

Diseño y Aplicación de Sistemas de Lógica Difusa para Apoyo en Auditorías de Instalaciones de Almacenamiento de Combustible

José E. Martínez Choque, Facundo R. Weihmüller, Gustavo I. Servetti, Javier Britch
Centro de Investigación y Transferencia en Ingeniería Química Ambiental (CIQA)
Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Córdoba
Tel: 0351 5986022 / Fax: 0351 59860000
e-mail: javierbritch@hotmail.com

Resumen - Con el objetivo de disponer de un sistema para valorar el estado de instalaciones de almacenamiento de combustible de acuerdo al Protocolo de auditorías para Establecimientos No Subterráneos (Resolución S.E. N° 1102/04 – Decreto N° 10877/60) que contemple cuantitativamente aspectos subjetivos se diseñaron y aplicaron ocho sistemas de diferente complejidad basados en la lógica difusa. Cada uno de ellos utilizó métodos de inferencia tipo Mamdani o Sugeno, y grupos difusos con distintos niveles de superposición. Se comparó el desempeño de cada uno de los ocho sistemas con los resultados de auditorías de diferentes grados de dificultad, llevadas adelante por un auditor calificado y acreditado por la Secretaría de Energía de la Nación. Se determinó que el desempeño del sistema difuso de menor complejidad con el método Sugeno de orden cero y grupo difuso con superposición alta, es más apropiado, robusto y confiable para auxiliar en el proceso de valoración del estado del establecimiento.

Palabras clave: Lógica difusa, auditorías, almacenamiento, combustible

Design and Application of Fuzzy Logic Systems as Support in Fuel Storage Facilities Audits

Abstract - In order to have a system to assess the status of fuel storage facilities in accordance with the Protocol of Audit for Non Underground Establishments (Resolución S.E. N° 1102/04 – Decreto N° 10877/60) that quantitatively includes subjective aspects, eight fuzzy logic based systems of different complexity, each of them with Mamdani or Sugeno type fuzzy inference methods and fuzzy groups with different levels of superposition, have been designed and applied. The performances of the eight systems have been compared against the results of different difficulty level audits, carried out by a qualified auditor accredited by the National Secretary of Energy. It was determined that the less complex fuzzy system with zero order Sugeno Inference method and fuzzy group with high superposition is more appropriate, robust and reliable in the evaluation process of the facility status.

Key words: fuzzy logic, audits, fuel, storage

INTRODUCCIÓN

Las instalaciones dedicadas al almacenamiento, distribución, fraccionamiento, y/o expendio de combustibles sólidos, líquidos o gaseosos deben realizar una auditoría anual de seguridad. (Resolución SE 1102/04).

Las auditorías de seguridad de las mencionadas instalaciones tienen por objetivo verificar el cumplimiento de las medidas de seguridad pasivas y activas vigentes en el territorio nacional al momento de ejecución de la misma.

A través de estas auditorías se busca controlar la aptitud de la instalación bajo análisis en los siguientes aspectos inherentes a la seguridad contra incendios y el cuidado medioambiental:

- Minimizar el riesgo de incendio/explosión (medidas pasivas).
- En caso de producirse éste, disponer de las medidas de extinción pertinentes (medidas activas).
- Minimizar el riesgo de derrames o fugas que com-

prometan el medio ambiente (medidas pasivas).

El procedimiento de auditoría consiste de tres etapas:

- Verificación de la documentación relacionada con habilitaciones, registros y capacitaciones en materia de seguridad que deben disponer las instalaciones auditadas de acuerdo a lo exigido por la legislación nacional: planos de la instalación, planillas de control de los elementos de lucha contra incendio (extintores, hidrantes, etc.), rol de incendio de la instalación, capacitación del personal de la instalación en lucha contra incendio y constancia de simulacros periódicos, etc.
- Verificación en campo de la instalación: consiste en el recorrido y verificación visual de las condiciones de seguridad que reúne la instalación, constatando el cumplimiento de los requisitos técnicos exigidos por la legislación nacional. Existe un protocolo guía de verificación que establece los puntos mínimos de control

de acuerdo a la magnitud de la instalación, determinada por el volumen de almacenamiento que dispone.

- Confección y elevación del informe de auditoría a Secretaría de Energía de la Nación en donde constan las condiciones en que se encontraba la instalación de almacenamiento y las de manejo de combustibles a la fecha de auditoría. Establecer, si así lo requiere, las correctivas necesarias en base a la normativa de aplicación en el momento de la auditoría y otorgar recomendaciones sobre la instalación y operación con combustibles brindando un soporte técnico a la seguridad industrial y a la protección del medio ambiente dentro del territorio nacional.

En este proceso, aun así protocolizado, existe un grado de incertidumbre que dificulta una valoración objetiva y la consecuente elaboración del informe para la toma de decisiones. Sistemas deterministas basados en lógica de primer orden que modelen el comportamiento de este tipo de hechos resultan ser complicados y a veces impracticables debido a que el conocimiento que se maneja es incompleto e inexacto (Greenberg, 1991).

En este contexto resulta aplicable la teoría de conjuntos difusos (Saeedi, 2008). Los sistemas basados en lógica difusa poseen diversos grados de certidumbre en una afirmación, y también se les asocian diversos grados de verdad: hay hechos que no son completamente ciertos o falsos sino que tienen cierto grado de verdad (Russel-Norvig, 1996).

Mientras que la teoría clásica de conjuntos realiza un mapa uno a uno de un concepto y un número real, la teoría de conjuntos difusos asocia al concepto un intervalo de números reales, cada número con un grado de membresía. Esta función de Membresía (FM) es una herramienta central que es utilizada para fijar conceptos imprecisos tales como “salario bajo”, “velocidad elevada” o “calidad regular”. Mediante ella la teoría de conjuntos difusos emplea métodos que trabajan con datos numéricos para obtener una salida también numérica sin crear modelos matemáticos complejos y haciendo posible tomar una decisión en condiciones de incertidumbre.

En el presente trabajo la lógica difusa es aplicada como apoyo en el proceso de auditoría en instalaciones de almacenamiento de combustible no subterráneos, con diferentes modelos difusos en función de la complejidad de la cantidad de reglas lógicas involucradas, categorías de adjetivación de los indicadores, nivel de superposición de la FMs y métodos de defuzzificación. Los indicadores del protocolo (entradas) que deben evaluarse para establecer la condición de la instalación y la condición misma (salida) fueron adjetivados con FMs. P.e. el indicador “Tanques” en el modelo detallado fue

adjetivado con tres FM (Malo, Regular, Bueno) mientras que en el simple sólo con dos (Malo o Bueno). Esta conceptualización responde a una mecánica específica/subjetiva de los criterios con que los auditores son capacitados y entrenados.

Una vez cuantificados los indicadores de entrada las funciones de membresía les asignan el correspondiente grado de pertenencia a los distintos conceptos (fuzzificación). El sistema difuso mediante reglas heurísticas, propias del juicio del experto y basadas en la lógica de segundo orden, los procesa obteniendo los grados de pertenencia de los conceptos asociados a la variable de salida. Mediante estos grados de pertenencia y un método de criterio específico se obtiene una valoración única de la variable de salida (defuzzificación) que indica el estado de la instalación.

En conjunto a un auditor experto reconocido como tal por los antecedentes y experiencia acreditada en la Secretaría de Energía de la Nación se definieron reglas que contemplan la importancia relativa o absoluta de los indicadores y con las cuales se puede evaluar el estado de la instalación. El sistema fue puesto a prueba con datos relevados en anteriores auditorías sobre instalaciones de diferentes grados de dificultad de acuerdo al criterio e interpretación del auditor experto sobre la reglamentación aplicable. Los grados de dificultad están asociados a la tipología de las faltas existentes en la instalación y que de acuerdo a la reglamentación vigente están consideradas como situaciones riesgosas de distinto nivel.

FUNDAMENTOS DE LA LÓGICA DIFUSA

La Teoría de Conjuntos Difusos constituye un método para especificar qué tan bien corresponde un objeto a una descripción vaga (Russel-Norvig, 1996).

Las personas procesan una lógica que con frecuencia no usa valores exactos para definir si un objeto pertenece o no a determinado conjunto o categoría; por ejemplo: se puede dudar en definir como “alta” a una persona que mide 1.78 metros. Y aunque se conoce su altura, la vaguedad o incertidumbre se presenta en el término lingüístico “Alta” (Russel-Norvig, 1996).

Los conjuntos tradicionales indican si un elemento pertenece o no al conjunto; en cambio, los conjuntos difusos consideran qué tanto puede pertenecer un objeto a un conjunto mediante un valor entre 0 y 1 llamado “Grado de Membresía o Pertenencia” (Russel-Norvig, 1996).

La lógica difusa puede asignar al objeto un grado de pertenencia con respecto a los diferentes conjuntos observados o puestos en estudio, llegando a tener membresías parciales. Por ejemplo, el estado de un tanque valorado con un puntaje de 6 (de 1 a 10) puede

presentar un grado de membresía de 0,7 al conjunto “bueno” y 0,3 a “malo”.

Las funciones de membresía (FM) se asocian a un concepto/adjetivo (bueno, malo, completo, incompleto, etc.) y convierten un dato de la variable entrada a un número difuso entre 0 y 1, otorgando a dicha entrada un grado de pertenencia a dicho concepto.

En la Fig. 1 se observan posibles FM asociadas al indicador de entrada “Tanques” en el modelo simple (bueno y malo). En la abscisa se representan las posibles valoraciones de dicho indicador. Una valoración, por ejemplo, de 5,8 devuelve una membresía de 0,56 a “bueno” y de 0,08 a “malo”.

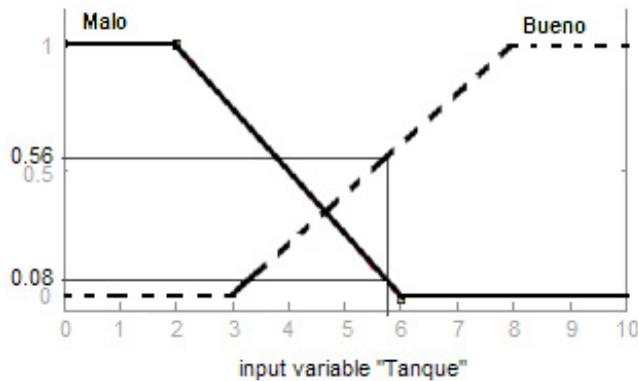


Fig. 1: Trabajo de las Funciones de Membresía (FM) con un dato ingresado

Grupos difusos: Se denomina de esta manera al conjunto de FM que “adjetivan” o “conceptualizan” a un mismo sustantivo. Estos grupos difusos pueden contemplar desde dos a más aspectos.

Las Operaciones lógicas, que permiten desarrollar las reglas, son AND, OR y NOT. Aunque son los mismos que se emplean en la lógica de primer orden y conceptualmente trabajan de igual forma, permiten procesar los valores difusos (Grados de Membresía) de cada dato ingresado y brindar un resultado que también es un número difuso.

En la lógica de primer orden se emplea la lógica booleana donde 0 representa que una declaración es falsa, y 1 que es verdadera. Se puede decir que se trabaja con los valores extremos de los números difusos (Vikas Kumar, 2008).

En las Tablas 1, 2 y 3 se observa cómo trabajan los operadores AND, OR y NOT de la lógica de primer orden.

En lógica difusa existe una función que para el operador AND hace que el valor tomado como respuesta sea el mínimo ($\min(A,B)$); y otro para que el operador OR tome como resultado el valor máximo ($\max(A,B)$). Con el operador NOT se toma la diferencia entre 1 y el valor de pertenencia del conjunto

Dado un conjunto A y uno B:

A	B	A and B
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Tabla 1: Operador AND de lógica de primer orden

A	B	A or B
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

Tabla 2: Operador OR de lógica de primer orden

A	Not A
0	1
1	0

Tabla 3: Operador NOT de lógica de primer orden

declarado (complemento) (Tutorial Matlab).

Las Tablas 4, 5 y 6 exponen algunos ejemplos de estos operadores difusos (lógica de segundo orden).

A	B	And min(A,B)
0.2	0.8	0.2
0.4	0.6	0.4
0.7	0.3	0.3
0.5	0.5	0.5

Tabla 4: Operador AND de lógica de segundo orden

A	B	Or max(A,B)
0.2	0.8	0.8
0.4	0.6	0.6
0.7	0.3	0.7
0.5	0.5	0.5

Tabla 5: Operador OR de lógica de segundo orden

A	Not 1-A
0.2	0.8
0.7	0.3

Tabla 6: Operador NOT de lógica de segundo orden

En la Fig. 2 se muestra cómo trabajan estos operadores con las funciones de membresía.

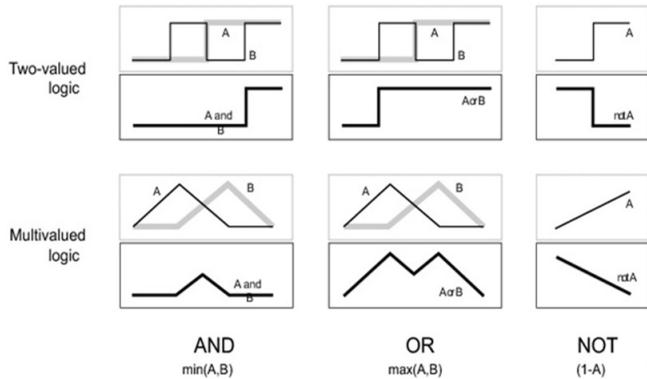


Fig. 2: Operaciones lógicas con Funciones booleanas y difusas

Reglas If-Then: Los valores difusos obtenidos de la conversión de los datos de entrada pasan a ser procesados por estas reglas conformadas por los conjuntos difusos y los operadores lógicos. El conjunto determina la salida resultante cuando se cumplen ciertas condiciones.

Dichas reglas tienen dos partes: la parte If comprende al antecedente y la parte Then el consecuente.

SISTEMA DE INFERENCIA DIFUSA

Este sistema usa los conjuntos difusos, las funciones de membresía, los operadores lógicos y las reglas If-Then para encontrar la salida que debe producirse según las entradas. Hay dos métodos de inferencia difusa: Tipo Mamdani y el Tipo Sugeno, que difieren básicamente en el proceso de defuzzificación (Mamdani, 1975; Jang, 1997; Takagi, 1985).

El proceso de inferencia difusa se realiza en tres pasos:

Fuzzificación: Es el proceso de transformar el dato de entrada en un valor difuso mediante las Funciones de Membresía.

Operación de Reglas Difusas: Para procesar los valores difusos obtenidos se crean las reglas del tipo If-Then. Con este fin se usan los conjuntos difusos y los operadores difusos AND, OR y NOT.

Defuzzificación: La entrada para el proceso de defuzzificación es un conjunto difuso (el conjunto de salida difuso agregado) mientras que la salida deseada es un número único. Sin embargo, el agregado de un con-

junto difuso comprende una gama de valores de salida, y por lo tanto debe ser defuzzificado con el fin de obtener un solo valor de salida del conjunto.

Luego de haber obtenido los valores difusos de las entradas (fuzzificación) y las reglas hayan operado con dichos valores, se obtiene un valor que es difuso, el cual es necesario transformarlo en un valor concreto (real y relacionado con el sistema). Para esto en un sistema tipo Mamdani existen métodos de defuzzificación como: el centroide, el bisector, y el medio, siendo el más común y el utilizado en este trabajo asociado a los sistemas tipo Mamdani, el del centroide. (Tutorial Matlab).

El centroide de una superficie contenida en una figura geométrica plana es un punto tal que cualquier recta que pasa por él divide a dicha superficie en dos partes de igual momento respecto a dicha recta. La posición del centroide de la figura plana o isobaricentro promedia la distribución de la superficie y está dada por:

$$\vec{r}_{centroide} = \frac{\sum^N \vec{r}_i}{N}$$

La principal diferencia entre los métodos de defuzzificación Mamdani y Sugeno es que las funciones de membresía de salida para Sugeno son lineales o constantes.

Una regla típica en un modelo de Sugeno tiene la forma:

Si la entrada 1 = x y la entrada 2 = y, entonces la salida es z = ax + by + c.

Para un modelo Sugeno de orden cero el nivel de salida z es una constante (a = b = 0).

El nivel de salida z de cada regla se pondera por el wi “intensidad de proyección” de la regla. Por ejemplo, para una regla AND con entrada 1= x y entrada 2=y,

$$W_i = AND (F1(x), F2(y))$$

donde F1 y F2 son las correspondientes funciones de membresía para las entradas 1 y 2.

La salida final del sistema es la media ponderada de todas las salidas de las reglas, calculado como:

$$Salida\ Final = \frac{\sum^n W_i Z_i}{\sum^n W_i}$$

donde n es el número de reglas que aplican. (Takagi, 1985).

DISEÑO DE LOS MODELOS

Al auditar un establecimiento de almacenamiento de combustible también pueden existir situaciones donde no es claro qué significa “malo” o “bueno”. Para

contemplar esta vaguedad se han diseñado modelos de sistemas lógicos que operen con conjuntos difusos.

En el presente trabajo se diseñaron 8 sistemas difusos utilizando un modelo detallado y otro simple. En el modelo detallado cada variable de entrada es adjetivado con tres FM y la cantidad de reglas que se aplican es contemplativa de muchas situaciones combinatorias específicas posibles mientras que en el modelo simple se intentó economizar la cantidad de reglas aplicadas sólo contemplando situaciones generales.

Cada uno de estos modelos (detallado y simple) se defuzzificó con métodos Mamdani (centroide) y Sugeno de orden cero (ver Tabla 7). Además se diferenciaron dos grupos difusos considerando la superposición que pueden tener las FM, como baja y alta. Este concepto de superposición de FM's es ilustrado en las Figs. 3 y 4.

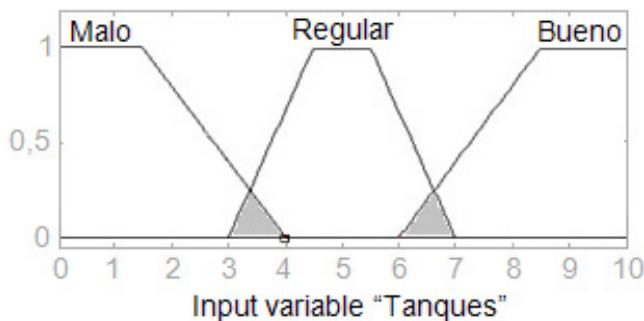


Fig. 3: Superposición Baja

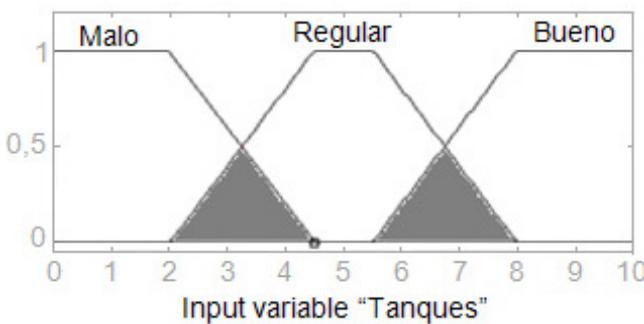


Fig. 4: Superposición Alta

Los diez indicadores de la entrada (contemplados en el protocolo) y la salida tienen su grupo difuso. En el modelo detallado los grupos difusos de entrada y salida están formados por tres FM: Malo, Regular y Bueno. En el modelo simple cada grupo tiene dos FM: Malo y Bueno. La forma funcional de las FM puede verse en las Tablas 8 y 9 para las variables de entrada y salida en ambos modelos.

Los indicadores constituyen las variables de entrada a ser valorados por el auditor con calificaciones

Método	Modelo	Superposición	Nombre del Sistema
Mamdani	Simple	Alta	M-SIM-A
		Baja	M-SIM-B
	Detallado	Alta	M-DET-A
		Baja	M-DET-B
Sugeno	Simple	Alta	S-SIM-A
		Baja	S-SIM B
	Detallado	Alta	S-DET-A
		Baja	S-DET-B

Tabla 7: Nombre de los sistemas y sus características

de 1 a 10. El detalle de las entradas de ambos modelos se muestra en la Tabla 8.

Se ha clasificado a las variables de entrada en dos tipos: absolutas y relativas. Una variable absoluta es aquella que al tener una calificación baja determina una salida "mala" independientemente de las demás variables. Una variable relativa no tiene un peso definitorio sobre el valor de la salida sino que sólo lo afecta en un cierto grado. Esta clasificación tiene efecto en el modelo detallado (ver reglas: tablas 10 y 11).

La salida se denomina "nivel de seguridad y mantenimiento (NSM)", el cual cuenta con tres FM para el modelo detallado, y dos para el modelo simple (para el método Mamdani). Esto se muestra en la Tabla 9. En el caso del método Sugeno de orden cero las salidas Malo, Regular, Bueno son representadas por FM constantes: 1, 5 y 10 respectivamente. En el modelo simple, las salidas son Malo y Bueno con constantes 1 y 10.

Por otra parte las reglas del sistema detallado se elevan a dieciséis mientras que en el simple son dos. Esto se puede ver en las Tabla 10 y 11.

El método de defuzzificación seleccionado para el sistema Mamdani fue el Centroide. En el método Sugeno la salida tiene FM constantes para la defuzzificación. (Sugeno, 1985).

RESULTADOS OBTENIDOS Y ANÁLISIS DE LOS MODELOS

El análisis se realizó en base a los resultados de nueve auditorías ejecutadas por el auditor experto, calificadas en función de las no conformidades relevadas y comparadas con la categorización de faltas establecidas en la legislación vigente. La selección de las auditorías buscó incluir casos con diferente grado de cumplimiento respecto a lo reglamentado, tratando de disponer de muestras con muy bajo grado de cumplimiento, otras con un cumplimiento medio, y otras con un cumplimiento alto. La comparación entre los resultados obtenidos de la calificación del auditor experto y los otorgados por los distintos sistemas, figura en la Tabla 12.

Se cuantificó el desempeño de cada sistema mediante la desviación cuadrática media (σ).

Ítem	Variable de Entrada o Indicador	Tipo de variable	Modelo Difuso Detallado		Modelo Difuso Simple	
			Tipo FM's: Trapezoidal		Tipo FM's: Triangular	
			Cant. De Func.	Nombre de las Funciones	Cant. De Func.	Nombre de las funciones
1	Tanques	Absoluta	3	Malo, Regular, Bueno	2	Malo, Bueno
2	Recintos	Absoluta	3	Malo, Regular, Bueno	2	Malo, Bueno
3	Instrumentos Eléctricos	Absoluta	3	Malos, Regulares, Buenos	2	Malo, Bueno
4	Rol de Incendios	Absoluta	3	SINcump, REGcump, TOTcump	2	Malo, Bueno
5	Sistema Contra Incendios	Absoluta	3	Defic, Reg, Efic	2	Malo, Bueno
6	Orden y Limpieza.	Relativa	3	Mala, Regular, Buena	2	Malo, Bueno
7	Señalética	Relativa	3	Mala, Regular, Buena	2	Malo, Bueno
8	Recepción y almacenamiento	Absoluta	3	Malo, Regular, Bueno	2	Malo, Bueno
9	Distanciamientos	Absoluta	3	Malo, Regular, Bueno	2	Malo, Bueno
10	Accesos	Absoluta	3	Malos, Regulares, Buenos	2	Malo, Bueno

Tabla 8: Funciones de membresía de las entradas

Variable de salida: Nivel de Seguridad y Mantenimiento(NSM)	SISTEMA MAMDANI			
	Modelo Detallado		Modelo Simple	
	Cant. De func.	Tipo de FM's	Cant. De func.	Tipo de FM's
	3 (Malo, Regular, Bueno)	Trapezoidal	2 (Malo, Bueno)	Trapezoidal
	SISTEMA SUGENO			
	Modelo Detallado		Modelo Simple	
Salidas	Constante	Salidas	Constante	
Malo Regular Bueno	1 5 10	Malo Bueno	1 10	

Tabla 9: Funciones de membresía de la salida para el Sistema Mamdani y Sugeno

Reglas del Modelo Simple										
Entradas										Salida
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	NSM
Mal=M Bno=B	Mal=M Bno=B	Mal=M Bno=B	Mal=M Bno=B	Mal=M Bno=B	Mal=M Bno=B	Mal=M Bno=B	Mal=M Bno=B	Mal=M Bno=B	Mal=M Bno=B	Malo Bueno
If										Then
M (or)	M (or)	M (or)	M (or)	M (or)	M (or)	M (or)	M (or)	M (or)	M	Malo
B (and)	B (and)	B (and)	B (and)	B (and)	B (and)	B (and)	B (and)	B (and)	B	Bueno

Tabla 10: Reglas del Modelo Simple

Reglas del Modelo Detallado										
Entradas										Salida
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	NSM
Mal=M	Mal=M	Mal=M	SIN=S	Defc=D	Mal=M	Mal=M	Mal=M	Mal=M	MI=M	Malo
Reg=R	Reg=R	Reg=R	REG=R	Reg=R	Reg=R	Reg=R	Reg=R	Reg=R	Rg=R	Regular
Bno=B	Bno=B	Bno=B	TOT=T	Efic=E	Bna=B	Bna=B	Bno=B	Bno=B	Bn=B	Bueno
If										Then
M (or)	M (or)	M (or)	S (or)	D (or)			M (or)	M (or)	M	Malo
B (and)	B (and)	B (and)	T (and)	E (and)	B	Bueno				
B (and)	B (and)	B (and)	T (and)	E (and)	R (and)	R (and)	B (and)	B (and)	B	Bueno
R (and)	R (and)	R (and)	R (and)	R (and)	M (and)	R (and)	R (and)	R (and)	R	Malo
R (and)	R (and)	R (and)	R (and)	R (and)	R (and)	M (and)	R (and)	R (and)	R	Malo
R (and)	Not M (and)	Not M (and)	Not S (and)	Not D (and)	Not M	Regular				
Not M (and)	R (and)	Not M (and)	Not S (and)	Not D (and)	Not M	Regular				
Not M (and)	Not M (and)	R (and)	Not S (and)	Not D (and)	Not M	Regular				
Not M (and)	Not M (and)	Not M (and)	R (and)	Not D (and)	Not M	Regular				
Not M (and)	Not M (and)	Not M (and)	Not S (and)	R (and)	Not M (and)	Not M (and)	Not M (and)	Not M (and)	Not M	Regular
Not M (and)	Not M (and)	Not M (and)	Not S (and)	Not D (and)	Not M (and)	Not M (and)	R (and)	Not M (and)	Not M	Regular
Not M (and)	Not M (and)	Not M (and)	Not S (and)	Not D (and)	Not M (and)	Not M (and)	Not M (and)	R (and)	Not M	Regular
Not M (and)	Not M (and)	Not M (and)	Not S (and)	Not D (and)	Not M (and)	Not M (and)	Not M (and)	Not M (and)	R	Regular
R (and)	R (and)	R (and)	R (and)	R (and)	M (and)	M (and)	R (and)	R (and)	R	Malo
B (and)	B (and)	B (and)	T (and)	E (and)	B (and)	R (and)	B (and)	B (and)	B	Bueno
B (and)	B (and)	B (and)	T (and)	E (and)	R (and)	B (and)	B (and)	B (and)	B	Bueno

Tabla 11: Reglas del modelo detallado

$$\sigma \equiv \sqrt{\frac{\sum(C_{exp} - C_{sist})^2}{N}}$$

donde N es el número de auditorías empleado para evaluar el sistema, C_{exp} es el resultado adjudicado por el auditor experto y C_{sist} es el resultado dado por el sistema.

Un desempeño más aproximado al del auditor implica un menor σ .

Se observa que S-SIM-A es el que tiene la menor desviación cuadrática media:

$$\sigma_{S-SIM-A} = 0,48$$

(Sugeno simple con superposición alta)

La superficie de desempeño de este modelo en función de una variable absoluta (tanques) y una relativa (señalización) se observa en la Fig. 5.

Por su parte el de peor desempeño es

$$M-SIM-A \text{ con: } \sigma_{M-SIM-A} = 1,6$$

(Mamdani simple con superposición alta)

Se observa que los modelos Sugeno tienen un me-

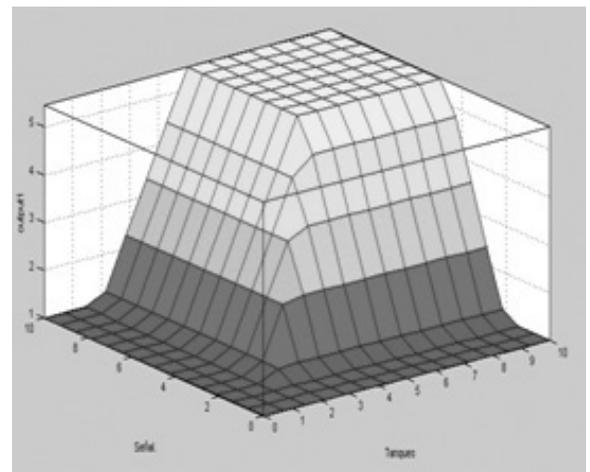


Fig. 5: Superficie de desempeño del modelo Sugeno Simple con superposición Alta para una variable absoluta (Tanques) y una relativa (Señalización)

jor comportamiento en cualquier nivel de detalle del sistema y de superposición de FMs. El pobre desempeño de los modelos Mamdani puede relacionarse al

Nº de Aud	Calificaciones de los Ítems										Opinión Experto (Cexp)	Resultado de Sist. Difuso (Csist)							
	Tanque	Recinto	Ins. Elec	Rol Inc.	Sist. Cont. Inc	Ord-Limp	Señal.	Recep Almc	Distanc.	Acc.		Mamdani				Sugeno			
												M-SIM-A	M-SIM-B	M-DET-A	M-DET-B	S-SIM-A	S-SIM-B	S-DET-A	S-DET-B
Aud-1	7	1	3	6	1	10	10	2	1	10	1	1.58	1.58	1.68	1.44	1.00	1.00	1.00	1.00
Aud-2	6	3	8	9	4	6	7	3	10	10	3	2.44	1.70	3.35	3.59	2.48	1.00	3.91	3.67
Aud-3	7	10	10	9	8	10	10	10	10	10	9	6.81	9.20	6.65	8.26	8.50	10.00	8.00	10.00
Aud-4	10	10	10	10	10	10	10	6	10	10	8	5.29	5.66	5.49	5.00	6.98	7.27	6.00	5.00
Aud-5	5	10	9	9	8	10	10	10	10	10	6	4.19	3.50	5.00	5.00	5.50	4.32	5.00	5.00
Aud-6	5	8	10	10	10	10	10	8	8	10	6	4.19	3.5	5.00	5.00	5.50	4.32	5.00	5.00
Aud-7	7	10	6	8	10	10	10	8	10	10	7	5.29	5.66	5.49	5.00	7.00	7.30	5.71	5.00
Aud-8	3	5	8	6	1	6	5	6	7	6	1	1.58	1.58	1.68	1.44	1.00	1.00	1.00	1.00
Aud-9	10	10	10	8	10	7	10	10	8	10	10	9.24	9.20	8.13	9.26	10.00	10.00	10.00	10.00
σ												1.6	1.59	1.52	1.37	0.48	1.12	1.03	1.35

Tabla 12: Calificaciones del experto, resultados de los sistemas y desviación cuadrática promedio de cada sistema

“amortiguamiento” de la salida generado por el método del centroide que aún en el caso de calificaciones límite en las entradas no genera una salida límite.

También puede observarse cómo, en líneas generales, el sistema detallado mejora el comportamiento del modelo Mamdani mientras que el simple hace lo propio con Sugeno. Esto puede asociarse a un equilibrio entre amortiguamiento y determinismo: Una salida Mamdani amortigua la salida mientras que Sugeno efectúa desde el punto de vista matemático un promedio. Por otra parte el sistema detallado es casi exhaustivo de las posibilidades de entrada (determinista) mientras que el simple considera dos situaciones extremas (todos los indicadores bien o todos mal). De esta manera el sistema detallado, más próximo a un sistema determinista, se equilibra con una defuzzificación amortiguada (Mamdani) mientras que el Modelo Sugeno se equilibra con reglas heurísticas simples, globales.

Se observa que las funciones de membresía muy enlazadas o muy superpuestas introducen una corrección que empeora el desempeño en los modelos Mamdani y lo beneficia en los Sugeno.

La forma de las FM (gaussianas, trapezoidales, triangulares) introducen cambios relativos en el desempeño menores al 1% por lo cual, teniendo en cuenta su complejidad intrínseca, no se profundizó su uso.

Desde esta perspectiva es que toma importancia no la forma genérica de la FM sino sus valores límite, los cuales fijan la superposición de los conceptos.

Es entonces que en el sistema detallado con una superposición elevada los resultados tienen mayor tendencia a pertenecer a una salida regular porque en la fuzzificación de las entradas la FM regular tiene un dominio más amplio y por ende otorga a un amplio rango de valores una pertenencia “regular”.

En el modelo detallado se asignan reglas que consideran a los indicadores “Orden – Limpieza” y “Señalética” como variables relativas.

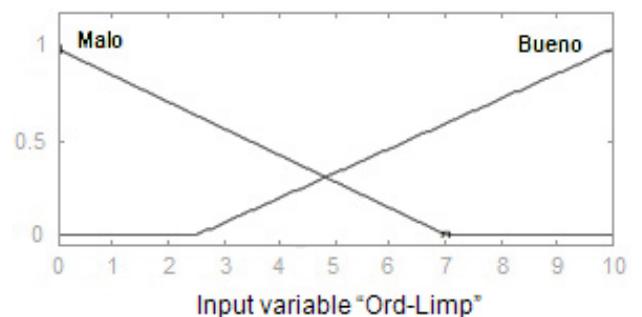


Fig. 6: FM del Ítem Tanques (absoluta)

En el modelo Simple la importancia relativa de las variables se resolvió ajustando los límites de ambos grupos de FM. En las Figs. 6 y

7 se puede ver la diferencia de los dominios de una variable absoluta con una variable relativa.

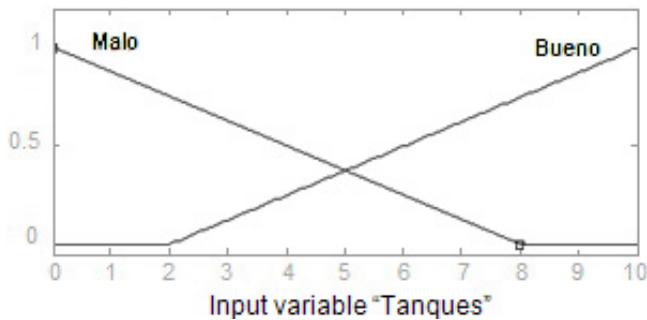


Fig.7: FM del Ítem Orden y Limpieza (relativa)

Este cambio permite asignar menor incidencia en la salida pero manteniendo la lógica por medio del ajuste de los valores límite de las FM.

Es importante reconocer que la salida no arroja un resultado de diez (10) ni uno (1) en el método Mamdani, aun cuando todas las entradas tengan calificación diez o uno respectivamente dado que la defuzzificación del tipo centroide no permite tomar valores extremos. Este problema no se presenta con el método Sugeno cuyas operaciones de defuzzificación permiten tener resultados extremos de uno (1) y diez (10) cuando los parámetros de entrada son extremos.

En un primer análisis de sensibilidad a las variables de entrada en el modelo de mejor desempeño (S sim A), un cambio del 10% en una de las variables absolutas en cualquier parte del rango se traduce en un cambio similar en la salida mientras que un cambio de 10% en una de las variables relativas en cualquier parte del rango se traduce en un cambio de 6 al 10% en la salida.

CONCLUSIONES

A partir de la comparación entre los resultados obtenidos para cada uno de los ocho sistemas con los resultados del auditor actuante, se observa que las versiones detalladas de los modelos parecen ser elevadamente deterministas, y los resultados obtenidos se acercan a una media ponderada de los valores datos, perdiendo de esta forma robustez frente a los diferentes escenarios que se pueden presentar en una auditoría.

El modelo detallado resuelto mediante Mamdani además no logra aproximar los extremos de la escala, y no permite obtener resultados de 1 ó 10 para instalaciones que así lo ameriten.

Los modelos simples muestran un mejor comportamiento en cuanto a los resultados obtenidos. El modelo simple defuzzificado por su parte, el modelo simple de Sugeno es el que mejores resultados arroja

en comparación con los valoración realizada por el auditor experto, mostrando una gran robustez frente a diferentes instalaciones con distintos grados de cumplimiento del protocolo utilizado para el análisis.

Para la completa determinación del sistema se ha observado que las formas de las FM tienen una influencia menor al 1% en la salida y el nivel de superposición de los grupos difusos de cada variable que mejor se adapta es el elevado con menor incidencia en las variables relativas que en las absolutas.

El análisis de sensibilidad será profundizado en futuros trabajos aumentando la estadística mediante el crecimiento de la base de auditorías realizadas y mediante el cálculo de incertidumbres con derivadas parciales difusas.

En el presente trabajo se han diseñado, aplicado y evaluado en su desempeño comparativo a un auditor experto, ocho sistemas difusos. El método de mejor desempeño, Sugeno-Simple con superposición alta, presenta un comportamiento que permite contemplar, al momento de tomar una decisión, factores que no son determinantes o que en presencia de otros se potencian mediante una valoración desagregada. Es decir que el auditor ahora dispone de una escala de 1 a 10 para cuantificar los indicadores, incorporando a la auditoría la riqueza de las apreciaciones producto de la experiencia y del juicio experto.

REFERENCIAS

Normativa legal:

PEN Ley N° 13.660. Instalaciones para Elaboración de Combustibles y Generación de Energía Eléctrica. Sancionada: 30 de setiembre de 1949.

Decreto N° 10877/60. Reglamentación de la Ley 13.660 relativa a la seguridad de las instalaciones de elaboración, transformación y almacenamiento de combustibles sólidos, minerales, líquidos y gaseosos.

Resolución SE N° 1102/04. Créase el Registro de Bocas de Expendio de Combustibles Líquidos, Consumo Propio, Almacenadores, Distribuidores y Comercializadores de Combustibles e Hidrocarburos a Granel y de Gas Natural Comprimido. Requisitos para la inscripción. Incumplimientos y aplicación de penalidades. Establecimientos con tanques de almacenaje subterráneo y no subterráneo. Empresas auditoras de seguridad. Modificaciones a otras resoluciones. Valores de referencia y régimen jurídico para la aplicación de sanciones.

Resolución SE N° 266/08. Registro de Universidades Nacionales para la realización de Auditorías Técnicas, Ambientales y de Seguridad en áreas de almacenaje, bocas de expendio, plantas de procesamiento, de fraccionamiento y almacenamiento, refinerías, tanques de almacenaje subterráneos y no subterráneos, cisternas para transporte de hidrocarburos y sus derivados.

Normativa Técnica:

IRAM-IAP-IEC 79-0: Materiales eléctricos para atmósferas explosivas. Requisitos generales - Instituto Argentino de Normalización.

IRAM-IAP-IEC 79-7: Materiales eléctricos para atmósferas gaseosas explosivas. Seguridad aumentada “e” - Instituto Argentino de Normalización.

IRAM-IAP-IEC 79-10: Materiales eléctricos para atmósferas gaseosas explosivas. Guía para la clasificación de áreas peligrosas - Instituto Argentino de Normalización.

IRAM-IAP-IEC 79-11: Materiales eléctricos para atmósferas gaseosas explosivas. Seguridad intrínseca “i” - Instituto Argentino de Normalización.

NFPA 30: Flammable and Combustible Liquids Code (1996 Edition) – National Fire Protection Association.

NFPA 70: National Electrical Code (2002 Edition) – National Fire Protection Association.

Greenberg, Harris R “Risk Assessment and Risk Management for the Chemical Process Industry”. Stone & Webster Engineering Corporation, Ed. Harris R Greenberg and Joseph J. Cramer John Wiley and Sons, Cap. 9 pag. 127 (1991).

Saeedi M., “A Fuzzy Modified Gaussian Air Pollution Dispersion Model”, Research Journal of Environmental

Sciences 2 (3), 156-169, (2008).

Russel Stuart and Norvig Peter, “Inteligencia Artificial: Un Enfoque Moderno”, Primera Edición, Prentice-Hall, USA, 176,490, (1996).

Vikas Kumar, “Soft Computing approaches to uncertainty propagation in environmental risk management”, tesis (Ph. D. in Chemical Engineering), Universitat Rovira I Vi. Tarragona-España, Cap. 2, pag. 20 (2008).

Tutorial de Matlab. www.matworks.com

Mamdani, E. H. and S. Assilian, “An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller,” Int. J. Man-machine Studies, Vol. 7, 1–13, (1975).

Jang, J. S. R., Sun, C. T., and Mizutani, E. Neuro-fuzzy and Soft Computing: A Computational Approach to Learning and Machine Intelligence, Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, cap. 3, (1997).

Takagi, T. and Sugeno, M., “Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control,” IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 15, 116–132, (1985).

Sugeno, M., Industrial Applications of Fuzzy Control, Elsevier Science Pub. Co., cap. 2 (1985).