

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**

**EVALUACIÓN DEL ESTADO DE TRANSFORMADORES DE  
POTENCIA MEDIANTE LA APLICACIÓN DE LÓGICA DIFUSA AL  
ANÁLISIS DE GASES DISUELTOS EN ACEITE**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO  
ELÉCTRICO**

**ALEX JAVIER CHICAIZA PORTERO**

javier.epn.28@hotmail.com

**DIRECTOR: ING. FAUSTO VALENCIA, MSc.**

fausto.valencia@epn.edu.ec

**Quito, Noviembre 2016**

## DECLARACIÓN

Yo, Alex Javier Chicaiza Portero, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

---

Alex Javier Chicaiza Portero

## CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Alex Javier Chicaiza Portero, bajo mi supervisión.

---

Ing. Fausto Valencia, MSc.  
DIRECTOR DEL PROYECTO

## AGRADECIMIENTO

En primer lugar, agradezco a Dios por la vida, la salud y la fuerza brindada para cada día avanzar en el transcurso de mi vida y mi carrera.

A mi madre por su infinito amor, por su apoyo incondicional, por creer en mí y darme la oportunidad de superarme, por su esfuerzo diario para ayudarme a cruzar cada etapa de mi vida.

A mi padre por su apoyo, por creer en mí y por sus constantes consejos.

A mi familia, mis tías, mis tíos, mis primos, mis primas y padrinos por su apoyo, por su cariño y estima, y por siempre darme un consejo.

A Alexandra R. y su familia por todo el estima y apoyo incondicional recibido durante esta etapa de mi vida.

A todos mis amigos de la Escuela Politécnica Nacional, especialmente a Ivoncita, Jefferson y Santiago por ayudarme en las situaciones difíciles, por los gratos momentos, por compartir una etapa más de mi vida, por escucharme y apoyarme, y sobre todo por la amistad que me brindaron.

Al Ingeniero Fausto Valencia por la paciencia y por su valiosa ayuda para la culminación de este proyecto.

## DEDICATORIA

*Dedico este trabajo a mi madre, Mercedes Portero.*

Alex Javier Chicaiza Portero

## CONTENIDO

DECLARACIÓN .....	i
CERTIFICACIÓN .....	ii
AGRADECIMIENTO .....	iii
DEDICATORIA .....	iv
CONTENIDO .....	v
RESUMEN .....	vii
PRESENTACIÓN .....	viii
INTRODUCCIÓN .....	1
<b>CAPÍTULO I</b> .....	<b>3</b>
1 MARCO TEÓRICO .....	3
1.1 GENERALIDADES DEL TRANSFORMADOR .....	3
1.1.1 SISTEMA DE AISLAMIENTO .....	3
1.2 ANÁLISIS DE GASES DISUELTOS .....	10
1.2.1 TEORÍA GENERAL .....	10
1.2.2 FALLAS INCIPIENTES EN TRANSFORMADORES .....	13
1.3 MÉTODOS CONVENCIONALES DE INTERPRETACIÓN DEL ANÁLISIS DE GASES .....	16
1.3.1 MÉTODO DE DUVAL .....	18
1.3.2 MÉTODO DE ROGERS .....	20
1.3.3 MÉTODO DE IEC .....	21
<b>CAPÍTULO II</b> .....	<b>24</b>
2 IMPLEMENTACIÓN DE LÓGICA DIFUSA AL ANÁLISIS DE GASES DISUELTOS .....	24
2.1 LÓGICA DIFUSA .....	24
2.1.1 DEFINICIÓN .....	24
2.1.2 CONJUNTOS DIFUSOS .....	25
2.1.3 REGLAS SI-ENTONCES (IF - THEN) .....	28
2.1.4 INFERENCIA DIFUSA .....	29
2.2 CAJA DE HERRAMIENTAS DE LÓGICA DIFUSA DE MATLAB (Fuzzy Logic Toolbox) .....	33
2.2.1 HERRAMIENTAS DE INTERFAZ GRÁFICA .....	34
2.2.2 APLICACIÓN DE LÓGICA DIFUSA .....	43
<b>CAPÍTULO III</b> .....	<b>57</b>

<b>3 ANÁLISIS DE GASES DISUELTOS EN ACEITE MEDIANTE MÉTODOS CONVENCIONALES Y COMPARACIÓN CON EL MÉTODO PROPUESTO.....</b>	<b>57</b>
3.1 ANÁLISIS DE GASES DISUELTOS MEDIANTE TÉCNICAS CONVENCIONALES .....	58
3.1.1 TÉCNICA DE DUVAL .....	58
3.1.2 EL MÉTODO DE ROGERS.....	60
3.1.3 EL MÉTODO IEC.....	61
3.2 ANÁLISIS DE GASES DISUELTOS MEDIANTE METODOS DIFUSOS .....	63
3.2.1 LAS RELACIONES DIFUSAS DE ROGERS.....	63
3.2.2 LAS RELACIONES DIFUSAS IEC.....	66
3.3 COMPARACIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS.....	68
3.3.1 VENTAJAS Y DESVENTAJAS .....	70
<b>CAPÍTULO IV.....</b>	<b>72</b>
<b>4 ANÁLISIS DE GASES DISUELTOS EN ACEITE DE CASOS ESPECIALES DE FALLAS EN TRANSFORMADORES .....</b>	<b>72</b>
4.1 CASO PROPUESTO.....	72
4.2 SOLUCIÓN MEDIANTE EL MÉTODO DIFUSO DE ROGERS.....	73
4.3 SOLUCIÓN MEDIANTE EL MÉTODO DIFUSO IEC .....	74
4.4 APLICACIÓN A UN CASO REAL .....	76
<b>CAPÍTULO V .....</b>	<b>79</b>
<b>5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>79</b>
5.1 CONCLUSIONES.....	79
5.2 RECOMENDACIONES .....	80
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>81</b>
<b>ANEXO 1 .....</b>	<b>83</b>
<b>ANEXO 2 .....</b>	<b>85</b>
<b>ANEXO 3 .....</b>	<b>87</b>
<b>ANEXO 4 .....</b>	<b>90</b>

## RESUMEN

En el presente trabajo se ha implementado la Lógica Difusa a los métodos de análisis de gases disueltos de Rogers e IEC como herramienta de análisis, esto se ha logrado gracias a la utilización del Toolbox de Lógica Difusa de Matlab.

Para poder conocer el grado de precisión de cada método difuso integrado (método difuso de Rogers e IEC), se ha procedido con el análisis de gases de los resultados de diversas cromatografías obtenidas de varias muestras de aceite de transformadores con fallas claramente identificadas.

Una vez que se han obtenido los resultados al aplicar estos nuevos métodos al análisis de gases, se realizó una comparación donde se encontró que los métodos que integran la lógica difusa como herramienta extra de análisis brindan un mejor grado de certeza a la hora de identificar una avería. Además, se encontró que en algunos casos especiales se pudo estimar la presencia de varios tipos de fallas, lo cual ayuda mucho a la hora de establecer un diagnóstico del estado de un transformador de potencia.

Finalmente se concluye que los métodos difusos ofrecen una mayor precisión a la hora de identificar una falla incipiente dentro de un transformador sumergido en aceite y que la lógica difusa es una herramienta de análisis inteligente muy beneficiosa.



## PRESENTACIÓN

En este presente documento se propone la utilización de la Lógica Difusa como una herramienta complementaria a los métodos de análisis de gases disueltos de Rogers e IEC, con el objetivo de mejorar la precisión a la hora de identificar una falla incipiente dentro de un transformador.

En el Capítulo 1 se desarrolla la teoría básica sobre el sistema de aislamiento de un transformador, el tipo de averías a los que está expuesto, los gases que éstos generan y los principales métodos para poder identificarlos.

En el Capítulo 2 se describe la teoría concerniente a la Lógica Difusa, se describe el paquete computacional que ofrece Matlab y se realiza la implementación de las aplicaciones de Lógica Difusa junto con los métodos de Rogers e IEC.

En el Capítulo 3 se realiza una comparación de resultados obtenidos al utilizar los métodos tradicionales de Rogers, IEC y Duval frente a los resultados obtenidos luego de incorporar la Lógica Difusa a los métodos de Rogers e IEC.

En el Capítulo 4 se proponen casos especiales con la finalidad de estimar el tipo de falla presente en cada muestra.

En el Capítulo 5 se formulan las conclusiones y recomendaciones derivadas de este trabajo.

Finalmente, se ponen a disposición las Referencias Bibliográficas utilizadas y los Anexos, donde se encuentra información de las aplicaciones implementadas, así como también los resultados obtenidos.

## INTRODUCCIÓN

Los transformadores de potencia son de gran importancia al ser uno de los equipos más costosos dentro de los procesos de conversión y transmisión de energía eléctrica. Durante su vida útil estos equipos están expuestos a diferentes condiciones de estrés eléctrico, tales como las descargas eléctricas y las fallas propias de su operación afectando sus componentes y como consecuencia la confiabilidad y la vida útil del mismo. Es, por lo tanto, importante establecer un plan de mantenimiento eléctrico preventivo y predictivo. En este sentido, tienen especial atención las pruebas fisicoquímicas y cromatográficas aplicadas al aceite aislante debido a que se las puede realizar con el equipo energizado. Con éstas se puede obtener información sobre el estado y funcionamiento del equipo, y así reducir el número de interrupciones no programadas causadas por daños al transformador.

El aceite mineral tiene como principal función proveer aislamiento dieléctrico, proteger al papel, y disipar el calor generado en el núcleo del bobinado. Durante la operación y con el transcurso del tiempo, el aceite se descompone liberando ciertos gases; la distribución y tasa de generación de los mismos puede ser útil para determinar el tipo de falla y su severidad, en caso de que alguna existiera.

Con el fin de darle un correcto significado al contenido de gases disueltos se propone el uso de herramientas inteligentes tales como la aplicación de la lógica difusa que junto con los métodos de interpretación de fallas de IEC y Rogers, permite identificar el tipo de falla y su origen, ya sea éste térmico o eléctrico y así conocer el tipo de mantenimiento correctivo a tomar.

En el presente trabajo se realiza una aplicación de la Lógica Difusa, utilizando el Toolbox de Lógica Difusa en el software computacional Matlab, el cual emplea las relaciones de gases obtenidos de una prueba de Cromatografía de Gases y las técnicas de análisis de Rogers e IEC con la finalidad de diagnosticar y determinar los

diferentes tipos de fallas incipientes que se presentan durante la operación de un transformador de potencia. El programa propuesto se aplicará a casos reales y a casos especiales permitiendo obtener una interpretación del tipo de falla, de acuerdo al contenido de gases presentes en el interior del transformador.

Esta aplicación y análisis se limita principalmente a transformadores de potencia sumergidos en aceite mineral dieléctrico.

Finalmente se comparan los resultados obtenidos con otros métodos existentes.

# CAPÍTULO I

## 1 MARCO TEÓRICO

### 1.1 GENERALIDADES DEL TRANSFORMADOR

El transformador es una máquina eléctrica estática de corriente alterna que mediante un campo electromagnético transmite energía. Su principal objetivo es la transformación o el cambio de voltaje alterno de un nivel a otro de la misma frecuencia.

Los transformadores son los enlaces entre los generadores eléctricos del sistema de potencia y las líneas de transmisión, y entre las líneas de diferentes niveles de voltaje. Generalmente está constituido por dos bobinas de material conductor, devanadas sobre un núcleo cerrado de material ferromagnético, pero aislados entre sí eléctricamente.

El transformador eléctrico es una máquina considerada como un elemento fiable en el sistema eléctrico. No obstante, sus componentes están sometidos a temperatura y gradiente de campo eléctrico, lo cual provoca un envejecimiento en el aislamiento.

#### 1.1.1 SISTEMA DE AISLAMIENTO

Este sistema tiene como función principal proporcionar aislamiento entre los devanados, el núcleo y la carcasa, es decir evita la circulación de la corriente entre dos puntos que tienen diferente potencial eléctrico.

En un transformador de potencia el sistema de aislamiento está compuesto principalmente por:

- Aceite Aislante
- Papel

### *1.1.1.1 El Aceite Aislante*

El aceite dieléctrico mineral es un líquido viscoso de color amarillo claro pálido, inodoro y estable en condiciones normales, que cumple con cuatro funciones principales: aislamiento eléctrico entre los componentes de transformador, protección del papel aislante del transformador y transferencia del calor generado en las bobinas y el núcleo hacia las paredes del tanque y los radiadores, además de extinguir eventuales arcos eléctricos. [1]

El aceite dieléctrico es una mezcla de hidrocarburos procedentes del petróleo obtenidos mediante procesos de destilación y refinación, en proporciones que dan las mejores características para adaptarse a las condiciones de funcionamiento. Está compuesto por hidrocarburos isoparafínicos, nafténicos y aromáticos; en algunos tipos de aceite se utilizan compuestos sintéticos conocidos como inhibidores.

El aceite dieléctrico para transformador debe cumplir con las siguientes características [1]:

- Alta Rigidez Dieléctrica.

Es la característica que tiene un aislante para soportar un valor límite de la intensidad del campo eléctrico sin fallar, necesaria en la prevención de arcos en el transformador.

- Baja tendencia a la oxidación.

Capacidad del aceite para evitar una oxidación prematura. Los procesos de oxidación son el paso inicial en la formación de ácidos, lodos y compuestos perjudiciales para el transformador.

- Baja Viscosidad y Alto Punto de Fluidez.

La viscosidad es la resistencia que tienen ciertos líquidos para fluir. Un aceite muy viscoso fluiría con dificultad en el transformador, disminuyendo su capacidad para extraer calor de los devanados. El punto de fluidez es la temperatura mínima necesaria para fluir; en lugares donde existan muy bajas temperaturas hay que asegurar un alto punto de fluidez.

- Alto Punto de Inflamación.

El punto de inflamación del aceite mineral es la temperatura a la que éste se debe calentar (en las condiciones de prueba) con el fin de obtenerse el suficiente vapor para formar una mezcla inflamable con el aire. El punto de inflamación es la temperatura que proporciona suficientes vapores combustibles para sostener un fuego durante 5 s (en las mismas condiciones de prueba). Un punto de inflamación bajo puede indicar la presencia de contaminantes combustibles volátiles en el aceite mineral.

- Baja tendencia a gasificarse.

Resistencia que deben tener los hidrocarburos para emitir gases ante la presencia de descargas eléctricas u otras condiciones de falla. Los gases generados en estas fallas además de cambiar las propiedades del aceite, generan elevadas presiones en el transformador que pueden ocasionar su desconexión.

- Alto punto de anilina.

El punto de anilina es la temperatura del aceite mineral que indica la solvencia del aceite con algunos materiales que están en contacto con el aceite. Un alto punto de anilina indica una baja solvencia con algunos materiales como el caucho, por ejemplo.

- Alta tensión Interfacial.

La tensión interfacial es un indicador de que tan soluble es el agua en el aceite. Una alta tensión interfacial es representativa de un aceite poco miscible en agua, por tal motivo un contenido alto de humedad en un aceite de alta tensión interfacial no representaría una disminución alta de su rigidez dieléctrica.

### *1.1.1.2 El Papel*

El papel aislante es el principal componente del aislamiento sólido dentro de transformadores sumergidos en aceite. Principalmente se tiene el papel kraft, el cual se lo utiliza para envolver los conductores de los bobinados, y el cartón prensado, usado para separar los devanados de alto y bajo voltaje, así como para brindar soporte mecánico.

Dentro de las principales características que debe cumplir el papel aislante en el interior de un transformador, se destacan las siguientes:

- Resistencia eléctrica: Debe tener buena capacidad de soportar altos voltajes incluidos esfuerzos de impulso y transientes de sobre-corrientes y/o sobretensiones.
- Resistencia mecánica a la tracción: La unidad debe soportar adecuadamente los esfuerzos axiales originados en cortocircuitos.
- Resistencia térmica y buena transferencia de calor.

El papel aislante está compuesto principalmente de celulosa. La celulosa es una de las numerosas sustancias vegetales que están formadas por largas cadenas de glucosa ( $C_6H_{10}O_5$ )<sub>n</sub>. La celulosa es utilizada en procesos industriales como absorbente de alta densidad para eliminar lodos y otras sustancias insolubles, por esta razón los contaminantes presentes en el transformador se adhieren a la misma. La

descomposición térmica de este aislamiento produce óxidos de carbono (CO, CO<sub>2</sub>) y algo de hidrógeno (H<sub>2</sub>) o metano (CH<sub>4</sub>), estos últimos debido a la presencia del aceite.

- El papel al ser impregnado de aceite dieléctrico ofrece una alta rigidez dieléctrica.
- Es un material muy higroscópico, es decir tiende a absorber grandes cantidades de agua aproximadamente 600 a 800 veces más que el aceite aislante. Por tal razón en el papel se halla el 90% del agua presente en el transformador.
- El papel Kraft es bastante poroso, por lo que tiene la capacidad de retener productos que pueden degradar el aceite. Puede decirse que el papel desarrolla la función de un elemento regenerador de aceite dieléctrico.
- Actúa como catalizador en el proceso de oxidación de los hidrocarburos.

### ***1.1.1.3 Agentes de degradación del aceite y del papel aislante***

El sistema de aislamiento de un transformador de potencia tiene potenciales agentes que facilitan y aceleran su deterioro y envejecimiento, entre los cuales se destacan los siguientes: la humedad, la temperatura y el oxígeno.

#### ***1.1.1.3.1 Humedad***

El impacto que tiene la humedad en las propiedades aislantes del aceite dieléctrico depende de la forma en que esté presente. Una pequeña cantidad de agua en forma de solución (agua - aceite) provoca una disminución importante de la rigidez dieléctrica del aceite; mientras que, si el agua se encuentra disuelta en el aceite, ésta tiene poca o ninguna influencia en la reducción de la rigidez dieléctrica.

Por otra parte, el agua desempeña la función de catalizador en las reacciones de deterioro del aceite, y si la cantidad de agua es excesiva también afecta al factor de potencia del aislamiento (aumentando su valor).



La cantidad de humedad presente en el aceite puede incrementarse rápidamente con el aumento de la temperatura, es decir, a medida que la temperatura del aceite se eleva la cantidad de humedad que puede ser disuelta en él también aumenta. [2]

Al considerar el papel como un elemento muy higroscópico, un alto contenido de humedad en el mismo deriva en las siguientes consecuencias:

- Disminución de la resistencia mecánica a la tracción.
- Desintegración de las fibras celulósicas.
- Aceleración del envejecimiento del aislamiento.
- Disminución de la temperatura de inicio de la formación de burbujas (vapor de agua).

A continuación, se muestra una tabla con los valores de concentración máxima de agua (ppm) para la operación normal de un transformador de acuerdo al nivel de voltaje.

Tabla 1.1 Contenido máximo de Agua [3]

Nivel de voltaje	≤69 kV	>69 kV y <230 kV	≥230 kV
<b>Contenido Máximo de Agua (ASTM D1533) mg/kg (ppm)</b>	35	25	20

La aparición de contaminantes sólidos provenientes de los procesos de deterioro del papel (fibras celulósicas) y de la corrosión de la cuba (partículas de óxidos) pueden formar puentes ideales para las descargas eléctricas, afectando la vida útil del transformador.

### *1.1.1.3.2 Temperatura*

Cuando existe un aumento de la temperatura se produce un incremento de la tasa de oxidación del aislamiento y también incrementa la cantidad de humedad que puede absorber el aceite.

Además, se sabe que el 90% del deterioro de la celulosa se debe al aumento de la temperatura. [2] El deterioro del aislamiento es función del tiempo, la temperatura y de cuan seco está el papel. Las elevadas temperaturas causan un envejecimiento acelerado de la celulosa empleada en el aislamiento, reduciéndose las propiedades mecánicas, dieléctricas y térmicas de la misma, provocando de-polimerización o destrucción del papel quedando zonas expuestas sin papel. Otros efectos debido a las elevadas temperaturas son generación de agua, materiales ácidos y gases (CO<sub>2</sub>, CO).

### *1.1.1.3.3 Oxígeno*

La omnipresencia del oxígeno junto con el efecto catalizador del cobre, calor y el agua favorece a la oxidación del líquido aislante incluso en condiciones normales. De este modo el proceso de oxidación permite la generación de algunos subproductos como ácidos, peróxidos, polímeros que alteran las propiedades originales del aceite dieléctrico. Así, el oxígeno disuelto se convierte en un factor que contribuye a la formación de gases de petróleo.

Estos procesos de oxidación son acelerados por las altas temperaturas generadas por el núcleo principalmente por las bobinas de bajo voltaje.

La oxidación ataca a las moléculas del papel en uno o más de sus enlaces, el resultado de este cambio químico es la formación de contaminantes polares y agua. La oxidación le resta al papel rigidez mecánica, dureza, capacidad de encorvarse y dilatarse, capacidad de resistir shocks de carga y, por último, como resultado de la

oxidación se generan productos volátiles que se evaporan y decrecen el espesor o volumen del papel. [2]

## **1.2 ANÁLISIS DE GASES DISUELTOS**

Debido a la importancia de los transformadores de potencia dentro de un sistema eléctrico, las pruebas de prevención y el monitoreo en línea son de gran beneficio para predecir condiciones de falla y establecer cronogramas de mantenimiento o retiro del equipo.

El análisis de gases disueltos (DGA por sus siglas en inglés) es una herramienta muy importante usada para detectar fallas incipientes en equipos sumergidos en aceite mineral. Este método es extensamente aplicado en mantenimientos de rutina de los transformadores de potencia. Cualquier deterioro en el aceite del equipo puede dar como consecuencia el fallo del mismo.

Diferentes tipos de fallas producen diferentes clases de gases, en diversas proporciones, y su análisis fisicoquímico junto con la ayuda del Análisis de Gases Disueltos, permite obtener información útil sobre la condición del aceite, y ayuda a identificar el tipo de falla en un transformador. [4]

### **1.2.1 TEORÍA GENERAL**

Las dos principales causas de la formación de gases en un transformador en operación son los esfuerzos térmicos y eléctricos. Cuando se tienen transformadores sobrecargados se producen gases debido a la descomposición térmica del aceite y el papel aislante. Los gases también se pueden originar debido a la descomposición del aceite expuesto a las altas temperaturas generadas por un arco eléctrico. [5]

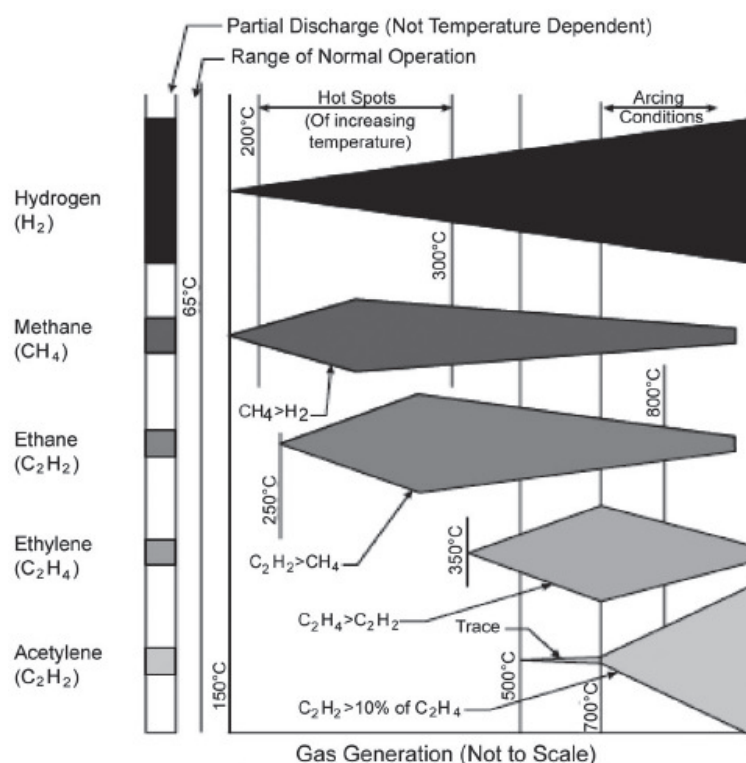


Figura 1.1 Generación de Gases Combustibles vs. Temperatura aproximada de descomposición del Aceite. [6]

### 1.2.1.1 Gases de Falla

A continuación, se mencionan los principales gases de falla encontrados en el interior de un transformador sumergido en aceite: [5]

- Hidrógeno (H<sub>2</sub>)

Este gas se presenta al inicio de cualquier falla, ya sea descargas de baja energía o de alta energía. Normalmente se genera a partir de los 150°C.

- Metano (CH<sub>4</sub>)

Este gas se produce ante la presencia de descargas parciales o descomposición térmica del aceite; como se puede observar en la Figura 1.1 el metano comienza a formarse en pequeñas cantidades a la misma temperatura que la del hidrógeno.

- Etano ( $C_2H_6$ )  
La principal causa de la formación de este gas es la descomposición térmica del aceite. Se comienza a producir a partir de los  $250^\circ C$ .
- Etileno ( $C_2H_4$ )  
Empieza a presentarse en el aceite sobre los  $350^\circ C$ . Este gas normalmente se debe a la descomposición térmica del aceite a altas temperaturas.
- Acetileno ( $C_2H_2$ )  
Este gas se produce a temperaturas superiores a los  $500^\circ C$ , y generalmente su causa es la presencia de un arco eléctrico. Si el tiempo de generación de este gas es muy corto, se deben tomar medidas preventivas.
- Monóxido de Carbono (CO)  
Generalmente la causa de este gas se le atribuye a la descomposición térmica de la celulosa u otro asilamiento sólido.
- Dióxido de Carbono ( $CO_2$ )  
Este gas es un indicativo del envejeciendo de la celulosa o la presencia de descargas en la misma. Si la relación de  $CO_2/CO$  es mayor a 7, puede deberse a un caso de sobrecalentamiento excesivo de la celulosa.

En la Tabla 1.2 se indican los niveles de gases en los cuales el transformador se encuentra operando satisfactoriamente.

Tabla 1.2 Concentración de Gases Disueltos [5]

Límites de Concentración de Gases Disueltos							
Gas	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	CO	CO <sub>2</sub>
[ $\mu L/L$ (ppm)]	100	120	1	50	65	350	2500

### ***1.2.1.2 Descomposición de la Celulosa***

La descomposición térmica de la celulosa impregnada de aceite produce Óxidos de Carbono (CO, CO<sub>2</sub>) y un poco de hidrógeno o metano (H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>) debido a la presencia del aceite. La velocidad a la cual se producen depende exponencialmente de la temperatura y directamente de la cantidad de material expuesto a dicha temperatura. Las fallas en el papel aislante son generalmente consideradas más graves que las fallas en el aceite. El papel es utilizado en áreas de una alta concentración del campo eléctrico, y su destrucción puede conducir a cortocircuitos o severos arcos eléctricos. Afortunadamente las fallas en papel son menos frecuentes que en el aceite. [5] [6]

### ***1.2.1.3 Descomposición del Aceite***

El aceite mineral de los transformadores es una mezcla de diferentes moléculas de hidrocarburos, cuyo proceso de descomposición es muy complejo. Dicha descomposición empieza por la ruptura de los enlaces de carbón-hidrógeno y carbón-carbón. Estos radicales libres pueden combinarse con otros, formando gases, moléculas de hidrógeno, metano, etano, etc., otros pueden recombinarse y formar nuevas moléculas condensables. Además, estos procesos de descomposición y reordenamiento conllevan a la formación de productos tales como el etileno y acetileno, y en casos extremos, se forman partículas de carbón hidrogenado. [5]

Estos procesos son dependientes de la presencia de hidrocarburos individuales, de la distribución de la energía y la temperatura en las cercanías de la falla, y del tiempo de exposición del aceite a los esfuerzos eléctricos o térmicos. [5]

## **1.2.2 FALLAS INCIPIENTES EN TRANSFORMADORES**

Las fallas incipientes dentro de un transformador pueden ser clasificadas en dos principales categorías, fallas de tipo térmico y fallas de tipo eléctrico. [5]

Las fallas pueden tener más de una causa; por esta razón se vuelve más difícil la localización de una falla. Para poder localizar el área de las fallas no solo se necesita el Análisis de Gases Disueltos (DGA), sino el empleo de otro tipo de pruebas eléctricas.

#### *1.2.2.1 Fallas Térmicas*

Las fallas térmicas surgen como consecuencia del sobrecalentamiento de conductores, cortocircuitos, sobrecalentamiento de los devanados debido a corrientes de Eddy, conexiones flojas o a causa de un sistema de enfriamiento deficiente. Las fallas térmicas localizadas se llaman puntos calientes. [5] [7]

La descomposición del aceite mineral a temperaturas que oscilan entre los 150°C a 500°C producen relativamente grandes cantidades de gases de bajo peso molecular, como el hidrógeno ( $H_2$ ) y el metano ( $CH_4$ ), y pequeñas cantidades de gases de alto peso molecular, como el etileno ( $C_2H_4$ ) y el etano ( $C_2H_6$ ). Cuando la temperatura de falla incrementa, las concentraciones de hidrógeno exceden a las de metano, dicha temperatura viene acompañada por significantes cantidades de gases de alto peso molecular, primero el etano, y luego el etileno. Al extremo superior del rango térmico de la falla, se puede producir un incremento sustancial de las cantidades de hidrógeno y etileno, además de aparecer rastros de acetileno. [5]

A diferencia de la descomposición térmica del aceite, la descomposición térmica de la celulosa y otros tipos de aislamiento sólido producen monóxido de carbón (CO), dióxido de carbono ( $CO_2$ ), y vapor de agua a temperaturas muchas más bajas que las necesarias para la descomposición del aceite y a una tasa exponencialmente proporcional a la temperatura. Debido a que la descomposición de la celulosa se da a menor temperatura que la del papel, se pueden encontrar estos gases (CO y  $CO_2$ ) a temperaturas normales de operación del transformador. [5]

### *1.2.2.2 Fallas Eléctricas*

- Descargas de baja intensidad

Las descargas de baja intensidad como las descargas parciales y los arcos de muy baja intensidad pueden deberse a huecos o grietas en el aislamiento sólido o la presencia de componentes flotantes como gotas de agua o burbujas de aire. Una descarga parcial aparece como un pequeño pulso que a menudo va acompañado por la emisión de sonido, luz, calor y reacciones químicas. [5] [7]

Este tipo de fallas producen principalmente hidrógeno, con decrecientes cantidades de metano y pequeñas cantidades de acetileno.

Si la intensidad de las descargas aumenta, las concentraciones de etileno y acetileno aumentan significativamente.

- Arcos de alta intensidad

Cuando hay la presencia de altos voltajes se puede dar la formación de un plasma en el aceite a través del cual puede fluir libremente la corriente eléctrica en forma de un arco. [5] [7]

Este tipo de descargas eléctricas generan elevadas temperaturas, que pueden alcanzar desde los 800°C hasta los 1800°C, produciendo importantes cantidades de acetileno.

Este tipo de fallas son muy peligrosas y si no son controladas, pueden producir presiones excesivas en el interior del transformador provocando una explosión en algunos casos.



En la Tabla 1.3 se indican los principales gases generados por la presencia de los diferentes tipos de averías eléctricas y térmicas.

Tabla 1.3 Gases generados en función del tipo de falla

<b>Gases generados en un transformador</b>				
Fallas	Térmicas	Altas Temperaturas	Aceite	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> , H <sub>2</sub> (CH <sub>4</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> )
			Papel	CO (CO <sub>2</sub> )
		Bajas Temperaturas	Aceite	CH <sub>4</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>
			Papel	CO <sub>2</sub> (CO)
	Eléctricas	Descargas Parciales	Aceite	H <sub>2</sub>
			Papel	H <sub>2</sub> , CO, CO <sub>2</sub>
		Arcos Eléctricos	Aceite	H <sub>2</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>

### 1.3 MÉTODOS CONVENCIONALES DE INTERPRETACIÓN DEL ANÁLISIS DE GASES

Existe una gran variedad de métodos de Análisis de Gases Disueltos, que se han implementado a fin de poder determinar el tipo de falla incipiente presente en un transformador. En este documento se utilizarán los métodos de relaciones entre gases: Método de Rogers, Método de IEC y el Método Grafico de Duval.

Mediante el uso de estas técnicas, es posible distinguir fallas en una gran variedad de equipos sumergidos en aceite. En la Tabla 1.4 se tabulan de forma general los tipos de fallas citados en este documento. [8]

Tabla 1.4 Clasificación General de los Tipos de Fallas

<b>Tipo de Falla</b>	<b>Código del Tipo de Falla (Por sus siglas en Inglés)</b>
Falla térmica a baja Temperatura	TF
Sobrecalentamiento y Chisporroteo	OH
Arco	ARC
Descargas Parciales y Corona	PD
Desgaste Normal	Normal

Cada método antes mencionado, realiza una subdivisión según el tipo de falla, como se muestra en la Tabla 1.5. [8]

Tabla 1.5 Agrupación de Fallas [8] [9]

<b>Método</b>	<b>TF</b>	<b>OH</b>	<b>ARC</b>	<b>PD</b>	<b>Normal</b>
Rogers	Ligero sobrecalentamiento <150°C	Sobrecalentamiento de Conductores	Flasheo	PDs	Normal
	Sobrecalentamiento de 150°C – 200°C	Circulación de corrientes en devanados	Arco	PDs con huella	
	Sobrecalentamiento de 200°C – 300°C	Circulación de corrientes entre tanque y núcleo	Chisporroteo Continuo		
IEC	Falla Térmica <150°C	Falla Térmica de 300°C – 700°C	Descargas de baja energía	PDs de baja densidad de energía	Normal
	Falla térmica de 150°C – 300°C	Falla Térmica >700°C	Descargas de alta energía		

				PDs de alta densidad de energía	
Duval	Falla térmica bajo los 300°C	Falla térmica entre 300°C y 700°C  Falla térmica a más de 700°C	Descargas de baja energía  Descargas de alta energía	Descargas Parciales  Mezcla de fallas térmicas y eléctricas	Normal

### 1.3.1 MÉTODO DE DUVAL

En 1974, Duval emplea tres gases (metano, etileno y acetileno) para la clasificación de fallas incipientes en transformadores. En 2002, llega a establecer un método gráfico para interpretar los resultados del análisis de gases disueltos y lo hace mediante el empleo de varias muestras con casos reales (fallas identificadas de forma visual) y algunas muestras con casos simulados en laboratorios. [10]

Para la interpretación gráfica, Duval utiliza un triángulo equilátero (Figura 1.2), donde cada lado constituye un eje en el cual se puede representar el contenido en porcentaje de CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> y C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, respectivamente.

A continuación, se presentan las ecuaciones que permiten calcular el porcentaje de contenido de cada gas: [10]

$$\%C_2H_2 = \frac{X}{X + Y + Z} * 100 \quad (1.1)$$

$$\%CH_4 = \frac{Y}{X + Y + Z} * 100 \quad (1.2)$$

$$\%C_2H_4 = \frac{Z}{X + Y + Z} * 100 \quad (1.3)$$

Donde **X** representa la concentración en ppm de C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, **Y** la concentración en ppm de CH<sub>4</sub> y **Z** la concentración en ppm de C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>.

Para el uso de este método gráfico se debe trazar líneas paralelas a los lados adyacentes, estas líneas deben intersectar a cada lado respectivamente en el valor obtenido por las ecuaciones (1.1), (1.2) y (1.3). La intersección de estas tres líneas indicará el punto de ubicación de la falla. [10]

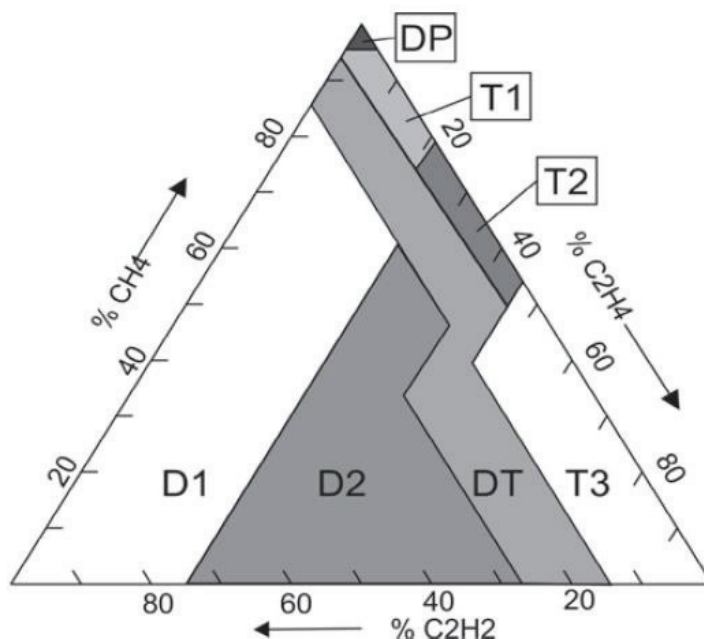


Figura 1.2 Triángulo de Duval [11]

En la Tabla 1.6 se muestran las fallas clasificadas según la técnica de Duval.

Tabla 1.6 Clasificación de fallas según Duval [10]

	Falla
DP	Descargas Parciales
T1	Falla térmica bajo los 300°C
T2	Falla térmica entre 300°C y 700°C
T3	Falla térmica a más de 700°C (Sobrecalentamiento)
D1	Descargas de baja energía (Chispas)
D2	Descargas de alta energía (Arco)
DT	Mezcla de fallas térmicas y eléctricas

### 1.3.2 MÉTODO DE ROGERS

Este método se basa en la correlación de los resultados de un número mucho mayor de investigaciones de fallas con el análisis de gases para cada caso. De acuerdo con Rogers, estas relaciones son aplicables tanto para gases obtenidos del espacio del gas (o relé), como para gases extraídos del aceite. [5]

Este método utiliza 4 relaciones de gases:  $\text{CH}_4/\text{H}_2$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6/\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$  y  $\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$ . Para facilitar la identificación de cada relación, así como el intervalo, se utiliza una base de códigos como se indica en la Tabla 1.7 y Tabla 1.8. [8]

Tabla 1.7 Código de Relaciones de Gases

Relación de Gas	Código de la Relación
$\text{CH}_4/\text{H}_2$	i
$\text{C}_2\text{H}_6/\text{CH}_4$	j
$\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$	k
$\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$	l

Tabla 1.8 Código de Relaciones de Gases de Rogers

Código de la Relación	Intervalo	Código
i	$x < 0.1$	5
	$0.1 \leq x \leq 1.0$	0
	$1.0 \leq x \leq 3.0$	1
	$x > 3.0$	2
j	$x < 1.0$	0
	$x \geq 1.0$	1
k	$x < 1.0$	0
	$1.0 \leq x \leq 3.0$	1
	$x > 3.0$	2
l	$x < 0.1$	0
	$0.1 \leq x \leq 3.0$	1
	$x > 3.0$	2

Las relaciones de Rogers permiten diagnosticar una gran variedad de fallas, tanto de origen térmico como de origen eléctrico, las cuales se encuentran clasificadas en la Tabla 1.9.

Tabla 1.9 Clasificación de Fallas según Rogers [8]

<b>i</b>	<b>j</b>	<b>k</b>	<b>l</b>	<b>Diagnostico</b>	<b>Falla</b>
1-2	0	0	0	Ligero Sobrecalentamiento <150°C	TF_1
1-2	1	0	0	Sobrecalentamiento de 150°C – 200°C	TF_2
0	1	0	0	Sobrecalentamiento de 200°C – 300°C	TF_3
0	0	1	0	Sobrecalentamiento de conductores	OH_1
1	0	1	0	Corrientes circulantes en devanados	OH_2
1	0	2	0	Corrientes circulantes entre tanque y núcleo, uniones calientes	OH_3
0	0	0	1	Flasheo con bajo flujo	ARC_1
0	0	1-2	1-2	Arco con alto flujo	ARC_2
0	0	2	2	Chisporroteo continuo a potenciales flotantes	ARC_3
5	0	0	0	Descargas parciales	PD_1
5	0	0	1-2	Descargas parciales con huella (observar CO)	PD_2
0	0	0	0	Deterioro Normal	Normal

### 1.3.3 MÉTODO DE IEC

El método de IEC es uno de los más utilizados durante varias décadas, cuando se trata del diagnóstico de fallas incipientes dentro de un transformador sumergido en aceite mineral. [8] [12]

Este método es una versión mejorada del método de Rogers, pues sólo utiliza tres relaciones. La relación de etano sobre metano ( $C_2H_6/CH_4$ ) es eliminada, pues solo indica el rango de la temperatura de descomposición, mas no ayuda a la identificación de la falla. [8] Al mismo tiempo que sólo considera tres intervalos para el uso de la relación  $CH_4/H_2$ . A continuación se muestra un cuadro resumen (Tabla 1.10 [12]) con la clasificación de fallas según IEC y algunas de sus posibles causas.

Tabla 1.10 Posibles causas según el tipo de falla

<b>Falla</b>	<b>Observaciones</b>
Descargas Parciales	Descargas en cavidades llenas de gas debido a la impregnación incompleta del papel, alta presencia de humedad en el papel, súper saturación del aceite o cavitación, formación de cera en el papel.
Descargas de Baja Energía	Chisporroteo o arco entre malas conexiones de potencial diferente o variable, conductores o devanados adyacentes, soldaduras rotas, circuitos cerrados en el núcleo. Descargas entre partes de sujeción, bushings y tanque, devanados de alto voltaje y tierra. Agrietamiento en los soportes de madera, separadores de bobinados, resinas, Corrientes de corte en selectores.
Descargas de alta energía	Arco eléctrico de alta energía local. Cortocircuito entre devanados o espiras o entre devanados a tierra y tierra.
Fallas Térmicas <150°C	Sobrecarga de transformadores en situaciones de emergencia. Obstrucción de la libre circulación del aceite a través de los devanados. Flujo de dispersión.
Fallas Térmicas 150°C a 300°C	Sobrecalentamiento localizado del núcleo debido a la concentración de flujo. Incremento de puntos calientes, Cortocircuitos entre laminados del núcleo, sobrecalentamiento del cobre debido a corrientes de Eddy, malos contactos o juntas, circulación de corrientes entre el núcleo y tanque.
Fallas Térmicas 300°C a 700°C	
Fallas Térmicas >700°C	

Tabla 1.11 Código de Relaciones de Gases de IEC [8]

<b>Código de la Relación</b>	<b>Intervalo</b>	<b>Código</b>
I	$x < 0.1$	0
	$0.1 \leq x \leq 3.0$	1
	$x > 3.0$	2

i	$x < 0.1$	1
	$0.1 \leq x \leq 1.0$	0
	$x > 1.0$	2
k	$x < 1.0$	0
	$1.0 \leq x \leq 3.0$	1
	$x > 3.0$	2

Tabla 1.12 Clasificación de Fallas según IEC [8]

<b>I</b>	<b>i</b>	<b>k</b>	<b>Diagnostico</b>	
0	0	1	Falla Térmica <150°C	TF_1
0	2	0	Falla Térmica de 150°C-300°C	TF_2
0	2	1	Falla Térmica de 300°C-700°C	OH_1
0	2	2	Falla Térmica >700°C	OH_2
1-2	0	1-2	Descargas de baja energía	ARC_1
1	0	2	Descarga de alta energía	ARC_2
0	1	0	PDs de baja densidad de energía	PD_1
1	1	0	PDs de alta densidad de energía	PD_2
0	0	0	Normal	Normal

A pesar de que las técnicas de Rogers e IEC son muy útiles, la desventaja de estos métodos de relaciones es que algunas combinaciones de gases no se pueden interpretar con los códigos antes mencionados o en ciertos casos se presentan varias condiciones de falla lo cual produce relaciones confusas entre los diferentes componentes de los gases. En el presente trabajo se propone superar estas desventajas mediante la utilización de la lógica difusa.



## **CAPÍTULO II**

### **2 IMPLEMENTACIÓN DE LÓGICA DIFUSA AL ANÁLISIS DE GASES DISUELTOS**

En la actualidad el ser humano busca construir, diseñar e implementar sistemas que simulen el razonamiento humano, apareciendo así una gran cantidad de sistemas de análisis expertos e inteligentes, entre los cuales se destaca la Lógica Difusa.

En este capítulo se tratará de explicar brevemente que es la lógica difusa, los métodos de inferencia difusa que existen, las aplicaciones que ofrece el paquete computacional de Matlab para la implementación de un análisis difuso y finalmente se realizará la aplicación del análisis difuso a los métodos de Rogers e IEC.

#### **2.1 LÓGICA DIFUSA**

Más específicamente, la lógica difusa puede ser vista como un intento de formalización/mecanización de dos capacidades humanas notables: En primer lugar, la capacidad de conversar, razonar y tomar decisiones racionales en un ambiente de imprecisión, incertidumbre, información incompleta o contradictoria, la parcialidad de la verdad y la parcialidad de la posibilidad, es decir, en un entorno de información imperfecta; y, en segundo lugar, la capacidad de realizar una amplia variedad de tareas físicas y mentales sin mediciones y ningún cálculo. [13]

##### **2.1.1 DEFINICIÓN**

La lógica difusa es una lógica continuamente valuada o multi-valuada que permite la representación matemática de la incertidumbre y la vaguedad, proporcionando herramientas formales para su tratamiento.

En efecto, la mayor parte de lógica difusa puede ser vista como una metodología para calcular con palabras en lugar de números. Aunque las palabras son inherentemente menos precisas que los números, su uso está más cerca de la intuición humana.

### 2.1.2 CONJUNTOS DIFUSOS

Según Zadeh (1965) un conjunto difuso se define como: [14]

“Una clase de objetos con continuos grados de pertenencia. Tal conjunto es caracterizado por una función de pertenencia (característica) la cual asigna a cada objeto un grado de pertenencia que varía entre cero y uno [0.0 - 1.0].”

De acuerdo con esta definición, un conjunto difuso se constituye por dos partes principales: sus elementos y la función de pertenencia que asigna el grado de pertenencia de estos elementos a su conjunto.

Entonces un conjunto difuso  $A$  en  $U$  está definido como un conjunto de pares ordenados.

$$A = \{x, \mu_A(x) | x \in U\} \quad (2.1)$$

Donde  $U$  es el universo de discurso continuo (por ejemplo, todos los reales:  $U = R$ )

En otras palabras, si  $A$  es un conjunto difuso, entonces su función de pertenencia  $\mu_A(x)$  mide el grado con el cual el valor  $x$  pertenece al conjunto  $A$ , de la cual puede tomar diferentes formas, dependiendo de la aplicación en particular.

La forma de la curva de pertenencia está abierta a cualquier función de  $x$  que permita modelar la pertenencia de los elementos al conjunto que se pretende representar. Algunas de las funciones más conocidas son: funciones singleton, función trapezoidal, triangular, sigmoideal, entre otras.

Se puede denotar rápidamente algunas diferencias entre los conjuntos clásicos y los conjuntos difusos:

- La función de pertenencia de los conjuntos clásicos puede tener dos valores de pertenencia: 1 o 0, es decir pertenece o no pertenece. Mientras que para los conjuntos difusos puede tomar valores entre 0 y 1.
- Un elemento puede pertenecer (parcialmente) a un conjunto difuso y al mismo tiempo pertenecer (parcialmente) al complemento de dicho conjunto. Lo cual no sucede en los conjuntos clásicos, ya que representaría una violación del Principio del Tercer Excluido, el cual dice que, la disyunción de una proposición y de su negación es siempre verdadera. Por ejemplo, es verdad que "es de día o no es de día".

### *2.1.2.1 Operaciones de Conjuntos*

Dada la definición de conjuntos difusos, posteriormente se enumera algunas operaciones que se pueden realizar con estos nuevos conjuntos al igual que con los conjuntos clásicos.

Sea  $U$  el universo de objetos (elementos), y  $x$  un elemento genérico de  $U$ .

Dado los conjuntos difusos  $A$  y  $B$  en  $U$ , y caracterizados por sus respectivas funciones de pertenencia  $\mu_A(x)$  y  $\mu_B(x)$ , donde dichas funciones permiten representar el grado de pertenencia de  $x$  en  $A$  y  $B$  respectivamente, se definen las siguientes operaciones [15]:

**Unión.** Operador Lógico OR de Zadeh

La unión de dos conjuntos difusos  $A$  y  $B$  con sus respectivas funciones de pertenencia  $\mu_A(x)$  y  $\mu_B(x)$  es otro conjunto difuso  $C = A \cup B$  cuya función de pertenencia relaciona aquellas funciones de pertenencia de  $A$  y  $B$ .

$$A \cup B \Rightarrow \mu_{A \cup B}(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (2.2)$$

**Intersección.** Operador Lógico AND de Zadeh

La intersección de dos conjuntos  $A$  y  $B$  con sus respectivas funciones de pertenencia  $\mu_A(x)$  y  $\mu_B(x)$  es otro conjunto difuso  $C = A \cap B$  cuya función de pertenencia relaciona aquellas funciones de pertenencia de  $A$  y  $B$ .

$$A \cap B = \mu_{A \cap B}(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (2.3)$$

**Complemento.** Operador Lógico NOT

El complemento de un conjunto difuso  $A$  denotado por  $A'$ , está definido por:

$$\mu_{A'}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (2.4)$$

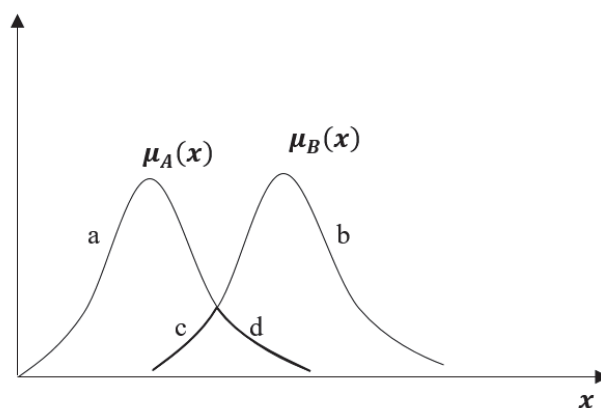


Figura 2.1 Unión e Intersección de Conjuntos Difusos

En la Figura 2.1 se puede observar tanto la Unión como la Intersección de dos conjuntos difusos, la función de pertenencia de la unión, compuesta por los segmentos  $a$  y  $b$ , y la función de pertenencia de la intersección compuesta por los segmentos  $c$  y  $d$  (líneas más oscuras).

### 2.1.2.2 Conjuntos especiales

Un conjunto difuso es vacío si y solamente si su función de pertenencia es idénticamente cero en  $U$ .

### Igualdad

Dos conjuntos difusos  $A$  y  $B$  son iguales, denotados como  $A = B$ , si y solamente si:

$$\mu_A(x) = \mu_B(x) \quad \forall x \in U \quad (2.5)$$

### Inclusión

$A$  está contenido en  $B$  (o, equivalentemente,  $A$  es un subconjunto de  $B$ , o  $A$  es más pequeño o igual que  $B$ ) si y solamente si:

$$A \subset B \Leftrightarrow \mu_A(x) \leq \mu_B(x) \quad (2.6)$$

### 2.1.3 REGLAS SI-ENTONCES (IF - THEN)

Uno de los principales componentes dentro de los sistemas de lógica difusa son las reglas, las mismas que son expresadas como implicaciones lógicas, es decir en forma de sentencias Si-Entonces.

Estas reglas describen la acción que se va a tomar en respuesta a varias entradas difusas.

Una regla difusa Si-Entonces (*IF-THEN*) simple, puede expresarse de la siguiente manera: [16]

Si (*IF*)  $x$  es  $A$  entonces (*THEN*)  $y$  es  $B$

Donde  $A$  y  $B$  son valores lingüísticos definidos por conjuntos difusos en los dominios (universos de discurso)  $X$  y  $Y$ , respectivamente. Estas reglas se encuentran compuestas por dos partes: la parte *Si* " $x$  es  $A$ " y la parte *Then* " $y$  es  $B$ ", denominadas antecedente o premisa y consecuente o conclusión respectivamente.

Estos fragmentos (antecedentes y consecuentes) son conjuntos difusos que se encuentran asociados mediante operaciones lógicas AND, OR, etc.

A menudo, se pueden emplear reglas compuestas por varios antecedentes y consecuentes.

*IF Antecedente1 AND Antecedente2... THEN Consecuente1 AND Consecuente2...*

donde, AND es uno de los operadores de lógica difusa.

## **2.1.4 INFERENCIA DIFUSA**

### *2.1.4.1 Fusificación de las Entradas*

El primer paso consiste en construir las funciones de pertenencia de cada conjunto difuso asociado, con la finalidad de poder asignar un grado de pertenencia de cada una de las variables de entrada a dichos conjuntos.

En la mayoría de casos las variables de entrada siempre son valores numéricos nítidos (valores crisp), naturalmente estarán limitados en el universo de discurso de la variable (por ejemplo, un intervalo entre 0-10). El valor del grado de pertenencia siempre tomará un valor entre 0 y 1.

### *2.1.4.2 Evaluación de Reglas*

Después de la fusificación de las entradas, se las aplican a los antecedentes de las reglas difusas. En ciertos casos, algunas reglas están compuestas por múltiples antecedentes, entonces se debe utilizar un operador difuso AND u OR para así obtener

un único valor numérico que represente el resultado de la evaluación. Luego este número será aplicado al consecuente, y así obtener un solo valor de verdad.

Cuando se utiliza el operador OR, se puede proceder de dos formas ya sea como *max* (máximo) o *sum* (suma algebraica), de igual manera para la operación AND existen dos formas conocidas como *min* (mínimo) y *prod* (producto algebraico).

En seguida, el resultado de la evaluación de los antecedentes se aplica al consecuente, recordando que el consecuente es un conjunto difuso representado por una función de pertenencia.

Finalmente se obtiene un conjunto difuso (consecuente) cuya función de pertenencia es reconfigurada según el valor de verdad del antecedente. Esta reconfiguración se puede dar por dos métodos: el más común utilizado es el de *truncamiento* que corta a la función de pertenencia del consecuente según el valor de verdad del antecedente, y por otra parte se tiene el método de *escalado* el cual proporciona un valor más preciso, pues conserva la forma original de la función de pertenencia. Se obtiene multiplicando todos los valores del conjunto por el valor de verdad obtenido del antecedente.

Estos dos métodos conocidos son las mismas funciones utilizadas por el método AND: *min* (mínimo) y *prod* (producto), respectivamente.

#### ***2.1.4.3 Agregación de las Salidas***

La agregación es el proceso por el cual los conjuntos difusos que representan las salidas de cada regla son combinados en uno solo.

El método de agregación es conmutativo, es decir el orden en el cual las reglas son ejecutadas no es importante.

Este proceso de agregación se puede realizar a través de tres métodos:

- max (máximo)
- probor (probabilidad OR)
- sum (suma de los conjuntos de salida de cada regla)

En el siguiente diagrama Figura 2.2, se ilustra el proceso de agregación de salidas. Para lo cual se ha utilizado un ejemplo de propina (tip) presentado por Matlab, en el cual se utilizan tres reglas básicas, las salidas de cada regla han sido combinadas en un solo conjunto difuso cuya función asigna un peso para cada valor de salida.

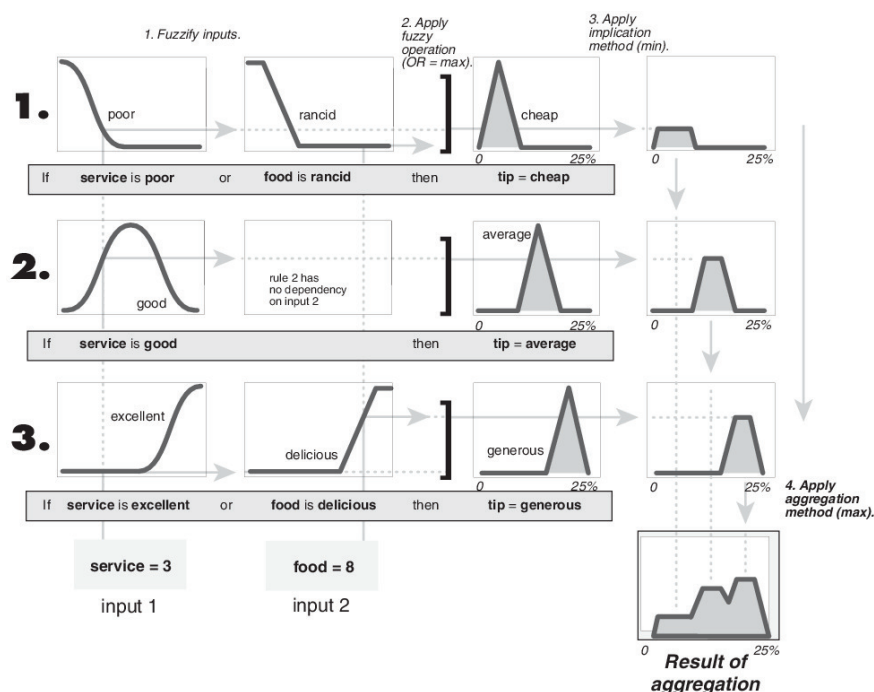


Figura 2.2 Proceso de agregación de salidas [16]

#### 2.1.4.4 Defusificación

La entrada al proceso de defusificación es un conjunto difuso (resultado del proceso de agregación) y la salida es un valor numérico. [16]



Entre los principales métodos de cálculo utilizados para la Defusificación se detallan los siguientes [16]:

- **Método del centroide o centro de gravedad:** este es el método más utilizado pues permite obtener el centro del área bajo la curva.

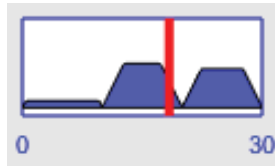


Figura 2.3 Defusificación con el método de centroide,  $F=18.4$

- **Bisector de área:** este método consiste en trazar una línea vertical que divida el área bajo la curva de dos sub-áreas iguales. Algunas veces, esta línea no siempre coincide con la línea del centroide.

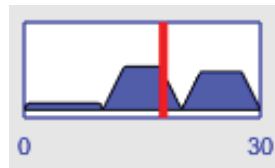


Figura 2.4 Defusificación con el método bisección,  $F=17.7$

- **Método de la media de máximo (MOM, middle of maximum):** la salida es el valor medio de los valores cuyas funciones de pertenencia alcanzan el valor máximo.

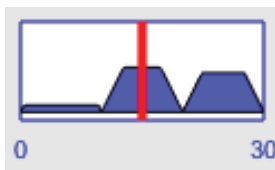


Figura 2.5 Defusificación con el método MOM,  $F=15$

- **Método del máximo más chico (SOM, smallest of maximum):** el resultado es el mínimo valor de todos aquellos que generan el valor más alto de la función de pertenencia.

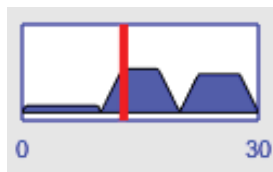


Figura 2.6 Defusificación con el método SOM,  $F=12.9$

- **Método del máximo más grande** (*LOM, largest of maximum*): la salida es el máximo valor de todos aquellos que generan el valor más alto de la función de pertenencia.



Figura 2.7 Defusificación con el método LOM,  $F=0$

## 2.2 CAJA DE HERRAMIENTAS DE LÓGICA DIFUSA DE MATLAB (Fuzzy Logic Toolbox)

Este paquete de herramientas que ofrece Matlab permite la utilización de funciones, aplicaciones y bloques de simulink para analizar, diseñar y simular sistemas basados en lógica difusa. Esta caja de herramientas (toolbox) permite modelar sistemas complejos usando simples reglas difusas, y luego se pueden implementar estas reglas en un sistema de inferencia difusa.

El toolbox ofrece diferentes alternativas de funciones que permiten trabajar con lógica difusa:

- Aplicaciones de Diseño de Lógica Difusa para construir sistemas de inferencia difusa, permitiendo visualizar y analizar sus resultados.
- Funciones de pertenencia para la creación de sistemas de inferencia difusa.
- Operadores lógicos AND, OR y NOT en reglas definidas por el usuario.

- Sistemas de Inferencia Difusa del tipo Mamdani y Sugeno.
- Capacidad de ensamblar un sistema de inferencia difuso en Simulink.
- Capacidad de trabajar con lenguaje C.

### 2.2.1 HERRAMIENTAS DE INTERFAZ GRÁFICA

Matlab dentro de su paquete de herramientas de Lógica Difusa (Fuzzy Logic Toolbox) presenta varias herramientas graficas muy amigables con el usuario, que permiten implementar, editar y visualizar sistemas de inferencia difusa y así poder utilizar la lógica difusa como herramienta de análisis. A continuación, se detallan estas interfaces:

#### 2.2.1.1 Diseñador de Lógica Difusa (*Fuzzy Logic Designer*)

Esta interfaz gráfica muestra la mayor parte de la información del sistema de inferencia difusa, en este documento se trabajará únicamente con el Sistema de Inferencia de tipo Mamdani, ya que este método es muy fácil de implementarlo y el que mejor se adapta para la realización de este proyecto. Se puede acceder a dicha interfaz con solo escribir la palabra **fuzzy** en la ventana de comandos de la página principal de Matlab, desplegándose una pantalla igual a la que se muestra en la Figura 2.8.

En esta interfaz gráfica, se pueden identificar los siguientes elementos:

1. Barra de Menús
2. Icono de Entradas
3. Icono del Editor de Reglas
4. Icono de Salidas
5. Área de Información sobre el sistema de inferencia

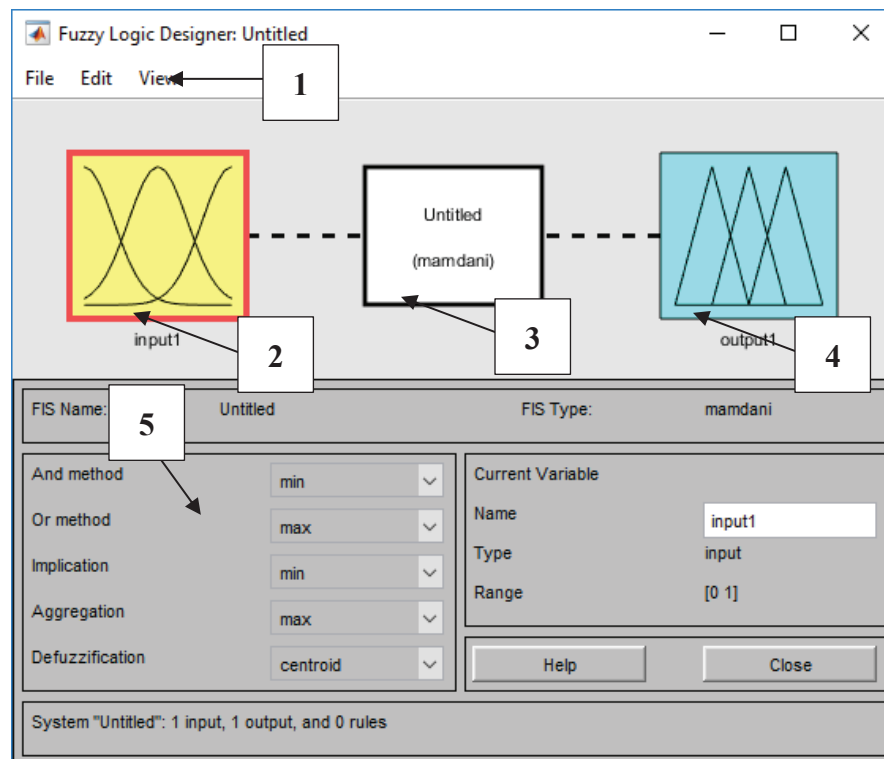


Figura 2.8 Fuzzy Logic Designer de Matlab

En la *barra de menús* se encuentran varios iconos que permiten abrir, guardar, y editar el sistema difuso. Además de poder acceder a otras interfaces graficas como: Funciones de Pertenencia, Editor de Reglas, Visor de Reglas y Visor de Superficie, interfaces que se estudiarán en el transcurso del desarrollo del documento. Esta barra contiene los siguientes submenús: File, Edit y View.

En el *icono de entradas*, al hacer *doble click* sobre éste, permite visualizar otra ventana la cual muestra las funciones de pertenencia de las entradas. Si se quiere adicionar otra entrada se lo puede hacer utilizando la barra de menús y en la pestaña *Edit* deberá escogerse *Add variable*. El número de entradas es ilimitado, sin embargo, un limitante puede ser la capacidad de memoria. Tener muchas entradas o demasiadas funciones de pertenencia puede dificultar el análisis del sistema difuso.

El *icono del editor de reglas* indica el nombre del archivo además del tipo de sistema de inferencia utilizado, cabe recalcar que en este documento se utilizará el sistema de inferencia tipo Mamdani. De igual manera al hacer *doble click* sobre éste, se desplegará una ventana donde se muestra las reglas utilizadas.

En el *icono de salidas*, se encuentra la información sobre las funciones de pertenencia de las salidas con solo hacer doble click. Además, si se debe agregar más salidas se hará siguiendo el mismo procedimiento que con las entradas.

Finalmente se identifica un área con diferentes opciones que permiten modificar los procesos de inferencia del sistema difuso. Además de información como: nombres del proyecto, de variables y el tipo de sistema de inferencia utilizada, que como ya se mencionó anteriormente se utilizara el tipo Mamdani.

Dentro de estas opciones se detallarán las siguientes:

- Permiten escoger como actuarán los operadores lógicos AND y OR, ya sea de la forma *min* (mínimo) o *prod* (producto algebraico), y *max* (máximo) o *sum* (suma algebraica) respectivamente.
- También permiten escoger el método por el cual se llevará a cabo el proceso de implicación y agregación de salidas, métodos mencionados en el punto 2.1.4.3.
- Seguidamente, se puede modificar el método de cálculo utilizado para la Defusificación, entre los cuales tenemos los siguientes: centroide, bisector, mom, lom y som, antes ya estudiados.
- Además, el usuario puede utilizar cualquier otro método que puede ser definido, fuera de los ya mencionados en los anteriores ítems.

Para este proyecto, las opciones que ayudan a ajustar los procesos de inferencia difusa serán las ya establecidas por defecto por Matlab, a excepción del método de

defusificación ya que se utilizará el método de la Media de Máximo (MOM). Este método como ya se explicó anteriormente ayuda a determinar el valor de la salida donde la curva toma mayor grado de pertenencia, lo cual para este caso facilita en la identificación de la falla presente.

### 2.2.1.2 Editor de funciones de pertenencia (*Membership Function Editor*)

En esta interfaz gráfica se encuentran todas las funciones de pertenencia de las variables de entrada y de salida. Para acceder a esta interfaz se puede hacer mediante los procedimientos ya mencionados o se puede dirigir a la pestaña **Edit** y luego a la opción **Membership Functions Editor**. En la Figura 2.9 se muestra el editor de funciones de pertenencia.

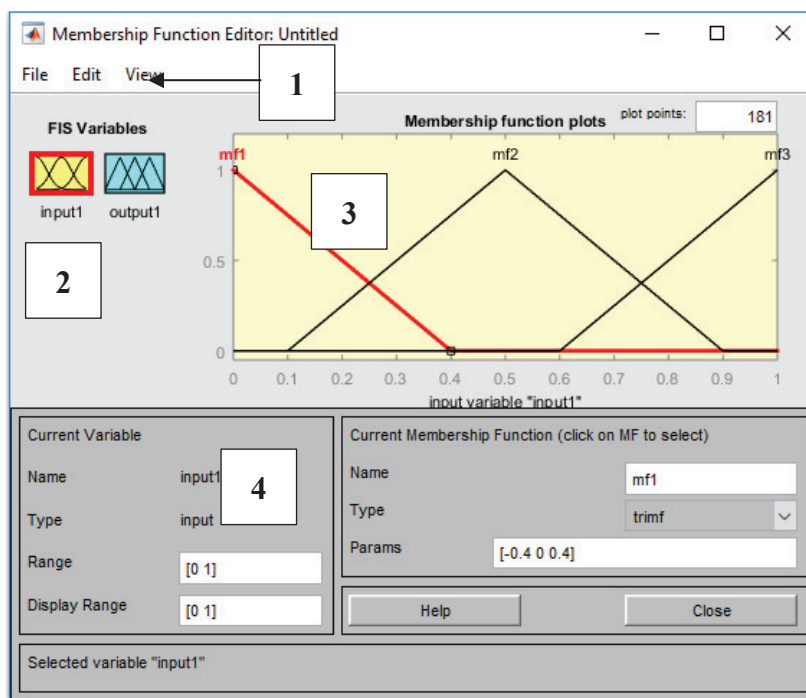


Figura 2.9 Editor de funciones de Pertenencia de Matlab

A continuación, se enumeran algunos elementos del editor de funciones de pertenencia:

1. Barra de menús
2. Paleta de Variables de Entrada y Salida
3. Pantalla de Funciones de pertenencia
4. Área con información de las variables

Dentro de la *barra de menús* se ubican las pestañas que permiten acceder a otros sub-menús tales como:

- **File:** esta opción permite guardar, abrir, imprimir, exportar e importar el proyecto.
- **Edit:** dentro de este sub-menú se puede encontrar opciones para remover o agregar nuevas funciones de pertenencia.
- **View:** se pueden desplegar varias ventanas como el visor de reglas y el visor de superficie.

Al situarse en la *paleta de variables de entradas y salidas* se localizan los iconos de las mismas, cuando se selecciona uno de estos iconos se observa las funciones de pertenencia que representan cada conjunto difuso asociado a dichas variables (ya sea entrada o salida). Existen dos formas de poder modificar estas curvas: la primera se puede efectuar utilizando el mouse, es decir, se puede seleccionar la función a modificar y seguidamente se puede arrastrar los puntos de inflexión de dicha curva, otra alternativa presentada por Matlab, es ingresar en la parte inferior a las curvas los puntos de inflexión dentro de corchetes.

Finalmente, se observa un área en la parte inferior donde se puede acceder a la información sobre las variables (salidas y entrada) y de las funciones de pertenencia. En este cuadro de dialogo se permite modificar ciertos parámetros, como el intervalo (*Range*) de la variable (universo de discurso) y el intervalo de visualización (*Display Range*) de la gráfica, y si el usuario selecciona una curva podrá modificar el nombre, el tipo y los parámetros o puntos de inflexión de la misma.

### 2.2.1.3 Editor de Reglas Difusas (Rule Editor)

Dentro de esta interfaz gráfica se tiene la libertad de crear, editar, agregar o eliminar reglas difusas del tipo *If-Then*, para acceder a esta interfaz se lo puede realizar desde la ventana del *Fuzzy Logic Designer*, dirigiéndose a la *barra de menús*, escogiendo la pestaña **Edit** y seguidamente la opción **Rules** o a su vez utilizar el comando *Ctrl+3*, y se desplegará una interfaz como se indica en la Figura 2.10.

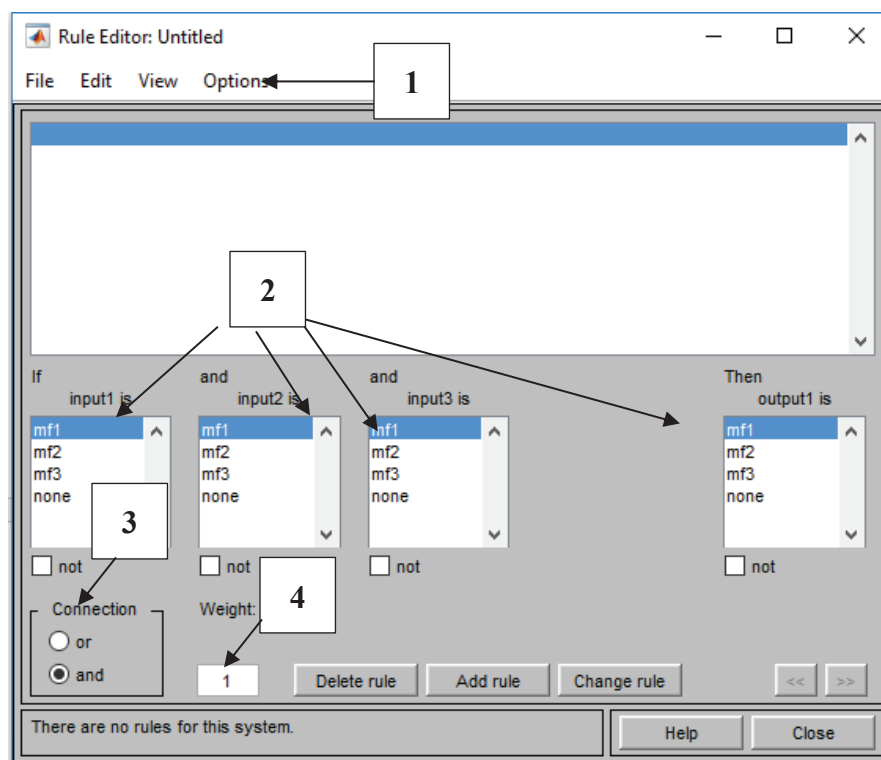


Figura 2.10 Editor de Reglas de Matlab

A continuación, se describen algunos de los principales elementos que contiene la interfaz del Editor de Reglas:

1. Barra de Menús
2. Menús de Selección
3. Tipo de Conector Lógico



#### 4. Peso de la regla

Al ubicarse sobre la *barra de menús* se tienen otros sub-menús que permitirán importar y exportar los archivos. Además, desde aquí se puede ingresar a las otras interfaces gráficas, también se tiene la opción de cambiar el idioma y el formato de las reglas difusas.

A la hora de construir las reglas se dispone de un *menú de opciones* para poder escoger las variables que conformaran el antecedente y el consecuente de las reglas difusas cualquiera sea el caso. También se puede utilizar los diferentes conectores u operadores lógicos (AND, OR) para unir los antecedentes o consecuentes.

En esta interfaz puede el usuario ponderar o darle un peso a determinadas reglas, este peso afectará directamente a la salida de la evaluación de la regla difusa. Por lo general el valor que se utiliza por defecto es 1, pudiendo también tomar un valor entre 0 y 1.

##### ***2.2.1.4 Visor de Reglas (Rule Viewer)***

Finalmente, y una vez establecido diferentes parámetros (variables de entradas y salidas, funciones de pertenencia y reglas difusas), Matlab presenta una interfaz gráfica (Figura 2.11) denominada *Visor de Reglas* como producto final. Dentro de esta ventana se puede observar gráficamente la constitución de las reglas difusas y sus respectivas funciones de pertenencia, además que permite ingresar valores nítidos como entradas y obtener resultados gráficos y numéricos.

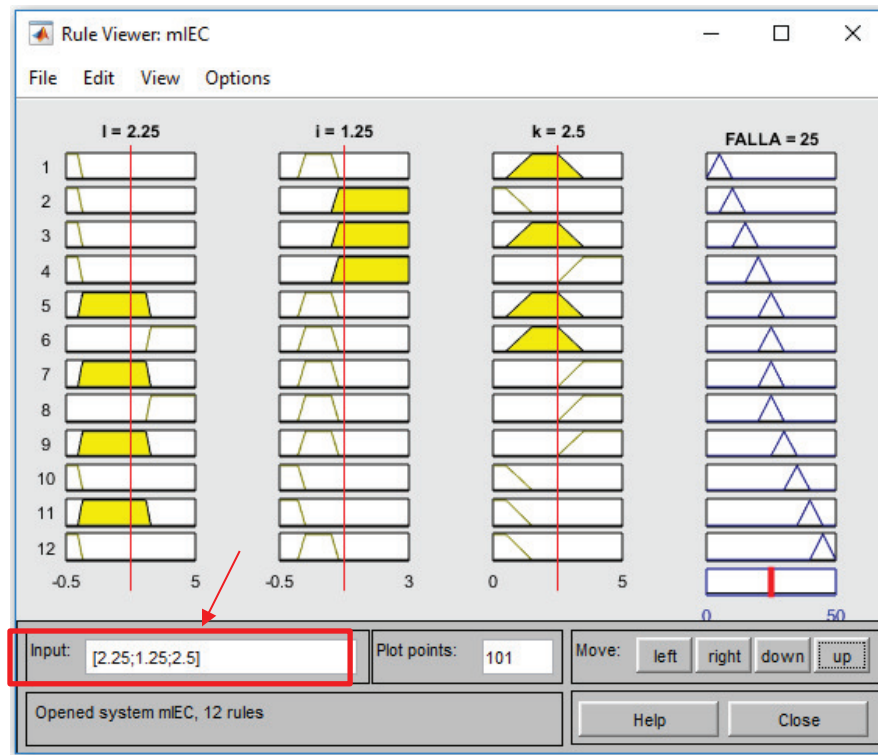


Figura 2.11 Visor de Reglas de Matlab

En esta interfaz se observarán varias columnas, las tres primeras de color amarillo representan las funciones de pertenencia de los antecedentes de cada regla y la cuarta columna de color azul representa las funciones de pertenencia de los consecuentes y también contiene la curva que es el resultado del proceso de agregación de salidas [8]. Las curvas de las cuatro primeras columnas se pintan totalmente de amarillo cuando los valores de cada entrada cumplen con los antecedentes, mientras que las curvas de la quinta columna se colorean totalmente o parcialmente de azul dependiendo del grado de pertenencia de la variable de salida a los conjuntos difusos asociados.

### 2.2.1.5 Visor de Superficies (Surface Viewer)

Matlab pone a disposición del usuario una ventana donde se puede observar gráficamente las entradas y salidas en una curva tridimensional como se muestra en la siguiente Figura 2.12, donde el usuario puede asignar cualquier variable de entrada a los ejes  $x$  e  $y$ , y variables de salida al eje  $z$ .

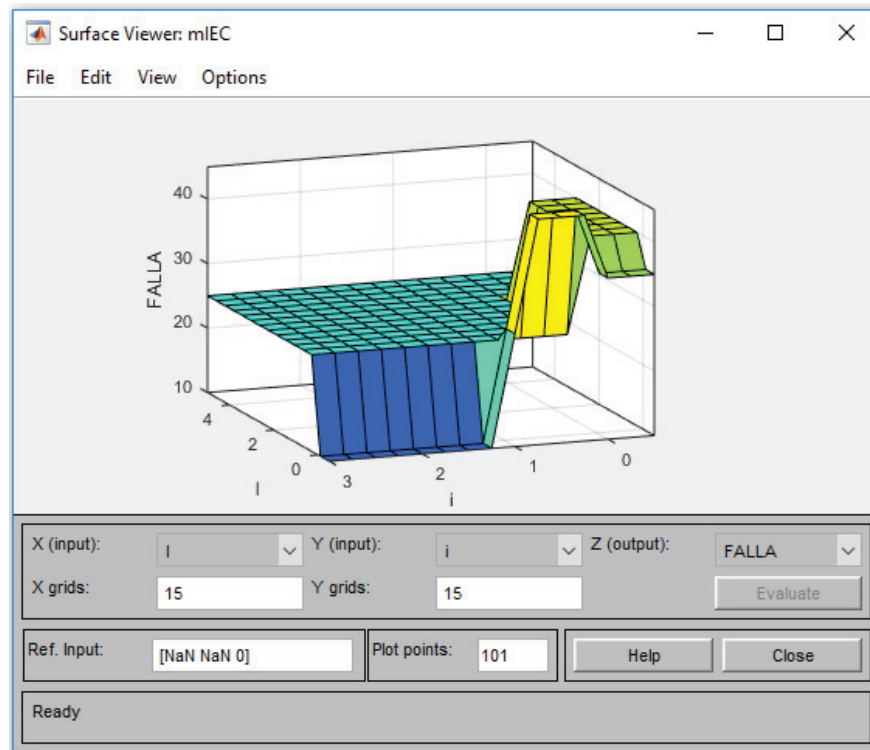


Figura 2.12 Visor de Superficie de Matlab

Una vez terminado la implementación se debe proceder a guardar o exportar el proyecto para lo cual hay que dirigirse a la pestaña **File**, y escoger la opción **Export** y luego dar click en el submenú **To File**.

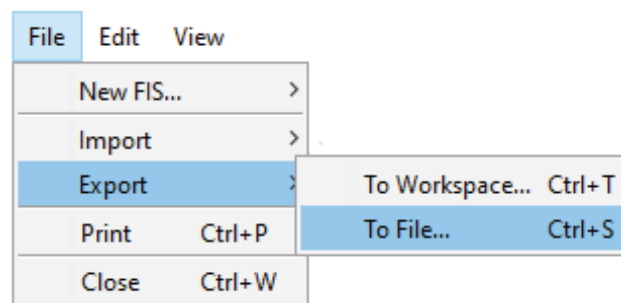


Figura 2.13 Proceso para exportar un proyecto

Los archivos que se exportan tienen la siguiente extensión (\*.fis), estos archivos contienen toda la información del proyecto antes detallado.

## 2.2.2 APLICACIÓN DE LÓGICA DIFUSA

En esta parte del documento se realizará la aplicación del análisis de lógica difusa a dos de los métodos de análisis de gases disueltos antes mencionados (Rogers e IEC) utilizando las herramientas de Lógica Difusa presentada por Matlab, y así obtener una mejor interpretación de las relaciones de gases.

### 2.2.2.1 Relaciones Difusas de Rogers

Para poder implementar el análisis difuso al método de relaciones de Rogers se debe transformar las variables de entradas tradicionales (i, j, k, l) por conjuntos difusos con sus respectivas funciones de pertenencia. Estas funciones de pertenencia estarán limitadas por los intervalos de cada relación.

Para lo cual se procede a utilizar los datos establecidos en la Tabla 2.1, nótese que se ha asignado a cada intervalo o código una variable lingüística Lo (Low), Med (Medium), Hi (High) o Vhi (Very high).

Tabla 2.1 Relaciones difusas de Rogers [8]

Código de la Relación	Intervalo	Código
<b>i</b>	$x < 0.1$	5 (Lo)
	$0.1 \leq x \leq 1.0$	0 (Med)
	$1.0 \leq x \leq 3.0$	1 (Hi)
	$x > 3.0$	2 (Vhi)
<b>j</b>	$x < 1.0$	0 (Lo)
	$x \geq 1.0$	1 (Hi)
<b>k</b>	$x < 1.0$	0 (Lo)
	$1.0 \leq x \leq 3.0$	1 (Med)
	$x > 3.0$	2 (Hi)
<b>l</b>	$x < 0.1$	0 (Lo)
	$0.1 \leq x \leq 3.0$	1 (Med)
	$x > 3.0$	2 (Hi)

### 2.2.2.1.1 Fusificación de Variables $i$ , $j$ , $k$ y $l$

Para la implementación del análisis difuso se hará uso del Diseñador de Lógica Difusa (*Fuzzy Logic Designer*). Se empezará abriendo la interfaz de Matlab, a continuación, se procede a escribir la palabra **fuzzy** y se desplegará la pantalla grafica de la Figura 2.8, dentro de esta interfaz se debe ingresar las variables de entrada y salida siguiendo el procedimiento descrito a continuación.

Se debe dirigir a la pestaña **Edit** donde se escoge la opción **Remove Selected Variable**, de esta manera se eliminarán las variables ya establecidas por defecto. Continuando con el procedimiento, nuevamente se debe hacer click en la pestaña **Edit**, seguidamente escoger la pestaña **Add Variable**, donde se tiene la opción de insertar variables de salida o entrada, como se muestra en la siguiente Figura 2.14.

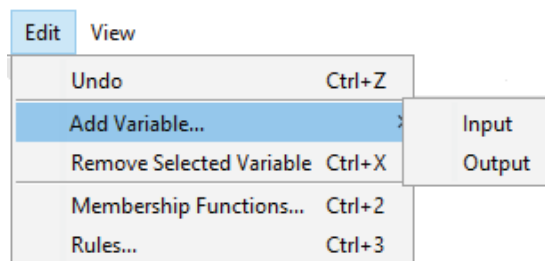


Figura 2.14 Cuadro de dialogo para agregar variables

Una vez escogida la opción **Input** u **Output**, se debe realizar este procedimiento de manera repetitiva para ingresar cuatro entradas ( $i$ ,  $j$ ,  $k$ ,  $l$ ) y una salida (tipo de falla), de manera que se disponga de un cuadro de dialogo como en la Figura 2.15.

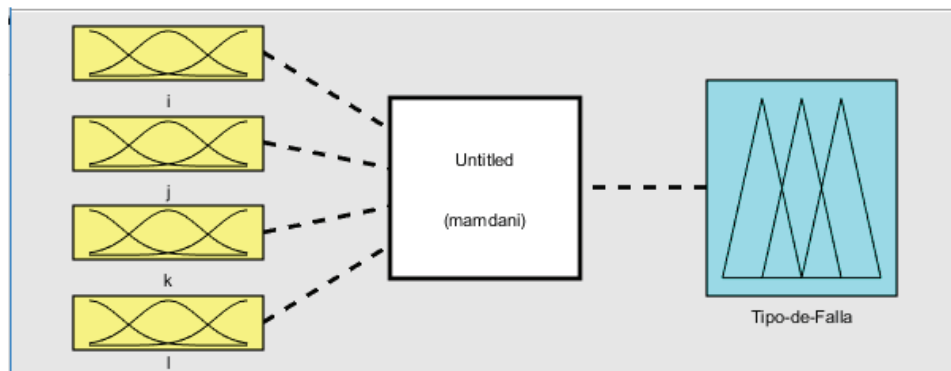


Figura 2.15 Implementación de Entradas y Salidas para el método de Rogers

#### 2.2.2.1.2 Creación de las Funciones de Pertenencia

Como siguiente paso, se procede a construir las respectivas funciones de pertenencia que caracterizarán a cada variable. Las funciones de pertenencia que representarán a los códigos de las relaciones i, j, k, l serán funciones de pertenencia difusas de tipo trapezoidal. [8]

Para efectuar esto, se recurre al Editor de Funciones de Pertenencia (*Membership Function Editor*) al cual se puede acceder mediante el comando **Ctrl+2**. Una vez dentro de este cuadro de dialogo, se debe seleccionar una de las variables (i, j, k, l, tipo de falla) y seleccionar la opción **Edit** de la barra de menús, donde se desplegará un menú como se indica en la siguiente Figura 2.16.

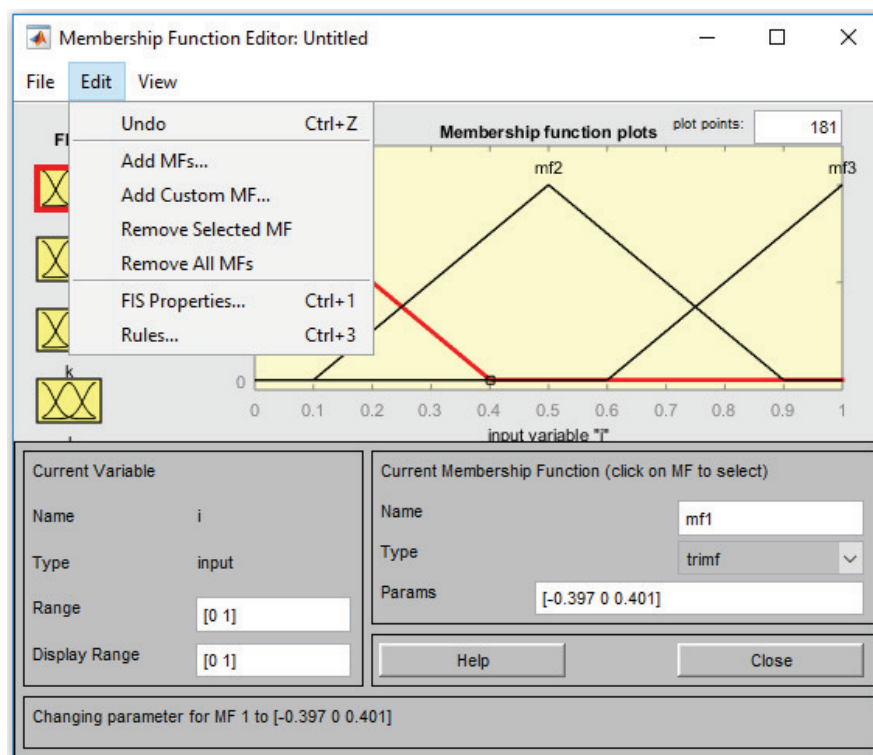


Figura 2.16 Cuadro de diálogo para agregar y remover funciones

En este menú se debe escoger la opción **Remove All MFs**, para eliminar las funciones de pertenencia creadas por defecto al establecer las variables de entrada y salida. Después se procederá nuevamente a hacer click en la pestaña **Edit** y ahora se debe escoger la opción **Add MFs**, donde aparecerá una ventana como la que se muestra en la Figura 2.17.

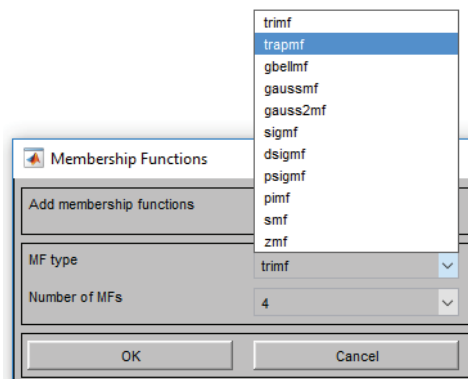


Figura 2.17 Cuadro de diálogo para crear funciones de pertenencia

Esta nueva interfaz gráfica permite al usuario agregar cualquier tipo de funciones de pertenencia, en este caso se escogerá el de tipo trapezoidal (*trapmf*) y el número de funciones para cada variable de entradas (i, j, k, l) será equivalente al número de códigos establecidos en la Tabla 2.1 respectivamente. Para el caso de la variable “*i*”, la cual cuenta con cuatro códigos (5, 0, 1, 2 o Lo, Med, Hi, Vhi) se deberá establecer cuatro curvas trapezoidales. Los límites de estas curvas están dados por los intervalos de cada relación de gases.

Una vez escogido el tipo y el número de curvas, el usuario debe dirigirse al cuadro de diálogo que se muestra en la Figura 2.18, donde se pueden modificar datos de las funciones de pertenencia como nombre (*Name*), tipo (*Type*) y puntos de inflexión (*Params*).

Los valores de estos parámetros o puntos inflexión de cada curva se encuentran tabulados en el Anexo 1.

Current Variable		Current Membership Function (click on MF to select)	
Name	i	Name	VHI
Type	input	Type	trapmf
Range	[-0.5 5]	Params	[2.9 3.1 5 5]
Display Range	[-0.5 5]	<input type="button" value="Help"/> <input type="button" value="Close"/>	
Ready			

Figura 2.18 Parámetros de las funciones de pertenencia

Además, en la parte izquierda de la pantalla se puede modificar otros datos de las variables de entrada o salida como rango (Range) y rango de visualización (Display Range).

Terminando este proceso de construcción de las funciones, se puede visualizar las curvas gráficamente como se muestra en la Figura 2.19.



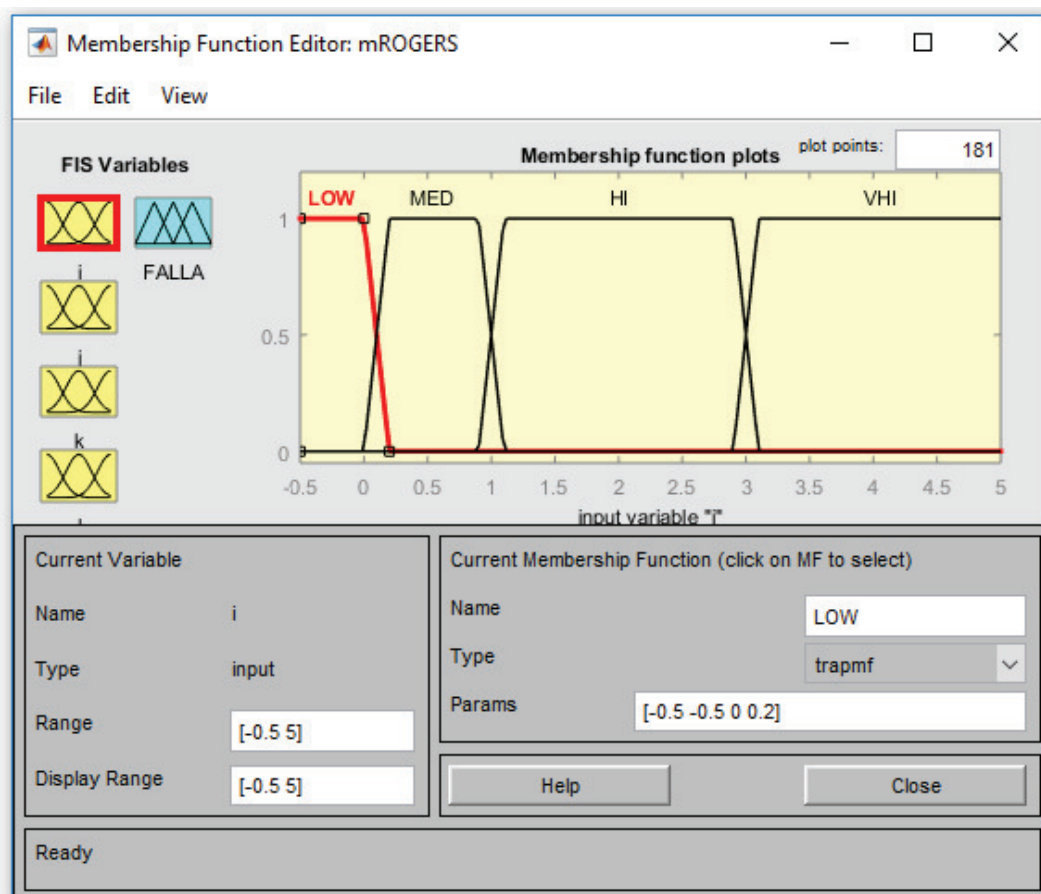


Figura 2.19 Funciones de Pertenencia para la variable “i”

A continuación, y siguiendo el mismo procedimiento establecido para la variable “i”, se debe construir las curvas para las variables restantes; para el caso de la variable de entrada “j” se debe tener dos curvas Lo (0) y Hi (1), para “k” tres curvas Lo (0), Med (1) y Hi (2), y finalmente para la variable “l” se implementará tres funciones de pertenencia Lo (0), Med (1) y Hi (2). Todas estas curvas se encuentran indicadas gráficamente en el cuadro de diálogo descrito a continuación.

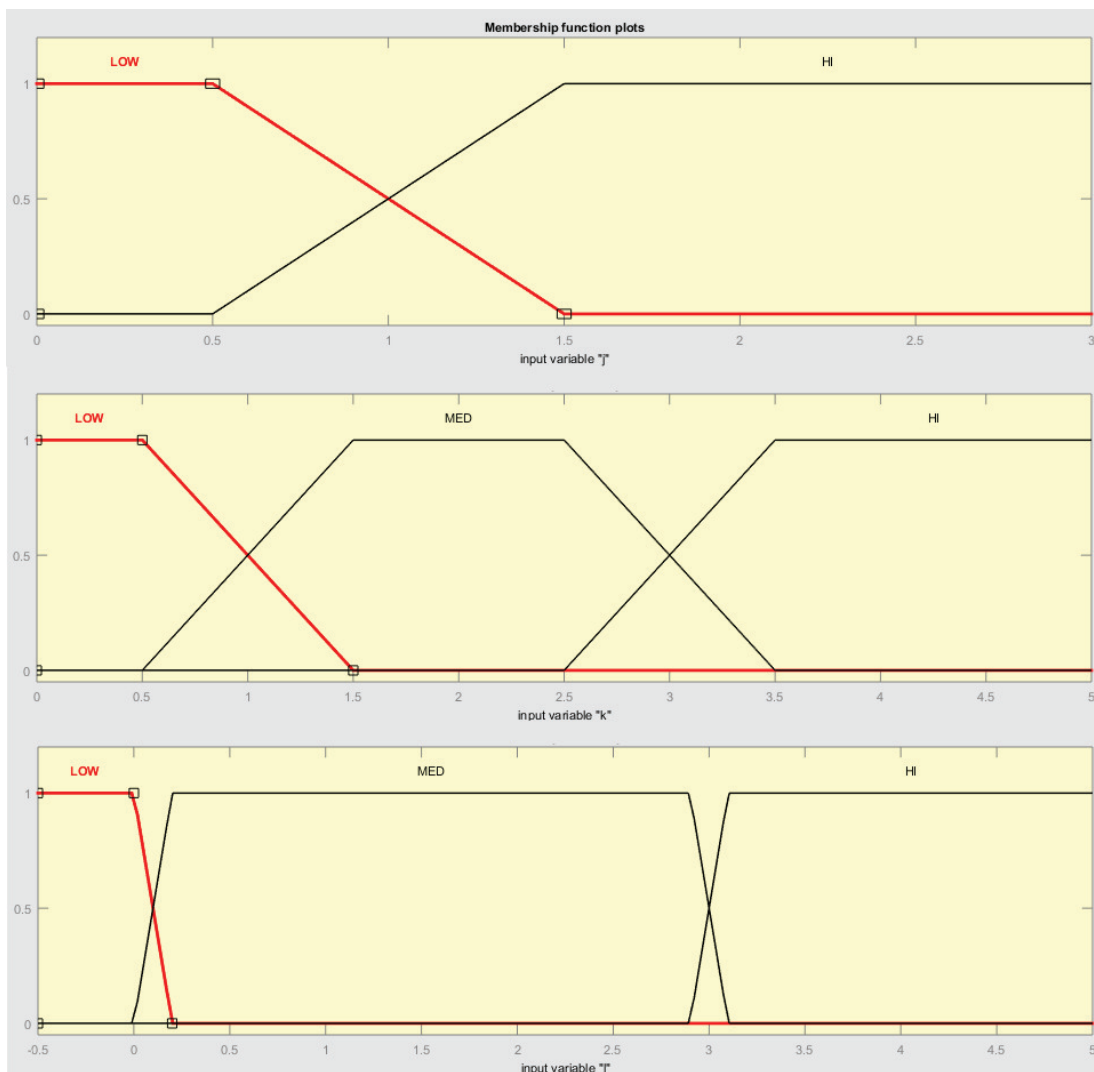


Figura 2.20 Funciones de Pertenencia de j, k, y l

Para la variable de salida “Tipo de Falla” se van a establecer funciones de pertenencia del tipo triangular y el número de curvas será igual al número de fallas encontradas según la clasificación de Rogers.

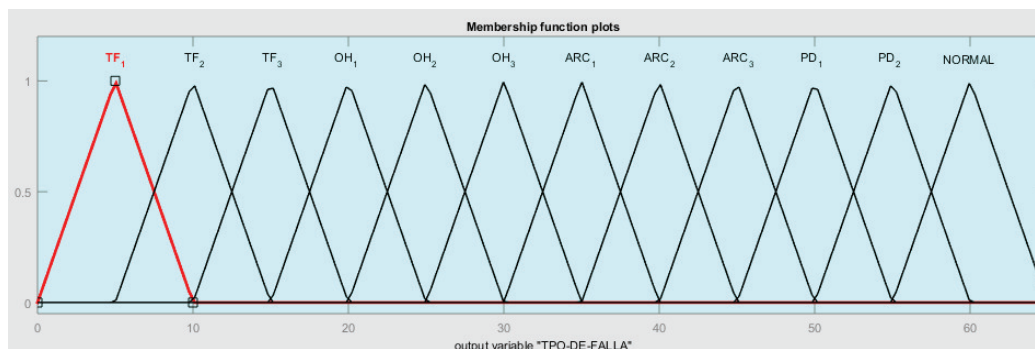


Figura 2.21 Funciones de pertenencia para la variable Tipo de Falla de Rogers

### 2.2.2.1.3 Reglas Difusas

Para continuar con el proceso de implementación del análisis difuso, se necesita establecer un grupo de reglas del tipo SI-ENTONCES (If-Then), estas reglas ayudarán en el proceso de inferencia difusa. Los antecedentes y consecuentes necesarios para la construcción de cada regla se derivarán de la información situada en la Tabla 1.9.

A continuación, se detalla un ejemplo de cómo construir una regla difusa, según la Tabla 1.9 si las variables  $i$ ,  $j$ ,  $k$  y  $l$ , tienen asignado los códigos 0 (Med), 1 (Hi), 0 (Low) y 0 (Low), se trataría de una falla TF\_3 o falla por Sobrecalentamiento de 200°C a 300°C, es decir:

**“SI (If)  $i$  es *Med* AND  $j$  es *Hi* AND  $k$  es *Low* AND  $l$  es *Low* ENTONCES (Then) Tipo de Falla es *TF\_3*”**

Como se puede observar el operador lógico utilizado para unir los antecedentes es el operador AND, ya que se debe cumplir de manera irrestricta con cada uno de los antecedentes para tener esta falla.

En algunos casos, a algunas variables se les puede asignar varios códigos como en el caso de la falla TF\_1, donde se puede encontrar que la letra “ $i$ ” asume dos códigos 1 o 2, “ $j$ ” asume 0, “ $k$ ” asume 0 y “ $l$ ” asume 0. Al momento de implementar las reglas se dispone de las siguientes posibilidades:

“SI (If) *i* es *Hi* AND *j* es *Low* AND *k* es *Low* AND *l* es *Low* ENTONCES (Then) Tipo de Falla es *TF\_1*”

O

“SI If *i* es *Vhi* AND *j* es *Low* AND *k* es *Low* AND *l* es *Low* ENTONCES (Then) Tipo de Falla es *TF\_1*”

Cuando se tienen varias reglas para inferir en una sola salida, es recomendable utilizar el operador *max* (OR) al momento de escoger el tipo de método para realizar el proceso de agregación de salidas.

Ahora se debe integrar estas reglas para el análisis, para lo cual se debe utilizar el Editor de Reglas Difusas (*Rule Editor*), para acceder a esta interfaz se la hará mediante el comando *Ctlr+3*. Dentro de este cuadro de diálogo (Figura 2.22) la creación de reglas es muy sencillo, ya que esta interfaz es muy amigable con el usuario.

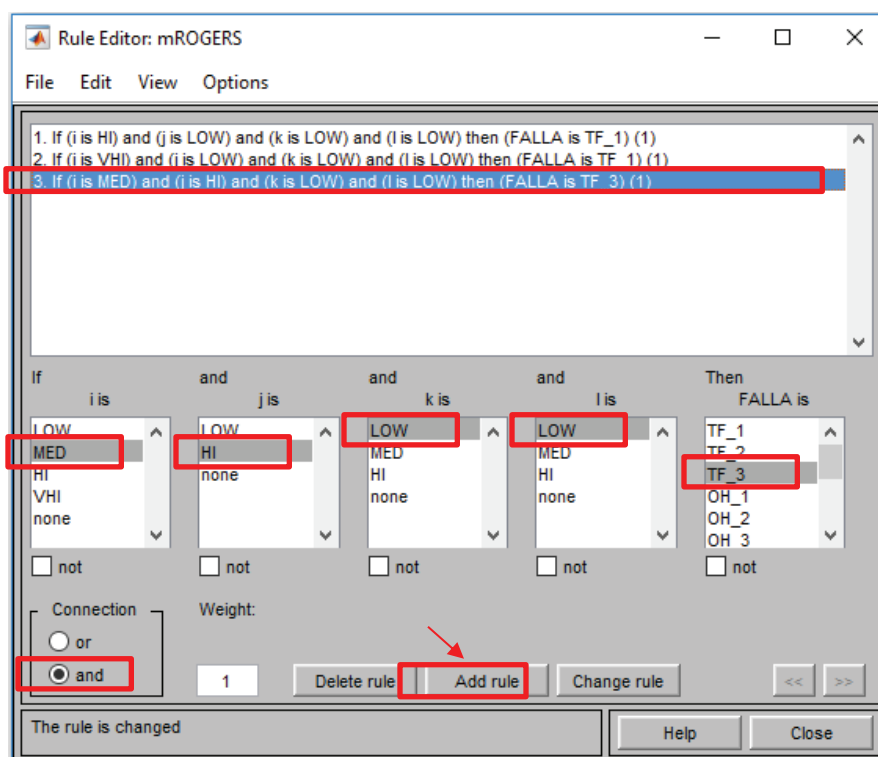


Figura 2.22 Implementación de reglas difusas para el método de Rogers.

Primero se debe escoger el tipo de conector que para este caso será el operador AND, luego se debe establecer un peso para cada regla, por lo general este peso siempre será 1 y finalmente, adicionar las reglas con el botón **Add rule**. También se puede modificar y eliminar reglas previamente seleccionadas.

En resumen, hay que implementar 18 reglas difusas para cada una de las fallas clasificadas por el método de Rogers, todas estas reglas construidas para cada falla se encuentran en el Anexo 1.

Finalmente, se puede tener una representación gráfica de cada una de las 18 reglas, junto con las variables de entrada y salida ( $i$ ,  $j$ ,  $k$ ,  $l$  y tipo de falla) en el visor de reglas (Rule Viewer).

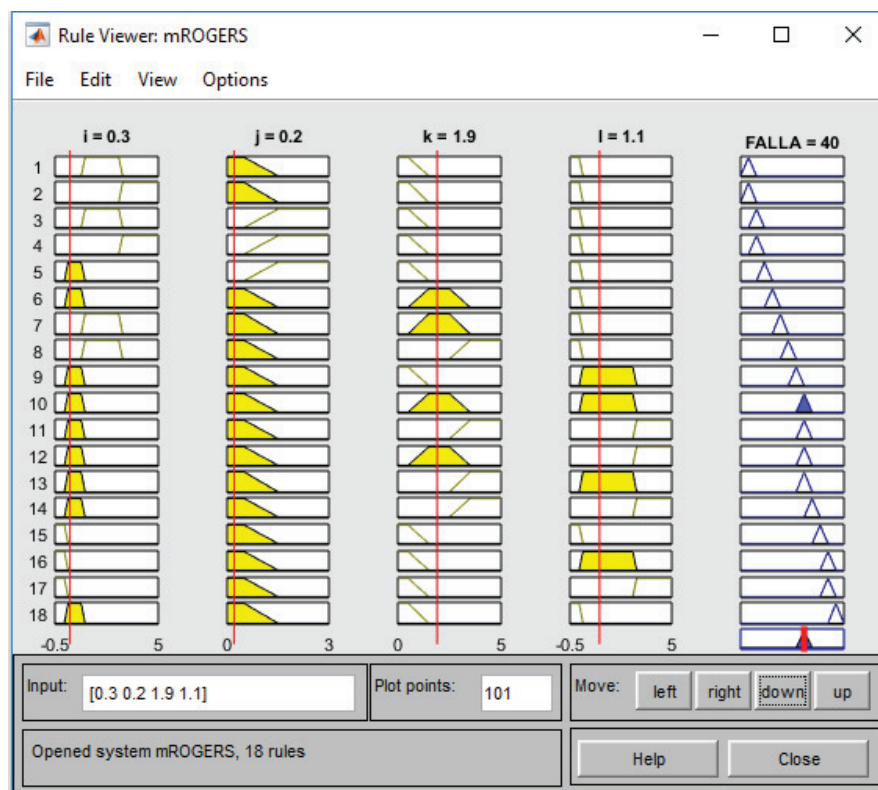


Figura 2.23 Vista Grafica de las Reglas de Rogers

También en el Visor de Reglas se permite ingresar valores numéricos y tener gráficamente un resultado.

### 2.2.2.2 Relaciones Difusas IEC

Para emplear la lógica difusa junto con el método de análisis de gases IEC como una herramienta de análisis se utilizará un procedimiento similar al empleado con el método anterior. Al igual que en el caso anterior se debe realizar el proceso de fusificación de variable, creación de funciones de pertenencia y la implementación de reglas difusas.

La información necesaria para esta implementación se encuentra en la Tabla 2.2 que se encuentra a continuación:

Tabla 2.2 Relaciones difusas IEC [8]

Código de la Relación	Intervalo	Código
l	$x < 0.1$	0 (Low)
	$0.1 \leq x \leq 3.0$	1 (Med)
	$x > 3.0$	2 (Hi)
i	$x < 0.1$	1 (Low)
	$0.1 \leq x \leq 1.0$	0 (Med)
	$x > 1.0$	2 (Hi)
k	$x < 1.0$	0 (Low)
	$1.0 \leq x \leq 3.0$	1 (Med)
	$x > 3.0$	2 (Hi)

#### 2.2.2.2.1 Fusificación de Variables l, i y k

En este caso se deben agregar solamente tres variables “l”, “i” y “k”, pues el método de IEC solo considera necesarias estas tres variables (Relaciones) para poder interpretar una falla.

Por lo tanto, dentro del Diseñador de Lógica Difusa y repitiendo el proceso ya estudiado se procede a establecer las variables difusas de entrada y salida, y además sus parámetros.

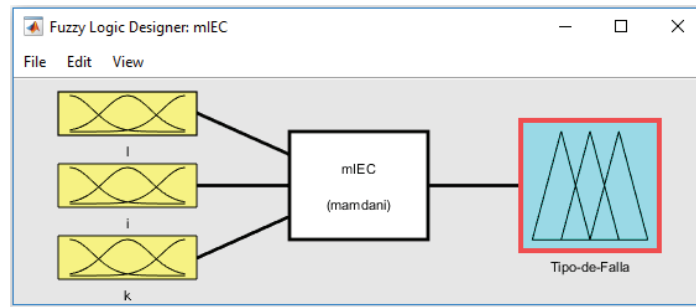


Figura 2.24 Implementación de Entradas y Salidas para el método IEC

#### 2.2.2.2.2 Creación de las Funciones de Pertenencia

En esta etapa se van a definir las funciones de pertenencia para lo cual se utilizará parte de la información de la Tabla 2.2, como se puede observar para la variable “i”, los intervalos se han modificado considerando el método de Rogers antes revisado. A continuación, se indican las curvas en la Figura 2.25.

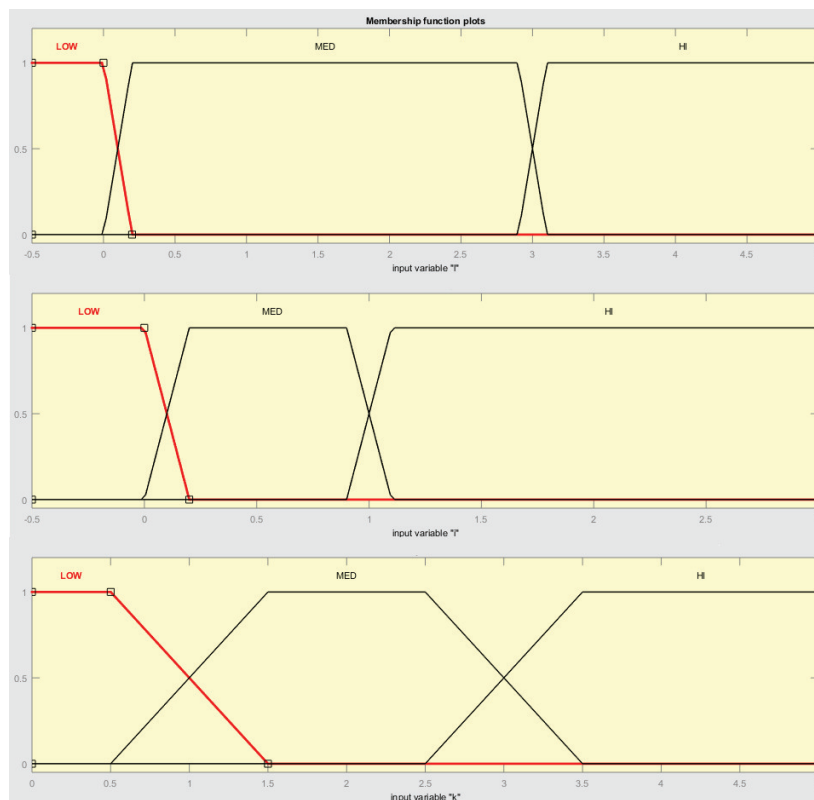


Figura 2.25 Funciones de pertenencia de l, i y k respectivamente

Las curvas implementadas son de tipo trapezoidal, sus parámetros como puntos de inflexión, tipo y nombre se encuentran en el Anexo 2.

Y para el caso de la variable de salida, se tiene una serie de curvas triangulares que se muestra a continuación en la Figura 2.26.

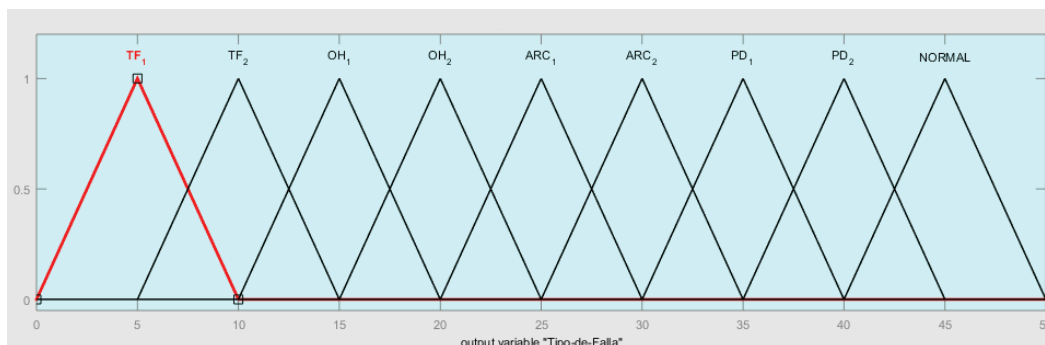


Figura 2.26 Función de Pertenencia para la variable de salida IEC

### 2.2.2.2.3 Reglas Difusas

En base a la información de la Tabla 1.12 se van a establecer 12 reglas difusas, las mismas que serán incorporadas utilizando el procedimiento ya establecido anteriormente, en el Anexo 2 se muestran las reglas incorporadas. A continuación, se puede observar de manera gráfica cada una de ellas en el Visor de Reglas (Figura 2.27).



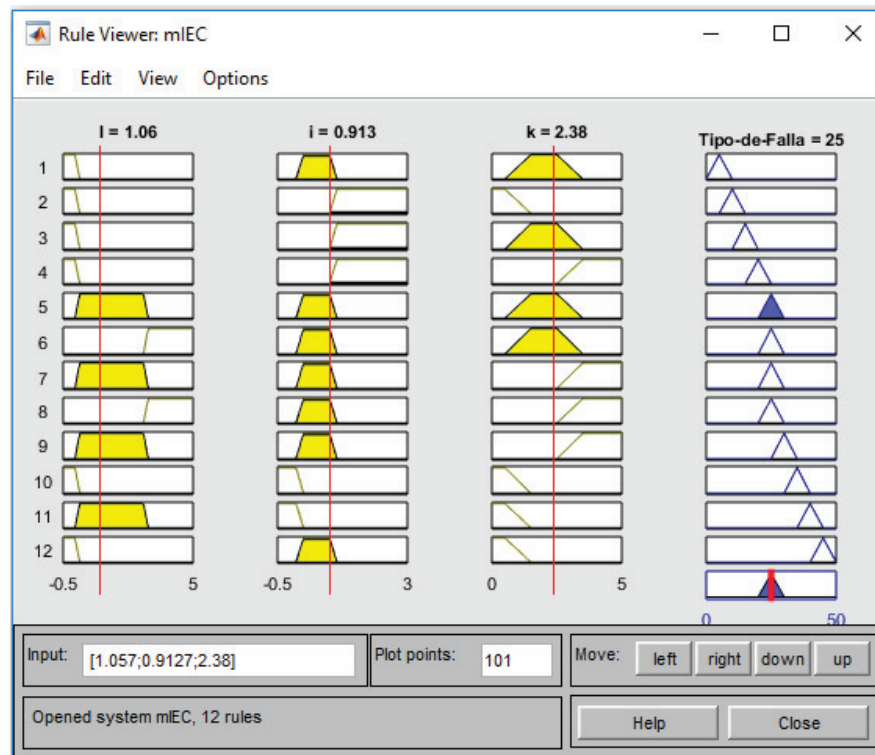


Figura 2.27 Vista grafica de las Reglas difusas de IEC

## CAPÍTULO III

### 3 ANÁLISIS DE GASES DISUELTOS EN ACEITE MEDIANTE MÉTODOS CONVENCIONALES Y COMPARACIÓN CON EL MÉTODO PROPUESTO.

En este capítulo se llevará a cabo la comparación de los resultados obtenidos entre los métodos convencionales y los métodos difusos, al ser empleados como herramienta de evaluación e interpretación del estado del aceite de un transformador. Debido a que los métodos convencionales antes mencionados definen las fallas de diferentes maneras, se realizará una clasificación de fallas usando la información de la Tabla 1.4.

Para esto, se va a utilizar un conjunto de valores de concentraciones de gases que se encuentran ordenados en la Tabla 3.1, los cuales fueron adquiridos mediante una cromatografía de gases aplicada a quince muestras de aceite con fallas previamente identificadas.

Tabla 3.1 Muestras de DGA en ppm [8]

No.	H <sub>4</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	Falla Identificada
1	200	700	250	740	1	Sobrecalentamiento y Chisporroteo
2	56	61	75	32	31	Descargas Parciales y Corona
3	33	26	6	5.3	0.2	Desgaste Normal
4	176	205.9	47.7	75.7	68.7	Arco
5	70.4	69.5	28.9	241.2	10.4	Sobrecalentamiento y Chisporroteo
6	345	112.25	27.5	51.5	58.75	Arco
7	172.9	334.1	172.9	812.5	37.7	Sobrecalentamiento y Chisporroteo
8	2587.2	7.882	4.704	1.4	0	Descargas Parciales y Corona
9	1678	652.9	80.7	1005.9	419.1	Arco
10	206	198.9	74	612.7	15.1	Sobrecalentamiento y Chisporroteo
11	180	175	75	50	4	Falla térmica a baja Temperatura

12	106	24	4	28	37	Arco
13	180.85	0.574	0.234	0.188	0	Descargas Parciales y Corona
14	27	90	24	63	0.2	Sobrecalentamiento y Chisporroteo
15	138.8	52.2	6.77	62.8	9.55	Arco

### 3.1 ANÁLISIS DE GASES DISUELTOS MEDIANTE TÉCNICAS CONVENCIONALES

#### 3.1.1 TÉCNICA DE DUVAL

Para el desarrollo de este análisis, se va a seguir el procedimiento detallado en el literal 1.3.1 de este documento, y se utilizarán los datos presentados en la Tabla 3.1.

Como primer paso, se debe obtener los porcentajes de contenido de cada gas (%CH<sub>4</sub>, %C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> y %C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>) mediante la aplicación de las ecuaciones (1.1), (1.2) y (1.3). Dichos valores se encuentran calculados en la siguiente Tabla 3.2.

Tabla 3.2 Cálculo de contenido de gases según Duval

No	%C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	%CH <sub>4</sub>	%C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>
1	0	49	51
2	25	49	26
3	1	83	17
4	20	59	22
5	3	22	75
6	26	50	23
7	3	28	69
8	0	85	15
9	20	31	48
10	2	24	74
11	2	76	22
12	42	27	31
13	0	75	25
14	0	59	41
15	8	42	51

Ahora se va a trabajar utilizando el triángulo de Duval para determinar el tipo de falla presente en las muestras de aceite.

A manera de ejemplo en la Figura 3.1, se ilustra la forma de detectar una falla en una muestra de aceite. Para lo cual se ha utilizado los valores de concentración de la muestra N.- 01,  $\%C_2H_2=0$ ,  $\%CH_4=49$  y  $\%C_2H_4=51$ .

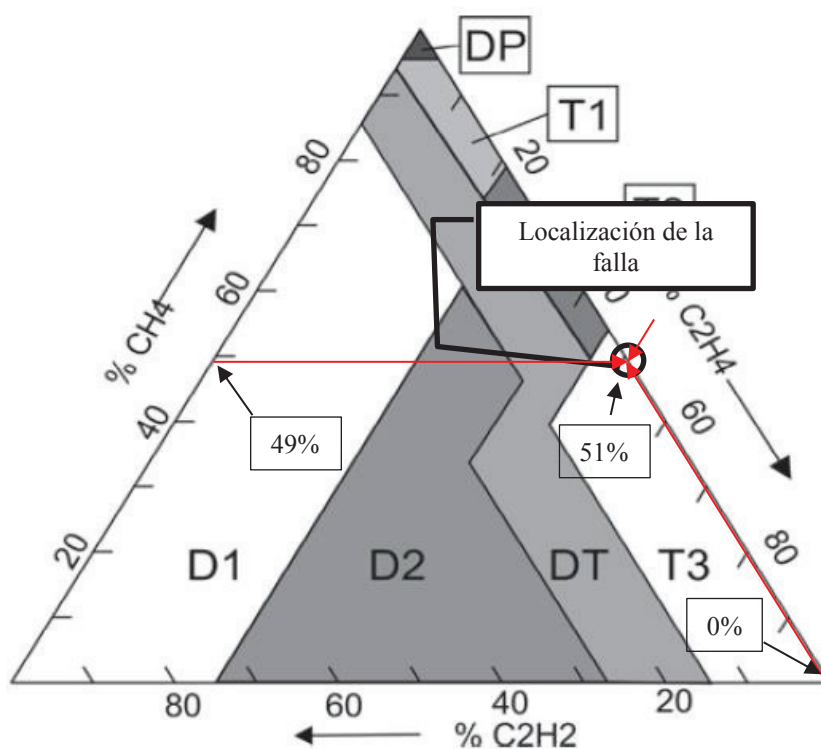


Figura 3.1 Ubicación de falla en el triángulo de Duval (muestra N.-01)

Como se puede observar en la figura anterior, el punto se localiza en la zona T3 es decir se trata de una Falla Térmica a más de  $700^{\circ}C$  (Sobrecalentamiento y Chisporroteo). De igual manera se procederá con el análisis de las muestras restantes, obteniéndose el siguiente cuadro resumen.

Tabla 3.3 Resultados del análisis mediante la técnica de Duval

No	Falla
1	T3 – Sobrecalentamiento y Chisporroteo
2	D2 – Arco
3	T1 – Falla térmica de baja temperatura
4	D2 – Arco
5	T3 – Sobrecalentamiento y Chisporroteo
6	D2 – Arco
7	T3 – Sobrecalentamiento y Chisporroteo
8	T1 – Falla térmica a baja temperatura
9	D2 – Arco
10	T3 – Sobrecalentamiento y Chisporroteo
11	T2 – Falla térmica a baja temperatura
12	D2 – Arco
13	T1 – Falla térmica a baja temperatura
14	T2 – Sobrecalentamiento y Chisporroteo
15	T3 – Sobrecalentamiento y Chisporroteo

### 3.1.2 EL MÉTODO DE ROGERS

Para utilizar este método se debe obtener las relaciones entre gases ( $\text{CH}_4/\text{H}_2$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6/\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$  y  $\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$ ) como se menciona en el literal 1.3.2. A continuación, se ordenan los valores de las relaciones en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4 Cálculo de Relaciones de Rogers

No	$i = \frac{\text{CH}_4}{\text{H}_2}$	$j = \frac{\text{C}_2\text{H}_6}{\text{CH}_4}$	$k = \frac{\text{C}_2\text{H}_4}{\text{C}_2\text{H}_6}$	$l = \frac{\text{C}_2\text{H}_2}{\text{C}_2\text{H}_4}$
1	3,50	0,36	2,96	0,00
2	1,09	1,23	0,43	0,97
3	0,79	0,23	0,88	0,04
4	1,17	0,23	1,59	0,91
5	0,99	0,42	8,35	0,04
6	0,33	0,24	1,87	1,14
7	1,93	0,52	4,70	0,05
8	0,00	0,60	0,30	0,00

<b>9</b>	0,39	0,12	12,46	0,42
<b>10</b>	0,97	0,37	8,28	0,02
<b>11</b>	0,97	0,43	0,67	0,08
<b>12</b>	0,23	0,17	7,00	1,32
<b>13</b>	0,00	0,41	0,80	0,00
<b>14</b>	3,33	0,27	2,63	0,00
<b>15</b>	0,37	0,13	9,28	0,15

Una vez obtenidos los valores presentados en la tabla anterior, se debe codificarlas utilizando la Tabla 1.8 y decodificarlas con ayuda de la Tabla 1.9, los resultados de este análisis se muestran a continuación en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5 Resultados del análisis mediante el método de Rogers

<b>No</b>	<b>i</b>	<b>j</b>	<b>k</b>	<b>l</b>	<b>Falla</b>
1	2	0	1	0	Indistinguible
2	1	1	0	1	Indistinguible
3	0	0	0	0	Normal
4	1	0	1	1	Indistinguible
5	0	0	2	0	Indistinguible
6	0	0	1	1	Arco
7	1	0	2	0	Sobrecalentamiento y Chisporroteo
8	5	0	0	0	Descargas Parciales y Corona
9	0	0	2	1	Arco
10	0	0	2	0	Indistinguible
11	0	0	0	0	Normal
12	0	0	2	1	Arco
13	5	0	0	0	Descargas Parciales y Corona
14	2	0	1	0	Indistinguible
15	0	0	2	1	Arco

### 3.1.3 EL MÉTODO IEC

Para el proceso de análisis mediante el empleo de esta técnica, se va a utilizar únicamente los valores de las relaciones  $CH_4/H_2$ ,  $C_2H_4/C_2H_6$  y  $C_2H_2/C_2H_4$  ya calculados en el literal anterior, y se los reordenarán en la siguiente Tabla 3.6.

Tabla 3.6 Calculo de Relaciones IEC

No	$l = \frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	$i = \frac{CH_4}{H_2}$	$k = \frac{C_2H_4}{C_2H_6}$
1	0,00	3,50	2,96
2	0,97	1,09	0,43
3	0,04	0,79	0,88
4	0,91	1,17	1,59
5	0,04	0,99	8,35
6	1,14	0,33	1,87
7	0,05	1,93	4,70
8	0,00	0,00	0,30
9	0,42	0,39	12,46
10	0,02	0,97	8,28
11	0,08	0,97	0,67
12	1,32	0,23	7,00
13	0,00	0,00	0,80
14	0,00	3,33	2,63
15	0,15	0,37	9,28

Una vez tabulado estos valores, se tratará de identificar el tipo de falla presente en cada muestra, para lo cual se usa la información de las Tabla 1.11 y Tabla 1.12. Los resultados obtenidos de este análisis se presentan en la siguiente Tabla 3.7.

Tabla 3.7 Resultados del análisis mediante el método IEC

No	l	i	k	Falla
1	0	2	1	Sobrecalentamiento y Chisporroteo
2	1	2	0	Indistinguible
3	0	0	0	Normal
4	1	2	1	Indistinguible
5	0	0	2	Indistinguible
6	1	0	1	Arco
7	0	2	2	Sobrecalentamiento y Chisporroteo

8	0	1	0	Descargas Parciales y Corona
9	1	0	2	Arco
10	0	0	2	Indistinguible
11	0	0	0	Normal
12	1	0	2	Arco
13	0	1	0	Descargas Parciales y Corona
14	0	2	1	Sobrecalentamiento y Chisporroteo
15	1	0	2	Arco

## 3.2 ANÁLISIS DE GASES DISUELTOS MEDIANTE METODOS DIFUSOS

### 3.2.1 LAS RELACIONES DIFUSAS DE ROGERS

En este segmento del documento se va a emplear las relaciones difusas previamente implementadas como herramientas de análisis para la interpretación de fallas presentes en las muestras de DGA de la Tabla 3.1.

Para ello se dirigirá al Visor de Reglas, y dentro de esta interfaz gráfica se debe ingresar los valores de la Tabla 3.4, y así obtener un tipo de falla para cada caso.

Como un ejemplo ilustrativo se va a realizar el análisis de la muestra N.-06 ( $i=0,33$ ;  $j=0,24$ ;  $k=1,87$  y  $l=1,14$ ), por lo que, como primer paso se debe ingresar los valores de las variables  $i$ ,  $j$ ,  $k$  y  $l$  en el cuadro de dialogo que se muestra en la Figura 3.2.

Figura 3.2 Cuadro de dialogo para ingreso de valores de  $i$ ,  $j$ ,  $k$ , y  $l$



Una vez realizado el paso anterior, se puede observar como en el cuadro de diálogo se presenta una respuesta gráfica, la cual viene acompañada por un valor numérico, como se muestra en la Figura 3.3.

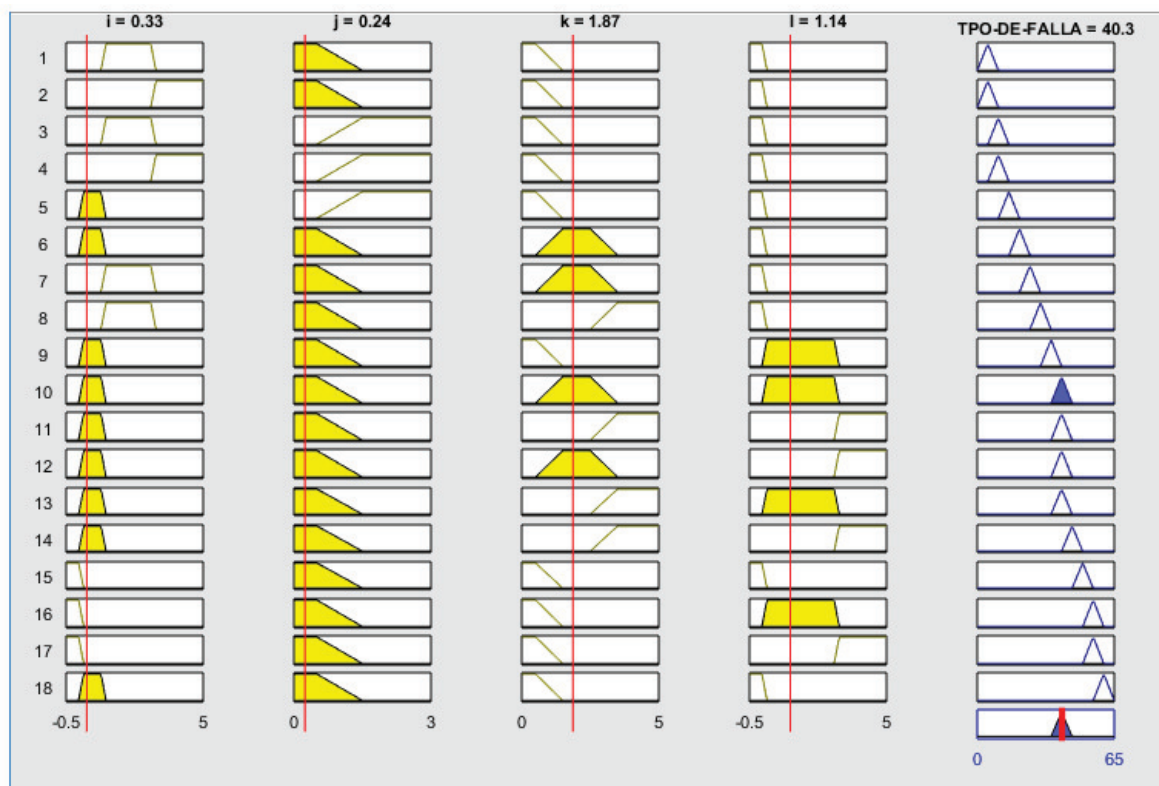


Figura 3.3 Análisis mediante el método difuso de Rogers para la muestra N.-06

En la figura desplegada en la parte superior se observa como la variable de salida *Tipo de Falla* es igual a 40.3, además se muestra un resultado gráfico, ya que la curva de la décima fila ubicada en la quinta columna se encuentra totalmente coloreada de azul. Esto indica que los valores ingresados cumplen con el consecuente de la regla número 10, regla que tiene la siguiente estructura:

**SI**  $i$  es Med AND  $j$  es Low AND  $k$  es Med AND  $l$  es Med **ENTONCES** Tipo de Falla es ARC\_2

Es decir que en la muestra N.-06 se pudo identificar una falla del tipo ARC\_2 (Arco con alto flujo), además si se considera el valor de *Tipo de Falla* y se utilizan las funciones de pertenencia de dicha salida, se puede confirmar el tipo de falla presente, como se indica en la siguiente Figura 3.4.

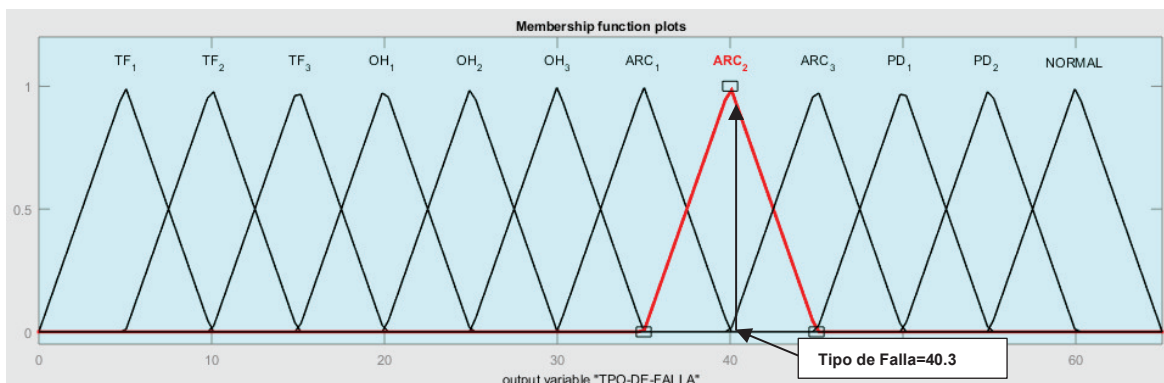


Figura 3.4 Tipo de Falla según método difuso de Rogers en muestra N.-06

En la siguiente Tabla 3.8 se encuentran los resultados del diagnóstico de cada muestra mediante la aplicación de los métodos de relaciones difusas de Rogers. Los resultados gráficos se encuentran ordenados en el Anexo 3

Tabla 3.8 Resultado del análisis mediante el método difuso de Rogers

No	Falla	Salida <i>Tipo-de-Falla</i>
1	Sobrecalentamiento y Chisporroteo	32.5
2	Arco	35.1
3	Desgaste Normal	60.1
4	Sobrecalentamiento y Chisporroteo	32.5
5	Sobrecalentamiento y Chisporroteo	29.9
6	Arco	40.3
7	Sobrecalentamiento y Chisporroteo	30.2
8	Descargas Parciales y Corona	50.1
9	Arco	40.3
10	Sobrecalentamiento y Chisporroteo	30.2
11	Normal <sup>1</sup>	60.1
12	Arco	40.3

<sup>1</sup> Cuando se analiza los resultados gráficos para este caso, se puede ver que si existe la presencia de una Falla Térmica del tipo TF\_1 pero que no es muy relevante.

13	Descargas Parciales y Corona	50
14	Sobrecalentamiento y Chisporroteo	32.5
15	Arco	40

### 3.2.2 LAS RELACIONES DIFUSAS IEC

El procedimiento para la aplicación de esta técnica es muy similar al manejado en la técnica estudiada en el punto anterior, ahora se deben utilizar los datos de la Tabla 3.6 como variables de entrada a la interfaz de análisis difuso.

De igual forma se realizará un ejemplo demostrativo, en esta ocasión se manipularán los datos de la muestra N.-14 ( $I=0,0$ ;  $i=3,33$  y  $k=2,63$ ), y se determinará el tipo de avería presente. Los resultados obtenidos se pueden visualizar en la Figura 3.5, que se indica a continuación.

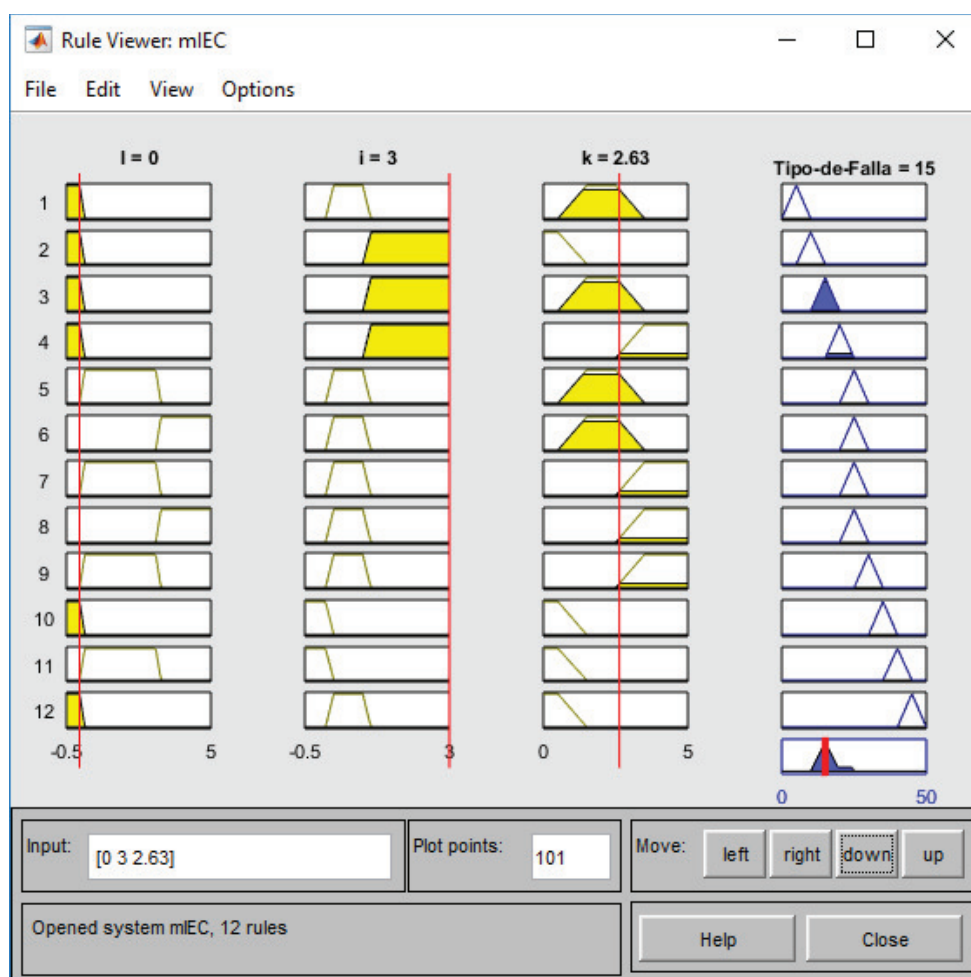


Figura 3.5 Análisis mediante el método difuso IEC para la muestra N.- 14

Como se puede apreciar en la figura anterior la tercera y cuarta curva de la cuarta columna se encuentran totalmente y parcialmente rellenas de color azul respectivamente, lo cual indica que se cumple totalmente con la regla número 3 y parcialmente con la regla número 4, estas reglas están estructuradas de la siguiente manera:

Regla 3: **SI**  $l$  es Low AND  $i$  es Hi AND  $k$  es Med **ENTONCES** Tipo de Falla es OH\_1

Y Regla 4: **SI**  $l$  es Low AND  $i$  es HI AND  $k$  es Hi **ENTONCES** Tipo de Falla es OH\_2

Es decir que existen dos tipos de falla presentes OH\_1 y OH\_2, pero con la ayuda del valor que toma la salida Tipo de Falla junto con el empleo de las curvas de la Figura 3.6 (Funciones de Pertenencia de la Salida) se puede concluir cual es la falla que predomina o tiene un mayor grado de pertenencia, y para este ejemplo es la falla OH\_1. Por otro lado, se tienen pequeños rastros que indican que hay la presencia de la falla OH\_2.

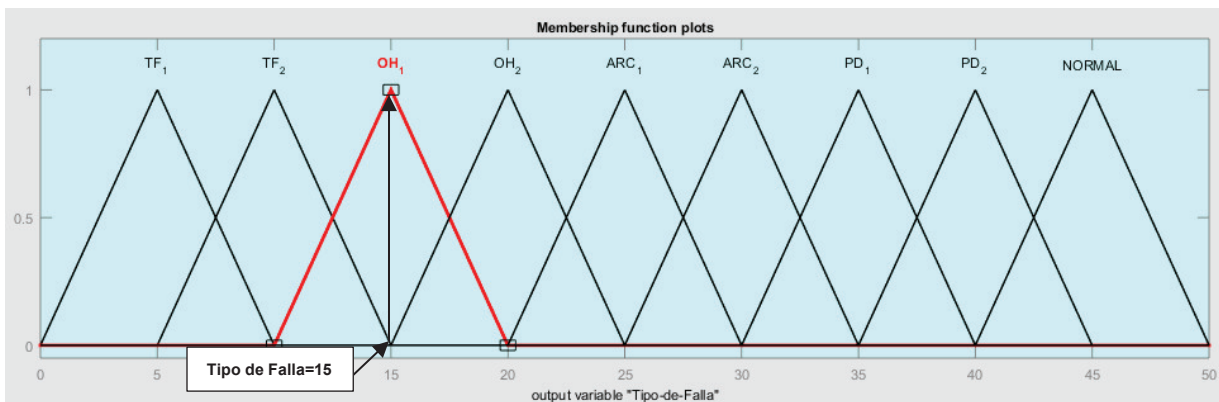


Figura 3.6 Tipo de falla según método difuso IEC en muestra N.- 14

Ahora se debe proceder con el análisis de las muestras restantes, para lo cual se repetirá el procedimiento que se aplicó a la muestra N.- 14. Las averías detectadas en las muestras se encuentran en la Tabla 3.8 que se muestra a continuación y los resultados gráficos se encuentran a disposición en el Anexo 4.

Tabla 3.9 Resultados del análisis mediante el método difuso IEC

No	Falla	Salida Tipo-de-Falla
1	Sobrecalentamiento y Chisporroteo	15
2	Arco	25
3	Normal	45
4	Arco	25
5	Sobrecalentamiento y Chisporroteo	20
6	Arco	25
7	Sobrecalentamiento y Chisporroteo	20
8	Descargas Parciales y Corona	35
9	Arco	27.5
10	Sobrecalentamiento y Chisporroteo	20
11	Normal	45
12	Arco	27.5
13	Descargas Parciales y Corona	35
14	Sobrecalentamiento y Chisporroteo	15
15	Arco	27.5

### 3.3 COMPARACIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS

Dentro del proceso de comparación se analizará el número de casos donde el tipo de falla estimada coincida con la falla ya identificada en cada muestra, así como también los casos que no pudieron ser identificados por los respectivos métodos.

Para esta fase se puede implementar una tabla donde se ordenarán los resultados obtenidos mediante el empleo de cada método: Método gráfico de Duval, Método de Relaciones de Rogers, Método de Relaciones IEC, Método difuso de Rogers (propuesto) y Método difuso IEC (propuesto).

Tabla 3.10 Análisis comparativo de los resultados obtenidos

N.-	Falla Identificada	Métodos Convencionales			Métodos Difusos Propuestos	
		T. Duval	M. Rogers	M. IEC	Rogers	IEC
1	Sobrecalentamiento y Chisporroteo	✓	●	✓	✓	✓
2	Descargas Parciales y Corona	X	●	●	X	X
3	Desgaste Normal	X	✓	✓	✓	✓
4	Arco	✓	●	●	X	✓
5	Sobrecalentamiento y Chisporroteo	✓	●	●	✓	✓
6	Arco	✓	✓	✓	✓	✓
7	Sobrecalentamiento y Chisporroteo	✓	●	✓	✓	✓
8	Descargas Parciales y Corona	X	●	✓	✓	✓
9	Arco	✓	●	✓	✓	✓
10	Sobrecalentamiento y Chisporroteo	✓	✓	●	✓	✓
11	Falla Térmica a baja temperatura	✓	X	X	X	X
12	Arco	✓	✓	✓	✓	✓
13	Descargas Parciales y Corona	X	✓	✓	✓	✓
14	Sobrecalentamiento y Chisporroteo	✓	●	✓	✓	✓
15	Arco	X	✓	✓	✓	✓
✓ Identificación Correcta		X Identificación Incorrecta			● Indistinguible	

De la Tabla 3.10 se deriva la siguiente Tabla 3.11, en este nuevo cuadro se encuentra información importante. Como se puede observar el método que ofrece un mayor grado de confianza al momento de identificar una falla correcta es el método difuso IEC con un 87% de fallas correctas, seguido por el método de Rogers con un 80%. En cuanto a los métodos convencionales, la técnica de Duval y el Método de relaciones IEC tienen un 67% de identificación correcta, es decir de las 15 muestras de aceite solo han podido identificar la falla correcta en 10 de ellas.

Si bien la técnica de Duval es una de las más utilizadas por su alto grado de confiabilidad al momento de identificar una falla, para estos casos (15 muestras) no ha sido muy eficiente, esto se puede deber a que la mayor parte de las muestras de aceite poseen concentraciones de gases que sitúan los puntos de localización de falla en los bordes o límites que determinan las mismas.

Por otra parte, el menos eficiente es el método convencional de relaciones de Rogers, ya que en el 53% de las muestras de aceite no ha sido posible establecer un tipo de falla.

Tabla 3.11 Resultados comparativos

<b>Estado / Resultado</b>	<b>Métodos Convencionales</b>			<b>Métodos Difusos</b>	
	T. de Duval	M. Rogers	M. IEC	M. difuso Rogers	M. difuso IEC
Identificación Correcta	67%	40%	67%	80%	87%
Identificación Incorrecta	33%	7%	7%	20%	13%
Indistinguible	-	53%	4%	-	-

Como se puede observar la implementación de la lógica difusa en los métodos de relaciones de gases de Rogers e IEC ha permitido mejorar notablemente el porcentaje de identificación correcta, lo cual destaca la importancia del uso de estas herramientas de análisis inteligentes dentro del campo de la ingeniería eléctrica.

### 3.3.1 VENTAJAS Y DESVENTAJAS

En el siguiente cuadro (Tabla 3.12) se va a detallar las ventajas y desventajas que existen al comparar los métodos convencionales frente a los métodos difusos.

Tabla 3.12 Ventajas y Desventajas de cada método

Métodos Tradicionales de Rogers, IEC y Duval	
Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Son muy prácticos a la hora de utilizarlos ya que no se necesita de ningún software especial.</li> <li>• La técnica de Duval, es uno de los métodos más confiables y por ende uno de los más utilizados.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Solo permiten identificar un tipo de falla, es decir no son útiles en casos especiales.</li> </ul>
Métodos Difusos de Rogers e IEC	
Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Permite identificar la presencia de varias fallas en casos donde existe múltiples averías.</li> <li>• Tiene la capacidad de estimar fallas cuando las concentraciones de gases no permiten tener una avería claramente identificada.</li> <li>• Integra resultados gráficos a la hora de realizar un análisis lo cual puede ayudar a identificar nuevas fallas incipientes.</li> <li>• Ayuda a tener un panorama más claro del estado interno de un transformador</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se necesita la implementación de un software especializado que contenga el tratamiento de problemas con Lógica difusa, como por ejemplo el toolbox de Lógica Difusa de Matlab.</li> <li>• Puede llevar a la confusión, ya que puede presentar casos donde además de mostrar la falla presente, también presente la falla "normal".</li> </ul>



## CAPÍTULO IV

### 4 ANÁLISIS DE GASES DISUELTOS EN ACEITE DE CASOS ESPECIALES DE FALLAS EN TRANSFORMADORES

En este capítulo se va a tratar de estimar el tipo de fallas presentes en muestras de aceite de casos especiales en las cuales las concentraciones de gases se deben a la presencia de múltiples fallas, lo cual provoca que las relaciones entre los diferentes gases utilizados se encuentren en los límites de los intervalos que condicionan cada falla. En estos casos, es compleja la identificación de la falla a través de los métodos convencionales, ya que estos métodos permiten identificar un solo tipo de falla a la vez, mientras que cuando se usa los métodos difusos se dispone de la facilidad de obtener un resultado gráfico y en base a las curvas de salida se puede estimar las fallas presentes en un caso especial.

#### 4.1 CASO PROPUESTO

Se planteará una muestra donde las concentraciones de gases deberían indicar que el transformador de potencia se encuentra afectado por varias averías. Para tratar de identificar estas fallas con los métodos difusos se va a utilizar los resultados gráficos que se obtienen al momento de realizar el análisis de gases disueltos. Básicamente lo que se debe observar es la distinción de las curvas de pertenencia de cada falla presente; para llevar a cabo este ejercicio se presentan los datos de la muestra a utilizar en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1 Concentraciones de Gases propuestos en ppm

No.	H <sub>4</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>
1	1230	123	79.95	79.95	13.615

## 4.2 SOLUCIÓN MEDIANTE EL MÉTODO DIFUSO DE ROGERS

Para la aplicación de este método se debe calcular las relaciones entre gases, con lo cual se obtiene  $i=0.1$ ,  $j=0.65$ ,  $k=1$  y  $l=0.1703$ . Como se puede observar los valores que toman las variables  $i$ ,  $j$ ,  $k$  y  $l$  son muy delicados pues en algunos casos, corresponden a los límites de los intervalos que definen las distintas fallas según Rogers, lo cual lleva a tener una interpretación ambigua del tipo de falla. Según estos valores, y utilizando la información de la Tabla 1.8 y la Tabla 1.9, se puede obtener el siguiente cuadro.

Tabla 4.2 Falla según Rogers

<b>i</b>	<b>j</b>	<b>k</b>	<b>l</b>	<b>Códigos según Rogers</b>	<b>Falla</b>
0.1	0.65	1	0.1703	0011	ARC_2 Arco con alto flujo

Ahora se va a utilizar el método difuso de Rogers y obtener la Figura 4.1. En esta representación gráfica se distinguen principalmente las curvas de las funciones de salida de las reglas 9, 10 y 16, ya que todas ellas se encuentran rellenas casi en su totalidad de color azul lo cual indica el grado de importancia.

Estas curvas representan las averías mencionadas en la Tabla 1.9, y en esta ocasión indican que las fallas que se pueden identificar en esta muestra de aceite son: ARC\_1, ARC\_2 y PD\_2.

Como se pudo comprobar cuando se tiene la presencia de varias fallas, el método difuso ayudará a estimar cuales son las fallas que se encuentran presentes.

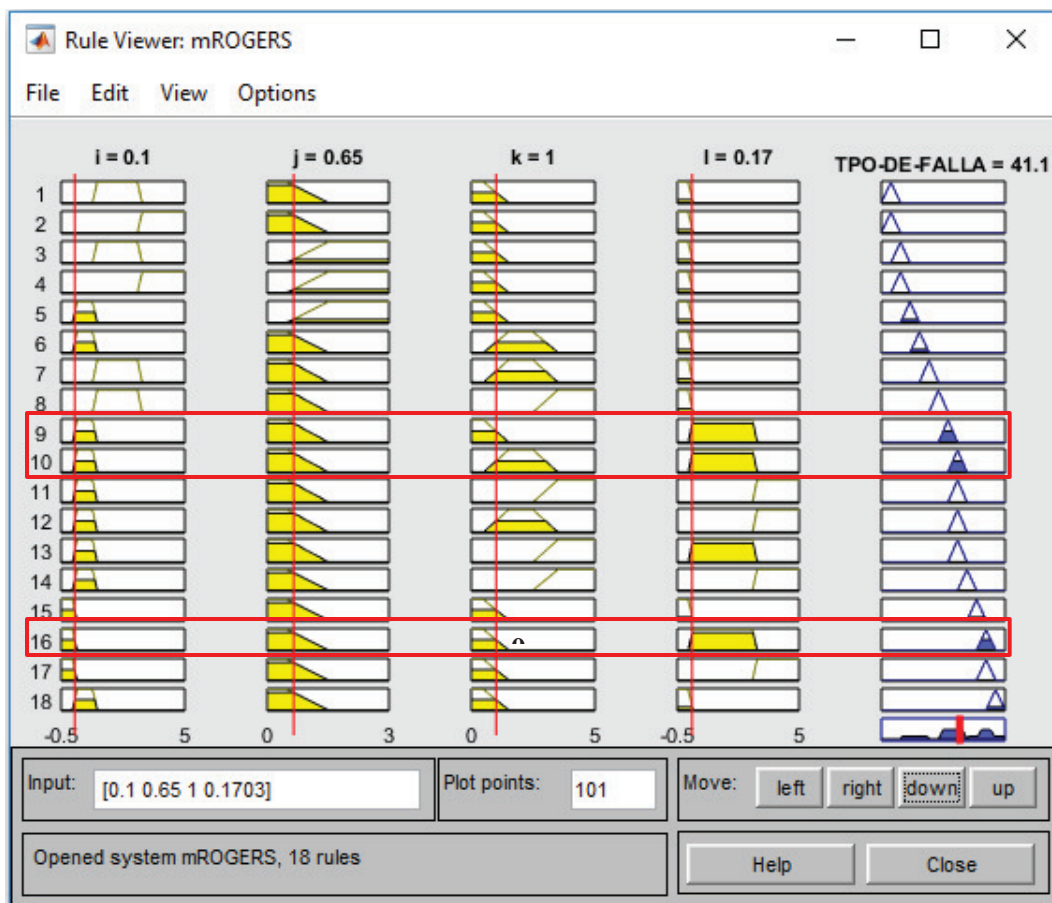


Figura 4.1 Resultados – Método difuso de Rogers

### 4.3 SOLUCIÓN MEDIANTE EL MÉTODO DIFUSO IEC

De igual manera que en el caso anterior también se va a analizar los datos de la muestra, utilizando ahora las relaciones de gases de IEC, con lo cual se ha podido identificar la presencia de un tipo de falla, la cual se describe en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3 Fallas según IEC

<b>l</b>	<b>i</b>	<b>k</b>	<b>Códigos según IEC</b>	<b>Falla</b>
0.1703	0.1	1	101	ARC_1 Arco con bajo flujo Indistinguible

Ahora se va a utilizar el método difuso IEC para realizar el análisis, obteniéndose los siguientes resultados que se muestran en la Figura 4.2.

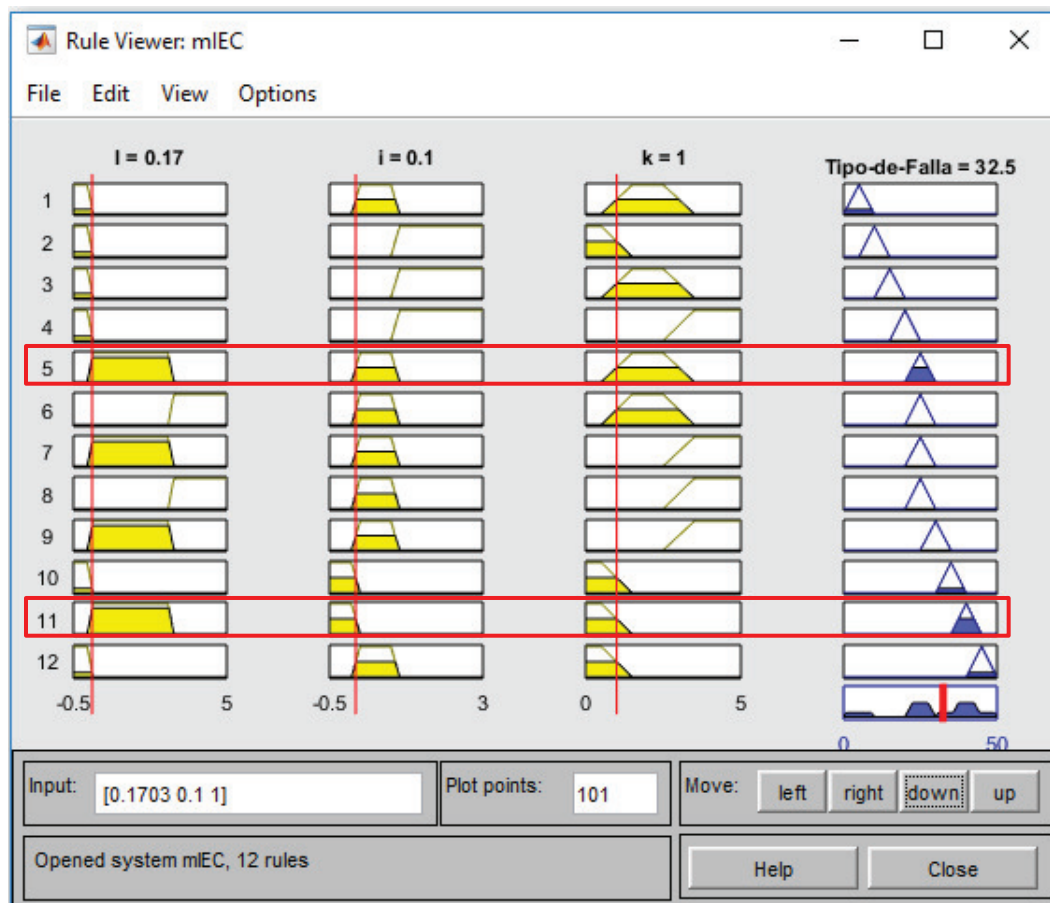


Figura 4.2 Resultados - Método difuso IEC

En este caso se puede apreciar que la aplicación para IEC considera que este transformador está siendo afectado por la presencia de las averías ARC\_1 y PD\_2, ya que las curvas que destacan son aquellas que están relacionadas con las reglas número 5 y número 10.

También llaman la atención la presencia de algunas curvas coloreadas parcialmente de color azul, las cuales se pueden considerar como fallas en desarrollo, pero que para este caso no tienen mucha importancia.

#### 4.4 APLICACIÓN A UN CASO REAL

Se va a considerar a la muestra de aceite de un transformador de 330kV como un caso especial para objeto de análisis, cuyos valores de concentraciones de gases se encuentran ordenados en la Tabla 4.4 en ppm. [17]

Cuando se realizó la inspección interna de este transformador se encontró que existían dos lugares con daños por sobrecalentamientos, el uno se debía a la circulación de corrientes de Eddy y el otro causado por un mal contacto. [17]

Tabla 4.4 Concentración de Gases – Transformador 330kV

H <sub>4</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	Fallas Presentes
200	700	250	740	1	Falla térmica de 300°C a 700°C Falla térmica >700°C

Para realizar el análisis de gases disueltos mediante los métodos convencionales de esta muestra se tienen que los valores de las relaciones entre gases son:  $i=3.5$ ,  $j=0.357$ ,  $k=2.96$  y  $l=0.001$ , y que los porcentajes de los gases utilizados por Duval son:  $\%C_2H_2=0.069$ ,  $\%CH_4=48.6$  y  $\%C_2H_4=51.4$ .

Cuando se realiza el análisis considerando las relaciones de Rogers se encuentra que para estas variables no existe un tipo de falla definido (código 2010), mientras que para el caso de IEC, este encuentra que la falla presente es OH\_1 (código 021) y finalmente en el análisis con el método grafico de Duval se puede considerar que se trata de una Falla térmica a más de 700°C. Como se puede observar ninguno de los tres métodos antes mencionados puede identificar dos fallas a la vez.

Ahora utilizando los métodos difusos propuestos en este documento se obtienen diferentes resultados, los cuales se muestra en las siguientes figuras.

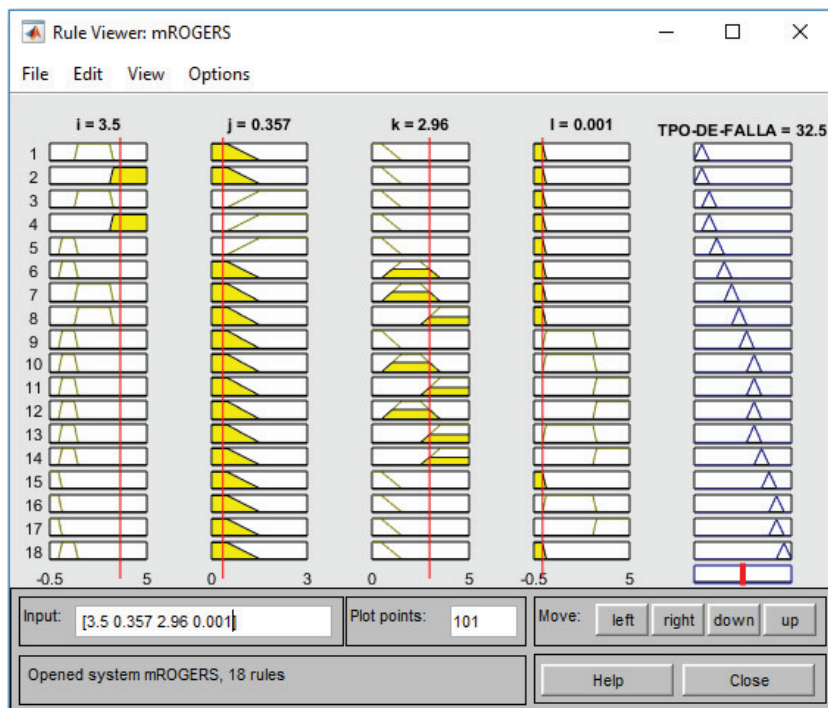


Figura 4.3 Resultados para el Transformador de 330kV según método difuso de Rogers

Como se puede observar para el caso del método difuso de Rogers no se distingue una falla claramente, pero estima un valor numérico el cual es 32.5, valor que indica, de acuerdo a las funciones de pertenencia, que se trataría de una falla de OH\_3 (Falla por sobrecalentamiento debido a corrientes circulantes entre el tanque y el núcleo o uniones calientes) o una falla ARC\_1 (Flasheo de bajo flujo), donde la primera interpretación es una de las presentes en esta muestra.

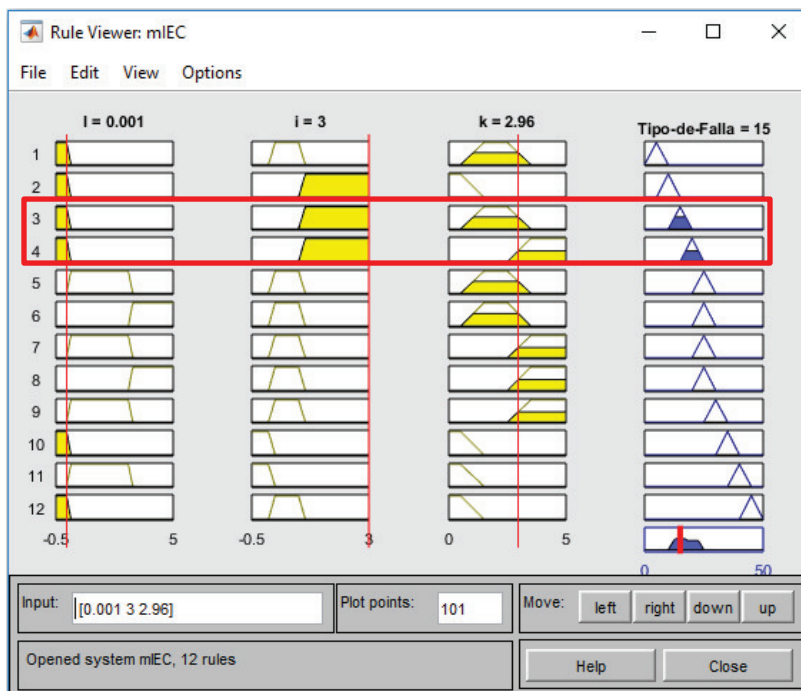


Figura 4.4 Resultados para el Transformador de 330kV según método difuso IEC

El método difuso IEC muestra la presencia de dos fallas muy bien diferenciadas las cuales son OH\_1 (Falla térmica de 300°C a 700°C) y OH\_2 (Falla térmica >700°C); este método es el único que para este caso pudo identificar múltiples fallas.

Finalmente, en casos especiales se puede estimar un tipo de falla ya sea utilizando el método difuso de Rogers o IEC, sin dejar de lado que puedan existir casos donde no se pueda identificar un tipo de falla.

## CAPÍTULO V

### 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1 CONCLUSIONES

- El uso de los métodos de análisis de gases disueltos es muy importante, ya que permite al usuario mantener un control continuo del estado del sistema de aislamiento interno de un transformador, además de prevenir posibles daños que puedan afectar la vida útil de este equipo.
- La incorporación de herramientas inteligentes como la lógica difusa en los métodos de análisis de Rogers e IEC permite obtener un panorama mayor del estado interno de un transformador, además de que permite una predicción más acertada del tipo de falla, pues se han identificado un número mayor de fallas que cuando se utilizan los métodos convencionales.
- El método que mayor grado de certeza ofrece al momento de identificar una falla es el método difuso IEC, pues ofrece una precisión mayor al 85% en los casos analizados, además fue el único método que permitió identificar dos fallas en un caso real, por lo cual se lo puede usar de preferencia ante casos donde se sospeche de fallas múltiples.
- Para el análisis en los casos especiales, se puede observar que la presentación gráfica de la variable de salida es una característica muy beneficiosa, ya que permite estimar la presencia de varias fallas con diferentes grados de importancia mediante la observación de las curvas correspondientes.
- Existen diferentes métodos a la hora de obtener el valor final del proceso de defusificación entre los cuales el más utilizado es el método del centroide. Sin embargo, en este documento se ha utilizado el método de la media del máximo ya que es el que mejores beneficios ofrece, pues devuelve al usuario un valor numérico con el cual se puede identificar rápidamente cual es la falla que tiene mayor relevancia.



## 5.2 RECOMENDACIONES

- Cuando se requiera la utilización de métodos basados en relaciones entre gases como Roger e IEC, el usuario debe tener mucho cuidado en el cálculo de estas relaciones, puesto que, debido a aproximaciones o redondeos, se puede tener una identificación errónea del tipo de falla.
- Conforme existan mejores técnicas de manejo e interpretación de datos, se deberá analizar la posibilidad de aplicarlas al diagnóstico de transformadores de potencia dada la importancia de estos equipos.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. E. SOLANO MARTINEZ , Mantenimiento de Transformadores de Potencia, Bucaramanga: Universidad de Santander, 2005.
- [2] J. NUÑEZ FORESTIERI, Guia para el Mantenimiento de Transformadores de Potencia, Guayaquil: Escuela Superior Politécnica del Litoral, 2004.
- [3] IEEE, IEEE Guide for acceptance and maintenance of insulating mineral oil in electrical equipment, New York: IEEE Std. C57.106-2015, 2015.
- [4] D. RANJAN PATRA y S. SAGAR BODA, Condition Assessment of High Voltage Power Transformer using Dissolved Gas Analysis, Odisha: National Institute of Technology, Rourkela, 2013.
- [5] IEEE, IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil-Immersed Transformers, New York : IEEE Std C57.104-2008, 2009.
- [6] S. SINGH y M. BANDYOPADHYAY, Dissolved Gas Analysis Technique for Incipient Fault Diagnosis in Power Transformers: A Bibliographic Survey, vol. 26, Kurukshetra, Haryana: National Institute of Technology, 2010.
- [7] J. ARAGÓN GÓMEZ, Experimental Investigations on the Dissolved Gas Analysis Method (DGA) through Simulation of Electrical and Thermal Faults in Transformer Oil, Essen: Universidad de Duisburg - Essen, 2014.
- [8] R. AFIQAH, I. MUSIRIN, D. JOHARI, M. OTHMAN, T. RAHMAN y Z. OTHMAN , Fuzzy Logic Application in DGA Methods to Classify Fault Type in Power Transformer, Shah Alam: University Technology MARA.
- [9] A. A. SULEIMAN , N. A. MUHAMAD y N. BASHIR, Introducing the Hybrid-DGA Interpretation Software as an Effective Power Transformer Management Tool, Istanbul, Turkey: 4th International Conference on Powering Engineering, Energy and Electrical Drivers, 2013.
- [10] J. T. SARRIA ARIAS, N. A. GUERRERO BELLO y E. RIVAS TRUJILLO, Estado del arte del análisis de gases disueltos en transformadores de potencia, vol. 23, Bogotá: Universidad Distrital "Francisco José de Caldas", 2014, p. 106.
- [11] SertinLab, «Informe de Resultados de Análisis de Cromatografías de Gases Disueltos en Aceite Aislante - Norma ASTM D-3612-A,» SertinLAB, Quito, 2014.
- [12] R. R. ROGERS, IEEE and IEC Codes to Interpret Incipient Faults in Transformers, using Gas in Oil Analysis, Guildford: C.E.G.B. Transmission Division, 1978.
- [13] L. A. ZADEH , Is There a Need for Fuzzy Logic ?, Berkeley, California: University of California, 1999.
- [14] I. PÉREZ y B. LEÓN, Lógica difusa para principiantes Teoría y Práctica, Caracas: Universidad Valle del Momboy, 2007.
- [15] T. P. TITUAÑA PILLAJO, Lógica Difusa y Extracción de Rasgos Topológicos para el Reconocimiento de Caracteres Manuscritos, Quito: Escuela Politécnica Nacional, 1997.
- [16] MATLAB, Ayuda de Matlab, 2015.

- [17] Q. SU, C. MI, P. AUSTIN y L. LAI, A Fuzzy Dissolved Gas Analysis Method for the Diagnosis of Multiple Incipient Faults in a Transformer, 2000.

## ANEXO 1

Tabla de parámetros para la construcción de las funciones de pertenencia para el método de Rogers.

Variable	Relación	Rango	Curva	Tipo	Puntos de Inflexión
Entradas	i	[-0.5 5]	Low	trapmf	[-0.5 -0.5 0 0.2]
			Med	trapmf	[0 0.2 0.9 1.1]
			Hi	trapmf	[0.9 1.1 2.9 3.1]
			Vhi	trapmf	[2.9 3.1 5 5]
	j	[0 3]	Low	trapmf	[0 0 0.5 1.5]
			Hi	trapmf	[0.5 1.5 3 3]
	k	[0 5]	Low	trapmf	[0 0 0.5 1.5]
			Med	trapmf	[0.5 1.5 2.5 3.5]
			Hi	trapmf	[2.5 3.5 5 5]
	l	[-0.5 5]	Low	trapmf	[-0.5 -0.5 0 0.2]
			Med	trapmf	[0 0.2 2.9 3.1]
			Hi	trapmf	[2.9 3.1 5 5]
Salidas	Tipo de Falla	[0 65]	TF_1	trimf	[0 5 10]
			TF_2	trimf	[5 10 15]
			TF_3	trimf	[10 15 20]
			OH_1	trimf	[15 20 25]
			OH_2	trimf	[20 25 30]
			OH_3	trimf	[25 30 35]
			ARC_1	trimf	[30 35 40]
			ARC_2	trimf	[35 40 45]
			ARC_3	trimf	[40 45 50]
			PD_1	trimf	[45 50 55]
			PD_2	trimf	[50 55 60]
			Normal	trimf	[55 60 65]

Conjunto de Reglas Difusas para el Método de Rogers según la información de la Tabla 1.9.

Falla	No	Reglas Difusas
TF_1	1	<b>SI</b> $i$ es $H_i$ AND $j$ es $Low$ AND $k$ es $Low$ AND $l$ es $Low$ <b>ENTONCES</b> Tipo de Falla es $TF_1$ , o
	2	<b>SI</b> $i$ es $V_{hi}$ AND $j$ es $Low$ AND $k$ es $Low$ AND $l$ es $Low$ <b>ENTONCES</b> Tipo de Falla es $TF_1$
TF_2	3	<b>SI</b> $i$ es $H_i$ AND $j$ es $H_i$ AND $k$ es $Low$ AND $l$ es $Low$ <b>ENTONCES</b> Tipo de Falla es $TF_2$ , o
	4	<b>SI</b> $i$ es $V_{hi}$ AND $j$ es $H_i$ AND $k$ es $Low$ AND $l$ es $Low$ <b>ENTONCES</b> Tipo de Falla es $TF_2$
TF_3	5	<b>SI</b> $i$ es $Med$ AND $j$ es $H_i$ AND $k$ es $Low$ AND $l$ es $Low$ <b>ENTONCES</b> Tipo de Falla es $TF_3$
OH_1	6	<b>SI</b> $i$ es $Med$ AND $j$ es $Low$ AND $k$ es $Med$ AND $l$ es $Low$ <b>ENTONCES</b> Tipo de Falla es $OH_1$
OH_2	7	<b>SI</b> $i$ es $H_i$ AND $j$ es $Low$ AND $k$ es $Med$ AND $l$ es $Low$ <b>ENTONCES</b> Tipo de Falla es $OH_2$
OH_3	8	<b>SI</b> $i$ es $H_i$ AND $j$ es $Low$ AND $k$ es $H_i$ AND $l$ es $Low$ <b>ENTONCES</b> Tipo de Falla es $OH_3$
ARC_1	9	<b>SI</b> $i$ es $Med$ AND $j$ es $Low$ AND $k$ es $Low$ AND $l$ es $Med$ <b>ENTONCES</b> Tipo de Falla es $ARC_1$
ARC_2	10	<b>SI</b> $i$ es $Med$ AND $j$ es $Low$ AND $k$ es $Med$ AND $l$ es $Med$ <b>ENTONCES</b> Tipo de Falla es $ARC_2$ , o
	11	<b>SI</b> $i$ es $Med$ AND $j$ es $Low$ AND $k$ es $H_i$ AND $l$ es $H_i$ <b>ENTONCES</b> Tipo de Falla es $ARC_2$ , o
	12	<b>SI</b> $i$ es $Med$ AND $j$ es $Low$ AND $k$ es $Med$ AND $l$ es $H_i$ <b>ENTONCES</b> Tipo de Falla es $ARC_2$ , o
	13	<b>SI</b> $i$ es $Med$ AND $j$ es $Low$ AND $k$ es $H_i$ AND $l$ es $Med$ <b>ENTONCES</b> Tipo de Falla es $ARC_2$
ARC_3	14	<b>SI</b> $i$ es $Med$ AND $j$ es $Low$ AND $k$ es $H_i$ AND $l$ es $H_i$ <b>ENTONCES</b> Tipo de Falla es $ARC_3$
PD_1	15	<b>SI</b> $i$ es $Low$ AND $j$ es $Low$ AND $k$ es $Low$ AND $l$ es $Low$ <b>ENTONCES</b> Tipo de Falla es $PD_1$
PD_2	16	<b>SI</b> $i$ es $Low$ AND $j$ es $Low$ AND $k$ es $Low$ AND $l$ es $Med$ <b>ENTONCES</b> Tipo de Falla es $PD_2$ , o
	17	<b>SI</b> $i$ es $Low$ AND $j$ es $Low$ AND $k$ es $Low$ AND $l$ es $H_i$ <b>ENTONCES</b> Tipo de Falla es $ARC_2$
Normal	18	<b>SI</b> $i$ es $Med$ AND $j$ es $Low$ AND $k$ es $Low$ AND $l$ es $Low$ <b>ENTONCES</b> Tipo de Falla es $Normal$

## ANEXO 2

Tabla de parámetros para la construcción de las funciones de pertenencia para el método de IEC.

Variable	Relación	Rango	Curva	Tipo	Puntos de Inflexión
Entradas	l	[-0.5 5]	Low	trapmf	[-0.5 -0.5 0 0.2]
			Med	trapmf	[0 0.2 2.9 3.1]
			Hi	trapmf	[2.9 3.1 5 5]
	i	[-0.5 3]	Low	trapmf	[-0.5 -0.5 0 0.2]
			Med	trapmf	[0 0.2 0.9 1.1]
			Hi	trapmf	[0.9 1.1 3 3]
	k	[0 5]	Low	trapmf	[0 0 0.5 1.5]
			Med	trapmf	[0.5 1.5 2.5 3.5]
			Hi	trapmf	[2.5 3.5 5 5]
Salidas	Tipo de Falla	[0.50]	TF_1	trimf	[0 5 10]
			TF_2	trimf	[5 10 15]
			OH_1	trimf	[10 15 20]
			OH_2	trimf	[15 20 25]
			ARC_1	trimf	[20 25 30]
			ARC_2	trimf	[25 30 35]
			PD_1	trimf	[30 35 40]
			PD_2	trimf	[35 40 45]
			Normal	trimf	[40 45 50]

Conjunto de Reglas Difusas para el Método IEC según la información de la Tabla 1.12.

Falla	No	Reglas Difusas
TF_1	1	<b>SI</b> l es Low AND i es Med AND k es Med <b>ENTONCES</b> Tipo de Falla es TF_1
TF_2	2	<b>SI</b> l es Low AND i es Hi AND k es Low <b>ENTONCES</b> Tipo de Falla es TF_2
OH_1	3	<b>SI</b> l es Low AND i es Hi AND k es Med <b>ENTONCES</b> Tipo de Falla es OH_1
OH_2	4	<b>SI</b> l es Low AND i es HI AND k es Hi <b>ENTONCES</b> Tipo de Falla es OH_2

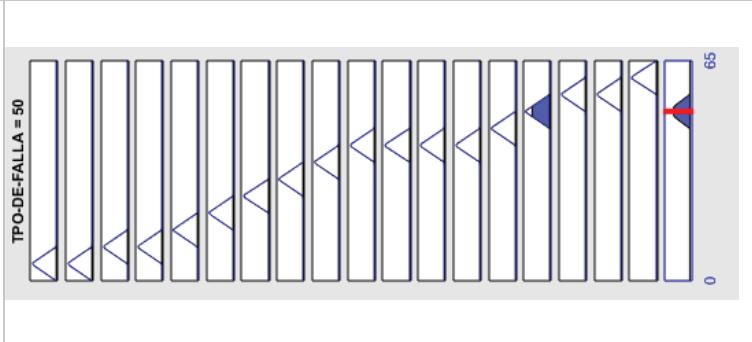
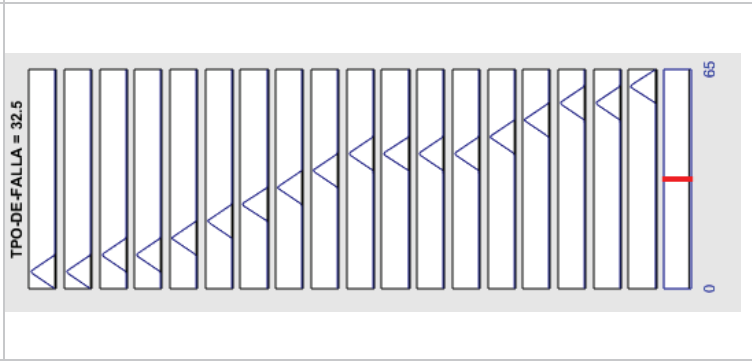
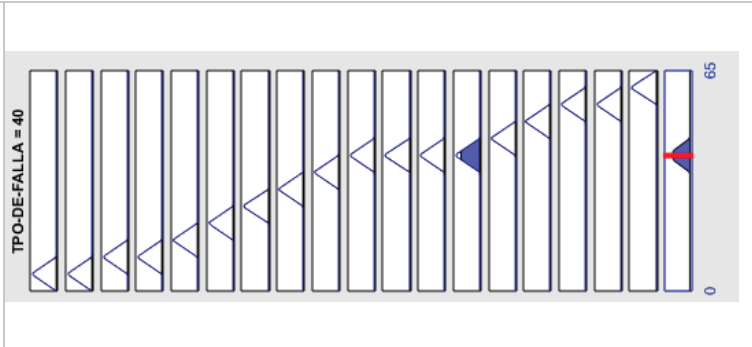
ARC_1	5	<b>SI</b> <i>l</i> es <i>Med</i> AND <i>i</i> es <i>Med</i> AND <i>k</i> es <i>Med</i> <b>ENTONCES</b> <i>Tipo de Falla</i> es <i>ARC_1</i> , o
	6	<b>SI</b> <i>l</i> es <i>Hi</i> AND <i>i</i> es <i>Med</i> AND <i>k</i> es <i>Med</i> <b>ENTONCES</b> <i>Tipo de Falla</i> es <i>ARC_1</i> , o
	7	<b>SI</b> <i>l</i> es <i>Med</i> AND <i>i</i> es <i>Med</i> AND <i>k</i> es <i>Hi</i> <b>ENTONCES</b> <i>Tipo de Falla</i> es <i>ARC_1</i> , o
	8	<b>SI</b> <i>l</i> es <i>Hi</i> AND <i>i</i> es <i>Med</i> AND <i>k</i> es <i>Hi</i> <b>ENTONCES</b> <i>Tipo de Falla</i> es <i>ARC_1</i>
ARC_2	9	<b>SI</b> <i>l</i> es <i>Med</i> AND <i>i</i> es <i>Med</i> AND <i>k</i> es <i>Hi</i> <b>ENTONCES</b> <i>Tipo de Falla</i> es <i>ARC_2</i>
PD_1	10	<b>SI</b> <i>l</i> es <i>Low</i> AND <i>i</i> es <i>Low</i> AND <i>k</i> es <i>Low</i> <b>ENTONCES</b> <i>Tipo de Falla</i> es <i>PD_1</i>
PD_2	11	<b>SI</b> <i>l</i> es <i>Med</i> AND <i>i</i> es <i>Med</i> AND <i>k</i> es <i>Low</i> <b>ENTONCES</b> <i>Tipo de Falla</i> es <i>PD_2</i>
Normal	12	<b>SI</b> <i>l</i> es <i>Low</i> AND <i>i</i> es <i>Med</i> AND <i>k</i> es <i>Low</i> <b>ENTONCES</b> <i>Tipo de Falla</i> es <i>Normal</i>

### ANEXO 3

Resultados del Análisis de Gases Mediante el Método Difuso de Rogers					
Muestra No 01	Muestra No 02	Muestra No 03	Muestra No 04	Muestra No 05	Muestra No 06
<p>TPO-DE-FALLA = 32.5</p>	<p>TPO-DE-FALLA = 35.1</p>	<p>TPO-DE-FALLA = 60.1</p>	<p>TPO-DE-FALLA = 32.5</p>	<p>TPO-DE-FALLA = 29.9</p>	<p>TPO-DE-FALLA = 40.3</p>

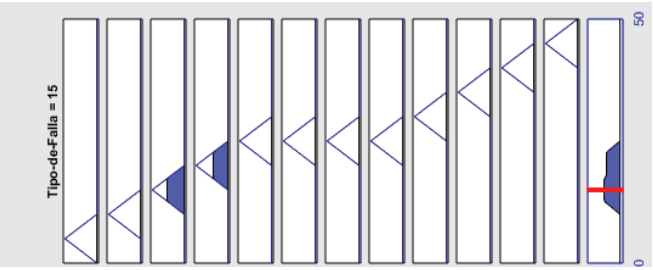
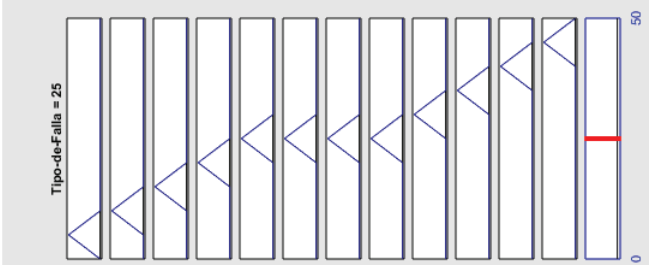
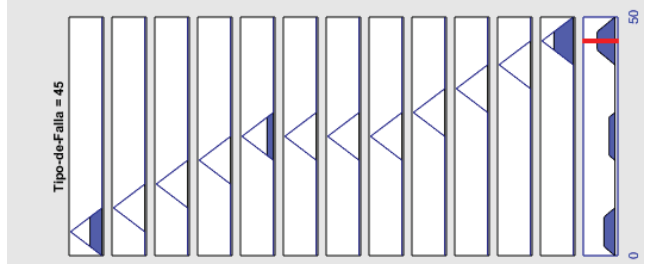
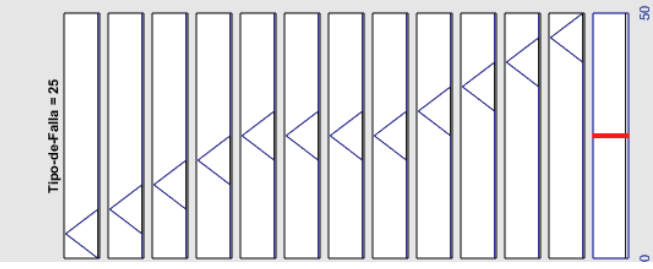
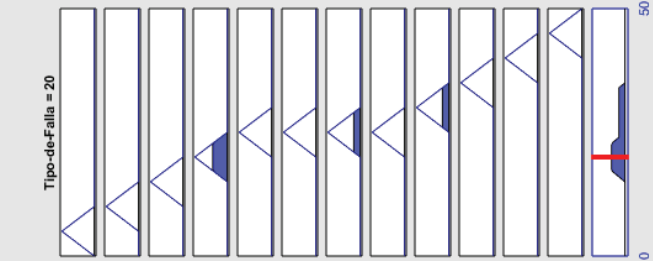
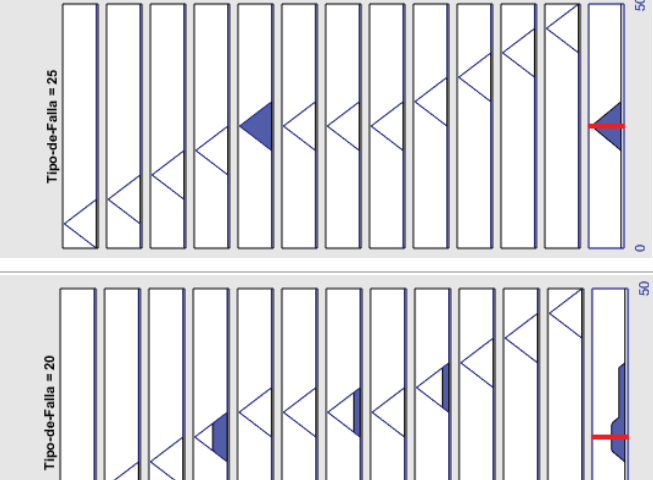


Resultados del Análisis de Gases Mediante el Método Difuso de Rogers					
<b>Muestra No 07</b>	<b>Muestra No 08</b>	<b>Muestra No 09</b>	<b>Muestra No 10</b>	<b>Muestra No 11</b>	<b>Muestra No 12</b>
<p>TPO-DE-FALLA = 30.2</p> <p>0 65</p>	<p>TPO-DE-FALLA = 50.1</p> <p>0 65</p>	<p>TPO-DE-FALLA = 40.3</p> <p>0 65</p>	<p>TPO-DE-FALLA = 30.2</p> <p>0 65</p>	<p>TPO-DE-FALLA = 60.1</p> <p>0 65</p>	<p>TPO-DE-FALLA = 40.3</p> <p>0 65</p>

Resultados del Análisis de Gases Mediante el Método Difuso de Rogers		
<p><b>Muestra No 13</b></p>  <p>TPO-DE-FALLA = 50</p>	<p><b>Muestra No 14</b></p>  <p>TPO-DE-FALLA = 32.5</p>	<p><b>Muestra No 15</b></p>  <p>TPO-DE-FALLA = 40</p>

# ANEXO 4

Resultados del Análisis de Gases Mediante el Método Difuso IEC

Muestra No 01	Muestra No 02	Muestra No 03	Muestra No 04	Muestra No 05	Muestra No 06
 <p>Tipo-de-Falla = 15</p>	 <p>Tipo-de-Falla = 25</p>	 <p>Tipo-de-Falla = 45</p>	 <p>Tipo-de-Falla = 25</p>	 <p>Tipo-de-Falla = 20</p>	 <p>Tipo-de-Falla = 25</p>

Resultados del Análisis de Gases Mediante el Método Difuso IEC

Muestra No 07	Muestra No 08	Muestra No 09	Muestra No 10	Muestra No 11	Muestra No 12
<p>Tipo-de-Falla = 20</p>	<p>Tipo-de-Falla = 35</p>	<p>Tipo-de-Falla = 27.5</p>	<p>Tipo-de-Falla = 20</p>	<p>Tipo-de-Falla = 45</p>	<p>Tipo-de-Falla = 27.5</p>

Resultados del Análisis de Gases Mediante el Método Difuso IEC		
Muestra No 13	Muestra No 14	Muestra No 15
<p>Tipo-de-Falla = 35</p> <p>0 50</p>	<p>Tipo-de-Falla = 15</p> <p>0 50</p>	<p>Tipo-de-Falla = 27.5</p> <p>0 50</p>

