

**UNIVERSIDAD RICARDO PALMA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE TITULACIÓN POR TESIS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**



**INFERENCIA DIFUSA PARA DIAGNOSTICAR CAUSAS DE
SOBRECALENTAMIENTO DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN EN
UN GENERADOR ELÉCTRICO**

**TESIS
PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO ELECTRÓNICO**

PRESENTADO POR:

**Bach. BRACO MOLINA, JOSÉ CARLOS
Bach. VELARDE GAMARRA, JULIO RICARDO**

ASESOR: Dr. Ing. HUAMANÍ NAVARRETE, PEDRO FREDDY

LIMA – PERÚ

2019

Dedicatoria

A mis padres y mis hermanos en especial a mi madre Gloria por el apoyo durante todo este tiempo. También en memoria de mi tía Margarita Aurora por la motivación incondicional que siempre me dio.

José Carlos Braco Molina

A mi Papa Efraín quien en vida me dio el mejor ejemplo de cómo salir adelante, a mi madre a quien le debo todo, a mi padre quien encontró la manera de enseñarme el tipo de huella que un hombre debe dejar, a mi Ale y Julito que hacen que cualquier esfuerzo valga la pena y a mis hermanos que el mejor respaldo que tengo.

Julio Ricardo Velarde Gamarra

Agradecimientos

A mi profesor y amigo Dr. Pedro Huamaní por su paciencia, por compartir su tiempo y transmitir su sabiduría hasta el final del camino.

A mi familia y amigos por su apoyo y comprensión por los momentos que no pude estar a su lado. En memoria de Akira y Aaliyah quienes siempre estuvieron conmigo en los más difíciles momentos.

José Carlos Braco Molina

A mi asesor Dr. Pedro Huamaní por su paciencia y apoyo, sobre todo por las ganas de compartir los conocimientos adquiridos.

A mis tíos Marco y Ronald que siempre me han dado su respaldo y toda mi familia y amigos, quienes me apoyaron tanto siempre.

Julio Ricardo Velarde Gamarra

ÍNDICE

RESUMEN	viii
ABSTRACT.....	ix
INTRODUCCIÓN	x
CAPÍTULO I - PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
1.1. Problema General.....	1
1.2. Problemas Específicos	1
1.3. Objetivo General	2
1.4. Objetivos Específicos.....	2
1.5. Estado del Arte	2
1.5.1. Ámbito Nacional	2
1.5.2. Ámbito Internacional.....	3
CAPÍTULO II - MARCO TEÓRICO.....	6
2.1. Inferencia Difusa.....	6
2.1.1. Modelo Difuso Mamdani	6
2.1.2. Inferencia TSK	7
2.2. Pruebas de detección de fuga	7
2.2.1. Prueba de presión para identificar fugas	8
2.2.2. Prueba de presencia de CO ₂	9
2.3. Software LabVIEW	10
2.3.1. Librería Fuzzy Logic	10
2.3.2. Librería VISA Driver	15
CAPÍTULO III – DESARROLLO DEL PROTOTIPO	22
3.1. Interfaz mecánica	22
3.1.1. Interfaz mecánica de conexión con el radiador	23
3.1.2. Soporte de sensores y cámara de lectura de presión y CO ₂	24
3.1.3. Bomba de presurización y vacío.....	26
3.2. Adquisición y Acondicionamiento de señales	26
3.2.1. Control de bomba de presurización	26
3.2.2. Sensor de presión.....	28
3.2.3. Sensor de CO ₂	31
3.2.4. Acondicionamiento de señales	33
3.2.5. Adquisición de señales con el microcontrolador	33

3.2.6. Programa en el software Labview	33
3.3. Algoritmo de Inferencia Difusa.	38
3.3.1. Variables de entrada y conjuntos difusos	38
3.3.2. Variables de salida y conjuntos difusos.....	39
3.3.3. Conjunto de reglas.....	41
CAPÍTULO IV – RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE CAMPO	43
4.1. Pruebas de calibración de sensores.	43
4.2. Prueba de control.....	44
4.3. Primera prueba de campo.....	47
4.4. Segunda prueba de campo.....	50
4.5. Tercera prueba de campo	53
CONCLUSIONES	56
RECOMENDACIONES.....	57
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58
ANEXO	59

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 01: El comprobador de presión.	8
Figura 02: Kit de prueba de gases.....	9
Figura 03: Ventana inicial.....	11
Figura 04: Bloque Load Fuzzy System (cargado de sistema difuso)... ¡Error! Marcador no definido.	
Figura 05: Bloque Load Fuzzy System.....	12
Figura 06: Bloque Fuzzy controller MIMO.....	13
Figura 07: Bloque FL Plot Variable.	14
Figura 08: Menú para la conexión del módulo Bluetooth.	15
Figura 09: Bloque Visa Configuration serial port	16
Figura 10: Ventana del administrador de dispositivos.....	16
Figura 11: Ventana de configuración del puerto bluetooth.	17
Figura 12: Bloque de función de escritura.....	19
Figura 13: Bloque de función de lectura.....	19
Figura 14: Bloque Flush I/O Buffer.....	20
Figura 15: Bloque Visa Close Function.....	21
Figura 16. Detalle de tapa del radiador.....	23
Figura 17: Tapa de presión con quick connect macho montado.....	23
Figura 18: Detalle del conector quick connect	24
Figura 19: Cámara de lectura de presión y CO2.....	25
Figura 20: Cámara de lectura de presión y CO2.....	25
Figura 21: Bomba de diafragma PML-8857-NF30.	26
Figura 22: Mosfet canal N para control de motor de la bomba.	27
Figura 23: Especificaciones mosfet Canal n.....	27
Figura 24: Circuito de Interfaz con el motor de la bomba.....	28
Figura 25: Datos del sensor de presión.....	29
Figura 26: Gráfica donde detalla las limitaciones de carga	30
Figura 27: Modulo sensor MG811.....	31
Figura 28: Distribución de pines del sensor.....	31
Figura 29: Gráfica de la respuesta del sensor.	32
Figura 30: Especificaciones técnicas	33
Figura 31: Diagrama de Bloques	34

Figura 32: Bloque de configuración Labview	35
Figura 33: Primer cuadro de la secuencia plana.	36
Figura 34: Cuadro de recepción y decodificación de datos	37
Figura 35: Cuadro de ejecución del algoritmo de inferencia difusa	38
Figura 36: Funciones de pertenencia de la variable “concentración de CO2”	39
Figura 37: Funciones de pertenencia de la variable “diferencia de presión”	39
Figura 38: Función de pertenencia de la variable INTERNA	40
Figura 39: Función de pertenencia de la variable EXTERNA	41
Figura 40: Test fuzzy system designer Labview	42
Figura 41: Test fuzzy system designer Labview	42
Figura 42: Panel HMI pestaña de medición de parámetros de la prueba de control	44
Figura 43: Panel HMI pestaña de procesamiento de datos de la prueba de control	45
Figura 44: Panel HMI pestaña de diagnóstico de la prueba de control	45
Figura 45: Función de pertenencia de la variable de salida INTERNO	46
Figura 46: Función de pertenencia de la variable de salida EXTERNO	46
Figura 47 Generador eléctrico EnerPower.....	47
Figura 48: Panel HMI pestaña de medición de parámetros de la primera prueba.....	48
Figura 49: Panel HMI pestaña de procesamiento de datos de la primera prueba.....	48
Figura 50: Panel HMI pestaña de diagnóstico de la primera prueba.	49
Figura 51: Función de pertenencia de la variable de salida INTERNA	49
Figura 53: Panel HMI pestaña de medición de parámetros de la segunda prueba	50
Figura 54: Panel HMI pestaña de procesamiento de datos de la segunda prueba.	51
Figura 55: Panel HMI pestaña de diagnóstico de la segunda prueba.	51
Figura 56: Función de pertenencia de la variable de salida INTERNA	52
Figura 57 Función de pertenencia de la variable de salida INTERNA.....	52
Figura 58: Panel HMI pestaña de medición de parámetros de la tercera prueba.....	53
Figura 59: Panel HMI pestaña de procesamiento de datos de la tercera prueba.....	54
Figura 60: Panel HMI pestaña de diagnóstico de la tercera prueba.....	54
Figura 61: Función de pertenencia de la variable de salida INTERNA	55
Figura 62: función de pertenencia de la variable de salida ETERNA	55

RESUMEN

La Marina de Guerra del Perú cuenta con un generador eléctrico de 175 KVA con problemas de sobrecalentamiento y no puede ser usado de manera continua, debido a tal problema este proyecto de tesis tuvo como objetivo principal aplicar la inferencia difusa a un prototipo de diagnóstico de las causas de sobrecalentamiento del sistema de refrigeración de un generador eléctrico de motor diesel. Pues, la principal causa de sobrecalentamiento en un sistema de refrigeración es la existencia de fugas. Al ser un sistema presurizado, la existencia de una fuga en el sistema compromete la eficiencia de la refrigeración, debido a que el líquido presurizado tiene una temperatura de ebullición más alta; además, una fuga permite la disminución de la presión, por lo cual el líquido puede llegar a su punto de ebullición, evaporarse y perder su función refrigerante lo cual es nocivo para el correcto funcionamiento del motor. Por tal razón, la implementación del algoritmo de inferencia difusa se implementó utilizando la librería FUZZY LOGIC del software Labview, basado en el método de Mandani con 2 entradas: DIF DE PRESIÓN y CO₂, 2 salidas: INTERNA y EXTERNA y un total de 49 reglas con el operador AND. Por lo cual, se recurrió al diseño de un prototipo eléctrico y mecánico para la adquisición de las señales de entrada, utilizando una tarjeta de desarrollo basado en un microcontrolador ARM, un sensor de presión y un sensor que mide la concentración de CO₂. De esta manera, al realizar las pruebas finales, se alcanzó encontrar la causa del sobrecalentamiento en un generador de la marina de guerra del Perú, del 100 % de las pruebas realizadas solo el 2% entregaron resultados errados.

PALABRAS CLAVES: Inferencia Difusa, Sistema De Refrigeración, Prueba De Presión, Prueba De Gases, Diagnóstico, Motores Diesel, Fugas.

ABSTRACT

The Peruvian Navy has a 175 KVA electric generator with overheating problems and cannot be used continuously, due to this problem this thesis project had as main objective to apply diffuse inference to a diagnostic prototype of the Causes of overheating of the cooling system of a diesel engine electric generator. The main cause of overheating in a cooling system is the existence of leaks. Being a pressurized system, the existence of a leak in the system compromises the cooling efficiency, because the pressurized liquid has a higher boiling temperature; In addition, a leak allows the pressure to decrease, whereby the liquid can reach its boiling point, evaporate and lose its cooling function, which is harmful for the proper functioning of the engine. For this reason, the implementation of the fuzzy inference algorithm was implemented using the FUZZY LOGIC library of the Labview software, based on the Mandani method with 2 inputs: PRESSURE DIFFERENCE and CO₂, 2 outputs: INTERNAL and EXTERNAL and a total of 49 rules with the AND operator. Therefore, the design of an electrical and mechanical prototype was used to acquire the input signals, using a development board based on an ARM microcontroller, a pressure sensor and a sensor that measures the CO₂ concentration. In this way, when performing the final tests, it was possible to find the cause of the overheating in a generator of the Peruvian Navy, 100% of the tests performed only 2% delivered erroneous results.

KEYWORDS: Fuzzy Inference, Refrigeration System, Pressure Test, Gas Test, Diagnosis, Diesel Engines, Leaks.

INTRODUCCIÓN

La presente tesis se desarrolló como respuesta a un problema presente en el sistema de energía de emergencia de la Marina de Guerra del Perú, y por ello se eligió la aplicación de la inferencia difusa para diagnosticar las causas del sobrecalentamiento del motor de un generador eléctrico, dar un mantenimiento correctivo acortando el tiempo de diagnóstico de posibles causas de falla, y visualizarlas en un ordenador portátil usando el software Labview y un enlace Bluetooth para la adquisición de datos. A continuación, una breve reseña de los cuatro capítulos que forman parte de la investigación.

En el capítulo I se describe el planteamiento del problema, en donde se explica en mayor profundidad las dificultades por las que el personal técnico tiene que pasar para lograr un diagnóstico acertado; así mismo, en este capítulo se detallan los objetivos trazados para este proyecto y además se detalla también una breve reseña en el estado del arte e investigaciones previas relacionadas al tema realizadas por otras fuentes.

En el capítulo II se detalla el marco teórico, que incluye información de la base teórica de algoritmos de inferencia difusa, fuzificación y defuzificación, el modelo Mamdani, establecimiento de reglas, además de información sobre la base de la realización de las pruebas de diagnóstico manuales. Información sobre el software Labview, las librerías que se usaron y una breve explicación de los bloques que se emplearon con el detalle de sus entradas y salidas.

Para el capítulo III, se describe el desarrollo del prototipo, se explica en detalle el diagrama de bloques, y el diseño de la interfaz mecánica que incluye el diseño de la modificación de una tapa de presión para la conexión con el radiador del sistema de refrigeración. Así como también, el diseño de la cámara de soporte de sensores y el motor de presurización y su control, además de todos los cálculos necesarios para la adquisición de señales con el microcontrolador de los sensores de presión y CO₂. Adicionalmente, la programación del microcontrolador, el desarrollo del programa del software Labview y el algoritmo de inferencia difusa con todas sus entradas, salidas y sus conjuntos de pertenencia.

Los resultados y pruebas se detallan en el capítulo IV donde se muestran las condiciones del sistema de refrigeración para el desarrollo de las pruebas, las pruebas de calibración de los sensores, las pruebas de control que entrega un punto de referencia para las pruebas de campo. En estas pruebas se muestran las capturas de pantalla de las tomas de datos y los resultados obtenidos en cada prueba, además de la comparación de los resultados obtenidos en la salida del controlador difuso implementado, y la verificación gráfica, la cual se repitió para las 3 pruebas de campo.

Al finalizar el proyecto, con la interpretación de los datos obtenidos de las conclusiones de la investigación, se verificó que el algoritmo de inferencia difusa es perfectamente aplicable a este tipo de aplicaciones donde se implementa un sistema de diagnóstico.

CAPÍTULO I - PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la actualidad La Marina de Guerra del Perú cuenta con generadores eléctricos que se usan para equipos de comunicaciones, y es necesario tenerlos operativos al 100 % tanto el principal como el de respaldo.

Las fallas más comunes que se han presentado en este generador eléctrico es el sobrecalentamiento del motor de combustión interna; por ello, la identificación de las posibles causas de este sobrecalentamiento requiere de una inspección visual de las partes, un proceso lento y complicado que algunas veces implica el desarmado de alguna de estas partes.

El sobrecalentamiento del motor es una de las principales causas de fallas críticas de un motor de combustión, el exceso de temperatura podría ocasionar rajaduras en el bloque de las válvulas del motor, el ingreso de agua a la cámara de combustión disminuye el poder de lubricación del aceite evitando que se genere la lubricación adecuada, y generando fricción y calor en el cilindro de combustión. Esto puede dejar permanentemente inoperativo al motor; por ello, todas estas fallas implican tiempo y altos costos de reparación.

Los centros de servicio de mantenimiento y reparación de motores mantienen personal que realiza los diagnósticos de las fallas y sus posibles causas basados en la experiencia y ensayo-error, existiendo así una gran ventana donde se requiere herramientas especializadas para realizar pruebas y efectuar diagnósticos más precisos de las posibles causas de fallas.

1.1. Problema General

¿Cómo se aplicará el algoritmo de inferencia difusa para diagnosticar las causas de sobrecalentamiento del sistema de refrigeración en un generador eléctrico?

1.2. Problemas Específicos

- a) ¿Cómo se diseñará un prototipo mecánico para facilitar las mediciones y el acondicionamiento de señales para los sensores?
- b) ¿Cómo se realizarán las mediciones de los parámetros ideales de funcionamiento del sistema de refrigeración del generador eléctrico para lograr establecer correctamente las reglas difusas?

- c) ¿Cómo se implementará en un ordenador portátil el enlace Bluetooth para la adquisición de datos, el algoritmo de inferencia difusa de diagnóstico y la interfase de usuario?

1.3. Objetivo General

Aplicar algoritmo de inferencia difusa para diagnosticar las causas de sobrecalentamiento del sistema de refrigeración en un generador eléctrico.

1.4. Objetivos Específicos

- a) Diseñar un prototipo mecánico para facilitar las mediciones y acondicionamiento de señales de los sensores.
- b) Medir los parámetros ideales de funcionamiento del sistema de refrigeración del generador eléctrico para establecer las reglas del algoritmo de inferencia difusa.
- c) Implementar el algoritmo de inferencia difusa de diagnóstico y una interfase de usuario en un ordenador portátil, utilizando el software Labview y un enlace Bluetooth para la adquisición de datos.

1.5. Estado del Arte

1.5.1. Ámbito Nacional

Ruiz de Somocurcio, A. investigó sobre cómo usar la lógica difusa para la toma de decisiones para el control automático del tráfico vehicular, concluye que:

- En caso de usar un microcontrolador en lugar de un ordenador para el procesamiento del algoritmo de inferencia difusa, se incurre en un error de al menos 1.5 %, por lo que se puede considerar que para algunos casos es factible un microcontrolador para realizar el procesamiento del algoritmo de inferencia difusa. (p.56)
- El desarrollo del GUI en base al toolkit fuzzy del software Matlab, y el algoritmo implementado en el microcontrolador, difieren en que en el caso del microcontrolador no posee una unidad de operaciones en punto flotante y es por este detalle que se presenta un error en cálculo con respecto al software Matlab. (p.64)

Rivera, E. diseñó un prototipo de supervisión y control de pintado usando el algoritmo de inferencia difusa, y mediante el software Labview conectado a una cámara hizo capturas de color, concluye que:

- Considerar un ambiente adecuado, y cuidar de factores externos a la medición mejoran considerablemente los resultados, comprobó además que la lógica difusa, si bien es un método práctico y muy flexible, proporciona resultados que presentan ciertas limitaciones. Los resultados para este tipo de aplicación fueron poco precisos con un tipo en particular de medición, por lo que es necesario realizar un set de reglas lo más acorde posible a la aplicación. (p.83) [...]
- El hardware de adquisición que se emplee tendrá un impacto directo en el desarrollo, se debe considerar las características necesarias para suplir las demandas del algoritmo y lograr un resultado favorable. (p.83) [...]
- En resumen, la supervisión del proceso se realizó de manera eficaz, el análisis de los datos, con ayuda del algoritmo de lógica difusa, que permitió la rectificación de los posibles errores al realizar la combinación de colores de las tintas, todo lo realizado permitió reducir la utilización de materiales y equipos permitiendo la reducción de tiempos y costos de producción. (p.84)

1.5.2. Ámbito Internacional

Sánchez, T. pretendió demostrar las bondades de la lógica difusa como herramienta de apoyo a la medicina, en sus conclusiones más importantes manifiesta que:

- El prototipo fue desarrollado en función del paciente y cuenta con descripciones de todos los términos médicos que podrían generar dudas en la comprensión del diagnóstico. (p.144) [...]
- Para la construcción del prototipo se utilizó el lenguaje PHP, JAVASCRIPT, HTML. (p.144) [...]
- De las pruebas obtenidas se logró emular al experto humano con una confiabilidad del 92.1%. (p.144) [...]

Jiménez, I. diseñó y construyó un sistema para controlar la temperatura de un horno eléctrico para cocción de piezas cerámicas mediante control difuso de tipo Mamdani, manifiesta en sus conclusiones más importantes que:

- Por la complejidad del sistema, los factores externos que son difíciles de modelar y el tiempo que se hubiera invertido en tratar de realizar el modelo de todo el sistema, parece haber sido lo más adecuado para resolver el problema utilizando un controlador difuso directo sin optimización tipo proporcional derivativo. (p.75) [...]
- Los controladores difusos pueden adaptarse con facilidad relativa a sistemas que posean por su naturaleza una dinámica especial de comportamiento, por lo tanto, presentan condiciones muy variables en cuanto a los puntos de operación. Sin embargo, en los controladores difusos es difícil asegurar su estabilidad siendo ésta una de sus principales desventajas. (p.75) [...]
- El controlador difuso proporcionó resultados satisfactorios y cumplió con las trayectorias de temperatura establecidas por los usuarios, mostrando un buen desempeño. Su realización fue sencilla gracias a la herramienta de lógica difusa de Labview 8.5, lo complicado fue la calibración, debido a que se tenía que probar en el sistema real y las pruebas tardaban como mínimo 6 horas. (p.75) [...]

Jiménez, R. diseñó un controlador lógico difuso aplicado al control de posición de un servomotor de C.D., usando un algoritmo genético, manifiesta en sus conclusiones más importantes que:

- En base a los resultados obtenidos, se puede concluir que el método de optimización, para obtener la base de las reglas del controlador difuso es satisfactorio, teniendo en cuenta que se usó un algoritmo genético simple de aplicación general. (p. 57) [...]
- Una desventaja de este método para el diseño de controladores difusos es el tiempo de proceso, debido a que cada uno de los controladores que son evaluados, requiere de un tiempo de simulación. (p. 57) [...]

Navas, R. diseñó y aplicó controladores neuro-difusos integrados en modo mixto de alta complejidad, manifiesta en sus conclusiones más importantes que:

- Partiendo de conceptos como los de regla activa y la propiedad de descomposición de los sistemas difusos, se propone una nueva arquitectura para la realización de circuitos integrados en modo mixto de controladores neuro-difusos, que permite incrementar considerablemente la complejidad (estimada en términos de número de entradas y número de reglas) abordable con técnicas puramente analógicas, manteniendo las principales ventajas de estas implementaciones (paralelismo computacional, compacidad y óptima eficiencia en la razón velocidad/consumo de potencia) (p. 290).
- Se discute la capacidad de aproximación de los controladores realizados siguiendo la arquitectura propuesta, que trabajan sobre particiones en rejilla del universo de discurso, las más empleadas en las realizaciones monolíticas y en aplicaciones de control (p. 290).

CAPÍTULO II - MARCO TEÓRICO

El concepto de Lógica Difusa fue creado por Lofti A. Zadeh, catedrático de la Universidad de Berkeley (California). En su propuesta, la lógica difusa fue presentada como una forma de procesamiento de información en la que los datos podrían tener asociados un grado de pertenencia parcial a conjuntos. Fue a mediados de los 70 cuando esta teoría se aplicó a los sistemas de control (cuando los pequeños ordenadores empotrados tuvieron suficiente potencia como para permitir su ejecución). Desde entonces, ha aumentado el número de aplicaciones industriales y su utilización en productos de consumo.

En la inferencia difusa se presenta una fundamentación en la teoría de conjuntos difusos, para la cual el grado de pertenencia a un conjunto difuso puede tomar un valor en el intervalo real de $[0,1]$. La lógica formal por su parte, requiere de marcos rígidos y claramente establecidos para hacer formulaciones o propuestas a problemáticas cotidianas.

2.1. Inferencia Difusa

La inferencia difusa puede definirse como el proceso de obtener un valor de salida para un valor de entrada empleando la teoría de conjuntos difusos. A continuación, veremos dos tipos de inferencia: el modelo de Mamdani y el de TSK (Takagi, Sugeno y Kang)

2.1.1. Modelo Difuso Mamdani

El método de Mamdani fue propuesto en 1975 y es posible el más usado en aplicaciones gracias a su estructura muy simple de operaciones “mín.-máx.” (ver figura 01), el proceso se realiza en cuatro pasos:

- a) Fuzificación de las variables de entrada: El primer paso consiste en tomar los valores crisp de las entradas (financiación-del-proyecto y plantilla-del-proyecto), y determinar el grado de pertenencia de estas entradas a los conjuntos difusos asociados.

- b) Evaluación de las reglas: Tomamos las entradas anteriores y se aplican a los antecedentes de las reglas difusas. Si una regla tiene múltiples antecedentes, se utiliza el operador AND u OR para obtener un único número que represente el resultado de la evaluación. Este número (el valor de verdad) se aplica al consecuente.
- c) Agregación de las salidas de las reglas: La agregación es el proceso de unificación de las salidas de todas las reglas; es decir, se combinan las funciones de pertenencia de todos los consecuentes previamente recortados o escalados, combinando para obtener un único conjunto difuso por cada variable de salida.
- d) Defuzificación: El resultado final habitualmente es necesario expresarlo mediante un valor crisp (de mayor exactitud). En esta etapa se toma como entrada el conjunto difuso anteriormente obtenido para dar un valor de salida. Existen varios métodos de defuzificación, pero probablemente el más ampliamente usado es el centroide; que calcula el punto donde una línea vertical divide el conjunto en dos áreas con igual masa.

2.1.2. Inferencia TSK

Este tipo de método proporciona mayor eficiencia, pero no presentan un marco tan natural para la representación del conocimiento humano. Un tipo habitual de representación del consecuente es un singleton (punta discreta), que toma valor de uno en un punto del universo del discurso y cero en cualquier otro punto.

En general, el método de Mamdani se utiliza más ampliamente porque apareció antes, y porque se presta más a la representación de conocimiento experto. Además, nos permite describir el conocimiento experto de una forma intuitiva. El principal inconveniente es su alto coste computacional, por lo que para aplicaciones de control y problemas de optimización se emplea más frecuentemente el método de inferencia TSK.

2.2. Pruebas de detección de fuga

2.2.1. Prueba de presión para identificar fugas

La prueba de presión del sistema de enfriamiento es un proceso para determinar donde se encuentra la fuga. Esta prueba se realiza después de que el sistema de enfriamiento se haya enfriado lo suficiente para que sea posible retirar la tapa de presión de manera segura. Cuando el sistema de enfriamiento está completamente lleno de refrigerante, mediante un aparato analógico que sirve para medir presión el cual llamaremos “el comprobador de presión” (figura 01), el comprobador de presión es colocado en lugar de la tapa del radiador. Este bombeará aire para generar presión en el sistema, este mismo nos indicará la cantidad de presión que está siendo bombeada mediante su indicador analógico. La presión que se bombeará debe ser igual a la presión indicada en la tapa del radiador o según las recomendaciones del fabricante.



Figura 01: El comprobador de presión.
Fuente: <https://mgaguru.com/mgtech/tools/ts128.htm>

En la figura 01 se muestra el bombín manual con el indicador de presión y el adaptador, el cual es necesario para poder acoplarlo con el cuello del radiador en lugar de la tapa de presión.

Una vez que la presión ha sido aplicada, se puede empezar a buscar las fugas, se debe también verificar el indicador y corroborar la existencia de pérdidas de presión. Si la presión disminuye más de 2.5 PSI en dos minutos es muy probable que haya una fuga escondida en algún lugar, no siempre es fácil localizar el lugar de la fuga.

Para el desarrollo de este proyecto de tesis reemplazamos el indicador de presión por un sensor, y el actuador manual con un motor de 24 V con un pistón que inyecta aire al sistema de enfriamiento hasta llegar a la presión deseada, en este caso fue de 18 PSI.

2.2.2. Prueba de presencia de CO₂

Si hay pérdida del líquido refrigerante en el sistema de enfriamiento, pero no existen señales de fugas externas, podría existir un problema con la empaquetadura del cabezal de válvulas, la mejor manera de comprobar este problema en una prueba de fuga de combustión en el radiador. Esto se logra usando un “block tester”. Este es un kit que realiza una prueba química a los vapores del radiador. Esta prueba detecta con un reactivo la presencia de CO₂ dentro del sistema de enfriamiento. Las causas más comunes para la presencia de gases de combustión es el radiador, que es una falla en la empaquetadura del bloque de válvulas. Para reemplazar esta empaquetadura es necesario desensamblar el motor lo cual puede llegar a ser considerablemente caro, otra de las causas de la presencia de gases de combustión es la rajadura del bloque de válvulas, una falla aún más complicada de resolver ya que puede darse también el caso de la deformación del bloque de válvulas, debido al calor excesivo generado por la falla del sistema de refrigeración.



Figura 02: Kit de prueba de gases.

Fuente: <https://www.eurocarparts.com/p/sealey-vs0061-combustion-leak-detector-SEAVS0061>

En la figura 02 se aprecia el kit de prueba de gases, el cual consta de un contenedor conectado a un dispositivo que succiona aire del sistema de enfriamiento, antes de realizar la prueba el reactivo debe ser colocado dentro del contenedor. A la presencia de gases de combustión este reactivo cambia su coloración.

En reemplazo de este dispositivo se utilizó un sensor de gases que entrega un valor analógico directamente proporcional a la concentración de CO₂ medido, y el mismo motor utilizado para generar presión se usa para generar vacío, de esta manera se extrajo aire del sistema para que el sensor pueda medir a concentración de gases de combustión.

2.3. Software LabVIEW

2.3.1. Librería Fuzzy Logic

El software Labview cuenta con librerías predefinidas para el uso de la lógica difusa, dicha librería se puede usar de dos maneras. La primera es usar bloques independientes para crear los conjuntos difusos, variables de entrada y salida, y el conjunto de reglas del controlador difuso. La segunda opción es usar el diseñador de sistemas difusos, donde se pueden definir fácilmente las variables de entrada y salida y el conjunto de reglas, luego esta configuración se almacena en un archivo que puede ser cargado en el programa al momento de realizar el procesamiento de los datos. En este caso se usó el diseñador de sistemas difusos, en la figura 03 se muestra la ventana inicial del diseñador.

Una vez se tenga definido el rango de las variables y las variables lingüísticas con sus respectivos rangos de pertenencia, estos pueden ser ingresados al fuzzy system designer. Para este estudio en particular se establecieron dos variables de entrada y dos variables de salida [Anexo 01], cada uno con siete funciones de pertenencia.

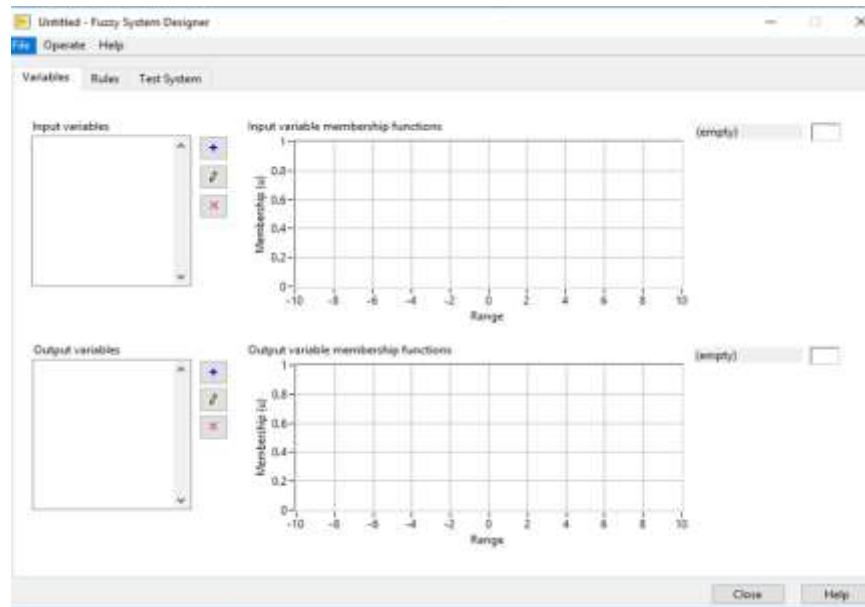


Figura 03: Ventana inicial del diseñador de sistemas difusos.
Fuente: Documentación de ayuda del Software LabVIEW.

En la figura 04, el sistema difuso generado con el diseñador de sistemas difusos, que cuenta con 2 variables de entrada y 2 de salida con sus respectivas funciones de pertenencia.

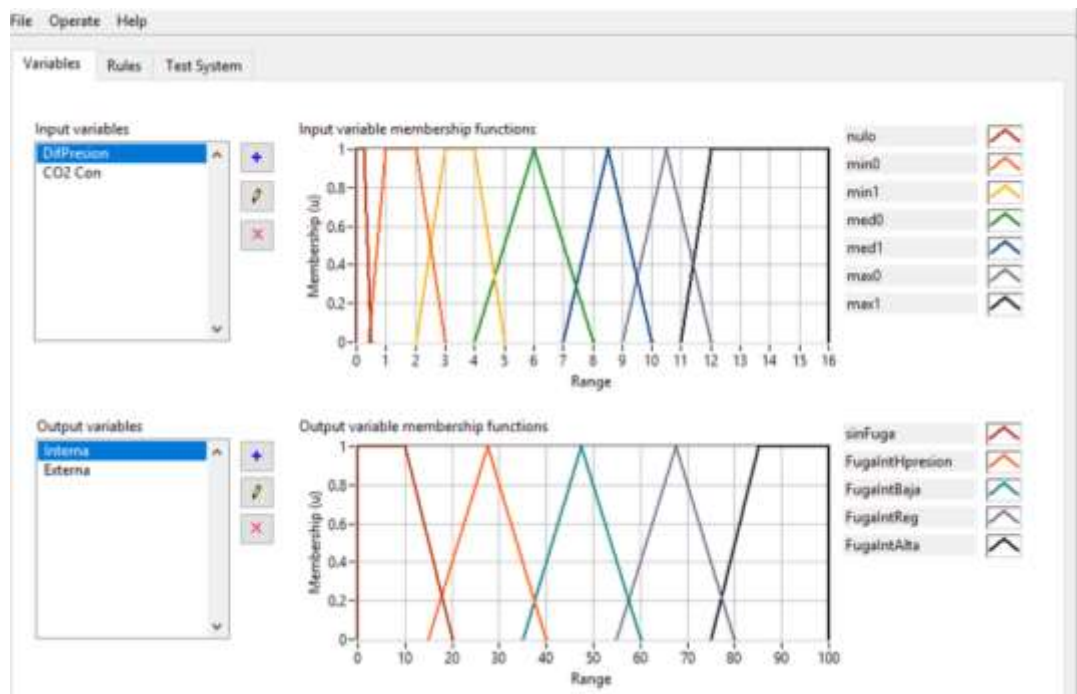


Figura 04: Variables de entrada y salida en el diseñador de sistemas difusos
Fuente: Elaboración Propia.

Bloque Load Fuzzy System (cargado de sistema difuso):

Como se muestra en la figura 04, el bloque cuenta con 2 entradas y 2 salidas, este bloque permite cargar un archivo preconfigurado en la ventana de diseño de sistemas difusos, donde se encuentra toda la información de las variables de entrada y salida, además de las reglas. La función de sus entradas y salidas se detalla a continuación:

- Entrada File path: donde se coloca el directorio de ubicación del archivo a cargar.
- Entrada Error in (no error): entrada de error previo, aquí al ser un bloque inicial de configuración se le coloca una constante de “no error” de tipo cluster, donde un cluster viene a ser un conjunto de tipos de datos diferente.
- Salida Fuzzy system out (Sistema difuso de salida): esta salida entrega la configuración de variables y sus respectivos conjuntos difusos, además del conjunto de reglas leídas del archivo preconfigurado que se encuentra en el directorio previsto.
- Salida Error Out (error de salida) esta salida entrega un código de error si existe un error en el bloque al momento de leer el archivo.

A continuación, la figura 5 muestra el Bloque Load Fuzzy System del software Labview y utilizado para cargar el archivo preconfigurado.

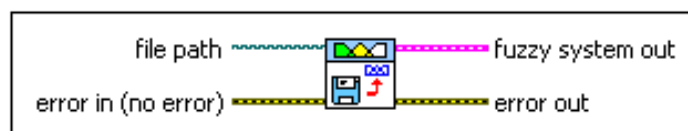


Figura 05: Bloque Load Fuzzy System
Fuente: Documentación de ayuda del Software LabVIEW.

Bloque Fuzzy controller MIMO (Controlador Difuso):

En la figura 06 se muestra el bloque donde se procesa la información del archivo cargado por el bloque anterior mostrado en la figura 05. En este bloque (figura 06) también se pueden ingresar los valores de las variables de entrada, y entregará los valores de salida y los pesos de las reglas. Asimismo, se debe especificar el tipo de controlador, en este caso fue MIMO (por sus siglas en inglés Multiple Input Multiple Output) para que se habiliten múltiples entradas y

múltiples salidas. Para poder usar los bloques de la librería Fuzzy Logic, es necesario primero configurar un sistema difuso con sus conjuntos. En este caso se hizo mediante el diseñador, se cargó el archivo con el bloque anterior (figura 05). Las entradas y salidas necesarias para el uso de este bloque (figura 06) se muestra a continuación:

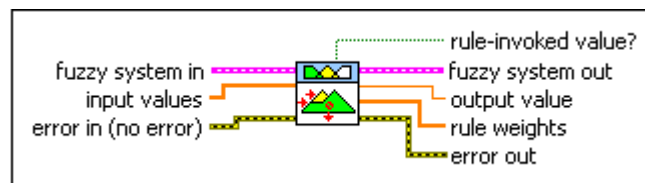


Figura 06: Bloque Fuzzy controller MIMO
Fuente: Documentación de ayuda del Software LabVIEW.

- Entrada Fuzzy System In (Sistema difuso de entrada) especifica la información completa de un sistema difuso, en este caso el sistema difuso que se lee del archivo por el bloque de carga de sistema difuso.
- Entrada Input Values (Valores de entrada) son los datos que tomaron las variables de entrada; es decir, los valores numéricos que fueron procesados por este bloque para la Fuzificación.
- Entrada Error in (no error) entrada de error previo, aquí esta entrada se conecta a la salida de error del bloque inmediato anterior.
- Salida Rule-invoked value (Valor de regla invocada), entrega un valor booleano, verdadero cuando el valor de la o las entradas invocan una de las reglas del sistema difuso.
- Salida Fuzzy system out (Sistema difuso de salida): esta salida entrega la configuración de variables y sus respectivos conjuntos difusos, además del conjunto de reglas leídas del archivo preconfigurado que se encuentra en el directorio previsto para que los bloques conectados a continuación, tengan acceso a los datos del sistema difuso.
- Output Values (Valores de salida) entrega los valores de las variables de salida del sistema difuso luego de la defuzificación, esto luego de recibir los valores de entrada.
- Salida Rule Weights (Pesos de reglas) retorna los pesos de las reglas que el controlador difuso usa para escalar las funciones de pertenencia de las

variables lingüísticas de salida, el método de la implicación específica como el controlador difuso realiza este escalamiento.

- Salida Error Out (error de salida) esta salida entrega un código de error si existe un error en el bloque o antes de este.

Bloque FL Plot Variable (Graficar Variable)

El bloque de la figura 07 muestra la interfaz de usuario de los conjuntos difusos de las variables de entrada y salida.

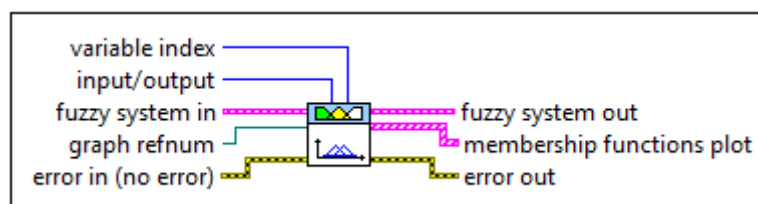


Figura 07: Bloque FL Plot Variable.

Fuente: Documentación de ayuda del Software LabVIEW.

- Entrada Variable Index (Indicador de Variable) para este bloque se indexan las variables existentes empezando de cero correspondiendo al orden en el que se crearon las variables lingüísticas, con esta entrada se especifica el indicador de la variable que se quiere graficar. El valor cero para la primera variable creada, uno para la segunda y así sucesivamente.
- Entrada Input/Output (Salida entrada) con esta entrada se especifica si la variable que se quiere graficar es una entrada o una salida. “cero” para entrada y “uno” para Salida
- Entrada Fuzzy System In (Sistema difuso de entrada) especifica la información completa de un sistema difuso, en este caso el sistema difuso que se lee del archivo por el bloque de carga de sistema difuso.
- Entrada Graph Refnum (Número de referencia de gráfico) es una entrada opcional que permite enumerar cada gráfico para identificar cada variable.
- Entrada Error in (no error): entrada de error previo, aquí esta entrada se conecta a la salida de error del bloque inmediato anterior.
- Salida Fuzzy system out (Sistema difuso de salida): esta salida entrega la configuración de variables y sus respectivos conjuntos difusos, además del

conjunto de reglas leídas del archivo preconfigurado que se encuentra en el directorio previsto, para que los bloques conectados a continuación tengan acceso a los datos del sistema difuso.

- Salida Membership functions plot (gráfica de funciones de pertenencia) salida del arreglo de datos que serán graficados por el bloque XY Graph.

2.3.2. Librería VISA Driver

Esta librería se encuentra en el software Labview, el cual nos permitió utilizar los puertos disponibles de comunicación del ordenador que tenga instalado. Se instaló como un paquete aparte porque se deben instalar los controladores necesarios para el uso de los puertos. El puerto de nuestro interés fue el puerto serial que utiliza el equipo para dispositivos Bluetooth. Es por lo que se usan los bloques de comunicación de la librería VISA Serial.

- Se debe primero lograr la conexión entre los dispositivos a través del menú de configuración de dispositivos Bluetooth del ordenador, tal como se muestra en la figura 08.

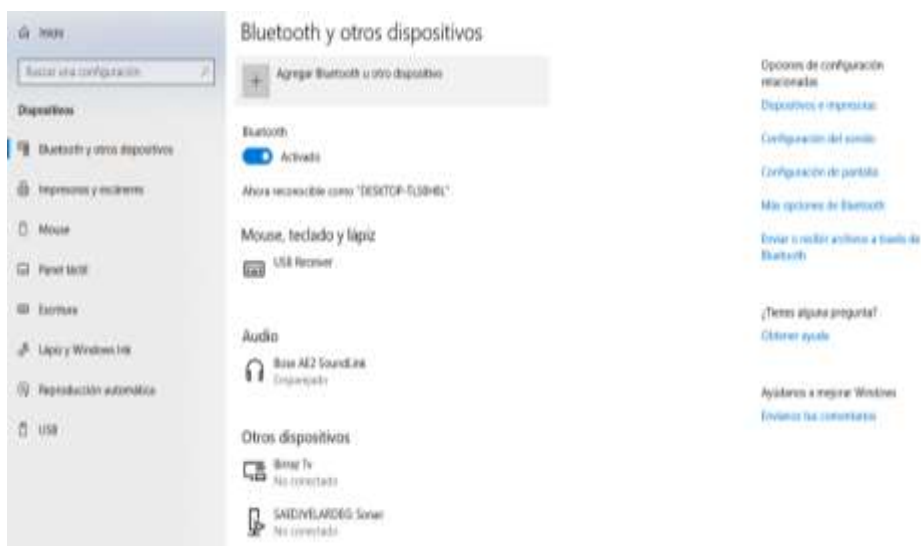


Figura 08: Menú para la conexión del módulo Bluetooth.
Fuente: Elaboración Propia.

- Bloque Visa Configuration serial port (Configuración de puerto serial)
La Figura 09 es el bloque que permitió realizar el enlace serial entre el ordenador y microcontrolador para la adquisición de señales. Una vez realizada

la conexión del módulo Bluetooth al ordenador, se habilita un puerto serial COM5 que se puede verificar con el número asignado por el administrador de dispositivos en el ordenador, tal como se muestra en la figura 10. Una vez ubicado el puerto se debe ver su configuración para poder configurar de la misma manera este bloque. En la figura 10 se puede observar la configuración de este puerto.

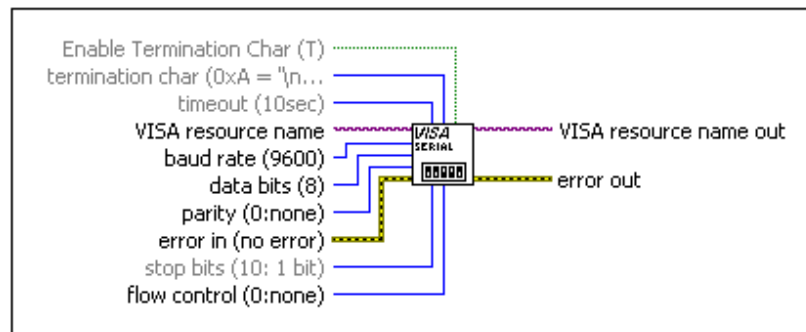


Figura 09: Bloque Visa Configuration serial port
Fuente: Documentación de ayuda del Software LabVIEW.

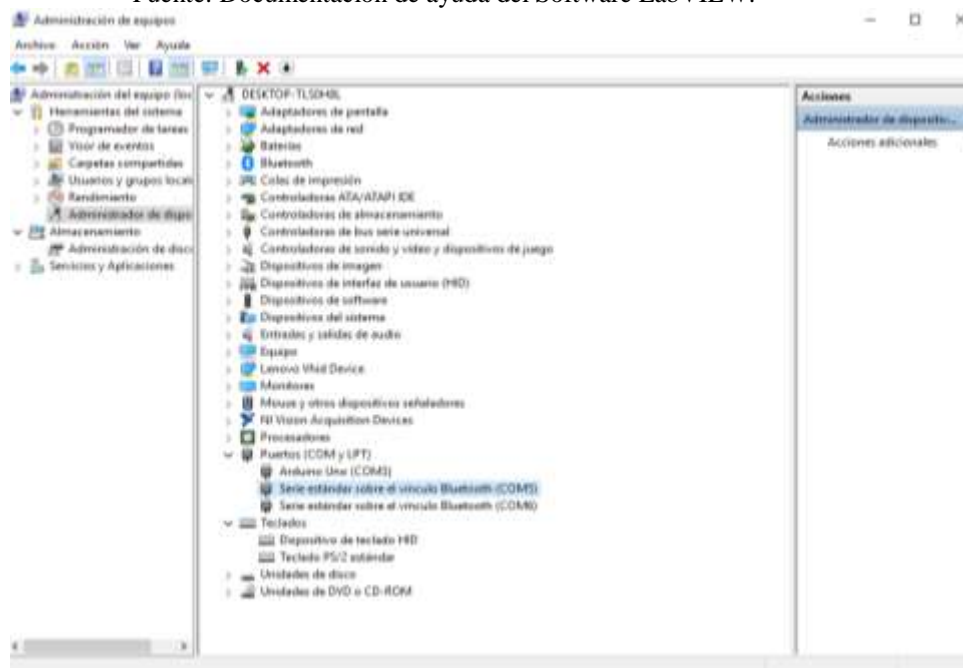


Figura 10: Ventana del administrador de dispositivos
Fuente: Elaboración Propia.

En la figura 11 se muestra la ventana de configuración, donde el puerto obtuvo las entradas necesarias en el bloque de comunicaciones, la mayoría de las veces estos puertos están configurados por defecto con los siguientes parámetros:

- Bits por segundo: 9600 baudios
- Bits de datos: 8
- Paridad: ninguna
- Bits de parada: 1
- Control de flujo: Ninguno

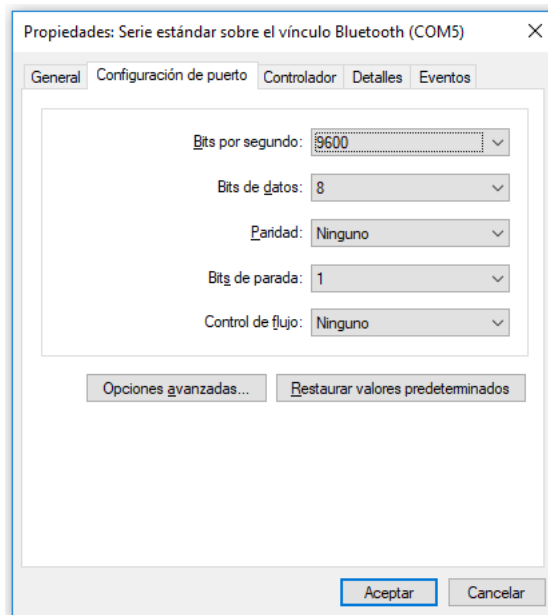


Figura 11: Ventana de configuración del puerto bluetooth.
Fuente: Elaboración Propia.

Además, el bloque que se muestra en la figura 09 cuenta con la configuración por defecto, la cual se describe a continuación con sus entradas y salidas:

- Entrada End read on termination char (habilitación de caracteres de terminación) esta entrada de tipo de dato booleano, cuando es verdadera habilita la detección de un caracter de terminación, es un modo de control de flujo que no se usa, por lo tanto, tiene una constante conectada con el valor de "false".
- Entrada Termination char (caracter de terminación) es la entrada que configura cuál de los caracteres se utilizará para terminar la lectura del puerto.
- Entrada timeout (tiempo de espera) es el tiempo en milisegundos que permanecerá el bloque intentado conectarse con el puerto designado VISA resource name.

- Entrada VISA resource name (nombre del recurso VISA) los recursos de la librería VISA son los puertos de comunicación serial del ordenador. Para nuestro caso fue el COM 5 el cual se usa como puerto de conexión entre el módulo Bluetooth y el ordenador.
- Entrada baud rate (bits por segundo) indica la velocidad de comunicación del puerto serial (9600).
- Entrada Data bits (bits de datos) indica la cantidad de bits presente en el dato a transmitir. Se usa generalmente 8 ya que se transmiten cadenas de caracteres codificadas en ASCII, y cada carácter tiene 8 bits, lo cual facilita la recepción de los datos.
- Entrada Parity (Pariedad) esta entrada permite añadir un bit de paridad a la transmisión, que puede ser par, impar o ninguna, esto depende de la configuración del transmisor. En este caso se seleccionó ninguna.
- Entrada error in (error de entrada) entrada de un posible error de bloques anteriores, previene que se ejecute el código cuando existe un error, este bloque solo necesita ser ejecutado una vez y debe ser colocado fuera de un bucle.
- Entrada Stop Bits (bits de parada) permite elegir el número de bits de parada de la comunicación serial que pueden ser 1, 1.5 o 2 bits.
- Entrada flow control (Control de flujo) indica el tipo de mecanismo de control de transferencia, para este caso no se usa, por lo tanto, la entrada es NONE (ninguna).
- Salida Visa resource name out (Recurso de salida) retorna una copia de la configuración del puerto para que la usen los bloques siguientes.
- Salida Error out (error de salida) esta salida entrega un código de error si existe un error en el bloque al momento de su ejecución.

iii. Bloque VISA Write function (bloque de función de escritura):

En la figura 12 se aprecia el Bloque VISA el cual se usó para escribir datos de manera serial, mandando un comando al controlador para el inicio de las medidas. El tipo de dato a enviar debe ser STRING (cadena de caracteres ASCII), donde las características de las entradas y salidas del bloque, como se muestra en la figura 12, se detallan a continuación:

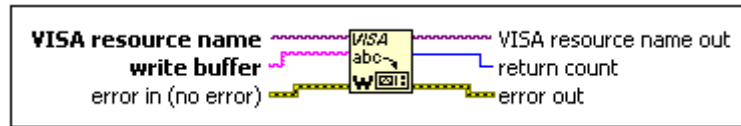


Figura 12: Bloque de función de escritura.

Fuente: Documentación de ayuda del Software LabVIEW.

- Entrada Visa resource name, esta entrada permite conocer la configuración del puerto serial a usar, por tanto, debe existir un bloque de configuración previo a una lectura o escritura. Esta entrada se conecta a la salida del mismo nombre del bloque anterior.
- Entrada write buffer (buffer de escritura), en esta entrada se introducen los datos a escribir. El tipo de dato es string.
- Entrada error In (error de entrada), es la entrada de un posible error de bloques anteriores, previene que se ejecute el código cuando existe un error.
- Salida visa resource out (recurso de salida), retorna una copia de la configuración del puerto para que la usen los bloques siguientes.
- Salida Return count (retorno de cuenta), retorna de cuenta de bytes ya escritos.
- Salida Error out (error de salida) esta salida entrega un código de error si existe un error en el bloque al momento de su ejecución.

iv. Bloque VISA Read Function (Función de lectura):

Este bloque se encarga de leer un número de bytes que se especifica en una de sus entradas, y retorna los datos a través de la salida read buffer como se aprecia en la figura 13. A continuación, el detalle de sus entradas y salidas.

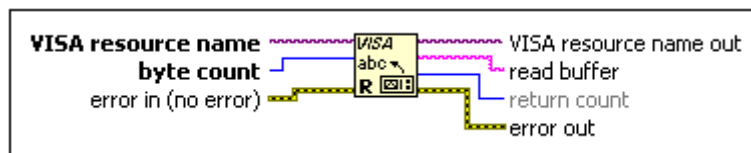


Figura 13: Bloque de función de lectura.

Fuente: Documentación de ayuda del Software LabVIEW.

- Entrada Visa Resource name: Esta entrada permite conocer la configuración del puerto serial a usar, por tanto, debe existir un bloque de configuración previo a una lectura o escritura. Esta entrada se conecta a la salida del mismo nombre del bloque anterior.

- Entrada byte count es la entrada por la cual se ingresa la cantidad de bytes que se desea leer.
- Entrada error In (error de entrada) entrada de un posible error de bloques anteriores, previene que se ejecute el código cuando existe un error.
- Salida visa resource out (recurso de salida) retorna una copia de la configuración del puerto para que la usen los bloques siguientes.
- Salida read buffer en esta salida se podrá leer la cadena de caracteres que llega a través de la comunicación serial.
- Salida return count (retorno de cuenta) retorna de cuenta de bytes ya escritos.
- Salida Error out (error de salida) esta salida entrega un código de error si existe un error en el bloque al momento de su ejecución.

v. Bloque flush I/O buffer:

Este bloque permite borrar el buffer de entrada o salida y de esta manera inicia una nueva cuenta de bytes de lectura o de escritura. Elimina datos antiguos que puedan haber quedado en la pila para actualizar el buffer. El bloque comparte entradas y salidas comunes con otros bloques de la librería tal como se muestra en la figura 14, por lo tanto, solo se detalla la única entrada diferente y es la siguiente:

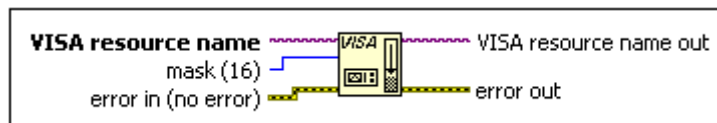


Figura 14: Bloque Flush I/O Buffer.

Fuente: Documentación de ayuda del Software LabVIEW.

- Mask (máscara) este mismo bloque puede eliminar los datos en el buffer de entrada y salida. Donde la entrada designa el buffer que se limpiará e indica que hacer con los datos a limpiar, puede tomar los siguientes valores:
 - 16: limpia y descarta el contenido del buffer de recepción.
 - 32: limpia y descarta el contenido del buffer de transmisión escribiendo todos los datos almacenados al dispositivo.
 - 64: limpia y descarta el contenido del buffer de recepción. (sin realizar ninguna acción en la entrada y salida del dispositivo).

- 128: limpia y descarta el contenido del buffer de transmisión. (sin realizar ninguna acción en la entrada y salida del dispositivo).

vi. Bloque Visa Close Function:

Este último bloque se usa para cerrar la sesión especificada por la entrada Visa resource name, esto permite liberar el puerto luego de terminar la transacción de datos. Usualmente es el último bloque de la secuencia. En la figura 15 se muestra que cuenta con dos entradas y una sola salida.

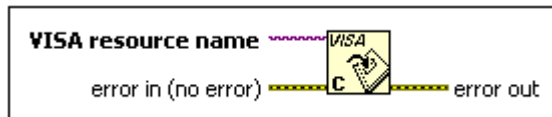


Figura 15: Bloque Visa Close Function
Fuente: Documentación de ayuda del Software LabVIEW.

- Entrada Visa Resource name esta entrada permite conocer la configuración del puerto serial a usar, por tanto, debe existir un bloque de configuración previo a una lectura o escritura. Esta entrada se conecta a la salida del mismo nombre del bloque anterior.
- Entrada error In (error de entrada) entrada de un posible error de bloques anteriores, previene que se ejecute el código cuando existe un error.
- Salida Error out (error de salida) esta salida entrega un código de error si existe un error en el bloque al momento de su ejecución. Este último bloque se conecta a un indicador y de esta manera se puede identificar el código de error.

CAPÍTULO III – DESARROLLO DEL PROTOTIPO

Para esta investigación, el prototipo construido está basado en contar con una cámara que permita la medición de presión y gases de combustión dentro de un sistema de refrigeración de un motor Diesel. Esta cámara debe ser presurizada, por lo tanto, debe ser capaz de mantener una presión de hasta 20 psi; además, esta cámara a través de una manguera y la tapa de radiador modificada se conecta con el radiador del motor permitiendo compartir la misma presión, de esta manera se logró medir la presión del sistema de refrigeración para identificar la existencia de fugas. Por otro lado, el sensor de presión está conectado a la cámara, y el sensor de CO₂ está dentro de la cámara, ambos conectados a un microcontrolador que realiza la adquisición de datos, y el control de un motor DC de 24V que tiene la función de presurizar la cámara, es decir el sistema entero de refrigeración. El mismo motor funciona de manera inversa, al momento de medir la concentración de CO₂, es necesario atraer el aire dentro del sistema de refrigeración hacia la cámara, donde el sensor de CO₂ pueda medir la concentración.

3.1. Interfaz mecánica

Para la interfaz mecánica se modificó una tapa de presión del radiador, de tal manera que esta cuente con una vía que permita el paso de aire desde la cámara hasta el sistema de refrigeración a través del radiador, y a la vez mantener la hermeticidad, de tal manera que, se logre mantener la presión durante la medición.

En la figura 16 se muestra una imagen de la tapa de presión del radiador, antes de ser modificada. Esta tapa cuenta con 2 partes principales, la primera es el cuerpo de la tapa, que es la parte externa que cubre toda la entrada del radiador, la segunda es la parte de presión, es la parte que va dentro del cuello del radiador y hace que la válvula permita o no el paso de líquido refrigerante hacia el tanque auxiliar, dependiendo de la presión del sistema usando un resorte que ejerce presión sobre una goma y esta a su vez presiona el cuello del radiador haciéndolo hermético.

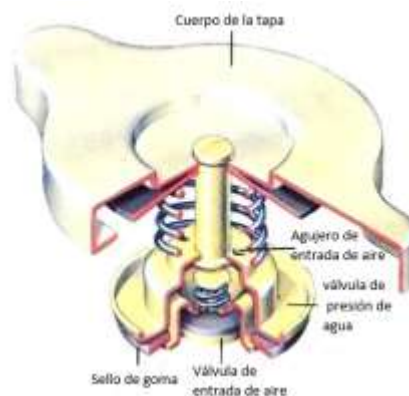


Figura 16. Detalle de tapa del radiador.

Fuente: https://www.uniquecarsandparts.com.au/how_it_works_radiator

3.1.1. Interfaz mecánica de conexión con el radiador

Para lograr la interfaz con la tapa del radiador se utilizó un conector neumático quick connect (conexión rápida), que es mostrado en la figura 17. Esto permite conectar y desconectar la tapa para su instalación. Debido al espacio reducido existía dificultad para conectar la tapa al radiador con la manguera conectada. El objetivo de modificar la tapa es lograr tener una conexión a la cámara de prueba de tal manera que, ambas el radiador y la cámara compartan la misma presión, la tapa permitirá conectar una manguera desde el radiador hasta la cámara, de esta manera tenemos una vía hermética que transporta el aire desde la cámara al radiador.



Figura 17: Tapa de presión con quick connect macho montado

Fuente: <https://www.sykes-pickavant.com/products/cooling-system-test-tools/cooling-system-testing/1506>

El conector hembra del quick connect está conectado a una manguera y esta a su vez está conectada a la cámara de medición, donde se encuentran montados los sensores de presión y CO2. En la figura 18 se observa el quick connect macho y

hembra. En el elemento hembra se observa que cuenta con un botón el cual permite la desconexión, este mecanismo cuenta con un gancho en el interior del conector hembra empujado por un resorte que solo puede ser retirado al presionar el botón.



Figura 18: Detalle del conector quick connect
Fuente: Elaboración Propia.

3.1.2. Soporte de sensores y cámara de lectura de presión y CO₂

La construcción de la cámara tuvo como propósito contar con un soporte donde se puedan realizar las medidas de presión y CO₂, contar con un contenedor que permita introducir presión y permita una vía de medición para los sensores, de tal manera que no haya necesidad de realizar ninguna modificación al sistema de refrigeración del motor.

La cámara ha sido construida de piezas rectangulares de acrílico selladas con silicona, y unidas con tornillos, las piezas de acrílico son de 12 mm de espesor y 29 cm de largo. Además, estas piezas son de 14 cm de ancho y las piezas de los laterales son de 7.5 cm, el motivo de usar este material es que se tenía en existencia y se pretendió aprovechar al máximo los materiales con los que se cuenta. En la figura 19 se muestra la cámara con todos sus componentes, el sensor de presión montado a un lado, el sensor de CO₂ dentro de la cámara, el circuito de control está sobre la estructura, el motor de presurización y por último la manguera de conexión a la tapa del radiador.

En la figura 20 se muestra el diagrama de bloques de la cámara de lectura de sensores, donde se visualiza de manera más detallada las conexiones de las

mangueras de aire que conectan el sistema de refrigeración a diagnosticar, con el prototipo.

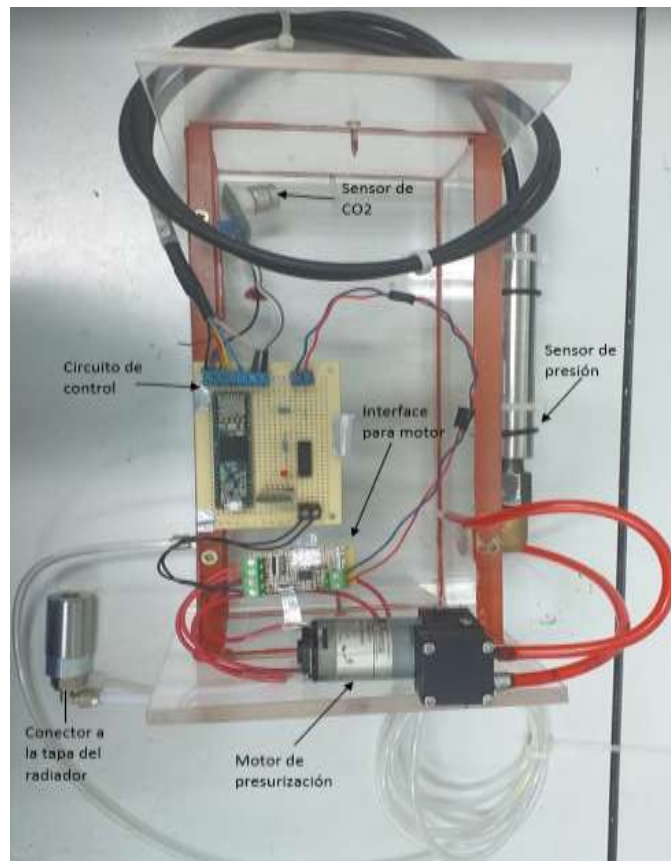


Figura 19: Cámara de lectura de presión y CO2.
Fuente: Elaboración Propia.

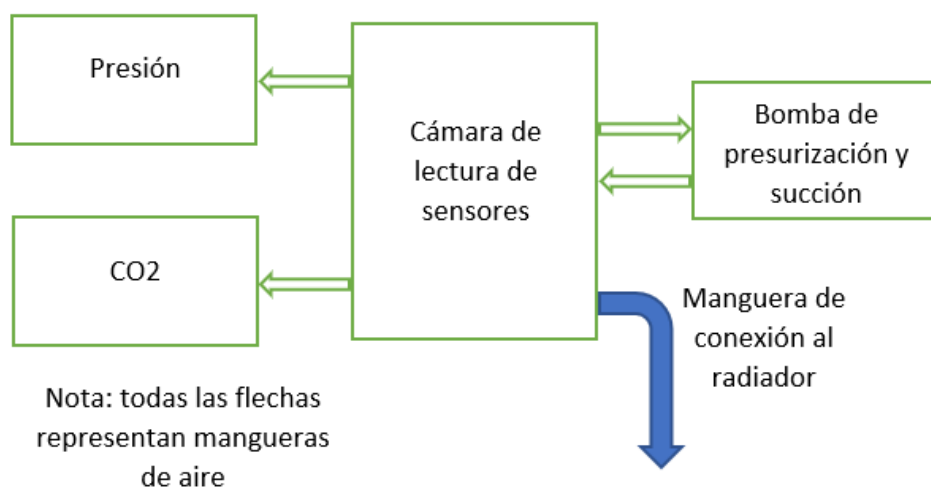


Figura 20: Cámara de lectura de presión y CO2
Fuente: Elaboración Propia.

3.1.3. Bomba de presurización y vacío

Para la presurización de la cámara se controla un motor de corriente continua con una salida digital del controlador y un mosfet para poder brindar la corriente necesaria, conectado al eje del motor está conectada una bomba de diafragma. Esta bomba tiene una conexión para la entrada de aire y otra para la salida, por lo tanto se puede usar esta bomba para generar presión en la cámara y se puede usar también para generar el vacío en la cámara, y atraer gases desde el sistema de refrigeración hasta la cámara para poder realizar mediciones de CO₂. En la figura 21 se muestra el motor de marca KNF de código PML-8857-NF30 el cual trabaja con 24 volts, por ello se requiere una interfaz que permita al microcontrolador que trabaja con una salida digital de 3.3 voltios, con lo cual se pueda controlar un motor de 24 V.



Figura 21: Bomba de diafragma PML-8857-NF30.
Fuente: <https://shop.knf.com/nf-30-ktdc-24v.html>

3.2. Adquisición y Acondicionamiento de señales

3.2.1. Control de bomba de presurización

Para poder controlar la bomba de 24 voltios, se confeccionó una interfaz con un mosfet, para lograr que el motor cuente con la corriente suficiente para funcionar apropiadamente. El mosfet utilizado fue el RPF30N60 como se muestra en la figura 22. Se seleccionó este mosfet debido a que requiere un voltaje V_{GS} (voltaje de activación) bajo para ser activado directamente del microcontrolador, por seguridad se instaló un optoacoplador PC817, para aislar al microcontrolador de la carga inductiva, para evitar problemas debido a los picos de tensión generados por el motor.

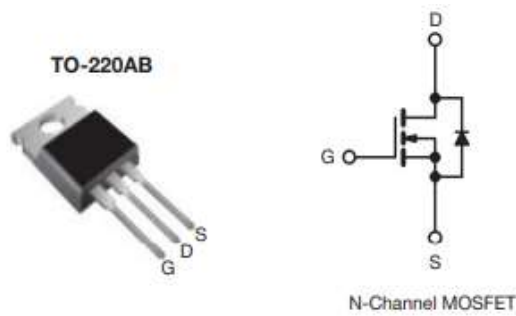


Figura 22: Mosfet canal N para control de motor de la bomba.
Fuente: <https://www.mouser.mx/Semiconductors/Discrete->

En la figura 23 se muestra un extracto de la hoja de especificaciones del transistor mosfet donde se muestra el voltaje umbral ($V_{GS(th)}$) que requiere para entrar en corte resaltado en amarillo, con estos datos se puede calcular los valores de resistencia para el control de este dispositivo.

SPECIFICATIONS ($T_J = 25\text{ }^\circ\text{C}$, unless otherwise noted)						
PARAMETER	SYMBOL	TEST CONDITIONS	MIN.	TYP.	MAX.	UNIT
Static						
Drain-source breakdown voltage	V_{DS}	$V_{GS} = 0\text{ V}$, $I_D = 250\text{ }\mu\text{A}$	600	-	-	V
V_{DS} temperature coefficient	$\Delta V_{DS}/T_J$	Reference to $25\text{ }^\circ\text{C}$, $I_D = 1\text{ mA}$	-	0.68	-	V/ $^\circ\text{C}$
Gate-source threshold Voltage (N)	$V_{GS(th)}$	$V_{DS} = V_{GS}$, $I_D = 250\text{ }\mu\text{A}$	2.0	-	4.0	V
Gate-source leakage	I_{GSS}	$V_{GS} = \pm 20\text{ V}$	-	-	± 100	nA
		$V_{GS} = \pm 30\text{ V}$	-	-	± 1	μA
Zero gate voltage drain current	I_{DSS}	$V_{DS} = 600\text{ V}$, $V_{GS} = 0\text{ V}$	-	-	1	μA
		$V_{DS} = 480\text{ V}$, $V_{GS} = 0\text{ V}$, $T_J = 125\text{ }^\circ\text{C}$	-	-	10	
Drain-source on-state resistance	$R_{DS(on)}$	$V_{GS} = 10\text{ V}$, $I_D = 15\text{ A}$	-	0.105	0.120	Ω
Forward transconductance	g_{fs}	$V_{DS} = 20\text{ V}$, $I_D = 15\text{ A}$	-	19	-	S
Dynamic						

Figura 23: Especificaciones mosfet Canal n
Fuente: https://www.mouser.mx/Semiconductors/Discrete-Semiconductors/Transistors/MOSFET/Datasheets/_/N-ax1sf?keyword=30n60

Para diseñar el circuito de interfaz de control del motor de la bomba se deben tener en cuenta los siguientes parámetros:

- Voltaje de la señal de control (V_c). Para este control se usa una salida del microcontrolador teensy 3.6 que entrega un voltaje de 3.3V.
- Corriente del led del optoacoplador PC817. De la hoja de especificaciones del dispositivo se pudo verificar que la corriente del LED es de 50mAmperios máximo.
- Voltaje umbral del mosfet, en la figura 23 se muestra que los voltajes de umbral mínimo y máximo son 2 y 4 voltios respectivamente.
- Con estos parámetros podemos calcular valores de resistencias que se usaron en el circuito que se muestra en la figura 24.

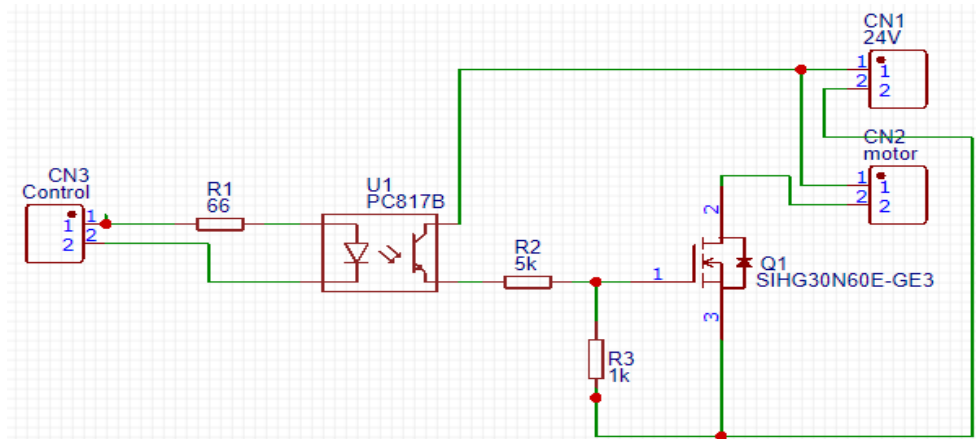


Figura 24: Circuito de Interfaz con el motor de la bomba
Fuente: Elaboración Propia.

Reemplazando los valores en la ecuación (1) se llegó a determinar el valor de R1, esta resistencia limita la corriente el diodo emisor de luz (IF) del optoacoplador.

$$R1 = \frac{V_C}{I_F} \text{ (ec1)} \quad R1 = \frac{3.3}{0.05} \text{ por lo tanto } R1 = 66 \Omega \quad (1)$$

Las resistencias R2 y R3 forman un divisor de tensión para generar el voltaje de umbral al transistor mosfet, este voltaje es de 4 voltios y el voltaje de entrada es de 24 voltios; por lo tanto, la caída de tensión en la resistencia R3 debe ser de 4V. Tomando un valor de R3 = 1K Ω calculamos la corriente en esta resistencia. Si su caída de tensión es de 4 voltios reemplazamos los valores en la ecuación 2.

$$I = \frac{4}{1000} = 0.004 \text{ mA entonces } R2 = \frac{24-4}{0.004} = 5000\Omega \dots\dots\dots(2)$$

Por lo tanto, R3 = 1K Ω y R2 = 5K Ω

3.2.2. Sensor de presión

El sensor de presión utilizado es de la marca Aircom de código D6A-10W, se alimenta con 24 VDC y su salida es de corriente 4 a 20 mA, su rango de medición es de 0 a 10 BAR tal como se muestra en la figura 25, en este caso se desean medir valores de 20 PSI como máximo, es decir, menos de 2 BAR, el microcontrolador cuenta con un ADC de 13 bits, y puede leer hasta 3.3 voltios como máximo; además, solo puede leer señales de voltaje. Para poder leer la señal del transmisor se colocó una resistencia en serie con la señal del sensor para poder medir la caída de tensión que genera el paso de corriente por dicha

resistencia, el valor de esta resistencia se calcula tomando en cuenta que, la presión que se generará en la cámara no sobrepasa los 16 PSI que equivale a 1.1 BAR. Para aprovechar mejor la resolución del ADC, se consideró que el rango de medición sea de 0 a 20 PSI, debido a que si se hubiera escogido el valor máximo de 16 PSI, este valor hubiera resultado ser el equivalente al voltaje máximo que puede medir el ADC del microcontrolador que es de 3.3 VDC, pero debido a que el sensor de CO₂ entrega una señal en mV se optó por usar una referencia de voltaje de 1.1 V, es decir que en lugar de que el ADC lea de 0 a 3.3 V, leerá de 0 a 1.1 voltios en toda su resolución de 13 bit.

Esto nos permitió leer señales con rangos pequeños, entonces si en algún momento durante las pruebas la presión es mayor a 16 PSI, el voltaje que ingresa al ADC será mayor a 1.1 V, y podría dañar el microcontrolador.

Pressure transducer G1/2 male			stainless steel, gauge pressure with angular coupling socket		D6A	D6V
142	27	27	2	0... -1	D6A-V0	D6V-V0
			2	-1... 1	D6A-V1	D6V-V1
			2	0... 1	D6A-01	D6V-01
			4	0... 2	D6A-02	D6V-02
			10	0... 5	D6A-05	D6V-05
			20	0... 10	D6A-10	D6V-10
			32	0... 16	D6A-16	D6V-16
125	27	27	40	0... 20	D6A-20	D6V-20
			70	0... 35	D6A-35	D6V-35
			140	0... 70	D6A-70	D6V-70
			200	0... 100	D6A-D1	D6V-D1
			400	0... 200	D6A-D2	D6V-D2
			700	0... 350	D6A-D3	D6V-D3



Figura 25: Datos del sensor de presión.

Fuente: <https://www.aircom.net/uploads/aircomdocs/Katalog/GB/Kapitel%2013/K-2017-13-6-GB.pdf>

En la figura 26 se muestra una gráfica donde detalla las limitaciones de carga de este sensor y sus diferentes configuraciones.

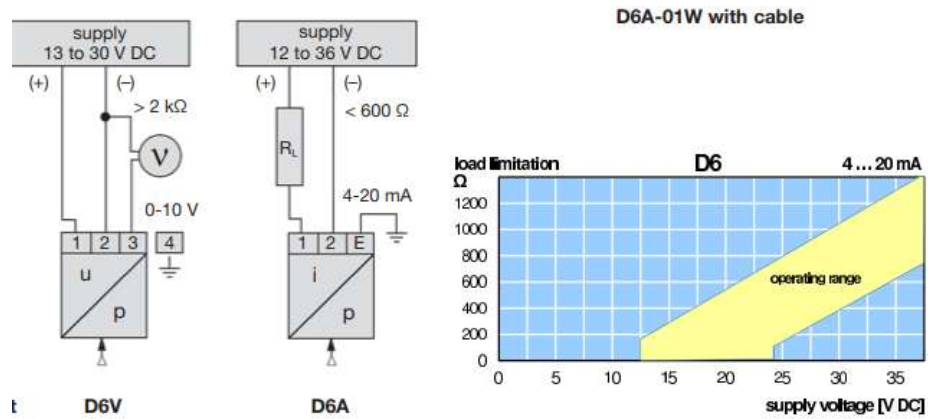


Figura 26: Gráfica donde detalla las limitaciones de carga
 Fuente: <https://www.aircom.net/uploads/aircomdocs/Katalog/GB/Kapitel%202013/K-2017-13-6-GB.pdf>

Entonces, para calcular la resistencia de carga del circuito del transmisor de presión se tuvieron los siguientes parámetros:

Valor máximo de presión 20Psi que equivale a 1.38 BAR, por lo tanto, la corriente máxima se calculó con la siguiente ecuación (3).

$$\frac{R_i}{R_p} = \frac{R_{i\max} - S_i}{R_p - V_p} \quad (3)$$

Donde:

R_i = Rango de instrumentación.

R_p = rango del proceso

S_i = señal de instrumentación

V_p = variable del proceso

Se determinó “ S_i ” reemplazando los valores en la ecuación (4), para una $V_p=1.38$ BAR cuando R_i es de 4 a 20mA y R_p es de 0 a 10 BAR;

$$\frac{20-4}{10-0} = \frac{20-S_i}{10-1.38} \Rightarrow S_i = 20 - 1.6 * 8.82 \dots \dots \dots (4)$$

Entonces, $S_i = 6.2$ mA. Por lo tanto, el rango de corriente que se obtuvo del sensor de presión fue de 0 a 6.2 mA y su equivalente en voltaje 0 a 1.1 V. Para calcular la resistencia de carga del sensor usamos la corriente y voltajes máximos y lo reemplazamos en la ecuación (5).

$$R_L = \frac{1.1}{0.0062} = 177.41 \Omega \dots \dots \dots (5)$$

Por conveniencia se usó una resistencia de $170\ \Omega$ el cual proporcionó un voltaje máximo de $1.054\ \text{V}$ a $6.2\ \text{mA}$. El rango del ADC para este sensor es de 0.68 a $1.054\ \text{V}$, si contamos con un ADC de 13 bits, el rango de valores entregados por el conversor para este sensor fue de 5094 a 7849 PPM, significando un span de 2755.

3.2.3. Sensor de CO₂

El sensor MG811 adopta el principio de celda de electrolito sólido, cuando el sensor es expuesto al CO₂. Este principio se basa en las reacciones químicas en los electrodos que a la presencia de CO₂ genera una fuerza electromotriz EMF, proporcional a la concentración del dióxido de carbono. En la figura 27 se muestra el módulo sensor, que tiene un circuito de interfaz, que brindó un voltaje de $6\ \text{V}$ a una bobina de calentamiento. Para que las reacciones químicas se concreten se debe alcanzar una temperatura mayor a la temperatura ambiente.



Figura 27: Modulo sensor MG811

Fuente: <https://sandboxelectronics.com/files/SEN-000007/MG811.pdf>

En la figura 28 se describe la distribución de pines de conexión, la conexión del calentador, y la conexión a la salida. Este sensor genera una salida de voltaje en milivoltios.

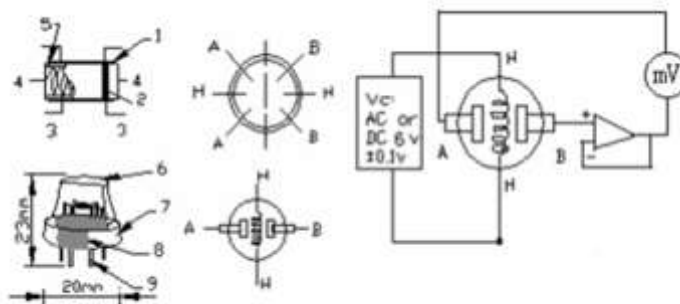


Figura 28: Distribución de pines del sensor

Fuente: <https://sandboxelectronics.com/files/SEN-000007/MG811.pdf>

En la figura 29 se muestra la gráfica de la sensibilidad del sensor respecto a los gases que puede detectar, se observa de la leyenda que la curva en azul corresponde al CO₂ y se observó que el rango de medición es de 350 a 10,000 PPM, y su equivalencia en mV es de 325 a 265 mV que es inversamente proporcional a la concentración de CO₂.

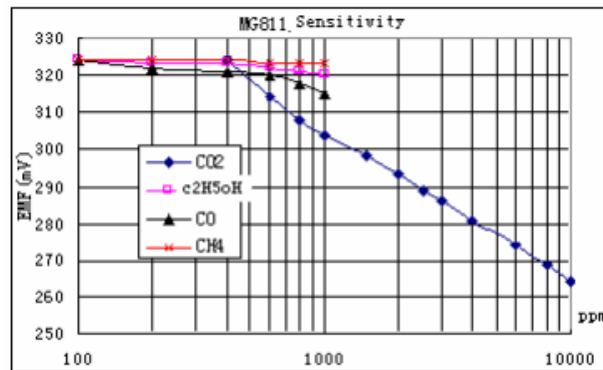


Figura 29: Gráfica de la respuesta del sensor.

Fuente: <https://sandboxelectronics.com/files/SEN-000007/MG811.pdf>

Esta gráfica es de ayuda cuando se trata de convertir los datos de voltaje entregados, para el conversor analógico digital de 13 bits el rango de valores que entregará luego de la conversión será de 2420 a 1973 con un span de 447. El sensor cuenta con una placa de circuito impresa desarrollada por el propio fabricante, con todo lo necesario para que la señal analógica pueda ser leída a través de un conversor analógico digital. Este circuito cuenta también con una salida digital, que no es más que la salida de un comparador, que compara la salida del voltaje del sensor con el voltaje de un potenciómetro, el cual puede ser variado a voluntad para poder obtener la señal digital que indicará que la salida del sensor sobrepasó cierto valor de voltaje configurado a través de este. Fue necesario también contar con las especificaciones técnicas del sensor, que se muestran en la figura 30.

Symbol	Parameter Name	Technical	Remarks
V _H	Heating Voltage	6.0±0.1 V	AC or DC
R _H	Heating Resistor	30.0±5% Ω	Room Temperature
I _H	Heating Current	@200mA	
P _H	Heating Power	@1200mW	
T _{ao}	Operating Temperature	-20—50	
T _{as}	Storage Temperature	-20—70	
V _{EMF}	Output	30—50mV	350—10000ppmCO ₂

3.2.4. Acondicionamiento de señales

Para el sensor de presión que es un transmisor de corriente, fue necesario usar una resistencia, para que el microcontrolador pueda leer la señal en voltaje. El cálculo se muestra en la sección 3.2.2 con todos los detalles. Para el sensor de CO₂ no fue necesario realizar ningún acondicionamiento debido a que el sensor entrega una señal de voltaje, el único detalle fue que los voltajes en ambos sensores son bastante bajos y se debió configurar el microcontrolador a un voltaje de referencia menor para obtener una mejor resolución. El microcontrolador usado cuenta con un voltaje de referencia interno de 1.1 voltios, al configurar esta opción la resolución de 13 bits del microcontrolador que es de 0 a 8192 equivale a 0 a 1.1 voltios lo que quiere decir que el microcontrolador podría leer 0.122 mV con su bit LSB.

3.2.5. Adquisición de señales con el microcontrolador

Para la adquisición de datos con el microcontrolador se preparó un programa basado en lenguaje de programación C, para poder configurar la ADC del microcontrolador, leer las señales analógicas, controlar una salida digital para el control de la bomba y enviar los datos de manera serial mediante la conexión Bluetooth.

3.2.6. Programa en el software Labview

El software Labview es un ambiente de programación, que cuenta con dos ventanas, el panel frontal y el panel de bloques. En el panel frontal se colocaron todo lo referido a la interfaz con el usuario, y en el panel de bloque se programó como actuará cada control del panel frontal. Labview es un software que permite el uso de bloques para generar algoritmos en lugar del código escrito. Para el desarrollo de este prototipo, Labview al ser un programa que usa bloques y no código, permite realizar la ejecución de los bloques en paralelo, a diferencia del código que se ejecuta en secuencia. para controlar el flujo de datos. Adicionalmente, se usó un bloque de estructura llamado flat sequence o

secuencia plana que permite seguir una secuencia, además los bloques de bucle while que si tienen un funcionamiento muy parecido a su contraparte en código, y el case structure, que es la estructura de casos, con estos bloques como base se explicará la secuencia que sigue el programa con ciertos comandos que son enviados por el microcontrolador, y además también envían comandos para indicarle al microcontrolador cuando empezar una medición. A continuación, en la figura 31 se representa cada parte del proceso.

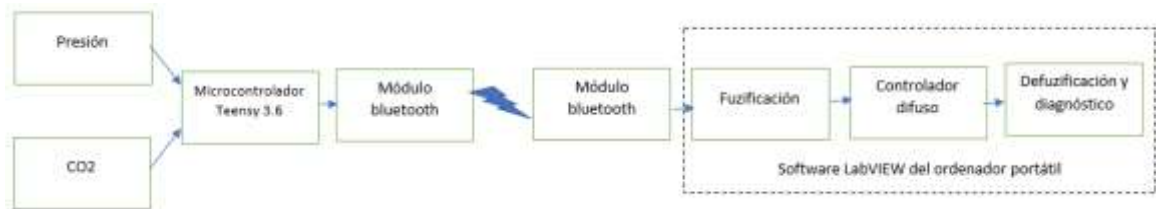


Figura 31: Diagrama de Bloques
Fuente: Elaboración Propia.

La parte inicial corresponde a la configuración que generalmente suele tener que ejecutarse una sola vez, por ello va al inicio y fuera de los bucles. En la figura 32 se muestra los bloques de configuración que solo se ejecutan una vez, en la parte superior se encuentra el bloque que realiza la lectura del archivo generado por la herramienta de diseño de sistemas difusos, que pertenece a la librería de fuzzy logic descrita en el punto 2.3.1. A continuación, se encuentra el bloque de configuración de la comunicación serial con todas sus entradas seguido de un bloque de configuración de buffer de entrada y salida, ambos bloques son parte de la librería VISA driver descritas en la sección 2.3.2. A continuación, en el bucle while se ejecutaron los bloques que se colocaron en su interior hasta que el comando stop lo permitió. Dentro de este bucle está el bloque estructural de secuencia plana que se representa como una cinta antigua de video dividida en cuadros, por ello cada cuadro se ejecutó en secuencia. Al interior de cada cuadro hay un bucle while que hizo que la ejecución permanezca en ese cuadro hasta que se cumplieran todas las condiciones para seguir al siguiente.

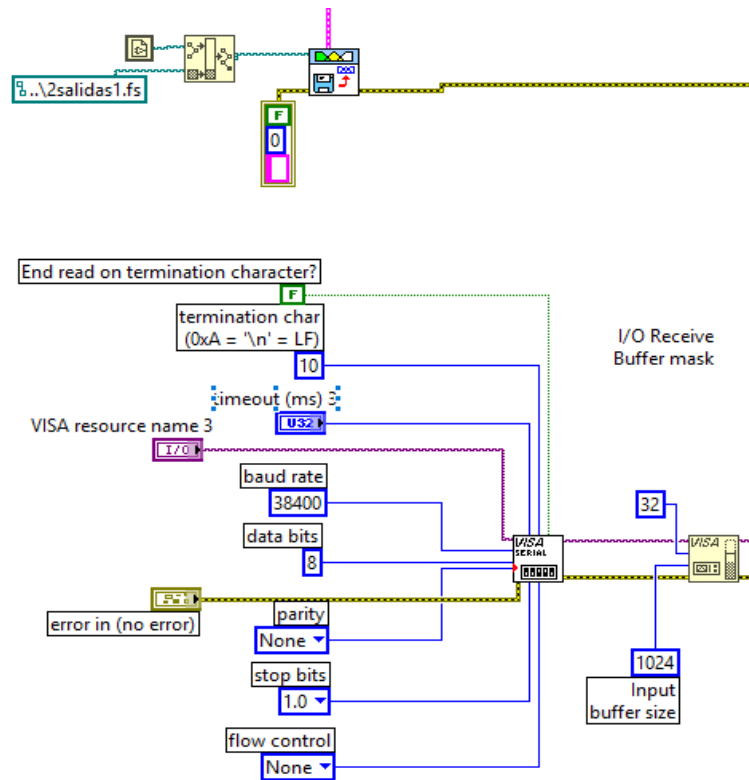


Figura 32: Bloque de configuración Labview
Fuente: Elaboración Propia.

En la figura 33 se muestra el primer cuadro de la secuencia plana, este cuadro permite verificar las condiciones iniciales para la ejecución de las pruebas, como es el estado de las válvulas. Para esto, el prototipo debe tener abierta la válvula 1 y 3, y cerrada la 2 y 4 para la prueba de presión. En este bloque se verificó dicha configuración y solo se puede salir de este cuadro cuando se activa el switch de inicio de prueba, el cual solo se habilita si se tiene la combinación correcta de válvulas. En la figura 32 se muestra que si no hay válvula seleccionada ambas pruebas se deshabilitan, esta lógica está dentro del bloque de estructura de casos que funciona de manera similar a un IF en el caso del código. Luego, al habilitarse el switch se inició una prueba donde el ordenador manda un comando al microcontrolador indicando que inicie con la prueba correspondiente al comando, hecho esto se produce un comando que detiene el bucle y pasa al siguiente cuadro de la secuencia plana.

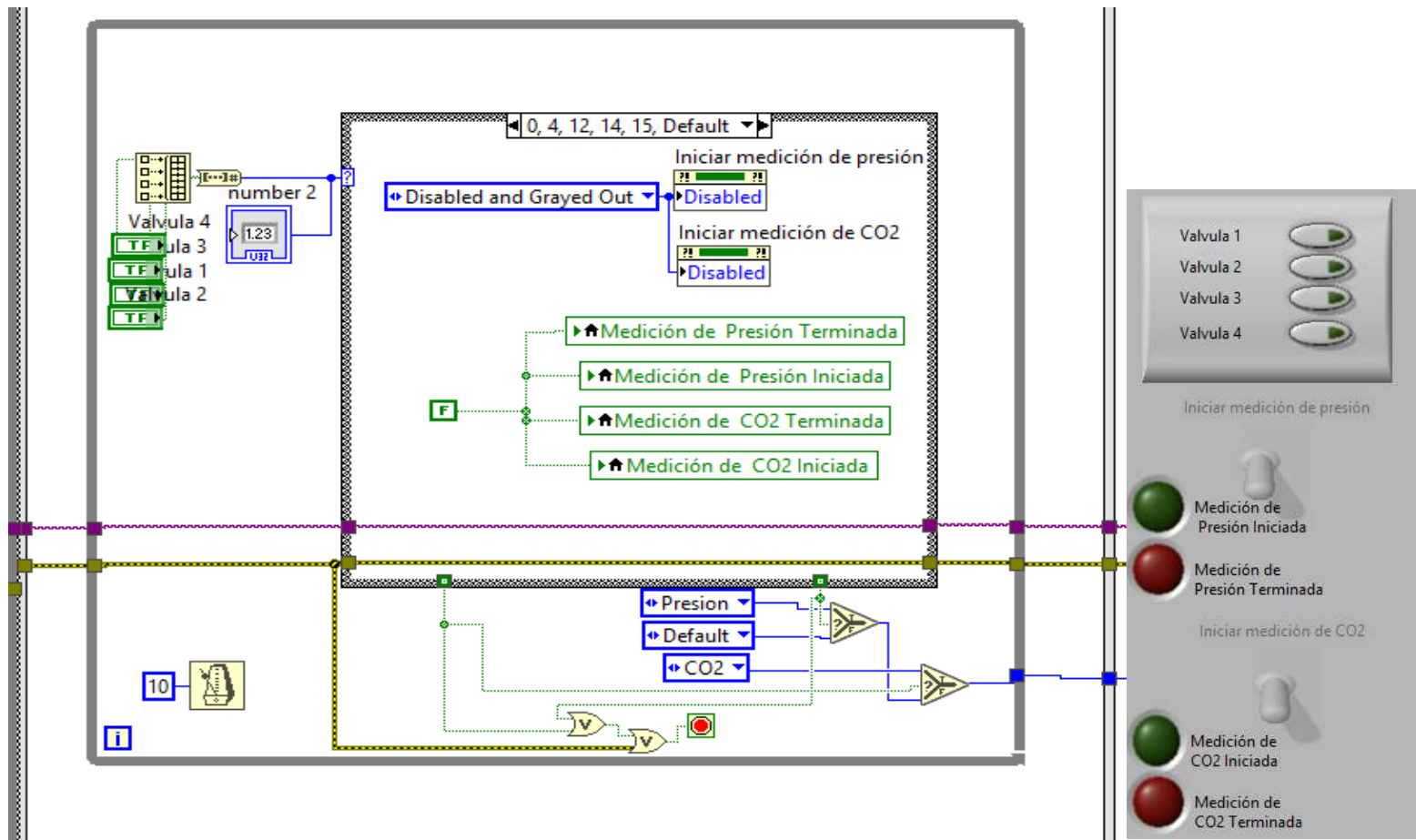


Figura 33: Primer cuadro de la secuencia plana.
Fuente: Elaboración Propia.

En este bloque se reciben los datos que envía el microcontrolador dentro de una trama, el cual tiene un formato que inicia con el carácter de dólar y separa los datos con comas, esta trama además de los datos cuenta con un comando que le indica al Labview si se encuentra en proceso de medición, o ya está mandando los datos para el procesamiento mediante la inferencia difusa. En la trama de envío, se tiene la siguiente consideración: el dato en “x” representa el valor del dato de presión que tiene máximo dos dígitos enteros y dos decimales, el dato en “y” representa la concentración de CO2 que cuenta como máximo con 5 dígitos, la M representa el comando que le indica al software si la data que llega es de una medición en curso. Cuando este comando cambia a R le indica al software que los datos enviados están listos para ser procesados. En la figura 34 se muestra el cuadro donde se realiza la decodificación de los datos.

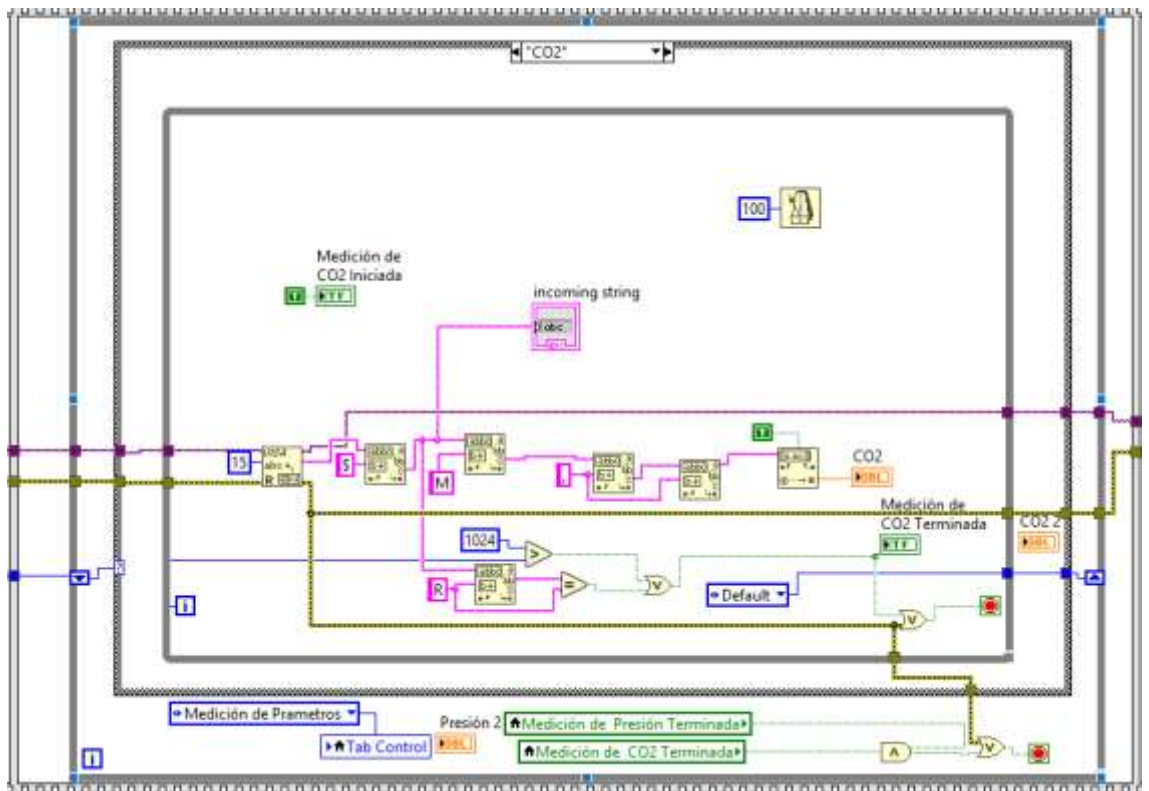


Figura 34: Cuadro de recepción y decodificación de datos
Fuente: Elaboración Propia.

Luego de que el microcontrolador manda los datos, estos deben ser procesados por el algoritmo de inferencia difusa lo cual se logra en el siguiente cuadro, ver la figura 35. Los datos decodificados ingresan y son procesados según el archivo que fue cargado por el bloque inicial que tiene toda la información de las variables. En este cuadro se grafican las funciones de pertenencia y se entregan

los valores de las variables de salida, con lo que se compara y encuentra el resultado en la pestaña de diagnóstico.

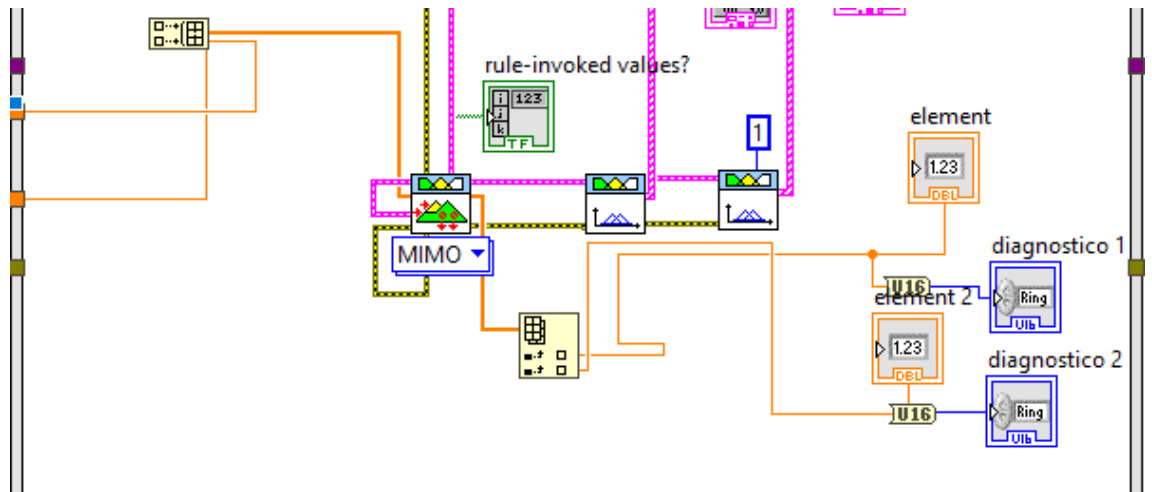


Figura 35: Cuadro de ejecución del algoritmo de inferencia difusa
Fuente: Elaboración Propia.

3.3. Algoritmo de Inferencia Difusa.

El algoritmo de inferencia difusa se creó usando una herramienta proporcionada por el software Labview, esta herramienta es llamada Diseñador de sistemas difusos (fuzzy system designer) y permite configurar variables de entrada y salida con sus respectivas funciones de pertenencia mediante un GUI (graphical user interface), el cual facilita la creación de las variables y la reglas. Además, cuenta con una opción que permite simular el funcionamiento del sistema difuso creado mediante el ingreso manual de datos.

3.3.1. Variables de entrada y conjuntos difusos

Los conjuntos difusos de las variables de entrada fueron definidos tomando en cuenta ciertos parámetros de los sistemas de refrigeración de motores, por ejemplo, el rango de la variable de presión, tiene ese valor debido a que es el valor de presión que se usa para realizar pruebas en sistemas de refrigeración con equipos manuales, pero la cantidad de funciones de pertenencia podría ser menor, ya que el hecho de que exista una fuga en el sistema ya representa un problema que debe ser solucionado muy aparte de cuán grande o pequeña sea dicha fuga. En el caso de la variable de concentración de CO2 el rango de la

variable es el nivel de medición del sensor, y el tener varias funciones de pertenencia ayuda a contar con una idea de la gravedad del problema. En las figuras 36 y 37 respectivamente, se muestran las funciones de pertenencia de ambas variables de entrada.

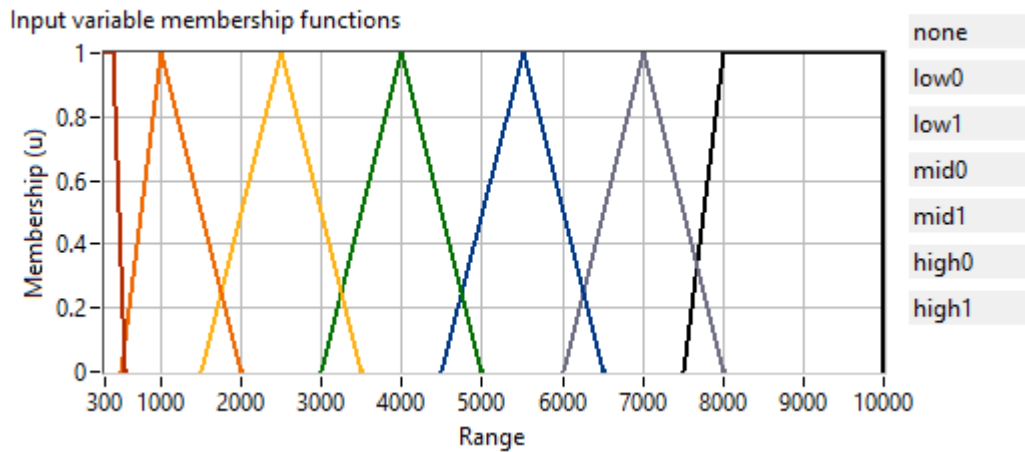


Figura 36: Funciones de pertenencia de la variable “concentración de CO2”
Fuente: Elaboración Propia.

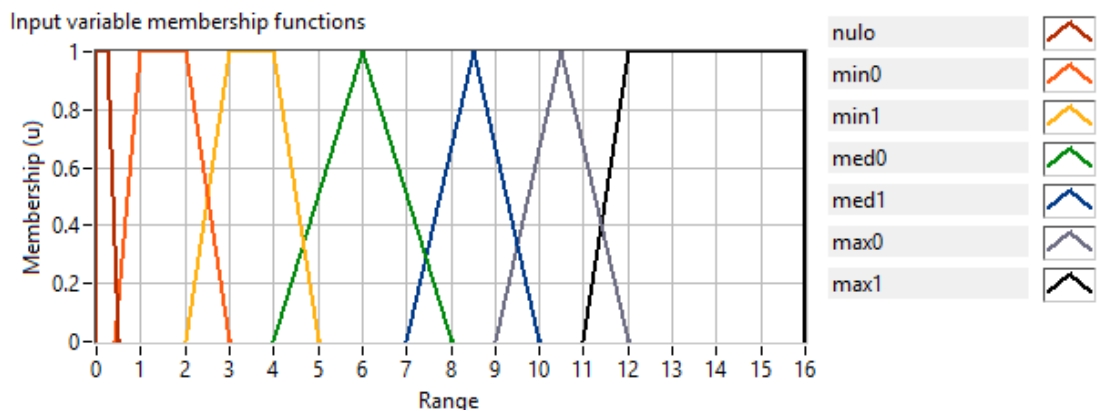


Figura 37: Funciones de pertenencia de la variable “diferencia de presión”
Fuente: Elaboración Propia.

3.3.2. Variables de salida y conjuntos difusos

Para las variables de salida, se optó por tener 2 a pesar de que en un principio solo sería una que englobaría ambas circunstancias. Es decir, en un principio, esta salida contaba con 9 funciones de pertenencia. Luego, dicha variable se desdobló en dos, pero aun conteniendo las 9 funciones de pertenencia, tal como se muestra en las figuras 38 y 39, donde las variables de salida son denominadas fuga interna y fuga externa, respectivamente. Al momento de desarrollar las

reglas del controlador difuso se observó que, al darse cierta combinación de datos de entrada, sería necesario invocar dos funciones de pertenencia en una misma variable para una misma regla, lo cual no era posible. Esto debido a que se tomó la decisión de usar dos variables en lugar de una, se separó en variable INTERNA y variable EXTERNA, que representan si la detección de la fuga se da desde el circuito de refrigeración hacia afuera del motor que es la variable EXTERNA, o en el caso contrario si la fuga tiene conexión con alguna parte interna del motor por este motivo se creó la variable INTERNA. En las figuras 38 y 39 se muestran las funciones de pertenencia para las variables de salida.

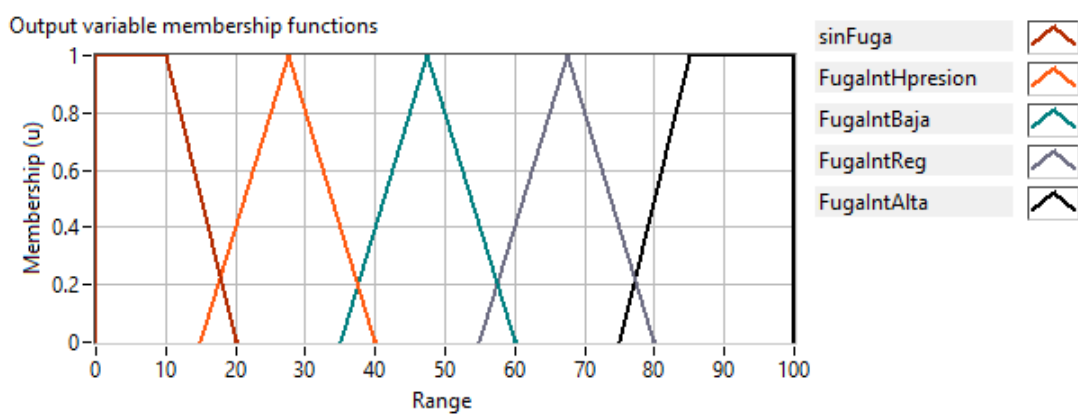


Figura 38: Función de pertenencia de la variable INTERNA
Fuente: Elaboración Propia.

Para la variable INTERNA que tiene 5 funciones de pertenencia, se detalla cada una a continuación.

- SinFuga, indica que no existe fuga desde el sistema de refrigeración hacia partes internas del motor, esto se da cuando no existen gases de combustión en el circuito de refrigeración.
- fugaIntHpresion: esta función indica la presencia de una fuga interna a alta presión, cuando existe presencia de CO2 en el circuito, pero no se observa fuga en la prueba de presión.
- fugaIntBaja: fuga interna baja, se da cuando existe diferencia de presión baja y presencia de CO2 en concentraciones bajas.

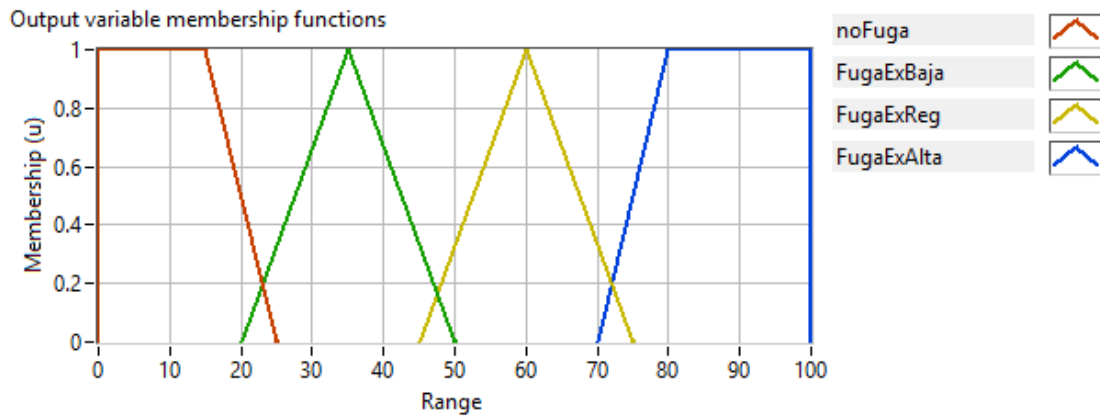


Figura 39: Función de pertenencia de la variable EXTERNA
Fuente: Elaboración Propia.

3.3.3. Conjunto de reglas

El conjunto de reglas se implementó basado en el conocimiento, experiencia e información de los sistemas a diagnosticar. La cantidad de reglas se define con las variables, cada variable tiene una cantidad de funciones de pertenencia, para el caso actual son dos variables de entrada y cada variable cuenta con 7 funciones de pertenencia cada una. Además, se cuenta con 2 salidas, debido a que las variables tienen cierta dependencia, en todas las reglas se cuenta con la participación de las dos variables de entrada usando la operación AND, debido a que ambas deben participar para definir una consecuencia. Cada una por sí sola no logra definir un dato de salida, y en cada regla se cuenta con la participación de las 2 variables de salida logrando un total de 49 reglas, que es el resultado de la combinación de cada una de las funciones de pertenencia de las variables de entrada. El diseñador de sistemas difusos del software Labview permite generar un reporte en HML.

En la figura 40 se muestra la captura de pantalla del diseñador de sistemas difusos en la pestaña de test system, que permite ingresar valores al controlador y verificar su respuesta. Muestra además una gráfica en 3D que corresponde a la relación entrada salida para ambas variables de entrada, y una variable de salida en este caso particular la variable de salida INTERNA. Y, en la figura 41 se muestra otra captura de pantalla, pero con la relación de ambas variables de entrada y la segunda variable de salida que es la variable EXTERNA.

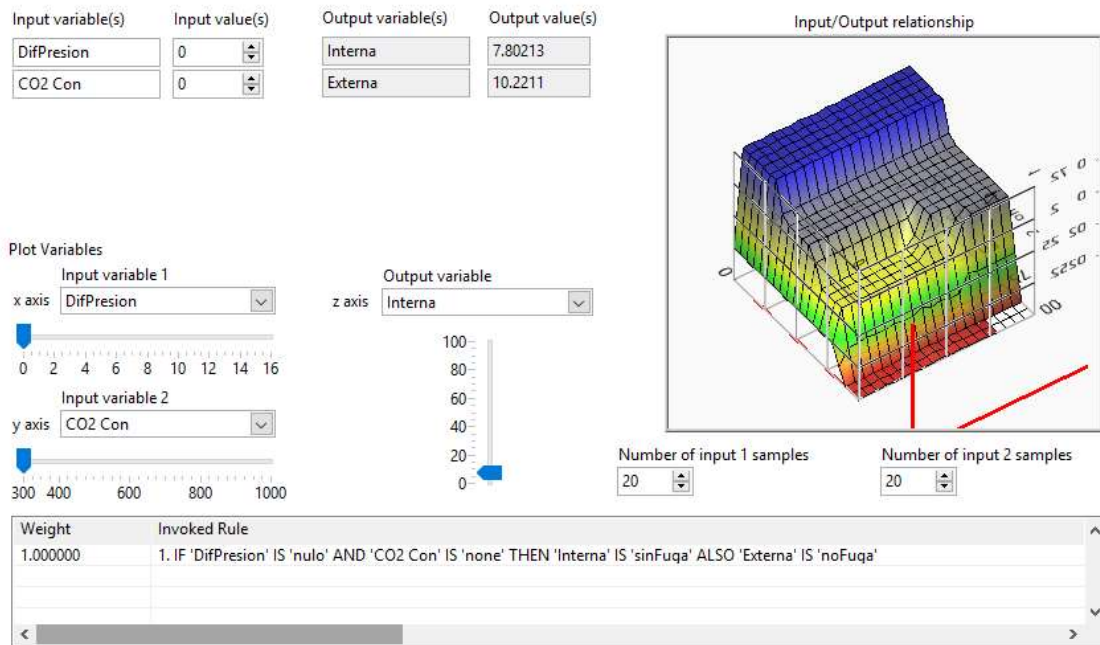


Figura 40: Test fuzzy system designer Labview
Fuente: Elaboración Propia.

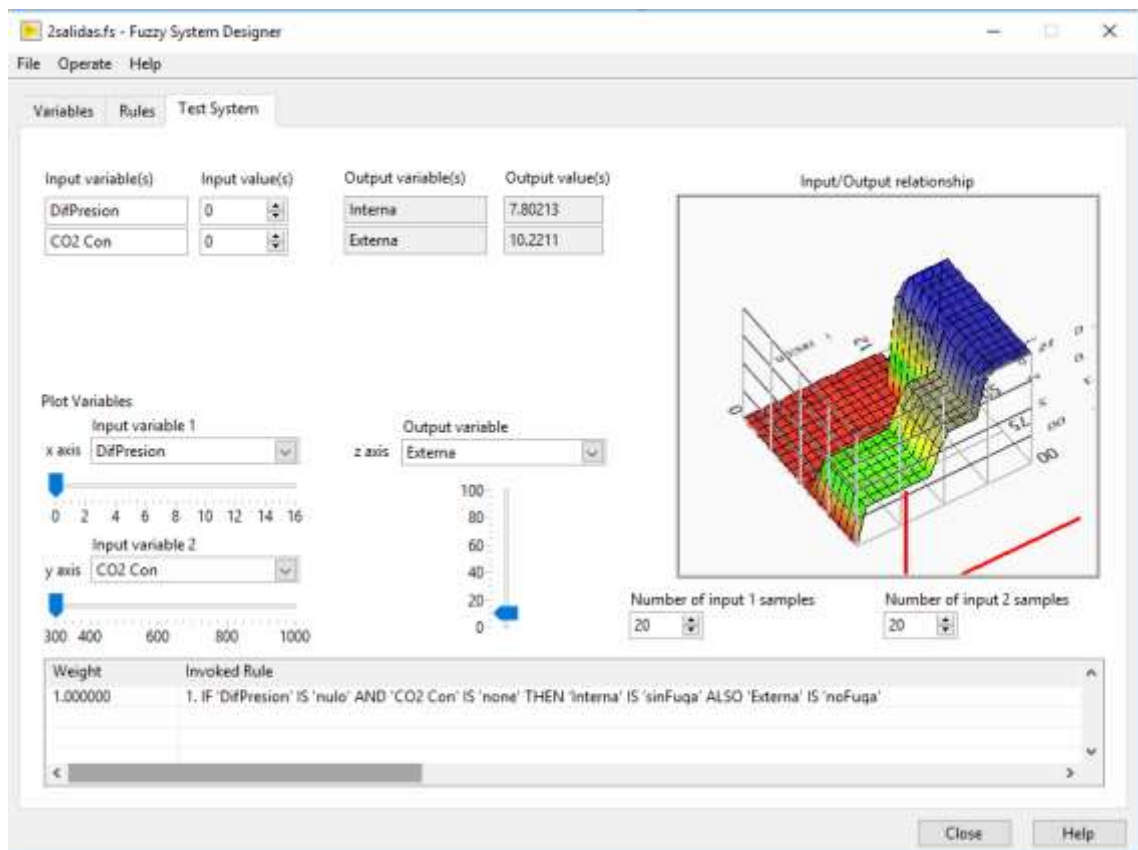


Figura 41: Test fuzzy system designer Labview
Fuente: Elaboración Propia.

CAPÍTULO IV – RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE CAMPO

Las pruebas fueron realizadas sobre un grupo electrógeno de marca EnerPower con un motor de marca Cummins y el generador marca Stanford, lo más importante en el sistema de refrigeración es el radiador, por lo tanto, debió cumplir ciertas características previamente a las pruebas que se detallan a continuación:

a. Prueba de CO₂

- El motor debe funcionar durante 10 minutos con el radiador al 80% de su capacidad y a una velocidad de rotación nominal, en este caso 1800 RPM que es la velocidad de rotación con la cual la energía generada alcanza los 60 Hz.
- Dejamos enfriar el motor, y nos aseguramos de no destapar el radiador hasta el momento de realizar la prueba.
- Colocamos la tapa modificada justo después de quitar la tapa del radiador y finalizamos con la conexión del quick connect.
- Procedimos con la prueba.

b. Prueba de presión:

- El líquido refrigerante en el radiador debió estar al 80% de su capacidad.
- El motor debió estar “frio”; es decir, no estuvo en funcionamiento por lo menos una hora antes de la prueba.
- Colocamos la tapa modificada, ubicada en el cuello del radiador y finalizamos con la conexión del quick connect.
- Procedimos con la prueba.

4.1. Pruebas de calibración de sensores.

Para dicha calibración, el sensor de presión realizó una prueba de lectura con el sensor desconectado de la cámara, la medición encontrada oscilaba entre 1.05 y 1.1 BAR, lo cual equivale a 1 Atm, la presión atmosférica al nivel del mar.

Al verificar la variación de lectura de concentración de CO₂ en el sensor que se usó, tomamos como fuente el ciclo de respiración de CO₂ en la exhalación, según

la página web *co2meter.com* la concentración en una exhalación de 3800 PPM nos muestra un nivel alto, debido a que inhalar aire con 2000 PPM de concentración causa dolores de cabeza y malestar común, entonces el introducir pequeñas cantidades de aire exhalado a la cámara podíamos observar cambios en la lectura. No obtuvimos una calibración precisa, pero sí la detección de este. El propósito de esta investigación implicó realizar una diferencia entre una concentración menor o mayor, pero sin necesidad de llegar a una precisión extrema.

Otra medida importante, para verificar un buen funcionamiento adecuado del sensor, fue realizar mediciones en espacios abiertos y en la página web *co2meter.com* menciona que la concentración de CO₂ en el aire resulta ser entre 350 y 450 ppm y en la medición realizada obtuvimos 420 PPM en promedio, lo cual indica que el sensor trabaja dentro de los parámetros.

4.2. Prueba de control.

Para las pruebas de control fue necesario definir un punto de referencia, las mediciones realizadas a un generador que funciona normalmente y no muestra fallas en su sistema de refrigeración. En la prueba de CO₂, la lectura indicó una concentración de 500 PPM, y la presión se mantuvo constante durante la prueba de presión. En la figura 42 se muestra una captura de pantalla de las mediciones realizadas.

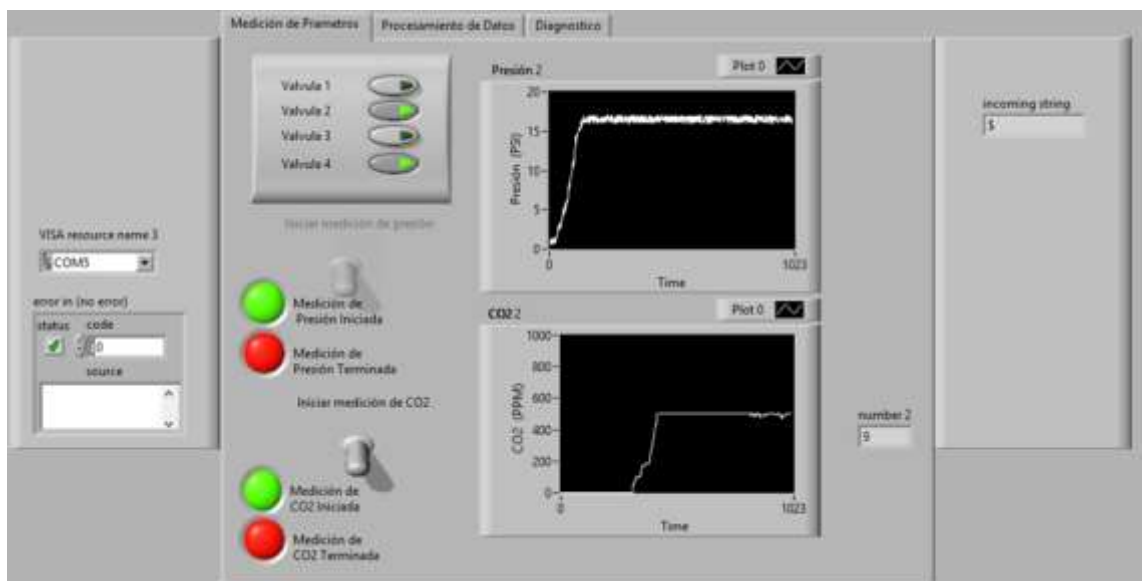


Figura 42: Panel HMI pestaña de medición de parámetros de la prueba de control
Fuente: Elaboración Propia.

En la imagen se observa que la medición de presión presenta una rampa ascendente, esta debido a que el motor se encuentra en funcionamiento y está presurizando el sistema de refrigeración, la presión de trabajo nominal es de 16 psi, en cuanto la presión alcanza este valor el motor deja de funcionar, y se continúan realizando mediciones hasta obtener una última medición después de 15 segundos de alcanzada la presión nominal de 16 PSI, como muestra la figura 43.

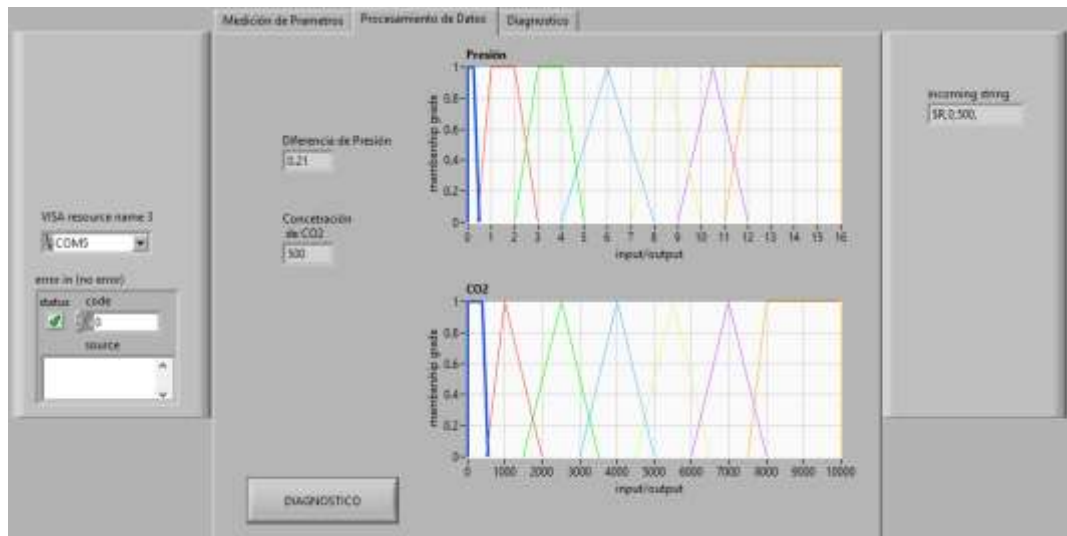


Figura 43: Panel HMI pestaña de procesamiento de datos de la prueba de control
Fuente: Elaboración Propia.

Los resultados obtenidos de la medición anterior se mostraron en la pestaña de procesamiento de datos, el bloque de controlador difuso procesó los datos según las reglas ingresadas y obtuvimos el resultado en la pestaña de diagnóstico como indica la figura 44.

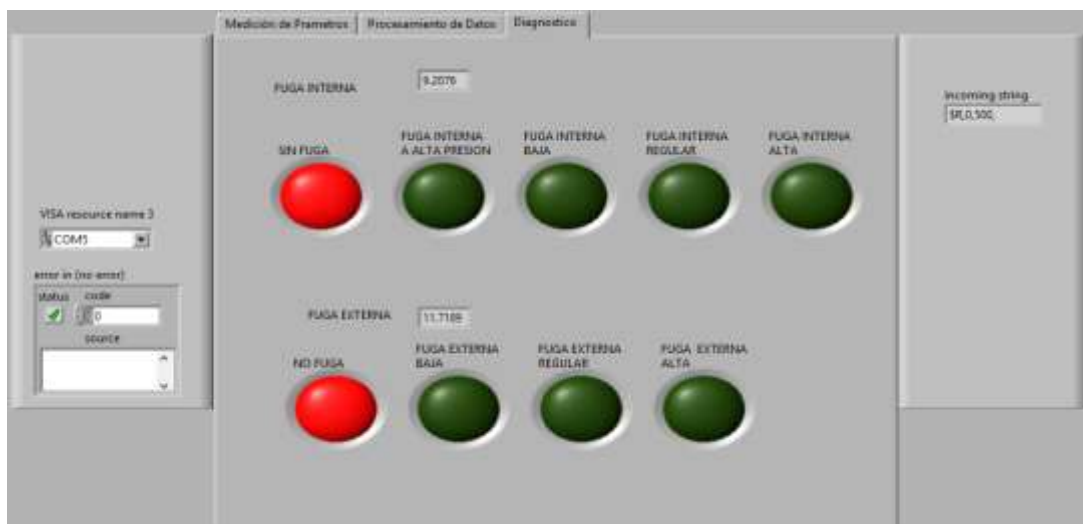


Figura 44: Panel HMI pestaña de diagnóstico de la prueba de control
Fuente: Elaboración Propia.

En esta pestaña obtuvimos el valor numérico de las salidas del controlador difuso y mediante comparaciones en los indicadores, la equivalencia de los valores numéricos con los lingüísticos. Estos valores lingüísticos representan las posibles fallas que se pueden presentar en el sistema de refrigeración. La muestra de color rojo representa el resultado del diagnóstico. Para este caso, no existe fuga interna o externa. Al observar los valores numéricos dados en la variable de salida INTERNA, como muestra la figura 45, obtuvimos un valor de 9.2076, y la fuga externa fue de 11,7189, como muestra la figura 46. Si ubicamos estos valores en la gráfica de conjuntos difusos de las salidas podemos determinar la correspondencia con las variables lingüísticas.

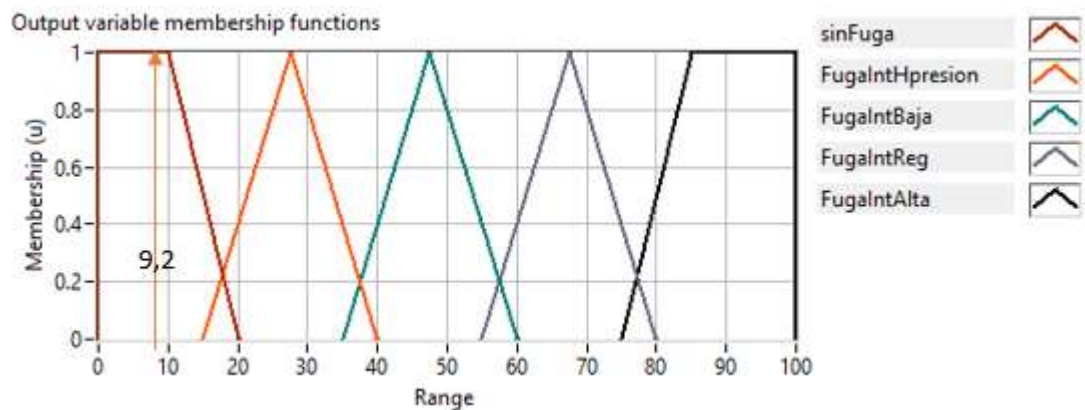


Figura 45: Función de pertenencia de la variable de salida INTERNO
Fuente: Elaboración Propia.

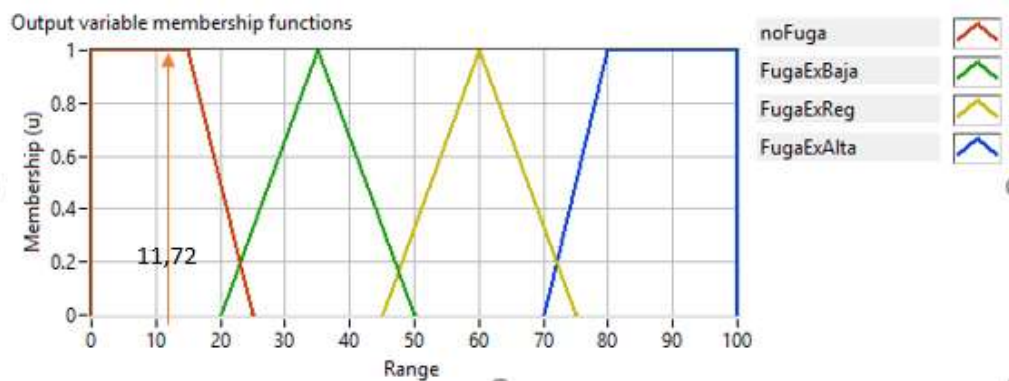


Figura 46: Función de pertenencia de la variable de salida EXTERNO
Fuente: Elaboración Propia.

Para esta gráfica que representa la existencia de fuga interna, el valor de 9.2 se ubica en el intervalo de la variable lingüística “sin Fuga” conjunto inicial trapezoidal de color rojo.

Esta segunda gráfica que representa la existencia de fuga externa, el valor de 11.72 se ubica en el intervalo de la variable lingüística “noFuga” conjunto inicial trapezoidal de color rojo, de esta manera se corroboró el resultado del algoritmo que se encuentra dentro de los parámetros estipulados.

4.3. Primera prueba de campo

El objeto de estudio, un generador eléctrico de 250 KVA que presenta una falla indicada en su panel de control, que se atribuye al sobrecalentamiento del motor diésel, como seguridad el grupo electrógeno realiza una parada de emergencia debido al exceso de temperatura en su sistema de enfriamiento, en la figura 47 se muestra el generador en cuestión.



Figura 47 Generador eléctrico EnerPower.
Fuente: Elaboración Propia.

Para esta prueba se debe tener en cuenta los procedimientos previos descritos al inicio de este capítulo, hecho esto se procedió con las pruebas. En esta primera prueba se observa que la medición de presión es estable en el tiempo, y se encontró que el nivel de la concentración era un poco alto en comparación con la lectura de la prueba de control. En la figura 48 se muestran las gráficas de ambas mediciones, en la primera pestaña la medición de parámetros, luego terminada la medición y contando con los datos necesarios se pasa automáticamente a la siguiente pestaña.

En esta pestaña de procesamiento de datos, figura 49, se demostró en los dos cuadros de texto el resultado de la medición de la diferencia de presión y la concentración de CO₂, con estos dos datos el controlador difuso logró calcular los

valores numéricos de las variables de salida que se muestran en la siguiente pestaña.

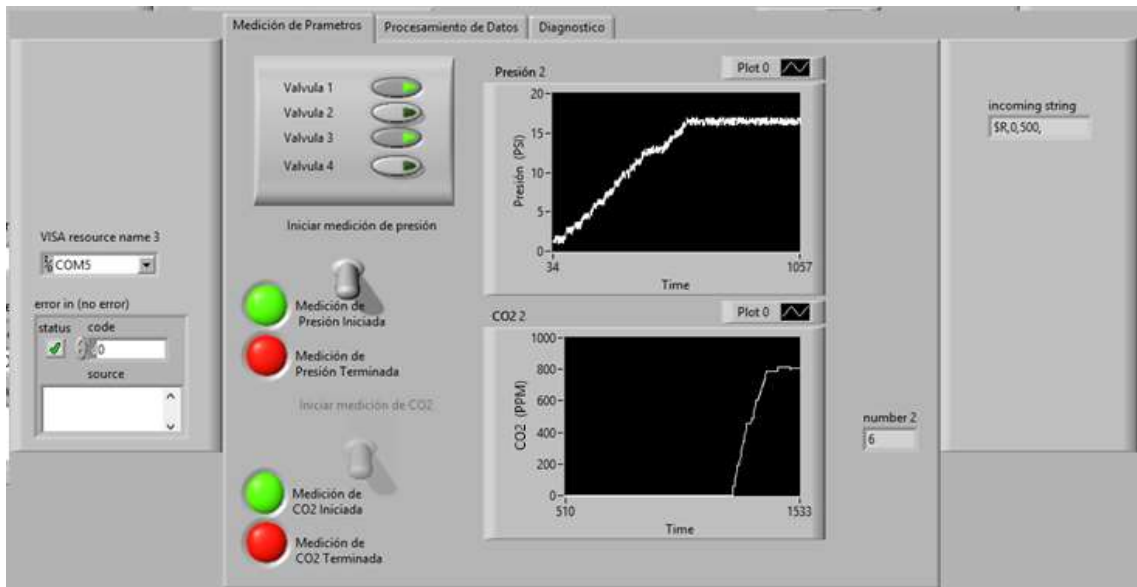


Figura 48: Panel HMI pestaña de medición de parámetros de la primera prueba
Fuente: Elaboración Propia.

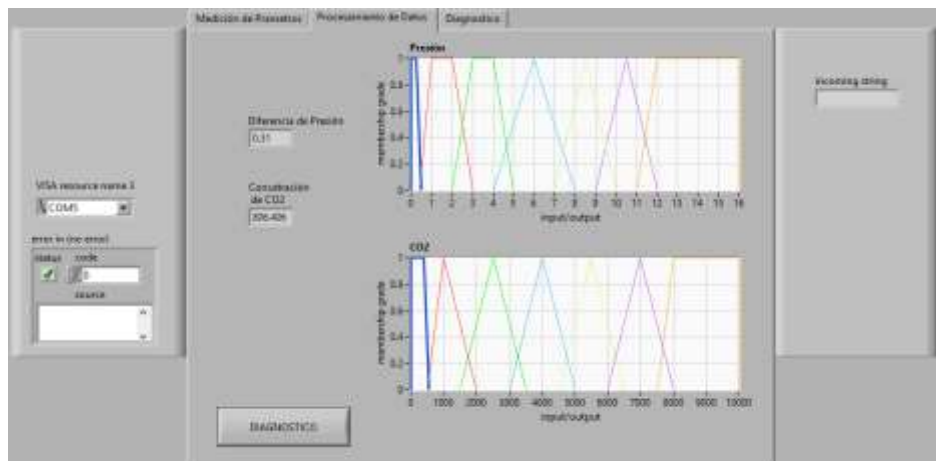


Figura 49: Panel HMI pestaña de procesamiento de datos de la primera prueba
Fuente: Elaboración Propia.

En la figura 50 mostramos el resultado numérico del controlador difuso de ambas variables, y los indicadores evidenciaron la correspondencia del valor numérico con la variable lingüística, en este caso el resultado de la prueba es fuga interna a alta presión esto para el caso de la variable de salida INTERNA, y para la siguiente variable que es EXTERNA el resultado es NO FUGA.



Figura 50: Panel HMI pestaña de diagnóstico de la primera prueba.
Fuente: Elaboración Propia.

De la pestaña de diagnóstico obtenemos los datos numéricos de las variables de salida del controlador de inferencia difusa, se observa un valor de 27.5002 para la variable INTERNA y 11.0657 para la variable EXTERNA. Si se grafican estos valores en las funciones de pertenencia correspondientes a estas variables, se puede determinar gráficamente la correspondencia con sus variables lingüísticas. Para la variable de salida INTERNA, en la figura 51 se muestra que el valor calculado se ubica en el segundo triángulo que corresponde a FugaIntHpresion.

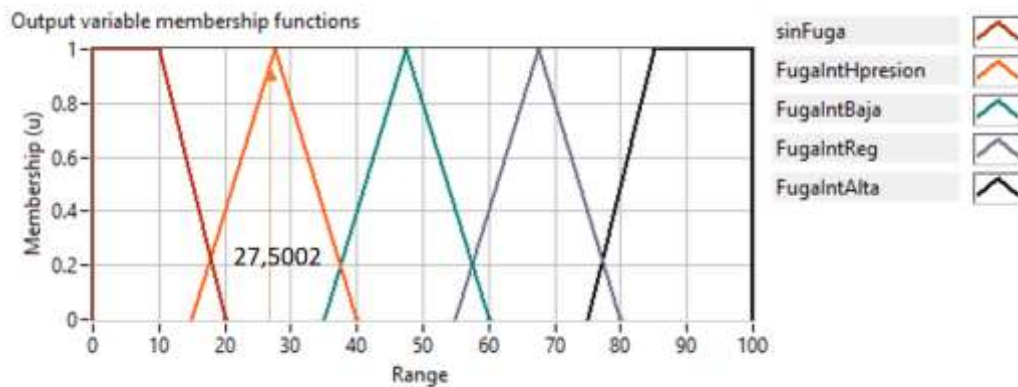


Figura 51: Función de pertenencia de la variable de salida INTERNA
Fuente: Elaboración Propia.

Para la variable EXTERNA, en la figura 52 se muestran las funciones de pertenencia de la variable.

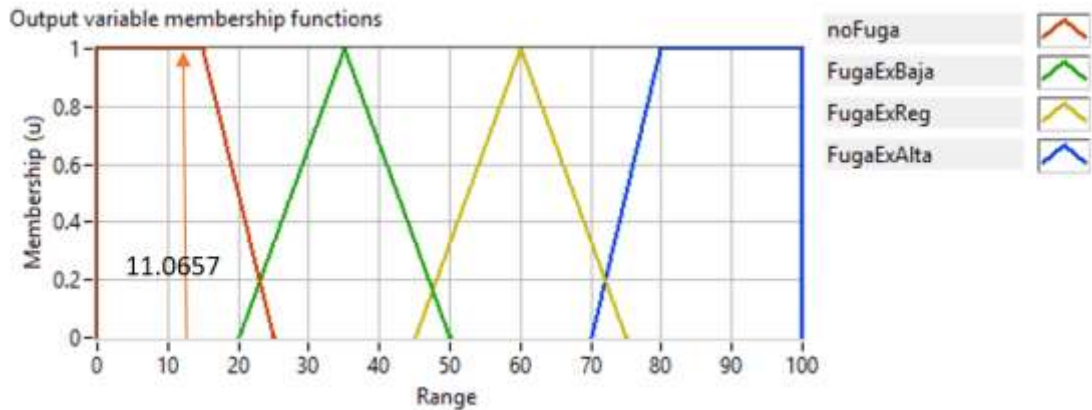


Figura 52: Función de pertenencia de la variable de salida EXTERNA

Fuente: Elaboración Propia.

De esta manera validamos los resultados de salida en la pestaña de diagnóstico.

4.4. Segunda prueba de campo

Para la segunda prueba de campo se obtuvo un resultado diferente comparando la primera prueba con la segunda prueba, la diferencia parece ser mínima, pero en este caso los resultados del diagnóstico en la variable EXTERNA fueron diferente y el resultado de la variable INTERNA se mantuvo. A continuación, se muestran los datos obtenidos en las figuras siguientes. La figura 53 muestra el panel HMI con la pestaña de medición de parámetros.

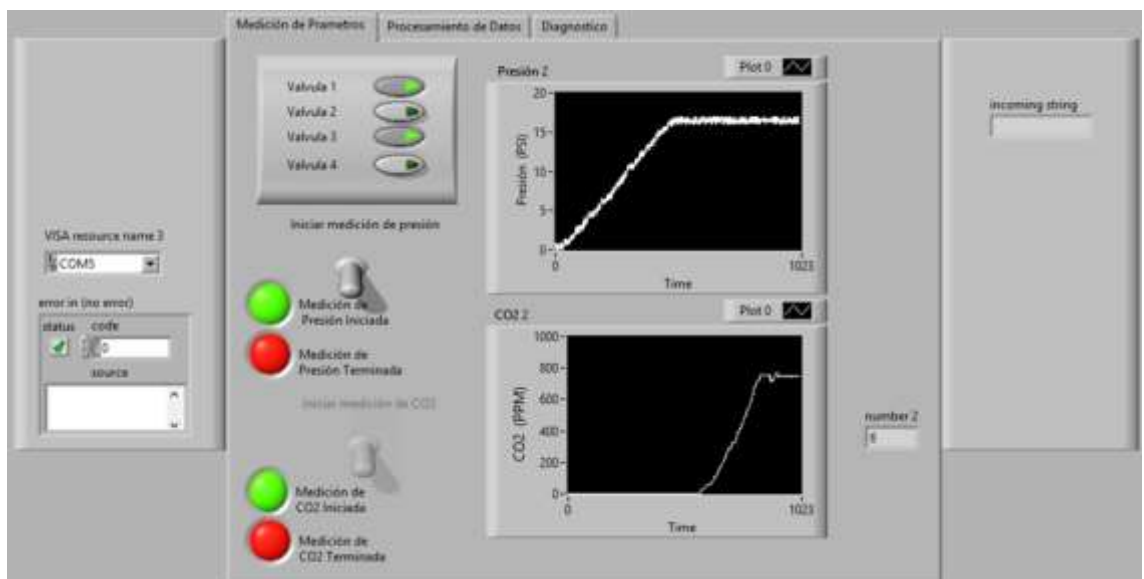


Figura 53: Panel HMI pestaña de medición de parámetros de la segunda prueba

Fuente: Elaboración Propia.

En la figura 54 mostramos la pestaña de procesamiento de datos donde evidenciamos los resultados obtenidos de la medición, los cuales serán los datos de entrada al controlador. Así como también, se muestran las funciones de pertenencia de cada variable, en este caso se evidencia el dato de diferencia de presión que se midió: 0.41 PSI y la concentración de CO2 que fue 745.04, con estos datos pasamos a la siguiente pestaña.

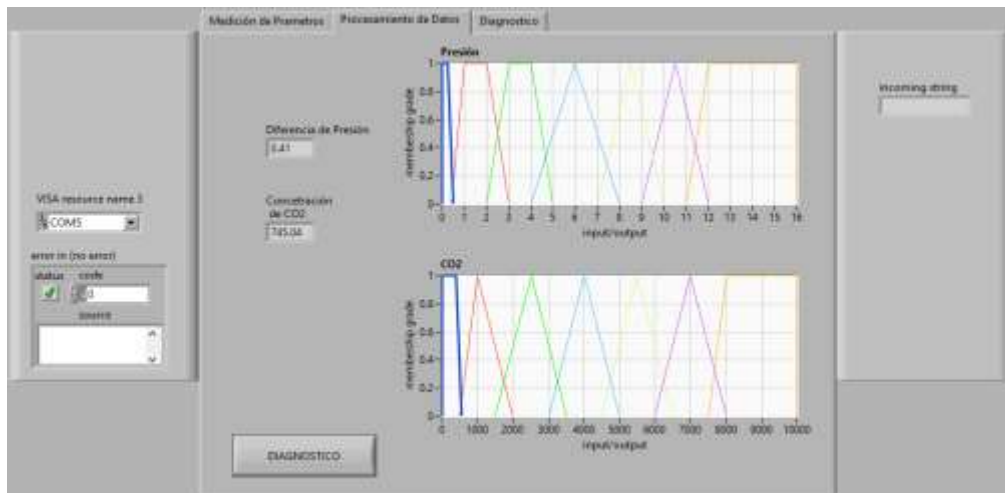


Figura 54: Panel HMI pestaña de procesamiento de datos de la segunda prueba.
Fuente: Elaboración Propia.

La última pestaña se muestra en la figura 55, que corresponde al diagnóstico, y es donde observamos la diferencia en la variable EXTERNA, que muestra el resultado de FUGA EXTERNA BAJA, cuando en la primera medición mostraba NO FUGA, Para ello, se obtuvieron los siguientes valores numéricos, para la variable INTERNA 24.5428 y para la variable EXTERNA 12.8396.

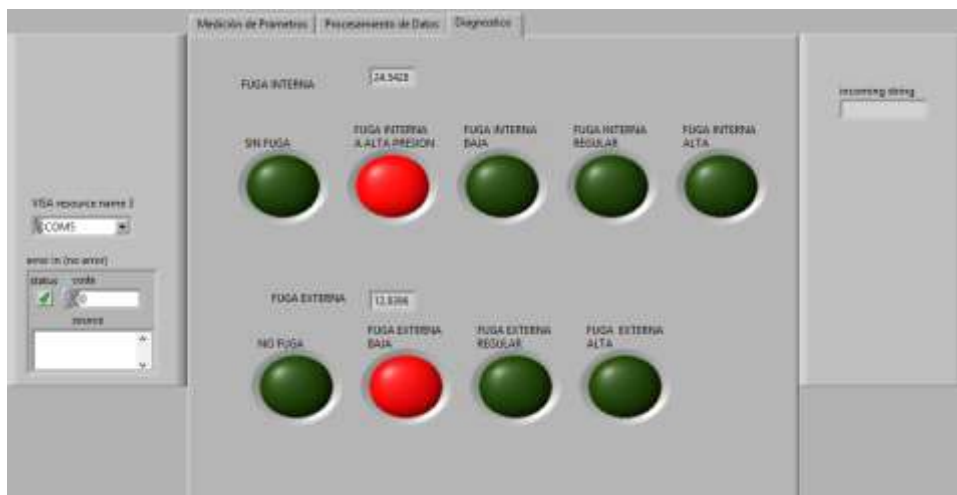


Figura 55: Panel HMI pestaña de diagnóstico de la segunda prueba.
Fuente: Elaboración Propia.

Con los valores obtenidos en la pestaña de diagnóstico podemos realizar la verificación gráfica de las respuestas. En la figura 56 se muestran las funciones de pertenencia de la variable Interna.

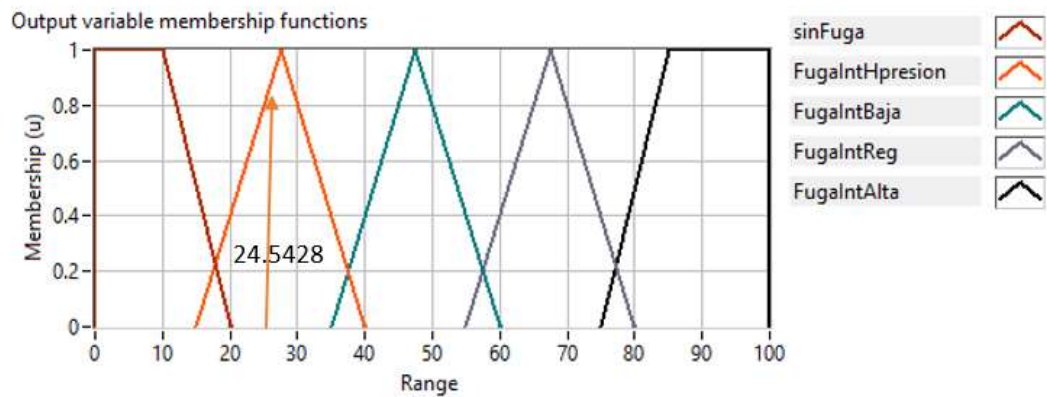


Figura 56: Función de pertenencia de la variable de salida INTERNA
Fuente: Elaboración Propia.

El resultado numérico del controlador difuso corresponde a la función de pertenencia triangular FugaIntHpresion, el mismo resultado que la primera prueba, y el mismo que se muestra en la pestaña de diagnóstico.

De la misma manera se realizó la verificación gráfica para la otra variable de salida que corresponde a Fuga Externa, en la figura 57 se muestran las funciones de pertenencia de esta variable, donde el valor de salida del controlador fue 12.8396.

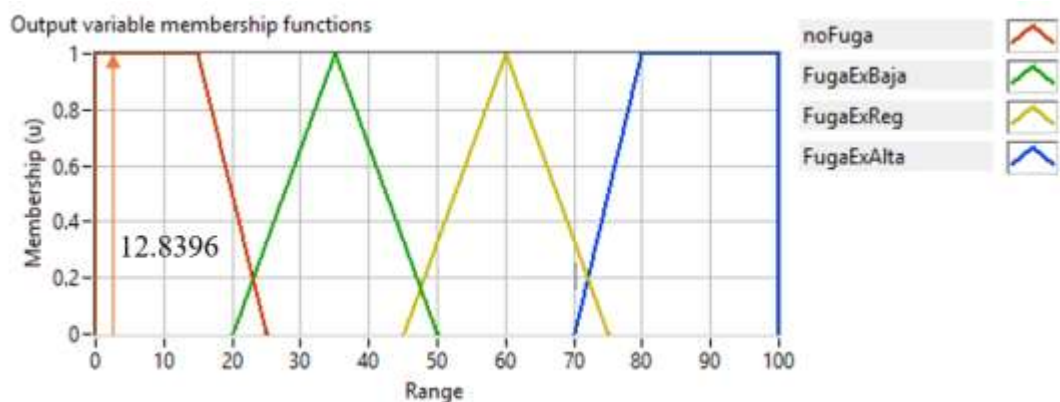


Figura 57 Función de pertenencia de la variable de salida INTERNA
Fuente: Elaboración Propia.

El detalle de esta prueba nos permitió corregir las funciones de pertenencia de la variable de diferencia de presión, debido al ruido de medición el cual afectó nuestro

rango. Entonces, al incrementar el rango de la primera función “nulo” en la siguiente prueba, se aprecia un resultado que concuerda con la primera prueba, y esta prueba permitió tomar en cuenta una corrección en las comparaciones debido a que según el gráfico debió activarse el indicador de no fuga.

4.5. Tercera prueba de campo

Para realizar esta prueba se corrigió el rango de la variable de diferencia de presión para corroborar si el cambio tuviese un efecto significativo en el resultado, en la figura 58 se muestran los datos obtenidos en la prueba.

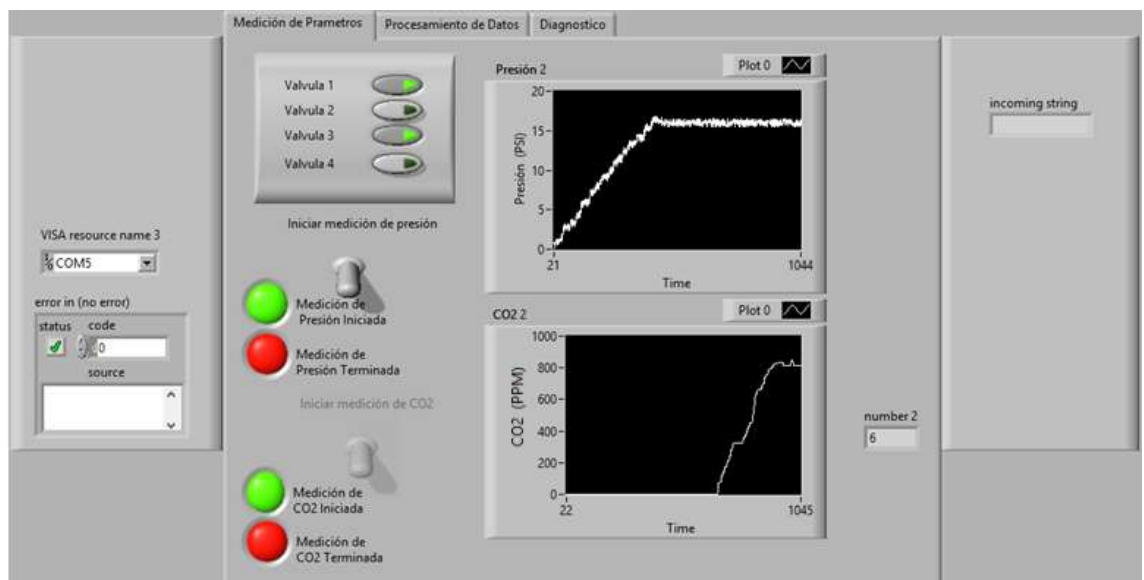


Figura 58: Panel HMI pestaña de medición de parámetros de la tercera prueba
Fuente: Elaboración Propia.

En la figura 59 se muestran los resultados de la medición de presión con un valor de 0.51 PSI y una concentración de 857.43 PPM, se observa también la modificación de la primera función de pertenencia de la variable de presión que ahora abarca hasta 1 PSI cuando antes era solo hasta 0.5. Debido al ruido de medición se presentó un problema en el resultado del diagnóstico, esto puede ser solucionado filtrando mejor las medidas obtenidas. Para el caso actual el tiempo solamente permitió realizar este cambio.

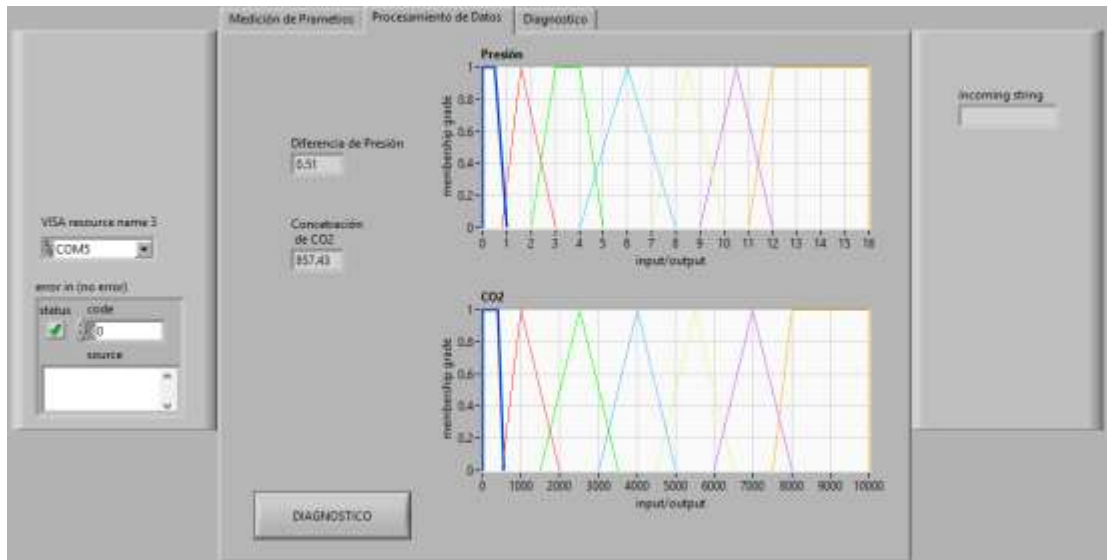


Figura 59: Panel HMI pestaña de procesamiento de datos de la tercera prueba
Fuente: Elaboración Propia.

En la última pestaña que se muestra en la figura 60, que corresponde al diagnóstico se observa la diferencia en la variable EXTERNA que muestra el resultado de NO FUGA, y para la variable Interna el diagnóstico es FUGA INTERNA A ALTA PRESIÓN. Asimismo, se obtuvieron los siguientes valores numéricos para la variable INTERNA 27.5285 y para la variable EXTERNA 10.8398.

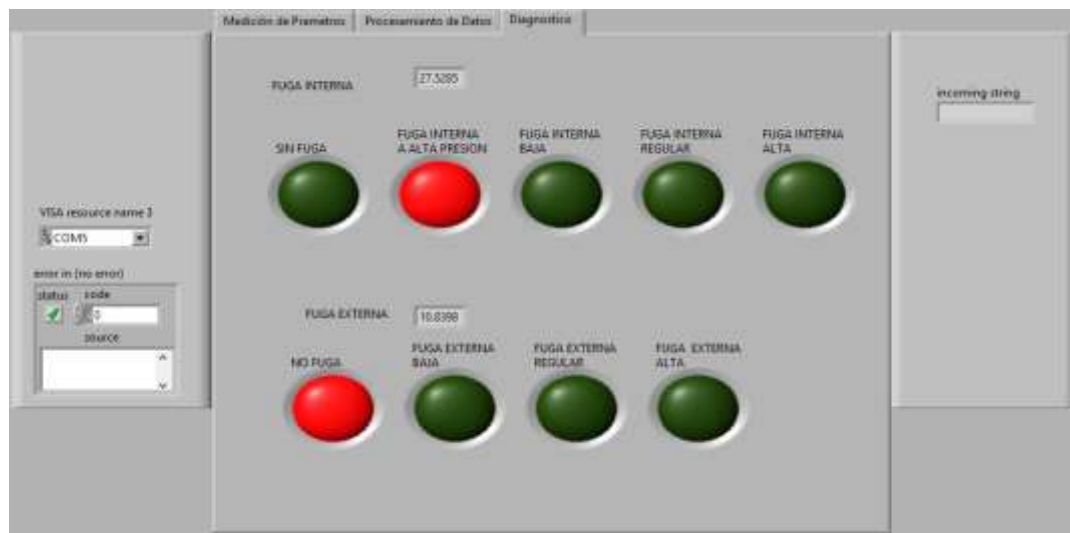


Figura 60: Panel HMI pestaña de diagnóstico de la tercera prueba
Fuente: Elaboración Propia.

Con los valores obtenidos en la pestaña de diagnóstico se puede realizar la verificación gráfica de las respuestas; y, en la figura 61 se muestran las funciones de pertenencia de la variable INTERNA.

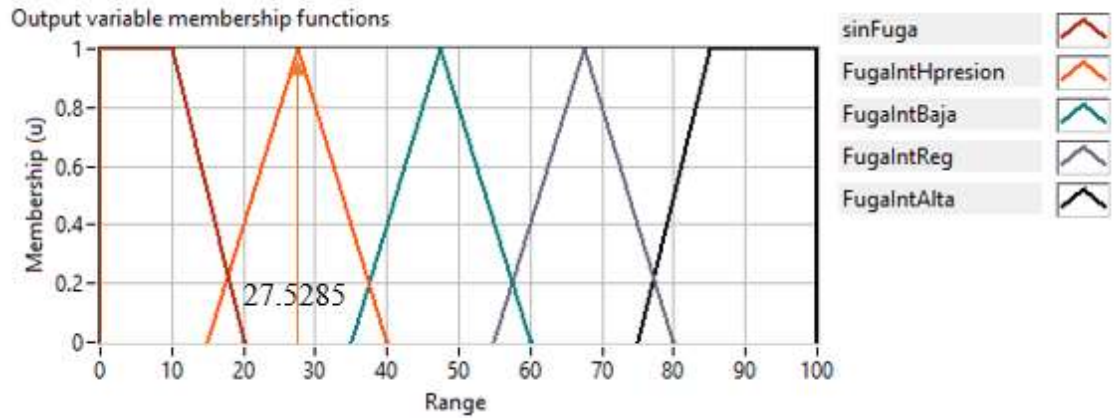


Figura 61: Función de pertenencia de la variable de salida INTERNA
Fuente: Elaboración Propia.

El resultado numérico del controlador difuso corresponde a la función de pertenencia triangular FugaIntHpresion, en la figura 62 se evidenció el mismo resultado que la primera prueba, y el mismo que se muestra en la pestaña de diagnóstico.

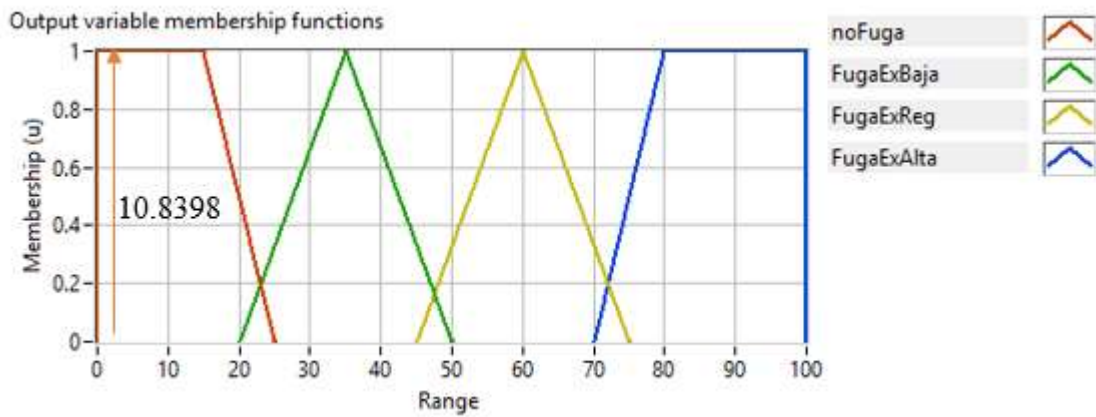


Figura 62: función de pertenencia de la variable de salida ETERNA
Fuente: Elaboración Propia.

De esta manera validamos los resultados de salida en la pestaña de diagnóstico.

CONCLUSIONES

- 1) Se logro diseñar e implementar una interfaz mecánica con el radiador, que fue usada como soporte de los sensores y parte electrónica. Para mantener la hermeticidad se usaron acoples neumáticos y selladores de silicona, en la figura 19 se detalla una imagen del diseño con todos sus componentes, el material acrílico utilizado, es fácil de unir, y su superficie liza permitió lograr que el sellador mantenga hermético el interior, el espesor de 18 mm del acrílico brinda solides estructural permitiendo atornillar las partes, mediante agujeros roscados, realizados directamente en el material
- 2) De las pruebas realizadas encontramos que, los parámetros ideales de funcionamiento del sistema de refrigeración para establecer las reglas del algoritmo, fueron medidos con éxito, usando un generador eléctrico 100% operativo como elemento de control, además, se debe tener en cuenta el ambiente donde se realiza la medición, debido a que en espacios confinados donde se encuentran motores de combustión en funcionamiento la lectura de CO₂ puede llegar a ser lo suficientemente alta como para ser confundida con una falla, es por este motivo que se realizan pruebas de control midiendo la concentración de CO₂ en el ambiente donde se encuentren los equipos a ser diagnosticados, y se actualizan los valores de las funciones de transferencia según los datos obtenidos.
- 3) Finalmente, el uso de las librerías del software Labview permitió la implementación de la inferencia difusa, con la ayuda de la herramienta de diseño de sistemas difusos, el uso de los bloques de programación de la librería de logica difusa fue posible lograr un sistema que permitió implementar una interfaz de usuario en un ordenador que procesa los datos adquiridos de los sensores a través de un enlace bluetooth con un microcontrolador, y visualiza el diagnostico de las posibles causas de sobrecalentamiento. Para el equipo en el cual se realizaron las pruebas el prototipo dio como resultado que existía una fuga interna en el sistema de refrigeración que solo se presentaba con el motor encendido que es cuando la presión del sistema es más alta.

RECOMENDACIONES

- 1) El uso de la herramienta de diseño de sistemas difusos provista por el software Labview, si bien permite desarrollar un controlador difuso confiable, es recomendable usarlo en conjunto con la librería de fuzzy logic, esto permitiría actualizar los conjuntos difusos de las variables de entrada y actualizar en cada uso el archivo generado por la herramienta de diseño. Para este caso en particular se tuvieron que hacer modificaciones al archivo del controlador difuso debido a que, al realizar las mediciones de control, la concentración de CO₂ estaba fuera de la función de pertenencia prevista. Esta situación se presentó al realizar las pruebas de campo en un lugar donde la concentración de CO₂ era más alta de lo normal, por los equipos que se encontraban en funcionamiento en un espacio confinado. Se podía usar la medición de control como referencia y la librería de Fuzzy logic del software para actualizar automáticamente las funciones de pertenencia de las variables de entrada del controlador de inferencia difusa.
- 2) Para futuras investigaciones relacionadas, se podría incluir una prueba que permita conocer el estado de los componentes del sistema de refrigeración usando el mismo principio de medición de presión. Podría ser plausible la posibilidad de conocer si la bomba de agua del sistema de refrigeración funciona de manera óptima midiendo la presión del sistema con el motor en funcionamiento.
- 3) Añadir una tercera variable, la temperatura, que, en combinación con la medición de presión, podría indicar si el termostato del sistema de refrigeración llega a actuar a la temperatura óptima. Esto abre la puerta a que en futuras investigaciones pueda lograrse un prototipo de diagnóstico completo y preciso.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bohacz R. (2007). Engine Cooling Systems New York, New York, USA.
- J.P. Aurrand-Lions, L. Fournier, P. Jarri, et al. Application of fuzzy control for ISIS vehicle braking. In Proceedings of Fuzzy and Neuronal Systems, and Vehicle applications'91, 1991.
- Jiménez, I. (2012). *Control de temperatura de un horno eléctrico mediante lógica difusa* (tesis de pregrado) de la Universidad Tecnológica de La Mixteca, Oaxaca-México.
- Jiménez, R. (2007) *Diseño de un controlador lógico difuso, aplicado al control de posición de un servomotor de C.D., usando un algoritmo genético* (tesis de maestría) Universidad Veracruzana, Veracruz-México
- L.A. Zadeh. Outline of a new approach to the analysis of complex system. IEEE Transaction on System Man and Cybernetics, 1:28–44, 1973.
- L.A. Zadeh. The concept of a linguistic variable and its applications to approximate reasoning. part i, ii, iii. Information Science, 8-9:199–249, 301–357, 43–80, 1975
- Navas, R. (2000). *Diseño y aplicación de controladores Neuro-Difusos integrados en modo mixto de alta complejidad* (tesis de doctorado) Universidad de Málaga, Málaga-España
- Ruiz de Somocurcio, A. (2008) *Control de tráfico vehicular automatizado utilizando lógica difusa* (tesis de pregrado) Universidad Ricardo Palma, Lima-Perú.
- Rivera, E. (2014) *Supervisión y control de un proceso industrial autónomo de pintado aplicando lógica difusa y visión artificial* (tesis de pregrado) Universidad Ricardo Palma, Lima-Perú.
- Sanchez, T. (2015) *Sistema experto para el diagnóstico y tratamiento de cáncer de cuello uterino basado en Lógica Difusa* (tesis de pregrado) Escuela Mayor de San Andrés, La Paz-Bolivia.
- Sánchez Gómez, R. (2009). Inteligencia en redes de comunicación Trabajo Optativo Lógica Difusa.
- Soto, S. y Gutiérrez, J. (2008) *Desarrollo e implementación de un modelo de Gestión para el área logística de una empresa manufacturera de productos plásticos* (tesis de pregrado) Universidad Ricardo Palma, Lima-Perú.

ANEXO

Anexo 01

Conjunto de reglas de Inferencia Difusa

N	Entrada 01	Variable 01	Entrada 02	Variable 02	Salida 01	Resultado 01	Salida 02	Resultado 02
1	Dif. de presion	nulo	CO2	none	Interna	sinFuga	Externa	noFuga
2	Dif. de presion	nulo	CO2	low0	Interna	FugaIntHpresion	Externa	noFuga
3	Dif. de presion	nulo	CO2	low1	Interna	FugaIntHpresion	Externa	noFuga
4	Dif. de presion	nulo	CO2	mid0	Interna	FugaIntHpresion	Externa	noFuga
5	Dif. de presion	nulo	CO2	mid1	Interna	FugaIntHpresion	Externa	noFuga
6	Dif. de presion	nulo	CO2	high0	Interna	FugaIntHpresion	Externa	noFuga
7	Dif. de presion	nulo	CO2	high1	Interna	FugaIntHpresion	Externa	noFuga
8	Dif. de presion	min0	CO2	none	Interna	sinFuga	Externa	FugaExBaja
9	Dif. de presion	min0	CO2	low0	Interna	FugaIntBaja	Externa	FugaExBaja
10	Dif. de presion	min0	CO2	low1	Interna	FugaIntBaja	Externa	FugaExBaja
11	Dif. de presion	min0	CO2	mid0	Interna	FugaIntReg	Externa	noFuga
12	Dif. de presion	min0	CO2	mid1	Interna	FugaIntReg	Externa	noFuga
13	Dif. de presion	min0	CO2	high0	Interna	FugaIntAlta	Externa	noFuga
14	Dif. de presion	min0	CO2	high1	Interna	FugaIntAlta	Externa	noFuga
15	Dif. de presion	min1	CO2	none	Interna	sinFuga	Externa	FugaExBaja
16	Dif. de presion	min1	CO2	low0	Interna	FugaIntBaja	Externa	FugaExBaja
17	Dif. de presion	min1	CO2	low1	Interna	FugaIntBaja	Externa	FugaExBaja
18	Dif. de presion	min1	CO2	mid0	Interna	FugaIntReg	Externa	noFuga
19	Dif. de presion	min1	CO2	mid1	Interna	FugaIntReg	Externa	noFuga
20	Dif. de presion	min1	CO2	high0	Interna	FugaIntAlta	Externa	noFuga
21	Dif. de presion	min1	CO2	high1	Interna	FugaIntAlta	Externa	noFuga
22	Dif. de presion	med0	CO2	none	Interna	sinFuga	Externa	FugaExBaja
23	Dif. de presion	med0	CO2	low0	Interna	FugaIntBaja	Externa	FugaExBaja
24	Dif. de presion	med0	CO2	low1	Interna	FugaIntBaja	Externa	FugaExBaja
25	Dif. de presion	med0	CO2	mid0	Interna	FugaIntReg	Externa	noFuga
26	Dif. de presion	med0	CO2	mid1	Interna	FugaIntReg	Externa	noFuga
27	Dif. de	med0	CO2	high0	Interna	FugaIntAlta	Externa	noFuga

	presion							
28	Dif. de presion	med0	CO2	high1	Interna	FugaIntAlta	Externa	noFuga
29	Dif. de presion	med1	CO2	none	Interna	sinFuga	Externa	FugaExReg
30	Dif. de presion	med1	CO2	low0	Interna	FugaIntBaja	Externa	FugaExReg
31	Dif. de presion	med1	CO2	low1	Interna	FugaIntBaja	Externa	FugaExReg
32	Dif. de presion	med1	CO2	mid0	Interna	FugaIntReg	Externa	noFuga
33	Dif. de presion	med1	CO2	mid1	Interna	FugaIntReg	Externa	noFuga
34	Dif. de presion	med1	CO2	high0	Interna	FugaIntAlta	Externa	noFuga
35	Dif. de presion	med1	CO2	high1	Interna	FugaIntAlta	Externa	noFuga
36	Dif. de presion	max0	CO2	none	Interna	sinFuga	Externa	FugaExReg
37	Dif. de presion	max0	CO2	low0	Interna	FugaIntBaja	Externa	FugaExReg
38	Dif. de presion	max0	CO2	low1	Interna	FugaIntReg	Externa	FugaExReg
39	Dif. de presion	max0	CO2	mid0	Interna	FugaIntReg	Externa	noFuga
40	Dif. de presion	max0	CO2	mid1	Interna	FugaIntReg	Externa	noFuga
41	Dif. de presion	max0	CO2	high0	Interna	FugaIntAlta	Externa	noFuga
42	Dif. de presion	max0	CO2	high1	Interna	FugaIntAlta	Externa	noFuga
43	Dif. de presion	max1	CO2	none	Interna	sinFuga	Externa	FugaExAlta
44	Dif. de presion	max1	CO2	low0	Interna	FugaIntReg	Externa	FugaExAlta
45	Dif. de presion	max1	CO2	low1	Interna	FugaIntReg	Externa	FugaExAlta
46	Dif. de presion	max1	CO2	mid0	Interna	FugaIntReg	Externa	FugaExAlta
47	Dif. de presion	max1	CO2	mid1	Interna	FugaIntReg	Externa	FugaExAlta
48	Dif. de presion	max1	CO2	high0	Interna	FugaIntAlta	Externa	FugaExAlta
49	Dif. de presion	max1	CO2	high1	Interna	FugaIntAlta	Externa	noFuga