la cantidad de flujo acumulado en el tanque.

Evento 3. Este se refiere al concepto 1 (Nivel de flujo acumulado en el tanque) relacionado con el concepto 2, cuando el nivel del flujo acumulado en el tanque es alto, se necesita cerrar la válvula 1 (concepto 2) y así la cantidad de flujo en el tanque se reduce.

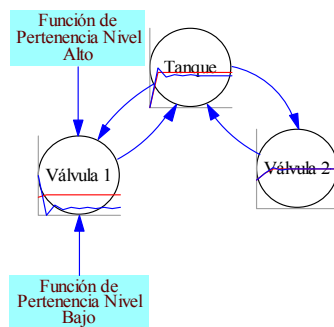


Figura 7: Modelo de simulación MCD híbrido numérico lingüístico mediante CBRB

En la figura 7 se observa que las funciones de pertenencia para el modelo lingüístico de las reglas difusas entran a hacer parte del modelo del MCD. Adicionalmente se observa el modelo en la modalidad de simulación para comparación de cambios, que provee *Vensim (Automatically simulate on change)*. Esta modalidad permite comparar la respuesta temporal del MCD con base de reglas mediante CBRB (curva azul) respecto de un MCD de tipo numérico (curva roja).

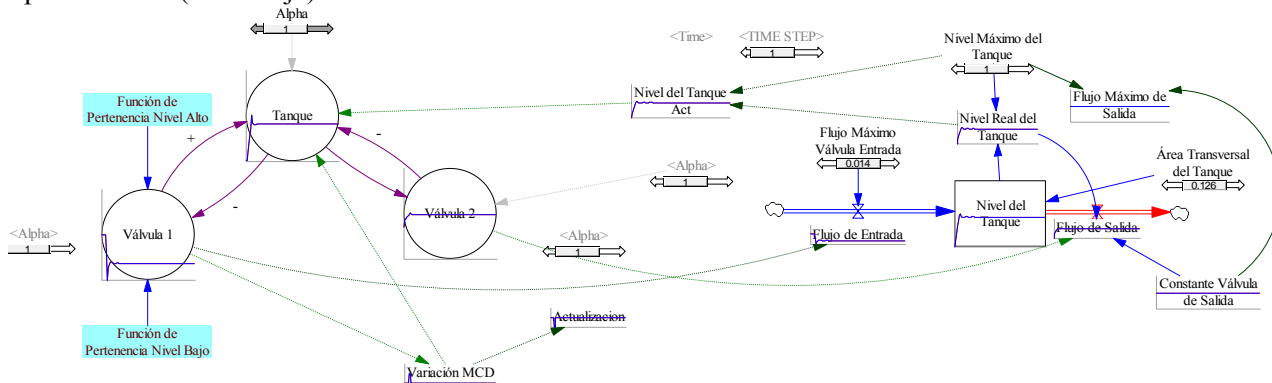


Figura 8: Modelo de simulación MCD híbrido numérico lingüístico mediante CBRB interactuando con el modelo dinámico del sistema de una variable de estado.

En la figura 7 se evidencia el esquema de control propuesto a través de un MCD que incorpora CBR para el control de una variable de estado de un modelo de DI. La base de reglas está contenida en el concepto válvula 1. En conclusión, nunca antes se había propuesto la vinculación de CBRB y MCD, ni tampoco la incorporación de estas técnicas a DI. Sin embargo, esta propuesta tiene un alto potencial de aplicación en ingeniería de control, gestión de organizaciones y toda ciencia que aplique indicadores y acciones para llegar a un nivel deseado.

REFERENCES

- Acevedo, T., Martínez, C., Díaz, J. (2007). "Diseño de un Controlador Lógico Difuso Para Sistema De Calefaccion", Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada, vol. 2, no. 10, 10 pp. 53 - 58.
- Babuska, R. (1998) "Fuzzy Modeling for Control". Boston: Kluwer Academia publishers.
- Ballén, A., Rodríguez, C. (2003). Diseño e implementación de un controlador difuso autosintonizado sobre microcontroladores, aplicado al control del péndulo invertido. Tesis de pregrado, Ingeniería Electrónica, Universidad Distrital Francisco José De Caldas.
- Carvalho, J. P., & Tomè, J. A. (2000). Rule based fuzzy cognitive maps-qualitative systems dynamics. In Fuzzy Information Processing Society, 2000. NAFIPS. 19th International Conference of the North American (pp. 407-411). IEEE.
- Dougherty, E., and Giardina, C. (1988). "Mathematical methods for artificial intelligence and autonomous systems". Prentice-Hall.
- Driankov, D., Hellendoorn, H., and Reinfrank, M. (1996). An introduction to Fuzzy Control. New York: Springer-Verlag.
- Espitia, H. (2009). Aplicación del Concesor Basado en Relaciones Booleanas para Sistemas de Lógica Difusa Tipo Dos, Tesis de Maestría en Ingeniería Industrial, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, págs. 115-134
- Forrester, J.W. (1961). "Industrial Dynamics", The MIT Press, Cambridge, M.A.
- Gao, Z., Trautzsch, T. (2002). "A Stable Self-Tuning Fuzzy Logic Control System for Industrial Temperature Regulation", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 38, no. 2, pp. 414 – 424.
- González, J. M. (2004). Automatización de Procesos Industriales, Dpto. I.S.A., EUITI e ITT - UPV/EHU, Ingeniería de Organización, pp 73 – 100, 2004
- Jinqiang, X., Ziping, F. (2007). "A Novel Self-adaptive Fuzzy-PID Controller for Temperature Control in Variable Refrigerant Volume (VRV) Air Conditioning Systems", Advances in Intelligent Systems Research ISKE.
- Klir, G., and Yuan, B. (1995). "Fuzzy Sets and Fuzzy Logic". New Jersey: Prentice Hall.
- Kumar, G., Chandra, S., Surekha, B. (2005) "A Genetic Based Neuro-Fuzzy Controller for Thermal Processes", Journal of Computer Science & Technology JCS&T, vol. 5, no. 1, pp. 37 – 43.
- Laukkanen, M. (1998). Conducting causal mapping research: opportunities and challenges. Managerial and organisational cognition theory, method, and research, 168-191.
- Nobre, F. S. M., Nakasone, J. J., Palhares, A. G. B., Madrid, M. K., & Roy, R. (2000). "Fuzzy logic in management control: a case study". In Engineering Management Society, 2000. Proceedings of the 2000 IEEE, pp. 414-419.
- Ogata, K. (1987). "Dinámica de Sistemas". Prentice-Hall Hisp.
- Perusich, K., & McNeese, M. D. (2006). Using fuzzy cognitive maps for knowledge management in a conflict environment. Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, IEEE Transactions on, 36(6), 810-821.
- Rovatti, R., Guerrieri, R., and Bacarani, G. (1995). "An Enhanced Two-Level Boolean Synthesis Methodology for Fuzzy Rules Minimization". *IEEE Transactions On Fuzzy Systems*, vol. 3, no. 3, pp. 288 – 299.
- Silveira, L. (2010). "Diseño e implementación de un motor de reglas dinámicas usando especificaciones GeneXus", Universidad de la República, Uruguay, pp. 55-65
- Soriano, J., González, O., Munar, F., Ramos, A. (2001). "Propuesta de concesor basado en relaciones Booleanas", Revista de Ingeniería, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, vol. 6, no. 1, pp 42-50.
- Soriano Méndez, J. J., Cuchango, E. & Eduardo, H. (2010). Sistema de inferencia difusa basado en relaciones Booleanas. Ingeniería, 15(2), 52-66
- Stylios, C. D., & Groumpos, P. P. (2000). Fuzzy cognitive maps in modeling supervisory control systems. Journal of Intelligent and Fuzzy Systems, 8(1), 83-98.

Authorization and Disclaimer

Authors authorize LACCEI to publish the paper in the conference proceedings. Neither LACCEI nor the editors are responsible either for the content or for the implications of what is expressed in the paper.