

# Grado de priorización para mantenimiento de equipo médico en un hospital por medio de lógica difusa y disposición aleatoria por el método de Montecarlo

Gonzalo Guillermo Martínez Oliva<sup>1</sup>, Gilberto Silos Chincoya<sup>1</sup>,  
Diego Antonio Flores Solorzano<sup>1</sup>, Francisco Javier García Camacho<sup>1</sup>,  
Jesús Alberto Vázquez Santacruz<sup>1</sup>, Agustín Ignacio Cabrera Llanos<sup>1</sup>,  
María Guadalupe Ramírez Sotelo<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Instituto Politécnico Nacional,  
Unidad Profesional Interdisciplinaria de Biotecnología,  
Departamento de Bioprocesos,  
México

<sup>2</sup> Instituto Politécnico Nacional,  
Unidad Profesional Interdisciplinaria de Biotecnología,  
Departamento de Bioingeniería,  
México

gmtzoliva29@gmail.com

**Resumen.** Los dispositivos médicos tienen un papel importante en cada una de las etapas de atención dentro de las unidades de salud. Por esta razón, es importante mantener una buena gestión del equipo médico con la finalidad de asegurar la calidad del servicio que estas unidades otorgan. En este trabajo se presenta un sistema difuso capaz de priorizar la necesidad de mantenimiento de equipo médico considerando cinco factores: la función del equipo, el área en donde se encuentra, la carga del hospital, el tiempo desde la última solicitud de mantenimiento y la distancia relativa hacia otra unidad médica. Estas variables se utilizan como entrada para el sistema difuso, diseñado por medio de las herramientas proporcionadas por LabVIEW. La salida del sistema es el grado de priorización de equipo médico, clasificado como: muy baja, baja, media y alta. Para estimar el comportamiento del sistema se realizó una simulación por medio de valores aleatorios de entrada para calcular la salida. Los datos obtenidos se utilizaron para un análisis estadístico de Montecarlo. Los resultados mostraron que el sistema tiende hacia valores medios de priorización. Este estudio demuestra la utilidad de los sistemas difusos para resolver problemas de gestión administrativa en los hospitales.

**Palabras clave:** Hospital, lógica difusa, LabVIEW, gestión de equipo médico, administración hospitalaria, Monte Carlo.

## Degree of Prioritization for Maintenance of Medical Equipment in a Hospital by means of Fuzzy Logic and Random Arrangement by the Monte Carlo Method

**Abstract.** Medical devices play an important role in each of the stages of care within health units. For this reason, it is important to maintain good management of the medical team in order to ensure the quality of service that these units provide. This paper presents a fuzzy system capable of prioritizing the need for maintenance of medical equipment considering five factors: the function of the equipment, the area where it is located, the load of the hospital, the time since the last maintenance request and the distance relative to another medical unit. These variables are used as input to the fuzzy system, designed using the tools provided by LabVIEW. The output of the system is the degree of prioritization of medical equipment, classified as: very low, low, medium and high. To estimate the behavior of the system, a simulation was carried out using random input values to calculate the output. The data obtained were used for a Monte Carlo statistical analysis. The results showed that the system tends towards average prioritization values. This study demonstrates the usefulness of fuzzy systems to solve administrative management problems in hospitals.

**Keywords:** Hospital, fuzzy logic, LabVIEW, medical team management, hospital administration, Monte Carlo.

### 1. Introducción

Dentro de un hospital, los equipos médicos tienen un papel de vital importancia para el diagnóstico, el tratamiento y la atención de los pacientes. Cada vez se diseñan dispositivos más completos y especializados, por la cual se deben de contar con un mantenimiento de calidad y así asegurar un excelente desempeño durante su interacción con el paciente.

Para lograr este objetivo se debe implementar una mejor planificación del programa de mantenimiento dentro de los hospitales para brindar una atención de calidad. La implementación de este sistema está a cargo del departamento de ingeniería de cada unidad de salud, de donde surge la necesidad de sistemas que faciliten esta tarea.

De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud [5], existen dos maneras principales de clasificar al mantenimiento de equipo médico: inspección y mantenimiento preventivo (IMP) y mantenimiento correctivo (MC). Dentro del mantenimiento preventivo se consideran todas aquellas actividades que tienen como objetivo asegurar la funcionalidad de los equipos, así como prevenir posibles fallas y de esta manera prolongar la vida útil del dispositivo. La OMS también recomienda que cada una de las instituciones de salud cuente con el diseño de un programa de mantenimiento de equipo médicos de acuerdo con sus necesidades.

Uno de los métodos más utilizados para el diseño de sistemas de gestión de equipo médico es el de Fennigkoh-Smith, que permite relacionar tres factores principales: la función del equipo, riesgo físico para el paciente y los requisitos de mantenimiento [4]. Este sistema propone un valor de prioridad llamada Gestión de Equipo (GE) que se calcula como la suma de la calificación asignada al dispositivo médico:

**Tabla 1.** Equipment Function. Estos valores están divididos en la importancia que tiene el equipo médico de acuerdo con la función que se desempeña en el hospital [2].

EF	Numeric Value
Therapeutic – Life support	10
Therapeutic – Surgical or Intensive Care	9
Therapeutic – Physical Therapy or Treatment	8
Diagnostic – Surgical or Intensive Care Monitoring	7
Diagnostic – Other physiological monitoring	6
Analytical – Laboratory	5
Analytical – Computer and related	3
Miscellaneous – Patient related	2
Miscellaneous – Non patient related	1

**Tabla 2.** Location of equipment. Valores asignados al lugar de uso dentro del hospital [2].

L	Numeric Value
Anesthetizing	5
Critical Care Areas, Operational Rooms	4
Wet Locations/Labs/Exam Areas	3
General Patient Care Areas	2
Non-Patient Care Areas	1

**Tabla 3.** Hospital Load. Valores asignados basado en la carga del hospital (número de camas) [2]

HL [beds]	Numeric Value	HL [beds]	Numeric Value
>550	12	251-300	6
501-550	11	201-250	5
451-500	10	151-200	4
401-450	9	101-150	3
351-400	8	51-100	2
301-350	7	0-50	1

GE= Función del equipo + Riesgo + Requisitos de Mantenimiento.

Otro modelo utilizado para la priorización del mantenimiento es el de Wang-Levenson quienes reinterpretaron el criterio de la función del equipo, implementado anteriormente por Fennigkoh-Smith, como la misión crítica [6]. De igual manera,

**Tabla 4.** Time. Valores asignados desde la última solicitud de mantenimiento. El tiempo en el que la solicitud de mantenimiento fue emitida también considera el lapso en que el equipo está fuera de servicio [2].

T [days]	Numeric Value	T [days]	Numeric Value
>10	22	5	10
10	20	4	8
9	18	3	6
8	16	2	4
7	14	1	2
6	12		

**Tabla 5.** Distance to nearest alternative. Valores asignados a la distancia más cercana a un hospital que cuenta con el mismo equipo médico [2].

D [km]	Numeric Value	D [km]	Numeric Value
>90	26	20.1-30	12
80.1-90	24	10.1-20	10
70.1-80	22	5.1-10	8
60.1-70	20	2.1-5	6
50.1-60	18	1.1-2	4
40.1-50	16	0-1	2
30.1-40	14		

renombraron el valor de prioridad como el índice de valor de equipo proponiendo la siguiente ecuación:

$$\#GE = \text{Misión crítica} + 2 \cdot \text{Riesgo} + 2 \cdot \text{Requisitos de Mantenimiento.}$$

Wang y Levenson también introdujeron el valor de tasa de uso para representar la urgencia de reparación del equipo, por lo cual se ajusta la ecuación de la siguiente manera:

$$\#GE = (\text{Misión crítica} + 2 \cdot \text{Requisitos de Mantenimiento}) \cdot \text{Tasa de uso} + 2 \cdot \text{Riesgo.}$$

Actualmente, existen muchas variantes del algoritmo de Wang-Levenson lo que permite seguir desarrollando sistemas que mejoren el desempeño de la administración de equipo médico dentro de las unidades de salud.

## 2. Metodología

La metodología desarrollada en este trabajo permite obtener un grado de priorización para cualquier solicitud de mantenimiento de equipo médico e indica la importancia relativa de esta solicitud, el sistema permite determinar el grado de priorización más

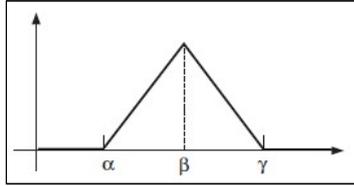


Fig. 1. Función Triangular.

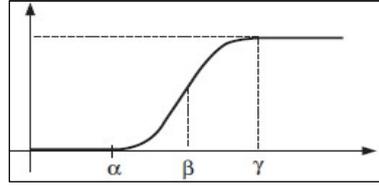


Fig. 2. Función Sigmoidal.

importante basado en las necesidades médicas del hospital y la seguridad del paciente. Los parámetros de diseño que permiten la importancia de la solicitud son basados en los siguientes criterios:

El número de prioridad de cada solicitud se calcula mediante el algoritmo de control difuso cuyo rango de valores se encuentra dentro del intervalo de 1 a 10 que se desarrolla en este trabajo, al número de prioridad más alto se le da servicio primero.

## 2.1. Etapas del control difuso

### 2.1.1. Fusificación

Esta etapa pondera a cada una de las entradas del sistema, con sus funciones de membresía definidas, en un rango de 0 a 1. Donde 0 representa la mínima pertenencia y 1 la máxima. Los conjuntos clásicos se representan como funciones de membresía o funciones de pertenencia esta descrita como  $\mu_A(x): U \rightarrow \{0,1\}$  es definido como 0 si x no se encuentra en A y si x toma el valor de 1 se encuentra en el elemento A. En los conjuntos difusos a x se le asigna un grado de pertenencia dentro del intervalo de [0,1].

Las funciones de membresía utilizadas en este trabajo son las siguientes:

#### Función Triangular

La representación de la función triangular se muestra a continuación.

$$\mu_T(x) = \begin{cases} 0 & x < \alpha, \\ \frac{x - \alpha}{\beta - \alpha} & \alpha \leq x \leq \beta, \\ \frac{x - \gamma}{\beta - \gamma} & \beta \leq x \leq \gamma, \\ 0 & x > \gamma. \end{cases}$$

#### Función Sigmoide

La representación de la función triangular esta descrita como:

$$\mu_S(x) = \begin{cases} 0, & x < \alpha, \\ 2 \left( \frac{x - \alpha}{m - \alpha} \right)^2, & \alpha \leq x \leq \beta, \\ 1 - 2 \left( \frac{x - \alpha}{m - \alpha} \right)^2, & \beta \leq x \leq \gamma, \\ 1, & x > \gamma. \end{cases}$$

### 2.1.2. Reglas de inferencia

Las reglas de inferencia toman como fundamento el concepto de variable lingüística para describir las entradas y salidas del sistema. Una variable convencional es numérica y precisa. No es capaz de soportar la vaguedad.

En los sistemas difusos, una variable lingüística está formada por palabras, frases o lenguaje artificial que son menos precisos que los números. Proporciona los medios de caracterización aproximada de fenómenos complejos o mal definidos, por mencionar algunas variables lingüísticas “Muy”, “Mucho”, “Poco”, “Menos”.

La base de reglas es esencialmente la estrategia de control del sistema. Generalmente se obtiene de conocimiento de reglas o heurística y expresado como un conjunto de reglas SI – ENTONCES.

Las reglas son basadas en el concepto de inferencia difusa y los antecedentes y consecuentes están asociados con variables lingüísticas. Se considera A y B como conjuntos difusos de entrada y salida,  $x$  es A haciendo referencia a los antecedentes, así como  $y$  es B como las consecuencias:

$$R: (x = A) \rightarrow (y = B) \text{ IF } x \text{ is } A \text{ THEN } y \text{ e } B.$$

### 2.1.3. Defusificación

Al diseñar todas las reglas difusas en la etapa anterior se obtiene una conclusión difusa, una variable lingüística cuyos valores han sido asignados por los diferentes grados de pertenencia. La conclusión es un conjunto difuso, sin embargo, se necesita un valor escalar que corresponda a estos grados de pertenencia.

El método de defusificación se realizó utilizando el método del centroide, conocido como Centro de Área, el cual calcula el centro de gravedad del polígono (curva de respuesta) que se generó mediante la etapa de inferencia, se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$f(y) = \frac{\sum \mu(y) \cdot y}{\sum \mu(y)}.$$

## 2.2. Algoritmos de programación

El grado de priorización fue calculado con lógica difusa por medio del software LabVIEW con la herramienta Fuzzy System Designer de la sección Control and Simulation. Para realizar un análisis de priorización se tomaron en consideración las entradas que teóricamente dan funcionalidad óptima a un hospital: Funcionamiento del equipo, área de uso, la carga de trabajo en el hospital (número de camas), tiempo desde el último mantenimiento, la distancia al hospital más cercano.

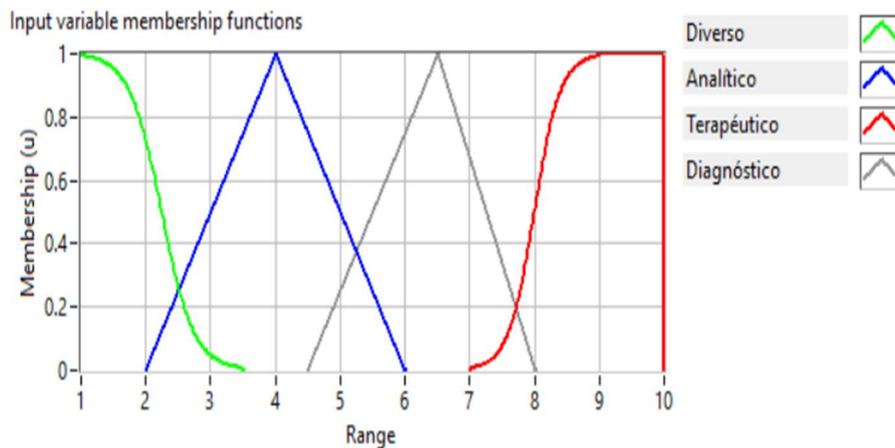
Estas variables fueron usadas como valores de entrada difusas para otorgar una salida pertinente al estado en que se encuentre un hospital.

**Tabla 6.** Parámetros de diseño de funciones de membresía de entrada de función del equipo.

Función de Membresía	Forma	Puntos / Intervalo
Diverso	Sigmoide	[0, 0, 1, 3.5]
Analítico	Triangular	[2, 4, 6]
Diagnóstico	Triangular	[4.5, 6.5, 8]
Terapéutico	Sigmoide	[7, 9, 10, 10]

**Tabla 7.** Parámetros de diseño de funciones de membresía de lugar de uso.

Función de Membresía	Forma	Puntos / Intervalo
Ninguno	Sigmoide	[1, 1, 1.25, 2.25]
General	Triangular	[1.5, 2.5, 3.25]
Áreas de exámenes / Húmedas	Triangular	[2.75, 3.5, 4.5]
Crítico	Sigmoide	[3.75, 4.75, 5, 5]



**Fig. 3.** Funciones de membresía de función de equipo.

### 2.3. Diseño de las funciones de membresía de entrada y salida

#### Función del equipo

Esta variable se refiere al papel que cumple el equipo. La función diversa se refiere a la relación con el paciente; analítica desempeñando su función en el laboratorio clínico o como equipo de cómputo; diagnóstico para supervisión fisiológica presente o no en cirugía y, finalmente de función terapéutica como un equipo en el que su funcionamiento dependa la vida del paciente en cirugía o sala de cuidados intensivos y terapia o un tratamiento. Esta variable tiene gran peso dentro del sistema difuso.

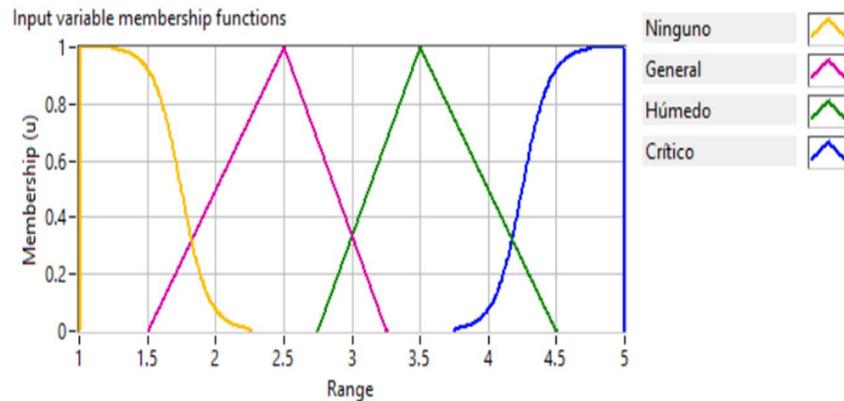


Fig. 4. Funciones de membresía de lugar de uso.

Tabla 8. Parámetros de diseño de funciones de membresía de carga del hospital.

Función de Membresía	Forma	Puntos / Intervalo
Muy poca	Sigmoide	[1, 1, 2, 4.5]
Poca	Triangular	[2.75, 5, 7.25]
Promedio	Triangular	[6.25, 8, 10.25]
Mucha	Sigmoide	[8.5, 10.5, 12, 12]

### Área

Esta variable hace referencia al área en la que se necesita el equipo, empezando donde no hay necesidad del cuidado del paciente, áreas de cuidado general, laboratorios o áreas donde se realizan exámenes; áreas de cuidado crítico o salas de operación y, por último, las áreas críticas citando como las áreas de anestesia o en Qx. Esta variable tiene gran peso dentro del sistema difuso.

### Carga de trabajo

Se refiere al número de camas designadas para dicho equipo donde muy pocas son de 0 a 200 camas, poca de 201 a 350, promedio de 351 a 500 y mucha de 501 a mayor de 550.

### Tiempo desde el último mantenimiento

Es el tiempo desde el último mantenimiento dado al equipo médico, dando un intervalo de d a 7 días para reciente, de 5 a 12 días para hace poco, de 10 a 18 días para bastante y de 15 a 22 días para mucho.

### Distancia

Se refiere a la distancia en kilómetros con respecto al hospital más cercano que cuente con el mismo servicio, siendo muy cerca de 2 a 8 km, cerca de 6 a 15 km, retirado de 12 a 22 km, lejos de 19 a mayor a 26 km.

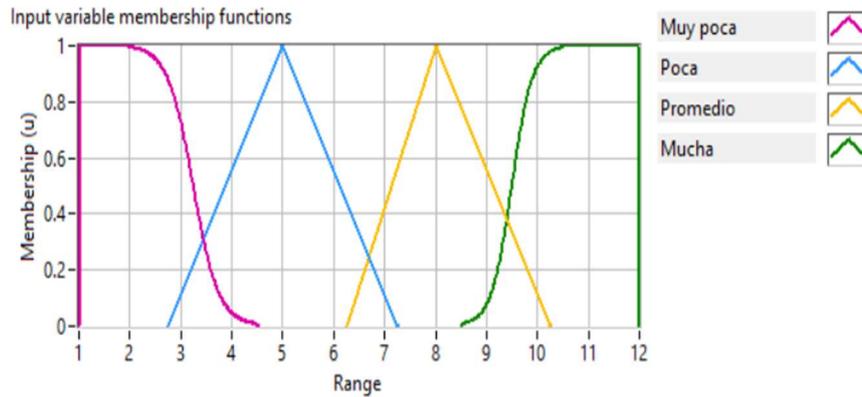


Fig. 5. Funciones de membresía de carga del hospital.

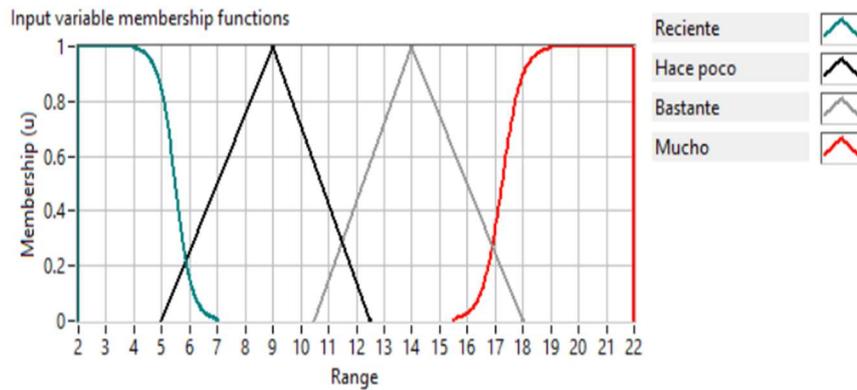


Fig. 6. Funciones de membresía del tiempo desde el último mantenimiento.

Tabla 9. Parámetros de diseño de funciones de membresía del tiempo desde el último mantenimiento.

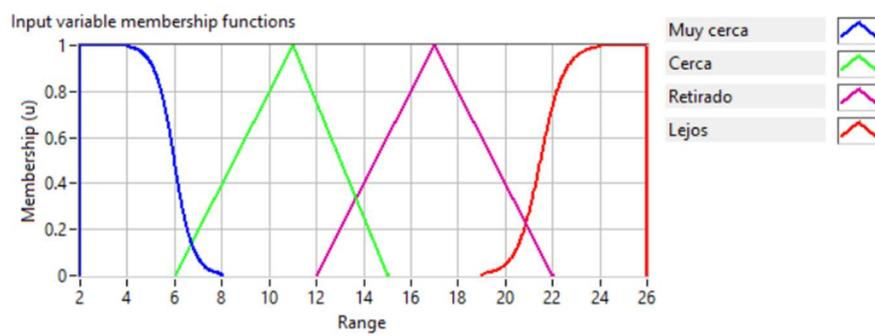
Función de Membresía	Forma	Puntos / Intervalo
Reciente	Sigmoide	[2, 2, 4, 7]
Hace poco	Triangular	[5, 9, 12.5]
Bastante	Triangular	[10.5, 14, 18]
Mucho	Sigmoide	[15.5, 19, 22, 22]

### Prioridad

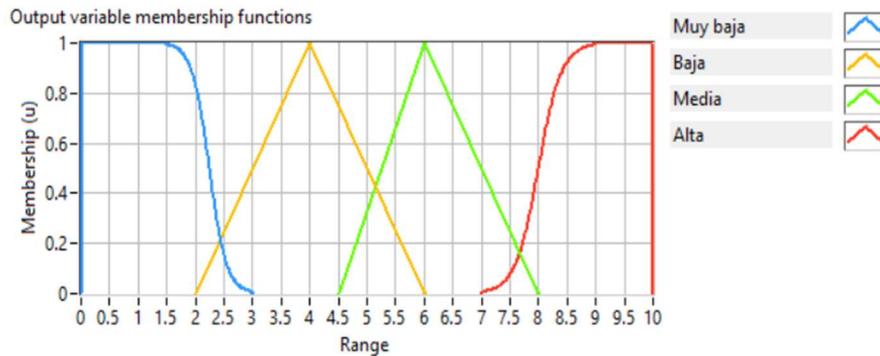
Por último, tenemos la salida que es el grado de priorización de mantenimiento que recibirá el equipo médico teniendo los siguientes intervalos:

**Tabla 10.** Parámetros de diseño de funciones de membresía de la distancia entre hospitales cercanos.

Función de Membresía	Forma	Puntos / Intervalo
Muy cerca	Sigmoide	[2, 2, 4, 8]
Cerca	Triangular	[6, 11, 15]
Retirado	Triangular	[12, 17, 22]
Lejos	Sigmoide	[19, 24, 26, 26]



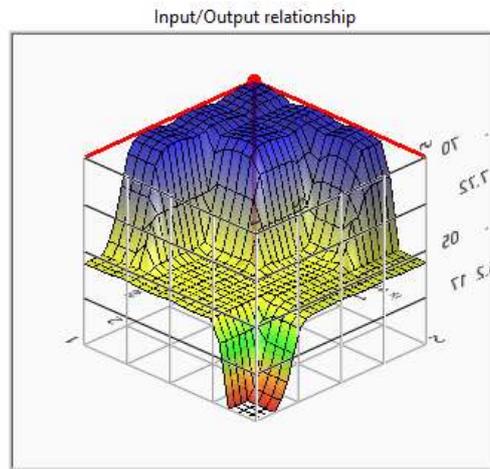
**Fig. 7.** Funciones de membresía de la distancia entre hospitales cercanos.



**Fig. 8.** Funciones de membresía del grado de priorización.

**Tabla 11.** Parámetros de diseño de funciones de membresía de grado de priorización de equipo médico.

Función de Membresía	Forma	Puntos / Intervalo
Muy baja	Sigmoide	[0, 0, 1.5, 3]
Baja	Triangular	[2, 4, 6]
Media	Triangular	[4.5, 6, 8]
Alta	Sigmoide	[7, 9, 10, 10]



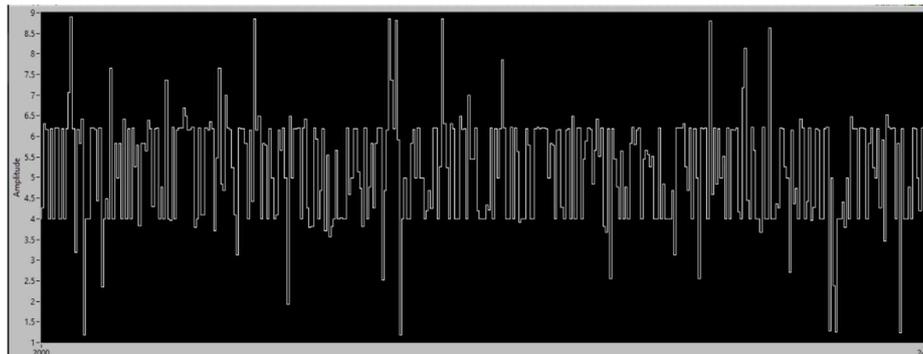
**Fig. 9.** Curva de respuesta del sistema.

**Tabla 12.** Diseño de reglas de inferencia.

1. IF 'Función del equipo' IS 'Diverso' AND 'Área' IS 'Ninguno' AND 'Carga de trabajo' IS 'Muy poca' AND 'Tiempo desde el mantenimiento' IS 'reciente' AND 'Distancia' IS 'muy cerca' THEN 'Prioridad' IS 'muy baja'
2. IF 'Función del equipo' IS 'Diverso' AND 'Área' IS 'Ninguno' AND 'Carga de trabajo' IS 'Muy poca' AND 'Tiempo desde el mantenimiento' IS 'reciente' AND 'Distancia' IS 'cerca' THEN 'Prioridad' IS 'muy baja'
3. IF 'Función del equipo' IS 'Diverso' AND 'Área' IS 'Ninguno' AND 'Carga de trabajo' IS 'Muy poca' AND 'Tiempo desde el mantenimiento' IS 'reciente' AND 'Distancia' IS 'retirado' THEN 'Prioridad' IS 'baja'
4. IF 'Función del equipo' IS 'Diverso' AND 'Área' IS 'Ninguno' AND 'Carga de trabajo' IS 'Muy poca' AND 'Tiempo desde el mantenimiento' IS 'reciente' AND 'Distancia' IS 'lejos' THEN 'Prioridad' IS 'baja'
5. IF 'Función del equipo' IS 'Diverso' AND 'Área' IS 'Ninguno' AND 'Carga de trabajo' IS 'Muy poca' AND 'Tiempo desde el mantenimiento' IS 'hace poco' AND 'Distancia' IS 'muy cerca' THEN 'Prioridad' IS 'muy baja'
6. IF 'Función del equipo' IS 'Diverso' AND 'Área' IS 'Ninguno' AND 'Carga de trabajo' IS 'Muy poca' AND 'Tiempo desde el mantenimiento' IS 'hace poco' AND 'Distancia' IS 'cerca' THEN 'Prioridad' IS 'muy baja'
7. IF 'Función del equipo' IS 'Diverso' AND 'Área' IS 'Ninguno' AND 'Carga de trabajo' IS 'Muy poca' AND 'Tiempo desde el mantenimiento' IS 'hace poco' AND 'Distancia' IS 'retirado' THEN 'Prioridad' IS 'baja'

## 2.4. Reglas de inferencia

Para determinar el grado de priorización se utilizan reglas para comparar las variables lingüísticas de entrada fusificadas, y posteriormente, evaluar las



**Fig. 10.** Interfaz de usuario del programa en operación.

**Tabla 13.** Relación del rango con el número de intervalo.

Intervalo	Rango
1	[1.2, 1.9]
2	[1.91, 2.62]
3	[2.63, 3.33]
4	[3.34, 4.05]
5	[4.06, 4.76]
6	[4.77, 5.47]
7	[5.48, 6.19]
8	[6.2, 6.9]
9	[6.91, 7.62]
10	[7.63, 8.33]
11	[8.34, 9.05]

combinaciones por medio de sentencias SI-ENTONCES (IF-THEN), donde cada regla se va etiquetando en función a los valores de pertenencia otorgados.

## 2.5. Defusificación

Esta es la etapa final que consiste en obtener una salida ponderada en los rangos de priorización elegidos de 1 a 10, por medio de una superficie generada en comparación de dos entradas en los ejes  $x$  y  $y$  y la salida en el eje  $z$ . Un ejemplo de las superficies donde se observa el comportamiento se muestra en la Fig. 9.

## 2.6. Método Monte Carlo

La simulación del sistema que se presenta en el desarrollo de este trabajo se realizó mediante el método Monte Carlo. La simulación Monte Carlo permite la creación de

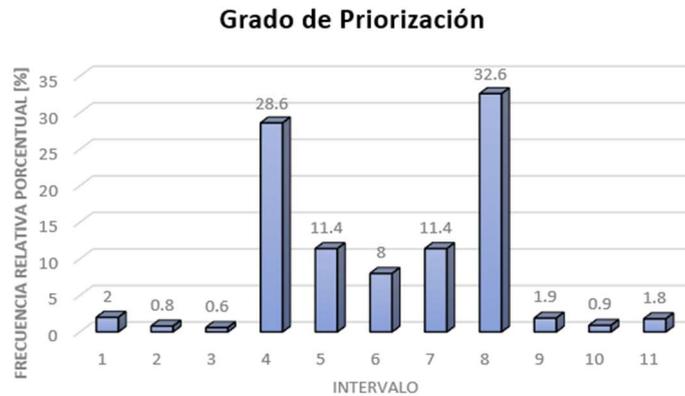


Fig. 11. Resultados de grado de priorización de mantenimiento de equipo médico, primera simulación.

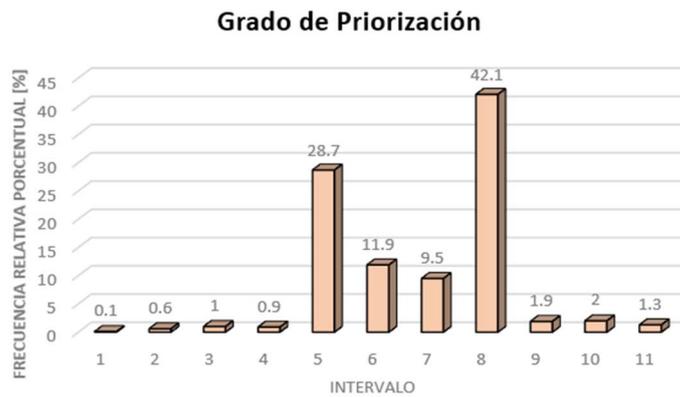


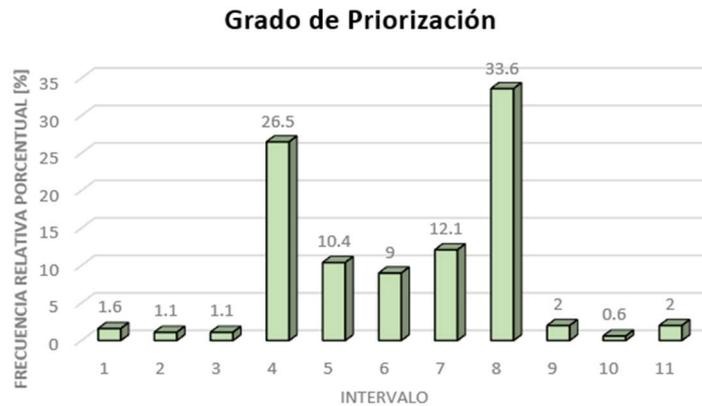
Fig. 12. Resultados de grado de priorización de mantenimiento de equipo médico, segunda simulación.

un modelo de estimación matemática mediante un análisis frecuencial utilizando una muestra de números aleatorios divididos por rangos. Se generaron 1000 diferentes números aleatorios para cada parámetro, los cuales se introducen al sistema difuso para generar una salida de la misma magnitud.

### 3. Resultados

#### 3.1. Simulación en LabVIEW

Se realizaron tres simulaciones diferentes de 1000 iteraciones aleatorias para evaluar la eficiencia del sistema y poder analizar los resultados. Los números aleatorios fueron



**Fig. 13.** Resultados de grado de priorización de mantenimiento de equipo médico, tercera simulación.

generados para los rangos de cada entrada. Dichas iteraciones fueron capturadas por medio del ploteo de LabVIEW.

### 3.2. Análisis estadístico

Se generó una hoja de datos en Excel a partir de la simulación en LabVIEW con los cuales se realizó el análisis de Monte Carlo. Se establecieron 11 intervalos definidos por el número de datos, los cuales se utilizaron para clasificar cada una de las salidas.

Se realizaron tres gráficas, una por cada simulación, de la frecuencia relativa porcentual ( $\%fr$ ) para cada uno de los intervalos. Con este análisis se puede realizar una comparación para determinar la respuesta probable del sistema.

Las tres simulaciones concentraron el mayor porcentaje de valores en el intervalo 8, correspondiente a un rango de [6.2, 6.9]. También se obtuvo una ligera tendencia hacia el intervalo 4 y 5, dentro del rango [3.34, 4.76].

## 4. Conclusiones

El sistema difuso muestra un comportamiento concentrado a valores bajos y medios de priorización de mantenimiento de equipo médico, esto debido al peso dado a las variables de entrada: función de equipo y área.

En este estudio, se logró demostrar la eficiencia de la lógica difusa ante la lógica tradicional, plantando las bases para la implementación del método en futuras plataformas de lectura de priorización en hospitales de la zona metropolitana.

El uso de lógica difusa tiene aplicaciones eficientes en el campo de la administración para resolver problemas convencionales con principios de inteligencia artificial.

## **Referencias**

1. Cabrera-Llanos, A.I., Ortiz-Arango, F., Cruz-Aranda, F.: Un modelo de minimización de costos de mantenimiento de equipo médico mediante lógica difusa. *Revista Mexicana de Economía y Finanzas Nueva Época*, 14(3), pp. 379–396 (2019)
2. Hamdi, N., Oweis, R., Zraiq, H., Sammour, D.: An intelligent healthcare management system: A new approach in workorder prioritization for medical equipment maintenance requests. *Journal of Medical Systems*, 36(2), pp. 557–567 (2010)
3. Jantzen, J.: *Foundations of fuzzy control*. John Wiley & Sons (2007)
4. Masmoudi, M., Houria, Z., Hanbali, A., Masmoudi, F.: Decision support procedure for medical equipment maintenance management. *Journal of Clinical Engineering*, 41(1), pp. 19–29 (2016)
5. Organización Mundial de la Salud: *Introducción al programa de mantenimiento de equipos médicos*. In: *Serie de Documentos Técnicos de la OMS sobre Dispositivos Médicos* (2012)
6. Tawfik, B., Ouda, B., El Samad, Y.: A fuzzy logic model for medical risk classification. *Journal of Clinical Engineering*, 38(4), pp. 185–190 (2020)