

CONTROL DE UN BIODIGESTOR USANDO LOGICA DIFUSA

Eladio Vásquez M.*

Los desarrollos biotecnológicos actuales requieren de tecnologías novedosas en el campo de la informática, con el fin de manejar sistemas complejos. En este artículo que sugiere el uso de la lógica difusa para la implementación de un sistema de control aplicado a un biodigestor. En primer lugar se revisan sus características e importancia como elemento descontaminante, para luego considerar todos los aspectos que facilitan su control por medio de una computadora, con el fin de sustituir al operario en aquellas labores que este deja de realizar por desidia o desconocimiento.

INTRODUCCION

La situación ambiental de nuestro país ha llegado a un momento en que se requiere buscar y utilizar las mejores técnicas con el fin de hacer frente a una serie de problemas que el dinamismo económico y el crecimiento de la población han provocado. Dos de las facetas más relevantes de estos son la necesidad de mayor producción de alimentos y la búsqueda de espacio para albergar a la población creciente. Por tanto se necesitan nuevas agroindustrias y urbanizaciones. Llega un momento en que ambas están muy cerca y los efectos de la contaminación no se hacen esperar.

Los biodigestores contribuyen a resolver algunos de los problemas ya que toman los desechos orgánicos y los transforman en abono orgánico, gas combustible y agua casi limpia. Esos desechos pueden ser de tipo líquido o sólido. Pueden provenir de

industrias, agroindustrias o tener origen doméstico.

Los biodigestores basan su funcionamiento en el trabajo gratuito de millones de bacterias que descomponen la materia orgánica, pero requieren una atención diaria, que no se puede dejar para después, lo que, sin embargo, muchas veces se hace difícil, por olvido del operario o por falta de atención a un trabajo rutinario.

Algunas de estas funciones son las de alimentar diariamente el biodigestor, en la cantidad apropiada, remover la materia prima varias veces al día, revisar las tuberías, controlar el pH y el porcentaje de sólidos, entre otras cosas. Lo anterior se aplica para los modelos de funcionamiento continuo, que es el que aquí se considera.

Para realizar estas funciones se contratan operarios o se puede usar como apoyo el computador con el fin de sustituir al operario humano en estas labores que en general no le agradan mucho. El diseño del controlador se complica por los métodos analíticos, por tanto se propone aquí la utilización de una técnica novedosa que se basa en la lógica difusa.

Los europeos del oeste llevan la delantera en implementación de grandes plantas biodigestoras para el tratamiento de desechos, especialmente de origen municipal. En nuestro país solo escondemos la basura, la tapamos con tierra, olvidándonos que la naturaleza puede ayudarnos a deshacernos de ella si a la vez nosotros

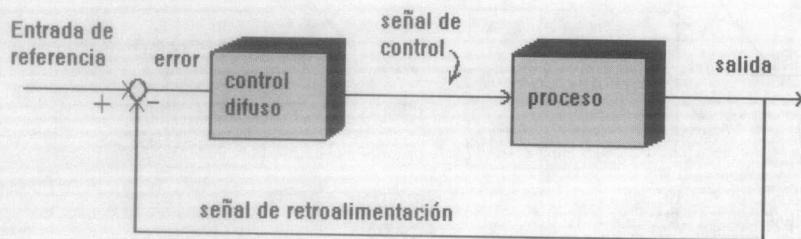
* Departamento de Electrónica, Instituto Tecnológico de Costa Rica

hacemos nuestro aporte, o sea si mantene-
mos vivas las bacterias que harán la
conversión de materia contaminante en
otra que tenga utilidad. Francia, Alemania y
Dinamarca se encuentran entre los países
que destacan en el desarrollo de sistemas
a gran escala. En La Buisse, Francia,
cerca de Grenoble, funciona desde 1984
una planta para el tratamiento de 10 000
toneladas por año de desechos sólidos.
Genera biogás, efluentes orgánicos, y
residuos no biodegradables. Antes de
iniciar el proceso se le remueven los
materiales inertes y los componentes
metálicos. El gas producido tiene un poder
calórico de 6,5 a 7 kWh/m³.

Los residuos son alrededor de 8 a 10
toneladas diarias de abono orgánico que es
vendido a los granjeros para el cuidado de
árboles frutales, viñedos e invernaderos. El
agua utilizada en el proceso, de tipo
anaeróbico, es reciclada dentro del siste-
ma. El costo de la planta oscila alrededor
de ϕ 20 000 por tonelada procesada.

En Dinamarca se ha dado un notable
auge en el uso de los biodigestores, de
forma tal que se prevé que la biometa-
nización jugará un papel importante en el
suministro futuro de energía para la región.
El biogás obtenido se utiliza para
calentamiento y producción de electricidad.
Para 1991 estaba planeada una planta
para el tratamiento de 20 000 toneladas de
material orgánico por año. Ha de servir a
unas 80 000 viviendas. Esta planta, situada
en Helsingoer, proveerá el 30% de la
demanda de energía para calentamiento
que necesita la ciudad. Los costos son
similares a los de la planta francesa^{2,7}.

FIGURA 1.
Sistema de
control usando
lógica difusa.



LA LOGICA DIFUSA Y EL CONTROL

La proposición de un nuevo método
para analizar el comportamiento de siste-
mas complejos o mal definidos, se debe a
Zadeh y otros como Mamdani y Assilian⁹.
Es común en los casos citados que el
análisis matemático riguroso se torne muy
difícil, sobre todo porque requiere mucho
tiempo e instrumentación para realizar
todas las mediciones. Es así como hace su
aparición la lógica difusa que facilita el
tratamiento de datos con alto grado de
incertidumbre o imprecisión. Tomando
como base la lógica difusa se elabora un
método basado en reglas que permiten
llevar a cabo el control del sistema, basa-
dos en la experiencia de expertos, ya sean
operarios, técnicos o ingenieros que lo
hayan manejado y que puedan informar
sobre las mejores opciones para alcanzar
un buen desempeño del proceso. El
método analítico para implementar siste-
mas de control es adecuado cuando se
pueden obtener mediciones precisas de las
variables de estado. El modelado riguroso
da muy buenos resultados en esas
circunstancias.

Los sistemas de control difuso se
pueden representar con los mismos
diagramas de bloques que se utilizan para
los sistemas de control continuo con
retroalimentación.

En la Figura 1 se muestra la configura-
ción básica de un sistema de control simple
en malla cerrada. El error se calcula como
la diferencia entre la entrada de referencia
y el valor correspondiente a la salida del
sistema.

La señal de error llega al controlador
difuso el cual, de acuerdo con el conjunto
de reglas internas y un sistema de
inferencia, determina las acciones que se
han de tomar con el fin de generar la señal
de control correspondiente⁴.

Parte del sistema de control es la planta
o proceso que deseamos funcione adecua-

damente a través del controlador difuso. En este caso se ha escogido un biodigestor para el tratamiento de desechos agrícolas. Dentro de ellos se realiza un proceso biológico que produce una síntesis microbiana de metano a partir de la materia prima de entrada⁵.

En la Figura 2 aparecen las etapas del proceso anaeróbico que corresponde a lo que se ha señalado⁶.

El proceso bioquímico de la fermentación anaeróbica requiere en primer lugar de la solubilización de la materia orgánica que da lugar luego a la producción de ácidos. Posteriormente se presenta el período metanogénico. Es muy importante resaltar el hecho de que estas etapas sucesivas están en equilibrio dinámico constante. He aquí un punto a favor del uso de la lógica difusa en el proceso de control ya que la gran cantidad de factores hace difícil su modelaje exacto.

Como se puede observar uno de los subproductos que se extraen del biodigestor es el metano que posee gran poder energético. La primera etapa, llamada de conversión, se realiza gracias a las bacterias del metano que son del tipo anaeróbico. Para que se desarrollen es necesaria la presencia de dióxido de carbono y además sustratos orgánicos. Estas bacterias del metano se encuentran en la panza de los rumiantes, por ejemplo. Si el pH del medio baja de 5.0 corren peligro de desaparecer. Se ha observado que el intervalo más favorable para su desarrollo corresponde a un pH entre 6.0 y 7.0.

Los biodigestores son tanques de hormigón cilíndricos con capacidad desde pocos metros cúbicos, tipo casero, hasta miles de metros cúbicos cuando se desarrollan a nivel industrial. El material con el que se construyen puede ser también plástico, metal, o fibra de vidrio. Los desechos por tratar pueden ser líquidos o sólidos. Pueden constar de dos etapas o sea dos depósitos conectados, en uno se lleva a cabo la fermentación y en el otro la postfermentación. En el segundo se produce el gas metano que se recoge por medio de una campana flotante.

En cuanto a la temperatura de funcionamiento se considera que el rango de 30 a 37°C es muy adecuado, sin embargo, puede trabajar también entre 50 y 60°C lo cual hace que el tiempo de fermentación disminuya considerablemente.

Para alimentar al biodigestor se deben diluir los sustratos de entrada hasta que los sólidos estén entre un 7 y un 10%.

Como medida para lograr un buen funcionamiento del biodigestor conviene agitar el contenido con el fin de lograr la salida del gas de las sustancias en proceso.

Los biodigestores pueden ser de tipo continuo y en ese caso es de esperar un 30% de degradación de la materia orgánica. Esto produce 56% de metano, 41% de dióxido de carbono, 1% de nitrógeno, 0,5% de oxígeno y 1,5% de H₂S que es una sustancia tóxica y produce corrosión en las tuberías.

En cuanto al gas de salida puede utilizarse en forma directa para la cocción o

FIGURA 2. Fases por las que pasa un proceso anaeróbico.



la iluminación. Podría dársele un uso indirecto en motores para generar electricidad por ejemplo.

Se obtienen otros efluentes de tipo líquido que pueden requerir un tratamiento posterior. También resulta otro subproducto conocido como lodo que puede utilizarse como abono orgánico.

La Figura 3 muestra un biodigestor simple de tipo continuo que se puede construir con materiales comunes. Existen muchas variantes del mismo que han de adaptarse a las circunstancias de la aplicación.

El tipo de biodigestor mostrado consta de dos etapas, donde el gas presiona hacia arriba el domo movable. Si se busca economía puede reducirse el sistema a una sola etapa.

DESARROLLO

En el planteamiento difuso para el control del biodigestor se han establecido algunas restricciones que corresponden a una posible aplicación en nuestro medio. Cumplen la función de delimitar el problema a situaciones específicas pero que en el caso de aplicación real pueden variarse dependiendo de las circunstancias.

Se establece el tipo de biodigestor, de alimentación continua en este caso. Podría aplicarse al tratamiento de estiércol de aves. Si funcionara a temperatura ambien-

te aportaría un 70% de metano. La producción de desechos en este caso es de $0,38 \text{ m}^3/\text{kg}$. Para que el proceso se inicie exitosamente es necesario inocular materia prima. Para controlar el proceso es necesario batir el contenido varias veces diariamente. Se requiere también controlar la temperatura para que se mantenga en el rango adecuado. Podría usarse un colector solar para calentar indirectamente la materia prima y de esta manera acelerar el proceso, si es eso lo que deseamos con la finalidad de aprovechar mejor las instalaciones. Se debe controlar en forma especial el pH. Sin embargo esta labor es delicada sobre todo teniendo en cuenta el material que tratamos. Puede utilizarse un método indirecto para verificar continuamente el buen funcionamiento del biodigestor, que consiste en comprobar la producción continua y estable de gas. Este es un sistema autocontrolado biológicamente, y requiere solo atención para evitar que llegue a límites en los cuales puedan morir las bacterias.

VARIABLES POR TOMAR EN CUENTA PARA LAS DECISIONES

Las variables importantes para que el sistema tome decisiones son en primer lugar la temperatura interna de la materia prima. Lo adecuado es una temperatura homogénea de 35°C . Con la ayuda del

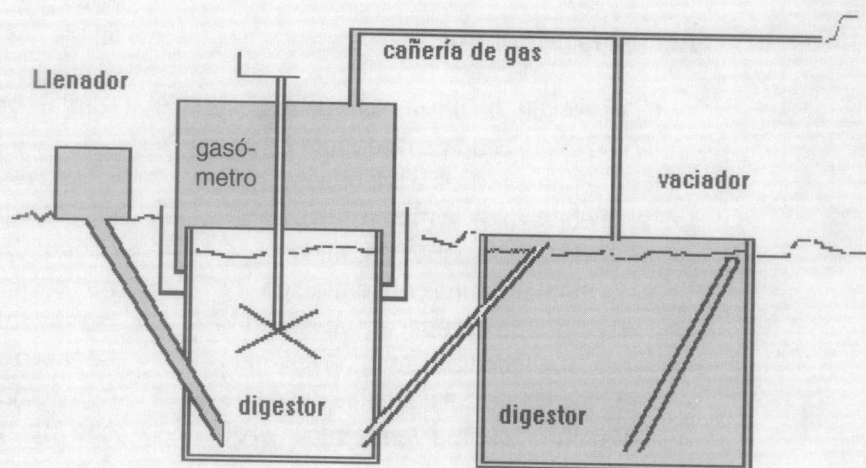


FIGURA 3.
Esquema básico
de un biodigestor
de dos etapas.

Los biogestores contribuyen a resolver algunos de los problemas de la situación ambiental ya que con ellos los desechos orgánicos se pueden transformar en abono orgánico, gas combustible y agua casi limpia.

colector solar se puede subir a los 55°C. Este valor se puede variar en el campo a la hora de operar el sistema. Al observar con más detalle la operación del controlador debe decirse que éste necesita específicamente el dato del *error de temperatura*, que es la diferencia entre el nivel externo especificado por nosotros, y la temperatura real de la materia prima. Esto es característico de sistemas retroalimentados (con respecto a la información). Lo mismo sucede con la presión del gas de salida, donde el controlador requiere la información sobre la diferencia entre la presión del gas y la presión atmosférica, que podríamos tomar como referencia. Este es uno de los factores más importantes, por tanto se ha de calcular también el cambio en el *error de presión* con el fin de determinar si hay variaciones negativas de la producción de metano que evidenciarían que el pH del sistema es inadecuado y que requiere participación externa para equilibrarlo.

El procesador necesita saber además cuál es el nivel de la materia prima dentro del tanque para así controlar la cantidad de materiales que entran al biodigestor, y que corresponde con la variable denominada *error de volumen*. El exceso o escasez de agua son problemáticos, por tanto es necesario incluir la variable *error de concentración*, que informa al controlador sobre esta medición para que tome las medidas del caso.

Acciones de control

Como resultado del análisis de las variables antes citadas el controlador ejecutará una serie de acciones para lograr el objetivo de la metanización eficiente de los desechos orgánicos.

Para mantener una concentración adecuada puede agregar agua, abriendo y cerrando una válvula para agua caliente.

Para facilitar la salida de los gases ha de agitar la materia prima varias veces al día,

haciendo actuar el motor que se encarga de la operación.

Para alimentar el biodigestor se ha de abrir y cerrar una compuerta de entrada, durante el tiempo necesario para que ingrese una cantidad de material, acorde con el tiempo de retención del sistema.

Para calentar la materia prima puede hacer uso de válvulas que hagan circular agua caliente a través de serpentines ubicados dentro del biodigestor.

Para avisar a los operarios que algo está mal en el sistema, como por ejemplo, un cambio pernicioso en el pH, se tiene un sistema de alarma, que actúa cuando el controlador no puede con el problema. En un nivel de complejidad superior esta etapa podría también ser resuelta por el controlador.

Entradas al sistema

Al biodigestor ingresa materia prima, estiércol de gallina que se mezcla con agua y residuos de productos agrícolas como plantas, por ejemplo, para lograr una mejor calidad del gas de salida.

Salidas del sistema

Del biodigestor se obtiene gas metano, mezclado con otros gases de los cuales debe eliminarse el ácido sulfhídrico.

Además del efluente orgánico, que sirve como abono para los cultivos, tenemos agua que ha de filtrarse para que pase limpia al ambiente.

Reglas basadas en la experiencia

Las reglas difusas son recomendaciones para la toma de alguna acción de control^{1,8}. Para iniciar se establecen algunos calificadores difusos. Los valores de las variables pueden corresponder a negativo muy alto (nma), negativo alto (na), cero (ce), positivo pequeño (pp), positivo alto (pa), positivo muy alto (pma).

CUADRO 1. Puntos de referencia para las funciones de membresía

Error temperatura (°C)		Error presión (cm de agua)		Cambio de error pres (cm agua)		Error volumen (m³)		Error concentrac (% de sólidos)	
na	-20	nma	15	na	2	ce	0	na	-6
np	-10	na	10	np	1	pp	1,5	np	-3
ce	0	np	5	ce	0	pa	3	ce	0
pp	10	ce	0			pma	4,5	pp	3
								pa	6
								pma	9

CUADRO 2. Puntos de referencia para las funciones de membresía correspondientes a las variables de salida

Agregar agua (minutos que permanece abierta la válvula)		Agitar (tiempo en minutos que actúa el motor)		Cargar (tiempo en minutos que permanece abierta compuerta de entrada)		Calentar (tiempo en minutos que permanece abierta la válvula que controla el paso de agua caliente)	
ce	0	ce	0	ce	0	ce	0
pp	1,5	pp	5	pp	2	pp	5
pm	3	pm	10	pm	4	pm	10
pa	4,5	pa	15	pa	6	pa	15
pma	6	pma	20	pma	8	pma	20

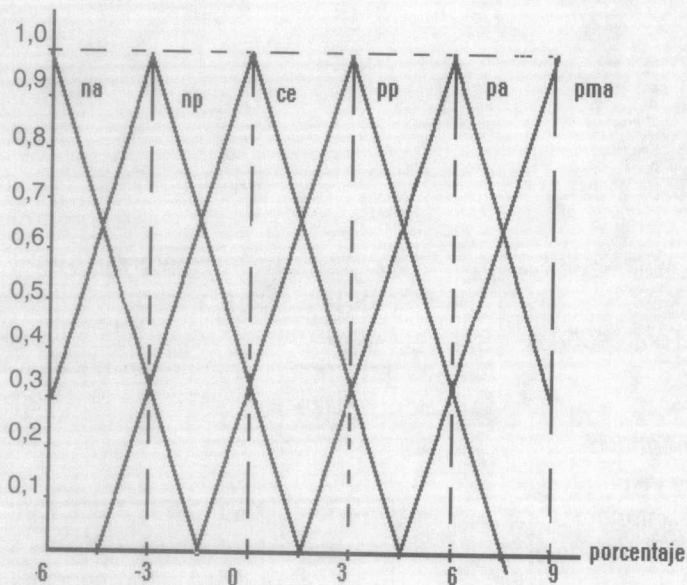


FIGURA 4. Función de membresía triangular para la señal de error de concentración.

La Figura 4 muestra las funciones de pertenencia de tipo triangular con las cuales es posible establecer una correspondencia entre los valores de las variables de entrada y los conjuntos difusos con los cuales trabaja el computador. Para mayor facilidad en el procesamiento de la información se ha de trabajar con valores normalizados.

Se puede comprobar que un valor positivo pequeño oscila entre -1,5 y 7,5% y tiene un valor central de 3%.

Con referencia a la regla 4 que aparece en el Cuadro 3 podemos leerla de la siguiente forma:

Si el error de volumen es cero entonces agite la materia prima positivo alto (pa)

Para determinar cuánto es el valor 'pa' es necesario consultar el Cuadro 2, que

CUADRO 3. Reglas lingüísticas para el sistema de control difuso

Regla No.	Temp. (°C)	Error de presión	Cambio error	Error vol. (m³)	Error concen. (%)	Agregar agua	Remover	Cargar	Calentar	Alarma
1	na	pa	..	..	..	..
2	np	pp	..	..	..	..
3	ce	ce	..	..	..	..
4	ce	..	..	pa	..	..	..
5	pp	..	..	pm	..	..	..
6	pa	..	..	pp	..	..	..
7	pma	..	..	ce	..	..	..
8	na	..	..	..	..	..	..	..	pa	..
9	np	..	..	..	..	..	..	..	pp	..
10	ce	..	..	..	..	..	..	..	ce	..
11	pp	..	..	..	..	..	..	..	ce	..
12	pa	..	..	..	..	..	..	..	ce	..
13	pma	..	..	..	..	..	..	..	ce	..
14	nma	..	ce	..	..	pm	..	..
15	nma	..	pp	..	..	pa	..	..
16	nma	..	pa	..	..	pma	..	..
17	nma	..	pma	..	..	pma	..	..
18	na	..	ce	..	..	pp	..	..
19	na	..	pp	..	..	pm	..	..
20	na	..	pa	..	..	pa	..	..
21	na	..	pma	..	..	pma	..	..
22	np	..	pp	..	..	pp	..	..
23	np	..	pa	..	..	pa	..	..
24	np	..	pma	..	..	pma	..	..
25	na	na	..	..	..	..	..	pa
26	na	np	..	..	..	..	..	pp
27	na	ce	..	..	..	..	..	ce
28	np	na	..	..	..	..	..	pp
29	np	np	..	..	..	..	..	pp
30	np	ce	..	..	..	..	..	ce

nos informa que ese valor oscila alrededor de 15 minutos.

Otro ejemplo puede ser el correspondiente a la regla 22:

Si el error de presión es negativo pequeño (np) y el error de volumen es positivo pequeño (pp) entonces cargue materia prima por un tiempo positivo pequeño.

La evaluación de las reglas las realiza el computador a través del método de composición max-min y del procedimiento del centro de gravedad⁹.

Conviene hacer referencia a los implementos útiles para construir el sistema.

Aquí se ha supuesto libremente que se tienen todos los materiales necesarios para realizar la labor. Estos son los siguientes:

- Una computadora que efectúe la inferencia de resultados. No necesita mucha capacidad computacional.
- Posteriormente puede sustituirse con un microcontrolador que contenga solamente las partes estrictamente necesarias.

- Agitador motorizado para remover el material.
- Válvulas para controlar la entrada de agua y materiales.
- Medidores de presión del gas, del nivel del material en el tanque, de temperatura y de concentración de sólidos.

Afinamiento

Muchas veces un sistema no funciona bien desde el inicio ya que requiere ajustar las referencias que se le dan de acuerdo con la materia prima de que se trate, y los dispositivos con que se cuente. Las mismas reglas requieren un afinamiento posterior lo cual solo se logra cuando el sistema se pone en operación y se sigue de cerca su funcionamiento. La computadora de control podría realizar mucho de este trabajo si se le dota de algoritmos genéticos que tomen la iniciativa de mejorar las reglas conforme se evolucione en la aplicación del sistema de control para el tratamiento anaeróbico de los desechos.

CONCLUSIONES

Dada la problemática ambiental de Costa Rica sería muy útil la implementación de sistemas biodigestores que tomen los residuos contaminantes y los conviertan en materiales útiles para el hombre aún en el aspecto económico.

La lógica difusa es una herramienta de análisis computacional muy útil para quien diseñe el sistema de control, cuya finalidad principal es ayudar a la naturaleza a realizar su labor, ya que por sí misma no lo puede hacer o requeriría muchos años para lograrlo, lo cual sería dejar para las generaciones futuras el problema de descontaminar el ambiente.

El control difuso de operaciones complicadas tiene la capacidad de responder muy bien a problemas derivados de mediciones con errores. Lo afecta muy poco el ruido.

En los sistemas difusos no importa si estamos o no en el período estable ya que las reglas toman en cuenta este aspecto. No sucede lo mismo con el método analítico que funciona básicamente para el estado estable.

No se ha de olvidar que como subproducto del sistema, además de descontaminar, se obtienen materiales con valor económico como el gas y el abono orgánico. Aparte de todo esto el agua resultante está casi limpia y con un poco de tratamiento posterior mejorará mucho su calidad, para lo cual existen muy buenas investigaciones³.

LITERATURA CITADA

1. Bernard J., Use of Rule-Based System for Process Control, *IEEE Control Systems*, pp. 3-12, Vol. 8, No. 5, 1988.
2. Biogas Production From Solid Waste, *Biocycle*, pp. 42, Vol. 29, No. 2, 1988.
3. Castillo G., El uso del lirio acuático en el Instituto Tecnológico de Costa Rica, *Tecnología en Marcha*, pp. 23-28, Vol. 10, No. 3, 1990.
4. DiStefano J., Stubberud A., Williams I., *Retroalimentación y Sistemas de Control*, Mc.Graw Hill, 1993.
5. Jagnow G., Dawid W., *Biotechnología*, Editorial Acibia, S.A., España 1991.
6. Simposio Centroamericano sobre aplicaciones de energía biomásica, *Diseño y construcción de biodigestores*, Cartago, Editorial Tecnológica de Costa Rica, 1985.
7. Skajaa J., Hannibal E., Anaerobic Gasification Advances, *Biocycle*, pp. 74-77. Vol. 32, No. 10, 1991.
8. Vatchsenavos G., Farinwata S., Pirovolou D., Fuzzy Logic Control of an Automotive Engine, *IEEE Control Systems*, pp. 62-68, Vol. 13 No. 3, Junio 1993.
9. Zimmermann H.J., *Fuzzy Sets Theory and Its Applications*, Kluwer-Nijhoff Publishing, USA 1985.