



Estado de corrosión en tuberías y accesorios metálicos expuestos al aire, basado en conjuntos difusos*

*Fernando Gutiérrez Figue***

*Milton Mena Serna****

*César Augusto García-Ubaque*****

Recibido: 14/08/2019 • Aceptado: 13/04/2020

<https://doi.org/10.22395/rium.v19n37a12>

RESUMEN

Los materiales metálicos usados en sistemas de distribución de agua potable presentan daños por corrosión, lo que hace necesario desarrollar métodos sencillos y accesibles, que permitan llevar a cabo medidas de tipo preventivo o correctivo con celeridad. En este sentido, con el trabajo del que se da cuenta en este artículo se pretendió construir un modelo de lógica difusa basado en datos obtenidos de inspecciones visuales del revestimiento y del grado de expansión de las apariencias de deterioro visibles (envejecimiento) de los elementos. El diseño metodológico utilizado correspondió a investigación cuantitativa, también conocida como enfoque matemático, que se caracteriza por la interpretación de datos, estadísticas, números y tablas, entre otros. Se analizaron los datos y registros de varias estaciones reductoras de presión (ERP) de las zonas 1 y 4 del acueducto y alcantarillado de Bogotá. Se utilizó Fuzzy Logic Toolbox™, complemento del software MATLAB, a partir de la selección de dos parámetros (protección/revestimiento y envejecimiento), a los cuales se les asignaron condiciones de calidad que operaron como datos de entrada del programa. Mediante la aplicación del modelo se obtuvo una superficie tridimensional con los valores de los estados de corrosión, según la calidad del revestimiento y la dimensión de envejecimiento. Se identificaron cuatro zonas, que representan los estados de corrosión de los elementos evaluados: óptimo, imperceptible, leve y grave, sin intervalo de transición. Los resultados demuestran que esta metodología provee una evaluación confiable del estado de corrosión de las estructuras metálicas evaluadas. Se concluye que la implementación del sistema de inferencia difusa proporciona una herramienta de sencilla aplicación, la cual puede ser ajustada con información recopilada en los trabajos rutinarios de mantenimiento preventivo o correctivo, y en actividades que relacionen otras variables con la corrosión.

Palabras clave: corrosión; inspección visual; lógica difusa; revestimiento; tuberías.

** Ingeniero civil, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Correo electrónico: fgutierrezf@correo.udistrital.edu.co. Orcid: 0000-0003-3442-4285.

*** MSc., Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Correo electrónico: mmenas@correo.udistrital.edu.co. Orcid: 0000-0002-7377-2787.

**** Ph. D., Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Correo electrónico: cagarciau@udistrital.edu.co. Orcid: 0000-0002-6959-6610.

Corrosion State in Metal Pipes and Fittings Exposed to Air Based on Fuzzy Sets

Abstract

Metallic materials used in drinking water distribution systems show corrosion damage, which makes it necessary to develop simple and accessible methods that allow preventive and / or corrective measures to be carried out quickly. The work that is described in this paper intended to build a fuzzy logic model based on data obtained from visual inspections of the cladding, and the visible deterioration appearances degree (aging) of the elements. The methodological design used was quantitative research, also known as a mathematical approach, distinguished by the interpretation of data, statistics, numbers, and tables, among others. The data and records of various pressure reducing stations (ERPs) in zones 1 and 4 of aqueduct and sewer in Bogotá were analyzed. Fuzzy Logic Toolbox™ MATLAB software complementing was used, based on the selection of two parameters (protection, and coating and aging). Each one was assigned quality conditions that operated as the program input data. By applying the model, a three-dimensional surface was obtained with the values of the corrosion states, according to the quality of the coating and the aging dimension. Four zones were identified, which represent the corrosion states of the evaluated elements: optimal, imperceptible, light, and severe, with no transition interval. The results show that this methodology provides a reliable evaluation of the state of corrosion of the evaluated metal structures. It is concluded that the implementation of the fuzzy inference system provides a simple application tool, which can be adjusted with information collected in routine preventive or corrective maintenance work, and in activities that relate other variables to corrosion.

Keywords: Corrosion; visual inspection; diffuse logic; coating; pipelines.

Estado de corrosão em encanamentos e acessórios metálicos expostos ao ar, baseado em conjuntos difusos

Resumo

Os materiais metálicos usados em sistemas de distribuição de água potável apresentam danos por corrosão, o que torna necessário desenvolver métodos simples e acessíveis, que permitam tomar medidas de tipo preventivo ou corretivo com celeridade. Nesse sentido, com o trabalho que se realizou neste artigo pretendeu-se construir um modelo de lógica difusa baseado em dados obtidos de inspeções visuais do revestimento e do grau de expansão das aparências de deterioração visíveis (envelhecimento) dos elementos. O desenho metodológico utilizado correspondeu à pesquisa quantitativa, também conhecida como enfoque matemático, que se caracteriza pela interpretação de dados, estatísticas, números e tabelas, entre outros. Analisaram-se os dados e registros de várias estações redutoras de pressão (ERP) das zonas 1 e 4 do Sistema de Saneamento Básico de Bogotá. Utilizou-se Fuzzy Logic Toolbox™, complemento do software MATLAB, a partir da seleção de dois parâmetros (proteção/revestimento e envelhecimento), aos quais lhes atribuíram condições de qualidade que operaram como dados de entrada do programa. Mediante a aplicação do modelo, obteve-se uma superfície tridimensional com os valores dos estados de corrosão, segundo a qualidade do revestimento e a dimensão de envelhecimento. Identificaram-se quatro zonas, que representam os estados de corrosão dos elementos avaliados: ótimo, imperceptível, leve e grave, sem intervalo de transição. Os resultados demonstram que essa metodologia provê uma avaliação confiável do estado de corrosão das estruturas metálicas avaliadas. Conclui-se que a implementação do sistema de inferência difusa proporciona uma ferramenta de simples aplicação, a qual pode ser ajustada com informação recopilada nos trabalhos rotineiros de manutenção preventiva ou corretiva, e em atividades que relacionem outras variáveis com a corrosão.

Palavras-chave: corrosão; inspeção visual; lógica difusa; revestimento; encanamentos.

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de distribución de agua potable que utilizan tuberías y accesorios metálicos (hierro fundido, hierro dúctil y acero) expuestos al aire son susceptibles a la corrosión electroquímica debido a la interacción del metal con la lluvia, la humedad y el flujo de agua dentro de la tubería [1] [2]. Estos elementos pueden presentar múltiples apariencias de corrosión [3], por lo que se han establecido especificaciones de protección interior y exterior [4] de las tuberías metálicas para garantizar su durabilidad y la calidad del servicio de agua potable [5] [6]. Sin embargo, la aplicación incorrecta de la capa de recubrimiento permitiría la pronta aparición de la corrosión en los elementos metálicos, hecho que reduciría su vida útil y aumentaría los costos de mantenimiento.

En la actualidad no existen equipos de medición de la corrosión [7] para hacer seguimiento y evaluación del estado actual de los elementos. Por ello se utilizan y desarrollan técnicas especializadas en detectar y calificar determinados mecanismos de daño [8] [9] y suelen emplearse para todas las condiciones, habida cuenta de que cada tipología de daño y material tiene una técnica asociada disponible. Así, la inspección visual proporciona una caracterización del material [10] y, por lo tanto, puede ser utilizada como método de evaluación de corrosión externa e interna en tuberías y accesorios metálicos [11].

Por todo lo anterior, el objetivo de estudio mostrado aquí fue presentar una metodología para estimar de forma cuantitativa el estado de corrosión de las tuberías y accesorios expuestas al aire. El modelo se basa en los estados de corrosión que pueda presentar una estructura metálica corroída. Estos estados se han determinado mediante la elección de dos parámetros, clasificados de acuerdo con dos o tres condiciones de calidad. Dado que el modelo propuesto involucra conocimientos y experiencias de personas (trabajadores, expertos y equipo de trabajo) se decidió utilizar la herramienta de lógica difusa, la cual permite producir resultados exactos a partir de información imprecisa [12] [13].

1. METODOLOGÍA

El diseño metodológico utilizado correspondió a investigación cuantitativa, también conocida como enfoque matemático; se caracteriza por la interpretación de datos, estadísticas, números y tablas, entre otros. Así entonces, se analizaron los datos y registros de varias estaciones reductoras de presión (ERP) de las zonas 1 y 4 del acueducto y alcantarillado de Bogotá (Colombia).

1.1 Técnicas de inspección de tuberías actuales

Existe una variedad de técnicas destructivas y no destructivas para evaluar de forma directa alguna forma de corrosión. Los cupones y núcleos permiten conocer la integridad estructural de la tubería y determinar las propiedades del material expuesto a la corrosión. Las pruebas no destructivas (NDT) incluyen métodos ultrasónicos, electromagnéticos y radiografías que permiten localizar áreas con problemas, reducción de espesor de pared, y fugas. También existen pruebas indirectas que permiten correlacionar con la corrosión algunas propiedades de calidad de agua y del suelo (en caso de tuberías enterradas) [14]. No obstante, el procesamiento de la información y datos obtenidos con estos equipos varía ampliamente, ya que dependen de la interpretación del operador.

1.2 Aplicación del modelo de lógica difusa (LD)

Para la implementación de LD se utilizó Fuzzy Logic Toolbox™, complemento del *software* MATLAB [15]. La aplicación de LD requiere tres pasos: selección de parámetros y construcción de funciones de pertenencia; definición de reglas; y *defuzzificación*.

1.2.1 Selección de parámetros y construcción de funciones de pertenencia [T4]

Dado que múltiples factores intervienen en la corrosión, el modelo propuesto se limita a dos parámetros: protección y envejecimiento, cuya estimación no requiere ningún equipo especializado. El parámetro de protección o revestimiento cuenta con 3 condiciones de calidad en el modelo:

- a. Bueno: recubrimiento con correcta adherencia y espesor requerido.
- b. Regular: recubrimiento con adherencia incompleta y espesor mínimo.
- c. Malo: Recubrimiento sin adherencia, no cumple espesor mínimo y presenta imperfecciones como ampollas, grietas, vacíos o picadoras. También aplica cuando se usa un recubrimiento que no cumple las normas técnicas de instalación de tuberías y accesorios metálicos para acueducto. En este parámetro se usó la función de pertenencia trapezoidal (figura 1).

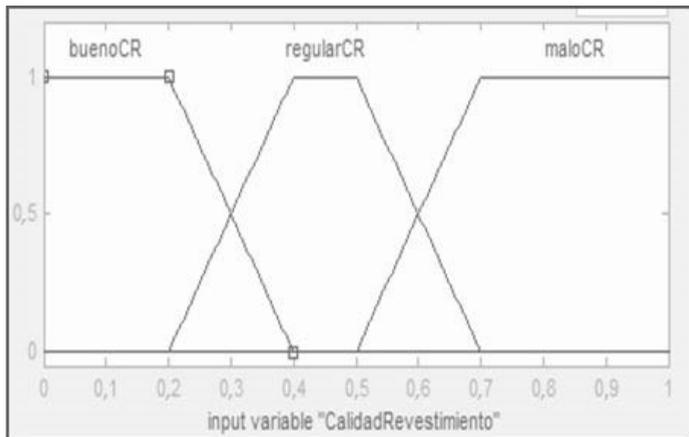


Figura 1. Función de pertenencia, parámetro 'revestimiento'

Fuente: elaboración propia.

El parámetro de envejecimiento tiene definidas dos condiciones de dimensión de las áreas de actividad de corrosión, que puede haber ocurrido o estar ocurriendo. Estas definiciones toman en cuenta la norma ASME B31G y una relación de proporción (ecuación 1).

- Alto: apariencias de corrosión localizadas en toda superficie del elemento, o pérdida de recubrimiento por corrosión.
- Bajo: apariencias de corrosión localizadas puntualmente en el elemento, sin presencia de corrosión visible.

En este parámetro también se utilizó la función de pertenencia trapezoidal como se muestra en la figura 2.

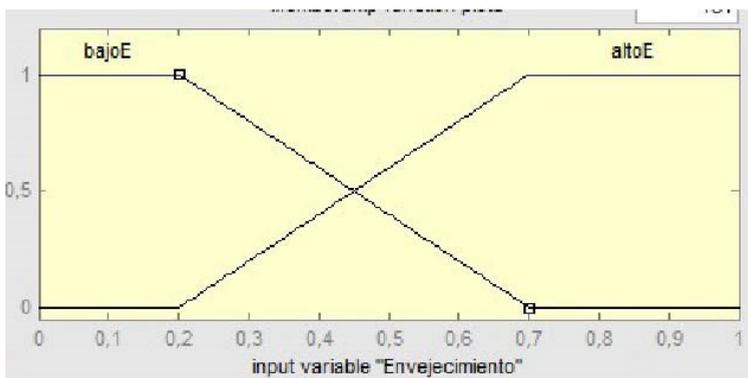


Figura 2. Función de pertenencia, parámetro 'envejecimiento'

Fuente: elaboración propia.

1.2.2 Definición de reglas

Para la construcción de las reglas de decisión se emplearon las combinaciones de las funciones de pertenencia de las entradas con apreciaciones basadas en la opinión de expertos, ingenieros y operarios de la empresa.

1.2.3 Defuzzificación

El sistema de inferencia difusa (FIS por sus iniciales en inglés) desarrollado permite obtener cualitativa y cuantitativamente el estado de corrosión de las tuberías expuestas al aire libre a partir de los parámetros y reglas definidos con anterioridad. Para este caso se empleó como método de *defuzzificación* el método del centroide, el cual obtiene un resultado único a partir de la función característica de salida [16]. La estructura básica del sistema se muestra en la figura 3.

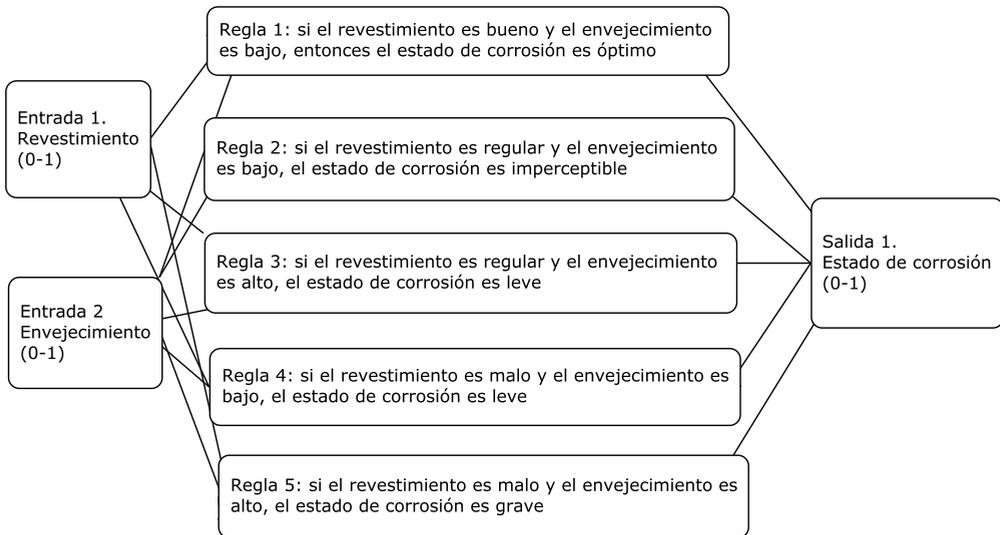


Figura 3. Esquema del sistema de lógica difusa

Fuente: elaboración propia.

Los estados de corrosión a partir de números difusos se basan en las variables lingüísticas ‘óptimo’, ‘imperceptible’, ‘leve’ y ‘grave’. Cada una de ellas fue representada por la función de pertenencia mostrada en la figura 4.

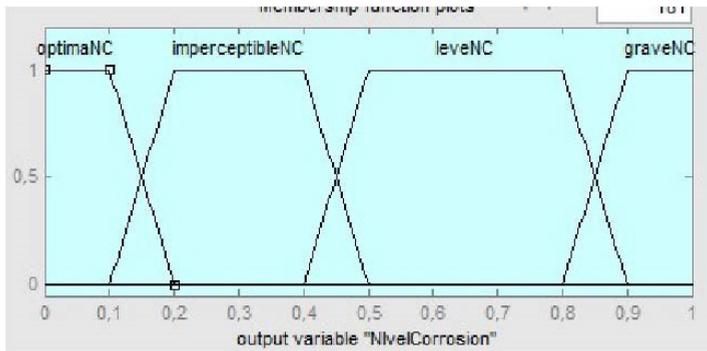


Figura 4. Función de pertenencia del parámetro de estado de corrosión

Fuente: elaboración propia.

2. RESULTADOS

A continuación, se muestra una superficie tridimensional con los valores de los estados de corrosión del FIS, según la calidad del revestimiento y la dimensión de corrosión (figura 5):

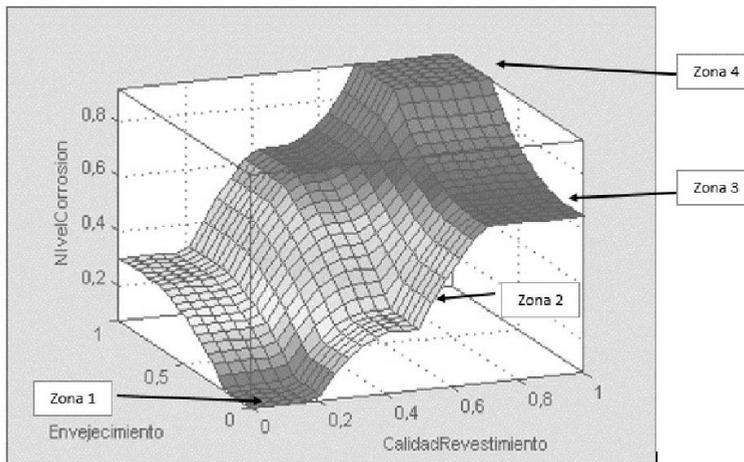


Figura 5. Visor de superficie de nivel corrosión

Fuente: elaboración propia.

A partir de esta imagen es posible hacer dos inferencias: primero, las zonas 1 - 4 representan los estados de corrosión ‘óptimo’, ‘imperceptible’, ‘leve’ y ‘grave’, respectivamente, sin intervalo de transición; y segundo, entre las zonas se encuentran los estados de corrosión con pertenencia a dos estados de corrosión. Estos datos demuestran que la metodología presentada brinda respuestas confiables del estado de corrosión de las estructuras metálicas.

En la tabla 1 se presenta el promedio de años de servicio para cada estación, de acuerdo con los datos analizados.

Tabla 1. Promedio de años de servicio por cada estado de corrosión

Estado de corrosión	Años de servicio
Óptimo	2
Imperceptible	5,8
Leve	9,6
Grave	17,1
Daño total	35

Fuente: elaboración propia.

Luego se realizó la regresión logarítmica de esta información y se obtuvo una función aproximada de los estados de corrosión en función del tiempo (figura 6).

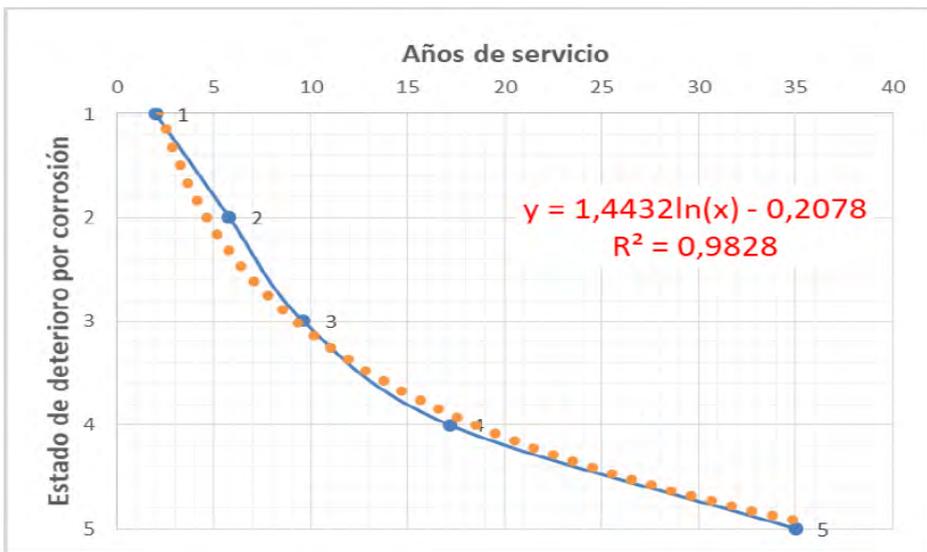


Figura 6. Línea de tendencia logarítmica

Fuente: elaboración propia.

Esta regresión tiene un coeficiente de determinación de 0,9828, valor cercano a 1, lo cual indica que la función representa el estado de corrosión en relación con los años de servicio en un 98,28 % por lo que la función obtenida es apropiada para este caso.

3. CONCLUSIONES

La implementación del FIS ha permitido incluir una herramienta de sencilla aplicación, que puede ajustarse si es preciso con información recopilada en los trabajos rutinarios

de mantenimiento preventivo o correctivo, y trabajos que relacionen variables con la corrosión. Además, provee información para las empresas prestadoras de servicio de agua potable, ya que permite determinar el grado de deterioro actual de las estructuras metálicas, habida cuenta de que las apreciaciones de estado de corrosión se limitan a las variables de calidad de revestimiento y de las dimensiones de las formas de corrosión presentes en la inspección visual.

La metodología propuesta se puede complementar con el análisis que se muestra en la tabla 2: esta ilustra la relación entre las variables de entrada y salida del algoritmo, lo cual permite una interpretación gráfica de los resultados antes y después del proceso del algoritmo.

Tabla 2. Interpretación gráfica del estado integral de la tubería basado en las dos variables de entrada

		Recubrimiento		
		Bueno	Regular	Malo
Envejecimiento	Bajo			
	Alto			

Fuente: elaboración propia.

De otra parte, también se propone utilizar la norma ASME B31G [17] como referencia para evaluar los distintos niveles de corrosión que puede tener el material, de tal manera que fuese posible estandarizar los tipos de corrosión (envejecimiento) que pudiera tener la tubería para aplicarlo como variable de entrada en el algoritmo. En este caso se realizan medidas directamente en la tubería y se obtiene un resultado de longitud o presión de falla, de acuerdo con cada caso. Al comparar estos resultados se puede llegar a tener una mejor aproximación del nivel alto o bajo de envejecimiento, que puede ser más preciso para utilizarlo como parámetro de entrada.

ASME B31G [17] propone tres niveles de evaluación que determinan el grado de oxidación en una pieza, lo cual permite determinar de manera analítica y cuantitativa si el envejecimiento es alto o bajo. Ello complementa el procedimiento y cumple el objetivo de tomar mediciones y decisiones de manera efectiva y rápida, con variables de entrada fáciles de medir. La evaluación nivel 0 trae consigo resultados conservadores de la integridad de la tubería respecto a la oxidación que posee; al establecer una relación entre estas dos variables se puede determinar si la tubería se ajusta al nivel bajo o alto (figura 7).

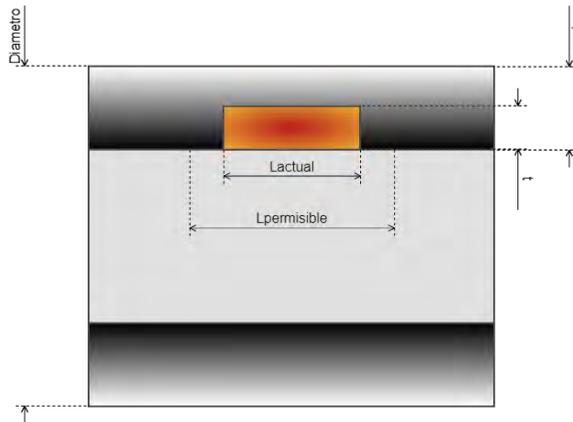


Figura 7. Características dimensionales de la tubería y la grieta

Fuente: elaboración propia.

Dado que la corrosión es un tema extenso, se podría seguir avanzando con base en estudios que permitan determinar el estado de corrosión actual con equipos sencillos. Además, se deberían realizar campañas de capacitación de corrosión en elementos metálicos al personal operativo y líderes de los procesos de mantenimiento de acueductos, a fin de brindar soluciones prácticas ante este fenómeno.

La evaluación 0 va a tomar como variables de entrada las características dimensionales de la tubería y traerá consigo, como resultado del proceso, la longitud permisible de la grieta que se ha generado. Luego de que se tenga esta longitud, se puede hacer una relación entre ambas longitudes (permisible y actual) para establecer de manera cuantitativa si el envejecimiento es alto o bajo (ecuación 1):

$$\frac{L_{actual}}{L_{permisible}} = L \quad (1)$$

Si, $0 < L \leq 0,5 \rightarrow$ envejecimiento bajo; y si $0,5 < L < 1 \rightarrow$ envejecimiento alto.

REFERENCIAS

- [1] N. Asrar, B. Mackay, Ø. Birketveit, M. Stipanicev, J. Jackson, A. Jenkins, D. Melot., J. Sheie, J. Vittonato. "La corrosión: La lucha más extensa". *Oilfield Review*, vol. 28, n.º 2, pp. 36-51, 2016.
- [2] R. Galván-Martínez, D. Cabrera-de la Cruz, A. Contreras, R. Orozco-Cruz. "A novel experimental arrangement for corrosion study of X60 pipeline steel weldments at turbulent flow conditions". *Corrosion Engineering, Science and Technology*, vol 51, n.º 6, pp. 80-91, 2016. DOI: 10.1080/1478422X.2015.1124598.

- [3] W. Smith, “Corrosión”, en *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales*, Madrid: McGraw-Hill Interamericana, 1998, pp. 718-777.
- [4] American Water Works Association AWWA, *C210-15 Liquid-Epoxy Coatings and Linings for Steel Water Pipe and Fittings*. Denver: American Water Works Association, 2015.
- [5] J. Rebollo, “Técnicas de protecciones de tuberías y accesorios”, en *Montaje de redes de distribución de agua*, Bogotá: Ediciones de la U, 2014.
- [6] J. Torres, E. Meraz y L. Veleva, “Evaluación de un sistema de protección catódica de un gasoducto enterrado”, *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, vol. 37, n.º 1, pp.19-26, 2017.
- [7] V. Tzatchkov, V. Alcocer, V. Bourguett y F. Arreguín. “Rehabilitación de tuberías de agua potable”, en: *Avances en la hidráulica de redes de distribución de agua potable*, México D.F.: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2014, pp. 363-376.
- [8] F. Pancorbo, *Corrosión, degradación y envejecimiento de los materiales empleados en la edificación*, Bogotá: Alfaomega, 2013.
- [9] G. Macioski, D. de Souza, A. Capraro y H. Medeiros. “Analysis of steel bars corrosion as a function of the environment Ph”. *Revista ALCONPAT*, vol. 6, n.º 3, pp. 223-234, 2016. DOI: 10.21041/rav6i3.153.
- [10] M. Fontana, “Corrosion Principles”, en *Corrosion Engineering*, Singapur: McGraw-Hill, 1987, pp. 12-38.
- [11] A. Lee. “Condition Assessment Technologies for water transmission and sewage conveyance systems”, en *UBC Sustainability scholar program 2017 & Metro Vancouver*, Vancouver, 2017. [internet]. Disponible en https://sustain.ubc.ca/sites/sustain.ubc.ca/files/Sustainability%20Scholars/2017_Sustainability_Scholars/Final_Reports/Condition%20Assessment%20Technologies%20for%20Water%20Transmission%20and%20Sewage%20Conveyance%20Systems_Lee_%202017%20SS.pdf.
- [12] G. Morales, *Introducción a la lógica difusa*, México D.F.: Cinvestav-IPN, 2002.
- [13] M. Biezma, D. Agudo y G. Barrón. “A Fuzzy Logic method: Predicting pipeline external corrosion rate”, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 163, pp. 56-62. 2018. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2018.05.001.
- [14] J. Thomson y L. Wang, “Technologies for condition assessment”, en *Condition Assessment of Ferrous Water Transmission and Distribution Systems*, Washington: EPA, 2009, pp. 14-85.
- [15] MathWorks, *Design and simulate fuzzy logic systems*. [internet]. Disponible en <https://la.mathworks.com/products/fuzzy-logic.html>.
- [16] R. Pérez, *Procesado y optimización de Espectros Raman mediante Técnicas de Lógica Difusa: Aplicación a la identificación de Materiales Pictóricos*, disertación doctoral,

Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, 2005.

- [17] The American Society of Mechanical Engineers, *Manual for Determining the Remaining Strength of Corroded Pipelines B31G – 2012*, Nueva York: ASME, 2012.