


# Modelo difuso para la inspección visual de superficies metálicas ferrosas corroídas

Fuzzy model for visual inspection of corroded ferrous-metal surfaces

Luis E. Calatayud<sup>1</sup>, Sandra Roblero<sup>1</sup> , J. Solís Romero<sup>1</sup>, Víctor A. Castellanos<sup>1</sup>. Mariana B. Castañeda<sup>2</sup>

<sup>1</sup>TecNM/DEPI-Instituto Tecnológico de Tlalnepantla, Av. Constituyentes de 1917, Col. La Comunidad S/N. C.P. 54070. Apdo. Postal 750

<sup>2</sup>TecNM/División de Ingeniería Química-Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec, Av. Tecnológico S/N Col. Valle de Anáhuac, Ecatepec de Morelos, Estado de México, C.P. 55210

\* Correo-e

## PALABRAS CLAVE:

Modelo difuso, corrosión, inspección visual.

## RESUMEN

Se presenta el desarrollo de un modelo difuso (MD), diseñado para inspeccionar visualmente superficies metálicas ferrosas expuestas a procesos corrosivos tales como picadura o corrosión atmosférica. Los parámetros considerados como datos de entrada, son variables visuales macroscópicas que se presentan en algunos de los fenómenos corrosivos. Estas variables fueron establecidas con base en normas estándar emitidas por la ASTM, artículos de investigación, ASM Handbooks volume 13 y 13 A, entre otros. Se realizó una discretización de sólo cinco variables como parámetros de entrada para reconocer hasta cinco procesos corrosivos. Para validar el funcionamiento del MD, se llevaron a cabo pruebas con base a fotografías de artículos de investigación en el análisis de falla de ingeniería obteniendo resultados favorables.

## KEYWORDS:

Fuzzy model, corrosion, visual inspection.

## ABSTRACT

A fuzzy model was developed, aimed to assist in the diagnosis of metallic surfaces subjected to corrosive processes, such as pitting and/or galvanic corrosion. The macroscopic visual variables present in some corrosive phenomena were considered as the input parameters. Those variables were established based on ASTM specifications, ASM handbooks volume 13 y 13 A and, published papers. As a whole, in order to recognize up to five corrosive processes, five variables were selected as input parameters. The fuzzy model was validated taking into account engineering failure analysis research papers photographs and, positives results were obtained.

Recibido: 7 de agosto de 2018 • Aceptado: 4 de marzo de 2019 • Publicado en línea: 31 de octubre de 2019

## Introducción

El uso de sistemas de inteligencia artificial en distintas áreas del conocimiento se ha convertido en una herramienta de gran potencial que ayuda a los investigadores, científicos y tecnólogos en la disminución de tiempos para la elaboración de diagnósticos y reportes durante los trabajos de investigación. Estos sistemas han hecho extensivo el conocimiento especializado para ayudar a resolver problemas a nivel experto y su desarrollo involucra factores importantes que dependen directamente del área en que esté enfocado. En los últimos años se han desarrollado sistemas de inteligencia artificial, basados en lógica difusa, que se enfocan específicamente en el análisis y/o diagnóstico de procesos corrosivos o análisis de falla. En 2016 se desarrolló un modelo de lógica difusa para estimar la probabilidad de falla por corrosión en tuberías de petróleo y gas [1]. La presión de operación de la tubería es alta y el medio de transmisión es inflamable y explosivo. Uno de los principales motivos de falla es la corrosión que puede conducir al adelgazamiento o al agrietamiento de la pared de la tubería. Para minimizar la corrosión y reducir las pérdidas económicas, es necesario evaluar el riesgo de falla de la tubería y luego tomar un plan de inspección efectivo de acuerdo con la clasificación de riesgos. El sistema desarrollado por los investigadores considera cuatro parámetros (factor de adelgazamiento de la tubería, factor de agrietamiento en las tuberías, eficiencia y tiempos de inspección)

para estimar la probabilidad de falla. Un año después fue desarrollado el mismo modelo [2] utilizando el mismo enfoque de lógica difusa, pero haciendo una aproximación distinta a la propuesta anteriormente. Por otro lado, se desarrolló un sistema para la inspección de análisis de riesgo de tuberías de petróleo y gas basada en el marco de lógica difusa [3], presenta una metodología propuesta, para el establecimiento de un programa RBI (Inspección basada en riesgo) para tuberías. En esta técnica, los parámetros de funcionamiento de la planta (tasas de flujo de temperatura, gas y líquido, presión total, presión parcial de CO<sub>2</sub> y pH) se toman como variables difusas y se usan para calcular la velocidad de corrosión. La tasa de corrosión inspeccionada y la eficiencia de la inspección también se consideran variables difusas y se utilizan para calcular la confianza en los resultados de la inspección y la confianza en los resultados previos.

En los casos anteriores, los sistemas desarrollados están orientados a áreas específicas donde la corrosión se encuentra presente y distintas maneras en las que puede ser evaluada. Hablar de corrosión, es un tema muy extenso y su presencia en el mundo es complicado. Durante su evaluación, el reconocimiento de los procesos corrosivos suele ser impredecibles y, para poder determinar qué tipo de ataque está presente en una superficie metálica dañada, se deben tener los conocimientos previos de un experto en el reconocimiento visual de superficies corroídas. En este trabajo de investigación se desarrolló de un

modelo difuso (MD) para el análisis visual de superficies metálicas ferrosas expuestas a procesos corrosivos. Para resolver problemas a nivel avanzado, los sistemas de inteligencia artificial necesitan un acceso eficiente a una base de conocimiento de dominio sustancial, y un mecanismo de razonamiento para aplicar el conocimiento a los problemas que se les brindan. A partir de lo anterior, el MD desarrollado, está basado en un modelo de lógica difusa, rama de la inteligencia artificial que le permite a una computadora analizar información del mundo real en una escala entre lo falso y verdadero [4]. Ésta es la programación lógica más parecida al pensamiento humano basada en la toma de decisiones. Las variables que pueden presentarse en la superficie metálica, cuando está siendo expuesta a procesos corrosivos, en ocasiones suelen ser confundidas unas con otras debido a ciertas similitudes que presentan los procesos corrosivos entre sí, o simplemente porque a simple vista no se observa la totalidad del daño. Así mismo durante el proceso de inspección podemos encontrar más de un proceso corrosivo en una sola superficie metálica haciendo que su reconocimiento sea complejo. En este artículo se presenta la metodología utilizada para el desarrollo del MD, desde la optimización y discretización de las variables visuales macroscópicas que presentan distintos fenómenos corrosivos hasta la implementación de las reglas de inferencia basadas en un ambiente de lógica difusa.

## Generalidades de la lógica difusa

La lógica difusa (LD) está relacionada y fundamentada en la teoría de los conjuntos difusos, en la cual, el grado de pertenencia de un elemento a un conjunto está determinado por una función de pertenencia (FP) que puede adoptar valores reales comprendidos en el intervalo  $[0, 1]$  [5] [6]. De esta manera, mientras que, en el marco de lógica clásica, un parámetro tiene pertinencia o no, dándole un valor de 1 si es pertinente y 0 en caso contrario. En la LD, se obtiene un nivel de cumplimiento de la pertenencia, es decir, entre más cercano a cero es menos pertinente y cuando sea más cercano a 1 será más pertinente. Las etapas que conforman un sistema de inferencia difuso Mamdani se muestran en la Figura 1. Textualmente se definen de la siguiente manera:

- Fase 1: Fusificador. Consiste en transformar los valores de entrada del sistema en valores difusos con un grado de pertenencia entre 0 y 1,
- Fase 2: Mecanismo de inferencia. En esta se almacena el conocimiento en un conjunto de reglas de la forma IF-THEN. Aquí se proponen reglas lingüísticas conocidas como de inferencia para evaluar las variables de entrada y asignarles una función de pertenencia.
- Fase 3: Defusificador. Consiste la transformación de los valores difusos obtenidos mediante las acciones del

sistema, a valores crisp o nítidos, obteniendo el valor de salida del sistema.

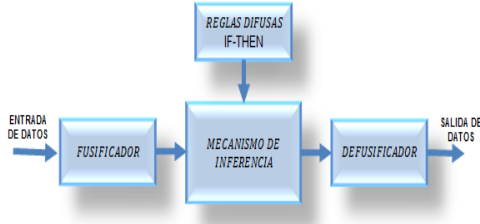


Figura 1. Sistema de inferencia difuso Mamdani

## Metodología

### Alcances del MD para el análisis visual

A lo largo de los años, los científicos e ingenieros en corrosión han reconocido que la corrosión se manifiesta en formas que pueden clasificarse en grupos específicos. Sin embargo, muchas de estas formas no son únicas, pero involucran mecanismos que tienen características que pueden influir o controlar el inicio o la propagación de un tipo específico de corrosión [7]. Una de las clasificaciones más aceptadas según la ASM es la propuesta por Fontana y Greene; ataque uniforme, corrosión en grietas, picaduras, corrosión intergranular, lixiviación selectiva, corrosión por erosión, corrosión por estrés y daño por hidrógeno. Esta clasificación de la corrosión se basó en las características visuales de la morfología de ataque [8].

Tomando como referencia la clasificación de Fontana y Greene y subclasificaciones definidas por la [9], se realizó una selección de procesos corrosivos que comúnmente suelen presentarse en superficies metálicas ferrosas; corrosión por picadura ( $C_{PP}$ ),

corrosión filiforme ( $C_{FF}$ ), corrosión inducida por esfuerzos ( $C_{IE}$ ), corrosión galvánica ( $C_{GA}$ ) y corrosión atmosférica ( $C_{AT}$ ) (ver Figura 2). Estos términos, son utilizados para definir de manera general la magnitud de propagación del ataque corrosivo presente en una superficie metálica. La característica principal de la corrosión generalizada, es que se presenta en toda la superficie provocando un adelgazamiento superficial uniforme mientras que la corrosión localizada solo se presenta en zonas específicas. Esta última, en algunos casos, suele ser imperceptible a la vista humana durante una evaluación visual.

### Determinación de las variables de entrada

Como se mencionó con anterioridad, se realizó una selección específica de los procesos corrosivos para delimitar los alcances del modelo propuesto. Posteriormente, se desarrolló una base de datos de las distintas variables morfológicas que pueden presentar estos procesos y que son perceptibles al ojo humano en el análisis visual de superficies metálicas. En la Tabla 1, se muestran las variables que nos ofrecen mayor información para identificar los procesos corrosivos propuestos. Estas variables fueron determinadas con base a handbooks emitidos por la ASM, NACE [10], guías estándar de ASTM, artículos de publicación internacional y literatura [11].

A partir de las variables mostradas en la tabla 1, se realizó una optimización de las mismas. Como se mencionó, la corrosión generalizada tiene la característica de atacar

uniformemente la superficie, mientras que la localizada solo se presenta en zonas específicas de la misma. En la tabla 1, podemos observar que algunas de las variables son repetitivas en los distintos tipos de corrosión, sin embargo, la magnitud de ataque es muy distinta para cada tipo. Por ejemplo, si durante una inspección superficial solo existiese presencia de grietas, seguramente el fenómeno que se presenta es una corrosión inducida por esfuerzos, pero, si sobre la misma superficie también se puede observar presencia de picaduras profundas y/o descamación de la superficie, lo más seguro es que el agrietamiento superficial se deba al debilitamiento mismo del material provocado por la presencia de corrosión por picadura altamente propagada o un ataque corrosivo galvánico.

Para poder determinar con mayor exactitud el fenómeno o los fenómenos corrosivos presentes en la superficie, se determinó como un parámetro de entrada la variable “Ataque superficial (AG)” la cual está en términos del porcentaje superficial del material que presenta el daño (de 0 a 100% de toda la superficie). Conforme a los datos de la misma tabla, se seleccionaron 4 parámetros más como variables de entrada “Picaduras en la superficie (PS)”, “Estricciones en la superficie (ES)”, “Descamación de la superficie (DS)” y “Arietamiento superficial (AS)” (ver Figura 2). La selección de estas variables se determinó de modo que pudieran ser enlazadas entre ellas dependiendo su grado de ataque y/o morfología según sea el caso. En la siguiente sección, se describen específicamente cada una de ellas.

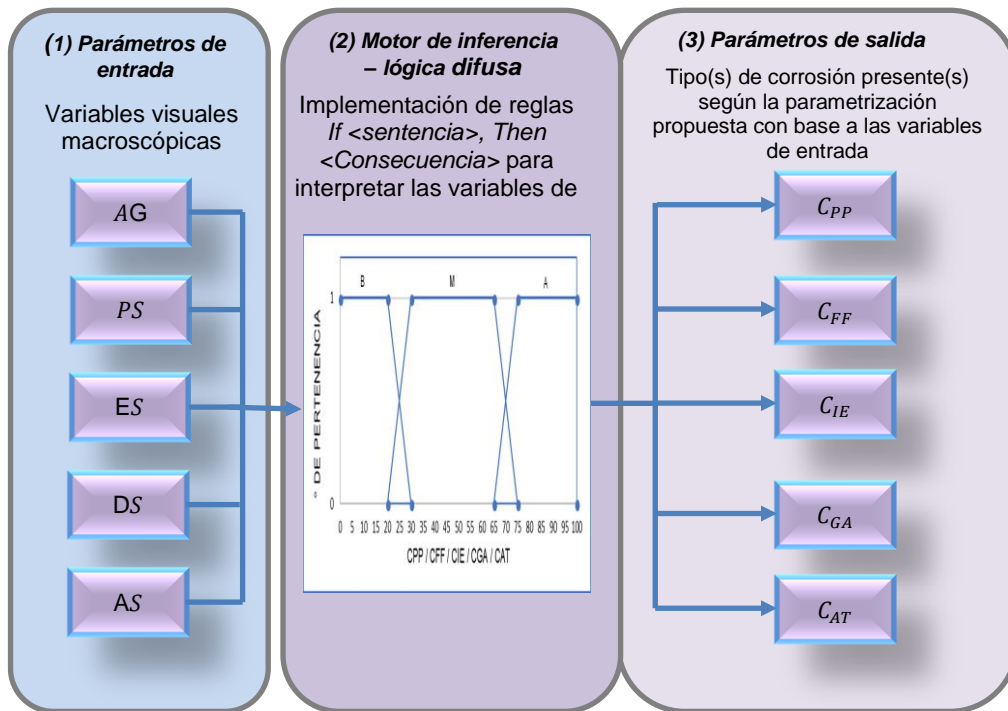
**Tabla 1.** Variables morfológicas macroscópicas de los procesos corrosivos propuestos

Clasificación	Tipo de proceso corrosivo	Variables morfológicas perceptibles sobre la superficie
Corrosión localizada	Corrosión por picadura	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Picaduras profundas y/o no profundas</li> <li>▪ Descamación superficial</li> <li>▪ Agrietamiento superficial</li> <li>▪ Coloración rojo cobrizo sobre la superficie</li> <li>▪ Estricciones</li> <li>▪ Agrietamiento sobre las estrías</li> </ul>
	Corrosión filiforme	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Cavidades bajo las estrías</li> <li>▪ Coloración marrón o rojo cobrizo sobre las estrías</li> </ul>
	Corrosión inducida por esfuerzos	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Agrietamiento superficial</li> </ul>
Corrosión generalizada	Corrosión galvánica	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Descamación superficial</li> <li>▪ Adelgazamiento superficial</li> <li>▪ Coloración rojo cobrizo sobre la superficie</li> <li>▪ Adelgazamiento superficial</li> </ul>
	Corrosión atmosférica	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Protuberancias y/o granos en la superficie</li> <li>▪ Coloración marrón o rojo cobrizo sobre la superficie</li> </ul>

### Determinación de las reglas para el MD

La determinación de las reglas difusas es parte esencial de la lógica difusa. Son usadas para describir la relación que existe entre las variables de entrada y salida. Las reglas generalmente se establecen con base a conocimiento ingenieril ofrecido por

expertos y en ocasiones con base a especificaciones y/o estándares. A continuación, se describen los aspectos más importantes sobre la selección de las cuatro variables morfológicas de los procesos corrosivos propuestos de la tabla 1 como parámetros de entrada al MD.



**Figura 1.** Modelo propuesto para el análisis visual de superficies metálicas ferrosas expuestas a procesos corrosivos

La descamación superficial de los metales, es sin duda una de las variables visuales macroscópicas de mayor presencia en algunos procesos corrosivos. Esta variable, es principalmente la consecuencia del inicio de un mecanismo de corrosión galvánica debido al acoplamiento entre dos metales de distinto potencial eléctrico. Así mismo, cuando en la superficie de un metal se tiene

una alta propagación de corrosión por picadura, el material tiende a debilitarse y a perder masa superficial formando grandes cavidades en la misma. Expuesto esto, la variable DS fue categorizada en cinco niveles; muy bajo (MB), bajo (B), medio (M), alto (A) y muy alto (MA), en donde MB representa una descamación del material casi nula y/o muy localizada mientras que MA

representa una descamación superficial uniforme dando lugar a una corrosión generalizada. Así mismo para la variable PS se asignaron los mismos cinco niveles en términos de la densidad de las picaduras presentes en la superficie expuesta. Este parámetro ha sido estandarizado por la ASTM [12]. Se consideró que MB representa una densidad no significativa mientras que MA expresa todo lo contrario. Otra variable muy común en los procesos corrosivos es el agrietamiento superficial. Cuando la propagación del ataque es muy avanzada, el material tiende a debilitarse estructuralmente y comienza a expresar esta debilidad a partir del agrietamiento superficial.

Usualmente, una superficie metálica, suele estar expuesta a más de un proceso corrosivo y mientras más presencia exista mayor será la pérdida de capacidades del material. Por el contrario, las grietas también pueden ser originadas por la existencia de corrosión inducida por esfuerzos, un tipo de corrosión producida por la exposición del material a esfuerzos y fatiga. La variable ASS fue categorizada en cinco niveles; muy bajo (MB), bajo (B), medio (M), alto (A) y muy alto (MA), en donde MB representa un agrietamiento superficial casi nulo y/o muy localizado mientras que MA podría expresar una alta presencia de corrosión inducida por esfuerzos y/o resultado de un debilitamiento por la propagación de otros procesos corrosivos. Para la variable ES, de igual manera se le asignaron cinco niveles; muy bajo (MB), bajo (B), medio (M), alto (A) y muy alto (MA), en donde MB representa la

existencia casi nula y/o mínima de estrías en la superficie expuesta mientras que MA representa, más que sólo una simple estría, presencia de grandes protuberancias en la superficie como las que podría presentar un proceso corrosivo atmosférico. Por último, la variable AG definida en la sección anterior, se considera como el parámetro que da el mayor soporte para la interpretación de todas las posibles combinaciones del resto de los parámetros. Este fue categorizado en tres niveles; bajo (B), medio (M) y alto (A) donde, B puede expresar ataques corrosivos localizados, M presencia de ataque corrosivos localizados propagados y/o iniciación de procesos corrosivos generalizados y A corrosión localizada muy alta y/o presencia de corrosión generalizada. Para cada una de las variables de salida propuestas ( $C_{PP}$ ,  $C_{FF}$ ,  $C_{IE}$ ,  $C_{GA}$  y  $C_{AT}$ ), se asignaron tres niveles; bajo (B), medio (M) y alto (A) donde, B representa una presencia baja del proceso corrosivo y A una presencia alta considerable.

En la tabla 2 se muestran las imágenes parametrizadas para representar gráficamente los distintos niveles de las variables de entrada del modelo difuso. Estas imágenes serán utilizadas en el desarrollo de la interfaz gráfica para que el usuario pueda asegurar que los parámetros de entrada que esté ingresando al MD coincidan con lo que está visualizando. En la tabla 3 solo se muestra de manera resumida las variables de salida que aloja el modelo difuso con base en los parámetros de entrada.

Se establecieron 198 reglas de inferencia difusa de un total de 1875 combinaciones entre los distintos niveles de cada una de los parámetros de entrada para estimar, en términos de porcentaje, el nivel de presencia de los distintos tipos de corrosión propuestos según sea el caso. Estas reglas están expresadas en un formato IF-THEN, por ejemplo:

- **RULE 10** : IF ((AG IS M OR AG IS A) **AND** ((PS IS MB AND AG IS M AND ((ES IS NOT A OR ES IS NOT MA) AND ((AS IS A AND (DS IS NOT MA AND ES IS NOT MB)) OR (AS IS MA AND DS IS MA AND ES IS MB)))) OR (PS IS MB AND AG IS A AND AS IS MA AND ((ES IS MB

AND DS IS NOT MA) OR (ES IS B AND DS IS M))) OR (PS IS B AND AG IS M AND AS IS A AND (ES IS MB OR ES IS B))) **AND** (ES IS NOT A OR ES IS NOT MA) **AND** (DS IS NOT MB OR DS IS NOT B) **AND** (AS IS A OR AS IS MA)) THEN CAT IS B **AND** CGA IS M **AND** CIE IS M;

**Determinación de las funciones de pertenencia para las variables**

En la Tabla 4, se muestra una compilación de los valores que se asignaron en términos de pertenencia a cada una de las variables de entrada y salida.

**Tabla 2.** Variables de entrada del MD

Variable	Abreviatura	Niveles				
		Muy bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy alto
Picaduras en la superficie	PS					
Estrías en la superficie	ES					
Descamación de la superficie	DS					
Agrietamiento superficial	AS					
Ataque superficial (%)	AG	N/A				N/A



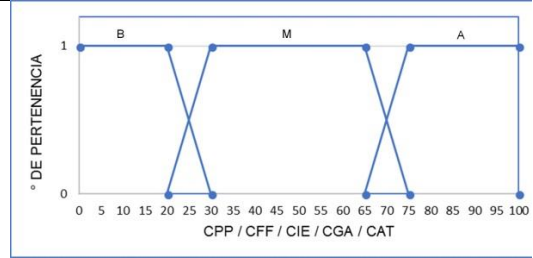
**Tabla 3.** Variables de salida del MD

Variable	Abreviatura	Niveles
Corrosión por picadura	C <sub>PP</sub>	Bajo, Medio, Alto
Corrosión filiforme	C <sub>FF</sub>	Bajo, Medio, Alto
Corrosión inducida por esfuerzos	C <sub>IE</sub>	Bajo, Medio, Alto
Corrosión galvánica	C <sub>GA</sub>	Bajo, Medio, Alto
Corrosión atmosférica	C <sub>AT</sub>	Bajo, Medio, Alto

**Tabla 4.** Funciones de pertenencia para cada variable de entrada y salida

Variable lingüística	Valores	Rango	Función de pertenencia	Gráfica
AG (K <sub>1</sub> )	A (L <sub>1</sub> )	$\mu_{l_1}^{k_1}: (65, 75, 100)$		
	M (L <sub>2</sub> )	$\mu_{l_2}^{k_1}: (20, 30, 65, 75)$		
	B (L <sub>3</sub> )	$\mu_{l_3}^{k_1}: (0, 20, 30)$		
PS (K <sub>2</sub> )	MA (L <sub>1</sub> )	$\mu_{l_1}^{k_2}: (100000, 200000, 500000)$		
	A (L <sub>2</sub> )	$\mu_{l_2}^{k_2}: (50000, 60000, 100000, 200000)$		
	M (L <sub>3</sub> )	$\mu_{l_3}^{k_2}: (10000, 20000, 50000, 60000)$		
	B (L <sub>4</sub> )	$\mu_{l_4}^2: (2500, 3500, 10000, 20000)$		
	MB (L <sub>5</sub> )	$\mu_{l_5}^{k_2}: (0, 2500, 3500)$		
ES (K <sub>3</sub> )	MA (L <sub>1</sub> )	$\mu_{l_1}^{k_{3,4,5}}: (75, 85, 100)$		
	A (L <sub>2</sub> )	$\mu_{l_2}^{k_{3,4,5}}: (55, 65, 75, 85)$		
	DS (K <sub>4</sub> )	$\mu_{l_3}^{k_{3,4,5}}: (20, 30, 55, 65)$		
	AS (K <sub>5</sub> )	$\mu_{l_4}^{k_{3,4,5}}: (5, 15, 20, 30)$		
	MB (L <sub>5</sub> )	$\mu_{l_5}^{k_{3,4,5}}: (0, 5, 15)$		

$C_{PP} (S_1)$		
$C_{FF} (S_2)$	$A (L_1)$	$\mu_{t_1}^{S_{1...5}}: (65, 75, 100)$
$C_{IE} (S_3)$	$M (L_2)$	$\mu_{t_2}^{S_{1...5}}: (20, 30, 65, 75)$
$C_{GA} (S_4)$	$B (L_3)$	$\mu_{t_3}^{S_{1...5}}: (0, 20, 30)$
$C_{AT} (S_5)$		



## Resultados

Con el fin de hacer una primera comprobación de la correcta funcionalidad y fidelidad del MD, se realizó una prueba comparativa de los resultados obtenidos previamente en artículos de investigación de análisis de fallas de ingeniería. En la tabla 5, se presentan los resultados obtenidos por el MD con base en artículos de análisis de fallas tomando como parámetros de entrada variables visuales de las fotografías presentadas en los mismos.

El porcentaje de error mostrado en la tabla se calculó con base al grado de acertamiento del MD al alojar los resultados a partir de las variables visuales de las fotografías de los artículos utilizados para su validación. Las variables de salida son comentarios propuestos por los expertos en donde hace notar lingüísticamente el grado de presencia de los procesos corrosivos según los parámetros de entrada y no el grado de daño provocado por los mismos.

**Tabla 5.** Pruebas de validación del MD

	Resultados del análisis de falla	Resultados del MD	% error
Caso 1 [13]	Corrosión por picadura alta debido a una mala selección del material para el diseño del tanque  Agrietamiento superficial debido a las altas tensiones al que era sometido el tanque	Alta presencia de corrosión por picadura y alta presencia de corrosión inducida por esfuerzos. Parte del agrietamiento superficial puede ser debido a la presencia de corrosión por picadura.	5%
Caso 2 [14]	Corrosión por erosión en las paredes internas de la tubería debido a la inhomogeneidad del flujo del fluido que transportaba. Así mismo agrietamiento de las paredes de la misma a causa de imperfecciones geométricas y concentración de esfuerzos no distribuidos correctamente.	Presencia de corrosión por picadura y corrosión inducida por esfuerzos. El agrietamiento y la descamación superficial pueden ser debido a la presencia de corrosión por picadura.	30%
Caso 3 [15]	Corrosión anormal en los tubos economizadores de calderas de calor residual donde, se hace presente un ataque corrosivo atmosférico debido a las	Alta presencia de corrosión atmosférica y alta presencia de corrosión por picadura. El agrietamiento y la descamación superficial pueden ser debidos a la	10%

---

condiciones ambientales a las que estaban expuestos. Así mismo, corrosión por picadura altamente propagada.

---

presencia de la corrosión por picadura.

### Trabajo a futuro

Como trabajo futuro a realizar se tiene; verificar el procedimiento interno y mejorar las pruebas de validación para minimizar el porcentaje de error del MD, extrapolar el MD a un sistema experto que de mayor información como salida e implementar una interfaz gráfica para facilitar al usuario su uso.

### Conclusiones

El diseño del MD se desarrolló en un ambiente de programación java bajo estándares de programación difusa [16] [17]. A comparación de la mayoría de los sistemas de inteligencia artificial basados en lógica difusa en donde las variables de salida son únicas para cada regla implementada, en el MD propuesto, para cada regla difusa puede existir una sola variable o una combinación de las distintas variables de salida propuestas.

El porcentaje de error mostrado en la tabla 5, como se mencionó, fue calculado en base al grado de coincidencia de los parámetros de salida del MD y los resultados obtenidos en los artículos de investigación utilizados para su validación, por tal motivo, se considera que parte del error se debe a la limitación que se tuvo con la información que se pudo extraer de las fotografías

presentadas en los artículos. Para mejorar las pruebas de validación del MD (como se mencionó en el apartado “Trabajo a futuro”), se van realizar pruebas experimentales sometiendo algunos metales ferrosos en ambientes corrosivos; por ejemplo, pruebas galvanostáticas.

En general, los resultados obtenidos se consideran favorables y con el soporte necesario para validar el correcto funcionamiento de éste primer desarrollo del MD para la inspección visual de superficies metálicas ferrosas expuestas a procesos corrosivos.

### Referencias

- [1] Qi Zhou, Wei Wu, Dongpeng Liu, Kaikai Li y Qiao Qiao, «Estimation of corrosion failure likelihood of oil and gas pipeline based on fuzzy logic approach,» *Engineering Failure Analysis*, vol. 70, pp. 48-55, 2016.
- [2] J. Dipak Kumar , B. Barnali , A. W. Mohd Helmy y M. Anupam , «Novel type-2 fuzzy logic approach for inference of corrosion failure likelihood of oil and gas pipeline industry,» *Engineering Failure Analysis*, vol. 80, pp. 299-311, 2017.
- [3] S. Maneesh y M. Tore , «A methodology for risk-based inspection planning of oil and gas pipes based on fuzzy logic framework,» *Engineering Failure Analysis*, vol. 16, pp. 2098-2113, 2009.
- [4] P. Cruz Ponce, *Inteligencia artificial con aplicaciones a la ingeniería*, Alfaomega, 2010.
- [5] L. Zadeh, *Fuzzy sets. Information and control*, 1965.
- [6] Didier Dubois y Henri Prade, *Fuzzy Sets and systems. Theory and applications*, Academic Press, 1980.
- [7] American Society of Metals, *ASM Handbook Volume 13 - Corrosion*, USA: ASM

- International, 1987.
- [8] F. Mars G., Corrosion Engineering, USA: McGraw-Hill, 1987.
- [9] American Society of Metals, ASM Handbook Volume 13A - Corrosion fundamentals, testing, and protection, USA: ASM International, 2003.
- [10] National Association of Corrosion Engineers, NACE corrosion engineer's reference book, Houston,: Robert Baboian, 2002.
- [11] K. Elayaperumal y V.S. Raja, Corrosión Failure. Theory, case studies and solutions, USA: John Wiley & Sons, 2015.
- [12] American Society of Testing Materials, *Standar Guide for Examination and Evaluation of Pitting Corrosion*, USA: ASTM international, 2005.
- [13] J. Orlikowski y S. Krakowiak, «Pitting corrosion and stress-corrosion cracking of buffer tanks in a brewery,» *Engineering failure analysis*, vol. 29, pp. 75 -82, 2012.
- [14] Qiao Qiao, Guangxu Cheng, WeiWua, Yun Li y Hui Huan, «Failure analysis of corrosion at an inhomogeneous welded joint in a natural gas gathering pipeline considering the combined action of multiple factors,» *Engineering Failure Analysis*, vol. 64, pp. 126 - 143, 2016.
- [15] . Y. Zhen-Guo, Qun Ding y T. Xiao-Feng , «Failure analysis on abnormal corrosion of economizer tubes in a waste heat boiler,» *Engineering Failure Analysis*, vol. 73, pp. 129-138, 2016.
- [16] International Electrotehcnical Commission, *IEC 1131 - Programmable controllers*, International Electrotehcnical Commission, 2012.
- [17] P. Cingolani y J. Alcalá Fdez., «jFuzzyLogic: a Java library to design fuzzy logic controllers according to the standar for fuzzy logic programming,» *International Journal of Computational Intelligence Systems*, vol. 6, nº 1, pp. 61-75, 2013.

*Acerca de los autores*