

Sistema de Decisión Borroso para la aplicación del Análisis Modal de Fallos y Efectos (AMFE).

Javier Puente García, Raúl Pino Diez, Paolo Priore Moreno, David de la Fuente García.
Dpto. Administración de Empresas y Contabilidad. Organización de Empresas.
E.T.S. Ingenieros Industriales de Gijón. Campus de Viesques s/n 33204. Gijón
e-mails: jpuente@etsiig.uniovi.es, pino@etsiig.uniovi.es, priore@etsiig.uniovi.es, david@etsiig.uniovi.es.

RESUMEN

En este trabajo se presenta una alternativa para la aplicación del Análisis Modal de Fallos y Efectos (AMFE) a cualquier tipo de problema. Se presenta una metodología basada en un sistema de decisión borroso que apoyado en reglas cualitativas permite establecer el ranking de riesgo sobre las potenciales causas de fallos de un sistema productivo. Mediante un ejemplo ilustrativo, se ponen de manifiesto las ventajas de utilizar este flexible sistema frente al modelo tradicional del AMFE.

1. Introducción.

En el presente trabajo, se aborda el estudio del método AMFE desde una nueva perspectiva basada en asignación de categorías (como intervalos de valores) tanto a los índices de detección, ocurrencia y gravedad, como al resultado de prioridad de riesgo de cada causa de fallo potencial para posteriormente construir un sistema de decisión borroso que se adapte a dicha asignación de categorías. En el apartado 2 se describe la metodología AMFE tradicional. En el apartado 3 se describe el método alternativo para asignar la criticidad a los eventuales fallos, que permite solventar alguna de las críticas propuestas al modelo tradicional. En el apartado 4 se muestra la construcción de un sistema de decisión borroso adaptable a la metodología propuesta en el apartado 3. Por último, en el apartado 5 se extraen las principales conclusiones de este trabajo.

2. El Procedimiento AMFE.

El procedimiento del AMFE está perfectamente documentado en la literatura del ámbito de la calidad [1], [2], [3]. La Figura 1 muestra el encabezado de un informe de AMFE donde

Descripción , Tipo y objeto del AMFE (Información Descriptiva).																
					Condiciones existentes (6)				Resultados (14)							
Nombre Ref. de la pieza	Función de la pieza (2)	Modo de fallo potencial (3)	Efecto potencial del fallo (4)	Causa potencial del fallo (5)	Controles actuales (7)	Ocurrencia (8)	Gravedad (9)	Detección (10)	Nº Prioridad Riesgo (NPR) (11)	Estado y acciones recomendadas (12)	Area responsable acción correctora (13)	Acción emprendida	Ocurrencia	Gravedad	Detección	Nº Prioridad Riesgo (NPR)

Figura 1: Campos del Informe AMFE

habitualmente se plasman los modos, efectos y causas de fallos relativos a una determinada función así como las acciones de control que actualmente existen. Después, se evalúa la

criticidad de cada causa de fallo mediante el "número de prioridad de riesgo" (NPR) asociado a la misma como el producto de tres índices: El Índice de Detección "D", el Índice de Ocurrencia "O" y el Índice de Gravedad "G". Obtenido el NPR, se realiza el ranking de causas de fallos y se toman las acciones pertinentes de control en aquellos fallos de mayor riesgo otorgado (según el NPR obtenido). Por último, para comprobar la efectividad de las nuevas acciones de control sugeridas para cada causa de fallo, se recalcula el valor del NPR al cabo de un tiempo para verificar si éste se ha reducido. Las asignaciones habituales correspondientes a los índices "D", "O" y "G" antes mencionados (función de las probabilidades de ocurrencia (Po) y no detección (Pd) de los fallos considerados) toman valores enteros entre "1" y "10".

Numerosos investigadores critican la racionalidad subyacente en el AMFE tradicional. Algunas de estas críticas son ([4], [5], [6]):

- La evaluación del NPR no satisface los requerimientos comunes de medida.
- No existe una regla algebraica precisa para asignar una valoración a los índices de ocurrencia "O" y no detección "D" ya que la asignación tradicional está basada en las probabilidades de fallo "Po" y en las probabilidades de no detección "Pd". Así efectuar el producto de los tres índices para hallar el NPR puede causar problemas puesto que la probabilidad de no detección y su correspondiente asignación sigue una ley lineal mientras que la relación entre la probabilidad de ocurrencia y su asignación no respeta esa linealidad.
- Diferentes valoraciones para el par de índices "O" y "D" pueden proporcionar el mismo resultado de NPR y tener una implicación de riesgo totalmente diferente.
- A la vista de los puntos anteriores no existe racionalidad en el hecho de obtener el NPR como el producto de los índices "D", "O" y "G".
- El NPR ignora el efecto de la cantidad producida.
- El NPR ignora una posible ponderación de importancia entre los índices "D", "O" y "G".
- El NPR no puede medir la efectividad de las medidas correctoras propuestas.

3. Propuesta de un nuevo modelo para asignar la criticidad a los eventuales fallos.

El sistema que se propone asigna una etiqueta de prioridad de riesgo a cada causa de fallo de un AMFE según la importancia que se asigne a las tres características básicas ligadas a un modo de fallo: La *Detección* del fallo (D), la frecuencia de *Ocurrencia* del fallo (O) y la *Gravedad* del mismo (G).

Las variables de entrada al sistema de decisión son los tres índices "D", "O" y "G" de la metodología tradicional, de modo que las valoraciones enteras (entre 1 y 10) asignadas a los mismos, tengan asociadas sus correspondientes etiquetas cualitativas. En este caso se ha decidido respetar las correspondencias tradicionales entre las categorías de importancia (desde Muy baja "MB" hasta Muy alta "MA") y las puntuaciones de los tres índices (entre 1 y 10) según se muestra en la Tabla 1. La variable de salida del sistema de decisión es la categoría de prioridad de riesgo (CPR) que se otorga a la causa de fallo. En este caso, se ha optado por dividir el dominio tradicional del número de prioridad de riesgo (NPR) 1-1000 en nueve intervalos de clase, de modo que a cada uno de ellos se le asocia una CPR diferente (Muy baja: "MB", entre muy baja y baja: "MB-B", baja: "B", ... , muy alta: "MA"). La correspondencia entre las CPR y los intervalos de clase asociados se muestra en la Tabla 2.

Como a cada una de las tres variables de entrada puede asignársele una de cinco etiquetas o categorías, dispondremos de hasta 125 reglas para asignar las CPR's a cada causa de fallo

analizada en el AMFE. Las reglas se representan en la Figura 2 en forma de gráfico tridimensional. Cada piso (asociado a una de las cinco categorías de gravedad) muestra la matriz de CPR's correspondientes a 25 posibles combinaciones de categorías de detección y ocurrencia.

Puntuaciones			Categoría
D	O	G	
1	1	1	MB
2,3	2,3	2,3	B
4,5,6	4,5,6	4,5,6	M
7,8	7,8	7,8	A
9,10	9,10	9,10	MA

Tabla 1: Categorías correspondientes a los índices "D", "O" y "G".

NPR (Intervalo de clase)	Marca de clase	Categoría (CPR)
1-50	25	MB
50-100	75	MB-B
100-150	125	B
150-250	200	B-M
250-350	300	M
350-450	400	M-A
450-600	525	A
600-800	700	A-MA
800-1000	900	MA

Tabla 2: Categorías correspondientes a la variable de salida del sistema de decisión

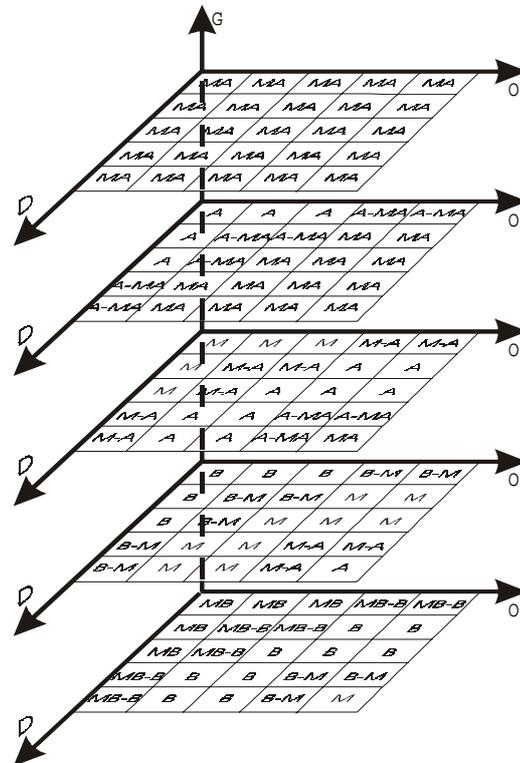


Figura 2: Base de reglas del sistema de decisión propuesto.

Con este procedimiento de asignación de CPR's se pretenden paliar algunos de los problemas del AMFE tradicional comentados en la sección anterior [4], [5], [6]:

En primer lugar no se usa el NPR como medida del riesgo asociado a una causa de fallo si no que se utiliza un intuitivo sistema de decisión basado en etiquetas o categorías de prioridad de riesgo (CPR). Además, la definición de las categorías para las variables involucradas en el AMFE, respeta la correspondencia numérica asignada a los índices "D", "O", y "G" del modelo tradicional pero no se efectúa el producto de tales índices para encontrar la implicación de riesgo asociado a un fallo si no que se calcula la CPR asociada al fallo según una base de reglas que contiene el conocimiento experto de la asignación de riesgo para cada combinación de categorías de "D", "O" y "G". Por otra parte, el establecimiento de la base de reglas permite ponderar con más importancia las variables de entrada deseadas (en nuestro caso se ha ponderado como más importante la correspondiente a la gravedad por poder afectar directamente a la integridad en el manejo del sistema evaluado), mientras que el método tradicional asigna la misma importancia a los tres índices. Así, el problema de las diferentes implicaciones de riesgo para un mismo NPR del modelo tradicional queda solventado. Además el sistema propuesto muestra sólo un posible modelo para un problema concreto. Es fácil, a partir del modelo planteado, generar nuevas bases de reglas según el problema de estudio y la experiencia de los analistas en problemas similares analizados en el pasado; por ejemplo, ponderando como más importante no sólo el índice de gravedad, si no también el de

ocurrencia (esto último implicaría considerar matrices no simétricas de CPR's y con mayores implicaciones de riesgo por encima de la diagonal principal). Incluso sería posible considerar diferente número de categorías para las variables del modelo según fuese el problema analizado, o considerar nuevas variables de entrada para la asignación de riesgos como el coste o la cantidad producida, pese a que el método se complicarse y fuese menos intuitivo al manejar mayor número de dimensiones. Por último, con este propuesta, el método gana en racionalidad y es fácil de implementar (basta una sencilla hoja de cálculo).

En la Tabla 3 se muestra un ejemplo de aplicación del método propuesto para 5 causas de fallo.

Modo de fallo potencial	Causa potencial del fallo	D	O	G	NPR (tradic.)	Ranking (tradic.)	D'	O'	G'	Prioridad Riesgo (CPR)	Ranking (nuevo)
A	a1	1	4	8	32	5°	MB	M	A	A	2°
	a2	5	2	4	40	4°	M	B	M	M-A	3°
	a3	1	7	10	70	1°	MB	A	MA	MA	1°
B	b1	7	7	1	49	3°	A	A	MB	B-M	5°
	b2	3	7	3	63	2°	B	A	B	M	4°

Tabla 3. Análisis Comparativo entre el método tradicional y el propuesto.

Puede observarse como los resultados en el ranking según el modelo AMFE tradicional (basado en el producto de los tres índices) y el propuesto (basado en la CPR que asigna el sistema de decisión propuesto) difieren excepto para la causa de fallo "a3". Esto se debe a que el nuevo modelo pondera de modo notorio el índice de gravedad, mientras que el modelo basado en el NPR efectúa simplemente el producto de los tres índices sin atender a la importancia asignada a un determinado índice. Además, debe tenerse en cuenta la flexibilidad del método propuesto, ya que pueden incorporarse otras variables de decisión como el coste asociado a la causa de fallo, la cantidad producida, etc; pueden asignarse mayor o menor número de categorías tanto a las variables de entrada como a la de salida; los rangos numéricos asociados a las categorías pueden hacerse variar de un problema a otro según el conocimiento del experto y la base de reglas puede adquirir una estructura diferente para cada problema según interese ponderar en mayor cuantía alguno de los índices "D", "O", "G".

Así, el modelo propuesto soluciona alguno de los problemas del modelo tradicional, pero también presenta inconvenientes. En primer lugar, se obliga a elegir una puntuación discreta para los índices "D", "O" y "G" entre los valores 1 a 10, lo que resta continuidad al modelo de decisión del AMFE. Además, para combinaciones de etiquetas similares en las variables de entrada, la categoría de prioridad de riesgo asignada (CPR) puede resultar semejante para diferentes causas de fallo, lo cual resta poder discriminatorio al establecer el ranking de prioridades de riesgo. En el siguiente apartado se propone la construcción de un sistema de decisión borroso para el estudio del AMFE que permita solucionar los anteriores problemas.

4. El AMFE como sistema de decisión borroso.

La construcción de sistemas de decisión borrosos, está fundamentada en la teoría de subconjuntos borrosos [7]. Gracias a esta teoría, se permite dotar a gran cantidad de modelos,

en multitud de áreas de aplicación, de un componente de incertidumbre que los hace más efectivos en términos de aproximación a la realidad [8].

Cuando las decisiones que se deben tomar requieren manejar información cualitativa o cuantitativa imprecisa parece tener fundamento el uso de variables lingüísticas, que permitan etiquetar su contenido. Dichas variables toman como valores, palabras del lenguaje común o natural, frente a las variables numéricas que sólo pueden tomar números como valores [9]. En todo problema de decisión es necesario disponer de una base de conocimiento. En general, ésta viene dada por el conocimiento de un experto que es capaz de explicar el funcionamiento del sistema mediante un conjunto de reglas lingüísticas donde se involucra a las variables de entrada y de salida del sistema decisorio; así, será necesario definir en forma borrosa las variables del sistema, esto es, definición de la forma y rango de las etiquetas de cada variable [10]. Los sistemas de decisión borrosos [11], se apoyan en la teoría anterior para modelar problemas de distintos ámbitos, como puede ser el del AMFE.

En el presente trabajo se introduce la mecánica operativa de los sistemas de decisión borrosos (FDMS - Fuzzy decision-making system), en el entorno MATLAB 5.3 - Toolbox "Fuzzy" (v. 2,0), y su aplicación al problema del AMFE. Se ha elegido el modelo Mamdani por permitir evaluar un dominio continuo (en nuestro caso entre 1 y 1000) para la variable de salida CPR. Un sistema de decisión o inferencia borroso, una vez definida la base de conocimiento soporte del sistema, consta de cinco fases: La fuzzificación de las variables de entrada, la aplicación de operadores fuzzy (AND/OR) en el antecedente, las implicaciones del antecedente al consecuente en cada regla, la agregación de consecuentes según las diferentes reglas y la defuzzificación [10]. Estas cinco fases serán de aplicación aquí para el ejemplo de AMFE ya propuesto en la Tabla 3.

En primer lugar, es necesario definir las variables de entrada y de salida del proceso de decisión. Consideraremos tres factores que afectan a la decisión del analista del AMFE: La detección (D), la ocurrencia (O) y la gravedad (G) de cada causa de fallo. La variable de salida del sistema de decisión será la prioridad de riesgo (PR) asociada a la causa de fallo. La denominación de las etiquetas de las variables de entrada y salida son las mismas que las propuestas en el modelo de la sección anterior, si bien en este caso cada etiqueta se asocia a

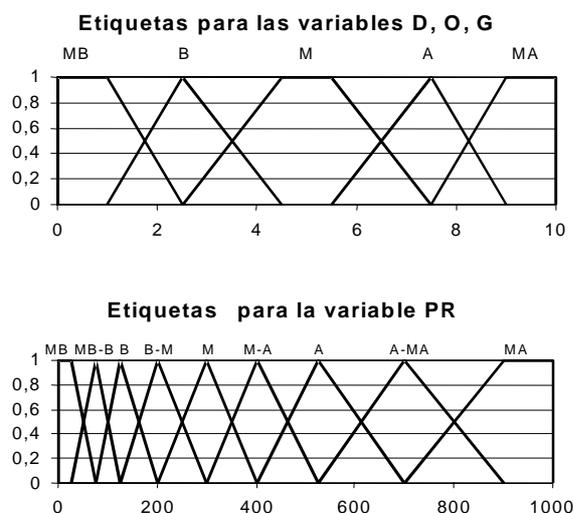


Figura 3. Etiquetas de las variables del modelo.

un número borroso. La Figura 3 muestra las etiquetas y rangos propuestos para las variables del sistema AMFE. Cada regla borrosa de nuestro sistema de decisión relaciona las tres variables de entrada con la única variable de salida manteniendo una estructura idéntica a la propuesta en el modelo propuesto de la sección anterior (125 reglas); la única diferencia es que ahora, cada etiqueta, es un número borroso.

Una vez desencadenado el proceso de inferencia para cada terna de entrada correspondiente a una causa de fallo, se obtendrá la valoración de su CPR correspondiente.

Como puede observarse en la tabla 4, las valoraciones de prioridad de riesgo para las 5 causas de fallo analizadas son: 675, 329, 886, 195 y 378. Para este ejemplo, las diferencias entre ambos sistemas estriban en las causas de fallos "a2" y "b2" y se deben a los parámetros elegidos para definir el sistema de decisión borroso.

Modo de fallo potencial	Causa potencial del fallo	D	O	G	Sistema 1 Ranking		Sistema 2 Ranking borroso	
A	a1	1	4	8	A	2°	675 (A-MA)	2°
	a2	5	2	4	M-A	3°	329 (M)	4°
	a3	1	7	10	MA	1°	886 (MA)	1°
B	b1	7	7	1	B-M	5°	195 (B-M)	5°
	b2	3	7	3	M	4°	378 (M-A)	3°

Tabla 4: Ranking de criticidad según sistema cualitativo (1) y sistema borroso (2).

Para dar consistencia al método borroso propuesto, de modo que fuera altamente compatible con el sistema de decisión propuesto en la sección anterior, es necesario que el error de clasificación de las causas de fallo analizadas fuese minimizado. Para conseguir esto último, se propone realizar un estudio de los parámetros del sistema de decisión borroso que minimice tal error. En concreto se estudiarán los errores de clasificación que proporciona el sistema borroso en 1000 casos, correspondientes a todas las entradas discretas en el rango 1-10 para las variables de entrada "D", "O" y "G". Se analizarán dos tipos de errores; el primero "MAPE" [12] cuantifica el error en términos porcentuales según la expresión:

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|x_i - s_i|}{1/2|x_i + s_i|} \quad (1)$$

donde:

N representa el número de ejemplos analizados (en nuestro caso: 1000), **x_i** es el valor numérico de clasificación según el sistema basado en reglas cualitativas-intervalo de la sección anterior, (como valor numérico de la etiqueta de salida se tomará la marca de clase del intervalo asociado; ver tabla 2), y **s_i** es el valor numérico de clasificación devuelto por el sistema borroso propuesto.

El segundo error analizado es propiamente el error de clasificación; esto es, se comprueba si la salida del sistema borroso coincide con la etiqueta de salida del sistema basado en reglas cualitativas-intervalo. Como el sistema borroso realmente devuelve un número, al mismo se le

asignará la etiqueta correspondiente al intervalo al que pertenezca según la tabla 2 anterior y para cuantificar el error se calcula la proporción de "mal clasificados".

A modo de ilustración, utilizando el ejemplo de las 5 causas de fallo se obtendría:

$$a) \text{MAPE} = \frac{1}{5} \left[\frac{|525 - 675|}{0.5 \cdot |525 + 675|} + \frac{|400 - 329|}{0.5 \cdot |400 + 329|} + \frac{|900 - 886|}{0.5 \cdot |900 + 886|} + \frac{|200 - 195|}{0.5 \cdot |200 + 195|} + \frac{|300 - 378|}{0.5 \cdot |300 + 378|} \right] = 0.1432$$

$$b) \text{ERROR CLASIFICACIÓN} = \frac{3}{5} \cdot 100 = 60\%$$

Puede observarse cómo, en este caso, la elección de los parámetros: "MIN" para el operador "and"; "MIN" para la implicación; "MAX" para la agregación, y "CENTROID" para la desborrosificación, no produce unos resultados satisfactorios de compatibilidad de clasificación entre ambos sistemas.

Cuando se analizan los 1000 ejemplos de entrada (todas las combinaciones discretas posibles para los índices "D", "O" y "G"), y para diferentes parámetros del sistema de decisión, los resultados obtenidos, (procesados en el toolbox fuzzy de MATLAB) fueron los dados en la Tabla 5, de modo que en las celdas en que se cuantifican errores, el superior es el MAPE y el inferior el error de proporción de casos mal clasificados.

Método AND	Método Implicación	Método agregación	Errores en % según el Método de desborrosificación				
			Centroide	Bisector	MOM	LOM	SOM
MIN	MIN	MAX	12.05 33	7.40 8.9	2.38 0	9.7 0	8.85 0
		SUM	14.03 38.4	11.16 24.7	5.78 0.2	9.83 0.2	9.48 0
		PROBOR	14.30 38.3	11.63 25.4	5.44 0	5.44 0	9.17 0
PROD	PROD	MAX	9.47 24.7	4.72 2.4	3.24 0	4.45 0	2.81 0
		SUM	10.07 25.7	5.92 7.9	3.93 1.2	5.07 1.8	3.33 1.2
		PROBOR	10.36 25.4	6.00 8.3	3.85 1.2	4.93 1.02	3.33 1.2

Tabla 5. Errores MAPE y de clasificación para diferentes estructuras de parámetros del Sistema Fuzzy.

Modo fallo	Causa del fallo	D	O	G	Sistema 1 Ranking		Sistema 2' Ranking		Errores
A	a1	1	4	8	A	2°	530 (A)	2°	MAPE = 0.015 E2 = 0 %
	a2	5	2	4	M-A	3°	405 (M-A)	3°	
	a3	1	7	10	MA	1°	925 (MA)	1°	
B	b1	7	7	1	B-M	5°	205 (B-M)	5°	
	b2	3	7	3	M	4°	300 (M)	4°	

Tabla 6: Ranking de criticidad según Sistema 1 y Sistema 2'.

A la vista de los resultados, las estructuras de parámetros que mejor se comportan son las que aparecen sombreadas en la tabla, ya que minimizan los dos tipos de error. Así, concluiremos eligiendo como conjunto de parámetros para el sistema de decisión fuzzy el siguiente: "MIN" para el operador "and", "MIN" como método de implicación, "MAX" como método de agregación, y "MOM" (media de los máximos) como método de desborrosificación. Tomando esta estructura de parámetros para el ejemplo de las 5 causas de fallo obtenemos los resultados de la Tabla 6, donde claramente se observa la alta compatibilidad de clasificación del nuevo sistema 2' con el sistema 1.

5. Conclusiones.

En este trabajo, para analizar un sistema AMFE se propone, en primer lugar, estructurar el conocimiento que posee un experto (para asignar riesgos a causas de fallos de un sistema), en forma de reglas de decisión cualitativas que permiten otorgar, a cada causa de fallo, su categoría de prioridad de riesgo (CPR) asociada. El método propuesto soluciona una de las principales críticas realizadas al modelo tradicional, pues la estructura del sistema de reglas permite ponderar de modo notorio la gravedad asociada a una causa de fallo. En segundo lugar, se propone la creación de un sistema de decisión borroso para aumentar la continuidad del modelo de decisión AMFE y para evitar que combinaciones de etiquetas similares en las variables de entrada, proporcionen CPR's semejantes para diferentes causas de fallo. Variando los parámetros del sistema borroso optimizamos su estructura minimizando los errores de clasificación de riesgos de las causas de fallo.

Referencias

- [1] MIL-HDBK-338-IA (1988). Military Handbook – Electronic Reliability Design Handbook, Department of Defense, Washington, DC.
- [2] MIL-STD-1629^a (1980) Military Standard –Procedures for Performing a Failure Mode, Effects and Criticality Analysis, Department of Defense, Washington, DC.
- [3] Chrysler Corporation, Ford Motor Company, General Motors Corporation (1995), "Potencial Failure Mode and Effects Analysis", *Reference Manual*, 2nd ed., February.
- [4] Gilchrist, W. (1993). "Modelling failure modes and effects analysis". *International Journal of Quality and Reliability Management*. Vol. 10 No. 5, pp 16-23
- [5] Ben-Daya, M.; Raouf, A. (1993). "A revised failure mode and effects analysis model", *International Journal of Quality and Reliability Management*, Vol 13 No ° 1, pp 43-7.
- [6] Deng, J. (1989), "Introduction to grey system theory", *Journal of Grey System*, Vol. 1 No. 1
- [7] Zadeh, L.A. (1965). "Fuzzy Sets". *Information and Control*. Vol 8, pp.338-53.
- [8] Kaufmann, A.; Gupta, M. (1991). "Introduction to Fuzzy Arithmetic. Theory and Applications" .Van Nostrand Reinhold.
- [9] Driankov, D.; Hellendoorn, H.; Reinfrank, M. (1996). "An Introduction to Fuzzy Control. 2nd Edition". Springer.
- [10] Cox, E. (1994). "The Fuzzy Systems Handbook". Academic Press, Inc.
- [11] Mamdani, E.H.; Gains, B.R. (1981): "Fuzzy Reasoning and its Applications". New York: Academic Press.
- [12] Makridakis, S.; Anderson, A.; Carbone, R.; Fildes, R.; Hibon, R.; Lewandowski, R.; Newton, J.; Parzen, E. And Winkler, R. (1982): "The accuracy of extrapolation (time series) methods: Results of a forecasting competition". *Journal of Forecasting*, 1, pp. 111-153.