

**TRABAJO DE GRADO
MODALIDAD DE INVESTIGACIÓN**

**CONSTRUCCIÓN DE UN ALGORITMO DE SELECCIÓN DE VENTILADORES
CENTRÍFUGOS INDUSTRIALES, MEDIANTE LÓGICA DIFUSA**



Por:
Carlos Alberto Cifuentes Martinez



**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
VILLAVICENCIO
2025**

**TRABAJO DE GRADO
MODALIDAD DE INVESTIGACIÓN
CONSTRUCCIÓN DE UN ALGORITMO DE SELECCIÓN DE VENTILADORES
CENTRÍFUGOS INDUSTRIALES, MEDIANTE LÓGICA DIFUSA**



Por:
Carlos Alberto Cifuentes Martinez

Documento final presentado como opción de grado para optar al título profesional de
Ingeniero Mecánico

Aprobado por:
Mg. Carlos Fernando Luna Carlosama
Director

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
VILLAVICENCIO
2025**

AUTORIDADES ACADÉMICAS

P. Álvaro José ARANGO RESTREPO, O.P.
Rector General

P. Mauricio Antonio CORTÉS GALLEGO, O.P.
Vicerrector Académico General

P. José Antonio BALAGUERA CEPEDA, O.P.
Rector Seccional Villavicencio

P. Adrián Mauricio GARCÍA PEÑARANDA, O.P.
Vicerrector Académico Seccional Villavicencio

Mg. Julieth Andrea SIERRA TOBÓN
Secretaria General Seccional Villavicencio

PhD. Handel Andres MARTINEZ SARACHE
Decano Facultad de Ingeniería Mecánica

DEDICATORIA

A mi familia, por su apoyo incondicional, por creer en mis sueños y estar a mi lado en cada paso de mi formación profesional. Gracias por ser mi motivación constante y por enseñarme que con esfuerzo y dedicación todo es posible.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco también al profesor Jerson Maldonado por haber brindado la idea inicial que dio origen a este proyecto. Su visión y aportes fueron clave para la concepción y el enfoque del trabajo realizado. Durante el desarrollo de este proyecto. Su orientación, conocimientos y dedicación fueron fundamentales para alcanzar los objetivos propuestos.

RESUMEN

En entornos industriales, la selección eficiente de ventiladores centrífugos en la industria es crucial para garantizar condiciones operativas óptimas. Sin embargo, los esquemas generales de selección carecen de un método intuitivo, automática y amigable, para el solicitante del equipo. En respuesta, este trabajo propone desarrollar un modelo basado en lógica difusa utilizando Python como lenguaje de programación, para mejorar el proceso de selección de ventiladores industriales tomando como base los principios presentados en catálogos, considerando variables de entrada como área disponible, presión, caudal y temperatura requeridos. La investigación se fundamenta en la necesidad de superar las limitaciones de los enfoques estáticos y se apoya en estudios que destacan la importancia de considerar las complejas interrelaciones entre variables operativas. La recopilación bibliográfica y el desarrollo del modelo basado en lógica difusa constituyen pasos fundamentales para comprender y abordar la complejidad del proceso de selección de maquinaria industrial. La validación del modelo se hará mediante la comparación de la metodología de catálogo, con respecto al algoritmo propuesto, asegurando su uso en procesos de selección. Se espera que este enfoque no solo seleccione el equipo requerido, sino que también contribuya a entornos más didácticos y procesos de selección más atractivos para un incremento de interés.

Palabras Clave: Maquinaria, industrial, selección, equipos, lógica, difuso, entornos, industrial, sistema, validación, modelo.

ABSTRACT

In industrial environments, efficient selection of centrifugal fans in industry is crucial to ensure optimal operating conditions. However, general selection schemes lack an intuitive, automatic, and user-friendly method for the equipment requester. In response, this work proposes to develop a model based on fuzzy logic using Python as a programming language, to improve the selection process of industrial fans based on the principles presented in catalogues, considering input variables such as available area, pressure, flow rate and required temperature. The research is based on the need to overcome the limitations of static approaches and is supported by studies that highlight the importance of considering the complex interrelations between operational variables. The bibliographic collection and the development of the fuzzy logic-based model constitute fundamental steps to understand and address the complexity of the selection process of industrial machinery. The validation of the model will be done by comparing the catalogue methodology with respect to the proposed algorithm, ensuring its use in selection processes. This approach is expected to not only select the required equipment but also contribute to more educational environments and more attractive selection processes for increased interest.

Keywords: Machinery, industrial, selection, equipment, logic, fuzzy.

CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	11
2.	FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	12
3.	JUSTIFICACIÓN.....	13
4.	OBJETIVOS.....	14
4.1.	OBJETIVO GENERAL.....	14
4.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	14
5.	ALCANCE.....	15
6.	MARCO DE REFERENCIA	16
6.1.	MARCO TEÓRICO	16
6.2.	MARCO CONCEPTUAL.....	25
6.3.	ESTADO DEL ARTE.....	27
7.	METODOLOGÍA.....	29
8.	CAPÍTULO 1: DESARROLLO DEL ALGORITMO	33
9.	CAPÍTULO 2: RESULTADOS OBTENIDOS.....	38
10.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	53
11.	RESULTADOS E IMPACTOS	57
12.	CONCLUSIONES	59
12.1.	CONCLUSIONES	59
12.2.	TRABAJOS FUTUROS.....	60
13.	BIBLIOGRAFÍA.....	61

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Variables lingüísticas.....	34
Tabla 2. Reglas difusas aplicadas en el algoritmo difuso.....	36
Tabla 3. Reglas difusas aplicadas en el algoritmo difuso.....	37
Tabla 4. Comparación de Selección de Ventiladores Centrífugos entre Lógica Difusa y Método de Chicago Blower para una Presión de 10 SP y un Área de 800 in ²	38
Tabla 5. Comparación de Selección de Ventiladores Centrífugos entre Lógica Difusa y Método de Chicago Blower para una Presión de 5 SP y un Área de 600 in ²	39
Tabla 6. Comparación de Selección de Ventiladores Centrífugos entre Lógica Difusa y Método de Chicago Blower para una Presión de 26 SP y un Área de 1400 in ² ..	40
Tabla 7. Comparación de Selección de Ventiladores Centrífugos entre Lógica Difusa y Método de Chicago Blower para una Presión de 36 SP y un Área de 2000 in ² ..	41
Tabla 8. Comparación de Selección de Ventiladores Centrífugos entre Lógica Difusa y Método de Chicago Blower para un caudal de 2000 CFM y un Área de 800 in ² .	42
Tabla 9. Comparación de Selección de Ventiladores Centrífugos entre Lógica Difusa y Método de Chicago Blower para un caudal de 4000 CFM y un Área de 1000 in ²	43
Tabla 10. Comparación de Selección de Ventiladores Centrífugos entre Lógica Difusa y Método de Chicago Blower para un caudal de 7000 CFM y un Área de 2000 in ²	44
Tabla 11. Comparación de Selección de Ventiladores Centrífugos entre Lógica Difusa y Método de Chicago Blower para una presión de 4 SP y un caudal de 800 CFM.	45
Tabla 12. Comparación de Selección de Ventiladores Centrífugos entre Lógica Difusa y Método de Chicago Blower para una presión de 15 SP y un caudal de 1600 CFM.	46
Tabla 13. Comparación de Selección de Ventiladores Centrífugos entre Lógica Difusa y Método de Chicago Blower para una presión de 36 SP y un caudal de 7000 CFM.	47
Tabla 14. Porcentajes Promedio de Diferencia entre Lógica Difusa y Chicago Blower para potencia del equipo seleccionado, para caudal variante, presión y área constante.....	48
Tabla 15. Porcentajes Promedio de Diferencia entre Lógica Difusa y Chicago Blower para potencia del equipo seleccionado, para presión variante, caudal y área constante.....	49
Tabla 16. Porcentajes Promedio de Diferencia entre Lógica Difusa y Chicago Blower para potencia del equipo seleccionado, para área variante, caudal y presión constante.....	49
Tabla 17. Desviación estándar de los ventiladores seleccionados.....	50
Tabla 18. Matriz de confusión para valores de presión y área constante con caudal variante.	53
Tabla 19. Métricas calculadas para caudal variante, presión y área constante....	54
Tabla 20. Matriz de confusión para valores de caudal y área constante con presión variante.	54
Tabla 21. Métricas calculadas para caudal y área constante con presión variante.	54

Tabla 22. Matriz de confusión para valores de presión y caudal constante con área variante.	55
Tabla 23. Métricas calculadas para presión y caudal constante con área variante.	55
Tabla 24. Métricas calculadas contabilizando todos los casos.....	55
Tabla 25. Resultados obtenidos.....	58
Tabla 26. Impactos esperados.	58

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Grado de pertenencia de conjuntos trapezoidal y singleton.....	17
Figura 2. Conjuntos $\mu_A(x)$ y $\mu_B(x)$	18
Figura 3. Unión de los conjuntos $\mu_A(x)$ y $\mu_B(x)$	19
Figura 4. Intersección de los conjuntos $\mu_A(x)$ y $\mu_B(x)$	19
Figura 5. Representación del inverso del conjunto difuso $\mu_A(x)$	20
Figura 6. <i>Gráfica de la función Gamma</i>	21
Figura 7. <i>Gráfica de la función L</i>	21
Figura 8. <i>Gráfica de la función triangular</i>	22
Figura 9. Gráfica de la función trapezoidal.....	22
Figura 10. <i>Gráfica de la función S</i>	23
Figura 11. <i>Gráfica de la función Z</i>	23
Figura 12. <i>Gráfica de la función Gaussiana</i>	24
Figura 13. Metodología de selección de chicao blower ICF, bulletin 105.....	27
Figura 14. Conjuntos difusos y variables lingüísticas en la variable de entrada de área.....	34
Figura 15. Conjuntos difusos y variables lingüísticas en la variable de entrada de presión.....	35
Figura 16. Conjuntos difusos y variables lingüísticas en la variable de entrada de caudal.....	35
Figura 17. Aplicación de métricas.....	51

1. INTRODUCCIÓN

En la complejidad de los entornos industriales modernos, la eficacia en la selección de maquinaria, especialmente de ventiladores industriales, desempeña un papel determinante en el mantenimiento de la eficiencia operativa y energética. Este proceso se ha guiado por criterios técnicos preestablecidos mediante documentos como catálogos de selección. Estos criterios no abordan óptimamente la varianza de los valores de entrada en distintos entornos. Este enfoque convencional, aunque ampliamente adoptado, presenta deficiencias en términos de didactismo, comprensión e interés del proceso de selección del producto, lo que conduce a una subutilización de recursos y posibles ineficiencias energéticas [1]

El proceso de selección de ventiladores industriales es una parte integral de la selección de maquinaria en entornos de producción. Los procesos de selección a partir de la metodología de catálogos son engorrosos y complejos, debido esto, requiere un enfoque más allá de métodos de solución manual, las cuales deben contemplar un proceso automatizado y didáctico. Este reto se ve amplificado por las interrelaciones entre variables operativas clave, como el área de operación, temperatura del fluido, altitud, presión estática y el caudal del fluido, cuya consideración es fundamental para garantizar un rendimiento óptimo [2].

Ante este panorama, la presente investigación se propone desarrollar un algoritmo para la selección de ventiladores centrífugos industriales de catálogo, empleando la lógica difusa como herramienta central. La lógica difusa, con su capacidad para manejar la ambigüedad y variables cualitativas, ofrece un enfoque prometedor para comprender y automatizar el proceso selección de estas máquinas, permitiendo representar las relaciones entre variables y adaptarse a cambios en las condiciones operativas en su valor de variable de entrada [3].

2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

El enfoque de la selección de ventiladores centrífugos de catálogo se basa en criterios técnicos, que, sin herramientas computacionales, resulta ineficiente, para su selección. Esta perspectiva es poco intuitiva y productiva. En entornos industriales, la correcta selección de ventiladores centrífugos es esencial para garantizar un flujo de aire adecuado, mantener la presión requerida y optimizar el rendimiento energético [7].

Los sistemas de ventilación centrífuga son esenciales para mantener condiciones operativas óptimas y asegurar la integridad de los procesos productivos. Sin embargo, la selección de estos equipos puede ser compleja [5]. La utilización de un modelo computacional y un algoritmo de programación facilita la visualización del producto y mejora significativamente el proceso de selección, generando un mayor interés por parte del seleccionador [3]. Este enfoque reduce las dificultades inherentes al proceso, permitiendo una selección más precisa y eficiente.

No obstante, los esquemas generales presentados por catálogos presentan limitaciones en su proceso de selección, debido a su complejidad y entorno poco intuitivo, lo que resulta en un método poco productivo. Existe una necesidad urgente de optimizar el proceso de selección de ventiladores centrífugos, para evitar la baja productividad del proceso de selección y la falta de un enfoque sistémico automático y comprensible, que considere las variables críticas como la presión, área ocupada, caudal de aire y la temperatura. Al abordar estos desafíos, se pueden mejorar las eficiencias en el proceso de selección de ventiladores centrífugos, y asegurar una selección más efectiva de estos equipos necesarios.

La carencia de un método sistemático e intuitivo para la selección de ventiladores centrífugos, generan importantes desafíos en cuanto a la eficiencia del proceso de selección del equipo. Por lo cual nos hacemos la siguiente pregunta ¿Cuáles estrategias de programación pueden implementarse de manera efectiva para optimizar el proceso de selección de ventiladores centrífugos?

3. JUSTIFICACIÓN

El uso de ventiladores centrífugos es fundamental para garantizar el rendimiento y la eficiencia operativa en diversos entornos industriales [5]. Estos equipos se seleccionan en función de valores de entrada como caudal, temperatura, presión y área, entre otros [8]. Sin embargo, los métodos convencionales de selección, basados en criterios rígidos y estáticos, suelen ser insuficientes para satisfacer la variabilidad y complejidad de las demandas industriales. Esto genera la necesidad de un enfoque más adaptativo que facilite la comprensión y la toma de decisiones en el proceso de selección de ventiladores.

Para abordar esta problemática, se propone el desarrollo de un modelo que utilice un enfoque basado en la lógica difusa. La lógica difusa permite representar valores de entrada de manera intuitiva y lingüística, facilitando la comprensión del proceso y su adaptación a diferentes condiciones operativas. El proyecto plantea la categorización de los valores de entrada mediante variables cualitativas, mejorando así la interpretación y el proceso de selección de ventiladores. La implementación de la lógica difusa se llevará a cabo utilizando el lenguaje de programación Python y sus librerías especializadas, permitiendo la transformación eficiente de valores numéricos en cualitativos [3].

Para la construcción del modelo difuso, se utilizarán valores de entrada preestablecidos, delimitados por el catálogo de Chicago Blower Industrial Fan Bulletin 105. Las variables consideradas incluyen caudal, presión, temperatura y área transversal, elementos que pueden variar según el entorno de aplicación [2]. La lógica difusa destaca por su capacidad para manejar la incertidumbre asociada a las variables lingüísticas, permitiendo la representación de relaciones no lineales y la adaptación a cambios en los valores de entrada. Esto la convierte en una herramienta valiosa para optimizar el proceso de selección de ventiladores centrífugos en entornos industriales [9].

4. OBJETIVOS

4.1. Objetivo General

Desarrollar un sistema de lógica difusa para la selección de ventiladores centrífugos SQI, tomando como referencia el catálogo chicago blower bulletin 105, para las variables críticas de área ocupada, presión, temperatura, altitud y caudal requeridos del sistema; empleando el lenguaje de programación Python.

4.2. Objetivos Específicos

1. Investigar y recopilar fuentes bibliográficas relevantes sobre lógica difusa, buscando en bases de datos académicas y revistas especializadas para obtener una base teórica sólida que sirva como fundamento para el desarrollo del algoritmo.
2. Desarrollar y construir un algoritmo empleando principios de lógica difusa, utilizando el lenguaje de programación Python, para optimizar la selección de ventiladores centrífugos industriales SQI del catálogo chicago blower bulletin105.
3. Validar el sistema de lógica difusa mediante la metodología de selección de blower industrial fan bulletin 105 midiendo su nivel de confiabilidad.

5. ALCANCE

El alcance de este proyecto se centra en el desarrollo de un sistema de lógica difusa para la selección de ventiladores centrífugos SQI, basado en el catálogo Chicago Blower Bulletin 105, utilizando el lenguaje de programación Python y su librería Skfuzzy. El objetivo principal es crear un algoritmo que permita la optimización de la selección de ventiladores considerando variables críticas como presión, área ocupada, caudal, temperatura y altitud. Para lograr esto, se debe llevar a cabo un análisis exhaustivo de la literatura relevante sobre lógica difusa, seguido del diseño y desarrollo del algoritmo en Python. El sistema será validado mediante pruebas comparativas con el catálogo Chicago Blower y utilizando una matriz de confusión, con un enfoque en obtener métricas de rendimiento como precisión, exactitud y recall.

6. MARCO DE REFERENCIA

6.1. Marco Teórico

La idea de conjunto difuso surge de la observación de Zadeh en 1965 de que muchas veces, las categorías de objetos en el mundo físico carecen de criterios precisos para definir su pertenencia [10]. Esto resalta la diferencia entre las representaciones mentales de la realidad y las representaciones matemáticas convencionales, que se basan en lógica binaria y números exactos [11]. Las categorías de objetos mencionadas por Zadeh se comprenden a través de términos del lenguaje natural como "alta temperatura", "hombre joven", entre otros, así como sustantivos como "ave" y "silla" [3]. La lógica clásica no puede explicar adecuadamente estas categorías, donde la pertenencia parece ser gradual en lugar de todo o nada [12]. Los números reales tienen una expresividad que supera la precisión de las representaciones mentales, que son resúmenes significativos de fenómenos perceptivos que explican la complejidad del mundo [13]. Las representaciones analíticas de los fenómenos físicos pueden ser fieles a la realidad, pero a menudo son difíciles de entender, mientras que las representaciones mentales son más comprensibles, pero están marcadas por la vaguedad y la falta de límites definidos. Por eso se utilizan predicados difusos o propiedades graduales [11].

SISTEMA DE INFERENCIA DIFUSA

El hombre ha buscado la precisión mediante la adaptación del mundo real a modelos matemáticos rígidos. Sin embargo, la teoría de conjuntos difusos se desarrolló en sentido contrario, buscando crear modelos matemáticos flexibles para resolver problemas del mundo real [14]. Surgió de la necesidad de representar de forma matemática familias de objetos comunes que no podían ser adecuadamente representadas por la teoría clásica de conjuntos o la teoría de probabilidad, ya que no abordan la imprecisión, la incertidumbre, la falta de especificidad, la vaguedad y la inconsistencia [15]. Esta teoría permite expresar estos conceptos en términos matemáticos, capturando todas las incertidumbres relacionadas con el razonamiento y el pensamiento humano [9].

La lógica difusa se puede considerar como una herramienta matemática que se utiliza ampliamente debido a la idea de conjuntos con límites imprecisos, los cuales se aplican en situaciones donde la información disponible es imperfecta [16].

CONJUNTOS DIFUSOS

La teoría de conjuntos difusos amplía la teoría clásica de conjuntos al introducir una función de pertenencia al conjunto, generalmente representada por un número μ en el intervalo $[0,1]$, en lugar de la pertenencia binaria clásica definida en el conjunto $\{0,1\}$. Esto da lugar al concepto de conjunto difuso asociado a un valor lingüístico específico, como una palabra, adjetivo o etiqueta lingüística A [17]. En este contexto,

un conjunto difuso A se define mediante una función de pertenencia $\mu_A(x)$, que asigna los elementos de un dominio X a valores en el intervalo [0,1], representando el grado en que un valor para la variable x está incluido en el concepto representado por la etiqueta A. Cuanto más cercano sea $\mu_A(x)$ a 1, mayor será la pertenencia del objeto x al conjunto A [9]. Los valores de pertenencia varían entre 0 (no pertenencia) y 1 (pertenencia total), lo que implica que un conjunto difuso es una clase de objetos con grados de pertenencia continuos. En la figura 1 se muestra el grado de pertenencia de diferentes tipos de conjuntos.

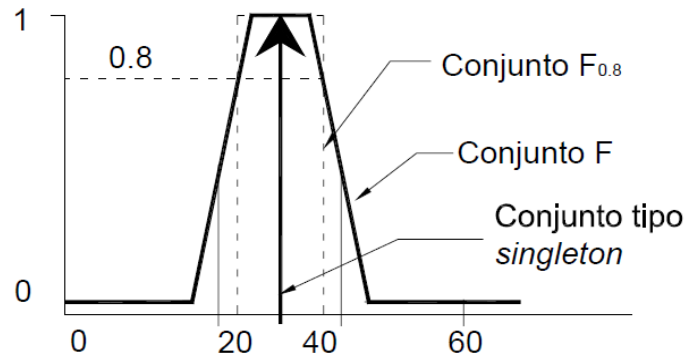


Figura 1. Grado de pertenencia de conjuntos trapezoidal y singleton.
Fuente:[9]

OPERACIONES ENTRE CONJUNTOS

Las Operaciones con conjuntos difusos son un área importante en la teoría de conjuntos difusos, una rama de las matemáticas que se centra en manejar conjuntos cuyos elementos tienen grados de pertenencia en lugar de valores binarios de pertenencia, como en los conjuntos clásicos. Estas operaciones permiten realizar manipulaciones y análisis sobre estos conjuntos de una manera coherente y significativa en contextos donde la precisión exacta puede ser difícil de determinar.

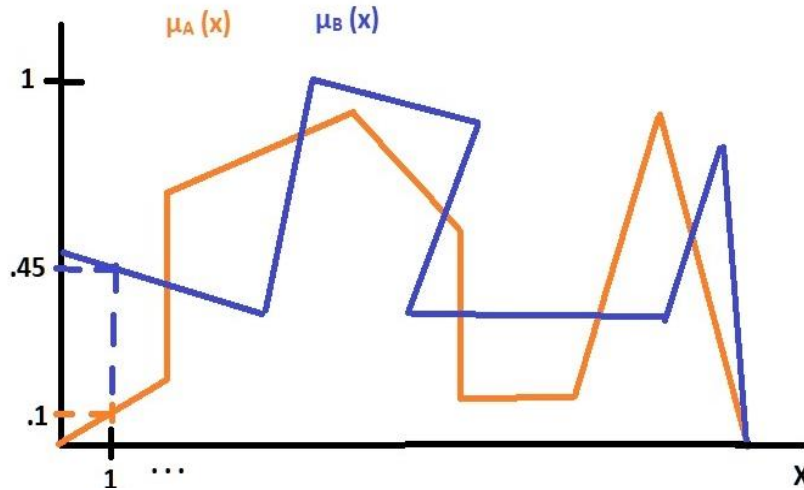


Figura 2. Conjuntos $\mu_A(x)$ y $\mu_B(x)$.

Fuente: [18].

UNIÓN: Combina dos conjuntos difusos asignando a cada elemento un grado de pertenencia que es el máximo de los grados de pertenencia en los conjuntos originales. Esta operación refleja la idea de que un elemento pertenece al conjunto unión en la medida en que pertenece a cualquiera de los conjuntos originales, como se muestra en la Figura 3.

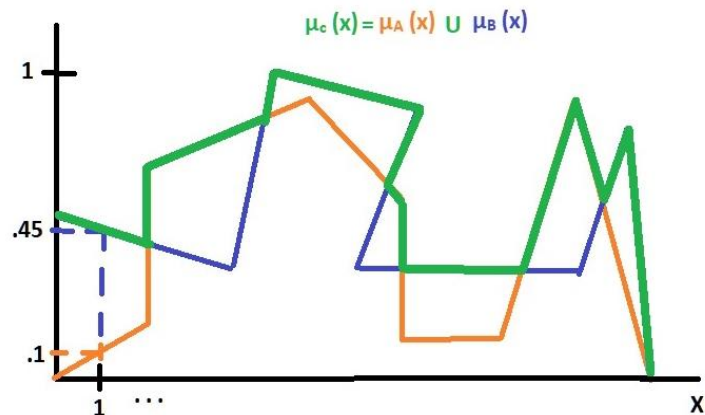


Figura 3. Unión de los conjuntos $\mu_A(x)$ y $\mu_B(x)$.
Fuente: [18]

INTERSECCIÓN: Determina el grado de pertenencia de cada elemento en el conjunto intersección como el mínimo de los grados de pertenencia en los conjuntos originales. Esto refleja la idea de que un elemento pertenece al conjunto intersección solo en la medida en que pertenece a ambos conjuntos originales, como se muestra en la Figura 4 [18].

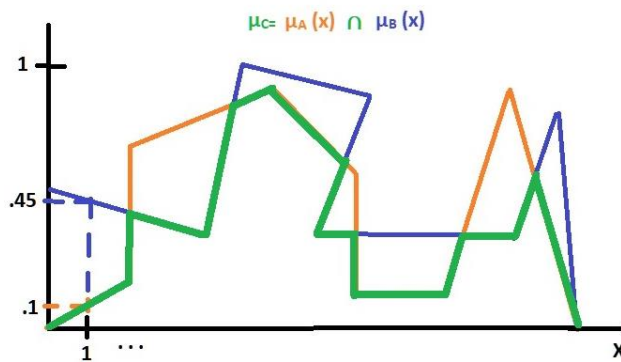


Figura 4. Intersección de los conjuntos $\mu_A(x)$ y $\mu_B(x)$.
Fuente: [18]

COMPLEMENTO: Se define como el conjunto de todos los elementos que no pertenecen a **A** o que tienen un grado de pertenencia nulo en **A**. En otras palabras, el complemento difuso de **A**, denotado como **A'**, está formado por todos los elementos que están completamente fuera de **A** o tienen una pertenencia nula en **A**, como se muestra en la Figura 5.

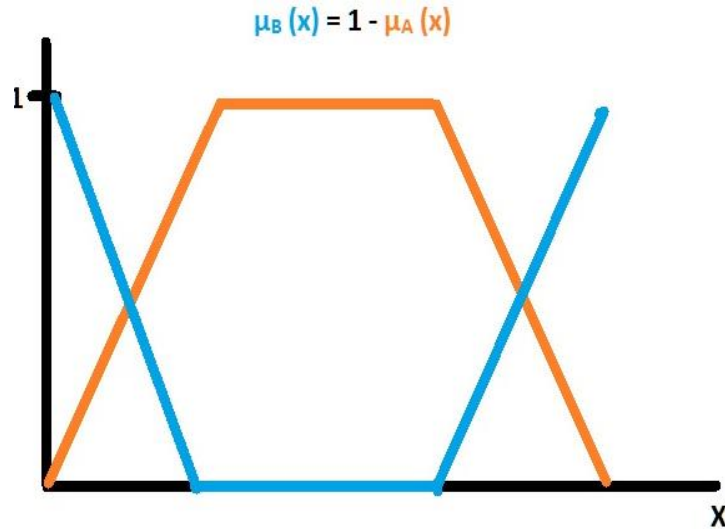


Figura 5. Representación del inverso del conjunto difuso $\mu_A(x)$.

Fuente: [18]

FUNCIONES DE PERTENENCIA

A pesar de que cualquier función puede ser válida para definir conjuntos difusos, en la práctica hay algunas funciones más utilizadas que otras. Esto se debe tanto a la facilidad computacional que conlleva su uso como a su idoneidad estructural para definir su valor lingüístico asociado [4]. Por lo tanto, las funciones de pertenencia más comunes descritas son las siguientes en la literatura [19].

1. Función Gamma:

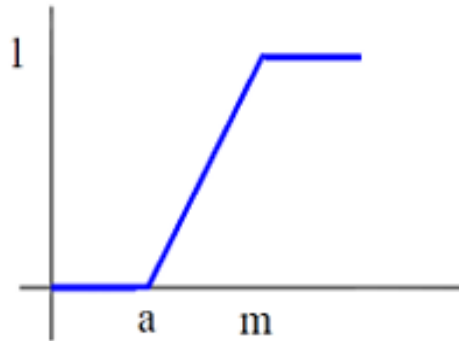


Figura 6. *Gráfica de la función Gamma.*
Fuente: [18]

2. Función L:

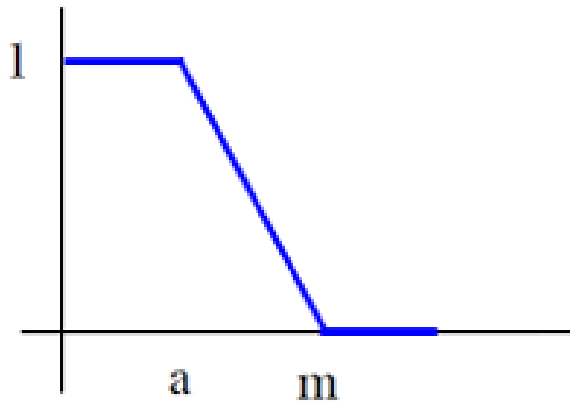


Figura 7. *Gráfica de la función L.*
Fuente: [18]

3. Función triangular.

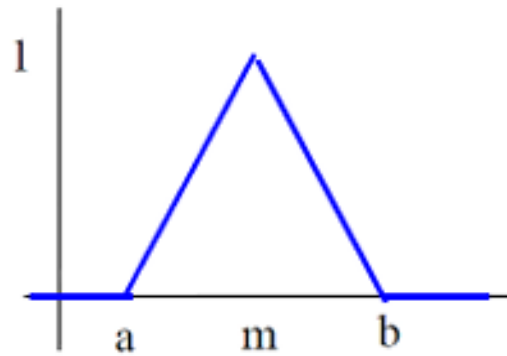


Figura 8. Gráfica de la función triangular.
Fuente: [18]

4. Función trapezoidal.

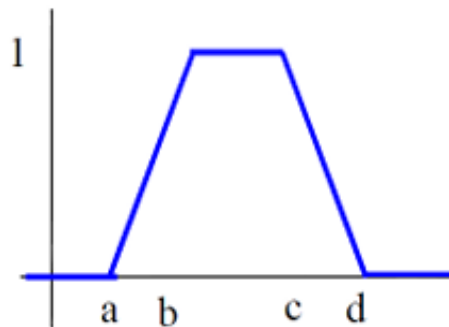


Figura 9. Gráfica de la función trapezoidal.
Fuente: [18]

5. Función S.

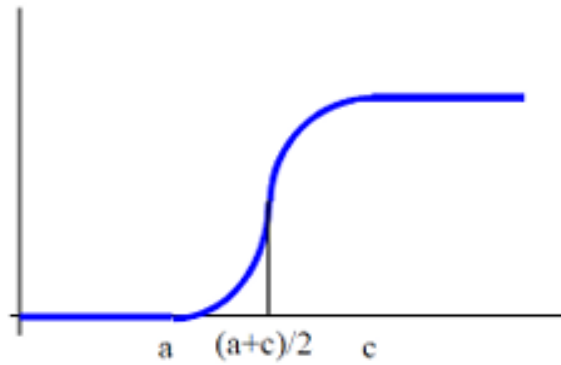


Figura 10. *Gráfica de la función S.*
Fuente: [18]

6. Función Z.

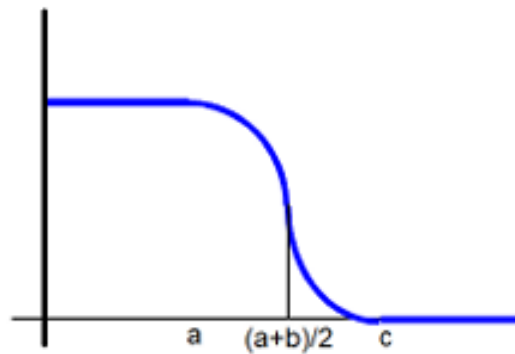


Figura 11. *Gráfica de la función Z.*
Fuente: [18]

7. Función Gaussiana.

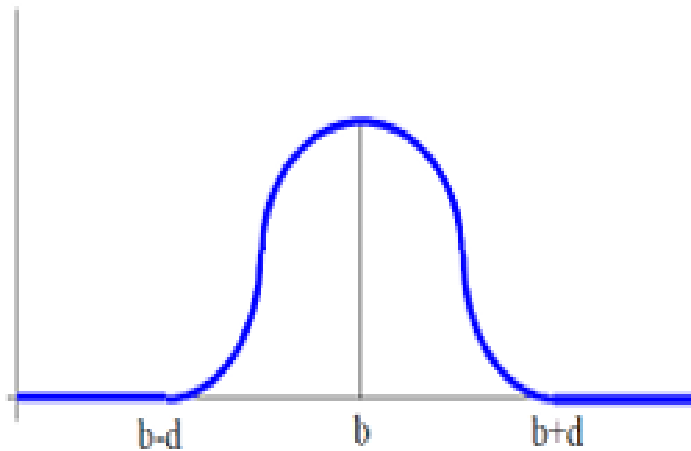


Figura 12. Gráfica de la función Gaussiana.
Fuente: [18]

MÉTODOS SOLUCIÓN DIFUSOS

La etapa final en un sistema de inferencia difusa es la 'desfuzzificación'. Este proceso consiste en obtener un valor de salida del conjunto difuso resultante, que es la combinación de todas las reglas aplicadas. Los enfoques más comunes para desfuzzificar según Ruvalcada Francisco y Vermonden Anais son:

El método del máximo: Se selecciona como valor de salida aquel para el cual la función característica del conjunto difuso alcanza su máximo. Sin embargo, este método puede no ser óptimo ya que varios valores pueden alcanzar el máximo.

El método del centroide: Se utiliza el centro de gravedad de la función característica de salida como el valor de salida. Este método proporciona una salida única.

El método de la altura: Se calculan los centros de gravedad para cada regla del conjunto difuso de salida y luego se realiza una media ponderada para obtener el valor de salida.

6.2. Marco Conceptual

VARIABLES LINGÜÍSTICAS

En la Teoría de conjuntos difusos, otro concepto importante son las variables lingüísticas, las cuales permiten expresar descripciones vagas en lenguaje natural en términos matemáticos precisos. Estas variables ayudan a comprimir información, un proceso conocido como granulación [20] y son útiles para caracterizar fenómenos que son difíciles de definir o que tienen una definición imprecisa o compleja. Según Zadeh (1975), una variable lingüística se define por **N**, **U**, **T(N)** y **M**, donde:

- **N** representa el nombre de la variable lingüística, mientras que **U** denota el dominio subyacente sobre el cual opera dicha variable.
- **T(N)** se refiere al conjunto de términos o etiquetas lingüísticas que la variable **N** puede asumir.
- **M** constituye una regla semántica que establece una asociación entre cada elemento de **T(N)** y un conjunto difuso en **U** seleccionado de entre todas las posibles opciones disponibles.

Las variables difusas permiten un cambio gradual entre estados y pueden manejar observaciones y medidas de incertidumbre de manera más realista que las variables con cambios abruptos. Por lo que las etiquetas lingüísticas, definidas como conjuntos difusos, representan los posibles valores de una variable lingüística [23].

REGLAS DIFUSAS

Las reglas en la lógica difusa son fundamentales para la toma de decisiones y el razonamiento en sistemas difusos. Estas reglas son similares a las reglas de la lógica tradicional, pero en lugar de tener valores de verdad binarios (verdadero o falso), se operan con grados de verdad difusos, lo que permite manejar la incertidumbre y la imprecisión de manera más flexible. Las reglas más comunes en la lógica difusa son las reglas de inferencia basadas en la lógica difusa de Mamdani y Sugeno [24].

Mamdani: Estas reglas son utilizadas para sistemas difusos de tipo "si-entonces". Se basan en la evaluación de conjuntos difusos mediante operaciones de unión y cortes difusos para calcular la salida difusa. Una regla de inferencia de Mamdani típica tiene la forma: "Si A es X y B es Y, entonces C es Z", donde A, B y C son conjuntos difusos, y X, Y, y Z son grados de pertenencia.

Sugeno: A diferencia de las reglas de Mamdani, las reglas de Sugeno generan una salida precisa, no difusa. Estas reglas asignan una función de consecuencia (generalmente lineal) a cada regla, y la salida del sistema difuso es una combinación ponderada de las consecuencias de todas las reglas aplicadas. Cada regla en este

caso tiene la forma: "Si A es X y B es Y, entonces la salida es F (X, Y)", donde F es una función específica.

Estas reglas de inferencia se combinan con operadores de conjunción (AND), disyunción (OR) y negación (NOT) para formar estructuras lógicas más complejas. La combinación de estas reglas y operadores permite modelar una amplia gama de situaciones en las que la información disponible es imprecisa o incierta.

METODOLOGÍA DE SELECCIÓN DEL CÁLOGO CHICAGO BLOWER ICF

Existe una metodología rigurosa para la selección de catálogos que garantiza la precisión y eficiencia en la elección de equipos industriales. En su proceso de selección de ventiladores SQI, se ha optado por emplear la metodología detallada en el catálogo Chicago Blower ICF, bulletin 105. Este enfoque permitirá asegurar que las especificaciones y características de los ventiladores seleccionados cumplan con los más altos estándares de calidad y rendimiento, optimizando así las operaciones y satisfaciendo las necesidades específicas de los proyectos.

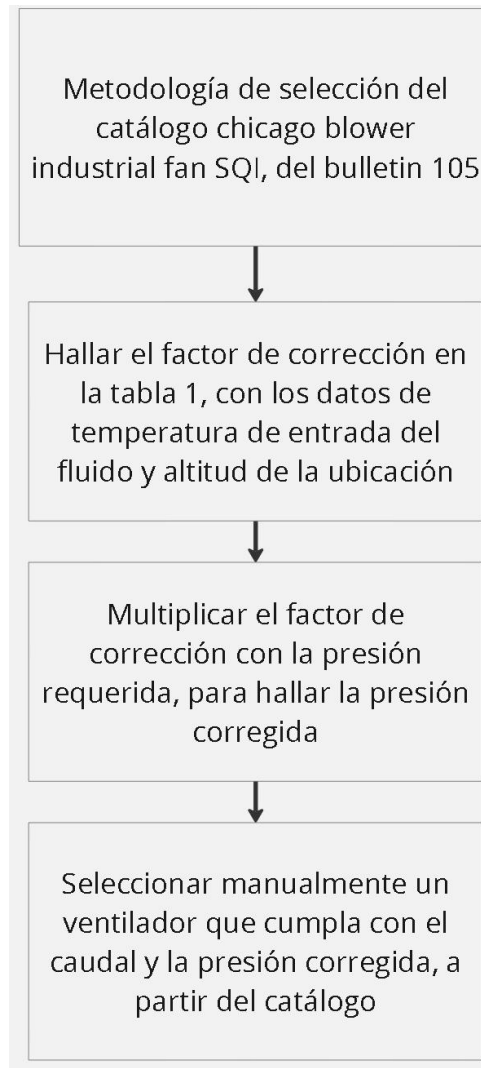


Figura 13. Metodología de selección de chicao blower ICF, bulletin 105.

Fuente: Autor.

6.3. Estado del Arte

D. N. Cuesta, E.D Triana y M. Regalia en su artículo, Application of fuzzy logic in smart grid, sugieren la aplicación de la lógica difusa como una perspectiva contemporánea para abordar los desafíos que enfrenta la red eléctrica, desde la generación y el transporte hasta el consumo de energía. En el estudio de las redes eléctricas inteligentes, se emplearán sentencias y conjuntos lógicos para llevar a cabo el análisis e interpretación de los datos recopilados del entorno, junto con modelos matemáticos que actúan como el vínculo entre el lenguaje humano y las máquinas. Estos modelos permiten realizar las correcciones necesarias a un agente inteligente que puede aprender y utilizarlas de manera autónoma en el futuro.

R. G. García y E. G. Muñoz, en su artículo "Sistema de recomendación difuso de productos basado en lógica difusa", presentan el diseño de un sistema de recomendaciones para la empresa Promevent. La metodología del estudio incluyó el preprocesamiento y limpieza de la base de datos, seguido de un análisis exploratorio de datos. Se determinó que tres clústeres eran adecuados usando el método del codo de Jambu. En la fase de modelado, se utilizó el algoritmo KNN para clasificar los datos basándose en las compras de los clientes, complementado con el método C Means para mejorar la precisión mediante la asignación de un grado de membresía a cada punto de datos. Como resultado, las recomendaciones se generaron a partir del perfil de cada cliente, identificando los siete productos más relevantes y beneficiando a la empresa al destacar los productos con mayor y menor rotación de inventario.

E. R. Aguirre en su tesis, estudio y simulación del control de tráfico inteligente utilizando lógica difusa, estudia el tráfico actual en la ciudad de Quito y desarrolla un software de simulación para el Control de Tráfico Inteligente en una intersección con dos vías unidireccionales. El propósito principal es mejorar la circulación vehicular, reducir los embotellamientos, minimizar el número de paradas, disminuir el consumo de combustible, así como reducir el ruido y las emisiones de gases de escape de los vehículos. Además, busca mejorar la seguridad y la atención a peatones y ciclistas. Para lograr esto, emplearon un controlador difuso de tráfico, una de las primeras aplicaciones de conjuntos difusos en Ingeniería de Transportación. Los conjuntos difusos son manipulados mediante operaciones teóricas como unión, intersección y complemento, utilizando funciones de membresía. Esto permite manejar conceptos vagos e imprecisos al introducir variables lingüísticas, relaciones difusas y la Lógica Difusa.

J. J. Jaramillo, en su tesis "Desarrollo de un sistema experto basado en lógica Fuzzy para la Dosificación de Sevoflurano", propone un sistema para predecir la cantidad de sevoflurano exhalado necesario durante una cirugía, basado en la respuesta simpática de la paciente reflejada en la presión arterial media y la frecuencia cardíaca. Utilizando lógica difusa y herramientas de ingeniería y control, se crearon cuatro sistemas difusos con datos de monitorización de pacientes sometidos a cirugía cardíaca en la Fundación Cardio Infantil. Los rangos de evaluación y las funciones de membresía se ajustaron según el criterio de un anestesiólogo. El objetivo es comparar estos sistemas para identificar el mejor en términos de predicción.

W. Y. Romero, J. X. Romero, J. A. Romero y A. M. Gordón, en su artículo "Modelamiento y simulación de un controlador difuso para un sistema de enfriamiento híbrido", modelaron y simularon un sistema de enfriamiento híbrido con un control difuso usando SCILAB. Identificaron las variables más relevantes del sistema para crear conjuntos de pertenencia, logrando un control más preciso. Establecieron un modelo matemático para observar la reacción de las variables al control y definieron los rangos necesarios para los conjuntos difusos. También analizaron la integración de energía solar en la etapa de regeneración para mejorar la eficiencia del sistema.

7. METODOLOGÍA

La metodología de este proyecto se ha estructurado en cuatro etapas principales, diseñadas para abordar de manera sistemática cada fase del desarrollo e implementación del sistema de lógica difusa para la selección de ventiladores centrífugos. A continuación, se describen detalladamente las actividades correspondientes a cada etapa.

ETAPA 1: PREPARACIÓN Y PLANIFICACIÓN

Esta primera etapa se enfoca en la conceptualización inicial y la planificación estratégica del proyecto. En primer lugar, se realiza la definición del problema y los objetivos. Esta actividad implica identificar claramente el problema central que se aborda en el estudio, es decir, las limitaciones de los métodos convencionales de selección de ventiladores centrífugos y la necesidad de un enfoque más automatizado. A partir de esta identificación, se establecen los objetivos específicos que guiarán la investigación, definiendo metas concretas y medibles.

La siguiente actividad es la revisión bibliográfica, en la que se lleva a cabo una búsqueda exhaustiva y un análisis crítico de la literatura académica y técnica relevante. Esta revisión incluye fuentes sobre lógica difusa, selección de ventiladores, con el fin de obtener un panorama completo del estado del arte y fundamentar teóricamente el desarrollo del proyecto.

Posteriormente, se procede con la elaboración del anteproyecto. Aquí se desarrolla un documento preliminar que define el enfoque, la metodología y el alcance del proyecto. Este anteproyecto servirá como guía estructurada para el desarrollo de las etapas subsecuentes, delineando las hipótesis de trabajo, las herramientas a utilizar y los criterios de evaluación. Finalmente, se lleva a cabo el diseño del plan de investigación, donde se detallan las fases, técnicas y herramientas que se emplearán a lo largo de la investigación. Esto incluye la planificación de las actividades de desarrollo, pruebas y validación, así como la determinación de los recursos necesarios para la implementación del sistema de lógica difusa.

ETAPA 2: RECOLECCIÓN Y DESARROLLO

La segunda etapa se centra en la recolección de datos y el desarrollo del sistema de lógica difusa. La primera actividad, recopilación de datos relevantes, consiste en obtener toda la información necesaria para el desarrollo y validación del algoritmo de lógica difusa. Esta recopilación se realiza a partir del catálogo Chicago Blower ICF Bulletin 105, que proporciona datos específicos sobre los ventiladores SQI, así como variables clave como temperatura, altitud, presión, caudal y área transversal. Esta información es fundamental para definir los parámetros de entrada del modelo.

Con los datos recopilados, se inicia el desarrollo del sistema de lógica difusa. En esta actividad, se lleva a cabo la creación y estructuración del sistema de selección basado en la lógica difusa. Se determina el tipo de conjunto de inferencia a utilizar y se desarrollan las reglas difusas que guiarán el algoritmo, permitiendo la categorización de los valores de entrada en términos cualitativos. La implementación se realiza utilizando la librería scikit-fuzzy (sk-fuzzy) en Python, que facilita la transformación de valores numéricos en cualitativos y permite la creación de un modelo adaptable y eficiente. El uso de scikit-fuzzy es fundamental, ya que provee herramientas especializadas para el diseño y la implementación de sistemas de lógica difusa de forma flexible y eficiente.

A continuación, se realiza la programación y configuración del modelo. Esta actividad implica la codificación del algoritmo de lógica difusa, configurando las reglas de inferencia y ajustando los parámetros necesarios para el correcto funcionamiento del modelo. Se realizan ajustes finos en la programación para asegurar que el sistema sea capaz de manejar la variabilidad de las condiciones operativas y seleccionar el ventilador adecuado en función de los valores de entrada.

ETAPA 3: PRUEBAS Y OPTIMIZACIÓN

En esta etapa, se evalúa y mejora el modelo desarrollado. Inicialmente, se llevan a cabo las pruebas iniciales del modelo para verificar su funcionamiento básico. Se realizan pruebas preliminares utilizando un conjunto de datos representativo, lo que permite identificar posibles errores y evaluar el comportamiento del algoritmo en condiciones controladas.

Tras estas pruebas, se procede con el ajuste y optimización del modelo. En esta fase, el algoritmo se refina en función de los resultados obtenidos durante las pruebas iniciales. Se ajustan las reglas de inferencia, los conjuntos difusos y otros parámetros del modelo para mejorar su precisión y eficiencia. La optimización busca asegurar que el sistema sea capaz de manejar adecuadamente las distintas combinaciones de variables de entrada, proporcionando una selección de ventiladores confiable y precisa.

Finalmente, se realiza la validación del modelo. En esta actividad, se verifica el desempeño del algoritmo de lógica difusa utilizando datos provenientes de la metodología de selección del catálogo Chicago Blower Industrial Fan SQI, Bulletin 105. Para evaluar el rendimiento del modelo de manera cuantitativa, se utilizará una matriz de confusión, la cual permitirá medir la confiabilidad y precisión del sistema al categorizar las selecciones de ventiladores como correctas o incorrectas en función de los valores esperados. Esta matriz permitirá calcular métricas como la precisión, exactitud y recall, proporcionando una evaluación objetiva de la eficacia del modelo. Esta validación es crucial para determinar la eficacia del enfoque basado en lógica difusa y su aplicabilidad en entornos industriales.

ETAPA 4: DOCUMENTACIÓN Y PRESENTACIÓN

La etapa final se enfoca en la documentación y comunicación de los resultados del proyecto. La primera actividad es la redacción del informe de investigación, en la cual se documenta de manera detallada todo el proceso, desde la identificación del problema hasta los resultados y conclusiones del proyecto. Este informe incluye el

marco de referencia, la metodología, los resultados obtenidos, el análisis y las conclusiones derivadas del estudio.

Luego, se procede con la preparación de la presentación. Esta actividad implica desarrollar materiales y estrategias para presentar los resultados de forma clara y comprensible a los interesados. Se elaboran gráficos, tablas y otros recursos visuales que faciliten la comprensión de los hallazgos y las implicaciones del proyecto.

Finalmente, se realiza la presentación del proyecto. Durante esta exposición formal, se presentan los resultados, conclusiones y recomendaciones del estudio. Se destaca la eficacia del enfoque basado en lógica difusa y su potencial para mejorar los procesos de selección de ventiladores centrífugos en aplicaciones industriales. La presentación se adapta al público objetivo, enfatizando los aspectos más relevantes y las aportaciones del proyecto.

8. CAPÍTULO 1: DESARROLLO DEL ALGORITMO

En esta fase, se llevó a cabo la recolección de datos necesarios para el desarrollo y validación del algoritmo de lógica difusa. La información se recopiló del catálogo Chicago Blower ICF Bulletin 105, específicamente para los ventiladores modelo SQI. Los datos obtenidos incluyen especificaciones técnicas detalladas sobre los ventiladores, tales como rangos de operación en términos de temperatura, altitud, presión, caudal y área transversal.

Utilizando los datos recopilados, se procedió a la creación y estructuración del sistema de selección basado en lógica difusa. Este sistema tiene como objetivo principal ofrecer un método de selección para los ventiladores centrífugos modelo SQI, considerando las variables críticas de entrada: temperatura, altitud, presión, caudal y área transversal ocupada por el equipo.

CONJUNTOS DIFUSOS

En el desarrollo del modelo difuso para la selección de ventiladores centrífugos, se optó por utilizar conjuntos difusos triangulares y trapezoidales, ajustados a la naturaleza de las variables que se manejan. Como menciona Timothy J. Ross en "Fuzzy Logic with Engineering Applications", los conjuntos triangulares son especialmente adecuados cuando se requiere una implementación simple y computacionalmente eficiente, permitiendo transiciones lineales entre grados de membresía. Esto los hace ideales para representar variables clave como presión, caudal, área y la salida del ventilador, donde es crucial que las variaciones entre categorías adyacentes sean continuas y uniformes.

Los conjuntos trapezoidales, por otro lado, resultan útiles para modelar situaciones en las que las variables permanecen dentro de un rango específico de valores altos o bajos, lo cual es esencial en aplicaciones industriales donde la estabilidad y precisión son prioritarias.

En la figura 14 muestra como se distribuyen estos conjuntos difusos y su representación dentro de las variables lingüísticas, lo que facilita una comprensión más clara de su impacto en el modelo.

VARIABLES LINGÜISTICAS

Se utilizó un total de 5 variables lingüísticas para mejorar la precisión y adaptabilidad del modelo al seleccionar ventiladores centrífugos. Estas variables permiten una descripción más detallada de las condiciones de operación, lo que facilita una selección más adecuada de ventiladores en función de las diferentes combinaciones de caudal, presión y área. Las variables lingüísticas utilizadas se muestran en la tabla

Tabla 1.
Variables lingüísticas.

Símbolo	Significado
VB	Muy Bajo
B	Bajo
M	Medio
A	Alto
VA	Muy Alto

Fuente: Autor.

Las variables lingüísticas representaran los conjuntos difusos trapezoidales y triangular que se muestra en la figura 14.

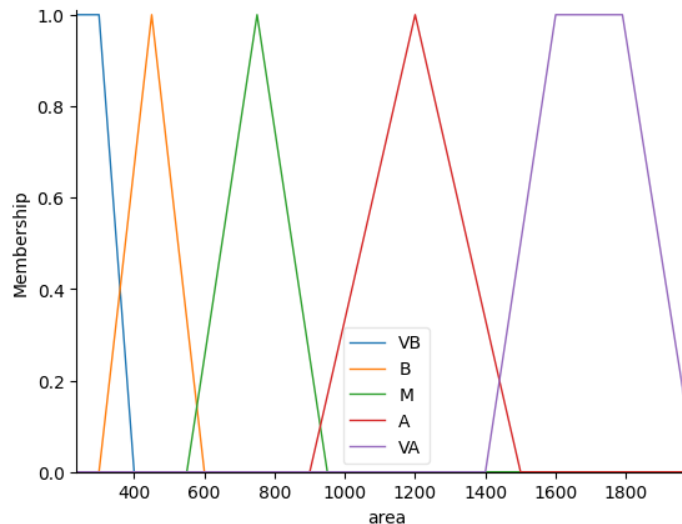


Figura 14. Conjuntos difusos y variables lingüísticas en la variable de entrada de área.

Fuente: Autor.

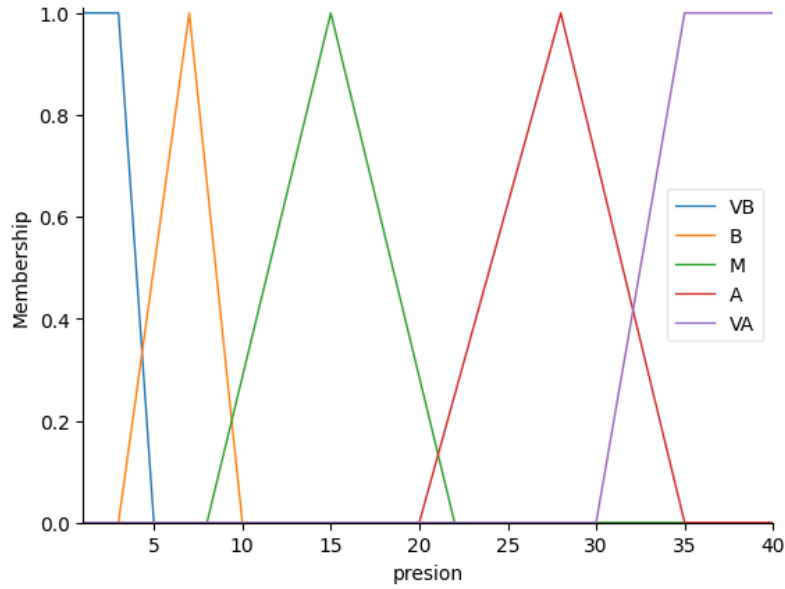


Figura 15. Conjuntos difusos y variables lingüísticas en la variable de entrada de presión.
Fuente: Autor.

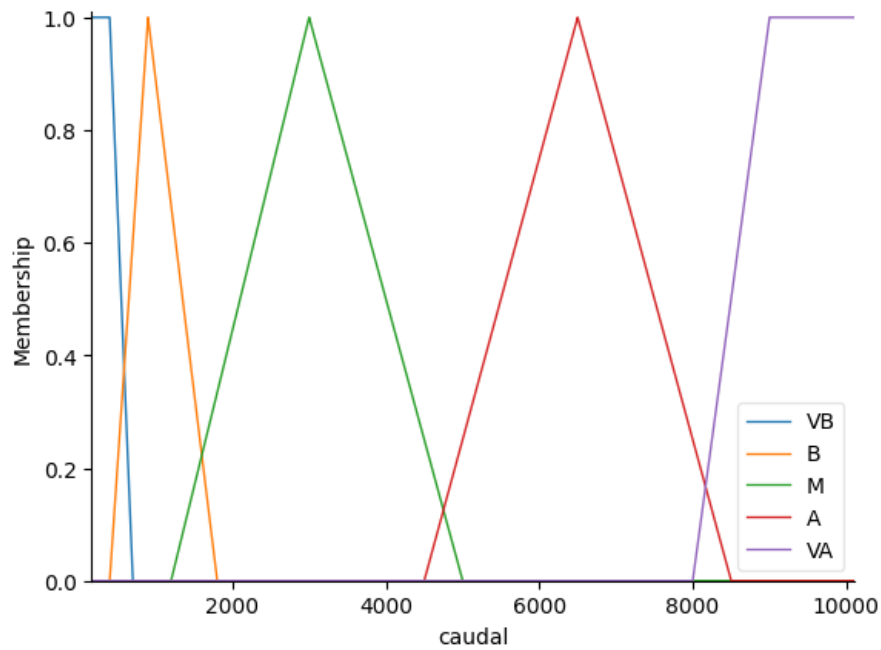


Figura 16. Conjuntos difusos y variables lingüísticas en la variable de entrada de caudal.
Fuente: Autor.

REGLAS DIFUSAS

El algoritmo de lógica difusa desarrollado para la selección de ventiladores centrífugos se basa en un conjunto de reglas de inferencia que relacionan las variables de entrada con la salida deseada. Estas reglas permiten al sistema difuso determinar el ventilador adecuado en función de las condiciones específicas de operación. Cada regla difusa sigue la estructura clásica de "SI-ENTONCES", donde se evalúan combinaciones de las variables de entrada (Caudal, presión y área disponible) para activar la membresía correspondiente de la salida, es decir, la selección de un ventilador específico.

Tabla 2.
Reglas difusas aplicadas en el algoritmo difuso.

Área	Caudal	Presión	Ventilador
VB	VB	VB	5
B	VB	VB	5
M	VB	VB	5
VB	B	VB	6
B	VB	VB	6
M	VB	VB	6
M	VB	M	7
A	VB	VB	6

Fuente: Autor.

Tabla 3.
Reglas difusas aplicadas en el algoritmo difuso.

Área	Caudal	Presión	Ventilador
M	B	M	8
M	VB	B	5
B	B	VB	7
B	B	B	7
M	VB	VB	7
M	B	B	9
B	M	B	9
B	A	B	9
A	M	M	11
A	M	A	13
A	A	M	13
M	VA	A	13
A	A	A	15
VA	A	A	15
VA	VA	VA	17
A	VA	A	17
VA	VA	M	17
M	VB	M	8
B	M	M	8
M	M	M	10
A	B	M	10
A	M	A	12
M	VA	M	12
A	A	A	14
VA	A	A	14
VA	A	A	16
VA	VA	A	16
A	VB	VB	5
M	M	B	10
VA	M	VA	13
VA	A	VA	17
M	M	VB	10
VA	A	VB	17
VA	A	B	16
VA	A	M	17
VA	A	A	17
VA	A	VA	17
A	B	VB	10
VA	B	VB	12
A	M	M	12
VA	M	M	12
M	M	M	9

9. CAPÍTULO 2: RESULTADOS OBTENIDOS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos al aplicar el algoritmo de lógica difusa y el método de Chicago Blower para la selección de ventiladores centrífugos, utilizando dos variables de entrada constantes y una variable que varía para evaluar el comportamiento de ambos métodos. Los resultados se han clasificado de la siguiente manera: se utiliza "N/A" para indicar que no se obtuvieron resultados válidos; los resultados marcados en color rojo corresponden a ventiladores que no se encuentran dentro del rango de operación para las condiciones especificadas; y los resultados en color azul indican ventiladores que, aunque no cumplen con el requisito de área, se consideran válidos debido a que la diferencia en área no excede los 150 in².

Tabla 4

Comparación de Selección de Ventiladores Centrífugos entre Lógica Difusa y Método de Chicago Blower para una Presión de 10 SP y un Área de 800 in².

PRESIÓN Y ÁREA CONSTANTE (10 SP y 800 in ²)		
CAUDAL (CFM)	SELECCIÓN CON LÓGICA DIFUSA	SELECCIÓN CON MÉTODOLÓGÍA CHICAGO BLOWER
300	7	6
1000	7	7
1700	7	9
2400	9	9
3100	9	N/A
3800	9	N/A
4500	9	N/A
5200	N/A	N/A
5900	N/A	N/A
6600	N/A	N/A
7300	N/A	N/A

Fuente: Autor.

Nota. Para los caudales de 3100, 3800 y 4500 CFM, los ventiladores seleccionados por la lógica difusa no se encuentran dentro del rango de operación para los parámetros de entrada especificados (presión de 10 SP y área de 800 in²).

Tabla 5
Comparación de Selección de Ventiladores Centrífugos entre Lógica Difusa y
Método de Chicago Blower para una Presión de 5 SP y un Área de 600 in².

PRESIÓN Y ÁREA CONSTANTE (5 SP y 600 in ²)		
CAUDAL (CFM)	SELECCIÓN CON LÓGICA DIFUSA	SELECCIÓN CON MÉTODOLÓGÍA CHICAGO BLOWER
300	5	5
1000	7	9
1700	9	9
2400	9	9
3100	9	N/A
3800	9	N/A
4500	9	N/A
5200	N/A	N/A
5900	N/A	N/A
6600	N/A	N/A
7300	N/A	N/A

Fuente: Autor.

Nota. Para los caudales de 3100, 3800 y 4500 CFM, los ventiladores seleccionados por la lógica difusa no se encuentran dentro del rango de operación para los parámetros de entrada especificados (presión de 5 SP y área de 600 in²).

Tabla 6

Comparación de Selección de Ventiladores Centrífgos entre Lógica Difusa y Método de Chicago Blower para una Presión de 26 SP y un Área de 1400 in².

PRESIÓN Y ÁREA CONSTANTE (26 SP y 1400 in ²)		
CAUDAL (CFM)	SELECCIÓN CON LÓGICA DIFUSA	SELECCIÓN CON MÉTODOLÓGÍA CHICAGO BLOWER
300	N/A	N/A
1000	N/A	N/A
1700	13	N/A
2400	13	13
3100	13	11
3800	13	13
4500	13	13
5200	15	13
5900	15	N/A
6600	15	N/A
7300	15	N/A

Fuente: Autor.

Nota. Para los ventiladores seleccionados por la lógica difusa con un tipo de ventilador 15, se observa que exceden el requisito de área, pero la diferencia no supera los 150 in², por lo que se consideran válidos. Además, para un caudal de 1700 CFM, el ventilador seleccionado por la lógica difusa no opera adecuadamente con los parámetros de caudal, presión y área especificados.

Tabla 7

Comparación de Selección de Ventiladores Centrífgos entre Lógica Difusa y Método de Chicago Blower para una Presión de 36 SP y un Área de 2000 in².

PRESIÓN Y ÁREA CONSTANTE (36 SP y 2000 in ²)		
CAUDAL (CFM)	SELECCIÓN CON LÓGICA DIFUSA	SELECCIÓN CON MÉTODOLOGÍA CHICAGO BLOWER
300	N/A	N/A
1000	N/A	N/A
1700	11	N/A
2400	11	N/A
3100	13	13
3800	13	13
4500	13	13
5200	17	13
5900	17	17
6600	17	17
7300	17	17
8000	17	17
8700	17	17
9400	17	17

Fuente: Autor.

Nota. Para un caudal de 1700 y 2400 CFM, el ventilador seleccionado por la lógica difusa no opera con los parámetros de caudal y presión especificados.

Tabla 8

Comparación de Selección de Ventiladores Centrifugos entre Lógica Difusa y Método de Chicago Blower para un caudal de 2000 CFM y un Área de 800 in².

CAUDAL Y ÁREA CONSTANTE (2000 CFM y 800 in ²)		
PRESIÓN (SP)	SELECCIÓN CON LÓGICA DIFUSA	SELECCIÓN CON METODOLOGÍA CHICAGO BLOWER
2	9	9
4	9	9
6	9	9
8	9	9
10	9	9
12	9	9
14	9	9
16	9	N/A
18	9	N/A
20	9	N/A
22	N/A	N/A
24	N/A	N/A
26	N/A	N/A
28	N/A	N/A
30	N/A	N/A
32	N/A	N/A
34	N/A	N/A
36	N/A	N/A
38	N/A	N/A
40	N/A	N/A

Fuente: Autor.

Nota. Para una presión de 16,18 Y 20 SP, el ventilador seleccionado por la lógica difusa no opera con los parámetros de caudal y presión especificados.

Tabla 9

Comparación de Selección de Ventiladores Centrifugos entre Lógica Difusa y Método de Chicago Blower para un caudal de 4000 CFM y un Área de 1000 in².

CAUDAL Y ÁREA CONSTANTE (4000 CFM y 1000 in ²)		
PRESIÓN (SP)	SELECCIÓN CON LÓGICA DIFUSA	SELECCIÓN CON MÉTODOLÓGÍA CHICAGO BLOWER
2	N/A	N/A
4	N/A	N/A
6	N/A	N/A
8	N/A	N/A
10	11	N/A
12	11	11
14	11	11
16	11	11
18	11	11
20	11	11
22	13	11
24	13	11
26	13	N/A
28	13	N/A
30	13	N/A
32	13	N/A
34	13	N/A
36	N/A	N/A
38	N/A	N/A
40	N/A	N/A

Fuente: Autor.

Nota. Para una presión de 22,24,26,28,30,32 Y 34 SP, el ventilador seleccionado por la lógica difusa no opera con los parámetros de caudal y presión especificados. Para una presión de 10 la lógica difusa selecciona un ventilador no operable para esos requisitos.

Tabla 10

Comparación de Selección de Ventiladores Centrifugos entre Lógica Difusa y Método de Chicago Blower para un caudal de 7000 CFM y un Área de 2000 in².

CAUDAL Y ÁREA CONSTANTE (7000 CFM y 2000 in ²)		
PRESIÓN (SP)	SELECCIÓN CON LÓGICA DIFUSA	SELECCIÓN CON MÉTODOLÓGÍA CHICAGO BLOWER
2	17	17
4	17	17
6	15	17
8	15	17
10	17	17
12	17	17
14	17	17
16	17	17
18	17	17
20	17	17
22	15	17
24	15	17
26	15	17
28	15	17
30	15	17
32	15	17
34	15	17
36	17	17
38	17	17
40	17	17

Fuente: Autor.

Nota. Todos los ventiladores seleccionados son funcionales para los parámetros mostrados.

Tabla 11

Comparación de Selección de Ventiladores Centrifugos entre Lógica Difusa y Método de Chicago Blower para una presión de 4 SP y un caudal de 800 CFM.

PRESIÓN Y CAUDAL CONSTANTE (4 SP y 800 CFM)		
ÁREA (in ²)	SELECCIÓN CON LÓGICA DIFUSA	SELECCIÓN CON MÉTODOLOGÍA CHICAGO BLOWER
300	5	N/A
400	6	6
500	6	7
600	7	9
700	7	9
800	7	9
900	7	11
1000	9	11
1100	9	11
1200	9	11
1300	9	11
1400	9	11
1500	11	11
1600	11	11
1700	11	11
1800	11	11
1900	11	11
2000	11	11

Fuente: Autor.

Nota. Para un área de 300 in² el ventilador seleccionado por lógica difusa no es operacional para una presión de 4 SP y un caudal de 800 CFM.

Tabla 12

Comparación de Selección de Ventiladores Centrifugos entre Lógica Difusa y Método de Chicago Blower para una presión de 15 SP y un caudal de 1600 CFM.

PRESIÓN Y CAUDAL CONSTANTE (15 SP y 1600 CFM)		
ÁREA (in ²)	SELECCIÓN CON LÓGICA DIFUSA	SELECCIÓN CON MÉTODOLOGÍA CHICAGO BLOWER
300	7	N/A
400	7	N/A
500	7	N/A
600	7	N/A
700	7	N/A
800	7	N/A
900	7	11
1000	11	11
1100	11	11
1200	11	11
1300	11	11
1400	11	11
1500	11	11
1600	11	11
1700	11	11
1800	11	11
1900	11	11
2000	11	11

Fuente: Autor.

Nota. Para un área de 900 in² e inferior el ventilador seleccionado por lógica difusa no es operacional para una presión de 15 SP y un caudal de 1600 CFM.

Tabla 13

Comparación de Selección de Ventiladores Centrifugos entre Lógica Difusa y Método de Chicago Blower para una presión de 36 SP y un caudal de 7000 CFM.

PRESIÓN Y CAUDAL CONSTANTE (36 SP y 7000 CFM)		
ÁREA (in ²)	SELECCIÓN CON LÓGICA DIFUSA	SELECCIÓN CON MÉTODOLÓGÍA CHICAGO BLOWER
300	N/A	N/A
400	N/A	N/A
500	N/A	N/A
600	N/A	N/A
700	N/A	N/A
800	N/A	N/A
900	N/A	N/A
1000	N/A	N/A
1100	N/A	N/A
1200	N/A	N/A
1300	N/A	N/A
1400	N/A	N/A
1500	17	N/A
1600	17	15
1700	17	15
1800	17	17
1900	17	17
2000	17	17

Fuente: Autor.

Nota. Para un área de 1500 in² el ventilador seleccionado por lógica difusa no es operacional para una presión de 15 SP y un caudal de 1600 CFM.

Tabla 14.

Porcentajes Promedio de Diferencia entre Lógica Difusa y Chicago Blower para potencia del equipo seleccionado, para caudal variante, presión y área constante.

Presión y Área Constante	Diferencia de BHP %
10 SP, 800 in ²	13.21%
5 SP, 600 in ²	3.36%
26 SP, 1400 in ²	0.39%
36 SP, 2000 in ²	0.00%

Fuente: Autor.

Nota. La tabla muestra los porcentajes promedio de diferencia entre los valores de BHP obtenidos mediante la lógica difusa y los obtenidos del catálogo de selección de ventiladores de Chicago Blower. Se excluyeron las comparaciones en las que alguno de los métodos no proporcionó datos válidos (N/A o X). Las diferencias más pequeñas indican una mayor coincidencia entre los dos métodos de selección de ventiladores, los ventiladores seleccionados por la metodología de Chicago Blower, muestran menor consumo de potencia.

Tabla 15.

Porcentajes Promedio de Diferencia entre Lógica Difusa y Chicago Blower para potencia del equipo seleccionado, para presión variante, caudal y área constante.

Caudal y área constante	Diferencia de BHP %
2000 CFM y 800 in ²	0,00%
2000 CFM y 800 in ²	1,99%
7000 CFM y 2000 in ²	5,69%

Fuente: Autor.

Nota. La tabla muestra la diferencia promedio en porcentaje entre los valores de BHP obtenidos mediante Lógica Difusa y los valores del catálogo de Chicago Blower para distintas condiciones de caudal y área constante, la selección mediante el método de Chicago Blower selecciona el ventilador que menor potencia consume.

Tabla 16.

Porcentajes Promedio de Diferencia entre Lógica Difusa y Chicago Blower para potencia del equipo seleccionado, para área variante, caudal y presión constante.

Caudal y Área Constante	Diferencia de BHP %
4 SP y 800 CFM	13,23%
15 SP y 1600 CFM	0,00%
36 SP y 7000 CFM	1,87%

Fuente: Autor.

Nota. La tabla muestra la diferencia promedio en porcentaje entre los valores de BHP obtenidos mediante Lógica Difusa y los valores del catálogo de Chicago Blower para diferentes condiciones de caudal y área constante.

Tabla 17.
Desviación estándar de los ventiladores seleccionados.

VALORES VARIABLE Y CONSTANTES	Desviación Estándar (Lógica Difusa)	Desviación Estándar (Chicago Blower)
PRESIÓN Y ÁREA CONSTANTE (10 SP y 800 in ²)	1	1,5
PRESIÓN Y ÁREA CONSTANTE (5 SP y 600 in ²)	1,91	2,00
PRESIÓN Y ÁREA CONSTANTE (26 SP y 1400 in ²)	1,914854216	2
PRESIÓN Y ÁREA CONSTANTE (36 SP y 2000 in ²)	1,932183566	2,06559112
CAUDAL Y ÁREA CONSTANTE (2000 CFM y 800 in ²)	0	0
CAUDAL Y ÁREA CONSTANTE (4000 CFM y 1000 in ²)	0	0
CAUDAL Y ÁREA CONSTANTE (7000 CFM y 2000 in ²)	1,020835571	0
PRESIÓN Y CAUDAL CONSTANTE (4 SP y 800 CFM)	1,900077398	1,57648156
PRESIÓN Y CAUDAL CONSTANTE (15 SP y 1600 CFM)	0	0
PRESIÓN Y CAUDAL CONSTANTE (36 SP y 7000 CFM)	0	1,09544512

Fuente: Autor.

Nota. Nota: La desviación estándar se calcula para las selecciones de ventiladores utilizando dos métodos distintos: Lógica Difusa y la metodología Chicago Blower, en diferentes condiciones de presión, caudal y área constante.

Para la validar el algoritmo y determinar su precisión y confiabilidad se utilizará una matriz de confusión. La matriz de confusión es una herramienta utilizada para evaluar el rendimiento de un modelo de clasificación comparando sus predicciones con los resultados reales y determinar la predicción de confiabilidad general con la

exactitud y precisión. En esencia, la matriz muestra cuántas predicciones fueron correctas y cuántas no, dividiendo los resultados en cuatro categorías como se muestra en la figura 17 [32].

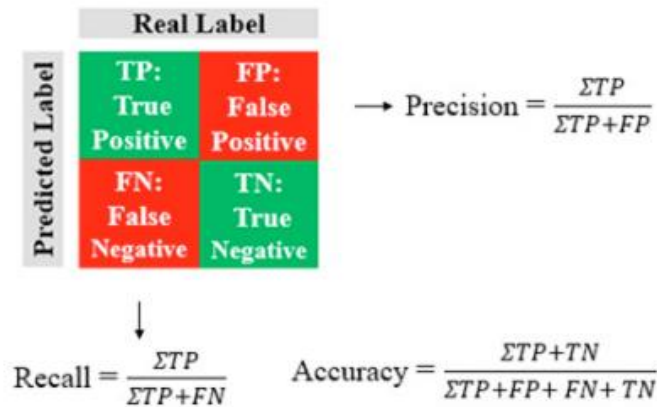


Figura 17. Aplicación de métricas.

Fuente: Autor.

Nota. En la matriz de confusión, después de la clasificación de sus datos en sus métricas, se calcula la métrica de precisión. También se evalúa la métrica de exactitud, la cual determina el porcentaje de predicciones correctas. Finalmente, se calcula la recuperación, que indica con qué frecuencia la predicción identifica ejemplos de una clase específica. Tomado de Roque, Krebs & Figueiro (2022), An analysis of machine learning algorithms in rotating machines maintenance.

CONSTRUCCIÓN DE LA MATRIZ DE CONFUSIÓN

Verdaderos Positivos (VP): Casos donde la lógica difusa y el método de catálogo coinciden en seleccionar un valor.

Falsos Positivos (FP): Casos donde la lógica difusa selecciona un valor, pero el método de catálogo no lo selecciona (es decir, el método de catálogo tiene N/A).

Verdaderos Negativos (VN): Casos donde ambos métodos no seleccionan.

Falsos Negativos (FN): Casos donde la lógica difusa no selecciona, pero el método de catálogo sí lo selecciona.

Las métricas por calcular son, precisión, la precisión mide la proporción de verdaderos positivos entre todos los elementos que el modelo ha clasificado como positivos. En otras palabras, de todos los elementos que el modelo predijo como positivos, cuántos realmente lo son. Exactitud, la exactitud mide la proporción de predicciones correctas (tanto verdaderos positivos como verdaderos negativos) sobre el total de predicciones. Indica qué tan bien el modelo está generalizando en comparación con la realidad. Recall, la recuperación, también conocida como

sensibilidad o tasa de verdaderos positivos, mide la proporción de verdaderos positivos que el modelo ha identificado entre todos los elementos que realmente son positivos. Es una medida de cuán bien el modelo encuentra todas las instancias positivas [32].

10. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Tras la ejecución del modelo de lógica difusa para la selección de ventiladores en diferentes configuraciones de presión y área constante, se realizó un análisis detallado para evaluar la precisión y confiabilidad del método en comparación con el catálogo de la metodología Chicago Blower. La matriz de confusión resultante ofrece una visión clara del desempeño del modelo, permitiendo la identificación de aciertos y errores en la clasificación.

Tabla 18.

Matriz de confusión para valores de presión y área constante con caudal variante.

Presión y Área Constante	VP	FP	VN	FN
10 SP y 800 in ²	2	4	4	0
5 SP y 600 in ²	2	4	4	0
26 SP y 1400 in ²	6	2	2	2
36 SP y 2000 in ²	9	3	0	0

Fuente: Autor.

Nota. La siguiente tabla presenta los valores de Verdaderos Positivos (VP), Falsos Positivos (FP), Verdaderos Negativos (VN) y Falsos Negativos (FN) para cada configuración de presión y área constante.

Tabla 19.
Métricas calculadas para caudal variante, presión y área constante.

	%
Recall	100
Precisión	60.6
Exactitud	69.7

Fuente: Autor.

Nota. Se obtuvo el 100% de recall, que significa que la lógica difusa selecciona un ventilador y el método del catálogo también lo hizo. El 60.6% de las selecciones validas coincidieron con el mismo valor y el 69.7% de las elecciones, sean válidas o no, coincidieron.

Tabla 20.
Matriz de confusión para valores de caudal y área constante con presión variante.

Caudal y Área Constante	VP	FP	VN	FN
2000 CFM y 800 in ²	7	3	10	0
4000 CFM y 1000 in ²	5	8	8	0
7000 CFM y 2000 in ²	6	2	2	0

Fuente: Autor.

Tabla 21.
Métricas calculadas para caudal y área constante con presión variante.

	%
Recall	1.00
Precisión	58
Exactitud	74.5

Fuente: Autor.

Nota. Se obtuvo el 100% de recall, que significa que la lógica difusa selecciono un ventilador, el método del catálogo también lo hizo. El 58% de las selecciones validas coincidieron con el mismo valor y el 74.5% de las elecciones, sean válidas o no, coincidieron.

Tabla 22.

Matriz de confusión para valores de presión y caudal constante con área variante.

Presión y caudal constante	VP	FP	VN	FN
4 SP y 800 CFM	7	1	0	0
15 SP y 1600 CFM	11	0	6	0
36 SP y 7000 CFM	3	1	12	0

Fuente: Autor.

Tabla 23.

Métricas calculadas para presión y caudal constante con área variante.

	%
Precisión	72.4
Exactitud	80.95
Recall	100

Fuente: Autor.

Tabla 24.

Métricas calculadas contabilizando todos los casos.

	%
Precisión	63.4
Exactitud	75
Recall	100

Fuente: Autor.

Nota. Se realizó una evaluación de la lógica difusa para la selección de ventiladores, analizando cuatro configuraciones diferentes de presión, área y caudal. Los resultados globales de la matriz de confusión muestran, una precisión de 63.4% que significa que ambos métodos seleccionaron el mismo tamaño de ventilador. La exactitud alcanzó un 75%, reflejando que el 75% de todas las predicciones, tanto correctas como incorrectas, coincidieron con los datos de referencia del catálogo. Se obtuvo un 100% de recall, lo que significa que todos los ventiladores seleccionados por la lógica difusa también fueron seleccionados por el método del catálogo.

El análisis del modelo de lógica difusa para la selección de ventiladores, comparado con el método del catálogo de Chicago Blower, revela que el modelo muestra una alta capacidad de detección, logrando un recall del 100% en todas las configuraciones evaluadas. Esto indica que todos los ventiladores identificados por la lógica difusa también fueron seleccionados por el catálogo, evidenciando que el modelo no pasó por alto ningún ventilador relevante.

Sin embargo, la precisión y la exactitud muestran variabilidad. Para las configuraciones de presión y área constante con caudal variante, la precisión fue del 60.6% y la exactitud del 69.7%, lo que sugiere que, aunque el modelo logró detectar todos los ventiladores correctos, la coincidencia específica con el catálogo no fue tan alta. En contraste, para las configuraciones de caudal y área constante con presión variante, el modelo alcanzó una precisión del 58.06% y una exactitud del 74.5%, lo que indica una mejor concordancia en las selecciones, aunque aún hay margen de mejora.

Para las configuraciones de presión y caudal constante con área variante, el modelo demostró una precisión excepcional del 72.4% y una exactitud del 80.95%, junto con un recall del 100%, destacándose en esta configuración.

En aspectos generales, sumando todas las configuraciones, el modelo de lógica difusa presenta una precisión del 63.44% y una exactitud del 75%, manteniendo un recall del 100%. Esto subraya que, aunque el modelo es efectivo en la identificación de ventiladores relevantes, la concordancia exacta con el catálogo puede variar dependiendo de la configuración específica. La alta tasa de recall sugiere que el modelo es robusto en la detección de ventiladores adecuados, mientras que la precisión y la exactitud indican áreas donde se podría mejorar la especificidad del modelo. Estos resultados destacan la utilidad del modelo de lógica difusa en aplicaciones prácticas, aunque también señalan la necesidad de ajustes adicionales para optimizar su rendimiento en comparación con métodos establecidos.

11. RESULTADOS E IMPACTOS

1. Se desarrolló un sistema de lógica difusa para la selección de ventiladores centrífugos SQI, tomando como referencia el catálogo Chicago Blower Bulletin 105. La validación del sistema demostró un desempeño robusto en diferentes configuraciones de presión, área y caudal.
2. Los resultados del sistema muestran un recall de 100%. Esto indica que el sistema de lógica difusa logró identificar correctamente todos los ventiladores seleccionados por el método del catálogo. Una precisión de 63%, que significa que de las selecciones válidas realizadas por el sistema coincidieron con las del catálogo. Una exactitud de 75%, que, de todas las predicciones, tanto correctas como incorrectas, coincidieron con los datos de referencia del catálogo.
3. Estos resultados sugieren que el sistema de lógica difusa es efectivo en la selección de ventiladores, con una precisión de 63% y una buena capacidad para coincidir con las recomendaciones del catálogo.

Tabla 25.
Resultados obtenidos.

Resultado	Indicador	Objetivo Relacionado
Documentación y validación del sistema	Documentación de trabajos previos y conceptos necesarios sobre lógica difusa.	Objetivo 1
Implementación en Python el algoritmo basado en lógica difusa	Optimización de selección de ventiladores	Objetivo Especifico 2
Desempeño y confiabilidad global del sistema	Recall: 100%, Precisión: 63%, Exactitud: 75%	Objetivo Especifico 3

Fuente: Autor.

Tabla 26.
Impactos esperados.

Aspecto	Impacto	Supuesto	Plazo
Técnico	Mejora en el proceso de selección de ventiladores centrífugos	Implementación de lógica difusa mejora la eficiencia de selección.	Mediano
Académico y Científico	Contribución al conocimiento en lógica difusa	Los resultados son referencia para futuras investigaciones	Largo

Fuente: Autor.

12. CONCLUSIONES

12.1. Conclusiones

Los resultados generales muestran que el algoritmo de lógica difusa, aunque ofrece una selección de ventiladores que en muchos casos coincide con el método de Chicago Blower, presenta algunas diferencias significativas en cuanto a la precisión y la consistencia de las selecciones. En particular, se observó que, para ciertas combinaciones de presión, área y caudal, el método de lógica difusa a veces selecciona ventiladores que no cumplen con el rango óptimo de operación especificado. En contraste, la metodología de Chicago Blower proporciona selecciones más ajustadas a los parámetros operativos, especialmente en condiciones de caudal alto y área extensa.

En términos de la diferencia en la potencia (BHP) entre las selecciones de ambos métodos, los resultados indican que la lógica difusa presenta variaciones notables, especialmente en condiciones de caudales y áreas variables. Aunque la lógica difusa muestra una menor diferencia en BHP bajo condiciones de alta presión y área, las discrepancias se vuelven más evidentes en escenarios con caudales más variados. Esto sugiere que mientras el algoritmo de lógica difusa puede ser efectivo en ciertas condiciones, la precisión en la selección de ventiladores puede verse afectada en otras.

La evaluación de la precisión mediante la matriz de confusión revela que el algoritmo de lógica difusa tiene una alta tasa de verdaderos positivos, indicando una buena coincidencia con el método de catálogo. Sin embargo, se identificaron falsos positivos y falsos negativos, lo que sugiere que el modelo tiene áreas de mejora en términos de precisión. Las métricas obtenidas muestran que, aunque el algoritmo de lógica difusa tiene un 100% de recall, lo que significa que no omite ninguna selección válida, la precisión es del 60.6% y la exactitud general es del 69% para caudal variante. Estos resultados indican que, aunque el modelo es eficaz en identificar ventiladores válidos, aún hay margen para mejorar la precisión y reducir los errores de selección.

El algoritmo ha demostrado un rendimiento eficiente con un recall del 100%, indicando que el sistema identificó correctamente todos los ventiladores seleccionados por el método del catálogo. La precisión general es de 63% sugiere que, de las selecciones válidas, el sistema acertó en un porcentaje significativo, mientras que la exactitud del 75% refleja una alta tasa de concordancia general

entre todas las predicciones y los datos de referencia. Los resultados obtenidos cumplen con los objetivos del proyecto, especialmente en la validación del sistema de lógica difusa. La comparación con el catálogo mostró que el sistema es capaz de replicar las selecciones del método estándar con una precisión y exactitud considerables, confirmando la validez del enfoque propuesto. Aunque el sistema muestra un rendimiento robusto, la precisión del 63% sugiere que hay de mejorar en la capacidad del sistema para reducir los falsos positivos. La incorporación de más reglas de inferencia podría mejorar la precisión sin comprometer el recall.

El análisis de la desviación estándar revela que la lógica difusa ofrece una dispersión comparable o inferior a la metodología Chicago Blower en diversas condiciones. En escenarios de presión y área constante, la lógica difusa presenta desviaciones estándar menores, lo que indica mayor consistencia. En condiciones de caudal y área constante, ambos métodos tienen una precisión idéntica con desviaciones estándar de 0. En condiciones de presión y caudal constante, Chicago Blower tiene una ligera ventaja con una desviación estándar de 1,58 frente a 1,90 de la lógica difusa. Sin embargo, en condiciones extremas de presión y caudal, la lógica difusa muestra una desviación estándar de 0 frente a 1,10 de Chicago Blower. Esto sugiere que la lógica difusa es una alternativa menos variante que la metodología Chicago Blower.

12.2. Trabajos Futuros

El trabajo futuro apunta, explorar la integración de características adicionales, considerando otras bases de datos para la creación de un código más robusto y susceptibles a distintos valores de entrada.

13. BIBLIOGRAFÍA

- [1] D. Rodríguez, J. Vargas, y E. González, “Arquitectura de información como un proceso para organizar sitios web usables e intuitivos: el caso del Centro Centroamericano de Población (CCP),” *E-Ciencias de la Información*, vol. 9, no. 1, pp. 60–83. [En línea]. Disponible: <http://dx.doi.org/10.15517/eci.v1i1.34185>
- [2] J. R. Chavarría, J. R. Monge, y J. L. Navas, *Equipo de laboratorio para la obtención de la curva característica de los ventiladores industriales*, tesis de grado no publicada, Repositorio. [En línea]. Disponible: <http://hdl.handle.net/11715/1720>, noviembre de 1992.
- [3] W. Ortega, F. Pozo, J. Vásquez, E. Díaz, y A. Patiño, *Modelo ecológico de Bronferbrenner aplicado a la pedagogía, modelación matemática para la toma de decisiones bajo incertidumbre: de la lógica difusa a la lógica plitogénica*, Huánuco: NSIA Publishing House Editions, 2021.
- [4] A. Cabrera, F. Ortiz, y F. Cruz, “Un modelo de minimización de costos de mantenimiento de equipo médico mediante lógica difusa,” *Revista Mexicana de Economía y Finanzas Nueva Época REMEF*, vol. 14, no. 3, pp. 379–396. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.21919/remef.v14i3.410>, marzo de 2019.
- [5] P. Sharma, *Selection of fans for thermal power plants*, tesis de maestría, Universidad de Delhi de Ingeniería, 1997.
- [6] P. Zúñiga-Moreno, *Recomendaciones básicas para la selección de ventiladores*, [Archivo PDF]. [En línea]. Disponible: <https://www.ispch.cl/sites/default/files/GuiaUsoVentilador-28062019A.pdf>
- [7] L. Zadeh, “The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning-III,” *Information Sciences*, vol. 9, no. 1, pp. 43–80. [En línea]. Disponible: [https://doi.org/10.1016/0020-0255\(75\)90017-1](https://doi.org/10.1016/0020-0255(75)90017-1), 1975.
- [8] F. I. Gallegos, *Desarrollo de hojas de cálculo mediante Excel para la selección de ventiladores industriales de tipo extractores centrifugos de tejado*, tesis de pregrado, Escuela Superior Politécnico de Chimborazo. [En línea]. Disponible: <https://es.scribd.com/document/293603159/SELECTION-OF-FANS-FOR-THERMAL-pdf>, noviembre de 1997.
- [9] R. Esquivel, G. Félix, y R. Bello, “Impact assessment of training with fuzzy logic,” *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, vol. 22, no. 1, pp. 41–52. [En línea]. Disponible: <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-33052014000100005>, 2014.
- [10] F. J. Ruvalcada y A. Vermonden, “Lógica difusa para la toma de decisiones y la selección de personal,” *RedALyC*. [En línea]. Disponible: <https://www.redalyc.org/journal/1872/187243745010/html/>, 2015.
- [11] J. M. Belman, D. A. Rodríguez, S. Ledesma, J. J. García-Pabón, D. Hernández, y D. M. Pardo, “A review on applications of fuzzy logic control for refrigeration systems,” *Applied Sciences*, vol. 12, no. 3, p. 1302. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.3390/app12031302>, diciembre de 2021.
- [12] C. Dumitrescu, P. Ciotirnae, y C. Vizitiu, “Fuzzy logic for intelligent control system using soft computing applications,” *Sensors*, vol. 21, no. 8, p. 2617. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.3390/s21082617>, abril de 2021.

- [13] G. Murugesan, T. Irshad, J. Bhola, M. Shabaz, J. Singla, M. Rakhra, S. More y I. Abubakari., "Fuzzy logic-based systems for the diagnosis of chronic kidney disease," *BioMed Research International*, vol. 2022, p. 2653665. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1155/2022/2653665>, marzo de 2022.
- [14] S. Hosseinpour y A. Martynenko, "Application of fuzzy logic in drying: a review," *Drying Technology*, vol. 40, no. 5, pp. 797–826. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1080/07373937.2020.1846192>, octubre de 2020.
- [15] M. N. Ali, K. Mahmoud, M. Lehtonen, y M. M. F. Darwish, "Promising MPPT methods combining metaheuristic, fuzzy-logic and ANN techniques for grid-connected photovoltaic," *Sensors*, vol. 21, no. 4, p. 1244. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.3390/s21041244>, febrero de 2021.
- [16] A. Kandel, *Fuzzy expert systems*, vol. 1, CRC Press, pp. 99–112, 1992.
- [17] R. Janarthanan, R. Balamurali, A. Annapoorani, y V. Vimala, "Prediction of rainfall using fuzzy logic," *Materials Today: Proceedings*, vol. 37, pp. 959–963. [En línea]. Disponible: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.179>, 2021.
- [18] Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, *Acervo para el mejoramiento del aprendizaje de alumnos de ingeniería en inteligencia artificial*. [En línea]. Disponible: <https://virtual.cuautitlan.unam.mx/intar/>, junio de 2021.
- [19] J. Galindo, *Apuntes de lógica difusa*, Departamento de Lenguajes y Ciencias de la Computación, Universidad de Málaga. [En línea]. Disponible: <http://www.lcc.uma.es/~ppgg/FSS/FSS8.pdf>
- [20] A. L. Zadeh, "Soft computing and fuzzy logic," *IEEE Spectrum*, vol. 11, no. 6, pp. 48–56. doi: 10.1109/52.329401, noviembre de 1994.
- [21] S. Diciembre-Sanahuja, *Fundamentos de los conjuntos difusos*, tesis de maestría. [En línea]. Disponible: <https://repositori.uji.es/server/api/core/bitstreams/4c55da16-35b5-4582-809d-0be5c07e1a56/content>, octubre de 2022.
- [22] Universidad de Sevilla, "Introducción a la lógica difusa." [En línea]. Disponible: https://www.cs.us.es/~fsancho/Blog/posts/Introduccion_logica_Difusa.md.html
- [23] V. Soler, *Lógica difusa aplicada a conjuntos imbalanceados*, tesis doctoral, Universidad de Barcelona. [En línea]. Disponible: <https://www.tesisenred.net/bitstream/handle/10803/5777/vsr1de1.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [24] J. Cisneros-Santoyo, *Diseño de un control inteligente usando técnicas de lógica difusa, aplicado a un balastro electrónico*, tesis de pregrado, Universidad Autónoma de Aguascalientes. [En línea]. Disponible: <http://hdl.handle.net/11317/1247>, 2016.
- [25] Chicago Blower Corporation, *Chicago Blower ICF, bulletin 105*, [Archivo PDF]. [En línea]. Disponible: <https://es.scribd.com/document/352531547/Catalogo-Ventiladores-Chicago-Blowers>
- [26] D. N. Cuesta Cuesta, E. D. Triana Campos, y M. Regalia, "Aplicación de la lógica difusa en redes eléctricas inteligentes smart grid," *Revista Vínculos*, vol. 10, no. 2, pp. 75–84, dic. 2013.
- [27] R. G. Morales y E. G. Muñoz, "Sistema de recomendación difuso de productos basado en lógica difusa," *Dialnet*, 2022. [En línea]. Disponible: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9401563>, septiembre de 2022.

- [28] E. R. Aguirre, “Estudio y simulación del control de tráfico inteligente utilizando lógica difusa,” 2002. [En línea]. Disponible: <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/5459>, febrero de 2002.
- [29] B. Musizza y S. Ribaric, “Monitoring the depth of anaesthesia,” *Sensors*, vol. 10, no. 12, pp. 10896–10935, Dec. 2010. doi: <https://doi.org/10.3390/s101210896>
- [30] W. Y. Romero, J. X. Romero, J. A. Romero, y A. M. Gordón, “Modelamiento y simulación de un controlador difuso para un sistema de enfriamiento híbrido,” *Dialnet*, 2020. [En línea]. Disponible: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7398399>, marzo de 2020.
- [31] T. J. Ross, *Fuzzy Logic with Engineering Applications*. 2010. doi: 10.1002/9781119994374
- [32] A. S. Roque, V. W. Krebs, I. C. Figueiro, and N. Jazdi, “An analysis of machine learning algorithms in rotating machines maintenance,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 55, no. 2, pp. 252–257, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.ifacol.2022.04.202.