

UNIVERSIDAD DE GRANADA

**E.T.S. DE INGENIERÍAS INFORMÁTICA Y DE
TELECOMUNICACIÓN**



**Departamento de Ciencias de la Computación e
Inteligencia Artificial**

**Aportaciones al diseño e implementación de
controladores difusos: Aplicación al curado del
tabaco en hoja**

TESIS DOCTORAL

Ihosvany Álvarez López
Granada, Febrero de 2006



**Aportaciones al diseño e implementación de
controladores difusos: Aplicación al curado del
tabaco en hoja**

MEMORIA QUE PRESENTA

Ihosvany Álvarez López

PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR

Febrero de 2006

Directores

José Luis Verdegay Galdeano y Orestes Llanes Santiago

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA
COMPUTACIÓN E INTELIGENCIA ARTIFICIAL**

La memoria titulada **Aportaciones al diseño e implementación de controladores difusos: Aplicación al curado del tabaco en hoja**, que presenta D. Ihosvany Álvarez López para optar al grado de Doctor, ha sido realizada en el Departamento de Ciencias de la Computación e Inteligencia Artificial de la Universidad de Granada, bajo la dirección conjunta del Dr. D. José Luis Verdegay Galdeano, Catedrático del referido departamento, y del Dr. D. Orestes Llanes Santiago, Profesor Titular del Instituto Superior Politécnico “José Antonio Echeverría” de la Habana (Cuba).

Granada, febrero de 2006

El doctorando

Los directores

Fdo. Ihosvany Álvarez López

Fdo. José Luis Verdegay Galdeano

A handwritten signature in black ink, enclosed within a large, hand-drawn oval. The signature appears to be 'Orestes Llanes'.

Fdo. Orestes Llanes Santiago

Agradecimientos

*A mis padres y hermanos por su apoyo.
A José Luis Verdegay por su ayuda incondicional.*

La oscuridad nos envuelve a todos,
pero mientras el sabio tropieza en alguna pared
el ignorante permanece tranquilo en
el centro de la estancia.
(A. France)

ÍNDICE

| | |
|---|-----|
| Introducción general | 9 |
| Capítulo I. Lógica difusa y control automático | 21 |
| Introducción | 23 |
| 1.1 Introducción a la teoría de conjuntos difusos, conceptos fundamentales | 23 |
| 1.2 Relaciones difusas | 32 |
| 1.3 Variable lingüística | 33 |
| 1.4 Reglas difusas del tipo “if – then” | 35 |
| 1.5 Estructura de un controlador difuso | 35 |
| 1.6 Implementación de controladores difusos | 43 |
| 1.7 Representación de los conjuntos difusos | 44 |
| 1.8 Estructura de la base de conocimientos | 50 |
| 1.9 Interfaz de desdifuminación | 56 |
| 1.10 Adquisición, pre y post procesamiento de datos | 62 |
| Capítulo II. El proceso de curado del tabaco en hoja | 69 |
| Introducción | 71 |
| 2.1 Conceptos fundamentales sobre aire húmedo | 75 |
| 2.2 Proceso de curado del tabaco | 81 |
| 2.3 El proceso de secado de la hoja de tabaco en cuba | 84 |
| 2.4 Cura controlada. etapas del proceso | 86 |
| 2.5 Tecnología aplicada en el proceso de cura controlada | 89 |
| 2.6 Análisis de los sistemas tecnológicos usados en el proceso de cura de tabaco justificación de la propuesta | 91 |
| 2.7 Cambios tecnológicos requeridos por el sistema | 101 |
| 2.8 Necesidad del sistema | 102 |
| Capítulo III. El sistema FzController | 105 |
| Introducción | 107 |
| 3.1 Otros sistemas para el desarrollo de sistemas difusos | 107 |
| 3.2 Descripción general del sistema FzController | 108 |
| 3.3 Módulos para el diseño de controladores difusos | 108 |
| 3.4 Módulo de control en tiempo real | 115 |
| 3.5 Generación automática de código para autómatas programables industriales y lenguajes de alto nivel | 116 |

| | |
|--|-----|
| 3.6 Diseño del controlador de humedad y de temperatura para la cura controlada de tabaco en hojas | 119 |
| Conclusiones. Futuros desarrollos | 137 |
| Conclusiones | 139 |
| Futuros desarrollos | 141 |
| Bibliografía | 143 |

INTRODUCCIÓN GENERAL

INTRODUCCIÓN GENERAL

Los antecedentes de esta tesis se remontan al año 1998, cuando la Universidad de Granada y la dirección de la Residencia Cardenal Cisneros de esta ciudad, conceden una beca al autor de esta memoria para realizar estudios de doctorado durante el curso 1999/2000 en el Departamento de Ciencias de la Computación e Inteligencia Artificial.

A consecuencia de esta beca, se inician unas estrechas relaciones entre el mencionado Departamento y el de Automática y Computación del Instituto Superior Politécnico “José Antonio Echeverría” de La Habana (Cuba) que, finalmente, cristalizan en la presentación de un proyecto de investigación conjunto, dentro de la correspondiente convocatoria que realiza la Consejería de Presidencia de la Junta de Andalucía, que lleva por título: “Automatización del proceso de curado de tabaco en hojas con técnicas de Inteligencia Artificial”.

Es absolutamente necesario conocer las razones que justifican esta línea de actuación y cooperación entre ambas instituciones, de obvia índole económica, pero también científica y de oportunidad regional, para conocer la trascendencia que los resultados alcanzados pueden tener en aquella zona, de ahí que en lo que sigue, y a título introductorio, procuremos dibujar ese marco.

El curado de la hoja de tabaco es el proceso que se realiza a esta inmediatamente después de su recolección en el campo. Este proceso se puede realizar de manera natural o en una atmósfera controlada. Alrededor del año 1986 se comenzó a introducir en Cuba la técnica del curado de tabaco de forma controlada, es decir, llevado a cabo en cámaras de curado, que son instalaciones aisladas térmicamente del medio exterior. En las mismas se controlan los parámetros de humedad y temperatura para favorecer el proceso de curado de la hoja de tabaco. Por otro lado el curado natural está sometido a las perturbaciones del clima, lo que trae como consecuencia que la hoja de tabaco no alcance un color homogéneo en toda la superficie, quedando veteada con tonalidades entre amarillo y carmelita, y esto atenta contra los parámetros de calidad de la hoja. Como consecuencia se tienen resultados

inaceptables para su entrega a la producción, derivándose de ello pérdidas económicas considerables. Actualmente el curado se realiza de manera natural en la mayor parte de las zonas tabacaleras cubanas. A lo largo de todo el proceso, el criterio de los obreros expertos en el curado (los denominados curadores) es fundamental para obtener una hoja con la calidad necesaria, es decir, el proceso esta controlado por medio de reglas que se basan en la experiencia de los curadores.

Como se sabe, las reglas de control basadas en la experiencia humana pueden reproducirse muy adecuadamente a partir de los modelos y las técnicas que aporta la lógica difusa, para obtener resultados que son cualitativamente competitivos con los que producen los operadores humanos, pero a un costo muchísimo menor que el asociado a estos últimos. El empleo de la lógica difusa en el control de sistemas electrodomésticos comercializados tales como lavadoras, microondas, cámaras de vídeo o fotográficas, etc., y en sistemas industriales como los de navegación (metro y helicópteros), ferrocarril, hornos, etc., son una prueba palpable de todo ello.

Las técnicas de control automático tienen un campo prácticamente ilimitado de aplicación, ya que en todo proceso de cualquier naturaleza, la posibilidad de contar con sistemas capaces de mantener la intervención de la mano del hombre, es intrínsecamente útil. Si además de ello se consigue optimizar la evolución del proceso, entonces ya no solamente se puede hablar de utilidad sino de avance tecnológico, ya que en infinidad de ocasiones ni la intervención humana podría lograr los mismos efectos. Esto sucede generalmente con las situaciones de elevada complejidad, o que tienen que operar con un tiempo de respuesta muy corto, casos ambos que pueden superar muy ampliamente los límites de la capacidad humana. El mismo tiempo, este tipo de sistemas elimina los fallos por distracciones, cansancio, tensión o cualquier condicionamiento que pudiera alterar el correcto funcionamiento o la toma de decisiones asimismo correcta.

En cualquier caso, bien sea un sistema físico, lógico o conceptual, lo cierto es que la teoría clásica de control exige un conocimiento en profundidad de los procesos a controlar y de la respuesta de los sistemas a los diferentes estímulos, cosa que no siempre resulta posible. Es

aquí donde la lógica difusa juega un papel esencial, por admitir información imprecisa (como la que generalmente proporcionamos los seres humanos), sin que por ello se llegue a soluciones menos robustas que con el control clásico ni, por supuesto, menos fiables. Muy al contrario, con muchísima asiduidad (hay suficiente bibliografía especializada al respecto) sucede precisamente lo opuesto.

Dada la enorme importancia de los sistemas de control, su proliferación y el hecho de que los sistemas de control difusos aportan soluciones muy sencillas y eficaces por un procedimiento, además, fácil de llevar a la práctica, el control basado en lógica difusa constituye una de las áreas de aplicación más importantes de dicha lógica, y más idóneo para realizar desarrollos innovadores en áreas tecnológicas emergentes.

Este trabajo se enmarca en el campo del Control Inteligente aplicando Lógica Difusa, y es que los problemas de control que en ocasiones son tan sencillos de resolver aplicando la experiencia y heurísticas, son de difícil solución aplicando técnicas computacionales: el ser humano opera con criterios de tipo lingüístico tales como “*más o menos frío*” y ejecuta tareas de control de manera trivial empleando estas expresiones, pero encontrar un algoritmo que sustituya esos criterios se torna complejo. Concretamente, el marco de referencia de la memoria es el que proporciona la “Soft Computing”. A continuación, tomando como referencia la definición de esta reciente área, se justifica esta elección, demostrando tanto su idoneidad metodológica como la actualidad del tema abordado.

Hasta que en 1994 L.A. Zadeh dio la primera definición de “Soft Computing“, la referencia a los conceptos que actualmente esta maneja solía hacerse de forma atómica, es decir, se hablaba de manera aislada de cada uno de ellos con indicación del empleo de metodologías fuzzy. Pero aunque la idea de establecer el área de Soft Computing se remonta a 1990, fue en 1994 cuando L.A. Zadeh propuso la definición de Soft Computing, estableciéndola en los siguientes términos:

“Básicamente, Soft Computing no es un cuerpo homogéneo de conceptos y técnicas. Mas bien es una mezcla de distintos métodos que de una forma u otra

cooperan desde sus fundamentos. En este sentido, el principal objetivo de la Soft Computing es aprovechar la tolerancia que conllevan la imprecisión y la incertidumbre, para conseguir manejabilidad, robustez y soluciones de bajo costo. Los principales ingredientes de la Soft Computing son la Lógica Fuzzy, la Neurocomputación y el Razonamiento Probabilístico, incluyendo este último a los Algoritmos Genéticos, las Redes de Creencia, los Sistemas Caóticos y algunas partes de la Teoría de Aprendizaje. En esa asociación de Lógica Fuzzy, Neurocomputación y Razonamiento Probabilístico, la Lógica Fuzzy se ocupa principalmente de la imprecisión y el Razonamiento Aproximado; la Neurocomputación del aprendizaje, y el Razonamiento Probabilístico de la incertidumbre y la propagación de las creencias”.

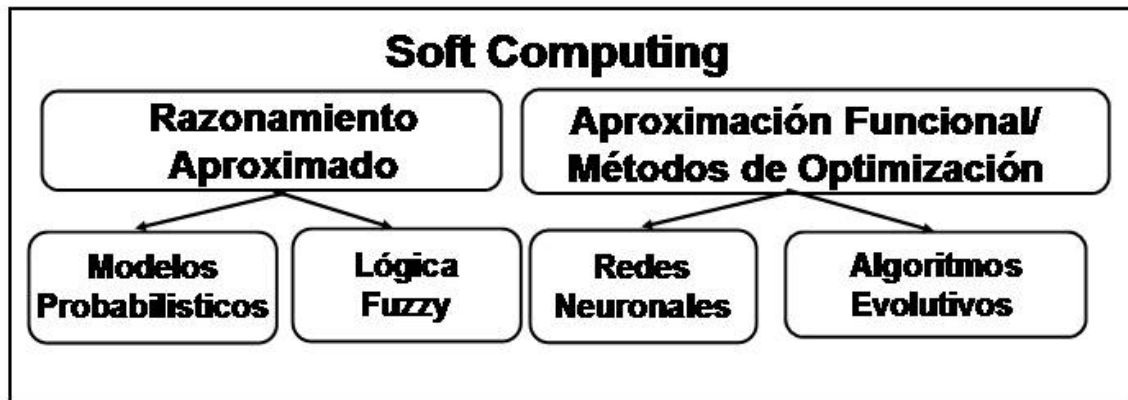
Queda claro así como la Soft Computing no está definida precisamente, sino que en una primera aproximación se define por extensión, por medio de distintos conceptos y técnicas que intentan superar las dificultades que surgen en los problemas reales que se dan en un mundo que es impreciso, incierto y difícil de categorizar.

El punto de vista que aquí consideramos para abordar la amplia área de la Soft Computing, y por tanto nuestra tesis, implica otra forma de enfocarla. Se trata de considerarla como un contrapunto de lo que podríamos denominar “Hard Computing”, de manera que podría verse la Soft Computing como un conjunto de técnicas y métodos que permitan tratar las situaciones prácticas reales de la misma forma que suelen hacerlo los seres humanos, es decir, en base a inteligencia, sentido común, consideración de analogías, aproximaciones, etc. En este sentido Soft Computing es una familia de métodos de resolución de problemas cuyos primeros miembros serían el Razonamiento Aproximado y los Métodos de Aproximación Funcional y de Optimización, incluyendo los de búsqueda.

En este sentido, la Soft Computing queda situada como la base teórica del área de los Sistemas Inteligentes, y se hace patente que la diferencia entre el área de la Inteligencia Artificial clásica, y la de los Sistemas Inteligentes, es que la primera se apoya en la denominada Hard Computing, mientras que la segunda lo hace en la Soft Computing.

Desde este punto de vista, en un segundo nivel, la Soft Computing se puede desgranar entonces en otros componentes que ayudan a una definición por extensión, como la que se dio en primer lugar. Desde el principio se han considerado que en ese segundo nivel los componentes mas importantes son el Razonamiento Probabilístico, la Lógica y los Conjuntos Difusos, las Redes Neuronales y los Algoritmos Genéticos, que debido a su alta interdisciplinariedad, la importancia de sus aplicaciones, y el volumen de resultados logrados, inmediatamente se destacaron de otras metodologías como, las ya citadas Teoría del Caos, Teoría de la Evidencia, etc.

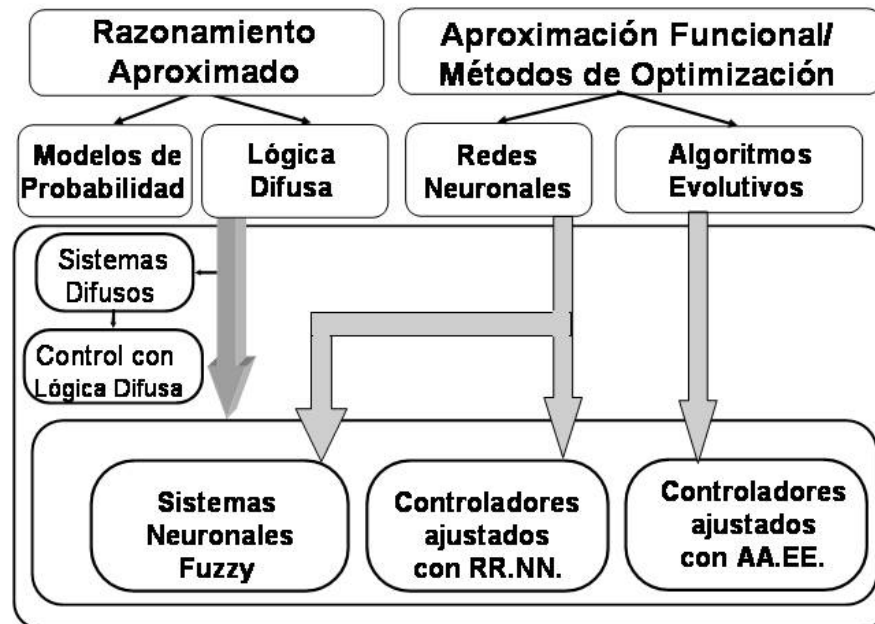
Esta situación es la que recoge el siguiente esquema



Así, desde esta última concepción de Soft Computing, podemos hacer una descripción de otras áreas que surgen en torno a ella, sin mas que tener en cuenta las posibles combinaciones que pueden darse:

1. Moviéndonos en el primer nivel a una de las dos grandes áreas que abarca la Soft Computing, la Aproximación Funcional/métodos de Optimización, el primer componente que aparece es el de las Redes Neuronales, y por tanto los diversos modelos de las mismas (Recurrentes, "Feedforward", Perceptrón, Hopfield, ...). En este contexto, la interacción con las metodologías de la Lógica Fuzzy y los Algoritmos Evolutivos llevan a lo que suelen llamarse Sistemas Neuronales Híbridos, particularmente el control fuzzy de parámetros de Redes, y la generación formal y la generación de pesos en Redes Neuronales

2. La segunda componente típica de la Soft Computing, por otro lado la que quizás tenga una historia mas corta, pero a su vez posiblemente la de mayor actualidad, es la constituida por los Algoritmos Evolutivos. Asociados a los mismos aparecen cuatro grandes áreas mas importantes: Las Estrategias Evolutivas y la Programación Evolutiva, y los Algoritmos Genéticos y la Programación Genética. Si no atendiéramos mas que a estas últimas áreas, podríamos considerar que en este caso la amalgama de metodologías y técnicas asociadas a la Soft Computing desembocan en tres importantes líneas: los Sistemas Genéticos Fuzzy, los Sistemas Bioinspirados y las Aplicaciones del Control Fuzzy sobre parámetros evolutivos, de enorme popularidad por sus desarrollos y aplicaciones.
3. De nuevo a partir del primer nivel, considerando los métodos de Razonamiento Aproximado, cuando nos concentramos solo en los Modelos Probabilísticos, nos encontramos con la Teoría de Dempster-Shafer y las Redes Bayesianas. Pero cuando los Modelos Probabilísticos los consideramos combinados con la Lógica Fuzzy, e incluso con algunas otras lógicas multivaluadas, nos surgen los que podríamos denominar Modelos Probabilísticos Híbridos, fundamentalmente los de la Teoría de Probabilidad para Eventos Fuzzy, los de Creencias de Eventos Fuzzy y los Diagramas Fuzzy de Influencia.
4. Finalmente cuando nos concentramos en los mas importantes desarrollos directamente asociados a la Lógica Difusa, aparecen destacados los Sistemas Difusos, y en particular los Controladores Difusos. Entonces de la incidencia combinada de Lógica Difusa con las Redes Neuronales y Algoritmos Evolutivos, surgen los llamados Sistemas Híbridos basados en Lógica Difusa, cuyos mas destacados exponentes son los Sistemas Neuronales Difusos, los Controladores Ajustados mediante Redes Neuronales (Sistemas Difusos Neuronales, distintos de los mencionados Sistemas Neuronales Difusos) y los Controladores basados en Lógica Difusa generados y ajustados con Algoritmos Evolutivos, como describe la siguiente figura,



Exactamente en este contexto es en el que se desarrolla esta tesis, en la que aparte de presentar los conceptos mas relevantes de la teoría de conjuntos difusos en el contexto que a nosotros nos interesa, i.e., el Control Automático de Procesos,

- 1) se realiza el estudio del proceso de cura controlada del tabaco en hoja,
- 2) se propone e implementa un sistema de control para el proceso de la cura controlada de tabaco aplicando lógica difusa, y
- 3) se desarrolla un sistema para el diseño de controladores difusos y control de procesos en tiempo real. El sistema cuenta con un dispositivo de adquisición de datos y actuación que permite adquirir y enviar señales a un determinado proceso. Así mismo el sistema que se desarrolla cuenta con un módulo para la programación por el usuario de sus propios operadores así como un módulo para la generación de código para Autómatas programables.

Como es bien conocido existen varios sistemas o algoritmos de control aplicados a la cura de tabaco en hoja, pero ninguno de ellos en un autómata programable, ni aplicando control inteligente. Para la implementación de controladores difusos en los autómatas programables

aquí se dispondrá de un módulo de procesamiento difuso, que será distinto en función del PLC (Controlador lógico Programable) seleccionado. La certeza sobre la originalidad y la innovación de lo que aquí se presenta se obtuvo a partir de un pormenorizado trabajo de campo dedicado al estudio de la bibliografía existente sobre el tema..

La bibliografía disponible sobre lógica difusa y Soft Computing es muy amplia. Se celebran congresos, existen revistas especializadas en lógica difusa y también hay revistas no especializadas que publican artículos del tema. Esto se debe a la considerable cantidad de científicos investigando sobre sistemas difusos. Revisar toda la bibliografía es prácticamente imposible. Para la elaboración de este trabajo se realizó una búsqueda bibliográfica lo más amplia posible en revistas especializadas en el tema como “Fuzzy Sets and Systems”, IEEE Trans. on Fuzzy Systems, y otras del área. Como consecuencia se adquirió la base teórica necesaria para el desarrollo de la investigación, y que en parte quedo reflejada en el Trabajo de Investigación Tutelada previo a la preparación de esta memoria.

Con esta base se presenta esta memoria que está dividida en tres capítulos. En el capítulo I se hace un estudio de la teoría matemática de conjuntos difusos y principales definiciones, así como su aplicación al control automático de procesos. Se explican los tipos de controladores difusos y sus principales características, además de las ventajas que ofrece el control difuso. Se hace un análisis de los principales algoritmos y métodos computacionales para implementar cada uno de los componentes de un controlador difuso computacionalmente. Junto con la obvia orientación de fundamentación teórica que tiene este capítulo, todos los conceptos necesarios se han querido puntualizar y detallar de cara a la futura preparación de un manual de referencia de propósito práctico. Para la preparación del mismo se recurrió a [Bonis97] [Cordón00], [Cordón99], [Drian93], [Dubois80], [Herr00], [Jant98], [Miz89], [Passino98], [Pomares99], [Reyero95], [Reznik97], [Trillas94] y [Zimmer96].

En el capítulo II se plantea y estudia el problema de la cura controlada del tabaco en hojas, para lo que se realizó un concienzudo trabajo de campo a base de numerosas visitas y

entrevistas con operadores expertos en la cura controlada del tabaco en hojas. Pero además se realiza un análisis de los conceptos fundamentales en el proceso del cálculo de la humedad relativa, en la que básicamente se siguen los trabajos de [Inst01], [Wexler65], [Virgil87], [Kirillin86]. Del análisis exhaustivo de los sistemas tecnológicos actuales se plantea la necesidad de mejorarlos, así como de desarrollar una herramienta para el diseño de sistemas de control basados en lógica difusa.

Para el desarrollo del capítulo III recurrimos básicamente a [Texas97], [Cordón99], [Drian93], [Hell93], [Jam93], [Lee99], [Matlab99], [Rao93] y [Passino98]. Concretamente se ha considerado,

- a) el detallado análisis de los métodos de desdifuminación¹, y las ventajas que cada uno de ellos tienen desde el punto de vista computacional, llevado a cabo en [Hell93],
- b) el estudio de los algoritmos de filtrado digital que se presenta en [Hamm93],
- c) el análisis de los sistemas de control realizado en [Ogata87,98], [Ques87] y [Smith97].

También se tiene en cuenta [Smith97], porque ofrece un enfoque muy acertado de un sistema de adquisición de datos y control por computador, así como de las estructuras y diseño de filtros digitales, y [Alvara98], recientemente suprimido, porque ofrece una metodología para el diseño de los sistemas de adquisición de datos que, aunque de perfil comercial muy orientado al diseño empleando equipamiento Texas Instrument, proporciona importantes claves a tener en cuenta en las fases de diseño. Junto con esto se estudian y evalúan las posibilidades de otros sistemas que persiguen propósitos similares, Xfuzzy, UnFuzzy y el Toolbox de Lógica Difusa de Matlab, para lo que se emplean los propios sistemas, [Xfuzzy], [UnFuzzy], [Matlab99] y la documentación publicada de los mismos.

Con todo ello en este capítulo se explica el sistema desarrollado como herramienta de apoyo y desarrollo a la cura controlada de tabaco en hojas. Se desglosan y explican cada

¹ Por este término traduciremos la palabra inglesa “defuzzification”, y para no emplear barbarismos como “borrosificación”, “fusificación”, etc., en lo que sigue utilizaremos la voz castellana difuminación, para referir la acción de difuminar, es decir, de hacer perder claridad o intensidad

una de las partes componentes del mismo. Se desarrolla un controlador para el proceso de curado de tabaco aplicando lógica difusa y se analizan los resultados obtenidos.

Las conclusiones mas importantes alcanzadas, el avance de las líneas de trabajo a desarrollar en el futuro, y las referencias de las fuentes bibliográficas consultadas, no siempre citadas a lo largo de la tesis, cierran la memoria.

CAPITULO I

LÓGICA DIFUSA Y CONTROL AUTOMÁTICO

INTRODUCCIÓN

En este capítulo se hace una introducción teórica de los conjuntos difusos. Se definen matemáticamente, así como las operaciones fundamentales que se pueden realizar con ellos. Se analiza la estructura de un controlador difuso y cada uno de sus bloques componentes así como la importancia del control difuso.

1.1 INTRODUCCIÓN A LA TEORÍA DE CONJUNTOS DIFUSOS, CONCEPTOS FUNDAMENTALES.

En la teoría clásica de conjuntos, un elemento pertenece o no al conjunto. La lógica difusa es una generalización de la lógica convencional. En la teoría de los conjuntos difusos, los elementos de un conjunto pueden pertenecer al mismo *en cierto grado*.

1.1.1 Definición de un conjunto difuso

Definición 1: Sea X una colección de objetos denotados generalmente por x , entonces un conjunto difuso A en X es un conjunto de pares ordenados:

$$A = \{(x, \mu_A(x)) \mid x \in X\} \quad (1.1)$$

$\mu_A(x)$ es llamada la función de pertenencia o grado de pertenencia de x en A (suele llamarse grado de compatibilidad o grado de verdad). Esta función de pertenencia hace corresponder X en el intervalo $[0; 1]$ de manera general, e indica cuán fuertemente está ligado cada elemento x de X al conjunto A . [Zimmer96]

Los conjuntos difusos se consideran una generalización de los conjuntos clásicos. En el caso en que la función de pertenencia haga corresponder X en el conjunto $\{0, 1\}$ estaríamos hablando de un conjunto clásico. Por tanto esta función puede asumir el mismo significado que la función característica de los conjuntos clásicos.

Ejemplo:

$X = \{1, 2, 3, \dots, 22\}$ $X \rightarrow$ Jugadores del Real Madrid C.F.

$x \rightarrow$ Número del jugador en la liga

$A =$ Buenos Jugadores.

$A = \{(1,1), (2, 0.9), (3, 0.5), (4, 0.8), (5, 0.9), (6, 0.6), (7, 1), \dots\}$

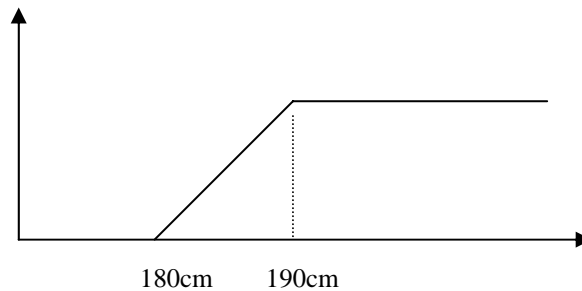
Ejemplo:

$X =$ Jugadores del Real Madrid C.F

$A =$ Ser alto

$A = \{(x, \mu_A(x)) / x \in X\}$

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0 & x \leq 180cm \\ \frac{1}{10}x - \frac{180}{10} & 180 \leq x \leq 190m \\ 1 & x \geq 190cm \end{cases}$$



Un conjunto difuso puede describirse de varias formas, pero las dos mas frecuentes son a) enumerando el conjunto de pares ordenados $(x, \mu_A(x))$, es decir, por extensión, y b) planteando analíticamente la expresión que rige la función de pertenencia, lo que suele denominarse por comprensión.

1.1.2 Operaciones con conjuntos difusos

Con los conjuntos difusos se puede operar de igual manera que en los conjuntos clásicos. Las operaciones entre conjuntos difusos se definen a través de su función de pertenencia.

A priori haciendo una generalización de las operaciones entre conjuntos clásicos se puede definir las operaciones básicas de intersección, unión y complemento entre conjuntos difusos como:

Dados dos conjuntos difusos A y B,

$$A = \{(x, \mu_A(x)) \mid x \in X\}$$

$$B = \{(x, \mu_B(x)) \mid x \in X\}$$

1- Se define un conjunto difuso C que representa la intersección entre A y B como:

$$C = A \cap B = \{(x, \mu_{A \cap B}(x)) \mid x \in X\}; \mu_{A \cap B}(x) = \min\{\mu_A(x), \mu_B(x)\}, x \in X. \quad (1.2)$$

2- Se define un conjunto difuso D que representa la unión entre A y B como:

$$D = A \cup B = \{(x, \mu_{A \cup B}(x)) \mid x \in X\}; \mu_{A \cup B}(x) = \max\{\mu_A(x), \mu_B(x)\}, x \in X. \quad (1.3)$$

3- Se define el complemento del conjunto difuso A como:

$$C_A = \{(x, \mu_{C_A}(x)) \mid x \in X\}; \mu_{C_A}(x) = 1 - \mu_A(x), x \in X \quad (1.4)$$

Los únicos operadores posibles para trabajar con conjuntos difusos no son los expuestos anteriormente, existen otros operadores para modelar la intersección y la unión entre conjuntos difusos que son más generales. Las t – normas, o normas triangulares, y las s – normas, o conormas triangulares, son operadores generales para modelar la intersección y la unión entre conjuntos difusos respectivamente, sin perder la generalidad cuando se trate de conjuntos clásicos. [Miz89]

Normas triangulares (t – normas)

Definen una clase general de operadores para modelar la intersección entre conjuntos.

t – normas: Son funciones de dos argumentos que estando definidas como

$$t: [0,1] \times [0,1] \rightarrow [0,1]$$

para cualesquiera $x, y, z, w \in [0,1]$ satisfacen las siguientes propiedades:

- | | | |
|----|--|--|
| 1) | $t(x,y) = t(y,x)$ | Conmutatividad. |
| 2) | $t(x, t(y,z)) = t(t(x,y),z)$ | Asociatividad. |
| 3) | $t(x,y) \leq t(w,z)$ si $x \leq w, y \leq z$ | Monótona no decreciente en cada uno de sus argumentos. |
| 4) | $t(x,1) = t(1,x) = x, t(x,0) = t(0,x) = 0$ | Condiciones de contorno. |

Conormas triangulares (s – normas)

Definen una clase general de operadores para modelar la unión entre conjuntos.

s – normas: Son funciones de dos argumentos que estando definidas como

$$s: [0,1] \times [0,1] \rightarrow [0,1]$$

para cualesquiera $x, y, z, w \in [0,1]$ satisfacen las siguientes propiedades:

- | | | |
|----|--|--|
| 1) | $s(x,y) = s(y,x)$ | Conmutatividad. |
| 2) | $s(x, s(y,z)) = s(s(x,y),z)$ | Asociatividad. |
| 3) | $s(x,y) \leq s(w,z)$ si $x \leq w, y \leq z$ | Monótona no decreciente en cada uno de sus argumentos. |
| 4) | $s(x,1) = s(1,x) = 1, s(x,0) = t(0,x) = x$ | Condiciones de contorno. |

Las t – normas y las s –normas están relacionadas dualmente. Se puede demostrar que s es una t -conorma si y sólo si existe una t -norma t tal que

$$s(x, y) = 1 - t(1-x, 1- y)$$

De la misma forma, a partir de una t -conorma se puede volver a obtener la t -norma como

$$t(x, y) = 1 - s(1 - x, 1- y)$$

En este caso se dice que t es la t -norma dual de s y que s es la t -conorma dual de t . Dadas las propiedades de t y de s , estos operadores se utilizan en la lógica difusa para definir la intersección y unión, respectivamente, entre conjuntos difusos definidos sobre un espacio cualquiera.

Existe una definición 2 más general de cómo obtener la t – norma (s – norma) dual para una s – norma (t – norma) dada. Escogiendo la negación (n) de un conjunto difuso como el complemento (1.4), pares de t – normas y s – normas satisfacen las leyes de De Morgan, de forma tal que:

$$\begin{array}{ll}
 s(x,y) = n(t(n(x), n(y))) & \overline{x \vee y} = \overline{x \vee y} = \overline{x} \wedge \overline{y} \\
 t(x,y) = n(s(n(x), n(y))) & \overline{x \wedge y} = \overline{x \wedge y} = \overline{x} \vee \overline{y}
 \end{array}$$

Existen dos familias fundamentales de t – normas y s – normas, las parametrizadas y las no parametrizadas [Zimmer96] [Miz89]. Entre las t – normas y s – normas más empleadas se encuentran las siguientes:

| t – norma | s – norma |
|--|--|
| Producto drástico $t(x,y) = \begin{cases} \min(x, y) & \text{si } \max(x, y) = 1 \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$ | Suma Drástica $t(x,y) = \begin{cases} \max(x, y) & \text{si } \min(x, y) = 0 \\ 1 & \text{en otro caso} \end{cases}$ |
| Diferencia Acotada $t(x, y) = \max(0, x+y-1)$ | Suma Acotada $s(x, y) = \min(1, x+y)$ |
| Producto drástico $t(x, y) = \frac{x \cdot y}{1 - (1-x)(1-y)}$ | Suma de Einstein $s(x, y) = \frac{x + y}{1 + xy}$ |
| Producto drástico $t(x, y) = xy$ | Suma Algebraica $s(x, y) = x+y-xy$ |
| Producto de Hamacher $t(x, y) = \frac{xy}{x + y - xy}$ | Suma de Hamacher $s(x, y) = \frac{x + y - 2 \cdot x \cdot y}{1 - xy}$ |
| Mínimo $t(x, y) = \min(x, y)$ | Máximo $s(x,y)=\max(x, y)$ |

Negación

Para el caso del complemento o la negación de un conjunto difuso se puede concluir haciendo un razonamiento lógico que:

Una función continua $C_A: [0,1] \rightarrow [0, 1]$ es una función complemento si satisface las siguientes propiedades o axiomas:

- 1) Si $\mu_A = 1, \mu_{C_A} = 0$, y viceversa.
- 2) C_A es continua y monótona decreciente.
- 3) $C_{(C_A)} = A$, involución del complemento.

Si además se impone la restricción:

- 4) $\mu_A = 1/2 \rightarrow \mu_{C_A} = 1/2$

queda unívocamente determinada la expresión del complemento como la negación. Las funciones de complementos más empleadas son las siguientes:

$$C(x) = 1-x$$

$$C_w(x) = (1-x^w)^{1/w} \quad w \in (0, \infty)$$

$$C_\lambda(x) = (1-x)/(1-\lambda x) \quad \lambda \in (-1, \infty)$$

Es importante destacar que toda operación de complemento tiene al menos un punto de equilibrio. El punto de equilibrio se define como un valor x' tal que

$$C(x') = x'$$

lo que equivale a decir que el punto de equilibrio de un conjunto difuso es aquel elemento cuyo valor de pertenencia al conjunto es igual a su complemento.

1.1.3 Operadores de implicación difusa

En la lógica clásica se dice que $A \rightarrow B$ cuando a partir de A podemos inferir si B es verdad o no, o lo que es lo mismo cuando al verificarse el predicado A obliga a que se verifique el predicado B .

$A = \text{“Andaluz”}$

$B = \text{“Ser Español”}$

$A \rightarrow B; B \text{ -/}\rightarrow A$

La implicación no es más que el operador que se emplea para el “then” de las reglas del tipo “if – then”. $A \rightarrow B$ decimos que A implica B .

Existen tres grupos fundamentales de operadores de implicación difusa: Los que son extensión de la implicación booleana, los que son extensión de la conjunción booleana y otro grupo que no cumplen ni una ni otra condición. [Cordon00]

Extensiones de la implicación Booleana

La implicación booleana queda descrita por la siguiente tabla de la verdad:

$$a \rightarrow b = \neg a \vee b$$

| a | b | a → b |
|---|---|-------|
| 0 | 0 | 1 |
| 0 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 0 |
| 1 | 1 | 1 |

Estos operadores de implicación difusa se pueden considerar como una generalización de la implicación en la lógica clásica.

Axiomas:

- 1 $v(P1 \rightarrow P2)$ depende solamente del grado de verdad $v(P1)$, $v(P2)$.
- 2 Si $v(P1) \leq v(P3)$ entonces $v(P1 \rightarrow P2) \leq v(P3 \rightarrow P2)$ cualquiera sea $P2$.
- 3 Si $v(P2) \leq v(P3)$ entonces $v(P1 \rightarrow P2) \leq v(P1 \rightarrow P3)$ cualquiera sea $P1$.
- 4 Si $v(P1) = 0$ entonces $v(P1 \rightarrow P) = 1$ cualquiera sea P .
- 5 Si $v(P1) = 1$ entonces $v(P \rightarrow P1) = 1$ cualquiera sea P .
- 6 Si $v(P1) = 1$ y $v(P2) = 0$ entonces $v(P1 \rightarrow P2) = 0$.

Los axiomas 2 y 3 indican la monotonía de la implicación para el caso de mantener constante el grado de verdad de la proposición del antecedente y del consecuente. El axioma 4 indica que una proposición falsa puede implicar cualquier cosa mientras que el axioma 5 indica que la tautología es implicada por cualquier cosa. El axioma 6 indica que una tautología no puede justificar algo que es falso. [Passino98].

Dentro de esta familia de operadores que son extensión de la implicación booleana encontramos dos grupos:

S implicaciones (implicaciones fuertes): Son extensión directa de la implicación lógica booleana, $A \rightarrow B = \neg A \vee B$

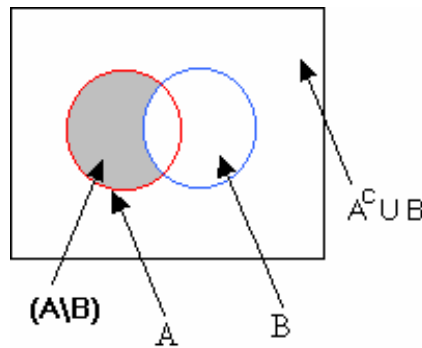
$$I(x,y) = S(N(x),y)$$

S = Cualquier S – norma.
 N = Función de Negación.

R implicaciones (Implicaciones residuales): Se obtienen por la residuación de una t – norma continua T de la forma:

$$I(x,y) = \sup\{c: c \in [0,1] / T(c,x) \leq y\}$$

$$A^c \cup B = (A \setminus B)^c = \cup \{Z \mid A \cap Z \subseteq B\}$$



Extensiones de la conjunción Booleana

En esta familia de operadores que son extensión de la conjunción booleana podemos encontrar las t – normas. Estos son los operadores de implicación difusos más empleados en el campo del control por su robustez y por su simplicidad de cálculo que lo hacen muy eficientes. Estos operadores verifican las propiedades de las t – normas y se pueden definir tantos operadores de implicación difusos como t – normas existan.

Criterios a tener en cuenta a la hora de seleccionar un operador de implicación difusa.

Existe un gran número de operadores de implicación, ahora cabe preguntarse ¿cuál emplear en cada caso?

Las funciones de implicación que son extensión de la conjunción booleana son operadores muy robustos y presentan un buen comportamiento en la mayoría de los casos. Dentro de estos, que son extensión de la conjunción booleana, las t – normas presentan la mayor

robustez de todos. En la mayoría de las aplicaciones de control se emplean las t – normas como operadores de implicación ya que tienen un buen comportamiento con cualquiera de los métodos de desfuminación y son de poca complejidad matemática.

Como puede comprobarse, las propiedades que verifican los operadores de implicación son las siguientes:

$\forall h \in [0,1]$ se cumple que $I(h,0) = 0$, esta propiedad garantiza que para valores de pertenencia del conjunto difuso del consecuente = 0 el valor de la implicación en esos puntos es cero. Esta propiedad evita que se generen bandas laterales con valores de pertenencias distintos de cero en todo el universo de discurso [Cordón00].

$I(h, 1) > 0, \forall h \in [0,1]$ e $I(1, 1) = 1$, esta propiedad significa que en aquellos puntos en los que el conjunto difuso de salida o del consecuente de las reglas tenga valor de pertenencia distinto de cero, el valor de pertenencia del conjunto difuso implicado tiene que ser mayor que cero, garantizándose así que no se pierda la información que aportan aquellos puntos modales o de definición de las funciones de pertenencia.

$I(0,y) = 0 \forall y \in [0, 1]$, esta propiedad asegura que no se debe inferir ningún conjunto cuando el grado de activación de las reglas es cero.

1.2 RELACIONES DIFUSAS

Una relación difusa entre conjuntos numerables o no numerables es un conjunto difuso cuyos elementos son tuplas, y cada tupla tiene asociado un valor de pertenencia entre 0 y 1 que caracteriza cuán fuertemente está ligada esa tupla al conjunto.

Definición 3: Dados dos universos U y V (continuos o discretos) y $\mu_R: [U \times V] \rightarrow [0, 1]$ entonces

$$R = \int_{U \times V} \mu_R(u, v) / (u, v) \quad \text{Para el caso continuo.}$$

$$R = \sum_{U \times V} \mu R(u, v) / (u, v) \quad \text{Para el caso discreto.}$$

La definición anterior es para el caso de una relación binaria, de manera general se define una relación clásica n – aria como:

Definición 4: Dado los conjuntos difusos U_1, U_2, \dots, U_n y $\mu R: [U_1 \times \dots \times U_n] \rightarrow [0, 1]$

$$R = \int_{U_1 \times \dots \times U_n} \mu R(u_1, \dots, u_n) / (u_1, \dots, u_n)$$

Ejemplo. Dado $U = \{1, 2, 3\}$ la relación binaria “es aproximadamente igual a” entre los elementos de U puede describirse como:

$$\mu_R(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{si } x = y \\ 0.8 & \text{si } |x - y| = 1 \\ 0.3 & \text{si } |x - y| = 2 \end{cases}$$

1.3 VARIABLE LINGÜÍSTICA

Por variable lingüística se entiende una variable cuyos valores o dominio de definición son palabras u oraciones (términos de carácter lingüístico) en lenguaje natural. Un ejemplo de variable lingüística puede ser la variable *estatura* si los posibles valores a tomar por ella son lingüísticos, como pueden ser: *pequeño, alto medio, muy alto*.

Una variable lingüística se caracteriza mediante la estructura $\langle X, L_\chi, \chi, M_\chi \rangle$ [Drian93] [Jant98] donde:

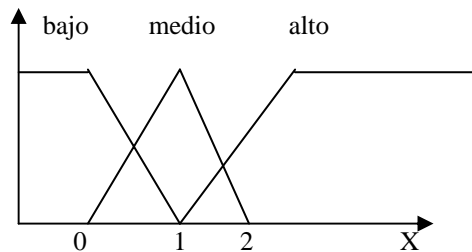
- X nota el nombre de la variable, como puede ser *estatura, error, edad, temperatura*
- L_χ es el conjunto de valores lingüísticos que puede tomar la correspondiente variable lingüística, $L_\chi = \{\text{Negativo (N), Cero(Z), Positivo(P)}\}$

- χ es el dominio físico sobre el cuál está definida la variable lingüística X. Es un conjunto clásico, $\chi = [-5, +5]$. χ es conocido como universo de discurso o de definición de la variable X.
- M_χ es la función semántica que le da significado a cada uno de los términos o valores lingüísticos L_χ que puede tomar la variable X. Es la función que hace corresponder a cada término lingüístico un conjunto difuso.

Ejemplo:

X = Nivel
 $L_\chi = \{\text{bajo, medio, alto}\}$
 $\chi = [0, 2]$

M_χ bajo $\rightarrow \int_0^x L(x;0,1) / x$
 medio $\rightarrow \int_0^x \wedge(x;0,1,2) / x$
 alto $\rightarrow \int_0^x R(x;1,2) / x$



El significado de la expresión o regla lingüística: si X es A entonces Y es B es representado como una relación difusa definida en $X \times Y$ donde X e Y son los dominios de las variables lingüísticas X e Y. Una regla difusa constituye una relación difusa entre antecedentes y consecuentes.

El antecedente de la regla *X es A* se representa por un conjunto difuso A como

$$A = \int \mu_A(x) / x$$

y el consecuente Y es B se representa por otro conjunto difuso B como

$$B = \int \mu_B(y) / y$$

la función de pertenencia de la relación difusa es μ_R : tal que

$$\forall x \in X, \forall y \in Y : \mu_R(x, y) = \mu_A(x) * \mu_B(y)$$

donde el operador $*$ puede ser cualquier operador de implicación difusa.

1.4 REGLAS DIFUSAS DEL TIPO “IF – THEN”

Una regla difusa del tipo “if A – then B”, que representaremos por $a \rightarrow b$ representa una relación difusa en el producto cartesiano $A \times B$ de los antecedentes y consecuentes de la misma, donde A y B son los dominios de definición de las variables lingüísticas a y b .

1.5 ESTRUCTURA DE UN CONTROLADOR DIFUSO

La figura 1.1 muestra la estructura de un controlador de manera general. Los bloques que se encuentran por encima de la línea horizontal que divide el esquema se pueden considerar o no en dependencia de la aplicación y los que están por debajo siempre serán considerados.

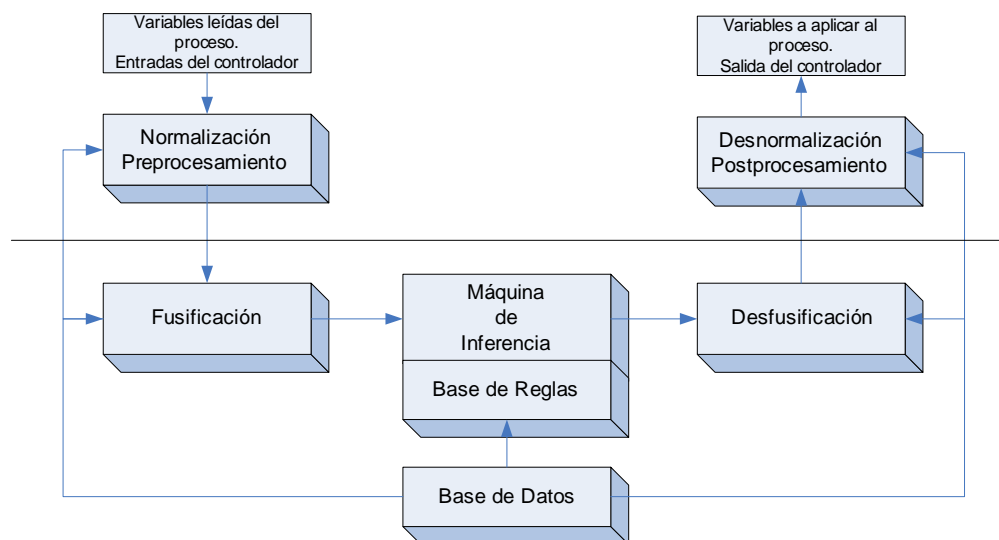


Fig. 1.1 Estructura general de un controlador difuso.

Bloque de Normalización

A este bloque entran los valores leídos de las variables de entradas directamente del proceso (presión, nivel, flujo,...) o por la combinación de estas (referencia, error, derivada del error,...), a su salida tenemos un valor real normalizado. Básicamente este bloque realiza una transformación de escala y transforma los valores físicos leídos de las variables del proceso en un universo normalizado que podría ser el intervalo $[1, -1]$. Si no estamos trabajando con universos normalizados no es necesario hacer el ajuste de escala.

Bloque de difuminación

Como su nombre indica, en este bloque se ejecuta la difuminación, que no es más que la conversión de los valores reales de las variables de entradas, normalizadas o no en conjuntos difusos, con el objetivo de hacerla compatibles con la representación difusa de las variables de entradas en los antecedentes de las reglas.

En este bloque lo que se diseña es el método de difuminación que se va a emplear en el controlador. En la mayoría de las aplicaciones de los sistemas basados en reglas difusas se emplea difuminación de tipo puntual.

Base de conocimiento

La base de conocimiento de un controlador difuso consiste en la base de datos más la base de reglas difusas

La función básica de la base de datos es la de proporcionar la información necesaria para el funcionamiento del módulo de difuminación, la base de regla y el módulo de desdifuminación. En esta información se incluye:

- Conjuntos difusos: Distribución de las funciones de pertenencias que representan el significado de los valores lingüísticos de las variables de estado del proceso y de las variables de salida del controlador.

- Dominios físicos y su normalización, junto con los factores de escala de normalización y desnormalización.

Los parámetros de diseño de este módulo son las funciones de pertenencias o diseño de los conjuntos difusos y la selección de los factores de escala.

La función básica de la base de reglas es representar de manera estructurada la política de control de un operador experto/ ingeniero en control sobre la forma de un conjunto de reglas de producción difusa con la estructura:

if <estado del proceso> then <salida de control>

El antecedente de cada regla constituye la descripción del estado del proceso en términos de una combinación lógica de proposiciones difusas atómicas.

El consecuente de la regla constituye una descripción de la salida de control en términos de una combinación de proposiciones difusas atómicas.

Los parámetros de diseño que se deben tener en cuenta en el diseño de la base de reglas son:

- Selección de las variables de estado del proceso o de entradas y las variables de salida o de control.
- Selección del contenido o proposiciones atómicas de los antecedentes y consecuentes de las reglas.
- Selección del conjunto de términos para las variables de estado del proceso y las salidas de control.
- Deducción del conjunto de reglas.

Motor de inferencia

Existen dos formas fundamentales de diseñar el motor de inferencia, inferencia basada en la composición e inferencia basada en el disparo de cada una de las reglas individuales. En la

casi totalidad de las aplicaciones de los sistemas basados en reglas difusas se emplea el segundo tipo de inferencia.

La función básica de este tipo de inferencia es la de calcular el valor de la variable de salida del controlador en función de la contribución de cada una de las reglas individuales. La salida del módulo de difuminación, que representa el valor actual medido de las variables de estado del proceso, se aplica a cada antecedente de las reglas y se calcula así el grado de activación de cada una de las reglas. Sobre la base del grado de activación, que representa el grado de satisfacción de la proposición difusa de los antecedentes, se modifica el conjunto difuso de salida o del consecuente de cada una de las reglas.

Todos los conjuntos de salida modificados según el operador de implicación que se emplee y en función del grado de activación de cada una de las reglas se agregan y forman el conjunto difuso de salida al que se le aplica el operador de desdifuminación.

Supongamos que se tiene un sistema de dos variables de entrada y una variable de salida:

Entradas : i_1, i_2

Salida : u

Representación de la regla k ésima de la base de reglas:

Si i_1 es $LI_1^{(k)}$ y i_2 es $LI_2^{(k)}$ entonces u es $LU^{(k)}$

Donde $LI_1^{(k)}$, $LI_2^{(k)}$ y $LU^{(k)}$ son los conjuntos de valores lingüísticos de las variables lingüísticas I_1, I_2, U respectivamente, y cuyo significado está representado por los conjuntos difusos con función de pertenencia $\mu_{LI_1}^{(k)}$, $\mu_{LI_2}^{(k)}$, $\mu_{LU}^{(k)}$.

El significado de la regla anterior empleando la función de implicación del mínimo está dado por una relación difusa definida en $I_1 \times I_2 \times U$ de manera que:

$$\forall i_1, i_2, u: \mu_R^{(k)}(i_1, i_2, u) = \min(\mu_{LI_1}^{(k)}(i_1), \mu_{LI_2}^{(k)}(i_2), \mu_{LU}^{(k)}(u)).$$

El conjunto completo de las reglas de la base de datos se puede ver como la unión de todas las reglas individualmente, así se tiene la relación R_T que representa la base de reglas dada en función de las entradas i_1, i_2 y la salida u

$$\forall i_1, i_2, u: \mu_{RT}(i_1, i_2, u) = \max(\mu_R^{(1)}(i_1, i_2, u), \dots, \mu_R^{(k)}(i_1, i_2, u))$$

Se supone que los valores de las variables de entrada son i_1^*, i_2^* , estos valores se pasan al módulo de difuminación el que produce las funciones de pertenencia o conjuntos difusos:

$$\forall i_1: \mu_{I1}(i_1^*) = \begin{cases} 1 & \text{para } i_1 = i_1^* \\ 0 & \text{para } i_1 \neq i_1^* \end{cases}$$

$$\forall i_2: \mu_{I2}(i_2^*) = \begin{cases} 1 & \text{para } i_2 = i_2^* \\ 0 & \text{para } i_2 \neq i_2^* \end{cases}$$

El proceso anterior es la difuminación.

$\mu_{I1}(i_1^*), \mu_{I2}(i_2^*)$ se combina en una función de pertenencia de los antecedentes μ_{ANT} de manera que:

$$\forall i_1, i_2: \mu_{ANT}(i_1, i_2) = \min_{I1 \times I2}(\mu_{I1}(i_1), \mu_{I2}(i_2))$$

El conjunto difuso resultante del proceso de inferencia de cada una de las reglas es:

$$\forall u: \mu_{CLU}^{(k)}(u) = \min_{I1 \times I2}(\mu_{ANT}(i_1, i_2), \mu_R(i_1, i_2, u)) = \mu_R^{(k)}(i_1, i_2, u)$$

y el conjunto difuso global obtenido por la agregación de todas las reglas es:

$$\forall u: \mu_U(u) = \max(\mu_{CLU}^{(1)}(u), \dots, \mu_{CLU}^{(k)}(u)) = \mu_{RT}(i_1^*, i_2^*, u)$$

Bloque de desdifuminación

La función de este módulo es la de convertir el conjunto difuso de salida resultante de cada una de las variables de salida en valores puntuales (“crisp”) aplicables al proceso.

En este bloque el parámetro a diseñar es el operador de desdifuminación que se emplee, entre los que se encuentra el método del centro de gravedad, bisector, media de máximos, máximo mayor, máximo menor, entre otros.

Bloque de desnormalización

Este módulo ejecuta la desnormalización de los valores crisp de las variables de salida entregados por el módulo de desdifuminación y los escala al dominio físico de cada variable. Al igual que en el caso del bloque de normalización, si no se trabaja con salidas normalizadas este bloque no es necesario.

En este bloque se diseñan los factores de escalado de cada una de las variables.

Tipos de Controladores Difusos

Existen tres tipos fundamentales de controladores difusos [Drian93]. La estructura del consecuente de las reglas distingue a cada uno de ellos.

1. Modelo de Mamdani.
2. Modelo de Takagi - Sugeno – Kang (TSK)
3. Modelo de Tsukamoto.

Modelo de Mamdani

Uno de los primeros en llevar a la práctica la lógica difusa en aplicaciones de control fue. A. Mamdani [Pomares99]. En el modelo del controlador que él estableció, los consecuentes hacen referencia a cambios en la acción de control. Estos cambios son expresados mediante términos lingüísticos o términos numéricos fijos. Las reglas empleadas son del tipo:

$$\text{Si } X_1 \text{ es } A_1 \text{ y } \dots \text{ y } X_n \text{ es } A_n \text{ entonces } U \text{ es } U_i$$

El consecuente de la regla es un conjunto difuso que expresa el significado de un término lingüístico de la variable lingüística de salida. Este modelo tiene una gran interpretabilidad de las reglas al emplear etiquetas lingüísticas en el consecuente.

Modelo de Takagi-Sugeno-Kang

En 1985, Sugeno realizó un estudio sobre las posibilidades de incluir en el consecuente nuevas formas de actuación [Pomares99] [Drian93]. El nuevo modelo de reglas que estableció tiene la forma:

$$\text{Si } X_1 \text{ es } A_1 \text{ y } \dots \text{ y } X_n \text{ es } A_n \text{ entonces } U \text{ es } F(X_1, \dots, X_n)$$

Donde los antecedentes de las reglas continúan siendo conjuntos difusos mientras que el consecuente es una función numérica de las entradas. Usualmente $F(X_1, \dots, X_n)$ es una función lineal de las entradas $F(X_1, \dots, X_n) = a_0 + a_1X_1 + \dots + a_nX_n$. De manera general F puede ser cualquier función polinómica. Cuando el grado del polinomio es 1 el sistema se denomina “Modelo de primer orden de Sugeno”. Cuando F es una constante el sistema es equivalente al modelo de Mamdani utilizando consecuentes no difusos. Cuando F es una constante se dice que los consecuentes de las reglas son conjuntos difusos de tipo puntual o “singleton”.

En la mayoría de los casos se necesitan menor cantidad de reglas para obtener una salida deseada si se emplea un controlador de tipo Sugeno que para el caso de Mamdani. La interpretabilidad de las reglas en este tipo de controladores es muy complicada porque las salidas del sistema son una combinación de las entradas y no un conjunto difuso de salida o una constante. Resulta sumamente difícil plasmar el conocimiento de un operador experto empleando este tipo de reglas.

Modelo de Tsukamoto

En el modelo de Tsukamoto los consecuentes de las reglas son funciones monótonas crecientes o decrecientes que dependen del nivel de activación de la regla. La estructura de las reglas de este modelo es:

$$\text{Si } X_1 \text{ es } A_1 \text{ y } \dots \text{ y } X_n \text{ es } A_n \text{ entonces } U \text{ es } F(\alpha)$$

En este modelo el conjunto difuso de salida es una función del valor de activación α de las reglas por lo que de manera general la interpretabilidad de estas reglas es más complicada que en el modelo de Mamdani.

En la mayoría de las aplicaciones de control se emplean controladores de tipo Sugeno por su eficiencia computacional, el modelo de Mamdani también se emplea, pero en menor medida, aunque con este se obtienen mejores resultados en cuanto a calidad de respuesta del sistema a controlar.

Ventaja de los controladores difusos

Es en el campo del control automático, con enorme diferencia respecto al resto de las aplicaciones, donde los sistemas basados en reglas difusas han tenido mayor éxito. El número de patentes a que han dado lugar, sirve para explicar por sí solo la conveniencia de su uso.

No obstante, puede darse una gran variedad de razones por las que los sistemas basados en reglas difusas han tenido tantos éxitos y se han impuesto como un nuevo paradigma dentro del control automático de procesos. Entre ellas, destacan las siguientes:

- 1. Uso efectivo de toda la información disponible:** En cualquier trabajo de ingeniería se debe intentar utilizar toda la información que esté disponible. A falta de un modelo matemático del proceso a controlar (que generalmente no se tiene o resulta muy complicado obtenerlo), la mayor parte de la información proviene de: (1) los sensores, que nos dan medidas numéricas de las variables externas del proceso y (2) descripciones generalmente lingüísticas de expertos familiarizados con el proceso. Los controladores difusos sí son capaces de incorporar este tipo de información lingüística.
- 2. Control de procesos alineales:** Los controladores difusos y en general los sistemas basados en reglas difusas son aproximadores universales [Castro95, 96]. Por tanto,

siempre que se escoja un número de parámetros suficientes y se les dé un valor adecuado, podremos encontrar un controlador difuso apropiado para controlar cualquier sistema a lineal.

- 3. El control difuso es fácil de comprender:** Debido a que un controlador difuso emula la estrategia de control de un operador experto, su funcionamiento es fácil de entender por personal no especialista en control. Además, el uso de las reglas del tipo “if - then” facilita que éstas puedan ser localmente manipuladas según las regiones vecinas. Esto permite construir algoritmos de una forma más sencilla y puede reducir el tiempo de desarrollo.

- 4. Los controladores difusos son fáciles de implementar:** Gracias a la existencia de chips comerciales que pueden ser programados y reprogramados externamente y a que los sistemas difusos admiten un alto nivel de paralelismo, la implementación de un controlador difuso de altas prestaciones puede realizarse de manera sencilla y rápida.

1.6 IMPLEMENTACIÓN DE CONTROLADORES DIFUSOS

Métodos de implementación

Existen dos métodos básicos para implementar controladores difusos, el exacto y el aproximado, cada uno con sus ventajas e inconvenientes.

1.6.1 Método exacto

El método exacto se basa en hacer un estudio de la forma que adopta el conjunto difuso ante cada uno de los operadores de implicación. Lo que se hace es una representación paramétrica de los conjuntos difusos inferidos. Este método tiene como inconveniente que hay que hacer un cálculo previo de las expresiones paramétricas de los conjuntos difusos antes de implementar el controlador. [Cordón99]

1.6.2 Método aproximado

Al utilizar este método no hay que hacer ningún cálculo previo ya que se discretiza el universo de discurso de cada una de las variables del consecuente en un número de puntos predefinido. Es un método más lento desde el punto de vista computacional y la precisión está dada por la cantidad de puntos de discretización. Hay que llegar a una solución de compromiso entre la velocidad computacional y la exactitud. Tiene la ventaja de poder trabajar con mayor cantidad de operadores de implicación ya que no necesita hacer un estudio previo de las expresiones parametrizadas de los conjuntos difusos. [Cordón99]

1.7 REPRESENTACIÓN DE LOS CONJUNTOS DIFUSOS

Un conjunto difuso puede ser descrito enumerando el conjunto de pares ordenados $(x, \mu(x))$ o expresando analíticamente la expresión que rige la función de pertenencia. Las funciones de pertenencias más usadas para representar los conjuntos difusos son las siguientes:

- Trapezoidales
- Saturadas a la derecha.
- Saturadas a la izquierda.
- Curva S.
- Curva Z.
- Curva PI.
- Campana de Gauss.
- Puntual (singleton).

Las funciones de pertenencias o funciones que describen conjuntos difusos anteriormente mencionadas son las más empleadas porque con ellas se pueden expresar de manera lineal como alineal la mayoría de los criterios lingüísticos.

1.7.1 Funciones de tipo Trapezoidal

Este tipo de funciones de pertenencia son muy empleadas en los controladores difusos por ser lineales y ofrecer mayor velocidad de cómputo. De manera general representan criterios lingüísticos tales como: “*alrededor de...*”, “*aproximadamente entre b y c*” representan intervalos difusos o números difusos. [Zimmer96]

Este tipo de función de pertenencia encierra como caso particular las funciones de pertenencia triangulares. Para el caso en que los puntos *c* y *d* (Fig. 1.2) coincidan se considera una función de tipo triangular.

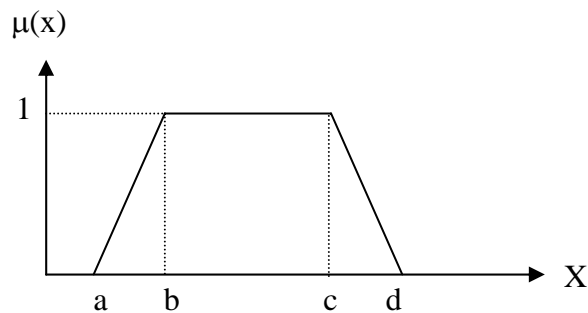


Fig. 1.2 Función de pertenencia Trapezoidal.

La expresión matemática que rige la función anterior es:

$$\mu_T(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } b \leq x \leq c \\ mD \cdot (x - d) & \text{si } c < x < d \\ mI \cdot (x - a) & \text{si } a < x < b \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (1.5)$$

donde

$$mD = \frac{1}{c - d} \quad , \quad mI = \frac{1}{b - a}$$

Antes se realiza el cálculo de las pendientes del trapezoido para obtener mayor velocidad de cómputo.

Para el caso de tener funciones de pertenencia trapezoidales saturadas a la derecha o a la izquierda como muestra la figura 1.3 la expresión del cálculo sería la misma, sólo habría que considerar que para valores de x que estén más allá del punto de saturación (b y b') el valor de pertenencia al conjunto es 1.

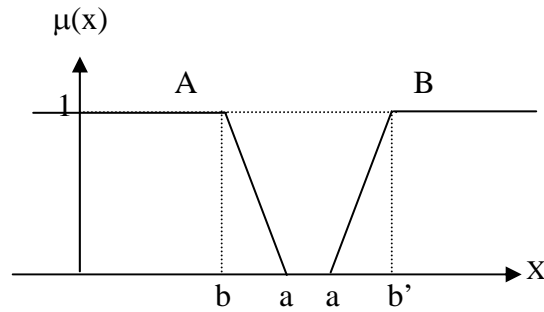


Fig. 1.3 Función de pertenencia Trapezoidal (A) saturada a la izquierda, (B) a la derecha

Las funciones de pertenencia con saturación representan conjuntos difusos que modelan propiedades como: “mayor que ...”, “menor que ...”, “la mayoría desde ...”. A partir de un cierto punto se considera que todos los elementos del universo de discurso $x \in X$ cumplen totalmente con la condición de agrupación de los elementos x en el conjunto difuso.

1.7.2 Curva S

La curva S representa los mismos criterios lingüísticos que un trapecio saturado a la derecha pero es una curva alineal mientras que los trapecios son lineales. La figura 1.4 muestra un función de pertenencia del tipo Curva S.

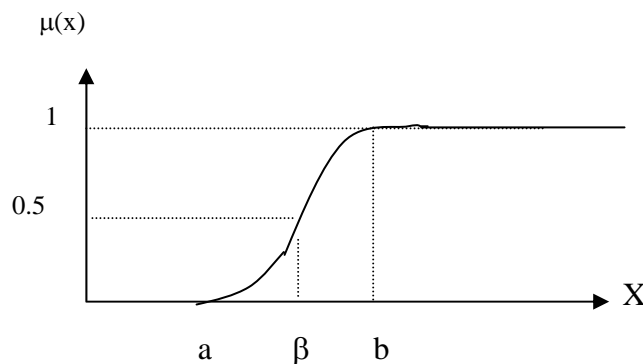


Fig. 1.4 Función de pertenencia Curva S

La expresión matemática que la rige es la siguiente:

$$\mu_s(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } x \geq b \\ \frac{(x-a)^2}{den} & \text{si } a < x < \beta \\ 1 - \frac{(x-b)^2}{den} & \text{si } \beta \leq x < b \\ 0 & \text{si } x \leq a \end{cases} \quad (1.6)$$

donde

$$\beta = \frac{a+b}{2}, \quad den = \frac{(b-a)}{2}$$

β determina el punto de inflexión de la curva en el que el valor de pertenencia es 0.5.

1.7.3 Curva Z

La curva Z representa los mismos criterios lingüísticos que un trapecio saturado a la izquierda y como la curva S es una función alineal. La figura 1.5 muestra una curva Z.

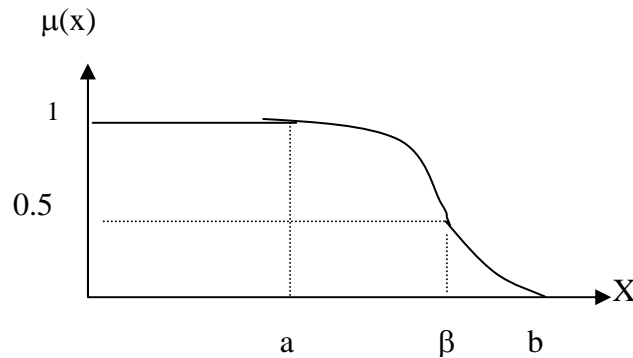


Fig. 1.5 Función de pertenencia Curva Z

La expresión matemática que la rige es la siguiente;

$$\mu_z(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } x \leq a \\ \frac{(x-a)^2}{den} & \text{si } \beta \leq x < b \\ 1 - \frac{(x-b)^2}{den} & \text{si } a < x < \beta \\ 0 & \text{si } x \geq b \end{cases} \quad (1.7)$$

donde

$$\beta = \frac{a+b}{2} \quad , \quad den = \frac{(b-a)}{2}$$

Analizando la expresión anterior se puede deducir fácilmente que $\mu_Z(x) = 1 - \mu_S(x)$.

1.7.4 Curva PI

Como las funciones de pertenencia trapezoidales las funciones de tipo Curva PI expresan criterios lingüísticos del tipo “*alrededor de...*”, “*aproximadamente entre b y c*” representan intervalos difusos o números difusos. Este tipo de función de pertenencia es alineal y suele ser menos utilizada en el campo del control automático debido a que necesitan realizar mayor cantidad de cálculos y no ofrecen ventajas sustanciales. [Reznik97]

La figura 1.6 muestra una función de pertenencia del tipo Curva PI.

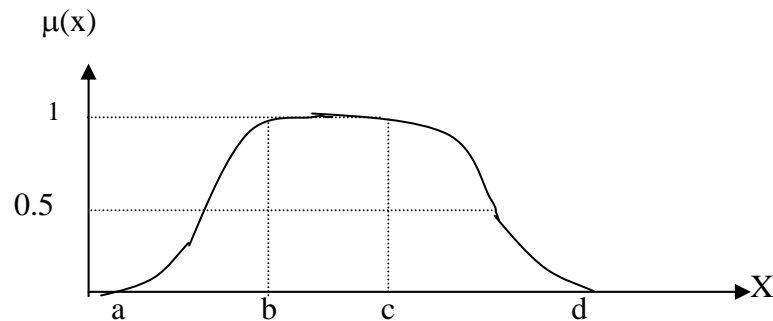


Fig. 1.6 Función de pertenencia Curva PI

Matemáticamente se expresa por la combinación de una función de tipo S y otra del tipo Z.

La expresión matemática que rige este tipo de funciones de pertenencia es la siguiente:

$$\mu_{PI}(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } b \leq x \leq c \\ \mu_{S;a,b}(x) & \text{si } x < b \\ \mu_{Z;c,d}(x) & \text{si } x > c \end{cases} = \{ \mu_{S;a,b}(x) \cdot u_{Z;c,d}(x) \} \quad (1.8)$$

1.7.5 Campana de Gauss

Mediante la campana de Gauss se pueden representar números difusos. Esta función tiene la particularidad de que se hace cero en el infinito por lo que habrá valores de pertenencia distintos de cero en todo el universo de discurso. Son las menos empleadas en aplicaciones de control por lo engorroso que resulta el cálculo y no ofrecen mejoras sustanciales. La figura 1.7 muestra un conjunto difuso representado por una función de pertenencia de tipo Campana de Gauss.

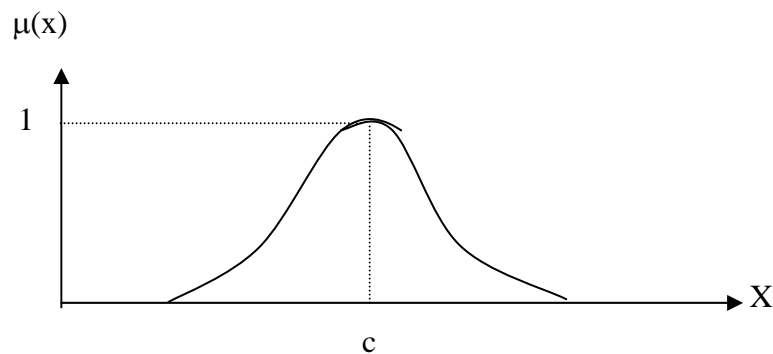


Fig. 1.7 Función de pertenencia Campana de Gauss

La expresión matemática de la campana de Gauss es la siguiente:

$$\mu_G(x) = e^{k(c-x)^2} \quad (1.9)$$

donde

$$k = \frac{-1}{2 \cdot \sigma^2}$$

1.7.6 Función de tipo Puntual

En los controladores de tipo Sugeno las reglas de inferencia difusa son del tipo:

si X_1 es A_1 y ... y X_n es A_n entonces U es $F(X_1, \dots, X_n)$

donde

$$F(X_1, \dots, X_n) = a_0 + a_1 X_1 + \dots + a_n X_n,$$

Generalmente se trabaja con el coeficiente a_0 y la manera de representar el consecuente de las reglas de este tipo de controladores es empleando una función de pertenencia de tipo puntual, también denominadas con frecuencia “singletons”, en la que existe pertenencia sólo en un punto e igual a 1.

La figura 1.8 muestra una función de pertenencia de tipo puntual.

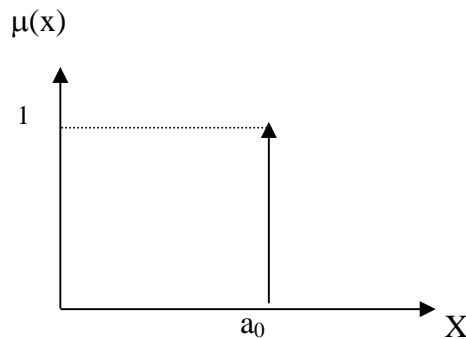


Fig. 1.8 Función de pertenencia de tipo puntual

La expresión matemática de este tipo de funciones de pertenencia es la siguiente:

$$\mu_p(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } x = a_0 \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (1.10)$$

1.8 ESTRUCTURA DE LA BASE DE CONOCIMIENTOS

Como anteriormente se dijo, la base de conocimientos de un controlador difuso la componen la base de datos y la base de reglas.

1.8.1 Base de datos

La estructura de la base de datos no es más que una lista de funciones de pertenencia, que puede estar acotada en función del medio de cómputo que se emplee para la implementación del algoritmo.

| | | | | | |
|-------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------|-----------------|
| | 0 | 1 | 2 | | 7 |
| Var: | MF ₀ | MF ₁ | MF ₂ | | MF ₇ |

A su vez cada información correspondiente a todas las variables del controlador son dos listas de variables, una para las entradas y otra para las salidas.

| | | | | | | | | | |
|-----------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-----------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | | 0 | 1 | 2 | 3 |
| VariablesEnt : | var ₀ | var ₁ | var ₂ | var ₃ | VariablesSal : | var ₀ | var ₁ | var ₂ | var ₃ |

1.8.2 Base de Reglas

La base de reglas puede ser tipo MISO (Multiple Input Single Output), Múltiples entradas y una salida, por sus siglas en inglés, o de tipo MIMO (Multiple Input Multiple Output). Un conjunto de reglas de tipo MIMO puede ser expresada como una base de reglas de tipo MISO aplicando operaciones lógicas.

Los antecedentes se organizan en un arreglo del tamaño de la cantidad máxima de variables de entradas permitidas al sistema.

| | | | | |
|--------------|------|------|------|------|
| | Var0 | Var1 | Var2 | Var3 |
| Antecedentes | 2 | -1 | 4 | -1 |

En este arreglo la posición inicial se refiere a la variable cero, y así sucesivamente hasta la última variable, en cada una de estas posiciones se ubica el valor del índice de la función de pertenencia a la cual hace referencia la regla, en el caso que una regla no incluya una variable determinada, en la posición de esta se ubica -1.

Así la estructura de datos para poder representar computacionalmente una regla puede ser la siguiente:

TConectivo = (Tand, Tor);
TRegla = class

```

Antecedentes : Array [0..MaxNoOfVar-1] of shortint;
VariableSal,
MfConsecuente : byte;
Conectivo : TConectivo;
Alphai : single;
Peso : Single;
end;

```

siendo

| | |
|--------------------------|--|
| VariableSal | Índice a la variable de salida del consecuente de la regla. |
| MfConsecuente | Índice a la función de pertenencia de la variable de salida del consecuente de la regla. |
| Alpha_i | Es el grado de activación de la regla. |
| Conectivo | Indica si los antecedentes de las reglas van a estar conectados por el conectivo de disyunción (<i>and</i>) o de conjunción (<i>or</i>). |
| Peso | Es el peso de ponderación de la regla. |

Ejemplo:

Supongamos la base de datos que muestra la Figura 1.9, correspondiente a cierto controlador difuso:



Fig. 1.9 Base de Datos

Reglas:

if (Entrada1 = mf1) **then** Salida = mf3

if (Entrada1 = mf2) **and** (Entrada2 = mf1) **then** Salida = mf1

Estructura de las reglas

Regla1 :

| | var0 | var1 | var2 | var3 |
|---------------|------|------|------|------|
| Antecedente : | 0 | -1 | -1 | -1 |

Conectivo : AND

VariableSalida : 0

MfConsecuente : 2

Regla2 :

| | var0 | var1 | var2 | var3 |
|---------------|------|------|------|------|
| Antecedente : | 1 | 0 | -1 | -1 |

Conectivo : AND

VariableSalida : 0

MfConsecuente : 0

1.8.3 Motor de inferencia

El motor de inferencias representa el núcleo del controlador, y agrupa toda la lógica de inferencia difusa del controlador. La inferencia difusa es el proceso mediante el cual se obtiene como consecuente un conjunto difuso U global, a partir de unos antecedentes difusos que son las variables de entradas del sistema. [Reyero95]

El primer paso en la labor de la máquina de inferencia consiste en calcular el grado de activación de cada una de las reglas, para ello se difumina cada una de las variables de entrada y se calculan los antecedentes de las reglas.

Si el conectivo empleado para relacionar las proposiciones de los antecedentes de las reglas es el AND se aplicará una función t – norma para calcular el grado de activación de la regla, en caso que sea el conectivo OR se aplicará una s – norma.

Una vez calculado el grado de activación de cada una de las reglas el próximo paso será el proceso de implicación. Se aplica el operador de implicación definido sobre cada uno de los conjuntos difusos del consecuente de las reglas para así obtener el conjunto difuso implicado.

Cuando se usan métodos exactos para la implementación del controlador difuso se emplea una descripción paramétrica de los conjuntos difusos de salida y las funciones de implicación actúan sobre estos puntos solamente. [Cordón99]

Cuando se emplean los métodos aproximados se tienen N listas de puntos que describen los conjuntos difusos. La cantidad de listas o arreglos será igual a la cantidad de reglas y el tamaño de cada arreglo individualmente estará dado por la cantidad de puntos de discretización del universo de discurso. [Cordón99]

Como resultado final de la inferencia se llega a un conjunto difuso global U que constituye la entrada al bloque de desdifuminación. Una vez obtenidos los vectores representativos de los conjuntos difusos implicados, o los puntos que los determinan, viene el proceso de agregación.

El proceso de agregación consiste en tener en cuenta en el conjunto difuso global U el aporte de cada una de las reglas individualmente.

La estructura del motor de inferencia es la que muestra la figura 1.10 donde N es el número de reglas del controlador y M es el número de puntos de discretización que se van a emplear para trabajar con cada uno de los conjuntos difusos de salida de manera discreta. Se crea una lista de puntos o valores por cada regla que va a representar el conjunto difuso del consecuente de la misma.

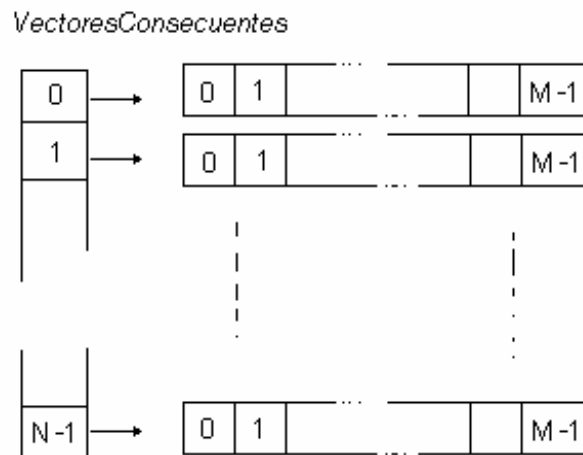


Fig. 1.10 Estructura de la maquina de inferencia.

A continuación se muestra un pseudocódigo para el cálculo de la inferencia.

```

for i:=0 to N-1 do
  CalculaActivación(ListaDeReglas[i]);
for i:=0 to N-1 do
  for j:=0 to M-1 do
    VectoresConsecuente[i][j]:=
      Implicación( ListaDeReglas[i].Alphai, VectoresConsecuentes[i][j] );
for i:=0 to M do
  for j:=0 to K do
    VectorU[j]:=Agregacion ( VectorU[j], VectoresConsecuentes[j][i] );
Salida:=Desdifumina(VectorU);

```

Donde:

| | |
|--------------------------|---|
| M | número de puntos de discretización del universo de discurso. |
| N | número de reglas del sistema. |
| K | número de Reglas que tienen como consecuente conjuntos difusos de la misma variable de salida. |
| <i>CalculaActivación</i> | Módulo que se encarga de calcular el grado de activación de cada una de las reglas de la base de conocimiento. |
| <i>Implicación</i> | Módulo que se encarga de realizar la función de implicación. |
| <i>Agregación</i> | Módulo que se encarga de realizar la función de agregación sobre todos aquellos vectores que pertenezcan a una misma variable |
| <i>Desdifuminación</i> | Módulo que se encarga de dado el conjunto difuso global U devolver un valor real como resultado de la inferencia. |

El resultado del proceso de inferencia es el conjunto difuso global U. Para cada una de las variables de salida del controlador, $\mu_{U_i}(x)$ es función del grado de activación de cada una de las reglas cuyo consecuente es un conjunto difuso que pertenece a la variable i y de cada uno de los vectores o conjuntos difusos implicados.

$$\mu_{U_i}(x) = F(\text{Alpha}_i, \text{VectoresConsecuentesImplicados})$$

donde $\mu_{U_i}(x)$ es la función de pertenencia del conjunto difuso global U inferido para la variable i.

Una vez calculado el grado de activación de cada una de las reglas el resto del proceso de inferencia y el posterior proceso de desdifuminación se puede realizar en paralelo.

1.9 INTERFAZ DE DESDIFUMINACIÓN

Existen dos métodos de desdifuminación en función del orden de las operaciones de agregación y de desdifuminación.

En lo que sigue, se nota B_i' al conjunto difuso inferido por la regla R_i .

Modo A: Se agrega primero y después se desdifumina. Se realiza la agregación de todas las reglas o del aporte individual de cada una de las reglas con el objetivo de realizar la desdifuminación posteriormente. Cada uno de los conjuntos difusos B_i' son agregados empleando el operador del mínimo o del máximo generalmente y se obtiene un conjunto difuso global B' . [Cordón99]

$$\mu_{B'}(y) = AG \{ \mu_{B_1'}(y), \mu_{B_2'}(y), \dots, \mu_{B_n'}(y) \}$$

donde AG es el operador de agregación o función global que acumula las evidencias.

Modo B: Se desdifumina primero cada uno de los conjuntos difusos inferidos por la acción individual de cada una de las reglas y se agrega después. La acción final de control se calcula a partir del aporte individual de cada una de las reglas. [Cordón99]

La programación o el algoritmo de desdifuminación empleado depende grandemente del modo de desdifuminación que se emplee. El modo A es mucho más complejo y necesita mayor esfuerzo computacional para obtener el conjunto difuso $\mu_{B'}(y)$. El modo B es mucho más empleado actualmente por su simplicidad.

Los métodos de desdifuminación en modo A se pueden clasificar en exactos o aproximados. Los métodos aproximados realizan la discretización del conjunto difuso B' y

los exactos realizan el análisis geométrico del conjunto B' , a partir del cual aplican el algoritmo de desdifuminación.

A continuación se describen someramente algunos de los métodos de desdifuminación más empleados y sus algoritmos: Centro de gravedad, bisector, máximo principal, máximo mayor, máximo menor y suma de centros ponderadas.

Centro de gravedad

El método del centro de gravedad o centro de área es uno de los más empleados y calcula el valor discreto y^* como salida desdifuminada del controlador como la coordenada x del centro de gravedad del conjunto difuso global B' . La figura 1.11 muestra el conjunto difuso global B' que ha sido inferido agregando los conjuntos difusos $\mu_{B1'}$, $\mu_{B2'}$, $\mu_{B3'}$, el operador de implicación es el del máximo.

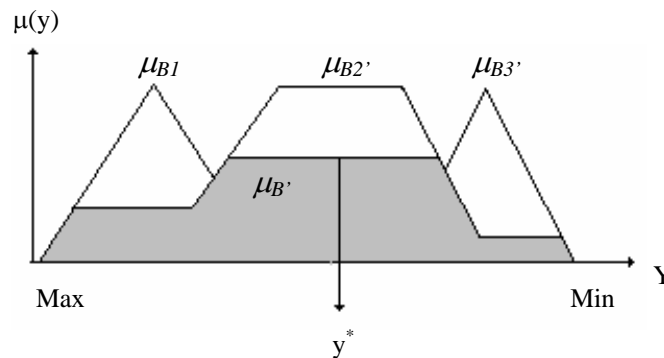


Fig. 1.11 Valor desdifuminado aplicando el método del Centro de gravedad.

La expresión matemática del centro de gravedad para el cálculo del valor desdifuminado y^* es:

$$y^* = \frac{\int y \mu_Y(y)}{\int \mu_Y(y)}$$

para el caso continuo, y

$$y^* = \frac{\sum_1^J y_j \mu_Y(y_j)}{\sum_1^J \mu_Y(y_j)}$$

para el caso discreto, donde J es el número de niveles de discretización.

Para calcular el valor desdifuminado y^* a partir de un vector que me represente el conjunto difuso global resultante de la inferencia B' se necesita el valor *máximo*, el *mínimo* del universo de discurso y la cantidad de puntos en los que se discretizó el conjunto. La cantidad de puntos en la que se discretizó el conjunto está dado por el tamaño del vector. A continuación se muestra la función que realiza el cálculo del valor desdifuminado aplicando el centro de gravedad dado el vector que representa el conjunto difuso B' .

```
function DefuzCentroid(Vector : array of single; max, min: single): Single;
var
  i: integer;
  Sum, FX, Paso: single;
begin
  Paso:=(max-min)/High(vector);
  Sum:=0;
  FX:=0;
  for i:=0 to High(Vector) do
  begin
    FX:=FX + (Min+i*Paso)*Vector[i];
    Sum:=Sum+Vector[i];
  end;
  if Sum=0 then Result:=(max+min)/2
  else Result:=FX/Sum;
end;
```

Bisector

Este método de desdifuminación devuelve el valor y^* del universo de discurso en el que queda bipartida el área bajo la curva μ_B .

$$y^* = z' / \int_{min}^{z'} \mu_B'(z) dz = \int_{z'}^{max} \mu_B'(z) dz$$

Algoritmo de desdifuminación aplicando el método del bisección:

```
function DefuzBisector(Vector : array of single; max, min: single): Single;
var
  i: integer;
  Area, SubArea, Paso: single;
begin
  Paso:=(max-min)/Length(Vector);
  Area:=0;
  SubArea:=0;
  for i:=0 to High(vector) do Area:=Area+Vector[i];
  i:=0;
  if Area=0 then Result:=(max+min)/2
  else
  begin
  While SubArea<Area/2 do
  begin
  SubArea:=SubArea+Vector[i];
  Inc(i);
  end;
  Result:=min+Paso*i;
  end;
  end;
```

Máximo principal

El método del máximo principal consiste en hallar la media de todos los puntos en los que el conjunto difuso B' alcanza su máximo:

$$h = \sup_{u \in Y} \mu_Y(y)$$

$$y^* = \frac{\left(\sum_{i=1}^n (y \in Y \mid \mu_Y(y) = h) \right)}{n}$$

donde n es el número de valores en los que $\mu_Y(y) = h$

Máximo Menor/Mayor

Estos métodos consisten en la búsqueda del valor máximo de $\mu_{B'}$ más a la izquierda en el caso del máximo menor, y más a la derecha en el caso del máximo mayor.

La expresión matemática es la siguiente:

Máximo menor

$$h = \sup_{u \in Y} \mu_Y(y)$$

$$y^* = \inf_{y \in Y} \{y \in Y \mid \mu_Y(y) = h\}$$

Máximo mayor

$$h = \sup_{u \in Y} \mu_Y(y)$$

$$y^* = \sup_{y \in Y} \{y \in Y \mid \mu_Y(y) = h\}$$

Los correspondientes algoritmos son:

```
function GetMax(vector : Array of single): single;
var
  i: integer;
  Temp: single;
begin
  Temp:=Vector[0];
  for i:=1 to high(Vector) do
    if Vector[i]>temp then Temp:= vector[i];
  Result:=Temp;
end;
```

```
function DefuzMaxMenor(Vector : array of single; max, min: single): Single;
var
  i, IndiceMinimo : integer;
  Maximo,
  Paso : single;
  Find : boolean;

begin
  Maximo:=GetMax(Vector);
  Paso:=(max-min)/Length(Vector);
  Find:= false;
  i:=0;
  while ((Not Find) and (i<=high(Vector))) do
    if Vector[i]=Maximo then
      begin
        IndiceMinimo:=i;
        Find:=true;
      end
    else inc(i);
  Result:=Min+Paso*IndiceMinimo;
end;
```

```

function DefuzMaxMayor(Vector : array of single; max, min: single): Single;
var
  i, IndiceMaximo : integer;
  Maximo,
  Paso : single;
  Find : boolean;

begin
  Maximo:=Getmax(Vector);
  Paso:=(max-min)/Length(Vector);
  i:=High(Vector);
  Find:=false;
  while ((not find) and (i>=0)) do
    if Vector[i] = Maximo then
      begin
        find:=True;
        IndiceMaximo:=i;
      end
    else dec(i);
  Result:=Min+Paso*IndiceMaximo;
end;

```

Suma de centros ponderadas

Para el caso de emplear un controlador de tipo Sugeno se emplea este método y es bien sencillo y rápido. La expresión matemática es la siguiente:

$$y^* = \frac{\sum_{i=1}^n y_{p_i} \cdot \alpha_i}{\alpha_i}$$

donde:

n es el número de conjuntos difusos de esa variable

α_i es el grado de activación de la regla i ésima.

y_{p_i} es el centro del conjunto difuso i ésimo.

Para el caso de inferencia de tipo Sugeno o un controlador de este tipo y_{p_i} es el coeficiente a_0 del consecuente de las reglas.

1.10 ADQUISICIÓN, PRE Y POST PROCESAMIENTO DE DATOS

El sistema de adquisición de datos del controlador implementado en cualquier medio de cómputo es sumamente importante, así como los algoritmos empleados para procesar las señales de entrada y postprocesar las señales de salida del sistema. Un buen acondicionamiento de las señales antes que sean procesadas garantiza la plausibilidad del resultado obtenido al procesar los datos.

1.10.1 Sistema de adquisición de datos local

Este tipo de sistema es normalmente implementado en un computador de escritorio o un computador portátil o en un Autómata programable. Se dice que es "local" porque la tarjeta de adquisición de datos reside dentro del equipo y el sistema de acondicionamiento de señales está desarrollado por hardware o por software.

La Adquisición de Datos, consiste en tomar un conjunto de variables medibles en forma física y convertirlas en niveles de voltajes, de tal manera que se puedan utilizar en la computadora. Se requiere de un elemento que convierta las señales analógicas o niveles de voltajes a valores digitales con los que operan las computadoras, el elemento que hace dicha transformación es la tarjeta de Adquisición de Datos.

Una vez que las señales eléctricas se transformaron en digitales dentro de la memoria de la computadora, se les puede procesar para mejorar sus características u obtener otras señales que sean una función de esta. A partir de estas nuevas señales se puede aplicar un algoritmo tan complejo como se quiera para obtener un conjunto de salidas al tiempo que se puede llevar un registro de las mismas.

De la misma manera que se toma una señal eléctrica y se transforma en una digital dentro de la computadora, se puede tomar una señal digital o binaria y convertirla en una eléctrica, en este caso el elemento encargado de hacer esta transformación es nuevamente la tarjeta de adquisición de datos.

Cualquiera sea el sistema de adquisición de datos y control por computador precisa de un dispositivo de adquisición de datos que sirva de interfaz con el proceso físico. Para trabajar con un dispositivo de entrada/salida se precisa del software apropiado.

La figura 1.12 muestra el diagrama en bloques de un sistema de adquisición de datos y control por computador.[Smith97]

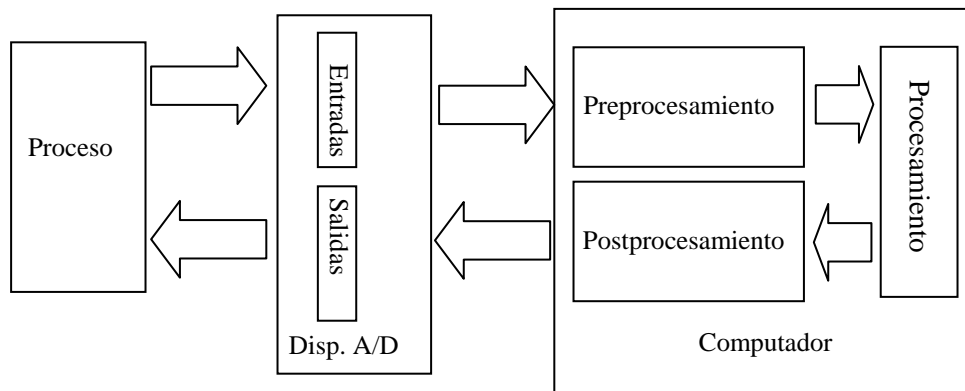


Fig. 1.12 Diagrama en bloques de un sistema de adquisición y control por computador.

1.10.2 Interfase con el dispositivo de adquisición de datos

El trabajo con los dispositivos de adquisición de datos se realiza mediante las librerías de enlace dinámico (dll), desarrolladas específicamente para cada uno de los dispositivos de adquisición de datos. El usuario o desarrollador del sistema puede implementar sus propias librerías de enlace dinámico que le permitan trabajar con desarrollos propios. También se puede implementar el sistema de adquisición de datos mediante un PLC.

1.10.3 Sistema de Acondicionamiento de Señales

El sistema de acondicionamiento de señales está formado por las etapas de preprocesamiento y postprocesamiento de los datos. Con el sistema de acondicionamiento de la señales no sólo se aplican algoritmos de filtros, sino también se realizan ajustes de escala así como se obtienen nuevas señales, que sean el resultado de una transformación de las leídas directamente del proceso.

Preprocesamiento y postprocesamiento de los datos

Al realizar la lectura del dispositivo de adquisición de datos se leen valores binarios que son representativos de los niveles de voltajes leídos en la entrada de la tarjeta que a su vez representan un valor de la señal del proceso.

Ajuste de escala de la variable medida del proceso

Dado un valor leído de un canal de entrada X_i se debe obtener un valor de salida X_{if} que represente el valor real físico del proceso.

$$X_{if} = m \bullet X_i + n \quad (1.10)$$

donde m es la pendiente o ganancia del escalado (en caso de un escalado lineal) y n es la pendiente u offset en caso de escalado lineal.

El caso analizado anteriormente se corresponde cuando se está haciendo un ajuste de escala a la entrada. Para el caso de una salida el análisis es similar sólo que ahora el proceso es inverso. Es posible, y en algunos casos necesario realizar un proceso de linearización de las señales.

Con la lectura de cada uno de los canales del dispositivo de adquisición de datos sólo tenemos aquellas señales leídas directamente del proceso. En cualquier sistema de control es interesante obtener señales de entradas que sean una función de las variables leídas del proceso como puede ser el error, la derivada del error o de cualquiera de las variables que describen el estado del proceso así como filtrar la señal. Por ello se hace necesario la construcción de estas señales a partir de las lecturas de las variables del proceso.

Obtención de la variable Error a partir de una variable medida del proceso

En cualquier sistema, el error se define como la diferencia entre el valor deseado de la variable y el valor actual.

$$\text{Error}(I_i(t)) = \text{Ref} - \text{Escalado}(I_i(t))$$

I_i Valor leído del canal I_i .

Ref Valor deseado para la variable de entrada I_i .

La operación de error se le puede aplicar tanto a una variable de entrada como de salida de nuestro sistema. No tiene mucho sentido aplicarlo a la salida del sistema, más bien lo que se quiere en un sistema de control es saber cuán cerca o lejos está una determinada variable del valor deseado y basándose en esta diferencia tomar determinada acción de control.

Derivada de la variable medida del proceso

Dado una lectura de un canal de entrada I_i en el instante t_l se puede calcular la derivada de la señal leída aplicando la aproximación de la diferencia hacia atrás o con el valor leído en el instante de tiempo anterior de manera que [Ques87]:

$$\frac{dI_i(t)}{dt} = \frac{I_i(nT) - I_i(nT - T)}{T} = \frac{I_{i_n} - I_{i_{n-1}}}{T} \quad (1.11)$$

donde

T Intervalo de muestreo de la señal.

n Instante n de muestreo.

nT Tiempo de muestreo.

Filtrado de la variable medida del proceso

En ocasiones las señales leídas tienen una componente de ruido apreciable y es necesario filtrarlas. El filtro exponencial es el más empleado en los sistemas de control digital para atenuar las señales de ruido. Este no es más que una emulación de los filtros RC pasa bajos, que son sistemas de primer orden con ganancia unitaria. [Hamm93] [Smith97]

Dada la ecuación de transferencia del filtro de primer orden con ganancia unitaria:

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{1}{\tau_F S + 1}$$

donde

$Y(S)$ Salida del filtro en el dominio de S.

$X(S)$ Señal de entrada al filtro con la componente de ruido.

τ_F Constante del filtro.

aplicando transformada Z se obtiene:

$$Y(z) = \frac{T}{\tau_F + T - \tau_F \cdot z^{-1}} \cdot X(z)$$

$$(\tau_F + T) \cdot Y(z) - \tau_F \cdot z^{-1} \cdot Y(z) = T \cdot X(z)$$

cuya ecuación en diferencia finita es:

$$Y_n = \frac{T \cdot X_n}{\tau_F + T} + \frac{\tau_F \cdot Y_{n-1}}{\tau_F + T} = a \cdot Y_{n-1} + (1-a) \cdot X_n$$

donde

$$a = \frac{T}{\tau_F + T} \quad 0 < a < 1$$

En la medida que se aumenta el valor de la constante del filtro, “a” tiende a cero y por tanto se tiene menos en cuenta el valor de la señal en el instante anterior. Si hacemos τ_F muy pequeño se le dará más peso al valor del estado anterior con respecto al estado actual.

De manera general una variable de entrada

$$I_{if} = \mathbf{Filtro}(\mathbf{Escalado}(I_i)).$$

Incremento o integración de la variable medida del proceso

Muchos algoritmos de control son incrementales, es decir, que la salida que se obtiene como resultado del procesamiento de las entradas no es el valor absoluto, sino la variación que sufrirá el valor de salida con respecto al valor anterior [Ogata87], [Ogata98]. Por tanto se hace necesario la programación de un bloque incremental.

$$Y_i n = \begin{cases} Y_i n - 1 + \Delta Y_i n & \text{si } Y_i \min < Y_i n < Y_i \max \\ Y_i \max & \text{si } Y_i n \geq Y_i \max \\ Y_i \min & \text{si } Y_i n \leq Y_i \min \end{cases}$$

Las condiciones de saturación se imponen para que la señal incrementada no crezca o decrezca indefinidamente o se salga de una banda prefijada por $Y_i \max$ y $Y_i \min$. Las condiciones iniciales del proceso de integración o incremento se toman siempre cero.

1.10.5 Control en tiempo real

Hoy en día, son más y más las aplicaciones en las que se emplean computadores personales para tomar mediciones y automatizar procesos. Cuando se trabaja en un sistema basado en un PC se están aprovechando las ventajas de las tecnologías de la computación más recientes como son las tarjetas de adquisición de datos.

Si bien es cierto que un sistema de adquisición de datos y control en tiempo real no es fácil de lograr con un computador personal, lo ideal sería contar con las mismas ventajas que ofrece un PC (interfaz gráfica, sistemas abiertos, conectividad, bajo costo) y la habilidad de crear aplicaciones lo suficientemente confiables para desempeñar el control de un sistema crítico.

Aunque “tiempo real” es uno de los términos más comúnmente usados en el mundo del control digital, su definición es un tanto ambigua. La mayoría de los expertos están de acuerdo en que tiempo real significa con retardos aceptables.

El término tiempo real duro, comúnmente se utiliza para definir un sistema que debe ejecutarse sin falla y cumplir con los requerimientos de tiempo en todo momento. Es un error común pensar que Tiempo Real significa rápido; de hecho algunas aplicaciones de adquisición de datos y control tienen tiempos de muestreo de 500ms como es el caso de los sistemas de control de temperaturas. El grado de inseguridad con cada ciclo de muestreo y procesamiento definen los requerimientos de “tiempo real” de un proceso.

La tecnología Windows para desarrollar sistemas de Tiempo Real aún presenta retos. En sistemas operativos de Tiempo Real, las interrupciones y eventos son jerarquizados y los eventos con la mayor prioridad se ejecutan antes que los eventos de prioridad menor. Aunque la tecnología multihilo ha incrementado la confiabilidad y manejo de interrupciones, aún existen situaciones en las que el manejador de dispositivo no tiene prioridad sobre otros eventos menos críticos.

CAPITULO II

EL PROCESO DE CURADO DEL TABACO EN HOJAS

INTRODUCCIÓN

La cura controlada de tabaco en Cuba viene realizándose hace varias décadas. Con ella se logra acelerar el proceso de secado de la hoja, se obtiene un mayor porcentaje de capas para la exportación y se necesita un menor número de casas tradicionales (secaderos) para la cura natural.

Para lograr las condiciones necesarias en la cura controlada hay que garantizar la temperatura y la humedad relativa adecuadas dentro de la cámara durante los pasos de la curación, lo cual se logra mediante un generador de aire caliente que aporta el aire necesario para mantener la ventilación requerida por las hojas, una correcta homogenización del ambiente en el interior del secadero y la temperatura adecuada, además de expulsar o incorporar humedad cuando sea necesario. Todo este proceso es controlado por un dispositivo inteligente que garantiza el seguimiento de un programa de curación previamente seleccionado por el operario del sistema, que es conocido con el nombre de “curador” y que es quien al final decide el cambio de una etapa a otra a partir del análisis que hace del estado de la hoja. Es decir, el curador es el experto que toma las decisiones de los cambios de etapa según el estado de la hoja.

La tecnología que hasta el momento se ha utilizado para el control del proceso de secado no permite cambios que puedan ayudar, sin afectar el proceso, a introducir mejoras al mismo con el objetivo de superar la calidad del producto final y obtener menores consumos de energía lo cual es una limitación para el curado de tabaco de forma artificial en las condiciones actuales de aquel país. Es en este sentido que se encaminó nuestro trabajo. Sin desconocer toda la experiencia que existe sobre el tema, proponer un cambio de tecnología y la utilización de las técnicas de Inteligencia Artificial, y específicamente las de la Soft Computing, para captar el “conocimiento” de los expertos de manera que se logaran mejores prestaciones en el proceso de secado de la hoja.

En lo que continúa se expone un estudio sobre el proceso de cura del tabaco según el tipo, desde una visión universal, absolutamente necesario para la comprensión del trabajo

realizado. Naturalmente se particulariza en el caso específico del proceso en Cuba, destacándose las etapas que forman parte del mismo así como la explicación del proceso tecnológico utilizado. También se describen los diferentes sistemas tecnológicos utilizados así como los sistemas de control empleados mostrándose las ventajas y desventajas de cada uno.

El tabaco (*Nicotiana tabacum L.*) es una planta que tiene diferentes usos, destacando su empleo para fumar en forma de puros, cigarrillos y picadura para pipa, que resultan los más difundidos; también para mascar, inhalar, y para elaborar insecticidas a partir de la nicotina, su principal alcaloide. Además, se emplea en la extracción de proteínas con fines alimenticios, como materiales sintéticos y varios productos para la bioingeniería [Ares99].

Ocupa el tabaco una posición sin paralelo entre las plantas de cultivo. En términos generales esta planta ha logrado una situación muy notable, destacando porque [Inst01]: “Es una de las pocas cosechas que llegan al mercado mundial totalmente en forma de hojas. En muchos países es un importante instrumento en la política financiera y económica. Como narcótico formador de hábitos, es objeto de constantes ataques encaminados a moderar o interrumpir su uso, pese a lo cual, su consumo se ha mantenido, incluso incrementado”. Por otra parte, el tabaco es un producto de gran intercambio comercial de tal forma que la cuarta parte del que se produce en el mundo, está sujeto a transacciones entre diferentes países.

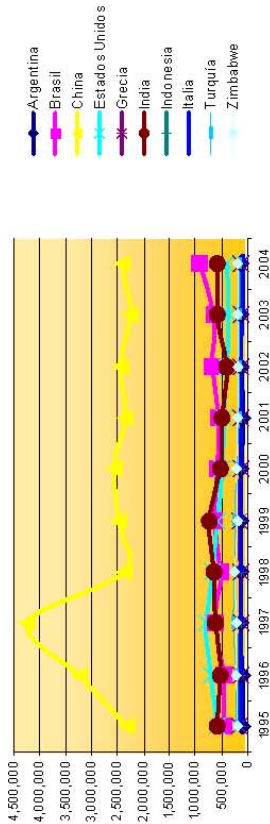
La producción mundial de tabaco, de acuerdo a las estadísticas de la F.A.O. que se recogen en las siguientes tablas, demuestran como el rendimiento de la producción de tabaco en Cuba sitúa a ese país en los últimos lugares (92º) entre los productores mundiales



MINISTERIO DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL
OBSERVATORIO AGROCADENAS COLOMBIA

Producción

Cadena: Tabaco
Información mundial
Producto:
0826 HOJAS DE TABACO



Tm

| Ord. | País | 1985 | 1986 | 1987 | 1988 | 1989 | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | Particip* Tasa cr. |
|------|------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------------|
| 1 | China | 2,326,685 | 3,245,230 | 4,261,283 | 2,373,978 | 2,478,295 | 2,863,854 | 2,388,842 | 2,454,105 | 2,262,243 | 2,405,000 | 36.51% |
| 2 | Brasil | 455,986 | 472,738 | 596,962 | 505,353 | 629,525 | 578,451 | 564,536 | 670,309 | 666,112 | 928,332 | 14.09% |
| 3 | India | 566,700 | 535,200 | 618,000 | 646,000 | 736,200 | 520,000 | 490,000 | 385,000 | 595,000 | 595,000 | 9.03% |
| 4 | Estados Unidos | 576,020 | 688,870 | 810,750 | 671,250 | 566,360 | 477,632 | 449,760 | 398,520 | 364,080 | 400,600 | 6.08% |
| 5 | Zimbabue | 196,380 | 208,716 | 215,369 | 260,000 | 193,183 | 227,726 | 195,905 | 178,408 | 180,000 | 180,000 | 2.73% |
| 6 | Turquía | 204,440 | 225,216 | 286,414 | 250,566 | 243,468 | 200,280 | 144,786 | 152,896 | 151,860 | 151,860 | 2.31% |
| 7 | Indonesia | 140,169 | 151,025 | 136,746 | 137,564 | 135,384 | 137,578 | 134,379 | 143,173 | 135,000 | 135,000 | 2.05% |
| 8 | Grecia | 148,543 | 133,750 | 136,977 | 137,114 | 139,791 | 136,593 | 136,490 | 127,000 | 121,000 | 121,000 | 1.84% |
| 9 | Argentina | 79,011 | 98,201 | 123,206 | 116,510 | 113,400 | 114,509 | 98,110 | 126,431 | 117,779 | 118,000 | 1.79% |
| 10 | Italia | 124,482 | 130,590 | 130,513 | 132,508 | 126,352 | 129,937 | 130,487 | 122,231 | 106,250 | 102,765 | 1.56% |
| 19 | Canadá | 74,219 | 70,151 | 76,204 | 73,178 | 70,215 | 53,010 | 58,000 | 54,550 | 46,338 | 48,000 | 0.73% |
| 22 | Colombia | 26,000 | 30,412 | 23,319 | 30,235 | 33,216 | 27,767 | 26,158 | 26,332 | 18,026 | 38,000 | 0.58% |
| 23 | Cuba | 24,989 | 31,485 | 30,938 | 37,870 | 30,562 | 32,237 | 31,751 | 34,484 | 34,494 | 34,484 | 0.52% |
| 34 | México | 27,401 | 42,631 | 32,204 | 48,763 | 50,567 | 45,164 | 40,560 | 21,936 | 21,885 | 21,885 | 0.33% |
| 43 | Perú | 3,100 | 6,100 | 14,294 | 12,307 | 15,561 | 12,249 | 11,436 | 9,832 | 12,000 | 12,000 | 0.18% |
| 51 | Paraguay | 6,945 | 8,156 | 14,024 | 13,700 | 10,920 | 4,486 | 12,508 | 9,776 | 10,000 | 10,000 | 0.15% |
| 56 | Ecuador | 1,625 | 1,816 | 3,850 | 3,461 | 3,851 | 5,080 | 4,824 | 7,164 | 7,958 | 8,000 | 0.12% |
| 57 | Chile | 12,159 | 10,999 | 11,117 | 11,679 | 11,789 | 10,521 | 7,382 | 7,245 | 8,000 | 8,000 | 0.12% |
| 62 | Venezuela, RB de | 14,751 | 14,412 | 13,866 | 13,334 | 10,034 | 8,755 | 6,464 | 6,504 | 5,320 | 5,300 | 0.08% |
| 78 | Uruguay | 2,500 | 2,500 | 2,600 | 2,600 | 2,800 | 2,900 | 2,900 | 2,900 | 3,000 | 3,000 | 0.05% |
| 102 | Bolivia | 890 | 905 | 920 | 920 | 965 | 975 | 978 | 980 | 975 | 975 | 0.01% |

Fuente: FAO

Cálculos: Observatorio Agrociadenas Colombia

* Participación en el mundo - Año: 2004

14-Abr-05

<http://www.agrociadenas.gov.co>

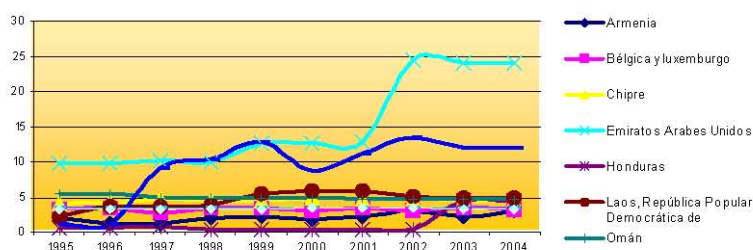


MINISTERIO DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL
OBSERVATORIO AGROCADENAS COLOMBIA

Rendimientos

Cadena: Tabaco

Producto: 0826 HOJAS DE TABACO



Información mundial

| Ord. | País | 1995 | 1996 | 1997 | 1998 | 1999 | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | Tasa cr. |
|------|--------------------------------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|
| 1 | Emiratos Arabes Unidos | 9.70 | 9.89 | 10.18 | 10.09 | 12.66 | 12.69 | 12.94 | 24.54 | 24.00 | 24.00 | 11.83% |
| 2 | Perú | 1.24 | 1.22 | 9.16 | 10.40 | 12.81 | 8.71 | 11.30 | 13.40 | 12.00 | 12.00 | 23.15% |
| 3 | Laos, República Popular Democr | 2.16 | 3.60 | 3.73 | 3.89 | 5.44 | 5.96 | 5.94 | 5.02 | 4.99 | 4.99 | 7.68% |
| 4 | Omán | 5.45 | 5.42 | 5.00 | 4.81 | 4.81 | 4.81 | 4.76 | 4.76 | 4.70 | 4.70 | -1.58% |
| 5 | Chipre | 4.13 | 4.20 | 4.60 | 4.42 | 4.50 | 4.92 | 4.64 | 4.64 | 4.50 | 4.50 | 0.93% |
| 6 | Honduras | 0.70 | 0.69 | 0.85 | 0.43 | 0.37 | 0.45 | 0.44 | 0.44 | 4.40 | 4.40 | 14.37% |
| 7 | Samoa | 3.50 | 3.50 | 3.50 | 3.50 | 3.50 | 3.50 | 3.50 | 3.50 | 3.50 | 3.50 | 0.00% |
| 8 | Uruguay | 3.21 | 3.21 | 3.25 | 3.25 | 3.25 | 3.37 | 3.41 | 3.41 | 3.33 | 3.33 | 0.61% |
| 9 | Bélgica y Luxemburgo | 3.36 | 3.57 | 2.89 | 3.50 | 3.44 | 3.00 | 3.50 | 3.00 | 3.46 | 3.32 | -0.17% |
| 10 | Armenia | 2.00 | 1.21 | 1.25 | 2.00 | 2.26 | 1.81 | 2.34 | 3.05 | 2.29 | 3.00 | 7.77% |
| 12 | Chile | 3.15 | 3.41 | 3.18 | 2.78 | 2.98 | 3.00 | 2.94 | 3.18 | 2.96 | 2.96 | -0.83% |
| 14 | Canadá | 2.76 | 2.73 | 2.71 | 2.65 | 2.78 | 2.23 | 2.42 | 2.88 | 2.90 | 2.82 | 0.26% |
| 19 | Estados Unidos | 2.15 | 2.32 | 2.40 | 2.31 | 2.24 | 2.50 | 2.57 | 2.30 | 2.19 | 2.42 | 0.53% |
| 20 | Venezuela, RB de | 1.78 | 1.65 | 1.62 | 1.66 | 1.57 | 1.63 | 1.92 | 2.02 | 2.49 | 2.41 | 4.35% |
| 37 | Brasil | 1.55 | 1.50 | 1.77 | 1.43 | 1.84 | 1.87 | 1.87 | 1.95 | 1.67 | 1.98 | 2.58% |
| 38 | México | 1.65 | 1.85 | 1.49 | 1.52 | 1.95 | 1.99 | 2.00 | 1.76 | 1.91 | 1.91 | 1.95% |
| 41 | Ecuador | 2.43 | 2.67 | 3.85 | 1.96 | 2.22 | 1.22 | 1.74 | 1.72 | 1.88 | 1.86 | -5.97% |
| 47 | Paraguay | 1.53 | 1.63 | 1.79 | 1.76 | 1.58 | 1.39 | 1.79 | 1.83 | 1.82 | 1.82 | 1.43% |
| 48 | Argentina | 1.59 | 1.75 | 1.77 | 1.51 | 1.66 | 1.92 | 1.75 | 1.90 | 1.78 | 1.79 | 1.29% |
| 54 | Colombia | 1.91 | 1.84 | 1.71 | 1.75 | 1.82 | 1.89 | 1.96 | 1.96 | 2.12 | 1.65 | 0.45% |
| 92 | Cuba | 0.65 | 0.76 | 0.67 | 0.77 | 0.67 | 0.71 | 0.78 | 1.02 | 1.02 | 1.02 | 0.25% |
| 98 | Bolivia | 0.89 | 0.89 | 0.89 | 0.89 | 0.92 | 0.92 | 0.92 | 0.92 | 0.92 | 0.92 | 0.00% |

Fuente: FAO

Cálculos: Observatorio Agrocadenas Colombia

Justamente por estas razones, el gobierno cubano continuamente insiste en la necesidad de aumentar los volúmenes y la calidad del tabaco entregado a la industria, de modo que se satisfagan las necesidades de ésta, se creen reservas para asegurar la estabilidad del mercado externo y se garanticen los programas científicos en la producción tabacalera.

La calidad del tabaco cubano en rama permite alcanzar en el mercado internacional un precio promedio de 2000 euros por tonelada, lo que representa un ingreso de 20 millones de euros anuales por este concepto. Sin embargo, la mayor entrada de divisas recae sobre la comercialización de los tabacos torcidos. La producción de este cultivo en Cuba está destinada fundamentalmente a la obtención de un producto cada vez más competitivo tanto en la calidad requerida para la exportación como en la eficiencia para su obtención.



Fig. 2.1 Cuidado del tabaco.

Si bien es cierto que las atenciones culturales a la planta desde la siembra comienzan a definir el resultado final del producto, es el proceso de secado un aspecto más que importante, pues es en esta parte del proceso cuando se le definen las características organolépticas a la hoja que la convierten en materia prima para la fabricación de “Habanos” con excelentes características de aroma, sabor y color garantizando su exportación, principal objetivo del proceso.

2.1 CONCEPTOS FUNDAMENTALES SOBRE AIRE HÚMEDO.

Cuando se habla de la mezcla de aire seco (aire que no contiene vapor de agua) y vapor de agua se está en presencia del aire húmedo. En el aire húmedo ocurren una serie de procesos termotécnicos aplicables a distintos procesos como el secado.

El aire húmedo es uno de los casos particulares de mezcla de gases. En la práctica tiene interés el aire húmedo a la presión atmosférica o próxima a esta, en un intervalo de temperaturas limitado por la parte inferior por temperaturas no demasiado bajas (no inferiores a $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$). Con estos parámetros el aire seco sólo puede hallarse en estado gaseoso, mientras que el agua puede encontrarse en la fase de vapor, líquida o sólida, en dependencia de la temperatura que tenga la mezcla. De aquí se deduce que el aire húmedo es una mezcla de gases en la cual uno de los componentes, - el vapor de agua - puede pasar a otra fase (líquida o sólida) al descender la temperatura y, a causa de esto, salir de dicha mezcla.

Por la razón anterior la cantidad de vapor de agua que hay en una mezcla que se considere no puede ser arbitraria; en dependencia de la temperatura y de la presión total de la mezcla, el vapor de agua que hay en el aire húmedo, no puede exceder de una cantidad determinada. En esto consiste la diferencia esencial entre el aire húmedo y las mezclas ordinarias de gases.

Como es conocido, el aire húmedo y el vapor de agua contenido en él pueden considerarse como gases perfectos. Esto permite al analizar las propiedades termodinámicas del aire húmedo utilizar las leyes formuladas para la mezcla de gases perfectos. [Inst01], [Wexler65].

Según la ley de Dalton, cada gas por separado se comporta en la mezcla gaseosa como si él solo, a la temperatura de la mezcla gaseosa, ocupara todo el volumen de ésta, o lo que es lo mismo, la suma de las presiones parciales de los gases que entran en una mezcla gaseosa es igual a la presión total de dicha mezcla.

Llamando p_a a la presión parcial del aire seco; p_v , a la presión parcial del vapor de agua; y p , a la presión de la mezcla, es decir, del aire húmedo, obtenemos de acuerdo con la ley de Dalton que:

$$p = p_v + p_a$$

Cuanto más vapor de agua haya en la mezcla de aire y vapor, tanto mayor será la presión parcial del vapor de agua en la mezcla. La presión parcial del vapor de agua en el aire húmedo no puede ser mayor que p_s (presión de saturación a la temperatura dada del aire húmedo).

$$p_v \leq p_s$$

La presión parcial de saturación del vapor de agua en el aire húmedo no es más que la presión parcial del vapor que existe a una temperatura dada cuando el aire seco y el vapor de agua se encuentran en equilibrio, y el aire seco no admite mayor cantidad de vapor de agua disuelto.

La presión parcial máxima del vapor de agua en el aire húmedo p_s se determina únicamente por la temperatura de la mezcla, y no depende de la presión p de ésta. [Wexler65].

Al aire húmedo en que $p_v < p_s$ se le llama no saturado y al aire húmedo en que $p = p_s$ se le llama saturado. El vapor de agua contenido en el aire húmedo no saturado se encuentra en estado recalentado. Si se hace descender la temperatura del aire húmedo no saturado, puede alcanzarse, conservando constante su presión el estado de saturación. [Wexler65]

Frecuentemente se utiliza el concepto de humedad relativa para caracterizar al aire húmedo. Se llama humedad relativa a la razón de la presión parcial del vapor de agua contenido en una mezcla de aire húmedo, a la presión de saturación del vapor de agua a la temperatura dada, es decir a la presión parcial máxima posible del vapor de agua a esta temperatura:

$$\phi = \frac{p_v(T)}{p_s(T)}$$

la magnitud ϕ (Hr) se expresa generalmente en tanto por ciento. Como $0 < p_v < p_s$, tenemos que: $0 < \phi < 100\%$.

La humedad relativa de por sí no caracteriza completamente al contenido de vapor del aire húmedo; para esto hay que conocer además la temperatura de dicho aire, que determina unívocamente el valor de la presión de saturación del aire húmedo. Si el contenido de vapor en el aire se mantiene constante, y la temperatura del aire se eleva, la humedad relativa del aire disminuye, porque al aumentar la temperatura crece la presión de saturación del vapor de agua. [Wexler65].

Además del concepto de humedad relativa se emplea el concepto de humedad absoluta. Se entiende por humedad absoluta la presión parcial del vapor de agua en el aire húmedo a la temperatura de la mezcla. A veces se le entiende también como humedad absoluta a la cantidad en masa de vapor de agua contenida en un metro cúbico de aire húmedo. [Wexler65].

2.1.1 Método Psicrómetro para el cálculo de la humedad relativa.

Para medir la humedad, en medios hostiles, donde el polvo, y la suciedad caracterizan el ambiente de trabajo, los instrumentos de medición de la humedad relativa por métodos eléctricos fallan, por lo que se justifica la utilización del psicrómetro como método de medición de humedad relativa. Este instrumento de medición indirecta de la humedad relativa, es el método más preciso y antiguo para medir dicha magnitud [Ares99]. Este equipo cuenta de dos termómetros o sensores de temperaturas, que son mucho más inmunes al polvo y la suciedad y operan en un ambiente hostil sin dañarse ni afectar la medición. Cada uno de estos sensores miden temperaturas diferentes como es lógico, uno de los sensores se le llama seco y el otro húmedo. El termómetro o sensor de temperatura húmeda difiere del seco en que el sensor está envuelto en una tela o gasa que se mantiene húmeda. Cuando la corriente de aire húmedo sopla los dos sensores, el sensor seco indica la temperatura del aire húmedo. El sensor húmedo indica la temperatura a la que está el agua contenida en la tela húmeda que envuelve al sensor. Es evidente que cuando el aire sopla sobre el sensor húmedo el agua se evapora de la superficie de la tela mojada (si el aire húmedo no está saturado). La evaporación del agua será tanto más intensa cuanto más seco esté el aire que incida sobre la tela (es decir cuanto menor sea la presión parcial del vapor de agua en la mezcla).

Como en evaporar la humedad se gasta una cierta cantidad de calor, igual al calor de vaporización del agua, que se extrae en primer lugar de la misma agua, la temperatura de la tela o gasa húmeda descenderá. Si al termómetro húmedo no llegara calor del exterior, de las capas de aire que lo rodean, la temperatura de la tela húmeda descendería hasta hacerse igual a la temperatura de saturación del agua a una presión igual a la presión parcial del vapor de agua en el aire analizado, es decir, a la temperatura del punto de rocío para la presión parcial dada del vapor de agua. En este caso el agua que hay en la tela deja de evaporarse y la temperatura permanecerá invariable con el tiempo. Midiendo esta temperatura del punto de rocío y hallando en ella la presión de saturación del vapor de agua (mediante tablas de presión de saturación/temperatura de agua), se determina la presión parcial del vapor de agua en el aire húmedo, y así la humedad relativa del aire [Ares99].

Sin embargo, en la realidad, al descender la temperatura de la tela el equilibrio se establece no a la temperatura del punto de rocío o de saturación, sino a una temperatura algo más alta que se conoce como temperatura de bulbo húmedo.

La diferencia entre la temperatura de bulbo húmedo y de bulbo seco es inversamente proporcional a la humedad del aire: cuanto más seco sea el aire, mayor será la diferencia o depresión de ambas temperaturas, si el aire está saturado de vapor ambas temperaturas se igualarán, ya que la presión parcial del vapor de agua en la mezcla será igual a la presión de saturación del aire a la temperatura del mismo.

2.1.2 Cálculo de la humedad relativa.

La ecuación termodinámica de equilibrio de la entalpía para el bulbo húmedo y el bulbo seco viene dada por,

$$h(p,T,r) + [r_w(p,T_w) - r] \cdot h_w(p,T_w) = h[p,T_w,r_w(p,t_w)]$$

donde:

| | |
|-----------------------|---|
| $h(p,T,r)$ | Entalpía de 1+ r gramos de aire húmedo. |
| $h(p,T_w)$ | Entalpía de un gramo de agua pura. |
| $h[p,T_w,r_w(p,T_w)]$ | Entalpía de uno 1+ r_w gramos de aire saturado a la temperatura T_w . |

A partir de la ecuación anterior, considerando al aire húmedo como una mezcla de gases perfectos, y despreciando algunos términos de segundo orden se llega a la ecuación de trabajo para el cálculo de la humedad relativa:

$$p_v = p_{vs}(T_d) = p_{vs}(T_w) - p \frac{C_p}{\epsilon L_v(T_w)} \left[1 - \frac{p_{vs}(T_w)}{p} \right] (T - T_w)$$

- T_d Temperatura del punto de rocío.
 T_w Temperatura del bulbo húmedo.
 T temperatura de la mezcla.
 p Presión de la mezcla (presión atmosférica).

El término $\frac{C_p}{\epsilon L_v(T_w)}$ se le llama constante psicrométrica y se nota por A_w . [Wexler65]

Esta constante depende de muchos factores, entre los que se destacan la velocidad del aire, velocidad del aire en la superficie del bulbo húmedo, o la conductividad térmica de aire entre otros. Para las condiciones específicas del lugar donde se instalaron los sensores para los experimentos que se desarrollaron en relación con esta memoria, detallados mas adelante, se tomó el valor $A_w = 6.53 \times 10^{-4} (\text{°C})^{-1}$ debido a que la velocidad del viento que incide sobre el sensor de bulbo húmedo, en media podía tomarse igual 2m/s por datos.

Finalmente se utilizó como ecuación de cálculo:

$$\phi = \frac{p_{vs}(T_w)}{p_{vs}(T)} - A_w \frac{p}{P_{vs}(T)} (T - T_w)$$

Las presiones de vapor saturado tanto para la temperatura de bulbo húmedo como de bulbo seco no requieren tanta explicación porque se buscan en tablas [Wexler65].

Existen otras expresiones para el cálculo de la humedad relativa, aplicables a determinadas condiciones del ambiente de medición, asumiendo implícitamente la constante psicrométrica, pero en general no existen muchas diferencias entre estas [Wexler65].

2.2 PROCESO DE CURADO DEL TABACO.

En lo que sigue, se exponen de forma general algunas características de la cura del tabaco, según los tipos existentes en el mundo, pero centrados en el caso de Cuba.

2.2.1 La cura según el tipo de tabaco.

El tabaco es una planta que tiene muchas variedades. A pesar de que los tabacos usados comercialmente corresponden a una sola especie (*Nicotina Tabacum*), existen diferentes variedades, cada una de ellas con sus particularidades de formas, colores, aromas y sabores. El proceso de secado de la hoja del tabaco está determinado por el tipo de tabaco, según ello se definen cuatro formas principales de curado (secado):

- Curado al cañón (Flue-cured), conocido también como "Virginia curado al cañón", o simplemente "Virginia", en honor al estado norteamericano en el cual se llevó a cabo por primera vez este método de curado utilizando calor artificial.
- Curado al aire, que comprende "burley", para puros, tabacos rubios y negros curados al aire. Se cura en aire ambiente con un mínimo control artificial de la humedad.
- Curado al fuego, de proceso muy parecido al del Virginia, con la diferencia que el calor lo suministra un fuego lento, consiguiendo así su característico sabor y aroma ahumado.
- Curado al sol. Tipo al que pertenecen los tabacos orientales. Su fuerte sabor y gusto se desarrollan en la primera fase del curado, reteniéndose después al secar las hojas al sol.

En la tabla 2.1 se muestran las áreas de crecimiento del cultivo a nivel mundial y sus principales tipos de tabaco.

| Países/Región | Principales Tipos de Tabaco |
|-----------------------------|--|
| Canadá | Virginia |
| Estados Unidos: | Virginia , Burley curado al aire, Maryland, curado al fuego, para puros |
| América Central y Caribe | Tabaco negro curado al aire |
| Sudamérica-Brasil-Argentina | Virginia, Burley curado al aire, más variedades locales. |
| Europa | Negro curado al aire, Burley oriental curado al aire, Virginia |
| África | Virginia y Burley ligero curado al aire. Negro curado al fuego, oriental |
| Oriente Medio: | Curado al Sol, incluyendo el oriental |
| Sur Asiático: | Virginia y Burley curado al aire;; |
| Lejano Oriente: | Virginia y negro curado al aire. |
| Australia | Virginia |

Tabla 2.1 Regiones y tipos de tabaco cultivados.

Para lograr sus características individuales, cada tipo necesita así mismo un cultivo en suelos y climas adecuados, un cuidado correcto y un curado que siga su método específico. En la tabla 2.3 se muestra la comparación entre el tabaco Virginia, Burley y el Oriental, los principales tipos utilizados en la fabricación de cigarrillos, en cuanto a la cosecha y el curado de la hoja.

| | Virginia | Burley | Oriental |
|-------------------------|---|--|---|
| COSECHAS CURADOS | Cosecha individual de hojas en grupos de 2 o más hojas a la vez en intervalos aproximadamente semanales. | Normalmente, las hojas más bajas se cosechan como si fuesen Virginia, se cortan del tallo y se curan, dejando intactas a las restantes. | Se hace "sudar" inicialmente a las hojas para estimular los cambios químicos necesarios, poniéndose a secar después al sol. |
| | Curado en temperatura estrictamente controlada y en regímenes de humedad que garanticen que los cambios químicos tienen lugar en el punto deseado pero no más allá. Prácticamente todo el almidón se convierte en azúcar. | Curado en temperaturas y humedad ambiente, con una cantidad limitada de humedad artificial controlada en algunos casos para permitir que se produzca una pérdida completa del almidón y prácticamente de todo el azúcar. | |
| | Tiempo de curado de 6-8 días. | 21-35 días de curado. | 14-21 días de curado. |
| | La hoja curada es de un color limón brillante, naranja o caoba. | La hoja curada es de un color canela marrón. | El producto curado va de un amarillo verdoso al marrón. |

Tabla 2.2 Comparación de la forma de cura entre los principales tipos de tabaco usados en la fabricación de cigarrillos.

Una vez cosechada la hoja de tabaco, ésta se lleva a ser curada por calor, aire o madera ahumada. El objetivo es la eliminación de la humedad y el gusto vegetal de la hoja verde, y prepararla para el embalado y las tareas de procesamiento final.

El tabaco Virginia es «estufado» o curado bajo un régimen artificial y los restantes son curados al aire. El proceso de curado que sigue a la cosecha tiene por objeto preservar las hojas de tabaco al generar, vía calor, condiciones organolépticas adecuadas para conservar la calidad potencial de la hoja. Esta debe mantenerse viva hasta que tengan lugar ciertos cambios biológicos, al mismo tiempo que la humedad debe ser disminuida, para evitar que el azúcar se transforme en alcohol y queme la hoja, produciendo pérdida de calidad y precio.

Más de un 60% de los tabacos son de tipo Virginia, utilizando calor de fuentes de energía tales como el carbón (67,1%), petróleo y gas (17,2%) y madera (15,7%) [Inst01]. Estas fuentes de calor calientan el aire que se hace circular por las hileras de hojas de tabaco mediante métodos de convección o con la ayuda de ventiladores para mejorar el control. En el curado del tipo Virginia se tarda una semana, y el método ofrece un mayor control sobre la hoja que cualquier otro método de curado que pueda utilizar el agricultor.

Cerca del 80 por ciento del curado con calor se realiza en estufas convencionales, construidas de diversos materiales, como madera, ladrillos cocidos, bloques de cemento, varas y barro, que llevan techos de metal corrugado, asfalto, tejas de arcilla, tejas de cedro o paja. La elección de la fuente de energía depende de la disponibilidad, costo, conveniencia general y requisitos de mano de obra; la principal exigencia es la eficiencia energética. La leña es un combustible por necesidad, más que por elección, en todos los países productores de África, excepto en la República de Sudáfrica y en Zimbabwe, donde el carbón es una fuente de energía importante. En el mundo, el carbón es el combustible más usado para curar tabaco (67,1%), particularmente en China, Polonia, Corea de Norte y Tailandia (lignito), mientras el petróleo y el gas (17,2%) son los principales combustibles usados en las estufas metálicas de Europa, América del Norte y América Latina. El tabaco curado al aire, sol o fuego (humo) requiere de poco o ningún calor artificial.

Como puede comprobarse en la anterior tabla 2.1, el principal tipo de tabaco que se cultiva en el Caribe es el tabaco negro. El mayor volumen del tabaco producido en Cuba es de este tipo precisamente, y son los puros “premiun” cubanos los que han logrado posicionarse en el liderazgo del mercado internacional seguidos por los de la Republica Dominicana y Honduras.

2.3 EL PROCESO DE SECADO DE LA HOJA DE TABACO EN CUBA.

La producción de hojas para “capas” o envoltura de los puros se lleva a cabo en campos donde se coloca un toldo para provocar una reducción de la radiación solar directa, que posibilita que éstas sean de textura fina, elástica, de colores apropiados, nerviaciones poco pronunciadas y de buena combustibilidad, para este fin la planta es muy exigente al suelo, clima y prácticas culturales.

Después de cosechadas, las hojas pueden ser curadas por el método tradicional o natural (al aire), donde juega un papel decisivo la experiencia del hombre y las condiciones ambientales que rodean el lugar donde se realiza esta o mediante la cura controlada. Esta última forma de cura también requiere de la experiencia del hombre, pero el ambiente controlado creado en el interior del recinto donde se realiza la cura permite lograr condiciones óptimas para el proceso, independizando éste de los cambios climáticos externos que en determinado momento pueden ser nocivos para la calidad del producto final. En ambos métodos es de suma importancia la influencia de la temperatura y la humedad relativa en las hojas de tabaco a curar.

El proceso de curación comprende dos fases principales, la pérdida de agua de la hoja o desecación, que puede ser al aire, al sol o con calor, y la fermentación. Durante este proceso se producen profundos cambios químicos en las hojas que son esenciales, pero también es necesario eliminar el agua que constituye aproximadamente del 85% al 90% del peso de la hoja verde. Este período es muy delicado pues es posible estropear una buena hoja con un mal curado, pero no es posible que una hoja supere el potencial que poseía al ser recolectado [Inst01].

La cura del tabaco negro cubano tradicionalmente se ha realizado de forma natural, esto consiste en almacenar las hojas de tabaco en las vegas o casas de tabaco. Después de ensartado, este permanece de 45 a 60 días para alcanzar el grado óptimo de secado. Cuando se ha terminado este proceso se pasa a la fermentación de la hoja en los pilones, lo que tiene como objetivo emparejar la humedad y coloración del paño de las hojas de tabaco, así como ordenar y mantener la materia prima en buen estado de conservación hasta su clasificación, que se puede realizar de forma natural o de forma controlada.

Los principios técnicos que se cumplen en el proceso de cura natural para que el tabaco no se deteriore por efecto de condiciones ambientales desfavorables como exceso de lluvia, días en extremo fríos, corrientes de aire anormalmente fuertes y otras se ajusta al tipo de casa en particular, y son conocidas por los productores y transmitidas de padres a hijos.

La arquitectura de estas casas de tabaco, proporciona un clima adecuado a la hoja, permite que se mantenga en su interior una temperatura moderada y una ventilación aceptable, que se corresponda con un clima, más o menos idóneo para el curado. Este proceso natural, está sometido a las perturbaciones del clima a pesar de las características constructivas de las casas de cura, que tratan de amortiguar en lo posible este efecto.

Pero parece obvio que curando el tabaco bajo fuertes perturbaciones de la naturaleza, no se garantiza la mejor calidad de la hoja. Resulta de interés señalar que la calidad del tabaco para “capas” está regida por indicadores subjetivos, sobre todo en Cuba, donde no existe un patrón químico para el tabaco negro, que se cultiva con el fin de obtener “capas” para la envoltura de los puros de exportación, razón por la que, en la selección y “rezago” de ellas, se tienen en cuenta fundamentalmente cualidades perceptibles por la vista y el tacto, como son, el tamaño, la textura o grosor de la hoja, su coloración, el contenido de grasa, y la elasticidad, fragilidad y presencia de manchas verdes entre otras, las cuales pueden ser alteradas por cambios en la temperatura y la humedad en el ambiente donde se realiza la cura.

2.4 CURA CONTROLADA. ETAPAS DEL PROCESO.

A finales de la década de los 80 y fundamentalmente en la del 90, se introduce a escala de producción la tecnología del curado controlado del tabaco para capas, con el objetivo de elevar la calidad de la materia prima y el aprovechamiento de las capacidades de curación con respecto al proceso tradicional. Ya en el mundo existía un amplio desarrollo en este tipo de cura pero aplicada solamente al tabaco Virginia. En tabaco para capas solo se conoce la experiencia cubana.

En general, la zona de la planta que se cura con este método es la comprendida entre el tercio central-basal y el central, es decir, alrededor de 10 hojas, que son las que tienen mayor posibilidad de convertirse en capa.

El sistema de cura controlada permite que el proceso transcurra con control efectivo de dos de los elementos climáticos que fundamentalmente intervienen en el proceso como son temperatura y humedad. Existe un tercer elemento que es el flujo de aire en el interior de la casa de cura, que se mantiene constante durante el proceso y que el sistema instalado no permite su control. Al manejar estos factores en función de la composición química de la hoja y teniendo muy en cuenta las condiciones medioambientales en que se desarrolló la plantación, es posible dirigir el proceso de curación hacia el cumplimiento de los objetivos trazados, la obtención de capas (Fig. 2.2).

Este proceso de manera controlada se realiza en cámaras de curado, que son instalaciones aisladas térmicamente del medio exterior (ver en la figura 2.2 las paredes en el interior del secadero recubiertas con aislantes térmicos) . A partir de estudios realizados por parte del Instituto de Investigaciones del Tabaco, acerca de las distintas etapas por las que transita la hoja de tabaco en el proceso de curado natural, se establecieron las condiciones de humedad y temperatura que debían obtenerse en cada una de ellas para realizar este proceso de manera controlada.



Fig. 2.2 Interior del Secadero. Tabaco Curado

2.4.1 Etapas para el proceso de cura controlada

Las hojas de tabaco llegan a las cámaras de cura controlada con condiciones muy diversas. Las condiciones de humedad y de temperatura con que llegan las hojas es afectada por factores climáticos. La recogida de las hojas del campo sólo se realiza por las mañanas y el contenido superficial de agua se ve grandemente afectado si llueve la noche antes. A partir de ese momento se inicia el proceso de control, que se desarrolla conforme a cuatro etapas:

1. **Amarillamiento:** El tabaco presenta un contenido inicial de agua de aproximadamente el 90% y un color verde más o menos intenso, pierde entre un 30-40% de su contenido acuoso inicial y cambia su color al amarillo verdoso con aparición de manchas carmelitas, fundamentalmente en el ápice y borde de la hoja que se desarrollan hacia el interior del limbo. El tratamiento del tabaco durante esta etapa requiere de temperaturas que comienzan con 28 °C y concluyen en los 30 °C y humedades relativas que oscilan entre el 85% y el 92%. Puede durar hasta 10 días para algunos tipos de tabacos.
2. **Desarrollo del color:** Comienza a partir de los 7-8 días y concluye cuando el paño presenta color carmelita, durante esta etapa la temperatura aplicada oscila entre los 30-32 °C y la humedad relativa entre el 80-85%. Duración del proceso 8 - 12 días en dependencia del tipo de tabaco.

3. Secado de paños y venas: Esta etapa está caracterizada por la extracción del agua innecesaria de la hoja, tanto del paño como de la vena, con temperaturas que comienza en 32 y termina en 34 °C y humedad relativa entre 76-80 %. La duración del proceso es de 4 a 6 días aproximadamente, dependiendo fuertemente del tipo de tabaco.
4. Secado de la vena central: la temperatura debe mantenerse entre 32-34°C y la humedad relativa de 70 a 75%. La duración del proceso será aproximadamente de 3 a 5 días, también en dependencia del tipo de tabaco.

El curado de tabaco de forma controlada consume alrededor de 21 días y el secado del tabaco de forma natural tarda alrededor de 60 días. La diferencia de 60 días a 21 es considerable y además en el curado de forma controlada la hoja de tabaco adquiere el color adecuado de manera homogénea, garantizando una mayor calidad de la capa del torcido cubano.

Cada una de esas etapas se puede subdividir, con lo que se logran variaciones suaves en la referencia de la humedad y la temperatura. La humedad en este proceso es crítica, y no debe experimentar cambios bruscos. Los pasos que establece el Instituto de Investigaciones del Tabaco son:

| PASO | Duración (hrs) | Referencia de Humedad relativa (%) | Referencia de temperatura (°C). | ETAPA |
|-------------|-----------------------|---|--|------------------------------|
| 1 | 99 | 90 | 30 | Amarilleo |
| | 99 | 85 | 30 | |
| 2 | 99 | 80 | 31 | Definición del Color |
| | 99 | 80 | 32 | |
| 3 | 99 | 76 | 34 | Secado de Paño y Venas Finas |
| 4 | 99 | 70 | 34 | Secado vena gruesa |

Tabla 2.3 Pasos establecidos para el curado de la hoja de tabaco y los valores de humedad y temperatura de referencia.

La tabla anterior contiene los pasos exactos aplicados en la zafra 2001-2002 y que fueron emitidos oficialmente por el Instituto de Investigaciones del Tabaco en el Manual Técnico para la Producción de Tabaco Negro [Inst01]. En estos datos nos basamos para realizar el control de las variables Temperatura y Humedad Relativa en nuestro trabajo.

Es necesario aclarar que estos valores pueden variar en dependencia de las condiciones particulares del tabaco a curar, lo que es determinado por la experiencia del curador, pero que en cualquier caso, a los efectos de diseño e implementación del controlador que aquí perseguimos, son completamente irrelevantes. Por tanto esos datos hay que entenderlos como los de prueba para el ajuste inicial, y posterior comprobación, del controlador.

2.5 TECNOLOGÍA APLICADA EN EL PROCESO DE CURA CONTROLADA

En la siguiente figura se muestra un esquema del proceso:

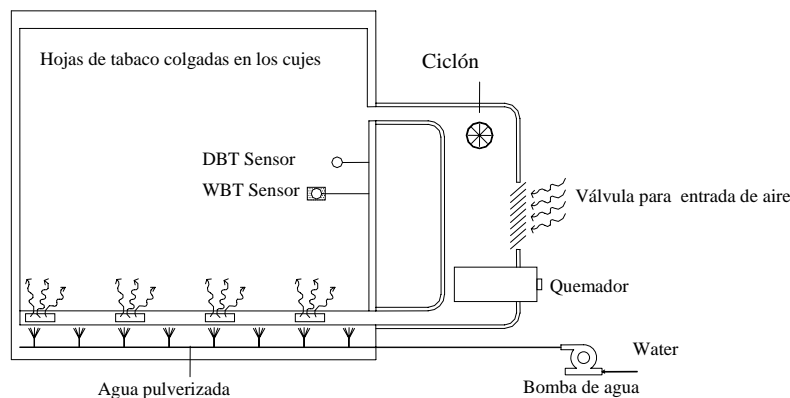


Fig. 2.3 Esquema tecnológico del proceso.

Como puede verse, se controlan dos variables, que son fundamentales en todo lo que sigue:

- a) la temperatura, y
- b) la humedad relativa.

La temperatura se controla calentando el aire que se hace circular por el interior de la cámara, mientras que la humedad se controla mediante la apertura de unas ventanillas

situadas al paso de la circulación del aire (Fig. 2.3) para intercambiar aire frío del exterior menos cargado de humedad con aire caliente del interior de la cámara cargado de humedad, y así seguir extrayendo humedad de las hojas de tabaco. Todo este proceso es controlado por un dispositivo inteligente que garantiza el seguimiento de un programa de curación previamente seleccionado.

Mediante dos ventiladores centrífugos se hace circular aire caliente por el interior de la casa. Este flujo se mantiene invariable durante toda la cura. El aire es introducido por la parte inferior de la cámara, por un canal que lo reparte de manera uniforme por el interior del recinto, el aire es extraído por la parte superior una vez que batió sobre las hojas de tabaco tendidas en los cujes por toda la casa, homogenizando el ambiente en la misma. Antes de entrar al proceso, el aire pasa por un intercambiador de calor, que en este caso no es más que un quemador de combustible diesel. Mediante el encendido y apagado del quemador, se controla la temperatura en el interior de la cámara. Al elevar la temperatura del aire que circula por la cámara se está aumentando su capacidad de extraerle la humedad a la hoja del tabaco, debido al aumento de la presión de saturación de la mezcla de aire húmedo.

La humedad se controla en la medida que se abren más o menos las ventanillas. Estas ventanillas se encuentran al paso de la circulación del aire. Con el grado de apertura de las ventanillas se produce más o menos intercambio del aire caliente que está circulando por el interior de la cámara, con el aire frío del exterior. Este choque con la masa de aire frío del exterior provoca que parte del aire caliente cargado de humedad salga de la circulación y entre en circulación aire frío del exterior con un contenido de humedad menor.

Mediante la puesta en marcha de la bomba se permite la entrada de agua para ser pulverizada en el interior del recinto, se realiza un proceso de humidificación cuando la humedad disminuya por debajo de los límites establecidos. Esto se realiza en los sistemas instalados de forma manual dependiendo del criterio del curador.

2.6 ANÁLISIS DE LOS SISTEMAS TECNOLÓGICOS USADOS EN EL PROCESO DE CURA DE TABACO. JUSTIFICACIÓN DE LA PROPUESTA.

2.6.1. Estado actual de la técnica.

Los sistemas tecnológicos más generalizados son los denominados CEPA y MaxiMiser que describimos brevemente a continuación.

a) Secado Automático de Tabaco Virginia - Sistema cepa (Control de Estufado de Productos Agrícolas). Se trata de un sistema electrónico, que consta de una Central de Control capaz de manejar hasta ocho (8) hornos de secado a través de periféricos (Fig. 2.4).

Esta versión del producto está expresamente realizada para el Tabaco Blanco Virginia, producido principalmente en las provincias de Salta y Jujuy, en Argentina. La Central maneja las diferentes fases de curado y secado permitiendo la realización de estufadas conformes con los valores recomendados (“curvas”, “tablas”, “parámetros”). Además genera reportes y estadísticas del ciclo.

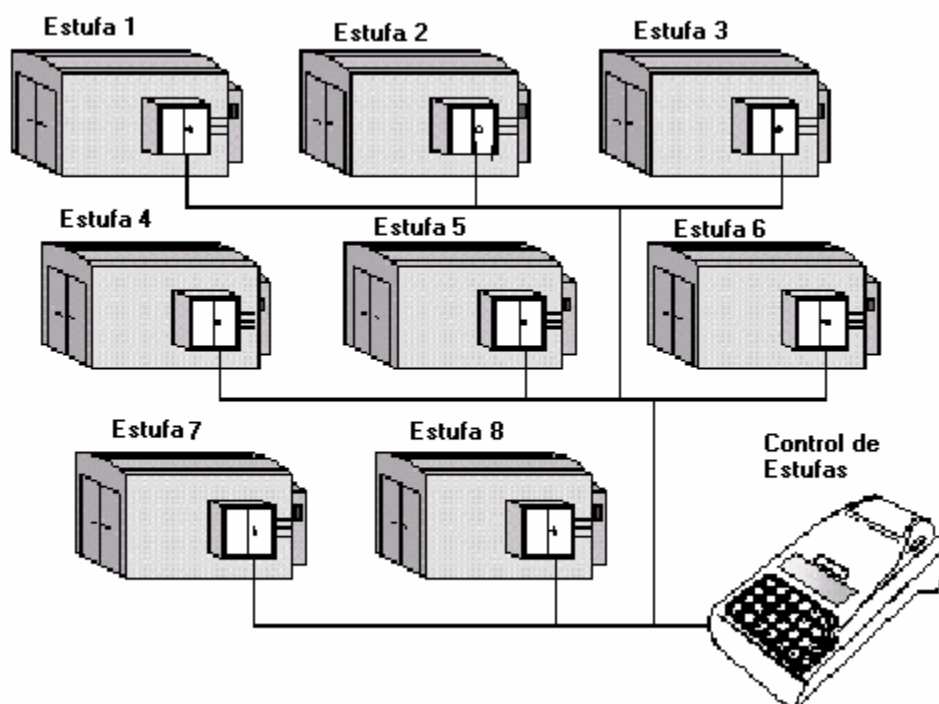


Fig. 2.4 “CEPA”

Los periféricos están diseñadas para adaptarse virtualmente a cualquier tipo de estufa Bulk Curing, controlando los principales elementos: quemador, ventana (a través de un motor), sensores de temperatura y de humedad, eventuales alarmas.

El sistema fue desarrollado entre la empresa Soluciones P.C.P.S.A., y CITE S.P.A. (Italia). La puesta a punto del producto llevó tres años trabajando tanto en Italia como en Argentina.

Las pruebas realizadas en los últimos años, certifican al sistema “CEPA” como apto y de suma utilidad, porque:

- Reduce el periodo de secado sin perjudicar la calidad de la hoja.
- Mejora la calidad del producto (hojas más uniformes, estabilidad de temperatura y humedad durante el ciclo).
- Aumenta la cantidad de tabaco curado (posibilidad de “sobrecargar” la estufa).
- Reduce el consumo de combustible y permite detectar fallas de las estufas.
- Elimina los riesgos: deshidratación, rotura de las hojas, incendio.

b) MaxiMiser[®] Bulk Curing Systems. Es el modelo típico de hornos para la cura de tabaco Virginia, normalmente conocidos como “Bulk Curing” (Fig. 2.5). Existen dos modelos de hornos, que se diferencian en la cantidad de hojas a curar. Ambos están contruidos con estructuras de acero y poseen excelentes características de hermeticidad.



Fig. 2.5 Horno Bulk Curing

Estos se comercializan como todo un sistema, el cual tiene incluido los dispositivos utilizados para el control del proceso.

Entre sus principales características destacan las siguientes

- Flujo de aire ajustable: se puede regular el aire que pasa entre las hojas durante las diferentes etapas de la cura, en la salida del horno.
- El quemador entrega todo el calor necesario para una cura eficiente.
- La construcción de la cámara de combustión con acero inoxidable garantiza una larga vida al sistema.
- Gran capacidad de cura, dada por el uso de ventiladores de motor jaula de ardilla que permiten mover grandes cantidades de aire y mantener con eficiencia el ambiente en el interior del secadero.
- Hornos con paredes aisladas térmicamente para incrementar eficiencia.
- Protección del horno contra fallas del flujo de aire.
- Protección por sobre temperatura.
- Control de temperatura Automático.
- Control manual de la Humedad Relativa.

Se puede adquirir de forma opcional: indicación remota de bulbo seco y de bulbo húmedo, control automático de temperatura y humedad relativa, control automático de temperatura y humedad relativa programable.

De las consultas realizadas en la búsqueda del estado actual de la técnica podemos resumir que la automatización del proceso de secado del tabaco no es la generalidad en todas las regiones, en muchos lugares en la cura de tabaco Virginia el control de temperatura y de humedad se realiza de forma manual utilizando como fuente de energía fundamental la madera, el resto del tabaco se seca de forma natural.

Los ejemplos anteriores sirven como referencia de la tecnología que se utiliza en el mundo para la actividad, pero en el contexto que a nosotros nos interesa, es decir, el cubano, son otros sistemas los que se emplean: el SCOPETTI de Italia y el Kalfrisa de España.

2.6.2 Sistemas tecnológicos usados en el proceso de cura en Cuba

Como decimos, los sistemas tecnológicos usados en Cuba para la cura controlada son: Kalfrisa, de procedencia Española, y SCOPETTI de Italia, siendo el primero el más utilizado. En el caso de Kalfrisa existen dos modelos de generadores que se diferencian en el caudal de aire, 32000 y 20000 m³/h respectivamente, con una capacidad calorífica de 200000 Kcal/h, una potencia instalada por equipo máxima de 10 Kw/h, partiendo de dos ventiladores centrífugos accionados por motores eléctricos y un quemador diesel (Fig.2.6).



Fig. 2.6 Generadores Kalfrisa.

Para conocer a profundidad el funcionamiento de los sistemas instalados y su comportamiento desde el punto de vista de consumo energético se visitaron todas las baterías de curación de la provincia Pinar del Río, donde se realizaron estudios energéticos los cuales arrojaron como resultado un alto consumo de potencia activa, reactiva y bajo factor de potencia, considerándose la actividad como la mayor consumidora dentro de la zafra.

Para el control de las variables del proceso, Temperatura y Humedad Relativa, se utilizan reguladores de propósito específico en la actividad. Al principio los sistemas Kalfrisa contaron con reguladores K2000 y K5000, dispositivos inteligentes diseñados para la cura controlada (Fig.2.7). SCOPETTI cuenta con un termostato que controla la temperatura.



Fig. 2.7 Regulador de temperatura y humedad relativa K-2000.

2.6.2.1 Sistemas de control utilizados con el sistema tecnológico Kalfrisa.

Reguladores Kalfrisa.

A continuación recogemos las principales características de los reguladores K200 y K500.

- Poseen dos entradas PT 100 a tres hilos para la lectura de la Temperatura de bulbo seco y Temperatura de bulbo húmedo.
- Rango de entrada de Temperatura entre 0.0 y 100.0 °C.
- Se realiza el cálculo de la Humedad Relativa en un margen de 0 a 100% aplicando tablas psicrométricas.
- Posee una salida por relé conmutado de 5 A 220V libre de potencial para el control de la temperatura, ON/OFF con histéresis ajustable.
- Una salida analógica 0/10 V de 8 bits de resolución y 500 ohmios de carga mínima para el gobierno del servomotor proporcional inverso para el accionamiento de la ventanilla de regulación de aire, sin aislamiento galvánico respecto a las entradas de señal.

- Almacena 4 programas de curación con 19 pasos cada uno. La programación se realiza con un programador de uso específico.
- Se realiza indicación digital (4 dígitos) de los valores reales de temperatura y humedad relativa, los valores de consigna de dichas variables, programa y paso del proceso y se indica mediante pilotos las alarmas por Temperatura y Humedad.

Las desventajas mas importantes que arroja este regulador son las siguientes.

- Presentan problemas con la medición de la Humedad Relativa.
- No están lo suficientemente preparados para las condiciones climáticas de nuestro país por lo que el porcentaje de fallas y roturas es alto.
- Rigidez en la comunicación con el operador, este no puede acceder a cambios en el programa de curación.
- Solo se controla la Humedad cuando está alta, mediante la apertura de las ventanillas, en caso de que ésta sea baja hay que regular de forma manual mediante la bomba de agua.

Como una solución alternativa al deterioro de los reguladores Kalfrisa y el alto costo de su reposición en el mercado, se desarrollaron en Cuba nuevos diseños de reguladores con prestaciones similares al regulador original y que han permitido sustituir este. Estos se insertan en el sistema realizando la misma función que el anterior, manteniendo las mismas prestaciones. A continuación presentamos las características fundamentales de los mismos.

Regulador TC07.

El modelo TC07 (Fig.2.8), es un Secuenciador electrónico para el control de la temperatura, el tiempo y la humedad relativa en el proceso de secado de las hojas de tabaco, y cuenta con varios programas de trabajo para el secado de diferentes variedades de tabaco. Fue desarrollado en el Combinado de Componentes Electrónicos “Ernesto Che Guevara”.



Figura 2.8 Vista del panel frontal del regulador TC07.

A continuación enumeramos sus características técnicas:

Mecánicas.

- El TC07 se presenta en un envase plástico, con dimensiones típicas para ubicar en paneles y cuadros de mando; este ocupa un volumen de: 96mm x 96mm x 112mm.
- Temperatura de funcionamiento entre 10 y 40 °C.

Eléctricas.

- Alimentación 220 V \pm 10%, 50-60 Hz. Usa un interruptor On/Off para su conexión.
- Salva y recupera automáticamente los parámetros y el estado del equipo, que están vigentes en el momento de ocurrir un fallo energético y cuando retorne la energía, el equipo continuará su trabajo en el mismo punto del programa y paso que se salvó.

Metrológicas.

- Medición e indicación digital de las temperaturas de bulbo seco y bulbo húmedo en un rango de medición de: 0 a 100 °C con una precisión de \pm 1°C, utilizando como sensores dos Sondas de temperaturas termorresistivas del tipo PT 100.

- Cálculo e indicación digital de la humedad relativa en el rango de 20 a 99 %, con una precisión de $\pm 3\%$, empleando el método psicrométrico de medición.
- Control secuencial del tiempo según el programa de trabajo seleccionado.
- Salidas de Control:
- Una salida formada por dos relés (5 A y 220V) conectados en serie para el control del tipo todo-nada. El primero de los cuales, denominado Q, realiza la desconexión cuando la temperatura medida alcanza el valor de la Consigna y se conecta cuando la temperatura decrece en el valor de la histéresis (HT) con respecto a la Consigna programada.
- El segundo relé, denominado RED, se desconecta cuando la temperatura sobrepasa la consigna en el valor del parámetro AT (protección automática por exceso de temperatura).
- El tercer relé, denominado HR, actúa cuando la humedad relativa sobrepasa la consigna en más de un 5%, y se controla en régimen On/Off el ventanillo.
- Una señal de voltaje de directa con un valor de 0 a 10 V, con resolución de 1V, carga mínima de 500 Ohmios, sin aislamiento galvánico respecto a las entradas de la señal, para el control del servomotor que gobierna el ventanillo de intercambio gaseoso que regula la humedad relativa durante el secado.

A continuación relacionamos las ventajas y desventajas del regulador comparado con el de marca Kalfrisa:

Ventajas:

- Bajos costos.
- Fáciles gestiones de comercialización dadas por la cercanía del fabricante.
- Desventajas:
- Poca fiabilidad para el trabajo en ambiente industrial.
- Rigidez en la comunicación con el operador, este no puede acceder a cambios en el programa de curación.

- Solo se controla la Humedad cuando está alta, mediante la apertura de las ventanillas, en caso de que ésta sea baja hay que regular de forma manual mediante la bomba de agua.
- Baja inmunidad al ruido.

Regulador programable de Humedad Relativa y Temperatura.

Este regulador, fue diseñado en el Centro de Investigaciones Microelectrónicas del Instituto Superior Politécnico José Antonio Echevarría.

El equipo controlador programable tiene las siguientes características técnicas:

- Alimentación: 24 V CA.
- Rango de medición de temperatura: 25°C a 75°C.
- Rango de medición de humedad: 10% al 99 % HR.
- Control *ON-OFF* de la temperatura con histéresis programable.
- Control proporcional de humedad en un rango de error del 5% HR.
- Desde el punto de vista de su operabilidad posee las siguientes facilidades:
- Puede almacenar 9 programas de secado de hasta 9 pasos cada uno. Cada paso puede tener una duración de hasta 99 horas.
- Permite indicar un grupo de alarmas cuyos rangos de activación son programables por el usuario. Asociada a la alarma de temperatura existe una salida por relé para acoplar algún indicador externo.
- Posibilidad de comunicación serie con un microcomputador mediante el interfaz RS-232C.
- Indicación de la temperatura de bulbo húmedo.
- Durante la ejecución del control permite chequear su estado y sus parámetros.

Los modos de trabajo fundamentales son:

- *Modo de supervisión:* En este, el controlador visualiza constantemente la temperatura y la humedad de la cámara. Permite visualizar la temperatura del bulbo húmedo y definir los parámetros de los programas de secado de tabaco.
- *Modo de control:* Aquí se activa la ejecución de los algoritmos de control. El equipo visualiza la temperatura y la humedad de la cámara, el número del programa y del paso en ejecución, así como alarmas e informaciones sobre el estado del controlador. En este modo se permite parametrizar el programa en ejecución.
- *Modo de comunicación serie:* Este modo está dedicado exclusivamente a la comunicación. En él no se visualiza información sobre el estado de la cámara.

Ventajas:

- Bajos costos.
- Fáciles gestiones de comercialización dadas por la cercanía del fabricante.
- El uso sensores fabricados por el instituto.
- Se permite parametrizar el programa en ejecución, lo cual garantiza que el operador tenga acceso a cambios requeridos en determinado momento del proceso.

Desventajas:

- Poca fiabilidad para el trabajo en ambiente industrial.
- Solo se controla la Humedad cuando está alta, mediante la apertura de las ventanillas, en caso de que ésta sea baja hay que regular de forma manual mediante la bomba de agua.
- Para la aplicación correcta del método psicrométrico en la medición de humedad, se requiere garantizar una velocidad del aire de 3m/s en el lugar donde se sitúa la celda, lo cual en la práctica no siempre se logra, afectándose así las mediciones.

2.6.2.2 Sistemas de control utilizados con el generador SCOPETTI.

En este sistema solo se mide y regula de forma automática la temperatura, la humedad se controla de forma manual. No se realiza indicación de la variable medida y el programa de

curación lo logra el curador cambiando la consigna de temperatura según el paso del proceso.

Para tener referencia de las variables a controlar se realizan mediciones en el interior del secadero cada hora, por lo que se hacen más frecuentes las perturbaciones producidas por la acción de abrir la puerta, esto puede ser resuelto si se hace un sistema de doble puerta para entrar a la casa, aún así, comparado con los sistemas antes mencionados es este el que más limitaciones presenta.

2.7 CAMBIOS TECNOLÓGICOS REQUERIDOS POR EL SISTEMA.

Todos los sistemas anteriores tienen programas fijos que no tienen la posibilidad de ir “aprendiendo” a partir de relacionar las acciones de control desarrolladas por el sistema al abrir y cerrar las ventanillas y las decisiones del operador para cambiar de paso en el proceso de curado. Además de lo anterior, investigaciones realizadas por especialistas en curación, demuestran que el flujo de aire circulante en la cámara no tiene que ser el mismo en todos los pasos del ciclo. A medida que avanza el proceso las hojas pierden peso, disminuye el volumen de tabaco en la casa y se requiere menor flujo de aire para mantener la homogeneidad del ambiente en el interior del secadero.

Desde el punto de vista de la calidad de la hoja curada, esta se vería menos agredida por la velocidad del aire y su efecto de rozamiento, garantizándose que se mantengan las propiedades organolépticas de la misma. Los sistemas de control anteriormente analizados no están concebidos para la introducción del flujo de aire como una variable del proceso, lo cual constituye una limitación tecnológica del sistema que unida a las desventajas antes mencionadas nos llevan al desarrollo de un nuevo sistema de control automático para el proceso de cura controlada con el objetivo de obtener capas con mayor calidad y eficiencia económica.

El desarrollo de un nuevo sistema se abordará en dos etapas. En una primera etapa, se introducirán técnicas de Inteligencia Artificial en el desarrollo del programa de control de secado para que el sistema vaya incorporando la experiencia de los curadores y vaya

adaptando los parámetros del secado en cada paso. Para poder implementar esto es necesario en primera instancia la utilización de Autómatas Programables. El uso de esta tecnología proporciona gran flexibilidad al sistema, lo que permitirá incorporar en el desarrollo de la segunda etapa de la investigación nuevas prestaciones desde el punto de vista tecnológico. En una segunda etapa se analizará la introducción del control del flujo de aire caliente en combinación con las técnicas de inteligencia artificial.

2.8 NECESIDAD DEL SISTEMA.

En los secaderos de tabaco de Cuba no existe uniformidad en cuanto a la técnica de control utilizada, pues se emplean los dos sistemas tecnológicos antes mencionados, SCOPETTI con su control, del cual ya mencionamos sus escasas prestaciones y el KALFRISA que puede tener incorporado el control original, o los de fabricación nacional. Basándonos en esta peculiaridad a continuación resumimos de forma general las limitaciones que presenta el proceso de cura controlada en cuanto a la técnica utilizada:

- Poca robustez del control utilizado ante condiciones ambientales adversas (polvo, temperatura y humedad).
- Escasa inmunidad al ruido.
- Deficiente sistema de control del proceso, lo cual atenta contra la calidad del producto final, debido a:
 - No se incluye el flujo de aire circulante como variable del proceso a controlar.
 - En algunos casos existen problemas con la medición de las variables a controlar.
 - El control de la Humedad Relativa en el interior del secadero se realiza de forma incompleta, solo se controla el exceso de humedad, la bomba se maneja de forma manual.
- Elevado consumo de portadores energéticos (petróleo y electricidad). En el caso de la electricidad hay un elevado consumo de potencia activa y reactiva, esta última implica un bajo factor de potencia.

El objetivo en esta etapa superar las limitaciones tecnológicas del proceso e incorporar nuevas prestaciones al mismo, tales como:

- Implantar un sistema de control eficiente e integral, totalmente automático, que permita elevar la calidad del producto final a partir de incorporar sistemáticamente al sistema el conocimiento del experto, con las siguientes prestaciones:
- Medición de temperatura y humedad relativa con la precisión adecuada, ajustadas y verificadas por patrones certificados.
- Implementación de un algoritmo de control que incorpore de manera sistemática el conocimiento del curador y que garantice mantener la variable en el valor de la consigna con un error de ± 0.15 °C en el caso de la temperatura y ± 1 % para la humedad relativa.
- Reducir el consumo de gasoil necesario para la curación.
- Puede el sistema adaptarse a diferentes procesos de cura ya sea tabaco negro, rubio o cualquier otro tipo de hoja o semilla que requiera se secada.

Para la implementación del sistema se empleará un autómata programable con módulo de procesamiento difuso. Inicialmente se parte del ajuste de un controlador mediante un PC y un sistema para el control, diseño e implementación de sistemas de control aplicando lógica difusa. La herramienta que se desarrolla se denomina *FzController*.

CAPITULO III

EL SISTEMA FZCONTROLLER

INTRODUCCIÓN

Los sistemas basados en lógica difusa constituyen una importante alternativa a tener en cuenta en numerosas aplicaciones. En el campo del control automático de procesos es donde las aplicaciones de lógica difusa adquieren su mayor relevancia. Es preciso el desarrollo de sistemas que permitan la implementación, el diseño y el aprendizaje de sistemas basados en lógica difusa orientados a aplicaciones de control. En los últimos años son numerosas las aplicaciones que se han desarrollado para el desarrollo de sistemas basados en lógica difusa, muchas de estas aplicaciones están limitadas en los operadores difusos que implementan.

En este capítulo se presenta el desarrollo software de una herramienta CAD que permite el diseño, desarrollo y síntesis de controladores difusos, así como su aplicación al problema de la cura controlada de los secaderos de tabaco en hoja.

3.1 OTROS SISTEMAS PARA EL DESARROLLO DE SISTEMAS DIFUSOS

En los últimos años son numerosas las herramientas que se han elaborado para el desarrollo de sistemas basados en lógica difusa. La herramienta que tiene un mayor número de usuarios lo constituye sin dudas el caso de la herramienta para lógica difusa que tiene el paquete de programas MATLAB. Esta herramienta, que tiene todas las potencialidades que le brinda este poderoso paquete, tiene como dificultades fundamentales que no permite una implementación en hardware del controlador diseñado y no permite realizar la síntesis directa del controlador en dispositivos industriales como son los PLC. Hay otras herramientas como el XFuzzy [IMSE, Moreno03, Lopez03] muy útil para aquellos que desean realizar una implementación en hardware del controlador diseñado, aunque no permite realizar la síntesis directa del controlador en dispositivos industriales como son los PLC.

Se plantea la necesidad de desarrollar un sistema que facilite el diseño de controladores difusos, que permita realizar control en tiempo real sobre una planta o proceso y que una vez ajustado el sistema sintetice el diseño en PLC.

3.2 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SISTEMA FzController

El sistema FzController emplea el método aproximado para la implementación software de los sistemas. Empleando el método aproximado se garantiza una mayor versatilidad del sistema al permitir trabajar con cualquier tipo de función de pertenencia, operadores, así como métodos de desdifuminación sin necesidad de realizar ningún ajuste previo.

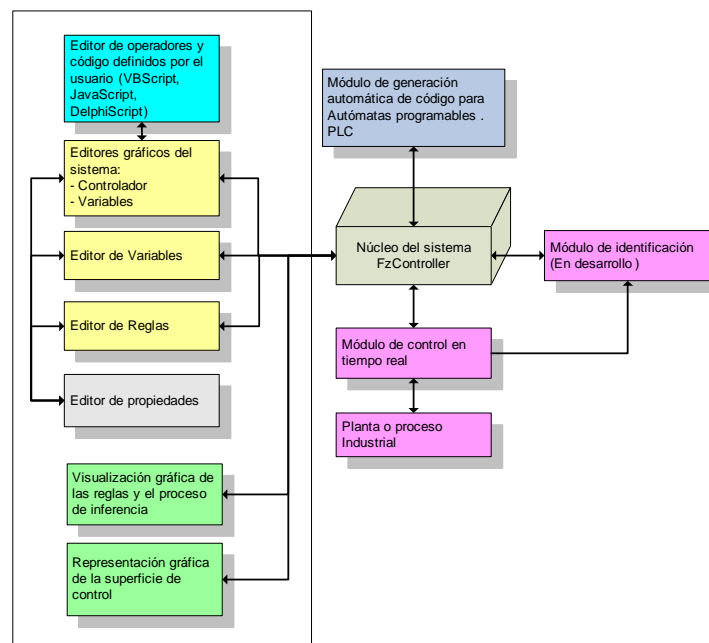


Fig. 3.1. Concepción general del sistema

3.3 MÓDULOS PARA EL DISEÑO DE CONTROLADORES DIFUSOS.

A continuación se presenta un análisis de cada uno de los elementos que integra el módulo de diseño de controladores difusos del FzController.

3.3.1 Editor del sistema.

Cuando se diseña un controlador difuso el primer paso es seleccionar la estructura del controlador que se va a implementar. En este caso el sistema FzController permite trabajar controladores de tipo Sugeno y de tipo Mamdani que son las estructuras clásicas que tiene un controlador basado en lógica difusa.

El editor del sistema (*Fig. 3.2*) permite seleccionar el tipo de controlador (Sugeno o Mamdani) y definir las variables lingüísticas del mismo. Una vez seleccionado el controlador se definen los operadores lógicos del mismo.

En el editor del sistema se agregan las variables lingüísticas del controlador y se describe el universo de definición de la misma así como la etiqueta lingüística.

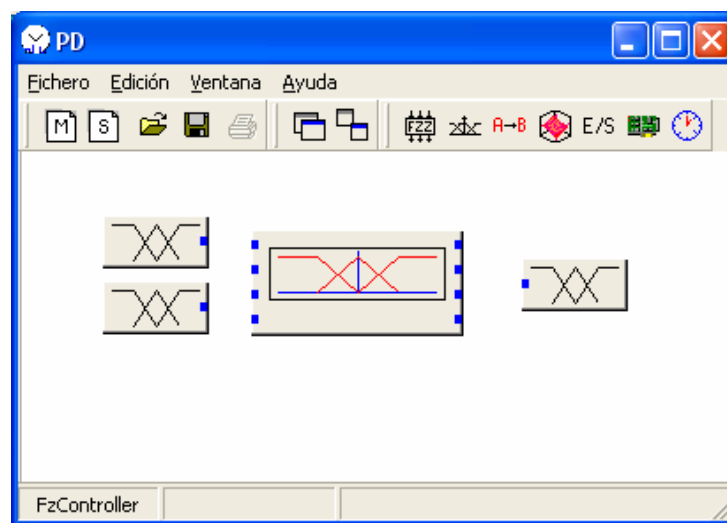


Fig. 3.2 Editor del sistema.

Mediante el editor de propiedades (*Fig. 3.3*) se editan los operadores difusos del controlador. Se selecciona el operador a emplear para el conectivo AND, el conectivo OR, operador de implicación, operador de agregación, método de desdifuminación así como el nombre del controlador.

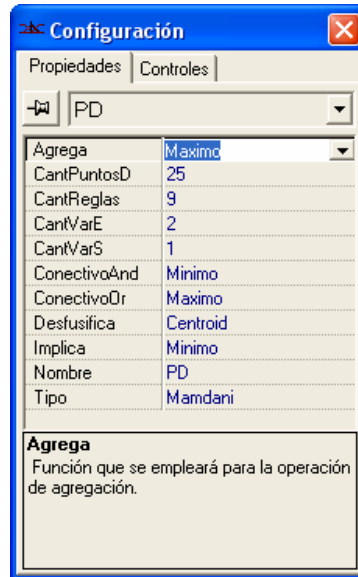


Fig. 3.3. Editor de propiedades y parámetros del sistema.

La tabla 3.1 muestra los operadores que FzController tiene implementados por defecto,

| | |
|--|---|
| Operadores conjunción (Conectivo AND) | t-normas: Mínimo, Producto de Hamacher, Producto, Producto de Einstein, Diferencia Acotada, Producto Drástico |
| Operadores de disyunción (Conectivo OR) | s-normas: Máximo, Suma de Hamacher, Suma Acotada, Suma de Einstein, Suma Algebraica, Suma Drástica |
| Operadores de Implicación | Diene, Dubois and Prade, Mizumoto, Goguen, Golden, Lukasiewicz Además de las t-normas y s-normas anteriores. |
| Operadores de agregación | t-normas: Mínimo, Producto de Hamacher, Producto, Producto de Einstein, Diferencia Acotada, Producto Drástico s-normas: Máximo, Suma de Hamacher, Suma Acotada, Suma de Einstein, Suma Algebraica, Suma Drástica |
| Métodos de desdifuminación | Centro de gravedad, Bisector, Media de máximos, Máximo menor, Máximo mayor, Suma de picos ponderada. |

Tabla 3.1. Operadores implementados por defecto el sistema FzController.

El sistema es abierto y permite la implementación de cualquier operador definido por el usuario. En la sección 3.3.4 se describe el módulo de implementación de operadores definidos por el usuario.

3.3.2 Editor de variables.

El editor de variables permite editar las funciones de pertenencia de cada una de las variables lingüísticas definidas en el sistema. Mediante el editor de propiedades del sistema se modifican, de manera muy sencilla, cada uno de los parámetros de las funciones de pertenencia o conjuntos difusos definidos en cada una de las variables.

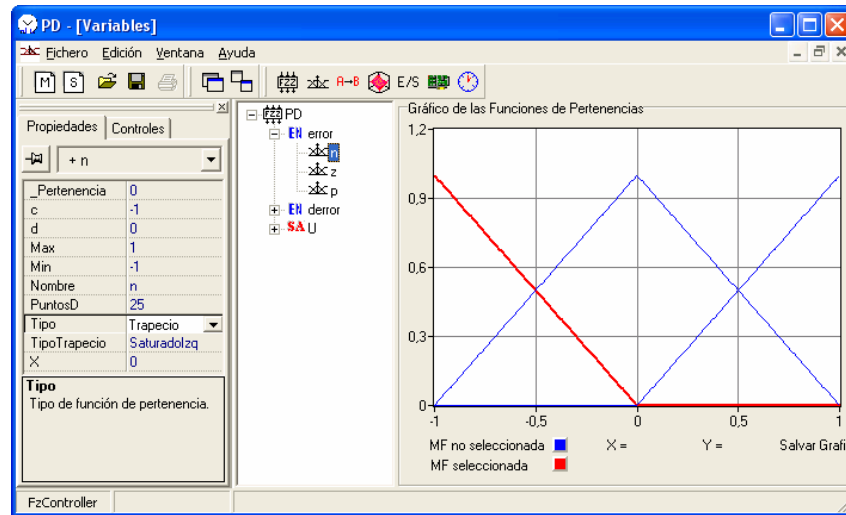


Fig. 3.4. Editor de variables del sistema FzController.

El sistema FzController tiene implementadas por defecto funciones de pertenencia de tipo Trapezoidal (en su caso particular de funciones triangulares), tipo Curva S, Curva Z, Curva Pi, Campana de Gauss y singleton (para el caso de un controlador con una estructura de tipo Sugeno), y con mucha facilidad se pueden incorporar funciones de pertenencia definidas por el usuario mediante expresiones matemáticas o mediante un vector.

3.3.3 Editor de Reglas.

La base de reglas de un controlador difuso contiene la información o conexión lógica entre las variables lingüísticas de entrada y de salida del sistema. El sistema FzController trabaja con reglas de tipo MISO (*Multiple Inputs, Single Output*). Permite agregar de manera sencilla y sin cometer errores de sintaxis las reglas del controlador.

La figura 3.5 muestra la ventana del editor de la base de reglas del sistema.

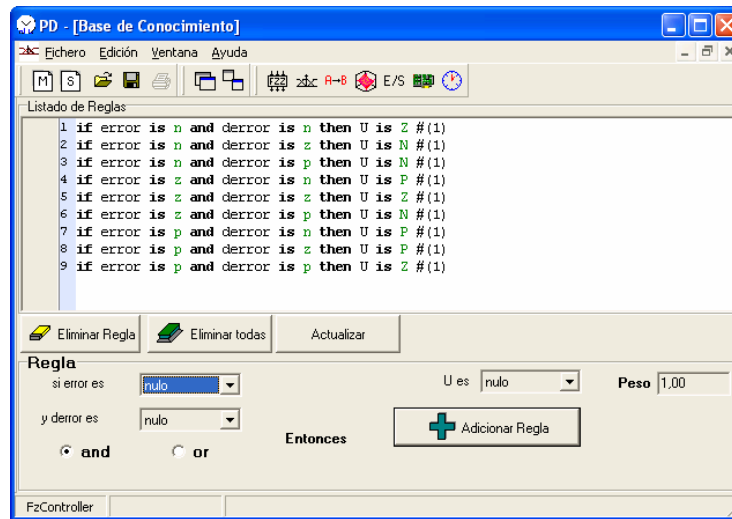


Fig. 3.5. Editor de la base de reglas del sistema.

3.3.4 Editor de operadores definidos por el usuario.

Una de las características fundamentales del sistema FzController es la posibilidad que le brinda al usuario de definir sus propios operadores difusos. El usuario no sólo puede trabajar con los operadores más comúnmente empleado sino que puede implementar sus propios operadores, probar la respuesta del sistema así como corregirlos. La figura 3.6 muestra la ventana del editor de código de los operadores definidos por el usuario.

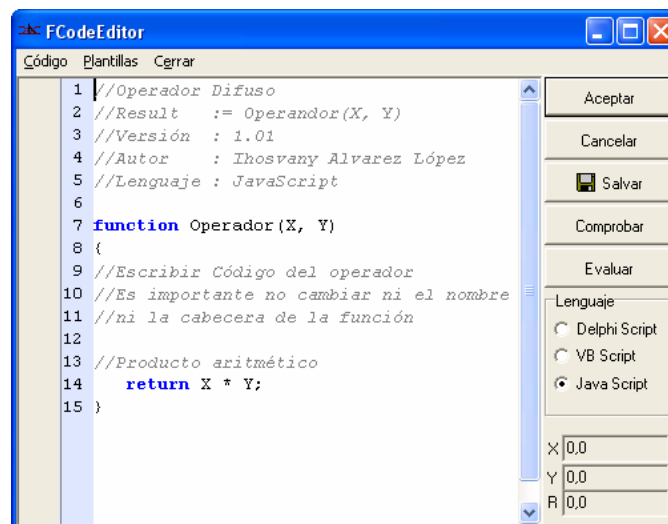


Fig. 3.6. Editor de operadores definidos por el usuario.

El editor de operadores definidos por el usuario presenta una interfaz gráfica que le permite al usuario, empleando alguno de los lenguajes de programación “*Delphi Script*”, “*Visual Basic Script*” o “*Java Script*” implementar sus propios operadores así como comprobar la sintaxis del código y evaluar el operador. Se recomienda al usuario del sistema implementar sus propios operadores en el lenguaje “*Delphi Script*” o “*Java Script*” para obtener una mayor velocidad de cómputo. En esta línea, y sin gran esfuerzo, el usuario también podría implementar sus propios métodos de desdifuminación. Independientemente de la facilidad de definir e implementar operadores “ad hoc”, es obvio que el usuario del sistema deberá tener unos conocimientos mínimos de programación para implementarlos.

3.3.5 Visualización gráfica de las Reglas y proceso de inferencia.

Una vez que el sistema ha sido diseñado es importante estudiar el comportamiento del mismo. La visualización del grado de activación de cada una de las reglas para un determinado vector de entradas constituye sin dudas una herramienta muy importante en el análisis del comportamiento del sistema diseñado. Existen algunos sistemas que implementan esta herramienta como el MATLAB. La figura 3.7 muestra la ventana de visualización gráfica del proceso de inferencia.

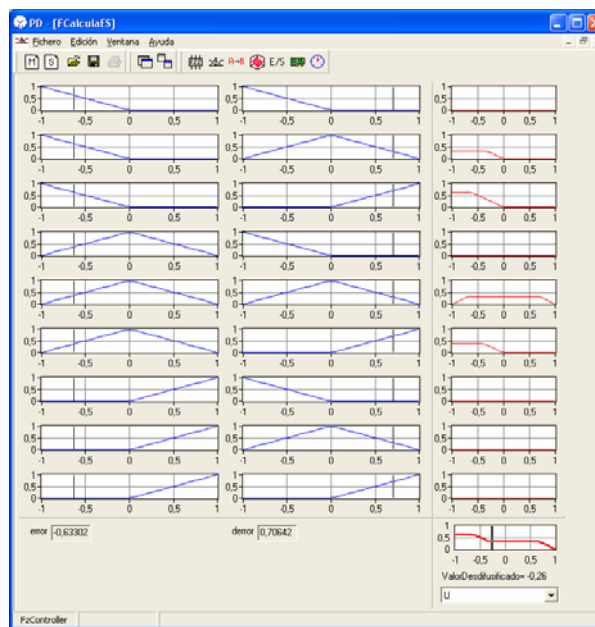


Fig. 3.7. Visualización gráfica de las Reglas y proceso de inferencia.

Cuando el usuario del sistema implementa sus propios operadores, no sólo puede analizar el comportamiento del mismo mediante el editor de operadores, sino que puede analizar la repercusión en la respuesta del controlador analizando gráficamente el proceso de inferencia. Mediante un exhaustivo análisis del proceso de inferencia se puede corregir el operador diseñado para garantizar la respuesta deseada del sistema.

FzController no sólo permite la visualización de la activación, i.e. conjunto difuso implicado, sino la del conjunto difuso global como resultado del proceso de agregación.

3.3.6 Representación gráfica de la respuesta del sistema. Superficie de control

El sistema permite la visualización gráfica de la respuesta del sistema mediante la superficie de control o mediante curva de relación de entradas/salidas.

Al igual que el análisis gráfico del proceso de inferencia, el análisis de la superficie de control constituye una importante herramienta en el estudio del comportamiento del sistema. La superficie de control muestra todos los posibles valores de respuesta del sistema ante cualquier combinación de las entradas. Así, superficies de control suaves, indicarían que la señal de control sería poco oscilatoria, y a cambios pequeños en los valores de entrada, la salida tendría cambios pequeños.

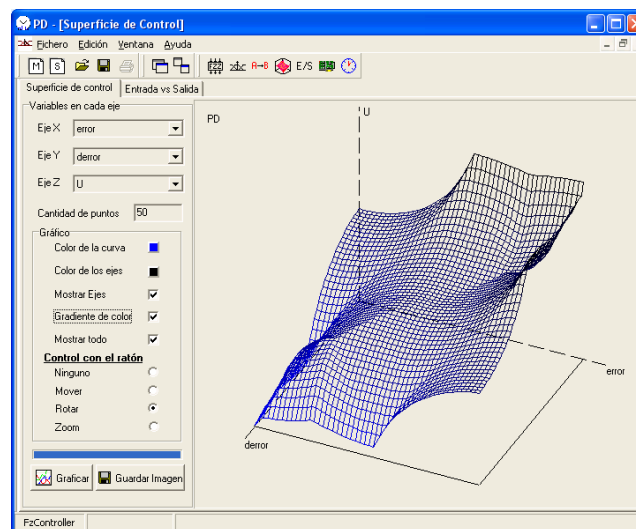


Fig. 3.8. Superficie de control del sistema diseñado.

Mediante el análisis de la superficie de control se puede analizar para qué combinación de entradas el comportamiento del sistema no es el deseado y corregirlo cambiando las reglas, operadores o funciones de pertenencia de las variables lingüísticas.

3.4 MÓDULO DE CONTROL EN TIEMPO REAL.

Es importante cuando se diseña un controlador para una planta o proceso comprobar los resultados obtenidos no sólo a nivel mediante simulación sino con una planta real. El módulo de control en tiempo real que se ha desarrollado tiene como propósito realizar control sobre una planta real a modo experimental y con el objetivo de mejorar el sistema diseñado.

Para interactuar con la planta o proceso se emplea una tarjeta de adquisición de datos. De manera general el sistema puede trabajar con cualquier dispositivo de adquisición de datos. El trabajo con la tarjeta de adquisición de datos se realiza mediante una librería de enlace dinámico (dll) que puede programar el propio usuario final del sistema.

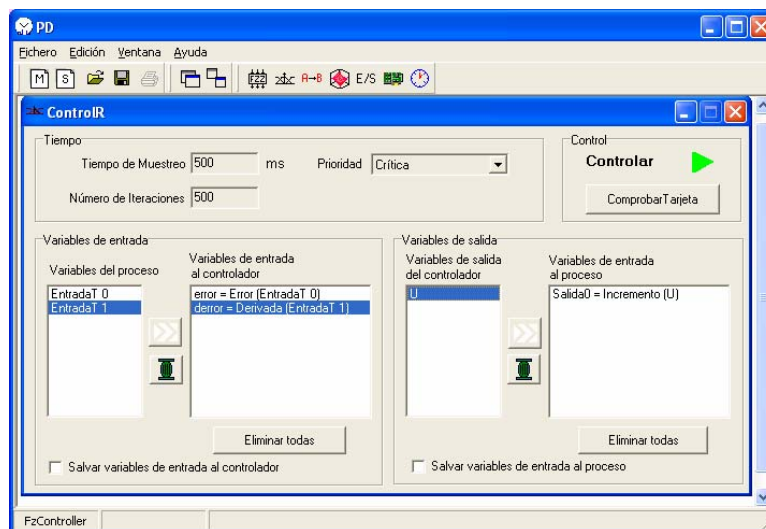


Fig. 3.9. Módulo de control en tiempo real.

En el módulo de control en tiempo real se realiza también el acondicionamiento de las señales, que consiste en realizar el proceso de filtrado, ajuste de escala, u obtener nuevas

señales como resultado de una transformación u operación matemática de las señales leídas directamente del proceso.

El sistema FzController permite aplicar algoritmos de filtraje, ajuste de escala, función de derivación, función de error y función de integración a las señales leídas del proceso físico o enviadas al proceso mediante el dispositivo de adquisición de datos.

3.5 GENERACIÓN AUTOMÁTICA DE CÓDIGO PARA AUTÓMATAS PROGRAMABLES INDUSTRIALES Y LENGUAJES DE ALTO NIVEL.

En la actualidad la mayoría de las aplicaciones industriales, que se han desarrollando, empleando lógica difusa o sistemas difusos se han implementado empleando autómatas programables [U.Michel90, J.Balcells97] con módulos de procesamiento difuso o diseños hardware a la medida. Aquí con este módulo se pretende poder implementar tantos controladores difusos como se quiera, empleando un autómata programable industrial, sin la necesidad de incorporar un módulo adicional de procesamiento difuso. Para ello el sistema es capaz de generar el código del controlador en texto estructurado y empleando funciones del estándar IEC 61131-3.

La norma IEC 61131-3 [AENOR94] tiene un gran impacto en el mundo del control industrial y éste no se restringe al mercado convencional de los PLC's. El uso de IEC 61131-3 proporciona numerosos beneficios para usuarios/programadores. Los beneficios de la adopción de este estándar son varios, dependiendo de las áreas de aplicación: control de procesos, integrador de sistemas, educación, programación, mantenimiento, instalación, entre otros. IEC 61131-3 es el resultado del gran esfuerzo realizado por 7 multinacionales a los que se añaden muchos años de experiencia en el campo de la automatización industrial. El estándar constituye las especificaciones de la sintaxis y semántica de un lenguaje de programación (texto estructurado), incluyendo el modelo de software y la estructura del lenguaje.

El lenguaje Texto estructurado (ST) es un lenguaje de alto nivel con orígenes en el Ada, Pascal y 'C'; puede ser utilizado para codificar expresiones complejas e instrucciones anidadas; este lenguaje dispone de estructuras para bucles (REPEAT-UNTIL; WHILE-DO), ejecución condicional (IF-THEN-ELSE; CASE), funciones (SQRT, SIN, etc.).

El código generado hace uso de una biblioteca de funciones, en la que se implementan todos los operadores y funciones de pertenencia con los que trabaja el sistema. Esta biblioteca de funciones es de libre distribución.

Inicialmente se ha desarrollado para autómatas programables "Panasonic" antiguos NAIS y SIEMENS. Al tratarse de un código estándar, en principio es válido para cualquier PLC cuyo entorno de desarrollo incorpore el estándar IEC 61131-3.

La tabla número 3.2, muestra los resultados obtenidos en la implementación de un sistema empleando un PLC de la serie FP0 de Panasonic (NAIS) [FPSeries05].

| Características del sistema implementado | |
|---|----------------------------------|
| Tipo Autómata (PLC) | Panasonic FP0 C14 |
| Controlador Implementado | Tipo Sugeno |
| Número de variables de entrada | 2 |
| Número de variables de salida | 1 |
| Funciones de pertenencias | 3 en cada variable |
| Número de reglas | 9 |
| Resultados | |
| Tiempo de ciclo de SCAN | 25.4ms |
| Tamaño del programa | 100 pasos o instrucciones de CPU |

Tabla 3.2. Datos de la prueba realizada.

Es importante tener en cuenta que para la implementación de sistemas de control difuso empleando autómatas programables hasta ahora había que incorporar un módulo de procesamiento difuso. Estos módulos normalmente suelen ser costosos y se encuentran limitados en cuanto al número de funciones de pertenencias y operadores entre otros. Los

módulos de procesamiento difusos, que se han venido comercializando hasta el momento, realizan un procesamiento muy rápido y no consumen tiempo del ciclo de SCAN de las CPU porque son unidades de procesamiento independientes. El código implementado con el Fzcontroller sí consume tiempo de ciclo de SCAN debido a que es una implementación software lo cual debe ser tenido en cuenta por el programador del sistema.

Las figuras 3.10 (a,b) muestran el código generado para un PLC PANASONIC así como la opción de generación de código del sistema.

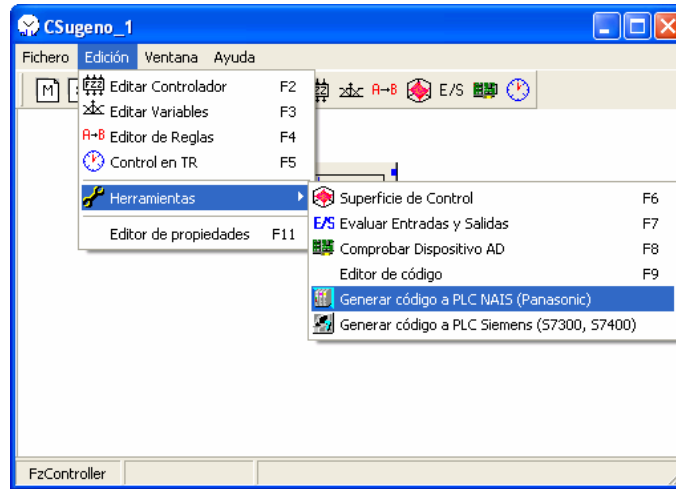


Fig. 3.10a Módulo de generación de código para PLC y código generado.

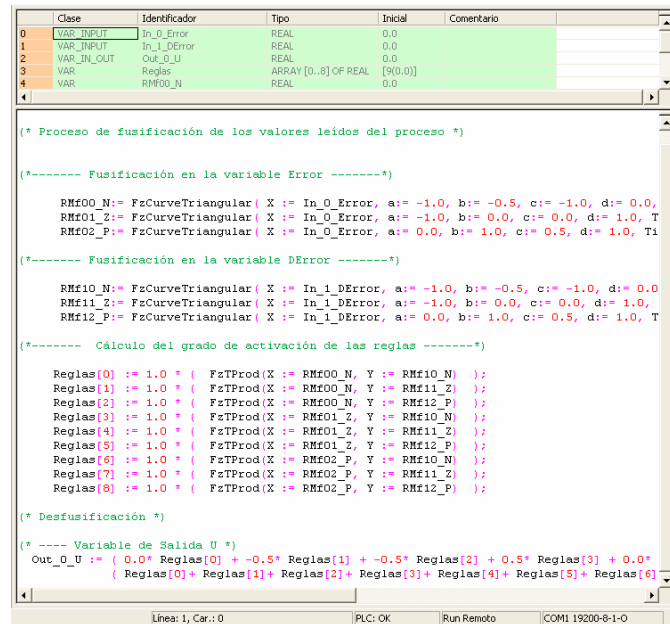


Fig. 3.10b Módulo de generación de código para PLC y código generado.

La introducción de este módulo en el sistema, que representa su característica distintiva fundamental con respecto a los sistemas conocidos, brinda las siguientes ventajas en la implementación de sistemas de control aplicando lógica difusa en autómatas programables:

- Cantidad no limitada de operadores y conjuntos difusos que se pueden emplear.
- Versatilidad del código generado.
- Posibilidad de implementar tantos controladores como quiera siempre que las limitaciones de la CPU y el ciclo de SCAN lo permitan.
- Menor coste económico.
- Posibilidad de implementar sistemas de control difusos en plantas que estén ya operativas sin necesidad de realizar nuevas inversiones.
- Menor tiempo de desarrollo de las aplicaciones finales.

3.6 DISEÑO DEL CONTROLADOR DE HUMEDAD Y DE TEMPERATURA PARA LA CURA CONTROLADA DE TABACO EN HOJAS.

Como anteriormente se comentó, en el proceso de curado de tabaco de manera controlada se miden y regulan dos variables, la humedad y la temperatura. Se propone un sistema de control aplicando la lógica difusa para el control de la humedad que es nuestro principal objetivo además se controla la humedad relativa con un control ON-OFF.

3.6.1 Diseño del controlador de humedad (difuso).

Las funciones de pertenencia de las variables de entrada al controlador difuso, el error de la variable humedad respecto a la referencia y su derivada, se realizaron a partir de entrevistas con los expertos operadores del proceso. En ellas se encuentra plasmado la manera de pensar y proceder del operador, que es el controlador del proceso.

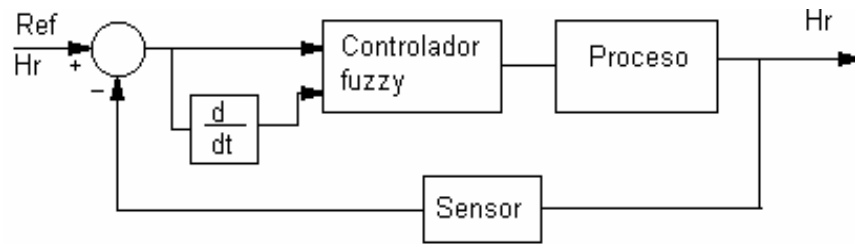


Fig. 3.11 Esquema del controlador difuso para la humedad.

3.6.2 Variables de entrada y de salida al controlador difuso.

Ante todo se deben definir las variables de entrada a nuestro controlador y la variable de salida. Como variables de entrada al controlador se escogió el error,

$$e(k) = \text{RefHr} - \text{Hr},$$

y su derivada

$$de = e(k) - e(k-1)$$

El error es la variable de entrada a todo tipo de controlador en lazo cerrado y da la medida de cuán cerca está la variable de salida del valor prefijado en la referencia.

La derivada del error no se define así, esta se define como:

$$de = [e(k) - e(k-1)]/T$$

donde:

T : Tiempo de muestreo que se tomo para el error.

e(k) : Error en el instante de muestreo actual.

e(k-1): Error en el instante de muestreo anterior.

Pero si el tiempo de muestreo es constante, igualmente la diferencia de los errores en el intervalo actual y en el intervalo anterior, ofrece una medida del comportamiento futuro del error. Si se analiza la derivada del error como la diferencia de los errores entre el tiempo de muestreo esta sería mayor o menor en dependencia del valor del tiempo de muestreo. Es decir si no se tiene en cuenta en la expresión el tiempo de muestreo explícitamente, se estaría en el caso particular en que el tiempo de muestreo es la unidad.

Al analizar la derivada se tiene una medida de cuanto valdría el error en el próximo instante de muestreo. En nuestro proceso la humedad relativa (Hr) es crítica, $|e| < 1$ o 1.5 % Hr. Por esa razón se decidió tener en cuenta la derivada del error para tener una idea de cual será el valor futuro del error si sigue el mismo comportamiento.

Como variable de salida del controlador es obvio que será la señal de control U que se aplica al servomecanismo que realiza la apertura o no de las ventanillas que actúan sobre la dinámica de la humedad relativa en el proceso.

3.6.3 Funciones de pertenencia de la variable error.

Sobre el universo de variación de la variable error se establecieron 7 conjuntos difusos (máxima cantidad de etiquetas por variable que admite el módulo de procesamiento difuso). Cada una de las variables lingüísticas en las que se subdivide el universo de variación del error, fueron creadas a través de entrevistas con operadores del proceso y un estudio del mismo. De acuerdo a las características de la planta, solo tiene interés analizar errores que no sean menores que -5% ni mayores que el 1 o 2%. Es decir para errores que se encuentren fuera de este rango, el controlador humano, que es el experto, genera una señal de control U que no varía. Las funciones de pertenencia definidas son las siguientes:

Error: $e = \text{RefHr} - \text{Hr}$

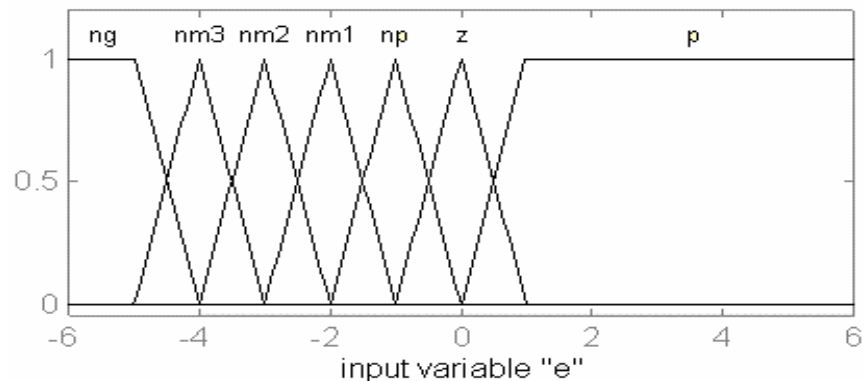


Fig. 3.12 Funciones de pertenencia de la variable de entrada error.

- Ng** Expresado por los operadores como: “un error grande es que la humedad este del 4 ó 5% o mayor que la referencia de la etapa”.
- Nm3** El operador lo expresa como: “un error negativo alrededor del 4%”.
- Nm2** Lingüísticamente fue expresado por los operadores como: “un error que sea negativo pero alrededor del 3%”.
- Nm1** En esta etiqueta los controladores humanos se expresan como: “un error en la humedad relativa que sea pequeño pero no muy pequeño, más o menos alrededor del -2%”
- Np** Es expresado como: “un error pequeño, alrededor del 1% pero negativo”.
- Z** Los expertos en el proceso hablan de “un error que esté alrededor de cero, que la humedad esté más o menos un 1% por encima o por debajo del valor de la referencia”.
- P** Los expertos en el proceso lo expresan como: “un error que sea positivo, que la humedad sea menor que la referencia fijada por más del 1%”.

En la definición de los conjuntos difusos sobre el universo de discurso de la variable error se observa que para valores de error mayor que el 5% hay una saturación. Esta saturación del conjunto difuso **Ng** se debe a que para valores de error que sean menores del -5% la acción de control a ejecutar es apertura total de las ventanillas. Es decir la señal de salida del controlador no varía ante nuevas variaciones del error que sean aumentando negativamente. Igualmente sucede con errores positivos mayores que el 1% de Hr que tienen total pertenencia al conjunto **P**. Frente a errores mayores que el 1% de Hr la decisión del operador sería cierre total de las ventanillas, y no habrá más alternativa, existe una saturación.

A la hora de llevar estas funciones de pertenencia al módulo de procesamiento difuso del autómatas se realizó un ajuste de la escala. Se estableció el cero como 2047, que sería la

mitad del rango máximo que permite representar el módulo en cada variable difusa. Así se fueron desplazando proporcionalmente alrededor del cero creado cada valor del error.

El valor de la humedad es representado en el autómata como un número de tres dígitos desde 000 hasta 999 (suponiendo variaciones en la humedad comprendidas entre 0% y 99,9%). Ese número se corresponde con un valor de humedad relativa xx,x. Es decir la unidad mínima o precisión con que se calcula la humedad relativa es de 0.1%. Tanto en nuestro proceso como en otros, de manera general no es necesario medir humedad con una exactitud mayor.

El módulo de procesamiento difuso trabaja con 12 bits, por lo que las funciones de pertenencia deben ser definidas en un rango de 0 - 4095. Entonces siempre se trabaja con un factor de escala que acondicione los valores de las variables que maneja el módulo. Este ajuste debe ser entendible por el programador en el formato que se representen los datos.

En el caso del error se escogió el cero en 2047 y el formato con el cual se representó el valor de la humedad relativa fue el explicado anteriormente, cada diez unidades entre 0 y 4095 representarían un 1% de humedad relativa. Entonces un error del 5% corresponde con $2047+50$, y un error del 5% pero negativo se corresponde con un valor de $2047-50$. Puede parecer que existe un aglutinamiento de las funciones de pertenencia alrededor del cero (2047), pero esto no es así. Se podría haber representado estas funciones de pertenencia ajustando la escala de forma que cubriera todos los puntos entre 0 y 4095, pero no se lograría una precisión mayor, está limitada a la del cálculo de la humedad.

3.6.4 Funciones de pertenencia de la variable derivada del error.

Las funciones de pertenencia de una variable difusa se definen arbitrariamente o bien mediante las especificaciones del operador experto. Las funciones de pertenencia o

conjuntos difusos definidos sobre el universo de variación “derivada del error” son las siguientes.

Derivada del error: $de = e(k) - e(k-1)$

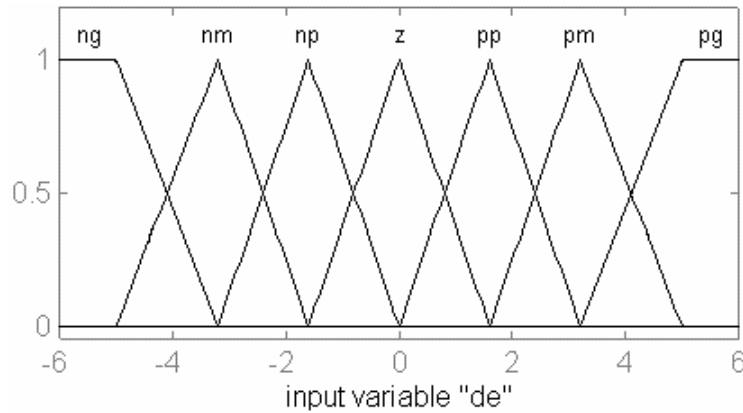


Fig. 3.13 Funciones de pertenencia de la variable derivada del error.

- Ng** Negativo grande. Corresponde con un error que vaya disminuyendo a razón de 5% en Hr o mayor en humedad relativa por cada instante de muestreo.
- Nm** Negativo medio. Corresponde con un error que vaya disminuyendo con una razón de alrededor del 3,2% en humedad relativa por cada instante de muestreo.
- Np** Negativo pequeño. Corresponde con un error que vaya disminuyendo con una razón de alrededor del 1,6% en humedad relativa aproximadamente por cada instante de muestreo.
- Z** Cero. Corresponde con una razón de cambio del error que sea alrededor de 0 en porcentaje de humedad relativa con respecto al instante anterior de muestreo.
- Pp** Positivo pequeño. Corresponde con un error que vaya disminuyendo con una razón de alrededor del 1,6% en humedad relativa aproximadamente por cada instante de muestreo.
- Pm** Positivo medio. Corresponde con un error que vaya aumentando con una razón de alrededor del 3,2% en humedad relativa por cada instante de muestreo.

Pg Positivo grande. Corresponde con un error que vaya aumentando a razón de 5% o mayor en humedad relativa por cada instante de muestreo.

Las funciones de pertenencia de la derivada del error están definidas por funciones de pertenencia de tipo triangulares con vértices equidistantes, por triángulos isósceles, con una razón de solapamiento del 30% entre dos funciones de pertenencias adyacentes.

Cuando se instaló el equipamiento en el proceso, se llevó a cabo una identificación del sistema. Esto se hizo con el objetivo de determinar la constante de tiempo de respuesta del sistema para establecer el intervalo de muestreo para la derivada del error.

Las pruebas se hicieron para el peor de los casos, que es cuando la casa de tabaco está vacía. En esta situación la dinámica del sistema es la mayor. Al no poseer las hojas de tabaco en su interior, que constituyen un punto de acumulación de humedad que determinan la dinámica del sistema conjuntamente con otros factores, se acotaría la variación del error entre -5% de Hr y +5% de Hr estableciendo un tiempo de muestreo adecuado para esto.

Cuando la cámara de curado de tabaco se llena es lógico pensar que el error no va a experimentar cambios superiores al 4 o 5% con respecto al intervalo anterior de muestreo. En la operación normal del proceso las variaciones del error, es decir su derivada, estarán sobre el 2 o 3% de Hr que serían las condiciones nominales del proceso. Pero las situaciones en que el error varía alrededor del 5% se debe tener muy presente pues en el proceso existe la posibilidad de humidificación. Ante una humidificación que decide el operador del proceso, se debe tener un buen control sobre esta pues puede provocar que la hoja se descomponga.

Para representar dentro del autómata y referir las funciones de pertenencia al módulo de procesamiento difuso se sigue el mismo procedimiento y razonamiento que para el error.

3.6.5 Funciones de pertenencia de la señal de salida del controlador U.

La señal de salida del controlador debe variar en un rango de 0-10V. El actuador lo constituye un servomecanismo que tiene una relación lineal entre el voltaje de entrada y la apertura de las ventanillas. La señal de entrada varía de 0-10V mientras la apertura de las ventanillas va de 0 - 100%.

El operador experto se mueve en todo el rango de apertura de las ventanillas, y no existe una zona dentro de la gama de aperturas en las que se encuentren el mayor número de decisiones del operador experto. A partir de los datos obtenidos y del estudio del proceso, se decidió realizar las siguientes funciones de pertenencia para la señal de salida del controlador.

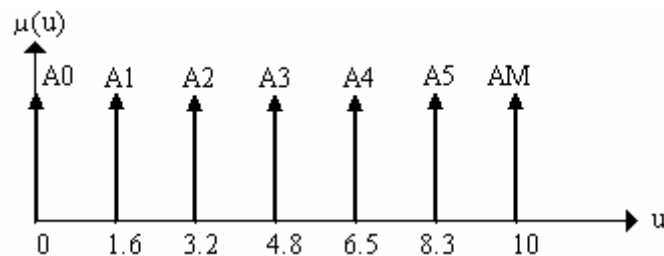


Fig. 3.14 Funciones de pertenencia de la señal de salida del controlador U.

- A0 Apertura cero. Cierre total de las ventanillas.
- A1 Apertura 1. Se corresponde con el 16% de la apertura máxima posible.
- A2 Apertura 2. Se corresponde con el 32% de la apertura máxima posible.
- A3 Apertura 3. Se corresponde con el 48% de la apertura máxima posible.
- A4 Apertura 4. Se corresponde con el 65% de la apertura máxima posible.
- A5 Apertura 5. Se corresponde con el 83% de la apertura máxima posible.
- AM Apertura máxima. Se corresponde con 100% de apertura de las ventanillas.

Las funciones de pertenencia de la salida del controlador son de tipo singleton. Cada una de estas etiquetas son interpretadas como el valor de máxima pertenencia del valor de la variable al conjunto difuso. Una vez que se obtiene el grado de cumplimiento de un predicado de una regla este es aplicado directamente a la salida singleton como un factor de escala. Las reglas o proposiciones son expresadas de igual forma que si fuera otro tipo de funciones de pertenencia en el espacio de salida.

Una vez aplicadas las reglas, la altura de cada singleton ya no sería 1 sino el valor de cumplimiento de cada regla. Para la desdifuminación se hace una interpolación lineal entre los puntos que se corresponden con la altura resultante de cada singleton para construir así la representación del conjunto difuso de salida. Entonces el método de desdifuminación por el centro de gravedad es sustancialmente simplificado.

Llamando S_i a la altura resultante del singleton i (pertenencia al conjunto difuso de salida i después de haber aplicado las reglas) y d_i al valor del dominio que corresponde al singleton, la expresión será la siguiente:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=0}^n d_i S_i \\ \sum_{i=0}^n S_i \end{array} \right\} \rightarrow \mathfrak{R}$$

3.6.7 Base de reglas del controlador difuso para la humedad.

Una vez que se diseñan las funciones de pertenencia de cada una de las variables que maneja el controlador difuso, se procede a la generación de las reglas o base de conocimientos.

El método más usado e ilustrativo para presentar las reglas es en forma tabular como sigue:

| e de | Ng | Nm3 | Nm2 | Nm1 | Np | Z | P |
|-----------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| Ng | ¹ Am | ² Am | ³ Am | ⁴ Am | ⁵ A5 | ⁶ A4 | ⁷ A3 |
| Nm | ⁸ Am | ⁹ Am | ¹⁰ Am | ¹¹ A5 | ¹² A4 | ¹³ A3 | ¹⁴ A2 |
| Np | ¹⁵ Am | ¹⁶ Am | ¹⁷ A5 | ¹⁸ A4 | ¹⁹ A3 | ²⁰ A2 | ²¹ A1 |
| Z | ²² Am | ²³ A5 | ²⁴ A4 | ²⁵ A3 | ²⁶ A2 | ²⁷ A1 | ²⁸ A0 |
| Pp | ²⁹ A5 | ³⁰ A4 | ³¹ A3 | ³² A2 | ³³ A1 | ³⁴ A0 | ³⁵ A0 |
| Pm | ³⁶ A4 | ³⁷ A3 | ³⁸ A2 | ³⁹ A1 | ⁴⁰ A0 | ⁴¹ A0 | ⁴² A0 |
| Pg | ⁴³ A3 | ⁴⁴ A2 | ⁴⁵ A1 | ⁴⁶ A0 | ⁴⁷ A0 | ⁴⁸ A0 | ⁴⁹ A0 |

Tabla 3.3 Base de reglas del controlador diseñado.

Todas estas reglas se expresan mediante sentencias del tipo

“si e es X1 y Y es X2 entonces U es Ax”

La unión de todas las reglas es lo que formará la base de conocimiento del controlador difuso. Esto se logra matemáticamente mediante el operador conectivo OR que en nuestro caso es el del máximo pero pudiera ser cualquier S-norma. Entonces la experiencia total del experto estará formada por la unión de todas las reglas.

Se debe destacar que para errores positivos o casi cero la salida del controlador difuso es A0 o pequeños valores que indicarían aperturas que estarán menos del 50% de la apertura total de las ventanillas. Esto se ve en las reglas aplicadas cuando se rompe la secuencia de que al mantener una variable en un conjunto difuso determinado y aumenta la otra en un conjunto difuso la salida del controlador aumenta en un conjunto difuso también.

Para la intersección de los conjuntos difusos se utiliza la T-norma del mínimo, al igual para el conectivo AND. Para el conectivo OR se empleó la S-norma del máximo. Como mecanismo de inferencia difusa se utilizó la regla composicional sup-min y como método de desdifuminación se empleó el centro de gravedad, que proporciona variaciones suaves y

continuas de la señal de control. A partir de la aplicación de las reglas a las funciones de pertenencia, se obtiene la superficie de control. Esta superficie no es más que una representación de todos los posibles valores de la salida del controlador difuso (en nuestro caso U) ante cualquier combinación de las variables de entrada una vez que se le aplican las reglas.

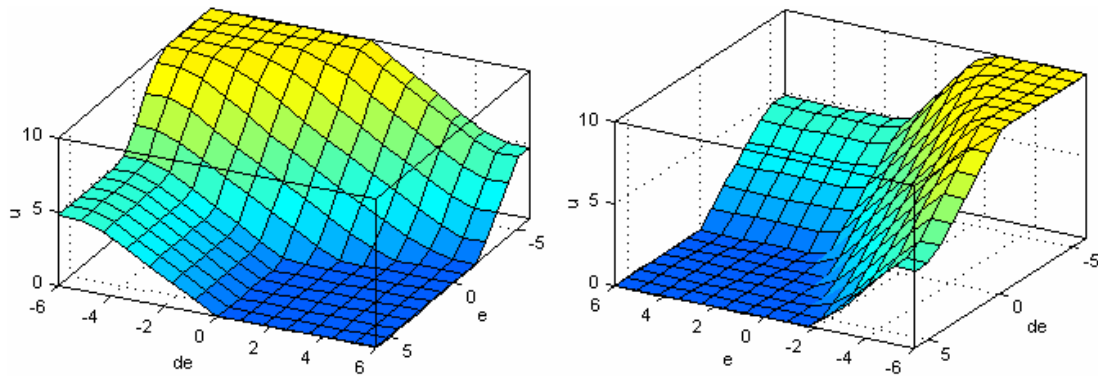


Fig. 3.15 Superficie de control generada por el controlador difuso diseñado.

Se puede realizar un pequeño análisis lógico del problema a partir de la superficie generada. Se ve claramente como al aumentar la señal del error negativamente la altura de la superficie (U) aumenta, y se llega a alcanzar el valor máximo, cuando la razón de crecimiento del error comienza a ser menos negativa. Para valores positivos del error la altura de la superficie, o señal de salida del controlador, se encuentra en cero prácticamente, solo para el caso en que la razón de cambio del error sea lo suficientemente grande como para que se comience a abrir las ventanillas deja de ser cero. En la intersección del plano $de=0$ con la superficie se encuentra una curva suave, que se comporta proporcionalmente con el error, estando en presencia de un control proporcional para estas condiciones de las variables de entrada.

3.6.8 Lazo de control de temperatura.

La temperatura es uno de los dos lazos de control que existen en el proceso. En este caso se realiza un simple control on-off de temperatura mediante el encendido o no encendido de un quemador diesel. Sobre el quemador se actúa mediante una salida de contacto, un relé.

La temperatura debe mantenerse alrededor de la referencia con $\pm 1^\circ\text{C}$. Es decir se tiene un lazo de control de temperatura con una histéresis de 2°C .

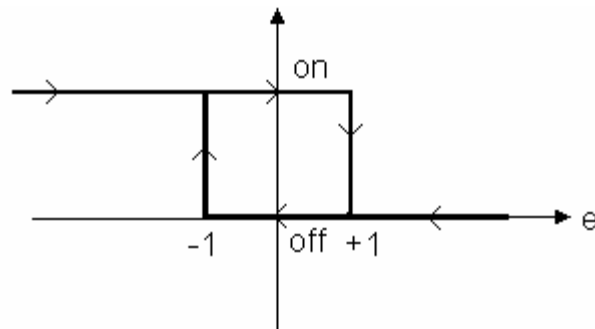


Fig. 3.16 Esquema del lazo de control de temperatura.

3.6.9 Análisis de los resultados obtenidos.

El sistema se probó en una casa de la batería de curación “Hoyo de Mena”. Para un mejor análisis se realiza la comparación de los resultados con los obtenidos en una casa testigo sin el sistema y sometida a las mismas condiciones que la casa de prueba.

3.6.10 Pruebas realizadas.

Para el desarrollo de las pruebas se instalaron metros contadores y tanques aforados para la medición del consumo de electricidad y combustible respectivamente, tanto en la casa de prueba como en la testigo. Es necesario precisar que en la zafra 2002-2003² la temperatura se controló en un rango de 30°C a 34°C y la Humedad Relativa del 90% al 75%, según documento emitido por el Instituto de Investigaciones del Tabaco.

Resultados de la zafra 2002/2003.

En esta zafra se realizaron tres ciclos con el sistema, donde el tabaco curado fue de muy buena calidad, lo que permitió que los resultados reflejen con mayor veracidad las

² Notese, como se comentó en la Tabla 2.3, que los valores de humedad y temperatura de referencia empleados para el diseño en la zafra 2001-02, luego se ajustaron perfectamente en esta zafra

bondades del sistema. Se pudo disponer de una casa testigo con tabaco de igual campo, corte y productor.

Prueba 1:

| Parámetros Comparados | Prueba | Testigo |
|-------------------------------|---------------|----------------|
| Productor | UBP-5 | UBP-5 |
| Duración del Ciclo (días) | 19 | 25 |
| Variedad | Habana 2000 | Habana 2000 |
| Corte | Centro Fino | Centro Fino |
| Numero de Cujes | 3 543 | 3 500 |
| Temperat. Ambiente Promedio | 14 °C | 14 °C |
| Temperatura Mínima | 11 °C | 11 °C |
| Combustible Consumido (lts) | 2 046 | 2 905 |
| Electricidad Consumida (Kw/h) | 1 630 | 4 190 |
| Quintales | 24.89 | 20.57 |
| % Exportación | 47.4 | 28.53 |
| % Consumo | 45 | 59.4 |

Tabla 3.4 Resultados obtenidos en la prueba N°1, realizada durante la zafra 2002/2003

Partiendo de los datos anteriores determinamos que el ahorro de portadores energéticos en este ciclo fue: 61% de electricidad y el 30% de combustible.

En esta prueba se realizó un análisis de las características organolépticas del tabaco curado, para lo cual se tomaron muestras de la casa testigo y la de prueba.

La prueba realizada no aporta suficientes criterios como para afirmar en que porcentaje puede mejorar la calidad de la hoja con el uso del sistema, pero si se puede decir que esta no es afectada y se aprecia mejoría en algunos parámetros, otros no se encuentran en el rango deseado pero aún así superan la casa testigo. El uso generalizado del sistema en la batería permitirá profundizar en este estudio para llegar a conclusiones.

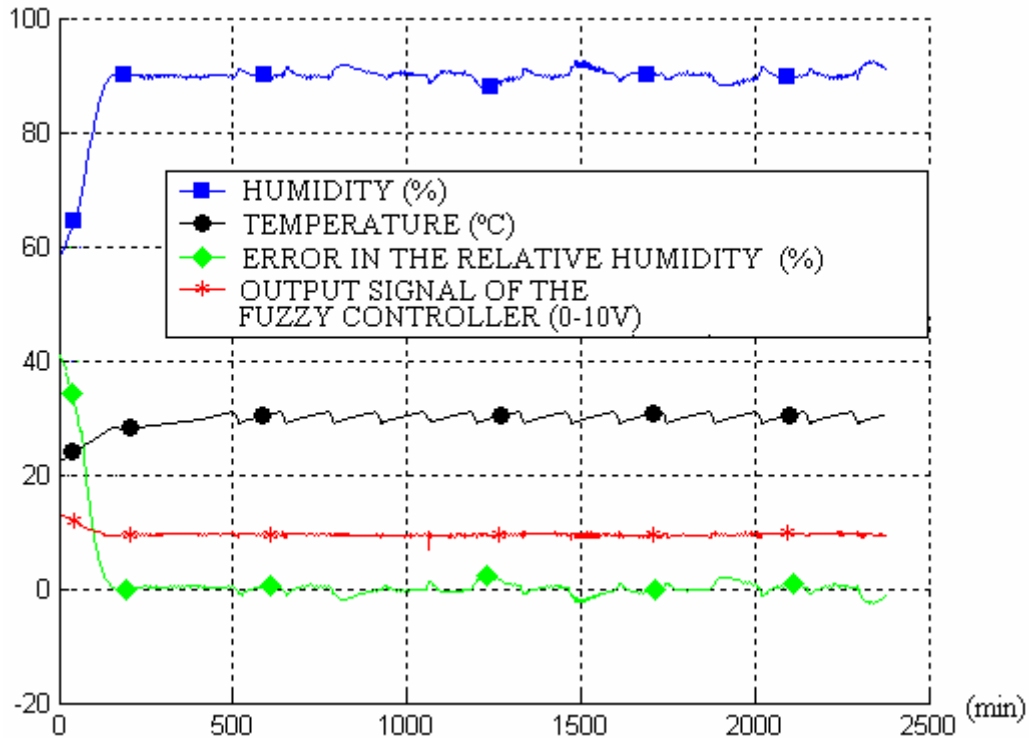


Fig. 3.17. Control de la humedad relativa. Comportamiento dinámico de la temperatura, humedad relativa, señal de control, y error en la variable Humedad Relativa.

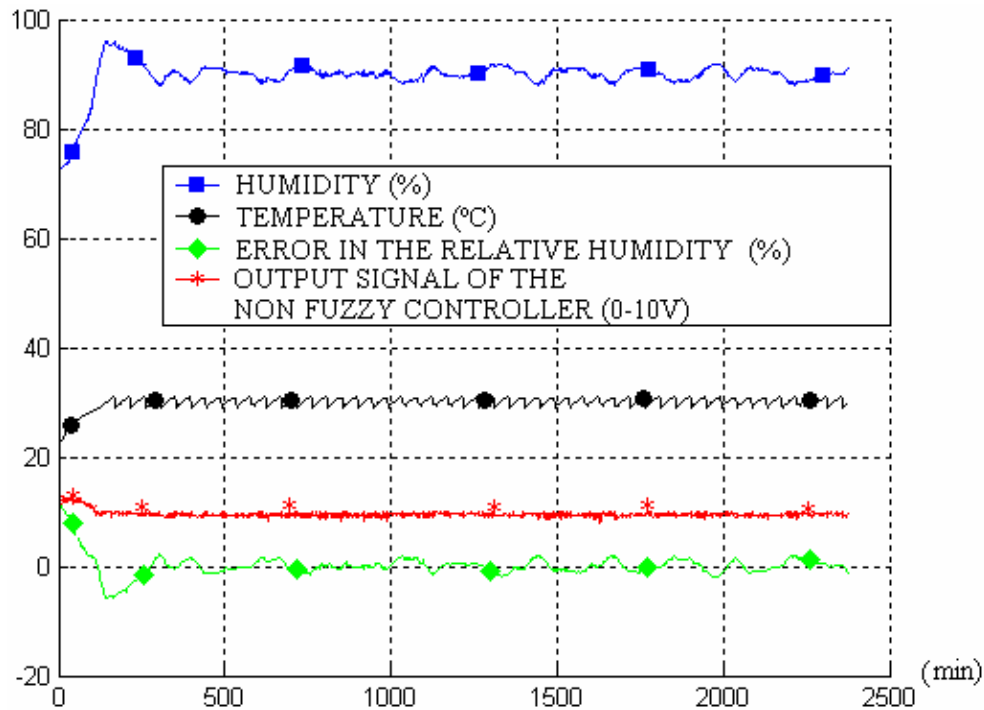


Fig. 3.18. Control de la humedad relativa (Con control convencional). Comportamiento dinámico de la temperatura, humedad relativa, señal de control, y error en la variable Humedad Relativa.

En la figura 3.18 se ve como la frecuencia de oscilación de la señal de control de temperatura es mayor lo cual justifica un incremento en el consumo de combustible en el sistema no controlado con lógica difusa.

Prueba 2:

El tabaco curado en este ciclo fue de excelente calidad y se curó el mismo tabaco tanto en la casa de prueba como en la testigo.

| Parámetros Comparados | Prueba | Testigo |
|-------------------------------|-------------------|-------------------|
| Productor | Salvador Carvajal | Salvador Carvajal |
| Duración del Ciclo (días) | 25 | 30 |
| Variedad | Criollo 98 | Criollo 98 |
| Corte | 1 y 2 Ligero | 1 y 2 Ligero |
| Numero de Cujes | 2 900 | 3 010 |
| Temperat. Ambiente Promedio | 17 °C | 17 °C |
| Temperatura Mínima | 16 °C | 16 °C |
| Combustible Consumido (Its) | 2 151 | 3 210 |
| Electricidad Consumida (Kw/h) | 1 440 | 5 028 |
| Quintales | 29.49 | - |
| % Exportación | 26 | 20 |
| % Consumo | 63.6 | - |

Tabla 3.5 Resultados obtenidos en la prueba N°2, realizada durante la zafra 2002/2003

El ahorro de portadores energéticos en este ciclo fue de un 71.3% de electricidad y un 33% de combustible.

Prueba 3:

En esta prueba no contamos con una casa testigo al no disponer de la cantidad requerida de este tabaco para la misma, por lo que la comparación se hizo respecto a los índices promedio de una casa de esta batería en la zafra.

| Parámetros Comparados | Casa en Prueba | Casa Testigo |
|-------------------------------|-----------------------|---------------------|
| Productor | UBP-3 S.Luis | - |
| Duración del Ciclo (días) | 24 | 25 |
| Variedad | Criollo 98 | - |
| Corte | Ligero y fino | - |
| # Cujes | 3 050 | 3 335 |
| Combustible Consumido (lts) | 1 041 | 1 968 |
| Electricidad Consumida (Kw/h) | 1 680 | 4 190 |

Tabla 3.6 Resultados obtenidos en la prueba N°3 , realizada durante la zafra 2002/2003

Como resultado se obtuvo, que el ahorro de portadores energéticos en este ciclo fue del 60% de la electricidad y 47% de combustible.

3.6.11 Análisis del ahorro energético en los resultados.

Durante las pruebas se curaron un total de 9493 cujes en la casa de prueba y 9845 en la casa testigo. Debe aclararse que paralelamente a todo esto se introdujo la tecnología necesaria para elevar el factor de potencia en las casas de tabaco como elemento fundamental para disminuir los costos en electricidad.

A los beneficios económicos que representa el ahorro de portadores energéticos, se suman los obtenidos por concepto de mejorar el factor de potencia, que se eleva desde 0.6 a más de 0.98.

Independientemente de estos resultados, que consideramos muy buenos, para determinar de forma concluyente el aporte económico total dado por la calidad de la hoja obtenida, y poder hacer correcciones e inferencias, se necesitaría realizar un mayor número pruebas que condujeran a resultados fiables, lo que evidentemente escapa al ámbito en el que se desarrolla esta memoria.

| Parámetros | Prueba | Testigo |
|----------------------------|---------------|----------------|
| Total de cujes curados | 9493 | 9845 |
| Consumo Combustible | 6125 litros | 8083 litros |
| Índice de consumo por cuje | 0.64 litros | 0.82 litros |
| Consumo Electricidad | 7260 Kw/h | 13408 Kw/h |
| Índice de consumo por cuje | 0.76 Kw/h | 1.36 Kw/h |

Tabla 3.7 Análisis de ahorro energético en los resultados obtenidos

CONCLUSIONES

FUTUROS DESARROLLOS

CONCLUSIONES

La lógica difusa y su aplicación al control automático ha tenido en las últimas décadas una gran cantidad de contribuciones desde el punto de vista teórico y existen múltiples ejemplos de aplicaciones, aunque numéricamente estas todavía no son significativas si se tiene en cuenta la potencialidad que la lógica difusa ofrece, y el amplio campo sobre el que hay que tomar referencias.

Uno de los principales elementos que en nuestra opinión limitan una utilización más amplia de la lógica difusa en aplicaciones industriales es el medio técnico sobre el cual implementar el algoritmo de control difuso. Los PLC son los dispositivos que fundamentalmente se usan en el ambiente industrial como controladores, siendo muy pocas las familias de PLC que ofrecen un módulo donde implementar algoritmos de control difusos, que por lo general son de elevado costo y con muy limitadas prestaciones. Es por la razón anterior que la mayoría de las soluciones que se encuentran están implementadas en un hardware específico o en un computador utilizado como controlador.

El sistema FzController que ha sido presentado en esta tesis constituye una aportación innovadora y original para el desarrollo, implementación y control en tiempo real de una planta mediante un controlador difuso. El sistema presenta numerosas herramientas que cubren en gran medida las distintas etapas de diseño de un controlador difuso y su característica fundamental y distintiva de otras herramientas que ya existen, es que aprovechando el estándar IEC 61131-3, presente en la mayor parte de los PLC comerciales, permite la implementación final de manera automática del controlador difuso diseñado en un PLC. Esta característica convierte a Fzcontroller en una herramienta muy poderosa y de extrema utilidad tanto para la investigación como para su uso en el ambiente industrial.

En el trabajo se ha realizado también un estudio del proceso de cura controlada del tabaco en hoja, así como de los sistemas tecnológicos actualmente empleados, para lo que se desarrolló un sistema de control empleando lógica difusa para la cura controlada del tabaco en hoja. A partir del diseño realizado, con el FzController, se implementó posteriormente

el controlador difuso en un autómata programable obteniéndose excelentes resultados y mejoras en el proceso.

En torno a este último punto concretamente, los resultados que mas destacan se pueden sintetizar de la siguiente forma:

- Se diseñó e implementó el Sistema de Automatización para el Curado del Tabaco, introduciéndose técnicas de Soft Computing en el mismo.
- El control preciso de la humedad y la temperatura garantiza un uso racional del combustible lográndose ahorros sustanciales.
- Se producen ahorros en el consumo de electricidad
- A partir de los datos de valores reales de las variables almacenadas durante los ciclos de curación se pueden determinar las curvas del comportamiento de la temperatura, humedad y flujo de aire.
- El factor de potencia en la cámara se eleva de 0.6 a 0.98 o más.
- La calidad de la hoja no se afecta y tiende a ser mayor con la introducción del nuevo sistema.
- Aunque las pruebas fueron realizadas en tabaco negro, el sistema puede ser utilizado para cualquier tipo de tabaco. También se puede aplicar a otros procesos de secado con características similares, aceptando cambios de hardware y software.

Por todo ello, este trabajo tiene un gran valor añadido por el significativo aporte que realiza a mejorar de manera indiscutible los indicadores de eficiencia y productividad de un sector muy importante para la economía de Cuba.

FUTUROS DESARROLLOS

Dado que en este trabajo se presentan en una secuencia lógica, los fundamentos teóricos de la lógica difusa que se utilizan en el diseño de controladores difusos, así como las estructuras de datos y los algoritmos de implementación, y que esta presentación es necesaria en una gran variedad de circunstancias, ámbitos y aplicaciones, surge la posibilidad de que la memoria se convierta en un punto de consulta importante para futuros desarrollos, lo que se intentará plasmar en forma de manual de referencia.

Junto con eso, la primera línea en la que hay que avanzar de manera inmediata es en la incorporación de métodos de aprendizaje y ajuste automático del controlador.

Posteriormente habrá que,

- Continuar realizando un estudio del sistema de cura controlada del tabaco en hoja para introducir mejoras que reviertan en la sociedad cubana, y que puedan exportarse a otros contextos regionales.
- Incorporar nuevos módulos al sistema FzController para hacer una herramienta más potente y completa, capaz de poderse adecuar a otros contextos.
- Incluir en el sistema un grupo de herramientas para el análisis de los datos obtenidos.
- Profundizar en la línea de la extracción del conocimiento experto que se aventura como muy fructífera.

BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

Bibliografía

- [AENOR94] AENOR, "NORMA UNE-EN-61131-1,2,3" ,AENOR, 1994.
- [Alvara98] Alvarado, I. Como especificar un sistema de adquisición de datos y control basado en PC. URL <http://www.instrucontrol.com/>, 1998.
- [Alva00] Álvarez, I., Cepero, A.O.: Control de un sistema en el modelo de espacio de estado empleando un planificador de ganancias difuso. X Congreso Español Sobre Tecnologías y Lógica Fuzzy. 2000
- [Alva02] Álvarez, I: Sistemas para el control automático de procesos aplicando lógica difusa. Memoria de III Ciclo. Universidad de Granada (2002)
- [Alva03] Álvarez, I, Llanes, O., Verdegay, J.L.: Control Difuso para Secado de Tabaco en Hoja. En Proceedings of the Int'l Conference "Management and Technology in the New Enterprise" (R.A. Espin, R. Garza, J. Marx y C. Rautenstrauch, Eds.). La Habana (Cuba), AMSE-Cujae, (2003) 531-544.
- [Alva04] Álvarez, I, Llanes, O., Verdegay, J.L.: Aplicación del Control Difuso en el Proceso de Secado de Tabaco. Actas del XII Congreso Español sobre Tecnologías y Lógica Fuzzy (ESTYLF'04), Jaen, 225-230 (2004).
- [Alva05] Alvarez, I, Llanes, O., Verdegay, J.L.: Drying process of tobacco leaves by using a fuzzy controller. Fuzzy Sets and Systems 150 (2005), 493–506.
- [Alva06] Álvarez, I, Llanes, O., Verdegay, J. L.: FzController: A Development Environment for Fuzzy Controllers.
- [Ares99] Ares, D.M., García, H., Naranjo S. y Peláez I.: Caracterización parcial de las fracciones proteicas extraídas de las hojas de tabaco. Cubatabaco 1(1): 55-61 (1999).
- [Bonis97] Bonissone, P: Fuzzy Logic and Soft Computing. Technology Development and Applications. GE Technical Report (1997)
- [Castro95] Castro, J.L.: Fuzzy Logic Controllers are Universal Approximators. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics 25 (1995), 629-635.
- [Castro96] Castro, J.L., Delgado, M: Fuzzy Systems with Defuzzification are Universal Approximators. IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics. 26 (1996), 149-152.
- [Chiu95] Chiu, S. Software Tools for Fuzzy Control. Industrial Applications of Fuzzy Logic and Intelligent Systems. IEEE press, 1995. 313 – 40.

- [Cordón00] Cordón O.: Sistemas inteligentes para modelado planificación y control". Apuntes de Tercer Ciclo. Curso 1999/2000.
- [Cordón97] Cordón, O., Herrera, F, Peregrín, A.: Applicability of the fuzzy operators in the design of fuzzy logic controllers. Fuzzy Sets and System. Vol. 86. 1997.
- [Cordón99] Cordón, O., Herrera, F.: A practical study on the Implementation of Fuzzy Logic Controllers. International Journal of Intelligent Control and Systems. Vol. 3, No 1, 1999.
- [Daley89] Daley, S., Gill, K.F.: Comparison of a fuzzy logic controllers with a P+D control law. Transaction ASME, Journal of Dynamical System, Measurement, and Control. Vol 111. 1989.
- [Drian93] Driankov, D. M. R. : An Introduction to Fuzzy Control, Springer – Verlag, 1993
- [Dubois80] Dubois D., Prade, H.: Fuzzy Sets and Systems: Theory and Applications. Academic Press. 1980
- [FPSeries05] FPSeries: Documentación Técnica, Autómatas FP Series, Panasonic, 2005
- [García93] García E., YurKovich, S., Passino, K.: Rule – based supervisory control of two – link flexible manipulator. Journal of Intelligent ans Robotics Systems. Vol 7, No 2. 1993.
- [Graham88] Graham, P., Newell, R.: Fuzzy identification and control of a liquid level rig. Fuzzy Sets and Systems. Vol 26. 1988.
- [IMSE] <http://www.imse.cnm.es/Xfuzzy/>
- [Moreno03] F. J. Moreno, F.J., Baturone, I., Sánchez, S., Barriga, A.: Rapid design of fuzzy systems with XFUZZY. IEEE International Conference on Fuzzy Systems FUZZ-IEEE (2003), 342-347.
- [Lopez03] D. R. López, D.R., Sánchez-Solano, S., Barriga, A.: XFL: a fuzzy logic systems language. Sixth IEEE Internacional Conference on Fuzzy Systems 3 (1997), 1585-1591.
- [Hamm93] Hamming, R. W. Digital – Filters. Prentice – Hall. 1993.
- [Hattori97] Hattori, N., Maekawa, Y., Asai, K., Nakajima, H.: Development of a Full Automated Tying Machine for Burley Tobacco Leaves (Part 1) - Development of a Leaf Feeder. Abstract. Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery (JSAM), Vol.59, No.5. (1997)

- [Hell93] Hellendoorn, H., Thomas, C.: Defuzzification in fuzzy controllers. Journal of Intelligent and Fuzzy System. Vol. 1. 1993.
- [Hell94] Hellendoorn H. and R. Palm. Fuzzy Systems Technologies at Siemens R&D. Fuzzy Sets and Systems. Vol 63. 1994. 245 – 69.
- [Herr00] Herrera, E.: Sistemas inteligentes basados en reglas difusas. Apuntes de Tercer Ciclo. Curso 1999/2000.
- [Inst01] Instituto de Investigaciones del Tabaco, Ministerio de la Agricultura de Cuba: Instructivo Técnico para el cultivo del Tabaco Negro Curado (2001)
- [Ishib94] Ishibuchi, H., Nozaki, K., Yamamoto, N.: Selecting fuzzy rules by genetic algorithm for classification problems. Proceedings of the second IEEE International Conference on Fuzzy Systems. P 1119 – 1124. 1993.
- [J.Balcells97] Balcells, J., Romeral, J.L.: "AUTÓMATAS PROGRAMABLES" , Editorial Marcombo, 1997.
- [Jam93] Jamshidi, M., Vadiiee, N., Timothy, R.: Fuzzy logic and Control: software and hardware applications. Prentice - Hall , 1993.
- [Jam94] Jamshidi M: On software and Hardware Applications of Fuzzy Logic. Fuzzy Sets. 1994. 396 – 430.
- [Jant98] Jantzen, J. Fuzzy Logic Course I-II. Technical University of Denmark. 1998.
- [Kalfrisa98] Kalfrisa. Manual de usuario. (1998).
- [Kick76] Kickert, W., Van Nauta, H.: Application of a fuzzy logic controller in a warm water plant. Automatica. Vol 12. No 4. 1976.
- [Kick78] Kickert, W., Mamdani, E.H.: Analysis of a fuzzy logic controller. Fuzzy Sets and Systems. Vol 1. 1978.
- [Kirillin86] Kirillin, V.: Termodinámica Técnica. Editorial Mir Moscú. 1986. Cap 14. p 539-549.
- [Kosko92] Kosko B.: Neural Networks and Fuzzy Systems: A Dynamical Systems Approach to Machinery Intelligence. Prentice Hall Inc. (1992).
- [Law72] Lawrence, R.: Charles R. Digital Signal Processing. IEEE Press. 1972.
- [Lee90] Lee, C.: Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller – parts I, II. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. Vol-20 No. 2. 1990.

- [Matlab99] Matlab. Fuzzy Logic Toolbox User Guide. Version 2, 1999.
- [Miz89] Mizumoto, M.: Pictorial Representations of Fuzzy Connectives, Part I: Case of t-Norms, t-Conorms and Averaging Operators. *Fuzzy Sets and Systems* 31. 1989.
- [Ogata87] Ogata, K.: *Discrete-time control systems*, Prentice-Hall International, 1987, USA.
- [Ogata98] Ogata, K. : *Ingeniería de Control Moderna*, Prentice Hispanoamericana, S. A. 1998, México. 313 – 402, 786 – 895.
- [Ojala94] Ojala, T.: *Neuro – Fuzzy Systems in Control*. Master of Science Thesis. 1994.
- [Passino93] Passino K.: *Fuzzy vs Convventional Control*. Proceedings of the IEEE International Symposium on Intelligent Control. 1993.
- [Passino98] Passino, K., Yurkovich, S.: *Fuzzy Control*, Addison – Wesley. 1998.
- [Ped98] Pedrycz, W., Gomide, F.: *An introduction to fuzzy sets : analysis and design*. MIT Press. 1998.
- [Pomares99] Pomares, H.: *Nueva Metodología para el diseño automático de sistemas difusos*. Tesis Doctoral,UGR 1999.
- [Ques87] Quesada, J.: *Procesamiento Automatizado de Datos*. Editorial Pueblo y Educación. 1987.
- [Ramirez98] Ramirez, M., Carbonell, E.: *Fuzzy-Reg. Un Regulador Difuso de propósito general*. *Automática y Electrónica* 2, Vol. XIX. 1998.
- [Rao93] Rao, V., Rao, H.: *C++ neural networks and fuzzy logic*. MIS. 1993.
- [Reyero95] Reyero, R., Nicolás, C.: *Sistemas de control basados en la lógica borrosa: Fuzzy Control*. Centro de investigaciones tecnológicas Ikerlan. 1995.
- [Reznik97] Reznik, Leonid. *Fuzzy Controllers*. Newnes. 1997.
- [Senhadji00] Senhadji, R., Álvarez, I., Barriga, A., Sanchez, S.: *Controlador de Nivel Basado en Lógica Difusa*. X Congreso Español Sobre Tecnologías y Lógica Fuzzy. 2000
- [Smith97] Smith, C.: *Principles and Practice of Automatic Process Contrl*. Part I-II. 1997.

- [Takagi85] Takagi, T., Sugeno, M.: Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modeling and Control. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. Vol-15 No.1 . 1985.
- [Tang85] Tang, K., Mulholland, R.: Comparing Fuzzy Logic with Classical Controller Designs. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. Vol-QMC 17 No. 6 . 1985.
- [Texas97] Texas A&M Universit, Dept. of Computer Science 1997. Introduction to fuzzy control. <http://www.cs.tamu.edu/research/CFL/fuzzy.html>.
- [Trillas94] Trillas, E. y otros: Fundamentos e introducción a la ingeniería "Fuzzy". Omron Electronics. 1994.
- [U.Michel90] Michel, U.: "AUTÓMATAS PROGRAMABLES INDUSTRIALES", Editorial Marcombo, 1990.
- [UnFuzzy] <http://ohm.ing.unal.edu.co/ogduarte/>
- [Virgil87] Virgil, F.: Termodinámica. Edición Revolucionaria. 1987. Cap 20. p 549-577.
- [Wan94] Wang, X.L.: Adaptive Fuzzy Systems and Control: Design and Stability Analysis. Prentice Hall Inc. (1994).
- [Wan97] Wang, X.L.: A Couse in Fuzzy Systems and Control. Prentice Hall Inc. (1997).
- [Wexler65] Wexler, A.: Humidity and Moisture. Reinhold Pub. Co. EUA. (1965).
- [XFuzzy] http://www.imse.cnm.es/Xfuzzy/xfoview_.htm
- [Yager93] Yager, R., Zadeh, L.A.: An introduction to fuzzy logic applications in intelligent systems. Kluwer Academic. 1993.
- [Zadeh65] Zadeh, L.A.: Fuzzy Sets. Information and Control. Vol. 8. 338 – 353. 1965.
- [Zimmer96] Zimmermann, H.J.: Fuzzy Set Theory and its Applications, Kluwer Academic Publishers, 1996

Otras fuentes consultadas

www.griffin.peachnet.edu/ca

www.tobaccoleaf.org/spanpap/infot12.htm

www.ingenieroambiental.com/new3informes/tabaco.htm
www.ustobaccofarmer.com
<http://news.excite.com/business/industry/tob>
www.moreover.com/tobacco
www.europa.eu.int/comm/agriculture/publi/fact/tobacco/index_es.htm
www.tobacco.org
www.worldsmoking.com
<http://biz.yahoo.com/news/tobacco.html>
<http://membraers.fortunecity.es/robertexto/archivo7/protocolos.htm>
www.tabaquismo.freehosting.net/la_industri_del__tabaco.htm
www.tobaccopedia.org
www.tobaccoleaf.org
www.fao.org
www1.worldbank.org/Tobacco
<http://tobacco.who.int/>
www.cdc.gov/toba
www.forces.org
www.ash.org
www.planalfa.es/confer/misiones20cofer/revista/octubre_diciembre_2002/
www.wctoh.org
www.altadis.com
www.dimon-inc.com
www.tobacco.gov.cn/english/index3.html
www.pmintl.com
www.broandwilliamson.com
www.iuf.org/es/
www.universalcorp.com