



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

UNIDAD PROFESIONAL ADOLFO LÓPEZ MATEOS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA EN CONTROL Y AUTOMATIZACIÓN

“Desarrollo de un sistema de monitoreo difuso para detectar fugas en un sistema de distribución de líquidos”

TESIS QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO EN CONTROL Y
AUTOMATIZACIÓN

PRESENTAN:

Diego Alberto Godoy Espinosa

Ivan Antonio González Navarro

Rodrigo Morales Valencia

Asesores:

Dr. Álvarez Villalobos Israel

Dr. Sánchez Silva Florencio

México, D. F.

Noviembre 2011

CONTENIDO

Resumen	I
Introducción	II
Capítulo 1. Métodos para la detección de fugas	5
1.1. Generalidades de las fugas	8
1.1.1. Tipos de fugas	8
1.1.2. Antecedentes de la detección de fugas	14
1.1.3. Beneficios de la detección de fugas	18
1.2. Métodos de detección de fugas	20
1.2.1. Generalidades.	20
1.2.2. Métodos de detección de fugas	21
1.2.2.1. Métodos acústicos	21
1.2.2.2. Métodos no acústicos	25
Capítulo 2. Principios de un sistema de monitoreo difuso	28
2.1. Antecedentes	28
2.2. Componentes de la lógica difusa	30
2.2.1. Reglas lingüísticas	30
2.2.2. Conjuntos difusos	32
2.2.3. Operaciones con conjuntos difusos	35
2.2.4. Proceso de inferencia	36
2.3. Métodos de desfuzificación	37
2.4. Controlador difuso	41
2.5. Fundamentos del movimiento de fluidos en tuberías	42
2.6. Componentes de los sistemas de distribución de fluidos	47
2.6.1. Instrumentos usados en los sistemas de distribución de fluidos	47
2.6.2. Sistemas SCADA	50
Capítulo 3. Desarrollo del sistema de monitoreo difuso para la detección de fugas	53
3.1. Caracterización del sistema original	53
3.2. Caracterización del sistema con las modificaciones propuestas	60
3.3. Diseño del controlador difuso	67
3.3.1. Selección de las variables de entrada y salida	67

3.3.2. Selección de funciones de membresía	70
3.3.3. Definición de las reglas lingüísticas	73
3.3.4. Superficies de control	75
3.3.5. Diseño de la interfaz gráfica	78
3.3.6. Programación de la interface gráfica	82
Capítulo 4. Resultados y análisis	88
4.1 Modo de operación correcto	88
4.2 Modo de operación de falla	92
4.3 Modo de operación de fuga	95
4.4 Costos	98
Conclusiones	100
Trabajos futuros	102
Bibliografía	103
Anexo A. Diagrama de Moody	104
Anexo B. Instalación actual	105
Anexo C. Instalación propuesta	106
Anexo D. Conjunto de reglas difusas	107
Anexo E. Código de la programación del sistema	113

RESUMEN

En la actualidad existe una creciente preocupación sobre el cuidado de los recursos naturales en general, sin embargo el agua es el recurso sobre el cual se han hecho mayores esfuerzos para su conservación y cuidado, esto se debe a la íntima relación que guarda con el ser humano, lo cual demuestra el énfasis en dichos esfuerzos. Por lo cual que el presente trabajo de tesis se encaminó al desarrollo de un método de detección de fugas en sistemas de distribución de líquidos cuyo objetivo principal es el desarrollo de un sistema de monitoreo que detecte fugas en una red de conducción de líquidos por medio de tuberías, esto basado en la lógica difusa que nos permite imitar la toma de decisiones del ser humano, haciendo que el monitoreo sobre la red de distribución sea flexible y más rápida que con métodos convencionales.

Para el desarrollo de este proyecto se realizó la caracterización de la red de distribución de agua de la empresa AstraZeneca S.A. de C.V., considerando los accesorios de la misma y las condiciones de trabajo de la red. Con estos valores es posible obtener, la caída de presión total del sistema. Sin embargo la red se modificó de tal manera que se ajustara a las necesidades del sistema de monitoreo desarrollado, calculando de igual manera los valores de la nueva red.

Se consideró la presión y el flujo, para realizar el modelado difuso y el posterior desarrollo del controlador difuso que va a monitorear la red empleada, para determinar el estado en el cual se encuentra el sistema, dichos estados son: correcto, falla y fuga. Por medio de las pruebas efectuadas al sistema se comprobó el correcto funcionamiento del sistema de monitoreo, esto se realizó simulando valores de entrada de presión y flujo para cada sección de la red, dichos valores se comparan por medio del controlador difuso y se determina el estado de cada sección. Al final del proyecto se logró el objetivo deseado, ya que se obtuvo el sistema de monitoreo con una interfaz hombre-máquina (desarrollada en LabView) que nos permite conocer el estado de las secciones de la tubería, bajo los criterios antes mencionados.

INTRODUCCIÓN

El término fuga se define como el escape de parte de un líquido que está siendo transportado de un punto a otro. La detección de fugas en los sistemas de distribución especialmente de agua potable, se ha vuelto primordial en países desarrollados. Esto se debe a que los sistemas de distribución son muy antiguos, llegando en algunos casos a contar con más de cien años. También hay otros factores como la mala planificación urbana que no contempla que los sistemas de distribución de agua deben crecer a la par de la explosión demográfica de la ciudad donde se encuentran, es decir, se tienen diseños inflexibles. Por otro lado, también se tiene el desgaste mecánico y desastres naturales que pone en peligro a estos sistemas.

En el Distrito Federal, el suministro de agua llega a los 32 mil 500 litros por segundo, de este total el Sistema de Aguas de la Ciudad de México estima que se pierde cerca de un 38%, a su vez de este 38%, el 50% se deriva en fugas dentro de la red de distribución, el 43% en fugas en instalaciones domésticas, mientras que el 7% se deriva de tomas clandestinas [5]. Por otro lado, se considera la pérdida de presión como el aumento de consumo y por lo tanto, para subsanar la pérdida de presión en la tubería se envía una presión mayor desde la central de distribución, ocasionando con esto un mayor gasto energético.

Se puede apreciar que los problemas van desde el tipo industrial al “doméstico” siendo las fugas las causantes de pérdidas en diversos sectores y que multiplican los problemas en la vida cotidiana. Por eso es de vital importancia cuidar el agua, se debe integrar el conocimiento existente para poder diseñar un sistema de medición confiable y oportuno.

Debido a la creciente importancia de este problema, se han desarrollado varios métodos para la detección de fugas, entre los cuales destacan: el método por ondas electromagnéticas, el cual consiste en mandar una onda a través de la tubería y seguir su trayectoria por la misma, otro método similar es el ultrasónico siendo este el más usado actualmente. Hay otros métodos más laboriosos como

los de tipo acústico en los cuales se debe literalmente “Escuchar” a la tubería, ya que se basan en la detección de ruidos anormales en la tubería.

Todos estos métodos tienen grandes inconvenientes, como costos elevados de implementación y de mantenimiento, en el caso del acústico y del electromagnético el ruido del sistema debe de ser eliminado casi por completo para tener una medición fidedigna, el uso de personal adicional, un largo tiempo de localización de la fuga y en los casos de ser redes muy grandes las pérdidas por fugas pueden ser consideradas como errores de medición. [8].

El presente método propone ayudar a minimizar costos, reduciendo el número de instrumentos que se emplean para la adquisición de datos además de ser más preciso que algunos métodos convencionales. Otro punto importante es que no necesita de equipos muy sofisticados que tengan un elevado precio y no requiere una alta capacitación del operario. Por lo cual se realiza esta propuesta para la detección de fugas, utilizando un monitoreo basado en lógica difusa. Este método nos permite enfocarnos en las características que se presentan al existir una fuga en un sistema de distribución de agua, en vez de caracterizarlo completamente. Al utilizar el conocimiento de los diferentes métodos en conjunto, además de las recomendaciones para la detección de fugas, se puede crear una serie de reglas difusas que le brinden a nuestro sistema de detección un gran nivel de flexibilidad y una precisión en la detección y ubicación de dichas fugas. Es necesario realizar el levantamiento del sistema de distribución, en este caso, con el fin de obtener las variables que existen en el sistema. Se realizará el levantamiento de la topología y características del sistema de distribución de agua potable de la empresa AztraZeneca para plantear los puntos más importantes que nos ayudarán en la resolución del proyecto. Una vez que se conoce el sistema es necesario seleccionar la instrumentación adecuada para este, conociéndose las características se empezará a formular las reglas de lógica difusa para plantear los algoritmos necesarios para el sistema de monitoreo difuso, que se acompañará con una simulación utilizando métodos heurísticos con lo cual se logrará crear

algoritmos de lógica difusa adecuados los cuales serán implementados mediante un sistema SCADA.

En el capítulo uno se contextualizará el problema de las fugas a nivel mundial y local, para comprender la necesidad de contar con un método eficiente de detección de fugas. Se encontrará la definición de fuga, así como algunos términos inherentes a dicha definición y algunas precisiones para evitar la ambigüedad con el término de fuga y sus diferentes acepciones. Otro punto relevante que se podrá encontrar en este capítulo es el desarrollo histórico de los métodos de detección de fugas así como las tendencias actuales en el área de detección de fugas.

El capítulo dos sentará las bases teóricas que se necesitan para el desarrollo del sistema de monitoreo, se hablará brevemente de los fundamentos básicos de la lógica difusa que se aplicaron para el desarrollo del modelado y del controlador difuso. La red debe de ser caracterizada para poder implementar el método propuesto en dicha red, por lo que también se describen las ecuaciones empeladas para dicha caracterización así como la instrumentación conveniente para un sistema de monitoreo en este tipo de redes de distribución además de una breve introducción a los sistemas SCADA.

El desarrollo de todo el sistema de monitoreo difuso se podrá encontrar en el capítulo tres en cual se muestra la forma en la que se aplicaron las ecuaciones mostradas en el capítulo dos para la caracterización de la tubería, así como el uso de dichos datos en el modelado difuso, donde se seleccionaron todas las características útiles del sistema generándose las reglas lingüísticas y sus respectivas funciones de membresía. Se podrá apreciar a detalle la programación del controlador, así como de la interfaz gráfica realizada en LabView. Finalmente en el capítulo cuatro se analizarán todas las pruebas hechas al sistema de monitoreo bajo los estados de las secciones de la tubería (correcto, falla, fuga) y se hará una estimación de costos de la implementación del proyecto.

CAPÍTULO 1

MÉTODOS PARA LA DETECCIÓN DE FUGAS

La importancia de la detección de fugas en un sistema de distribución de agua, radica en la conservación y manejo adecuado del recurso. El agua por si misma representa una parte fundamental de la vida en el planeta, tan solo en el cuerpo humano se estima que el agua representa dos tercios del peso total, lo anterior en función de la edad del ser humano [1], el agua es el segundo componente más importante en el ser humano después del aire.

A finales del año 2000, en el planeta habitaban 6 billones de personas, mientras que en 1974 existían 4 billones de habitantes, mientras que para finales del año 2011 se espera que la población mundial aumente a 7 billones de personas. Lo que ha provocado que los gobiernos se vean en la necesidad de implementar nuevas estrategias para proveer a la población de sus necesidades básicas tales como agua, alimento, servicios de salud, entre otros. La problemática que representa una cobertura universal de estas necesidades ha logrado que la población entienda que existen recursos que no pueden seguir siendo explotados al ritmo actual como por ejemplo el agua y los alimentos.

La errada creencia de la abundancia del agua está fundamentada en que la cantidad de agua que hay en la tierra alcanza los 1385 millones de km^3 , desafortunadamente menos del 3% es agua dulce. Sin embargo en la actualidad existen más de 28 países que tienen carencia del vital líquido, ya que cuentan con una dotación menor a los 1000 m^3 por habitante, en México se tiene una disponibilidad media de 5000 m^3 por habitante al año.

Se estima que a nivel mundial el 65% del agua se destina para el riego agrícola, el 25% para uso industrial, el 10% para el consumo doméstico y servicios urbanos. En México se usa el 83% para riego agrícola, 12% para uso doméstico, 3% al uso industrial y el 2% restante a acuicultura [2].

El ser humano se ha visto en la necesidad de desarrollar nuevos sistemas de almacenaje, extracción, envío y tratamiento de agua, logrando grandes éxitos de la ingeniería en este rubro; sin embargo existen países que aun no cuentan con la infraestructura adecuada para realizar dichas acciones. Los países desarrollados tienen sistemas de distribución aceptables pero sufren de problemas de sustentabilidad a largo plazo. Estos sistemas de distribución han tenido éxito para solventar el abasto de la población sin embargo se ha sacrificado la calidad en el sistema de distribución ya que se deja un de lado el mantenimiento de las partes más antiguas del sistema. Mientras tanto existen países que por razones económicas, políticas y/o sociales, se ven imposibilitados de la instalación de dichos sistemas alejando a la población del preciado líquido (figura 1.1).



Figura 1.1. Escases de agua.

El agua, siendo un recurso en plena sobreexplotación, a generado una creciente preocupación a nivel global sobre su cuidado, ya que existen zonas en el mundo en las que se carece totalmente del agua y otras zonas donde se desperdicia el recurso consciente e inconscientemente. Al respecto, el Banco Mundial presenta las siguientes cifras [3]:

- Una de cada ocho personas carecen de acceso a agua potable.

- 2600 millones de personas no disponen de servicios básicos de saneamiento.
- Cada 20 segundos, un niño menor de cinco años padece alguna enfermedad transmitida por el agua.
- Un tercio de la población que no cuenta con acceso se encuentra en regiones de África.

Otro aspecto desfavorable son las pérdidas del recurso que se presentan en todo sistema de distribución en el mundo, tanto en las tuberías del usuario final o del proveedor. La pérdida del líquido se debe principalmente a las fugas, llegando a alcanzar hasta un 70% del total de las pérdidas (OMS 2001) [4]. En nuestro país la cifra no es menos alarmante ya que de un total de 32 mil 500 litros de agua por segundo que suministra el sistema de Agua de la Ciudad de México se estima que se pierde el 38% de esta agua; a su vez el 50% de estas pérdidas se derivan de fugas dentro de la red de distribución, mientras que un 43% se debe a instalaciones domésticas y el 7% restante se debe a tomas clandestinas [5].

Según el departamento de salud del estado de Washington, en su publicación "*Water use efficiency*", en su tercera edición, considera que las pérdidas de un 10% en los sistemas de distribución son aceptables [6], se considera que es más económico resolver grandes fugas que enmendar pequeñas. Fácilmente es apreciable que aunque se tiene un margen de "lo aceptable" es importante tener un método que prevenga estas pérdidas de agua. Las pérdidas de agua en función de la forma cómo se presentan son dos fundamentalmente:

1. Cualquier pérdida de líquido que se presente en tuberías, juntas, accesorios, depósitos y tanques, todas estas se conocen como pérdidas reales.
2. Toda aquella agua que no se pierde físicamente, sin embargo no genera ingresos, causadas principalmente por errores relacionados con la

medición, errores de manejo de agua, o algún tipo de robo o uso ilegal, se conocen como pérdidas aparentes.

1.1. GENERALIDADES DE LAS FUGAS

1.1.1. Tipos de Fugas

Se considera una fuga cuando “el agua que está siendo transportada abandona el sistema de distribución antes de que llegue a su destino final” (figura 1.2).



Figura 1.2. Fuga de agua en el DF.

El término fuga tiene algunas precisiones para no hacer la definición tan ambigua, estas son:

- **Pérdidas “reales” o físicas.** Se contempla toda pérdida dentro del sistema de distribución de agua en cualquier trayecto desde la salida de los centros de distribución, hasta su destino final.
- **Errores de medición, error de contabilización y robo de agua (Pérdidas aparentes).** Cualquier sistema tiende a tener errores o situaciones que no están 100% contempladas, en este caso se considera como “pérdidas

aparentes” a los errores dentro del proceso de distribución de agua, al tener una mala contabilidad del agua enviada al consumidor o proceso, derivada de errores en los instrumentos ya sea por un mal funcionamiento o una mala calibración del mismo. Otro punto a considerar en estas “pérdidas aparentes” es el robo en los sistemas de distribución en cualquier parte del sistema.

A pesar de la diferencia física evidente, estos tipos de fuga se ven reflejadas en costos para el prestador del servicio de agua potable, ya que si bien las fugas reales suponen costos más elevados por sus características tangibles, las fugas aparentes si no son detectadas a corto, mediano y largo plazo pueden representar pérdidas más elevadas y consecuencias más graves para los usuarios finales desde el punto de vista económico.

Como se puede apreciar la definición de fuga es muy amplia y con diversas formas de contextualizarla, se amplía su significado. Es de gran relevancia comprender el tipo de problema que afecta al sistema para poder brindar las soluciones adecuadas.

Pérdidas reales

La cantidad de pérdidas reales en los sistemas de distribución de agua representan el mejor indicador de la eficiencia del proveedor del servicio de agua potable, entre la gestión de los activos del proveedor y el producto que suministra al usuario final. Si el volumen de las pérdidas reales se ve reflejado en pérdidas económicas se deben de tomar acciones más drásticas en el sistema de distribución. Las pérdidas reales pueden presentarse de las siguientes formas (figura 1.3):

- **Fugas reportadas:** Por regla general tienden a tener altas tasas de flujo, esta fuga es visible a simple vista, genera caídas de presión en el sistema y provocan interrupciones en el suministro, por lo que los usuarios del servicio reportan este tipo de fugas inmediatamente.
- **Fugas no reportadas:** Este tipo de fuga se caracteriza por estar oculta bajo el suelo, tienen tasas moderadas de flujo, la detección de este tipo de fugas tarda más tiempo por su ubicación.
- **Fugas de fondo:** Estas se presentan cuando el agua se filtra en las uniones entre tuberías y conexiones. Las tasas de flujo suelen ser bajas aproximadamente 250 l/h. Se puede hacer una detección de la fuga confiable hasta que esta fuga sea mayor. Para solucionar este tipo de fugas es necesario manejar la presión en dicho tramo de la tubería o simplemente sustituir los elementos defectuosos.

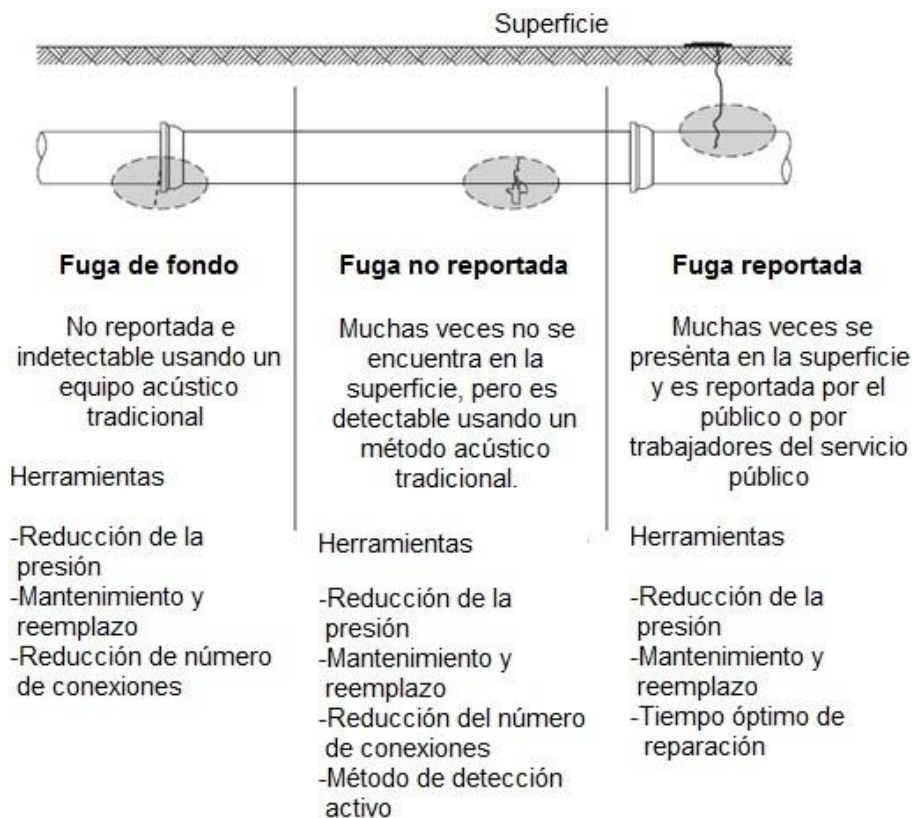


Figura 1.3. Pérdidas reales.

Las pérdidas reales existen prácticamente en todos los sistemas de distribución de agua, a pesar de los esfuerzos realizados por el prestador del servicio, este tipo de pérdidas no pueden ser eliminadas en su totalidad, por el tamaño y la complejidad de las redes de distribución, sin embargo pueden reducirse con procedimientos eficientes de prevención y atención de fallas dentro de sistema de distribución. Las causas principales que propician este tipo de pérdidas son:

- Mala calidad de los materiales empleados en los sistemas de distribución.
- Procedimientos deficientes para el transporte y/o instalación de los materiales que se emplearán en el sistema.
- Variaciones en la presión.
- Corrosión.
- Tráfico del líquido.
- Vibración en la tubería.
- Condiciones ambientales, tales como el frío.
- Plan de mantenimiento deficiente.

Las fugas se producen principalmente en tres secciones de la red de distribución:

- En la red de transmisión (figura 1.4).
- En la red de distribución (figura 1.5).
- En las tuberías de servicio (figura 1.6).

Según el lugar donde se presenten dichas fugas, muestran características como la tendencia a causar interrupciones en el suministro además de la dificultad de su detección. Sin embargo, con prácticas adecuadas sobre el control de las fugas, se puede ayudar a prolongar la vida útil de la infraestructura, ya que se reduce las

pérdidas o simplemente se atiende más rápido ante la presencia de dichas pérdidas.



Figura 1.4. Ruptura en una tubería de transmisión principal.



Figura 1.5. Ruptura en una tubería de distribución.



Figura 1.6. Fuga en tubería de servicio.

Pérdidas aparentes

Un punto importante para comprender este tipo de pérdidas es que no son causadas por pérdidas físicas del líquido desde el punto de transmisión principal hasta el usuario final. Sin embargo; esta transmisión exitosa se ve marcada por errores en la medición, facturación inadecuada del consumo del usuario o uso ilegal del agua. Este tipo de pérdidas se ven reflejadas en los ingresos del proveedor.

Es importante cuantificar claramente cualquier pérdida, al ser más evidentes las pérdidas reales su cuantificación es más fácil, sin embargo en las pérdidas aparentes esto no resulta tan fácil, ya que son errores de medición en su gran mayoría, se debe tener en cuenta este factor para un buen control de las pérdidas, ya que esta medición eficiente brinda información valiosa sobre las tendencias de consumo logrando optimizar la gestión y operación del servicio. Para entender mejor este fenómeno es necesario comprender la estructura usual de la instalación de una red doméstica que se alimenta de una red de distribución principal (figura 1.7).

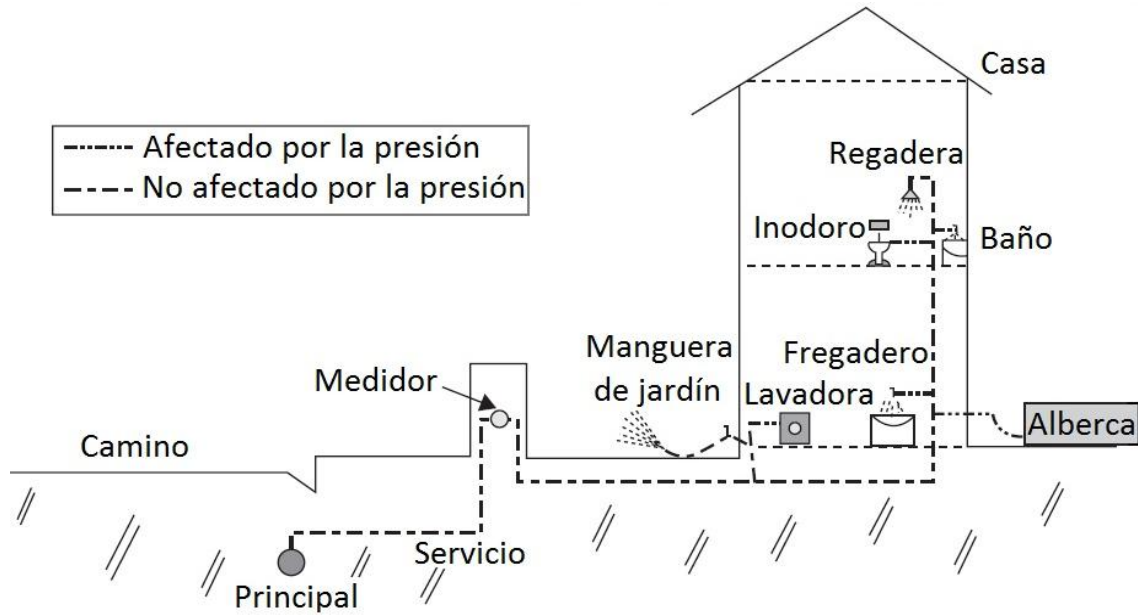


Figura 1.7. Instalación de una red doméstica tomando agua directamente de la red principal.

Las pérdidas aparentes se presentan básicamente en tres formas:

- Inexactitud en la medición del consumo del cliente.
- Errores en la contabilidad del agua suministrada a la red de transmisión.
- Consumos no autorizados.

1.1.2. Antecedentes de la detección de fugas

Los sistemas de distribución se han utilizado desde hace miles de años, cuando el hombre empezó a extender sus asentamientos hasta convertirlos en ciudades. Los antiguos egipcios, griegos y romanos encontraron formas avanzadas para su época; de captar, tratar y de distribuir el agua; sin embargo estas técnicas no difieren mucho de los sistemas actuales ya que si bien la tecnología ha cambiado

con el tiempo, los fundamentos siguen siendo los mismos, los cuales se muestran a continuación:

- Yacimientos de agua.
- Sistemas de bombeo primarios.
- Almacenamiento.
- Bombeo de agua o suministro por efecto de la gravedad.
- Sistema de transmisión.
- Sistema de distribución.
- Conexión del servicio mediante tuberías con o sin medidores.

Egipcios, griegos y romanos estaban muy conformes con el desarrollo de sus sistemas de distribución, pero también estaban conscientes del problema que representaba la pérdida de agua durante el envío de esta. Se tienen conocimiento que en la antigua Roma se enviaban a los consumidores un aproximado de 40 millones de galones de agua al día a través de una red de 420 km, esta red estaba compuesta de tuberías y canales fabricados en su mayoría de ladrillo y piedra con revestimientos de cemento, además de algunas tuberías de plomo, el primer sistema se instaló alrededor del año 312 AC. Este sistema era administrado por 250 depósitos que alimentaban por medio de la gravedad toda la red. Se sabe que tenían equipos de trabajo especializados en esta red conformado por un comisionado además de ingenieros y técnicos especializados para localizar y reparar las fugas como su actividad primordial [7].

Anteriormente la forma más eficiente de tener conocimientos sobre el sistema de distribución, era realizar encuestas casa por casa, analizando las fugas dentro de sus instalaciones y fugas en las calles, esta era la forma de recabar la información para realizar un mapa de zonas de riesgo de fuga, esto por la falta de datos de los primeros sistemas existentes en las ciudades.

La calidad de la mano de obra de los antiguos ingenieros y técnicos es fácilmente visible ya que una sección de un acueducto instalado entre los años 98 y 117 D.C.

sigue estando en uso en España (figura 1.8). A pesar de la eficacia de los viejos sistemas, la complejidad de las ciudades ha traído consigo avances en el manejo del agua.



Figura 1.8. Acueducto romano.

El primer método de detección registrado se basaba en un palo de madera del cual uno de sus extremos se ponía en la tubería principal o en los accesorios del sistema y el otro lado se ponía en el oído del trabajador [8], escuchando el ruido que se generaba desde la tubería o el accesorio se podía determinar la existencia de una fuga.

Posteriormente se efectuaron modificaciones al método anterior, ya que por lo rustico del método resultaba poco claro escuchar los ruidos provenientes de la tubería, por lo que se adoptó un aparato parecido al estetoscopio de un médico, que amplificaba más el ruido y llegaba más claramente al oído del ingeniero o técnico que buscaba la fuga.

El éxito de este método radicaba en su sencillez y bajo costo, pero su eficiencia solo era aplicable a tuberías de metal, además de que se necesitaba un oído muy

bien entrenado, ya que de no ser así esta forma de detección y ubicación podía tomar bastante tiempo en tuberías profundas.

Sin embargo, por las limitaciones del método anterior y por el crecimiento demográfico de las ciudades llegó a ser desplazado por otros métodos o por modificaciones más sofisticadas del mismo, los métodos más importantes desde 1850 a 2003 se muestran en la tabla 1.1.

Tabla 1.1 Línea del tiempo de la tecnología de detección de fugas

Año	Tecnología o método
1800	Fórmula de escurrimiento pico.
1850	Audición Manual.
1920	Geófonos simples.
1965	Micrófonos en tierra.
1978	Correlación fuga-ruido.
1980	Introducción de los DMA ¹ .
1990	Registradores de acústica. Radar de penetración de tierra.
2002	Correlación fuga-ruido por medios electrónicos.
2003	Micrófonos en tierra avanzados. Método de enfriamiento.
2004 – Adelante	Método de ruido continuo. Método de detección por medio de helio. Ondas electromagnéticas.

¹ Medidor de área de distrito, de sus siglas en inglés DMA, es un área que tiene entre 500 y 3000 conexiones, en donde se puede medir el agua para verificar la presencia de fugas.

La importancia que tiene detectar y reparar las fugas en zonas urbanas ha hecho necesaria la implementación de nuevas tecnologías para este fin, es fácilmente apreciable que la mayoría de los métodos sean evoluciones de métodos o tecnologías previamente desarrolladas, por lo que la detección de fugas es un tema de estudio en países desarrollados.

1.1.3. Beneficios de la detección de fugas

Existen dos factores muy importantes que enmarcan la importancia de la detección de fugas así como su pronta reparación. Resulta fácilmente visible que se evitaría la pérdida del líquido en cantidades muy grandes, pero sin duda el mundo se rige bajo reglas económicas, y la pérdida del líquido representa pérdidas económicas según las tarifas vigentes en cada zona del mundo. Lo anterior se puede visualizar de la siguiente manera, “para una fuga individual, la cantidad perdida en un periodo de tiempo determinado, multiplicado por el valor de venta de dicha agua dará la cantidad en la moneda nacional del país donde se realice el estudio [9]. Los beneficios de la detección de fugas son:

- Se beneficia la salud pública.
- Mejora la calidad y la eficiencia del servicio de suministro.
- Se hace eficiente el cobro del líquido.
- Mejora la percepción del consumidor final sobre el proveedor de servicios.
- Se incrementa el conocimiento del sistema de distribución.
- El sistema puede ser extendido de mejor manera.
- Se evita la contaminación del recurso.
- Se reduce el daño a terceros.

Es fácilmente apreciable cuantos beneficios se logran, analizando los puntos anteriores, es comprensible que al detectar y corregir las fallas en el sistema de distribución (figura 1.9), se aprende de él, generando experiencia entre los trabajadores que estén en contacto con este sistema y se genere la documentación que ayude a prevenir posibles fallos en el sistema o una atención más rápida ante la presencia de una fuga en la zona.



Figura 1.9. Reparación de una fuga.

Al no tener muchos problemas con el sistema de distribución, se mejora la forma en la que se distribuye el líquido, evitando interrupciones en el servicio manteniendo un flujo continuo en el sistema. También se evita dañar la propiedad privada derivada del reblandecimiento de la tierra o algún otro daño derivado de las fugas.

La reparación correcta de fugas ayuda a que el agua no se contamine, ya que al estar en contacto con elementos ajenos a la tubería, se mezcla con tierra, polvo, eses fecales o algún otro contaminante del agua, lo que provocaría que se tratara de nuevo el agua.

El último beneficio es considerado como el más importante por la dinámica poblacional ya que la explosión demográfica en el país obliga a las ciudades a expandir sus servicios básicos, en este caso el sistema de distribución de agua resulta ser el más afectado, ya que al no haber una planeación adecuada crece en forma desmedida. Si se conoce el sistema de distribución ya sea por reparaciones previas o simplemente por la necesidad de la actualización de la red, resulta más fácil a los ingenieros ampliar el sistema de distribución, sin correr el riesgo de crear zonas propensas a la existencia de fugas.

1.2. MÉTODOS DE DETECCIÓN DE FUGAS

1.2.1. Generalidades.

Si se cuenta con un método para detectar fugas, por regla general debe de presentar las siguientes etapas desde su detección hasta la reparación para que sea un sistema normalizado y eficiente.

- Realizar un estudio extenso del sistema de distribución enfocado en las fugas.
- Reparar los tanques de almacenamiento con problemas de fugas.
- Calibrar o reparar los instrumentos de medición.
- Sincronizar la producción y consumo con los elementos de medición adecuados.
- Desarrollar un programa y presupuesto para la renovación de las zonas del sistema de distribución con mayor antigüedad.
- Tener una mayor vigilancia sobre el robo de agua.

Todo esto con el fin de mejorar los métodos existentes. Las ventajas que se encuentran al realizar modificaciones estructurales son el ahorro de agua, tiempo y dinero.

1.2.2. Métodos de detección de fugas

El equipo empleado en la detección de fugas está presente en una amplia gama de tecnologías, características y precios. Por lo tanto, se vuelve indispensable conocer las características del sistema, los puntos críticos donde se presentan con más frecuencia las fugas, para que los encargados de seleccionar un método tomen la decisión más adecuada. El factor más importante para la detección de fugas empleando cualquier tipo de equipo es la experiencia que tengan los operarios de los equipos, ya que deben de saber interpretar correctamente los datos que se reciben de los mismos.

1.2.2.1. Métodos acústicos

Los instrumentos tradicionales de los métodos auditivos, son por ejemplo palos de madera, varillas metálicas, los cuales se emplean para golpear sistemáticamente todos los accesorios de los tubos de transmisión o tuberías de conexión. Existen otro tipo de diseños en los cuales a las varillas de metal se le adiciona auriculares para oír el ruido dentro de la tubería, una alternativa es agregarle una membrana al final de la varilla que amplifica el sonido. El problema fundamental de estos equipos es la necesidad de un operador entrenado, ya que dentro de la tubería se presentan una amplia gama de sonidos.

Este método en su forma electrónica (figura 1.10) funciona bajo el mismo principio que su par mecánico, sin embargo emplea elementos electrónicos para amplificar

el ruido. Este equipo se emplea más en áreas donde existe presión baja, y el ruido de la fuga es débil, además de que se emplea en áreas donde el ruido externo es un factor determinante para no tener una detección errónea.

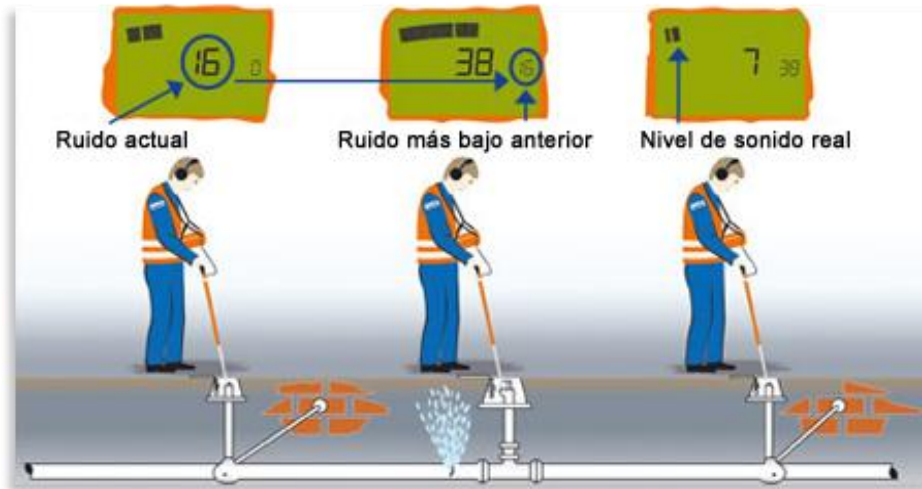


Figura 1.10. Sistema auditivo.

Micrófono de tierra

Los micrófonos de tierra o geófonos (figura 1.10) son dispositivos que sirven para oír el ruido en la tubería, válvulas, hidrantes, puntos de conexión, etc. Este tipo de instrumentos sirven para determinar el punto exacto de la fuga, estos dispositivos trabajan bajo el mismo principio de funcionamiento que un estetoscopio médico. Al ser equipos electrónicos cuentan con amplificadores y filtros de ruido para atenuar el ruido específico de la fuga. Este tipo de dispositivos se emplean en combinación con otros equipos o en áreas con pocos accesorios y tuberías de plástico.



Figura 1.10. Geófonos mecánicos.

Detector de fuga por correlación de ruido

De la misma forma que los equipos tradicionales de detección de ruido, este equipo detecta el ruido generado por una fuga dentro de la tubería. También cuenta con un receptor y un procesador, además de dos sensores equipados con un transmisor de radio. Los sensores se colocan en los extremos en donde se supone que se encuentra la fuga (figura 1.11), estas señales se convierten en señales eléctricas y luego se transmite a través de emisores de radio a la unidad de procesamiento. El sonido viaja a velocidad constante en función del diámetro de la tubería, el ruido de la fuga llega a la sonda más cercana.

La capacidad para determinar con precisión la ubicación de la fuga depende en gran medida la posición de los sensores y la exactitud de los datos ingresados a la unidad procesadora.

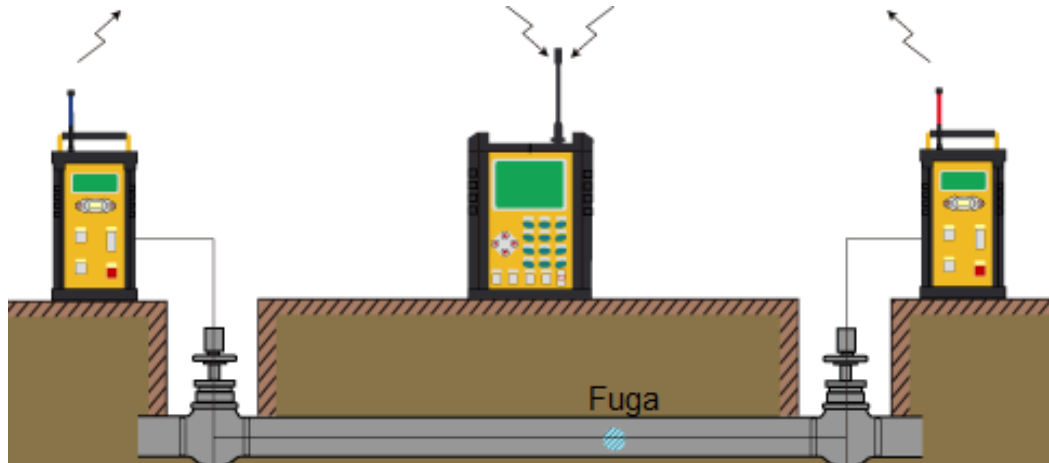


Figura 1.11. Equipo detector de fugas por correlación de ruido.

Registradores de ruido

Los registradores de ruido son instalados en los accesorios de la tubería, su encendido es automático durante la madrugada, monitorea el ruido dentro de la tubería mientras está encendido. El periodo de registro habitualmente está determinado por el consumo del agua, se enciende de 2:00 am a 4:00 am. El realizar un registro entre estas horas se obtiene el beneficio de obtener una mayor intensidad del ruido de la fuga debido al aumento de la presión y se evita la interferencia por el ruido ambiental o el consumo del agua.

Registrador digital por correlación de ruido

Conforme se fueron dando avances tecnológicos significativos en la detección de fugas, los desarrolladores se dieron cuenta de que el uso de 2 o más tecnologías mejoraba la detección de fugas, en este caso se unieron los métodos de

correlación de ruido y el registrador de ruido, cada uno aportando sus ventajas y subsanando las desventajas de cada una de estas tecnologías.

El primer dispositivo que entra en uso es el registrador ya que detecta la presencia de un ruido perteneciente a una fuga y es cuando se va delimitando la ubicación de la fuga por medio del sistema de correlación, lo anterior favorece a reducir el lapso de tiempo de la identificación de la fuga y su localización, lo que representa ahorros importantes en cuanto al personal que se emplea, además de que una oportuna reparación de las fugas evita el desperdicio de elevados volúmenes de agua que se hubieran perdido con métodos más lentos.

1.2.2.2. Métodos no acústicos

Detector de fugas usando gas

Se emplean gases insolubles como el agua, helio o hidrógeno, insertándose en segmentos aislados de la tubería. El gas que se insertó previamente escapa a través de las hendiduras provocadas por el rompimiento de la tubería (figura 1.12), el gas impregna la superficie de la tierra donde se puede detectar mediante un detector de gas de alta sensibilidad. Dependiendo del material de la superficie el proceso de impregnación es más lento.

Este método es una opción muy utilizada en redes de transmisión, en redes de presión baja donde la acústica necesaria no está presente, además de pequeños tubos de plásticos o en redes domésticas. Además, este método se emplea para controles de calidad en tuberías que van a ser instaladas. El principal problema de este método es que deben aislarse las tuberías a analizar.



Figura 1.12. Aplicación del método de detección usando gas.

Radar subterráneo

El radar subterráneo identifica las fugas de agua mediante la detección de cavidades creadas por la fuga y la presencia de agua alrededor de la tubería, además de anomalías en la tierra enviando señales bajo tierra y recibiendo las señales de reflejadas (figura 1.13). Esta tecnología no es muy empleada por la logística que se requiere para emplear el equipo, y además por su costo elevado.



Figura 1.13. Funcionamiento del radar subterráneo.

Método de enfriamiento

Este método contempla la congelación del agua dentro de la tubería para verificar visualmente la congelación de la tubería al igual que en la figura 1.14, en caso de que existiese una fuga se podrá apreciar la fisura en la tubería. El problema de este método está en la función de congelar una sección de la tubería y solo se aplica a tuberías visibles.



Figura 14. Método de congelación de tubería.

En este capítulo se describió la importancia de contar con un sistema efectivo de detección de fugas de líquido en los sistemas de distribución, principalmente en los sistemas de agua potable. Es por ello que se mencionaron a través del capítulo algunos de los métodos más importantes que han existido a lo largo de la historia, así como los de mayor uso actualmente. En el capítulo siguiente se describe los principios de la lógica difusa y la ecuación de conservación de la energía con el propósito de vincular los conceptos vistos en este capítulo.

CAPÍTULO 2

PRINCIPIOS DE UN SISTEMA DE MONITOREO DIFUSO

La lógica difusa fue desarrollada por Lotfi Zadeh. En 1965 publicó su trabajo en el boletín “información y control” bajo el título de “conjuntos difusos”. En este trabajo Zadeh partió del uso de la teoría de conjuntos clásica en la cual sus elementos solo podían “ser” o “no ser” parte del conjunto. Para proponer de esta forma una noción de pertenecía (grado de pertenencia o verdad), definiendo esta pertenencia entre los valores de cero a uno. Lo que permite expresar y cuantificar un modelo de forma más fácil. Zadeh desarrolló el concepto de la incompatibilidad el cual dice lo siguiente:

“A medida que la complejidad de un sistema aumenta, la capacidad de hacer declaraciones precisas e importantes sobre su comportamiento disminuye hasta alcanzar un umbral, en el cual la precisión y la importancia (o su conexión) se convierten mutuamente en características exclusivas del sistema.”

2.1. ANTECEDENTES

Es importante conocer el desarrollo de la lógica difusa a lo largo de la historia por el hecho de que en este desarrollo se cimienta todo el conocimiento actual sobre esta técnica de control, también ofrece una perspectiva de los alcances y campos de aplicación de esta técnica. A continuación se muestran algunas fechas que describen el desarrollo de la lógica difusa desde su aparición en 1965.

1965.- Lotfi Zadeh desarrolló la teoría de conjuntos difusos.

1974.- Ebrahim Mamdani desarrolló el control de un motor de vapor.

1977.- Se creó el primer sistema experto para la aplicación de préstamos, desarrollado por Hans Zimmermann.

1980.- Se desarrolló la primera aplicación industrial basada en lógica difusa para el control de un horno de cemento. Se programaron los juegos de ajedrez y backgammon usando lógica difusa.

1985.- Se desarrolló el primer chip difuso en los laboratorios BELL.

1986.- Se implementó un sistema difuso experto para el diagnóstico de enfermedades en Japón.

1987.- Se creó el sistema de aterrizaje automático para aviones.

1989.- Se creó el laboratorio para investigación de ingeniería difusa (LIFE).

1990.- Salen al mercado los primeros electrodomésticos basados en lógica difusa. Se fundó el laboratorio de sistemas inteligentes de control SIEMENS.

1991.- Se creó el centro de inteligencia artificial difusa en Japón.

Las aplicaciones de la lógica difusa en los últimos 20 años han tenido un gran desarrollo debido a los avances tecnológicos en el mundo. Es importante enumerar las aplicaciones más relevantes, entre las cuales se tiene:

- Control automático para el control de las compuertas de una planta hidroeléctrica.
- Control simplificado de robots.
- Control eficiente y estable para los motores de automóviles.
- Autoenfoco de cámaras digitales.
- Sistema de conducción vehicular.
- Sistemas de archivo de datos electrónicos.
- Sistema de predicción de terremotos.

- Diagnóstico de cáncer.
- Reconocimiento de movimiento en cámaras de video.

2.2. COMPONENTES DE LA LÓGICA DIFUSA

La lógica difusa se divide en 4 partes fundamentales, para facilitar su comprensión y/o aplicación. La aplicación ordenada de éstas lleva a una correcta aplicación de la lógica difusa. Estas son:

- Reglas lingüísticas.
- Conjuntos difusos.
- Operaciones de conjuntos difusos.
- Proceso de inferencia.

Estos componentes básicos deben ser estudiados ampliamente para una correcta aplicación de la lógica difusa, ya que algún error en algún punto de la aplicación de esta técnica de control puede traer consigo un error en todo el método.

2.2.1. Reglas lingüísticas

Retomando el concepto de incompatibilidad de Zadeh, cuando se tiene un sistema o un problema muy complejo, es complicado expresarlo y analizarlo de una manera matemática. Es por esto que se trata de hacer una interpretación del problema utilizando herramientas lingüísticas, esto significa que el sistema o problema se interpreta a través de palabras en vez de números. Si bien estas son menos precisas permiten un acercamiento más próximo al lenguaje humano.

Para desarrollar estas reglas es necesario tener un conocimiento acerca de la problemática o del comportamiento del sistema, ya que con ello se es capaz de tener una mejor interpretación de los sistemas. Estas reglas utilizan la estructura “*si..... entonces*” y está conformada por dos partes: *el antecedente* y *la consecuencia*. El *antecedente* es la asignación de un valor lingüístico a una característica del sistema.

Ejemplo: *Es muy frío el día.* En este ejemplo el *sistema* es el día, la *característica* es la temperatura y la *asignación* es muy frío.

Un ejemplo de las palabras usadas para la asignación de un valor son: sobre, cerca, debajo de, más que, cerca de, muy, lejos, generalmente, definitivamente, etc. La asignación de estas u otras palabras dependerá del enfoque con el que se analice el sistema.

La consecuencia es el resultado del antecedente, siguiendo con el ejemplo anterior en el antecedente se puede considerar que la consecuencia podría ser: **me pongo ropa abrigada**. Por lo cual la regla lingüística quedaría de la siguiente forma:

Si el día es muy frío me pongo ropa abrigada

Es necesario crear varias reglas para tener una aproximación más cercana al sistema, el número de estas puede variar en función a la característica del sistema que se desea aproximar y a los valores que se necesiten para ella. Cada asignación tiene un grado de verdad o de adición respecto a la característica del sistema, este grado de adición recibe el nombre de función de membresía.

Para la creación de las reglas lingüísticas se puede partir de cualquiera de las siguientes bases:

- Conocimientos y experiencias de expertos.
- Aprendizaje de las acciones de control realizadas por un operario.
- Aplicación de técnicas de aprendizaje.

Cualquiera de estas bases permitirán crear las reglas lingüísticas, independientemente del sistema, siempre y cuando las reglas sean completas (describan al proceso adecuadamente), consistentes (sean coherentes) y continuas (tengan una consecuencia). En la figura 2.1 se muestra un diagrama de cómo obtener las reglas lingüísticas.



Figura 2.1. Formulación de las reglas lingüísticas.

2.2.2. Conjuntos difusos

Es el conjunto de reglas lingüísticas o de aproximaciones que se realizan al sistema. Formalmente se definen como:

“Aquel conjunto que no tiene firme y claro, cuáles son sus límites y el cual puede contener cualquier elemento con un grado de adición.”

El grado de adición recibe el nombre de función de membresía, esta función tiene valores entre cero y uno solamente y se define matemáticamente como:

$$A = \{x, UA(x) | x \in X\} \quad (2.1)$$

Donde $UA(x)$ es el grado de membresía. El valor de $UA(x)$ se define en la asignación realizada en el antecedente. Retomando el ejemplo anterior ahora, se crearan más asignaciones para tener una aproximación más real sobre el sistema y se le asignará un valor numérico entre 0 y 1, como se mencionó anteriormente, para generar su función de membresía:

Tabla 2.1. Asignaciones lingüísticas para el ejemplo.

Valor lingüístico	Grado de Adición
El día es muy frío	1
El día es frío	0.75
El día es algo frío	0.5
El día es poco frío	0.25
El día es caluroso	0

Los valores de la función de membresía generados por la asignación mostrada en la tabla 2.1 pueden ser representados a través de una gráfica (figura 2.2.). Existen varias formas de curva que representan a la función de membresía las cuales dependerán de la distribución de los valores de la función de membresía, las formas más comunes de distribución son:

- **Distribución signoidal.**
- **Distribución gaussiana.**
- **Distribución cuadrática.**
- **Distribución triangular.**

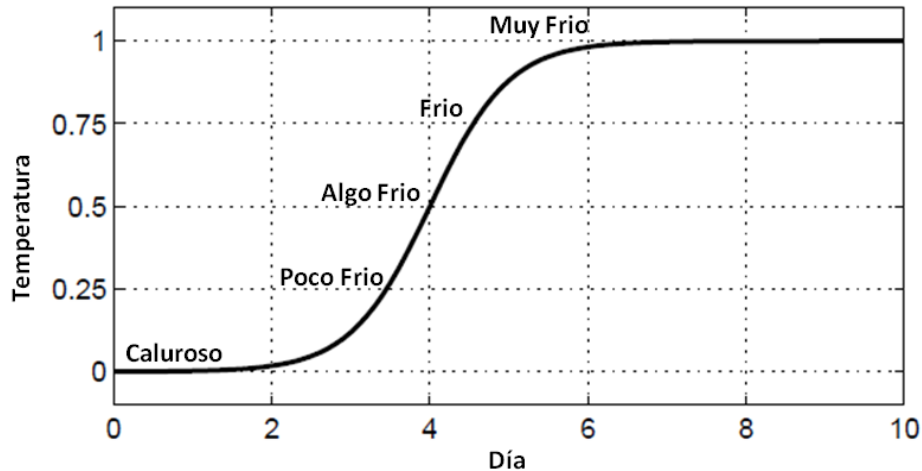


Figura 2.2. Curva de función de membresía para el ejemplo desarrollado.

Es importante recalcar que la forma de la curva de distribución dependerá del sistema, no es necesario que tenga la distribución de alguna de las formas antes mencionadas; sin embargo, son las más comunes y con más puntos de coincidencia cuando se requieren hacer aplicaciones. Existe una amplia gama de software que facilita el diseño de las mismas.

Aunque no existe un criterio fijo para la selección de las funciones de membresía del sistema, estas por lo general son diseñadas en base al conocimiento de algún experto sobre el proceso o sistema a controlar, se puede considerar algunos de los siguientes puntos para su selección:

- Seleccionar funciones que tenga un porcentaje pequeño de superposición con la función precedente o anterior, este porcentaje debe estar entre el 12% o 14%, este intervalo se propone para mantener un margen de relación entre la respuesta del sistema y la acción de control respecto al tiempo.
- Si la relación de tiempo-error con la respuesta del sistema es corta, el porcentaje de superposición de las funciones de membresía disminuye.

- En caso que el sistema presente una gran cantidad de oscilaciones o tiempos muertos, el porcentaje de superposición deberá de crecer.

2.2.3. Operaciones con conjuntos difusos

Cuando se requiere analizar dos o más características de un sistema, es necesario realizar operaciones. Estas operaciones se basan en las operaciones básicas de la teoría de conjuntos, las cuales son:

- **Mín (A, B).**- Esta operación resuelve A y B con valores entre (0,1).
- **Máx (A, B).**- Esta operación resuelve A o B.
- **A negada** .- Esta operación es el valor negativo de la función A.

Las operaciones anteriores pueden representarse a través de una tabla como se muestra en la tabla 2.2 o de forma gráfica (figura 2.3.).

Tabla 2.2. Tabla de datos de la teoría de conjuntos.

A	B	mín(A, B)	A	B	máx(A, B)	A	-A
0	0	0	0	0	0	0	1
0	1	0	0	1	1	1	0
1	0	0	1	0	1		
1	1	1	1	1	1		
	Mín			Máx			A negada

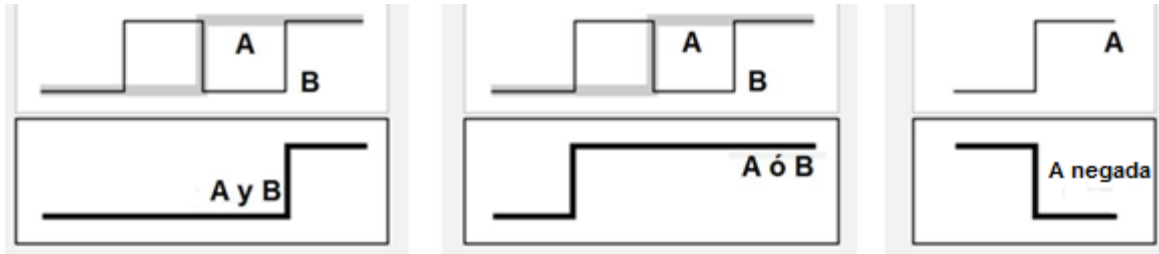


Figura 2.3. Representación gráfica de la teoría de conjuntos.

2.2.4. Proceso de inferencia

Este proceso sirve para la obtención de las entradas y salidas del sistema (figura 2.4), el cual es uno de los objetivos de la lógica difusa. También permite tomar decisiones de control y discernir patrones. Este proceso está conformado por las siguientes etapas:

1. **Fuzzification² de las entradas y salidas:** Se deben asignar nombre a las variables de entrada y salida, así como los intervalos de operación, a su vez se realizan las reglas lingüísticas que describen el comportamiento del sistema. En este paso se encarga de determinar la función de membresía de los argumentos de entrada y salida. (antecedentes).
2. **Aplicación de los operadores matemáticos:** Determinada la función de membresía, en caso de tener dos o más características es necesario utilizar estos operadores.
3. **Método de implicación:** Se evalúan las funciones de membresía en paralelo para discriminar condiciones obvias del sistema, esta etapa funciona como un filtro para las salidas.

² No existe una traducción adecuada al español, por lo que se dejó el término del inglés.

4. **Defuzzification**³: En esta etapa se obtiene la salida del sistema, la cual es un conjunto difuso y del que se obtiene únicamente un valor. Para este proceso se tienen varios métodos como el de centroide, bisección, media del máximo, etc.

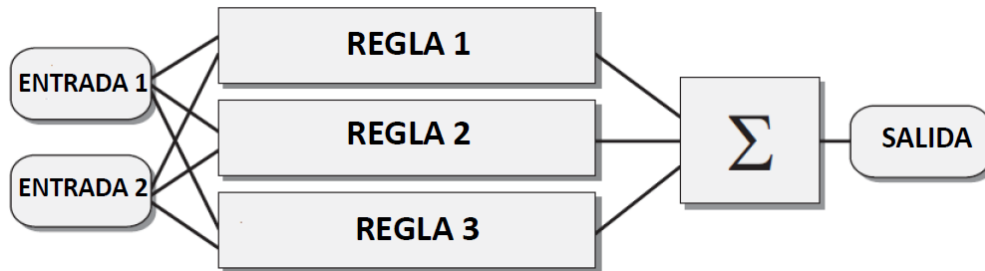


Figura 2.4. Proceso de inferencia para 2 entradas y 3 reglas.

Estas etapas son las utilizadas por el modelo de Mamdani pero pueden variar dependiendo del modelo de resolución del sistema por medio de otros métodos tales como Takagi-Sugeno-Kang, Larsen o Tsukamoto.

2.3. MÉTODOS DE DESFUZIFICATION

Método del centroide

Este método calcula el área debajo de la función de membresía con el intervalo de las variables de salida, esto se realiza mediante de la siguiente ecuación:

³ No existe una traducción adecuada al español, por lo que se dejó el término del inglés.

$$CoA = \frac{\int_{x_{min}}^{x_{max}} f(x) \cdot x \, dx}{\int_{x_{min}}^{x_{max}} f(x) \, dx} \quad (2.2)$$

Donde CoA es el centroide del área, x es el valor de la variable lingüística, y x_{min} y x_{max} son los intervalos de la variable. En la figura 2.5 se muestra un ejemplo de este método.

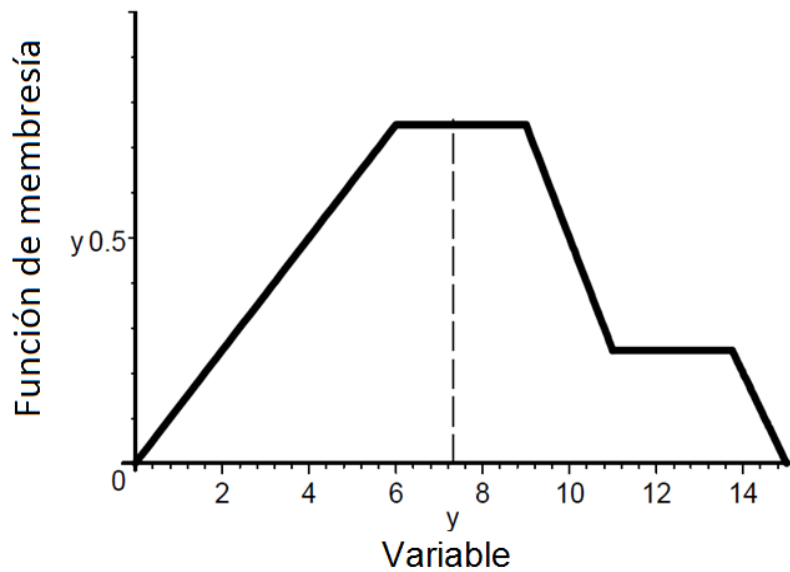


Figura 2.5. Método del centroide.

Método del centroide elevado

Es similar al método del centroide, pero con la peculiaridad de que ignora todos los valores por debajo de un valor α asignado. En la figura 2.6 se muestra un ejemplo de ello.

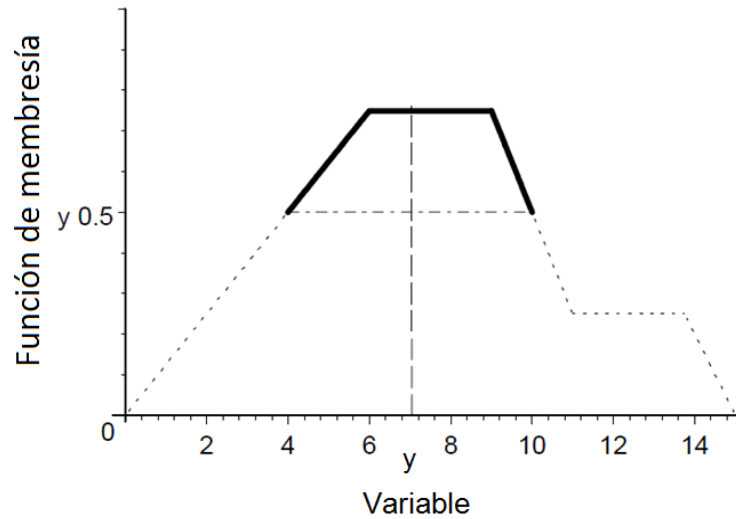


Figura 2.6. Ejemplo del método del centroide elevado.

Método de la suma de centroides

Este método es una variación más del método del centroide, la diferencia radica en que este método calcula el centroide de cada función de membresía de salida en vez de solo considerar la función de membresía de la salida. El método se representa en la siguiente ecuación:

$$x_{final} = \frac{CoA_1area_1 + CoA_2area_2 + \dots + CoA_narea_n}{(area_1 + area_2 + \dots + area_n)} \quad (2.3)$$

Al realizar el cálculo del centroide para cada función de membresía, se obtiene un promedio de ellos para que de esta manera se obtenga un valor numérico en la salida. La figura 2.7 describe este método.

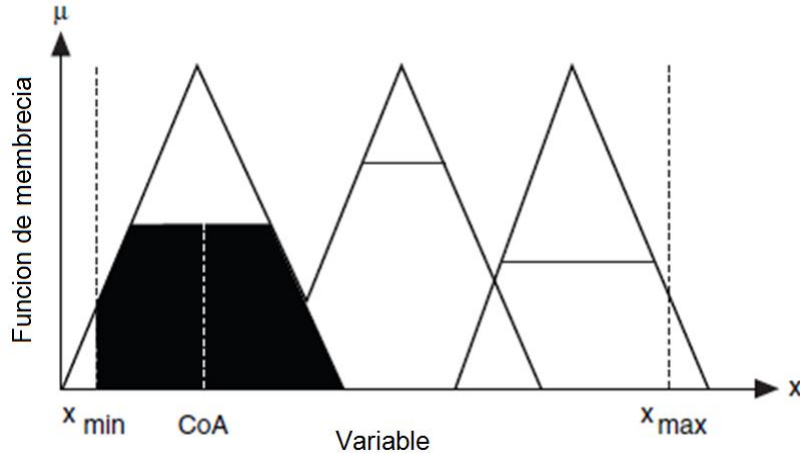


Figura 2.7. Método de la suma de centroides.

Método del criterio máximo

Este método selecciona de manera arbitraria los valores máximos posibles que se encuentren dentro de la función de membresía de salida que se consideren altos. En la figura 2.8 se muestra un ejemplo de ello.

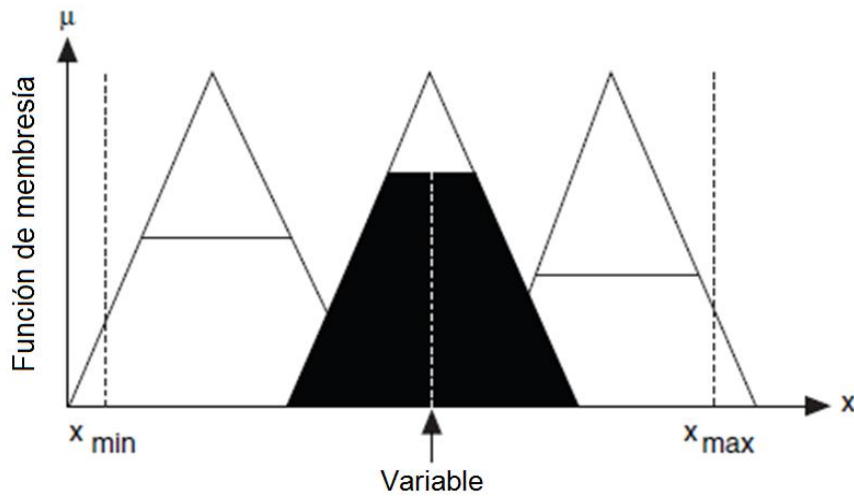


Figura 2.8. Método del criterio máximo.

Consideraciones de aplicación

Para la selección de cualquiera de los métodos de defuzzification es recomendable considerar el siguiente criterio para su selección:

- **Continuidad:** Es la capacidad del sistema de reconocer adecuadamente las entradas del sistema, por ejemplo, si se tiene una entrada de un valor pequeño, el sistema no deberá de presentar una respuesta grande.
- **Ambigüedad:** este punto se refiere a la capacidad del método trabajar bajo cualquier circunstancia que se pueda presentar en el sistema y sea consistente con los métodos anteriormente descritos.
- **Complejidad computacional:** Este punto es de importancia para aplicaciones prácticas, debido a que los métodos tienen diferentes velocidades de ejecución esto se debe a la cantidad de cálculos para su realización, por lo que se debe tener siempre en cuenta la aplicación del sistema difuso.

2.4. CONTROLADOR DIFUSO

Los controladores difusos son aquellos sistemas que utilizan lógica difusa para realizar una acción de control. Estos dispositivos cuentan con la capacidad de resolver el proceso de inferencia difusa descrito en este capítulo. El uso de la lógica difusa en controladores es aplicable solamente en casos donde se satisfaga cualquiera de los siguientes puntos:

- La teoría convencional de control no provee un resultado satisfactorio.
- Existe un modelado matemático complejo.
- El problema de control no tiene solución.

El uso de un controlador difuso dentro de los sistemas de control proporciona ventajas sustanciales sobre otras técnicas de control convencionales, tales como:

- Proporcionar la capacidad de implementar los conocimientos del personal con mayor experiencia en el sistema a controlar, por lo que el sistema es más sencillo de controlar.
- Su aplicación es simple, no requiere de gran tecnología para su implementación.
- Se logra obtener robustez en el sistema de control.
- Tiene gran capacidad de controlar sistemas inestables.

2.5. FUNDAMENTOS DEL MOVIMIENTO DE FLUIDOS EN TUBERÍAS

Para caracterizar el sistema de tuberías para detectar fugas se debe hacer un análisis en función de las características que se desean conocer. En el caso del sistema de monitoreo difuso, propuesto en este proyecto, se requiere conocer el flujo y la presión en la salida del sistema, así como las caídas de presión por instrumentos y tubería, por lo cual se emplea la ecuación de la ley de la conservación de la energía y la ecuación de continuidad, las que se describen a continuación.

Ecuación de continuidad

La ecuación de continuidad considera que el flujo total de un sistema, en estado permanente, no cambia respecto al tiempo, esto significa que el flujo en cualquier parte del sistema es constante. La ecuación de continuidad se expresa de la siguiente forma:

$$Q = VA = \left[\frac{m^3}{s} \right] \quad (2.4)$$

Dónde:

$$Q = \text{Flujo} \left[\frac{m^3}{s} \right].$$

$$V = \text{Velocidad promedio} \left[\frac{m}{s} \right].$$

$$A = \text{Área de la sección transversal de la tubería} [m^2].$$

Ley de la conservación de la energía

Esta ley indica que la energía total en un punto cualquiera por encima de un plano horizontal, es igual a la suma de la energía geométrica, la energía debida a la presión y la energía debida a la velocidad. En este caso se desprecian las inyecciones y pérdidas de energía en el sistema, teniendo la siguiente ecuación:

$$\frac{P_A}{\gamma_A} = \frac{V_A^2}{2g} + Z_A = \frac{P_B}{\gamma_B} = \frac{V_B^2}{2g} + Z_B \quad (2.5)$$

Dónde:

P_A y P_B = Presiones absolutas o relativas en los puntos A y B [Pa].

γ_A y γ_B = Peso específico en los puntos A y B $\left[\frac{N}{m^3} \right]$.

V_A y V_B = Velocidad promedio en los puntos A y B $\left[\frac{m}{s} \right]$.

g = Aceleración local de la gravedad $\left[\frac{m}{s^2} \right]$.

Z_A y Z_B = Altura respecto a un plano de referencias de los puntos A y B [m].

Para que se puedan determinar las caídas de presión que se generan en el sistema, se efectuaron los cálculos con una modificación a la ley de la conservación de la energía, esta modificación es conocida como el método de Darcy, el método incluye la caída de presión por fricción del material de la instalación y la caída de presión por accesorios en la tubería. La caída que se obtiene al utilizar este método representa la altura en metros columna de fluido, el método de Darcy es el siguiente:

$$\frac{P_A}{\gamma_A} = \frac{V_A^2}{2g} + Z_A = \frac{P_B}{\gamma_B} = \frac{V_B^2}{2g} + Z_B + h_L \quad (2.6)$$

Dónde:

h_L = Índice de pérdidas por fricción [m] .

El flujo de fluidos en tuberías siempre se encuentra acompañado por un rozamiento entre las partículas del fluido y las paredes de la tubería, esto ocasiona una caída de presión en el sentido del flujo, esta pérdida de presión por fricción se calcula con el método de Darcy y es representada como h_L , la cual se obtiene con la siguiente ecuación.

$$h_L = \frac{fLV^2}{2Dg} = [Pa] \quad (2.7)$$

Dónde:

f = Factor de fricción [Adimensional].

L = Longitud de la tubería [m].

D = Diámetro de la tubería [m].

V = Velocidad promedio del fluido *en la tubería* [$\frac{m}{s}$].

En la ecuación anterior se presenta el coeficiente de fricción f , el cual es necesario para la obtención de h_L . El factor de fricción para condiciones donde el flujo de la tubería es laminar está únicamente en función del número de Reynolds Re , en cambio si el régimen del fluido es turbulento, el factor de fricción corresponderá al número de Reynolds Re y al tipo de la pared de la tubería.

Por lo que para la obtención de f es necesario calcular el número de Reynolds Re , el cual indica el régimen de flujo, que puede ser laminar o turbulento. Esto último va a depender del diámetro de la tubería, la densidad, viscosidad del fluido a manejar y de la velocidad del fluido. Se considera un flujo laminar cuando el número de Reynolds es menor o igual a 2000 y cuando el número de Reynolds es mayor a 4000 el régimen del flujo es turbulento. Lo anterior es representado con la siguiente ecuación:

$$Re = \frac{DV\rho}{\mu} \quad (2.8)$$

Dónde:

ρ = Densidad del fluido [$\frac{kg}{m^3}$].

μ = Viscosidad del fluido [$kg \cdot \frac{m}{s^2}$].

El factor de fricción f se determina con el diagrama de Moody, el cual se encuentra en función de la rugosidad relativa de cada material y del número de Reynolds. El diagrama de Moody se muestra en el anexo A del trabajo.

En un sistema de distribución no solo se tiene que considerar las pérdidas de presión por la longitud de la tubería y por la fricción del fluido sobre la pared de la tubería, si no también se tienen que tomar en cuenta las caídas de presión provocados por los accesorios. Estas caídas menores se determinan también con la ecuación de Darcy, a la cual únicamente se le realizan unas pequeñas modificaciones como se muestra en la siguiente ecuación:

$$h_{L(Accesorios)} = \frac{KV^2}{2g} \quad (2.9)$$

Dónde:

K = Coeficiente de resistencia [Adimensional].

El coeficiente de K se puede considerar como constante para cualquier obstrucción dada en accesorios como pueden ser válvulas, codos, reducciones, ampliaciones, entre otros. Este factor de fricción está en función del diámetro y de la velocidad del fluido y es distinto para cada tipo de accesorio, los cálculos para obtener este factor se presentan en el siguiente capítulo. Una vez que se obtienen los valores anteriores es posible calcular las caídas de presión en el sistema de trabajo. La aplicación de las ecuaciones presentadas en esta sección realizara en el siguiente capítulo.

2.6. COMPONENTES DE LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE FLUIDOS

2.6.1. Instrumentos usados en los sistemas de distribución de fluidos

No existe una regla que especifique que instrumentos utilizar para los sistemas de distribución de líquidos, ya que estos dependen de las características específicas del sistema, así como del presupuesto previsto para éste. Aun así es necesario que los instrumentos utilizados dentro de estos sistemas sean económicos, fiables, duraderos y que requieran poco mantenimiento. Entre los instrumentos más utilizados para una red de distribución de líquidos, como el agua se tienen los siguientes:

Placa de orificio

Se trata de un diafragma de metal con un barreno constrictor (figura 2.9). Se coloca normalmente entre bridas de la tubería. Utiliza la diferencia de presión para medir indirectamente el flujo.



Figura 2.9. Placa de orificios.

Medidor tipo turbina

Usado para medir principalmente flujo másico (figura 2.10). Consta de una turbina montada en un rotor en el centro de la tubería y gira a una velocidad proporcional a la velocidad del flujo del líquido que pasa por los álabes. Su costo es mayor que otros dispositivos, pero tienen una gran exactitud y fiabilidad.



Figura 2.10. Medidor tipo turbina.

Medidores electromagnéticos

Estos dispositivos constan de dos electrodos montados en el líquido en lados opuestos de la tubería (figura 2.11), generando un campo magnético a través de la tubería y perpendicular a los electrodos. El fluido al pasar por el campo magnético genera una tensión entre los electrodos que es utilizada para medir el flujo.



Figura 2.11. Medidor electromagnético.

Medidores de desplazamiento positivo

Son recipientes que se llenan y se vacían una determinada cantidad de veces en un periodo de tiempo conocido (figura 2.12). Los dispositivos más usuales son el medidor de pistón y el medidor de disco oscilante.



Figura 2.12. Medidor de desplazamiento positivo.

2.6.2. Sistemas SCADA

Los sistemas SCADA son el acrónimo de Supervisory Control and Data Acquisition (Control Supervisorio y de Adquisición de Datos), estos se aplican en procesos que están dispersos en una amplia superficie geográfica y que por medio de un conjunto de herramientas de software y hardware se implementan con el propósito de controlar y supervisar dicho proceso. Un sistema SCADA consta de las siguientes partes fundamentales (figura 2.13):

1. **Interfaz Hombre-Máquina (Human-Machine Interface ó HMI):** Son entornos visuales en los cuales se representa el proceso o una parte de este de manera dinámica. Están diseñados para que el operario tenga una visión más clara del proceso y además que sea capaz de controlarlo.
2. **Unidad Central (Master Terminal Unit ó MTU).** También es conocida con el nombre de Unidad Maestra y es la encargada de ejecutar todas las acciones de mando del sistema así como del almacenamiento y procesamiento de datos del mismo. Esto se realiza a través de un software el cual es programado en un lenguaje como LabVIEW, Visual C, Visual Basic, etc.
3. **Unidades Remotas (Remote Terminal Unit ó RTU):** Su función es recibir las señales de los sensores de campo y enviar las señales de control necesarias.
4. **Sistema de Comunicación:** Es el enlace entre los elementos del sistema y cuenta con la versatilidad de adaptarse a los requerimientos del sistema SCADA, distancias de las RTU y los servicios de comunicación con los que se cuentan, estas pueden ser:
 - Línea telefónica.
 - Cable coaxial.

- Fibra óptica.
- Teléfono celular.
- Radio.
- Microondas.
- Satélite.

5. **Software SCADA:** Es un software especialmente diseñado para ser manejado a través de una interfaz gráfica, el cual es la parte central de los sistemas SCADA. Es el encargado de gestionar y controlar todos los dispositivos que conforman un sistema SCADA, así mismo se encarga de almacenar la información proveniente del sistema, ejemplos de estos software son:

- FIX.
- INTOUCH.
- FACTORY.
- GENESIS.
- LABVIEW.

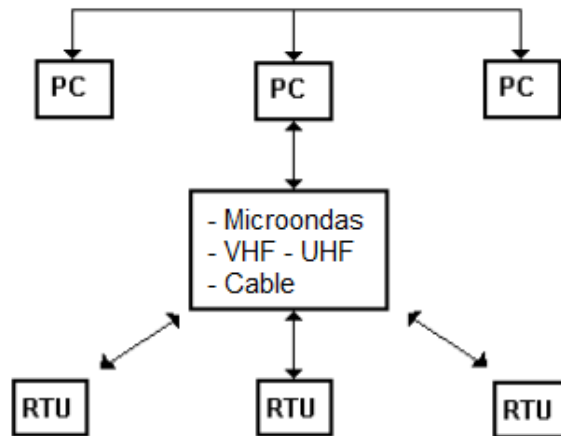


Figura 2.13. Esquema de un sistema de adquisición de datos y control.

Entre las funciones y características principales de estos sistemas son:

- Manejo del soporte o canal de comunicación.
- Manejo de uno o varios protocolos de comunicación (Drive).
- Manejo y actualización de una Base de Datos.
- Administración de alarmas (Eventos).
- Generación de archivos históricos.
- Interfaces con el operador (Man Machine Inteface ó MMI).
- Transferencia dinámica de datos (DDE).
- Conexión a redes.

A lo largo del capítulo se describieron las bases de la lógica difusa, así como las consideraciones básicas para su uso. Esta es una herramienta que permite realizar un control más complejo y flexible a los tradicionales. A su vez se detallaron los cálculos necesarios para caracterizar el comportamiento de la presión dentro de un sistema de tuberías. Estos dos elementos se unen en el capítulo siguiente para diseñar un sistema de monitoreo que tenga como base, la lógica difusa y que sea coherente con el comportamiento calculado del sistema de distribución

CAPITULO 3

DESARROLLO DEL SISTEMA DE MONITOREO DIFUSO PARA LA DETECCIÓN DE FUGAS

En el capítulo siguiente se mostrará el desarrollo del sistema de monitoreo, el cual está conformado por un modelado difuso realizado en base a la ecuación de la conservación de la energía. Para ello será necesario realizar una caracterización del sistema y en su defecto realizar una propuesta para la implementación del sistema de monitoreo.

3.1. CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA ORIGINAL

La tubería sobre la cual se trabajó, es un sistema de distribución de agua potable de la farmacéutica AstraZeneca S.A. de C.V., en la que se realizó el levantamiento de las características y componentes de la tubería, lo cual representa el primer paso del presente trabajo. Este sistema cuenta con las siguientes características:

- Longitud total de 21 m.
- El material de la tubería es PVC Hidráulico Sanitario
- Diámetro de la tubería 1.5”.
- Cuenta con 10 codos en diversos puntos de la tubería.
- Tiene 2 válvulas esféricas en la entrada y salida del sistema.
- Posee 2 conexiones en T.

Para realizar los cálculos, la empresa farmacéutica AstraZeneca S.A. de C.V. proporcionó los registros de bitácoras de las cuales se obtuvo que el flujo de

trabajo es de 19 LPM y la presión de trabajo en la entrada del sistema (punto A) es de $1.2 \frac{kg}{cm^2}$. El diagrama isométrico de la instalación se muestra en el Anexo B.

Para determinar la caída de presión en la tubería se utilizaron las ecuaciones de continuidad y la de la conservación de la energía mostradas en el capítulo 2 de este trabajo. Para realizar estos cálculos se requiere tener el flujo y el área transversal de la tubería en el sistema internacional de unidades, por lo que estos valores son:

$$Q = \frac{(19LPM) \left(1.666 \times 10^{-5} \frac{m^3}{s} \right)}{1LPM} = 0.00031666 \frac{m^3}{s}$$

Del diámetro de la tubería se tiene:

$$D = 1.5" = 0.0381 \text{ m}$$

$$A = \pi * r^2 = (\pi)(0.01905^2) = 0.00114 \text{ m}^2$$

Ya que se cuenta con todas las unidades en el mismo sistema, se deben obtener los parámetros necesarios para la ecuación de continuidad y conservación de la energía. El primer valor que se obtuvo es el de la velocidad promedio del fluido en la tubería, este cálculo emplea la ecuación 2.4, como se muestra a continuación.

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{0.00031666 \text{ m}^3/\text{s}}{0.00114 \text{ m}^2} = 0.2777 \text{ m/s}$$

Una vez calculada la velocidad se procede a determinar el número de Reynolds (ecuación 2.8) para obtener el coeficiente de fricción mediante el diagrama de Moody (Anexo A). Para lo cual se considera la densidad y la viscosidad del agua a 20°C las cuales son

:

$$\rho_{\text{agua}} = 998.2 \text{ kg/m}^3 \quad \mu_{\text{agua}} = 0.001003 \text{ kg m/m s}^2$$

Por lo que el número de Reynolds es:

$$Re = \frac{\left(998.2 \text{ kg/m}^3\right) (0.27774 \text{ m/s}) (0.0381 \text{ m})}{\left(0.001003 \text{ kg m/m s}^2\right)} = 10531.2528$$

Con el número de Reynolds y el material de la tubería (PVC Hidráulico), se considera el material como liso, por lo que tiene una rugosidad de cero, se obtiene el factor de fricción de la tubería del diagrama de Moody:

$$f = 0.03$$

Obtenido el factor de fricción de la tubería se calculan las pérdidas de presión por fricción de la misma (h_L), sustituyendo valores en la ecuación 2.7 obteniéndose lo siguiente:

$$h_L = \frac{(0.030)(21m)(0.27774 \text{ m/s})^2}{2(0.0381m)(9.81 \text{ m/s}^2)} = 0.0656011 \text{ m}$$

Las pérdidas de presión por accesorios (ecuación 2.9) también se deben calcular para obtener la pérdida total de presión en el sistema, estas pérdidas corresponden a cada tipo de accesorio. Como se puede observar en la ecuación 2.9, existe una constante K , esta constante es el producto del coeficiente de fricción por la longitud equivalente del accesorio dividido entre el diámetro del mismo, para efectos prácticos se utilizaron tablas para determinar el factor K de cada accesorio, este valor es calculado de distinta forma para cada tipo de accesorio, las ecuaciones 3.1, 3.2, y 3.3 se emplean para el cálculo del factor K para codos normalizados a 90° , válvulas de bola y conexiones en T respectivamente.

- Codos

$$K = 30f_T \quad (3.1)$$

- Válvulas esféricas

$$K = 3f_T \quad (3.2)$$

- Conexiones en T

$$K = 20f_T \quad (3.3)$$

Ya que se cuenta con dichas ecuaciones se procede al cálculo de las pérdidas por accesorios.

- Codos

$$K = (30)(0.03) = 0.9$$

Obteniendo K se calcula la pérdida por el codo:

$$h_{L A(codos)} = \frac{(0.9)(0.27774 \text{ m/s})^2}{2(9.81 \text{ m/s}^2)} = 0.003538 \text{ m}$$

Tomando en cuenta que la instalación posee 10 codos, se tiene que:

$$h_{L A(codos)} = (10)(0.003538 \text{ m}) = 0.03538 \text{ m}$$

- Válvulas esféricas

$$K = (3)(0.03) = 0.09$$

Obteniendo K se determinó la pérdida de la válvula.

$$h_{L_{A(\text{valvulas})}} = \frac{(0.09)(0.27774 \text{ m/s})^2}{2(9.81 \text{ m/s}^2)} = 0.0003529 \text{ m}$$

Tomando en cuenta que la instalación posee 2 válvulas:

$$h_{L_{A(\text{valvulas})}} = (2)(0.0003529 \text{ m}) = 0.0007059 \text{ m}$$

- Conexiones en T

$$K = (20)(0.03) = 0.6$$

Con el valor de K se obtienen las pérdidas de la conexión en T:

$$h_{L_{A(T)}} = \frac{(0.36)(0.27774 \text{ m/s})^2}{2(9.81 \text{ m/s}^2)} = 0.002359 \text{ m}$$

Como la instalación cuenta con 2 conexiones en T se tiene que:

$$h_{L_{A(T)}} = (2)(0.002359 \text{ m}) = 0.004718 \text{ m}$$

Calculadas todas las pérdidas por accesorios se obtiene la pérdida total del sistema sumando todas las caídas de presión de los accesorios y tuberías.

$$h_{L_{total}} = h_L + h_{L_{A(codos)}} + h_{L_{A(valvulas)}} + h_{L_{A(T)}} \quad (3.4)$$

Por lo tanto:

$$h_{L_{total}} = 0.06560 \text{ m} + 0.03538 \text{ m} + 0.0007059 \text{ m} + 0.004718 \text{ m} = 0.10640 \text{ m}$$

Con el cálculo de $h_{L_{total}}$ se despeja a P_B de la ecuación 2.6 de lo cual se obtiene lo siguiente:

Despejando a P_B :

$$P_B = \left(\frac{P_A}{\gamma_A} + \frac{V_A^2}{2g} + Z_A - \frac{V_B^2}{2g} - Z_B - h_L \right) (\gamma_B)$$

Reacomodando la ecuación:

$$P_B = \left(\frac{P_A}{\gamma_A} + \frac{V_A^2 - V_B^2}{2g} + (Z_A - Z_B) - h_L \right) (\gamma_B)$$

Sustituyendo los valores de la ecuación se tiene:

$$P_B = \left(\frac{117679.8 \text{ Pa}}{9789 \text{ N/m}^2} + 0 + (1.3\text{m} - 1.5\text{m}) - 0.10640 \text{ m} \right) (9789 \text{ N/m}^2)$$

$$= 114680.38 \text{ Pa}$$

Por lo tanto, la caída de presión entre los puntos A y B es:

$$P_A - P_B = 117679.8 \text{ Pa} - 114686.22 \text{ Pa} = 2999.4135 \text{ Pa}$$

3.2. CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA CON LAS MODIFICACIONES PROPUESTAS

Para realizar el monitoreo difuso de una manera adecuada se propuso dividir el sistema de distribución en tres secciones por medio de válvulas de compuerta en lugar de tener solo 2 válvulas esféricas. La distribución de estas válvulas se muestra en el Anexo C. Para el caso de la primera válvula propuesta se tomará la presión calculada, como la presión medida de dicho punto por encontrarse en el Punto A, que es el inicio del sistema de distribución sobre el cual se trabajó. Para la segunda válvula se realiza el cálculo de la caída de presión con la ecuación 2.7 de lo cual se obtiene lo siguiente:

$$Re = 10531 \quad y \quad f = 0.03$$

Sabiendo que la válvula se encuentra a una distancia de 8 m, se pueden calcular las pérdidas por fricción debido al flujo en la tubería (h_L), sustituyendo valores se tiene:

$$h_L = \frac{(0.030)(8m)(0.27774 \text{ m/s})^2}{2(0.0381m)(9.81 \text{ m/s}^2)} = 0.024766 \text{ m}$$

En este tramo, la tubería tiene un total de 5 codos, 1 conexión en T y 2 válvulas de compuerta, para lo cual se calculan las pérdidas ocasionadas por estos accesorios con la ecuación 2.9. Para el cálculo de K utilizaremos las ecuaciones 3.1 y 3.3 en el caso de la válvula puesto que anteriormente se consideraba una válvula de bola y ahora es considerada una de compuerta, por lo tanto el cálculo de K queda de la siguiente manera:

- Válvulas de compuerta

$$K = 8f_T \quad (3.5)$$

Aplicando la ecuación 3.5 se tiene que:

$$K = (8)(0.03) = 0.24$$

Sustituyendo en la ecuación 2.9:

$$h_{L A(\text{válvulas})} = \frac{(0.24)(0.27774 \text{ m/s})^2}{2(9.81 \text{ m/s}^2)} = 0.0009436 \text{ m}$$

Este resultado se multiplica por 2 puesto que se tienen 2 válvulas.

$$h_{L A(\text{válvulas})} = (2)(0.0009436 \text{ m}) = 0.0018872 \text{ m}$$

De los cálculos de la sección 3.1 se tiene que:

$$h_{L A(\text{codos})} = \frac{(0.9)(0.27774 \text{ m/s})^2}{2(9.81 \text{ m/s}^2)} = 0.003538 \text{ m}$$

Tomando en cuenta que hasta el punto de la segunda válvula de la instalación se tienen 5 codos, se obtiene lo siguiente:

$$h_{L A(\text{codos})} = (5)(0.003538 \text{ m}) = 0.017690 \text{ m}$$

Para la conexión en T también se tiene que.

$$h_{L A(T)} = \frac{(0.36)(0.27774 \text{ m/s})^2}{2(9.81 \text{ m/s}^2)} = 0.002359 \text{ m}$$

En este tramo de la tubería solo se cuenta con 1 conexión en T. Ya calculadas todas las pérdidas se obtiene la pérdida total del sistema sumando todas las caídas obtenidas mediante la ecuación 3.4, sustituyendo valores:

$$h_{L_{seccionA}} = 0.024766 \text{ m} + 0.017690 \text{ m} + 0.0018872 \text{ m} + 0.002359 \text{ m} = 0.046702 \text{ m}$$

Con el cálculo de $h_{L_{total}}$ se puede despejar $P_{B'}$ de la ecuación de conservación de la energía, y sustituyendo valores se obtiene lo siguiente:

$$\begin{aligned} P_{B'} &= \left(\frac{117679.8 \text{ Pa}}{9789 \text{ N/m}^2} + 0 + (1.3\text{m} - 2.2\text{m}) - 0.046702 \text{ m} \right) (9789 \text{ N/m}^2) \\ &= 108410 \text{ Pa} \end{aligned}$$

Por lo tanto, se obtiene la caída de presión entre los puntos A y B.

$$P_A - P_{B'} = 117679.8 \text{ Pa} - 108410 \text{ Pa} = 9267.4 \text{ Pa}$$

Para la tercera válvula se realizaron los mismos cálculos pero ahora se contempla una distancia de 15 m, 6 codos, 1 conexión en T y 3 válvulas de compuerta.

Calculando h_L tenemos:

$$h_L = \frac{(0.030)(15\text{m})(0.27774 \text{ m/s})^2}{2(0.0381\text{m})(9.81 \text{ m/s}^2)} = 0.046437 \text{ m}$$

Para las válvulas se tiene que:

$$h_{L_{A(\text{valvulas})}} = 0.0009436 \text{ m}$$

Sabiendo que son 3 válvulas las pérdidas debidas a estos accesorios son:

$$h_{L_{A(\text{valvulas})}} = (3)(0.0009436) = 0.0028308 \text{ m}$$

Realizando la misma secuencia para los codos obtenemos:

$$h_{L_{A(\text{codos})}} = 0.003538 \text{ m}$$

Teniendo 6 codos en el tramo de la tubería se tiene lo siguiente:

$$h_{L_{A(\text{codos})}} = (6)(0.003538 \text{ m}) = 0.021228 \text{ m}$$

Para la conexión en T se tiene la misma caída que en cálculo anterior:

$$h_{L_{A(T)}} = 0.002359 \text{ m}$$

Por lo tanto a pérdida total será la suma:

$$h_{L_{\text{seccionB}}} = 0.046437 \text{ m} + 0.021228 \text{ m} + 0.0028308 \text{ m} + 0.002359 \text{ m} = 0.072855 \text{ m}$$

Realizando los despejes y sustituciones anteriores se calcula la presión en el punto $P_{B''}$ como se muestra a continuación:

$$P_{B''} = \left(\frac{117679.8 \text{ Pa}}{9789 \text{ N/m}^2} + 0 + (1.3\text{m} - 2.2\text{m}) - 0.072855 \text{ m} \right) (9789 \text{ N/m}^2)$$

$$= 108160 \text{ Pa}$$

Obteniendo la caída de presión en los puntos A y B' se tiene que:

$$P_A - P_{B''} = 117679.8 \text{ Pa} - 108160 \text{ Pa} = 9523.3 \text{ Pa}$$

Para la última válvula se realizaron los mismos cálculos y se tomará en cuenta una longitud de 21 m, 9 codos, 2 conexiones en T y 4 válvulas de compuerta.

Calculando h_L se tiene.

$$h_L = \frac{(0.030)(21\text{m})(0.27774 \text{ m/s})^2}{2(0.0381\text{m})(9.81 \text{ m/s}^2)} = 0.0656011 \text{ m}$$

Para las válvulas tenemos que:

$$h_{L A(\text{válvulas})} = 0.0009436$$

Sabiendo que son 3 válvulas se obtiene:

$$h_{L_{A(valvulas)}} = (4)(0.0009436) = 0.0037744 \text{ m}$$

Para el caso de los codos se tiene:

$$h_{L_{A(codos)}} = 0.003538 \text{ m}$$

Teniendo 6 codos en el tramo de la tubería se tiene lo siguiente:

$$h_{L_{A(codos)}} = (9)(0.003538 \text{ m}) = 0.031842 \text{ m}$$

Para la conexión en T se tiene:

$$h_{L_{A(T)}} = 0.002359 \text{ m}$$

Contando con 2 conexiones en T tenemos que:

$$h_{L_{A(T)}} = (2)(0.002359 \text{ m}) = 0.0047180 \text{ m}$$

Por lo tanto la pérdida total debido a los accesorios es:

$$\begin{aligned}
 h_{L_{seccionB}} &= 0.0656011 \text{ m} + 0.031842 \text{ m} + 0.0037744 \text{ m} + 0.0047180 \text{ m} \\
 &= 0.10574 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Realizando los despejes y sustituciones anteriores se calcula la presión en el punto P_B como se muestra a continuación.

$$P_B = \left(\frac{117679.8 \text{ Pa}}{9789 \text{ N/m}^2} + 0 + (1.3\text{m} - 1.5\text{m}) - 0.10574 \text{ m} \right) (9789 \text{ N/m}^2) = 114690 \text{ Pa}$$

Por lo tanto, la caída de presión entre los puntos A y B es:

$$P_A - P_B = 117679.8 \text{ Pa} - 114690 \text{ Pa} = 2992.9 \text{ Pa}$$

3.3. DISEÑO DEL CONTROLADOR DIFUSO

3.3.1. Selección de las variables de entrada y salida

Para la realización del modelo difuso se partió del proceso de inferencia visto en el capítulo 2, por lo cual lo primero que se debe hacer es identificar las variables involucradas en el proceso que describieran más adecuadamente la dinámica del sistema. Esencialmente el sistema cuenta con dos variables principales, que son la presión y el flujo volumétrico. Estas variables se escogieron bajo el criterio de que son aquellas que aportan más dinámica al sistema. El valor de estas variables son obtenidas a través de mediciones realizadas directamente en el proceso, si bien estas variables podrían servir en primera instancia para realizar la detección de fugas de líquido dentro del sistema, se eligió incluir al sistema dos variables

más; presión calculada y flujo estimado con el fin de comparar el comportamiento dinámico del sistema con su comportamiento calculado

La presión calculada se obtiene a través del análisis matemático del sistema a través de la ecuación de conservación de la energía, se llegó a la decisión de incluirla dentro del modelo debido a que se tiene un conocimiento preciso de los componentes físicos del sistema, así como de las medidas y el tipo de material del que está constituido. Para ello se realizaron los cálculos de las secciones previas del presente capítulo.

La cuarta variable del sistema es el flujo estimado, esta variable es estimada debido a que el sistema de distribución no presenta cambios de su diámetro interno, a si mismo, se considera una velocidad promedio del mismo, es por estas razones que se definió que fuese estimado en vez de medido. Una vez definidas las variables de entrada se les dio una asignación lingüística, es decir, se les asignó un adjetivo que represente la condición o estado de las variables. Debido al comportamiento de las variables del sistema se eligieron tres:

- *Bajo*
- *Trabajo*
- *Alto*

Una vez que se asignaron estos estados fue necesario determinar los intervalos de operación de cada uno de estos para cada variable de entrada del sistema, esto se refleja dentro de la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Intervalos de los estados de las variables de entrada.

Variable	Bajo	Trabajo	Alto
Presión calculada kPa	0-80	75-160	160-200
Presión medida kPa	0-80	75-160	160-200
Flujo estimado lpm	0-12	11-24	24-30
Flujo medido lpm	0-12	11-24	24-30

Continuando con el método de inferencia se prosigue a la asignación de las salidas del sistema, en el caso del presente trabajo se eligió solamente una salida, esta salida representa el comportamiento de la salida del sistema de manera cualitativa y no cuantitativa, es por ello que se asignaron los siguientes estados que definen la salida del sistema.

- **Correcto:** Se define cuando las condiciones medidas son iguales a las calculadas.
- **Fallo:** Se presenta cuando los valores de obtenidos a través de las mediciones son mayores a los valores calculados y estimados.
- **Fuga:** Aparece cuando los valores medidos son inferiores a los calculados y estimados.

Para los intervalos de operación de las condiciones del sistema su escala no cuenta con una magnitud siendo sus intervalos de 0 a 12, los cuales se verán de manera más detallada en la selección de funciones de membresía presentada a continuación.

3.3.2. Selección de funciones de membresía

Las funciones de membresía deben describir el grado de verdad que tenga de la variable ya sea medida, calcula o estimada con respecto a su magnitud y estado deseado, es por ello que la selección de estas deben ser determinadas en base a esa relación. En la figura 3.1 se observan las funciones de membresía elegidas para la presión calculada y medida.

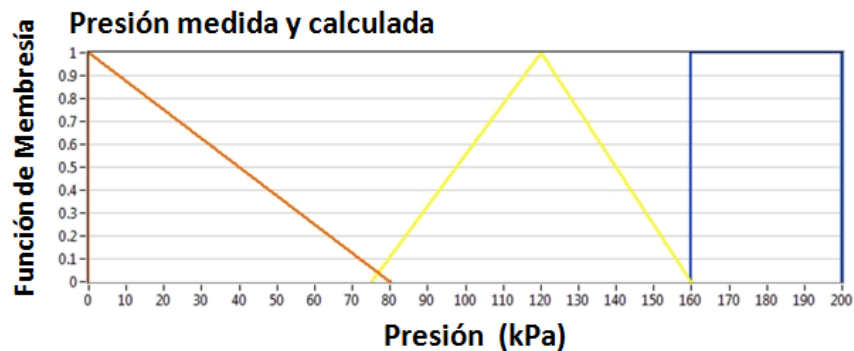


Figura 3.1. Funciones de membresía de la presión medida y calculada.

Se seleccionaron las formas triangulares para las presiones *Bajas* y de *Trabajo* debido a su facilidad de manejo, de esta manera se define que el comportamiento de esta variable será lineal dentro del modelado difuso. De esta forma el criterio de selección para el estado Bajo (primer triángulo de izquierda a derecha) parte de que para el sistema el grado de verdad máximo de esta condición se presenta cuando la presión es cero, y de aquí va decreciendo de manera lineal conforme va creciendo su magnitud hasta que su grado tenga el valor de cero, lo que sucede cuando se llegan a los 80 kPa.

La función de membresía del estado de Trabajo parte de un grado de verdad cero cuando se tiene un valor de 75 kPa, de este punto va creciendo hasta alcanzar su valor máximo cuando se llega a los 120 kPa, este valor se considera el estado óptimo del sistema. Una vez rebasado este valor desciende en su grado de verdad

para convertirse en cero al llegar a los 160 kPa. Es aquí cuando se tiene la transición al siguiente estado que es el de *Alto*, para este estado la función de membresía tiene una forma rectangular, debido a que para el sistema todas las presiones arriba de los 160 kPa son presiones altas, esto es que todas tienen un grado de verdad igual a uno. En la tabla 3.2 se describen de manera resumida las formas y los valores de los intervalos de cada una de las funciones de membresía para las presiones.

Tabla 3.2. Datos de las funciones de membresía de las presiones.

Variable	Función de membresía	Intervalo [kPa]
Presión Baja	Triangular	0-80
Presión de Trabajo	Triangular	75-160
Alta Presión	Rectangular	160-200

En el caso de los flujos sus funciones de membresía se muestran en la figura 3.2 y sus características en la tabla 3.3. Estas funciones son muy similares a las de las presiones, estas se diferencian principalmente por la función de Bajo flujo ya que para estas variables se considera absolutamente como verdad esta condición cuando el flujo se encuentra en los 6 lpm, iniciando de cero hasta llegar a este y valor, y de aquí desciende hasta llegar a cero a los 12 lpm, esto se determinó a base de las necesidades de los equipos en el sistema de distribución.

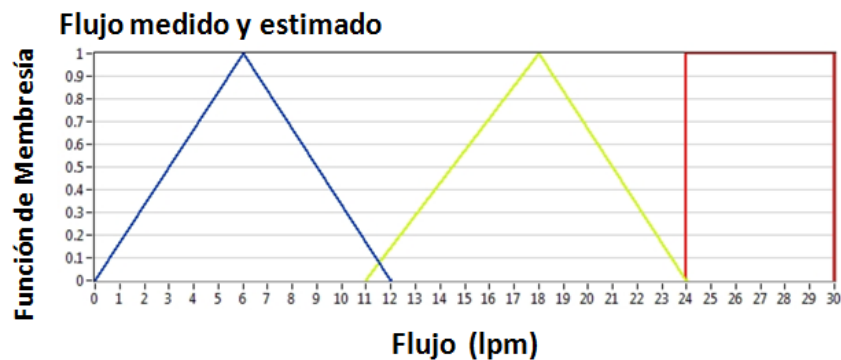


Figura 3.2. Funciones de membresía de los flujos estimados y medidos.

La tabla 3.3 mostrada a continuación es un resumen de las funciones de membresía para el flujo estimado y medido:

Tabla 3.3 Características de las funciones de flujo medido y estimado

Variable	Función de membresía	Intervalo [lpm]
Flujo Baja	Triangular	0-12
Flujo de Trabajo	Triangular	12-24
Alto Flujo	Rectangular	24-30

El paso siguiente en el proceso del modelado difuso es la selección de las funciones de membresía de la salida, como el objetivo del controlador difuso es resaltar una cualidad y no generar una acción de control se determinó un intervalo de valores de 0 a 12 para las funciones. Estas funciones se eligieron como triangulares con el fin de tener una distribución equitativa entre ellas y de esta manera obtener una salida uniforme. Estas funciones se aprecian en la figura 3.3.

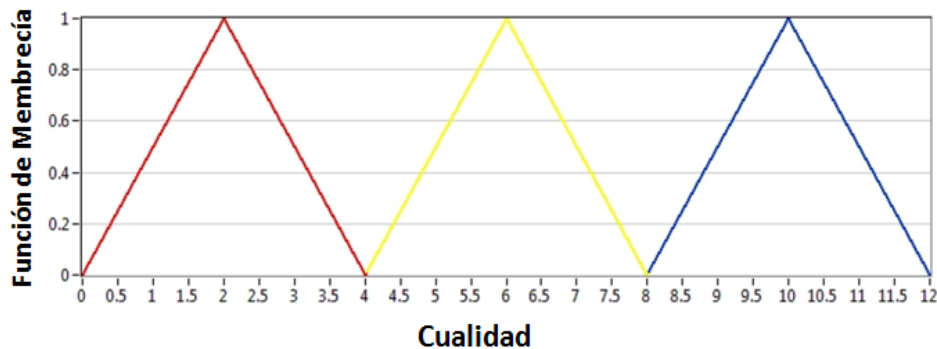


Figura 3.3. de las funciones de membresía de salida del sistema

La distribución de las funciones de membresía de la salida se muestra en la tabla 3.4. Dichas distribuciones representan los tres estados posibles del sistema que son correcto (color rojo), fallo (color amarillo) y fuga (color rojo), al tratarse de una cualidad los valores asignados no son de relevancia.

Tabla 3.4 Características de los valores de las funciones de membresía de la salida.

Variable	Función de membresía	Intervalo
Correcto	Triangular	0-4
Fallo	Triangular	4-8
Fuga	Rectangular	8-12

Seleccionadas las variables de entrada y de salida del sistema, así como las funciones de membresía propias para cada una de ellas, se continúa a la definición de las reglas lingüísticas.

3.3.3. Definición de las reglas lingüísticas

Para la definición de las reglas lingüísticas se crearon una serie de tablas en las cuales se muestra cada una de las variables así como sus estados. Cada una de las condiciones representan una función de membresía y como el sistema cuenta con 4 variables de entrada y una salida es necesario marcar un método de inferencia para poder unirlos, es por ello que se eligió la operación mínimo (AND) para unir cada una de las variables y de esta manera obtener una salida adecuada del sistema (tabla 3.5.).

Tabla 3.5. Método de inferencia de las variables.

Presión medida	AND	Presión calculada	Flujo medido	AND	Flujo estimado
Baja	Min	Baja	Baja	Min	Baja
Trabajo	Min	Trabajo	Trabajo	Min	Trabajo
Alta	Min	Alta	Alta	Min	Alta

Para obtener una regla lingüística a partir de las tablas anteriores, se utilizó el conector AND (y) de esta manera se conjuntaron las 4 variables, en cualquiera de sus posibles estados con la salida de cada combinación posible de las reglas está se determinada en base al conocimiento y la experiencia que se tiene acerca del

sistema. A continuación se muestra un ejemplo de cada una de las posibles salidas del sistema:

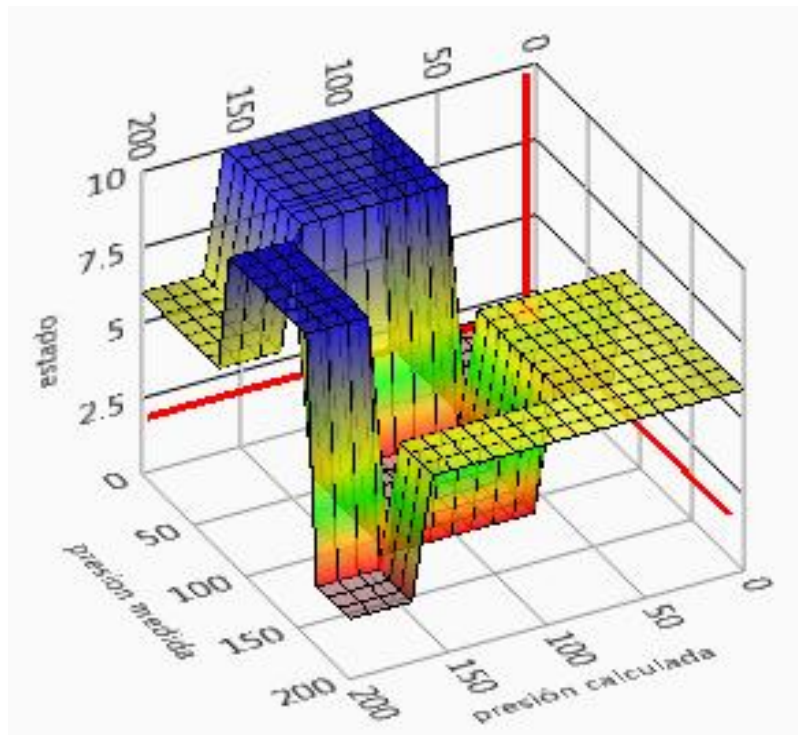
1. Si la “presión calculada” es **baja** y la “presión medida” es **baja** y el “flujo medido” es **bajo** y el “flujo estimado” es **bajo** entonces el “estado” es **correcto**.
2. Si la “presión calculada” es **baja** y la “presión medida” es **alta** y el “flujo medido” es **alto** y el “flujo estimado” es **bajo** entonces el “estado” es **falla**.
3. Si la “presión calculada” es **alta** y la “presión medida” es **baja** y el “flujo medido” es **bajo** y el “flujo estimado” es **alto** entonces el “estado” es **fuga**.

Lo que representan cada una de estas reglas es la forma en que interactúan entre si las variables para definir el comportamiento del sistema, refiriéndose a la regla uno, en ella todos las variables se ubican en el estado bajo, lo cual significa que no existe diferencia entre los valores calculados y medidos del sistema.

En cambio si se analiza la regla 2, en ella se muestra que los valores medidos sobrepasan a los calculados, lo cual implica que existe algún fallo en el sistema, ya sea de medición o de cálculo. En cambio en la regla 3 se presentan condiciones inversas en las cuales las presiones medidas son inferiores a las calculadas, siendo esta combinación la que determine la condición de fuga dentro del sistema. En base a las combinaciones posibles se obtuvieron un total de 81 reglas lingüísticas que determinan el comportamiento del sistema, dichas reglas se encuentran descritas en el Anexo D. Las reglas antes mostradas son las que determinan la salida del controlador.

3.3.4. Superficies de control

Las superficies de control dentro de la lógica difusa son aquellos conjuntos de valores en los cuales es posible tener una acción de control, lo que sería similar al intervalo de ganancias de un controlador PID en un control clásico. Estas superficies representan la interacción de todas las variables de entrada para la obtención de una salida. Como el sistema sobre el que se trabajó es de 5° orden (4 variables de entrada y 1 de salida) es imposible ver la interacción de todas las variables para obtener una superficie de control, por lo cual solo es posible analizar las superficies de control para tres dimensiones (2 variables de entrada y una salida). En la figura 3.4 se muestra la superficie de control para la relación Presión medida-Presión calculada-Salida.



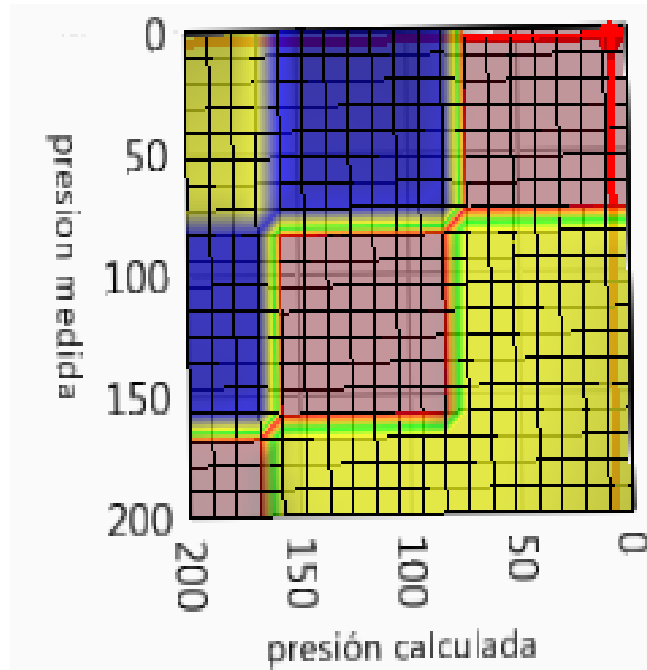


Figura 3.4. Superficie de control de la relación Presión calculada – Presión medida - Salida. [**Azul:** Fuga; **Amarillo:** Fallo; **Rojo:** Correcto; **Verde:** Incertidumbre].

Como se muestra en la figura anterior, las superficies cuentan con un código de colores, estos colores representan un estado de la salida, y para que esta salida tenga un valor debe de existir una relación de valores entre las variables. En las superficies se tiene un color verde que significa incertidumbre, esta incertidumbre son los valores intermedios entre cada salida. Estos valores son aquellos que se encuentran entre las fronteras de cada función de membresía de salida, son llamados también valores de transición. El hecho de que sean puntos de incertidumbre no significa que sean despreciables si no que son puntos en los que la acción de control es incierta.

La forma que tiene la superficie de control se genera a partir de la relación que se tiene de las variables de entrada con las de salida, si esta relación fuese muy estricta, las superficies tendrían una forma más recta y uniforme, pero al tener una relación con flexibilidad (superposición) se generan superficies de forma más variada. En la figura 3.5 se muestra la superficie de control para la relación de Flujo medido- Flujo estimado-salida.

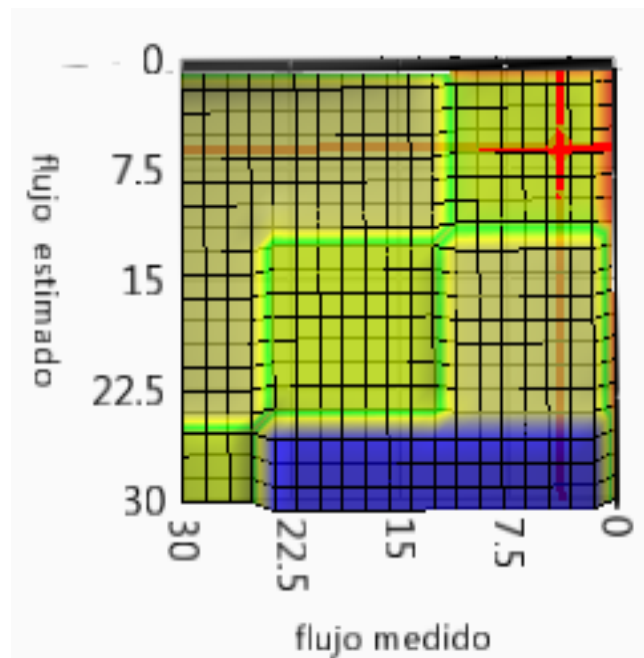
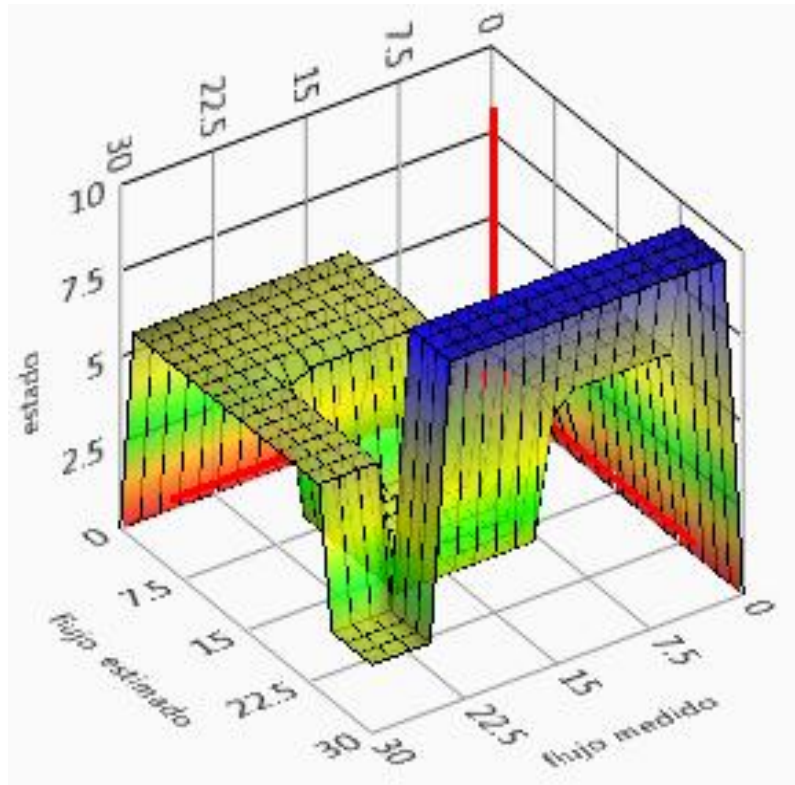


Figura 3.5 Superficie de control de la relación del Flujo medido - Flujo estimado - Salida [Azul: Fuga; Amarillo: Fallo; Rojo: Correcto; Verde: Incertidumbre].

Al igual que las superficies de control para las variables de presión-salida, esta cuenta con un código de colores que determina los intervalos de valores donde se genera una salida determinada del sistema. Es importante denotar que estas superficies cambian conforme a la relación de variables, si fuese presión medida - flujo estimado - salida, se tendría una superficie de control totalmente diferente, pero no por ello errónea, solamente la relación es diferente.

3.3.5. Diseño de la interfaz gráfica

Para realizar la interfaz gráfica se utilizó como base el modelo difuso creado con anterioridad, bajo el nombre de “modelo_tesis”.

Una interfaz se usa para que el usuario visualice de forma amigable el comportamiento de las variables del sistema (presión y flujo) así como tener una notificación del estado del sistema de tuberías ya sea para realizar alguna acción de control o tener un registro del comportamiento del sistema.

Básicamente la interface cuenta con 6 pestañas de visualización para el usuario. La pestaña principal del usuario se muestra en la figura 3.6. En dicha figura se muestra señalizaciones luminosas para la representación del estado del sistema en cada punto, una serie de indicadores de presión para cada punto de medición y una barra indicadora de los valores de entrada de presión y flujo. A su vez se cuenta con perillas que permiten la selección de las diferentes posiciones para cada válvula.

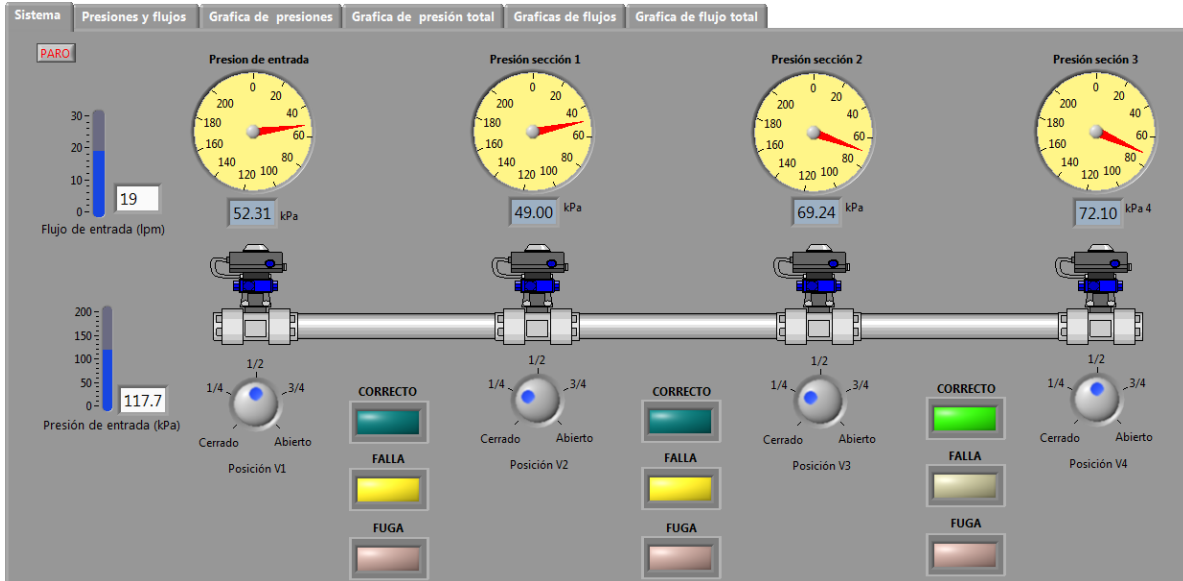


Figura 3.6. Pestaña principal de la interfaz.

En la siguiente pestaña mostrada en la figura 3.7, se muestran los valores de las presiones medidas para cada sección del sistema, las caídas de presión por cada sección de la tubería, las cuales varían dependiendo de las posiciones de las válvulas así como las presiones medidas para cada sección y los flujos del sistema.

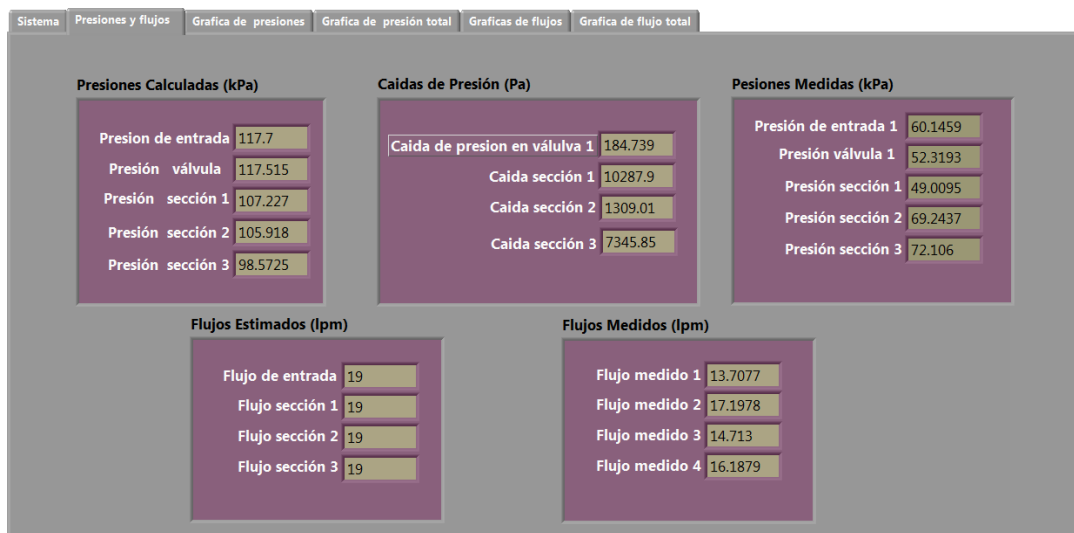


Figura 3.7. Pestaña de presiones.

La tercera pestaña del programa muestra de manera gráfica el comportamiento de las presiones dentro del sistema, cada una de las gráficas representa una presión medida en los diferentes puntos del sistema tal y como se muestra en la figura 3.8.

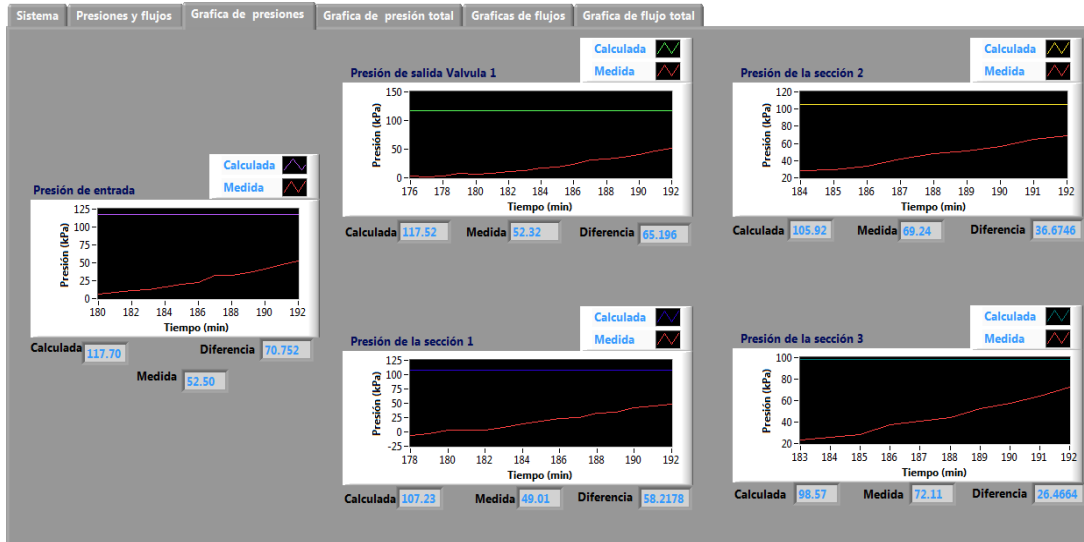


Figura 3.8. Pestaña de visualización de presiones.

La siguiente ventana muestra todas las presiones dentro de una sola gráfica tal y como se muestra en la figura 3.9.

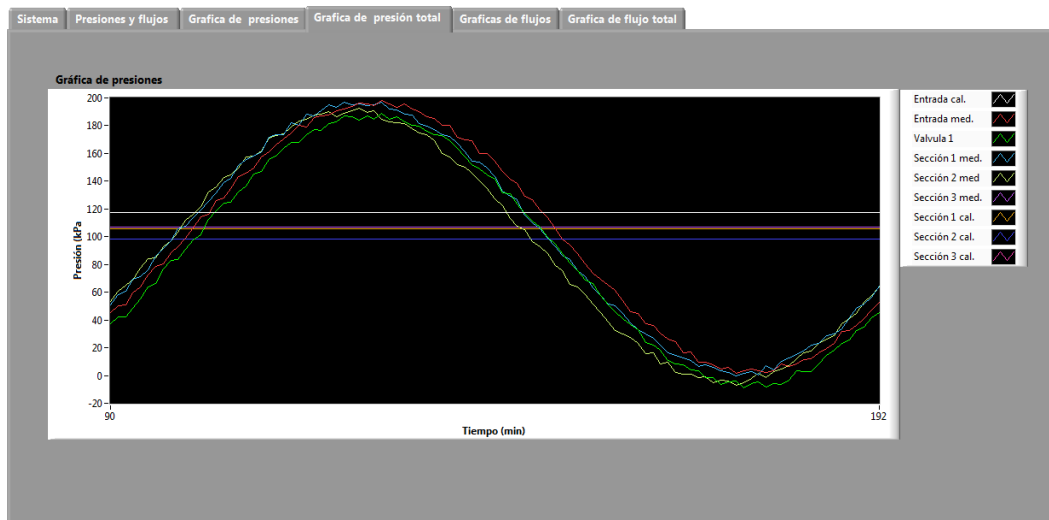


Figura 3.9. Pestaña de visualización de las funciones de membresía.

Las siguientes dos pestañas muestran de manera similar gráficas de flujos por sección así como la global, tal y como se muestra en la figura 3.10 y 3.11

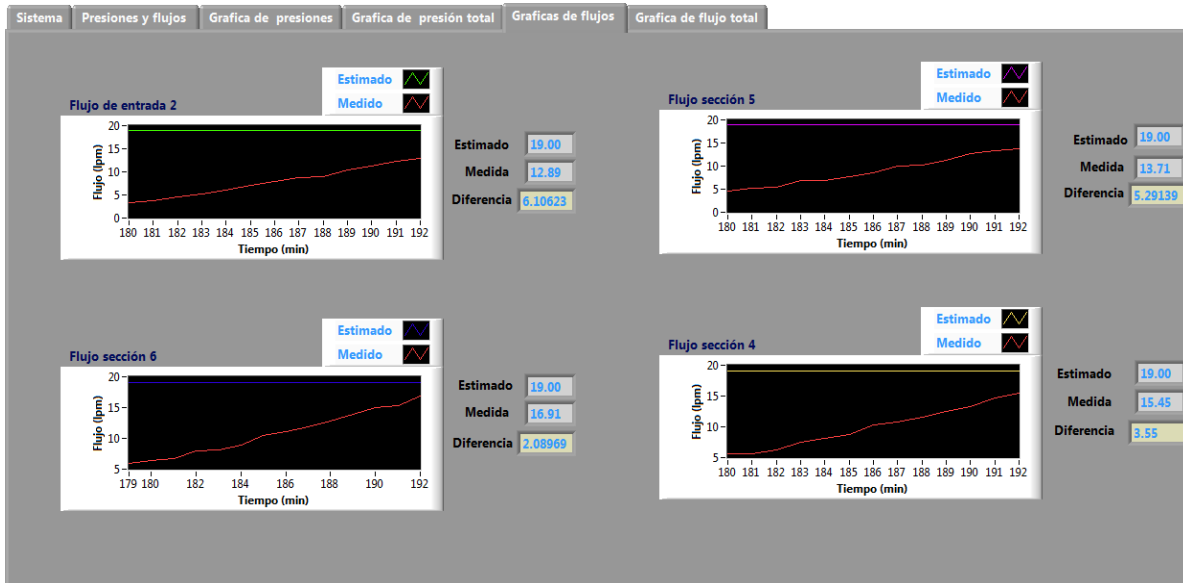


Figura 3.10. Pestaña de visualización de flujos por sección.

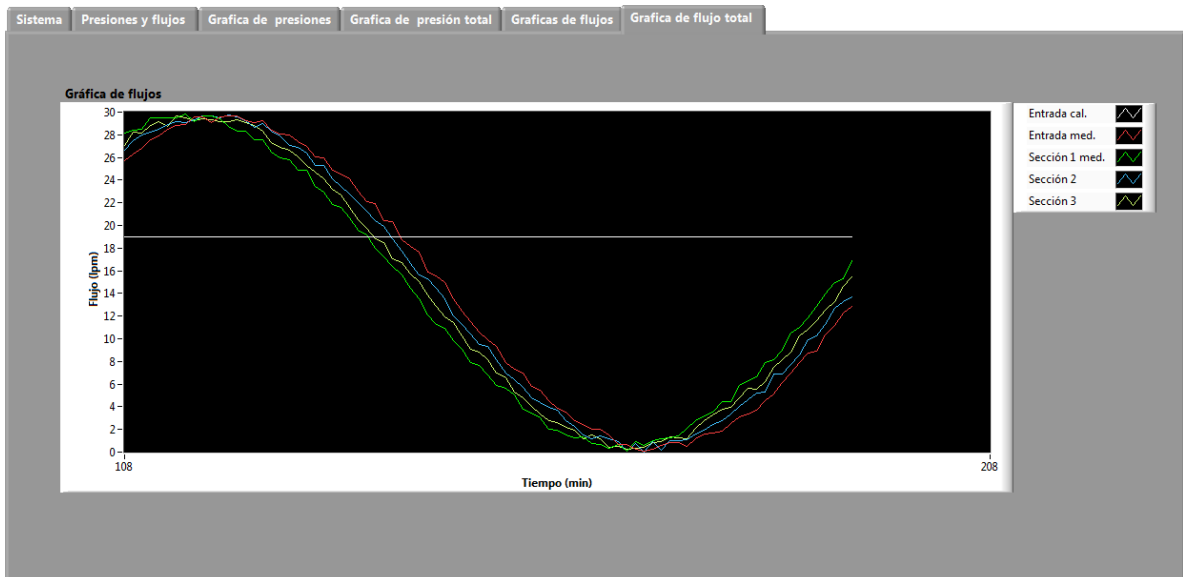


Figura 3.10. Pestaña de visualización del total de flujos.

3.3.6. Programación de la interface gráfica⁴

La programación de la interface cuenta internamente con 4 controladores difusos que son los encargados de realizar la tarea de monitoreo del sistema, el primer controlador (3.12) se utiliza básicamente para calcular las caídas de presión ocasionadas por la primer válvula así como para la adquisición de datos de entrada (presión y flujo) de las condiciones iniciales y para la adquisición de datos que simulen los valores medidos a través de una tarjeta de adquisición de datos.

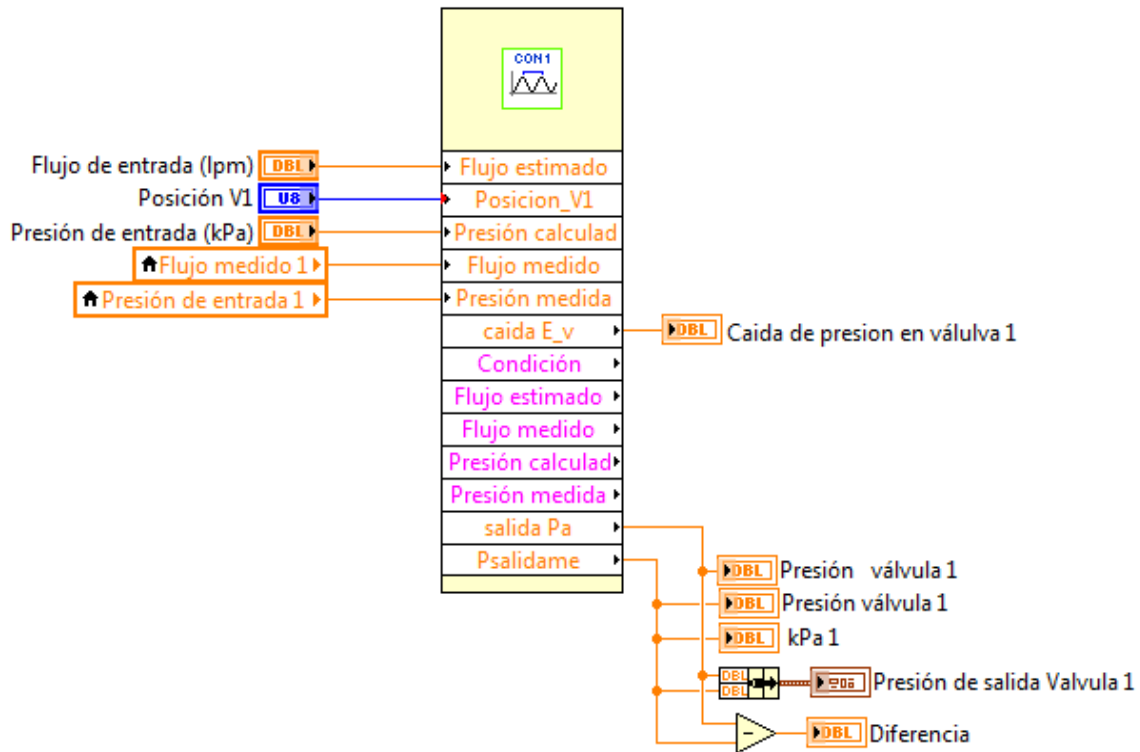


Figura 3.12. Estructura del controlador difuso en el programa principal.

Esta estructura solamente es la adquisición y la transmisión de datos a una subrutina (también conocida como subVIs) la cual en su interior se encarga de

⁴ Nota: La programación a continuación mostrada se realizó utilizando LabView 2010 Professional Developer.

realizar lo anteriormente mencionado. Internamente la subrutina debe llamar al modelo difuso creado a través de la secuencia mostrada en la imagen 3.13. Si bien cuando se realizó la programación del modelo difuso se determina prácticamente todo el proceso de inferencia, es necesario realizar este llamado para poder asignarle valores a las variables, así como para obtener una salida del sistema.

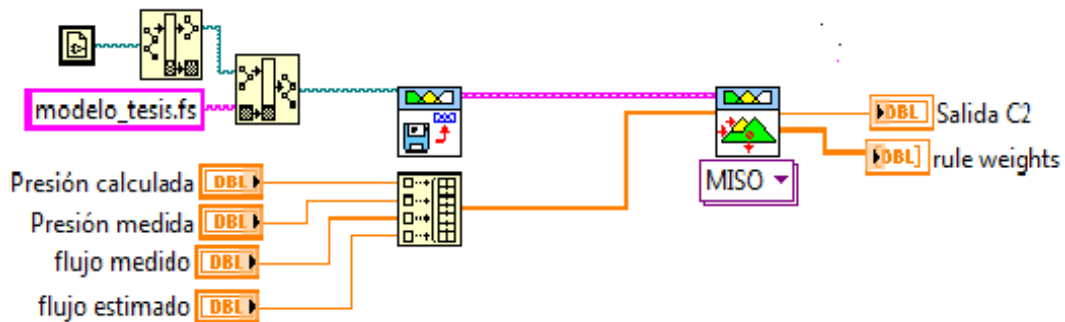


Figura 3.13. Llamado del modelo difuso.

El programa también permite la visualización de las funciones de membresía del sistema a través de la rutina mostrada en la imagen 3.14. Con esta rutina se pueden ver de manera gráfica una de las variables del sistema con sus funciones de membresía, esta rutina se repitió para cada una de las variables de entrada y de salida.

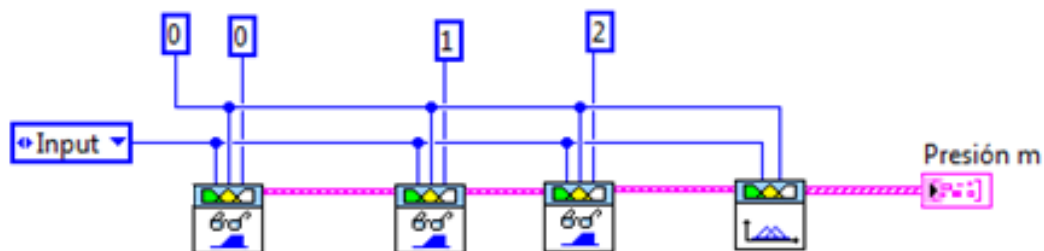


Figura 3.14. Visualización de las funciones de membresía.

Para determinar la caída de presión para cada una de las secciones del sistema, se programó la ecuación de conservación de la energía y como se muestra en la figura 3.15. Dentro de este código se encuentra una subrutina inferior la cual determina la caída de presión que se tiene por las diferentes posiciones de la válvula. Este código se realizó tanto para la presión calculada y la medida.

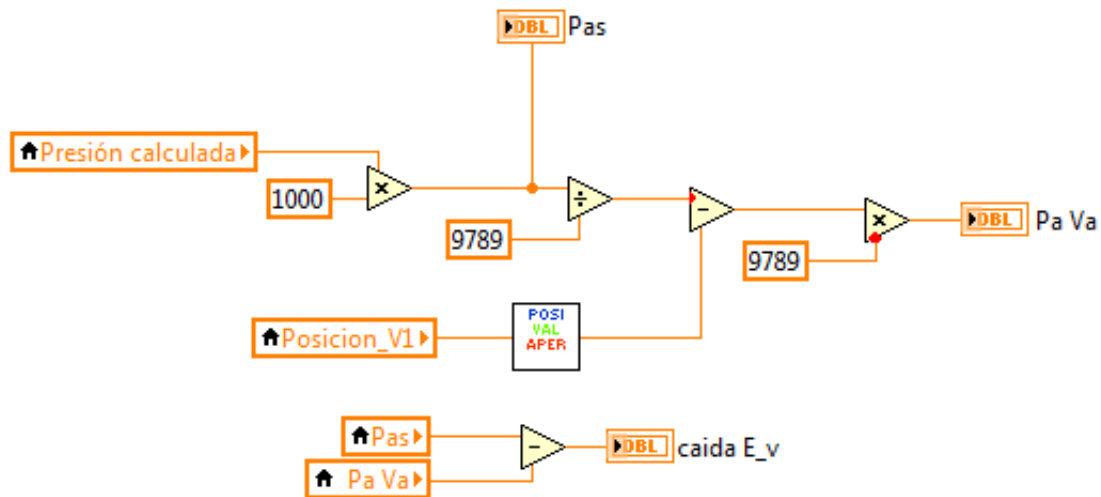


Figura 3.15. Programación de la ecuación de conservación de la energía.

Para los controladores 2, 3 y 4, su funcionalidad cambia, estos controladores además de realizar las acciones descritas para el primer controlador, cuentan con una salida, la cual es la que nos determina la condición de la sección de la tubería, la cual debe monitorear el controlador. Además de que reciben datos a partir de la salida del controlador anterior. A diferencia del primer controlador. La estructura de estos controladores se muestra en la figura 3.16.

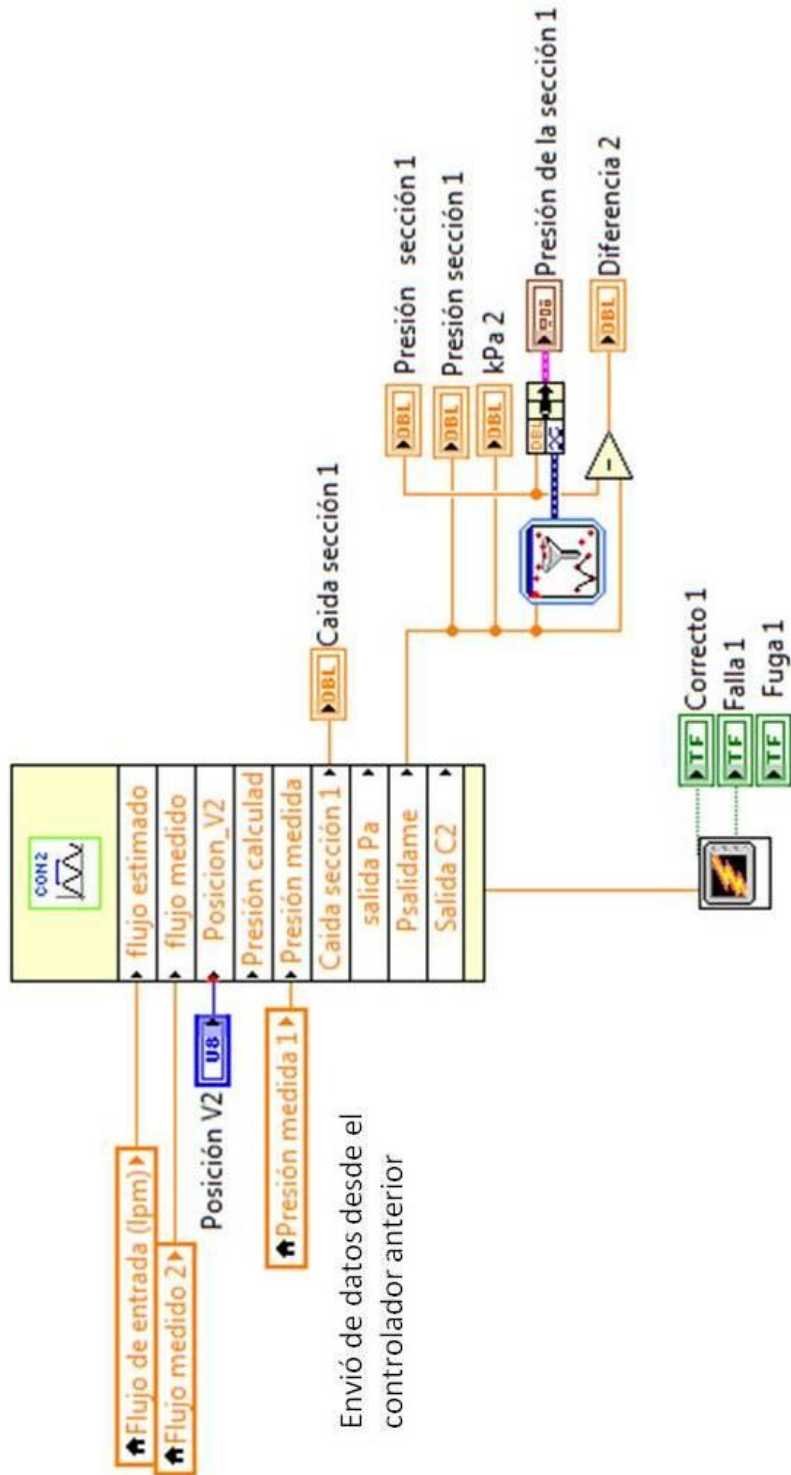


Figura 3.16. Estructura básica de los controladores 2,3 y 4.

Su estructura es similar a lo que se tiene en el primer controlador, aun así cuenta con diferencias internas como la mostrada en la figura 3.16. La cual es una rutina que permite modificar automáticamente los intervalos de las funciones de membresía para que se adapten a la caída de presión del sistema en ese punto de medición. Esto se debe a que como el sistema se encuentra dividido en 3 secciones y por las caídas de presión, no será la misma presión que se tiene en el punto inicial con la que se tenga en la segunda sección.

A su vez también cuenta con la ecuación de continuidad programada para las variables de presión medida y presión calculada tal y como lo muestra el código de la figura 3.17 y de la cual se generan los valores de las caídas de presión de las cuales se adaptaran las funciones de membresía. El código del programa realizado se encuentra en el Anexo E del presente trabajo.

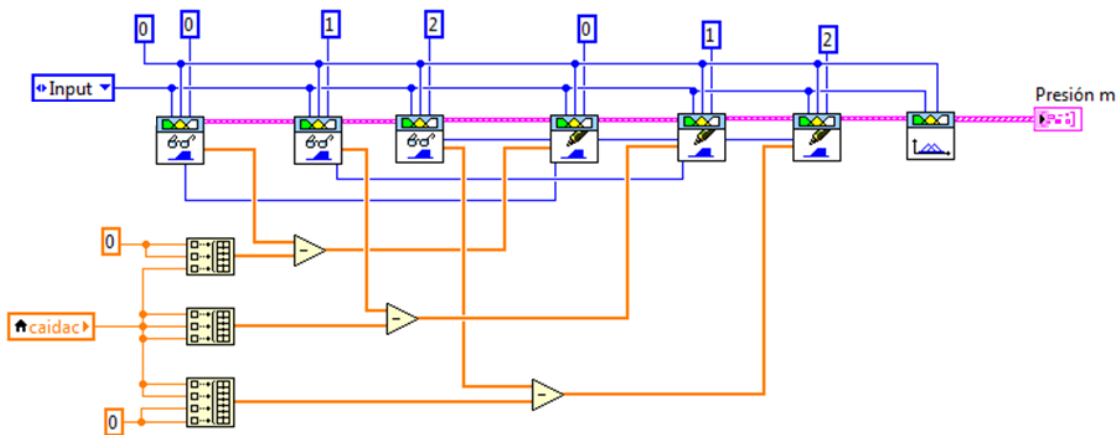


Figura 3.16. Código que permite adaptar los valores de las funciones de membresía.

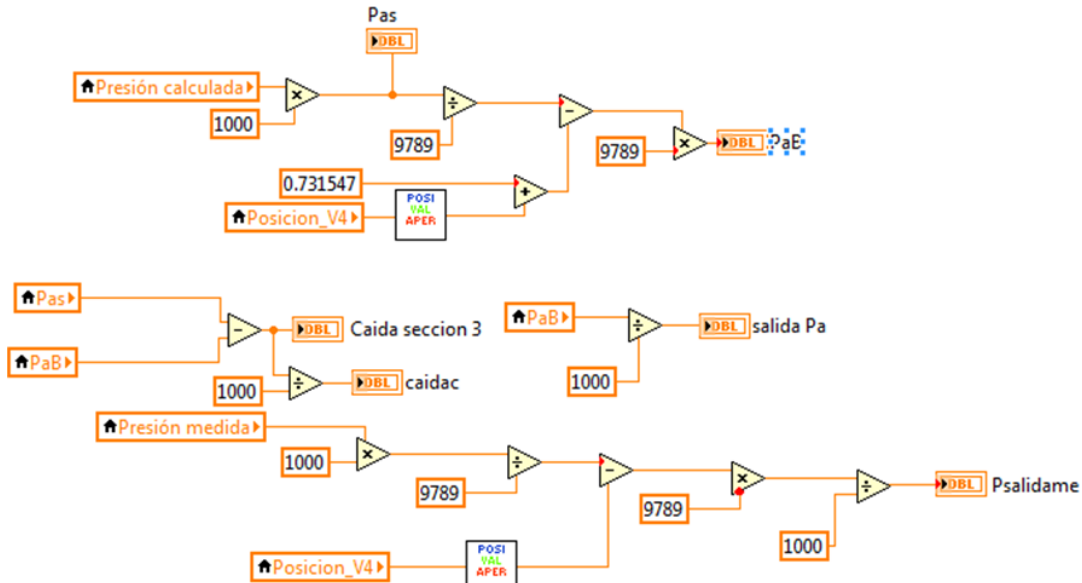


Figura 3.17. Código que permite adaptar los valores de las funciones de membresía.

El último factor importante dentro de la programación de la interface es la simulación de la tarjeta de adquisición de datos, para la cual se eligió el modelo NI USB 6210 el cual cuenta con las siguientes características:

- 16 entradas analógicas.
- 2 salidas analógicas.
- Una velocidad máxima de muestreo de 80 MHz.

Una vez realizada la programación de nuestra interface grafica, de los controladores difusos y de la caracterización del sistema, se procederá a realizara la obtención de datos mediante la simulación de una tarjeta de adquisición de datos, la obtención de los resultados y su análisis se realizaran en el siguiente capítulo.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS Y ANÁLISIS

El presente capítulo muestra los resultados obtenidos con el sistema de monitoreo difuso desarrollado en el capítulo 3 así como el análisis de estos. Para ello se analizaron los tres estados posibles del sistema (Correcto, Falla y Fuga) utilizando como base los datos de trabajo del sistema que son 19 lpm para flujo y 117.7 kPa para presión. Por último se presenta el análisis económico para la implementación del método difuso para la detección de fugas.

4.1 Modo de operación correcto

Para la realización de las pruebas se definieron una serie de valores para cada uno de los niveles de las variables del sistema (bajo, trabajo y alto). Los valores tanto de presión como de flujo para cada uno de estos estados se muestran en la tabla 4.1. Estos valores son los mismos para cada prueba realizada al sistema.

Tabla 4.1. Valores propuestos para la realización de las pruebas.

VARIABLE	NIVEL		
	Bajo	Trabajo	Alto
Presión de entrada	40 kPa	117.67 kPa	170 kPa
Flujo de entrada	6.45 lpm	19 lpm	27.44 lpm

En la tabla 4.2 se muestran los valores de las caídas de presión del sistema para cada una de las secciones dependiendo la posición de apertura de cada válvula. Estas presiones son referentes para todos los resultados y análisis de resultados mostrados en este capítulo.

Tabla 4.2 Valores de las caídas de presión por sección dependientes de apertura de las válvulas.

SECCION	APERTURA			
	1/4	1/2	1/3	100%
Válvula 1	1039.15 Pa	184.7339 Pa	40.41 Pa	9.23
Sección 1	10287.9 Pa	9433.53 Pa	9289.21 Pa	9258.03
Sección 2	1309.01 Pa	454.592 Pa	310.265 Pa	279.09
Sección 3	8200.27 Pa	7345.85 Pa	7201.53 Pa	7201.53

Una vez determinadas las caídas de presión así como los valores que toman, se iniciaron las pruebas utilizando el valor *Bajo* para ambas variables dentro del sistema y a su vez las válvulas se posicionaron en su máxima apertura. Al introducir los valores del sistema así como la simulación de la adquisición de datos, los resultados del estado correcto en presión en un nivel bajo se muestran en la gráfica de la figura 4.1.

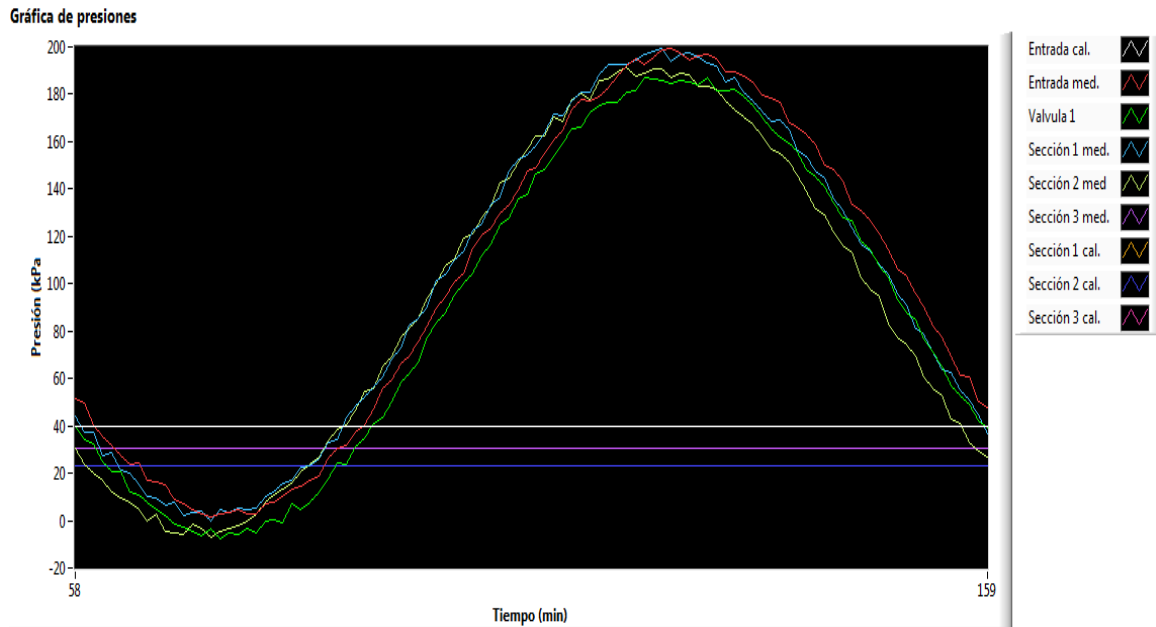


Figura 4.1. Gráfica de presiones para el estado correcto.

Dentro de la imagen anterior se aprecia el comportamiento de las presiones medidas por la simulación de la tarjeta de adquisición de datos, estas son

comparadas contra las presiones calculadas, las presiones medidas presentan un comportamiento oscilatorio, mientras las presiones calculadas se comportan de una manera lineal. En la gráfica, las presiones medidas dentro del intervalo de 0-80 kPa coinciden en el intervalo con las presiones calculadas. No necesariamente las presiones medidas son iguales a las presiones calculadas, basta con que estén dentro del mismo intervalo para que el sistema se encuentre en un estado correcto, cabe mencionar que las presiones medidas están siendo simuladas por la simulación de la tarjeta de adquisición de datos. En la tabla 4.3 se localizan las presiones calculadas y medidas para cada sección del sistema.

Tabla 4.3 Valores medidos y calculados de presión en estado correcto en nivel bajo.

VARIABLE	VALORES		
	Calculada (kPa)	Medida(kPa)	Diferencia (kPa)
Presión de entrada	40	47.60	-7.6
Presión sección 1	39.99	33.69	6.3
Presión sección 2	30.73	35.116	-5.11
Presión sección 3	23.28	19.1	4.18

En la tabla anterior en la columna de diferencia se aprecian tanto valores positivos como negativos, estos valores son como su nombre lo indica la diferencia que existe entre la presión calculada y la medida, los números positivos significan que la presión calculada se encuentra por encima de la presión medida y los números negativos indican que la presión medida se encuentra por encima de la presión calculada. En la figura 4.2 se muestra una gráfica similar a la de la figura 4.1, pero para los flujos.

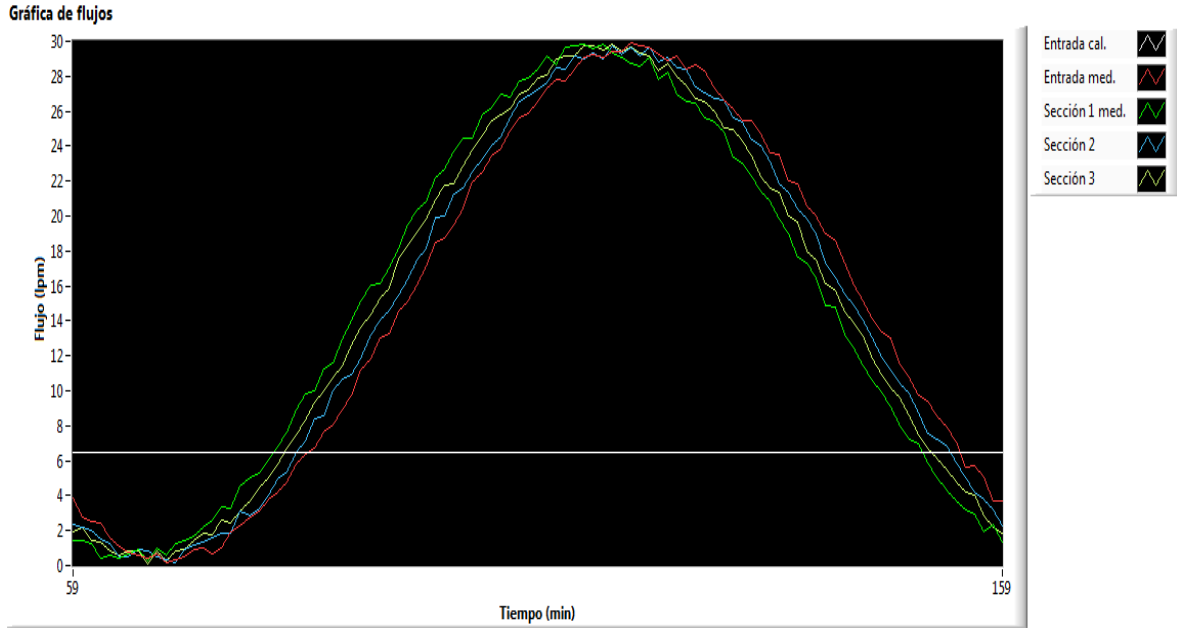


Figura 4.2. Gráfica de flujos para el estado correcto.

En esta gráfica a diferencia de la gráfica de las presiones, solo se tiene una variable lineal debido a que se tiene un flujo estimado de misma magnitud para las tres secciones de las tuberías. Esto se debe a que se está considerando un flujo promedio para todas las secciones. En el caso de los flujos volumétricos, se encuentran en un estado correcto cuando están en el intervalo de 0-12 lpm. En la tabla 4.4 se muestran los valores de los flujos medidos, estimados y la diferencia entre ellos.

Tabla 4.4. Valores medidos y calculados de flujo en estado correcto en bajo nivel.

VARIABLE	VALORES		
	Estimado (lpm)	Medido (lpm)	Diferencia (lpm)
Flujo de entrada	6.45	3.73	2.72
Flujo sección 1	6.45	1.36	5.09
Flujo sección 2	6.45	2.30	4.15
Flujo sección 3	6.45	1.88	4.57

El hecho de que el sistema determine un estado correcto a pesar de que las variables medidas y calculadas tengan distintos valores, provee al sistema de una

flexibilidad al momento de determinar el estado de éste, ya que el sistema trabaja con intervalos que no son otra cosa más que las funciones de membresía. En la figura 4.3 se muestra la pantalla principal de la interfaz en estado correcto en nivel bajo.

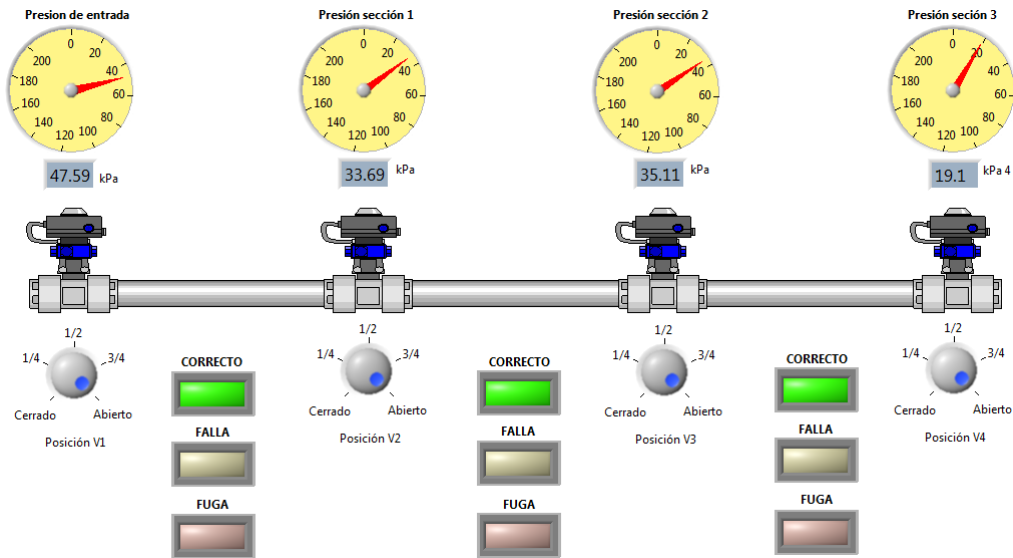


Figura 4.3. Pantalla inicial de la interfaz para el estado correcto en un nivel bajo.

4.2 Modo de operación de falla

Para las pruebas de la condición de Falla del sistema se utilizaron los valores de trabajo mostrados en la tabla 4-1 así como las válvulas se posicionaron a un $\frac{1}{2}$ de su apertura. En la figura 4-4 se muestra la ventana principal de la interfaz, en la cual se muestra el estado de falla para cada una de las secciones.

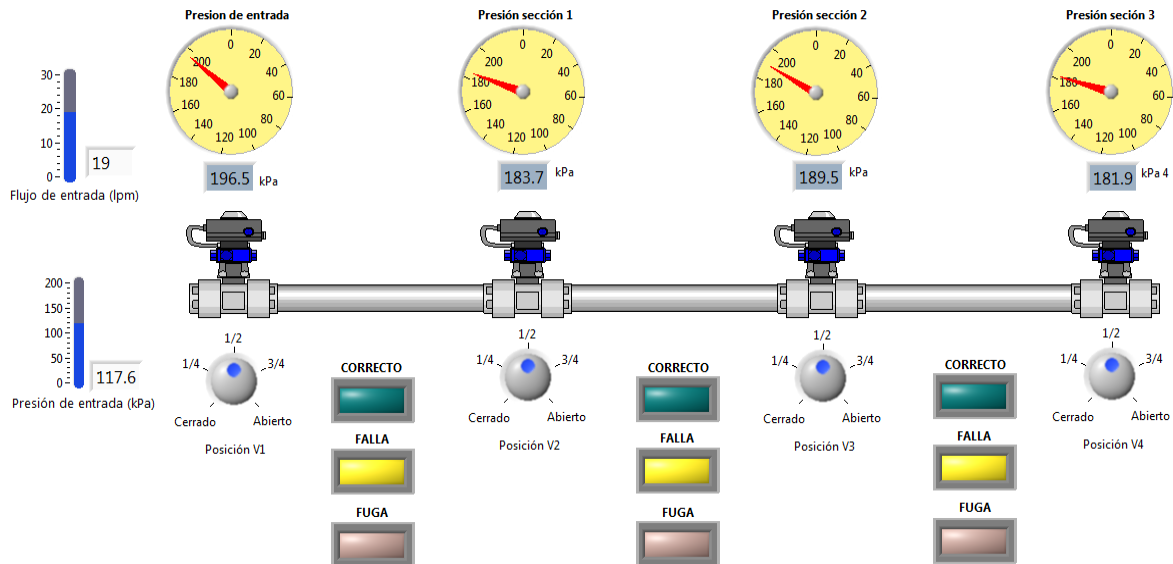


Figura 4.4. Pantalla inicial de la interfaz para el estado de falla en un nivel de trabajo.

El estado de falla se presenta cuando las variables medidas se encuentran en un intervalo mayor que las calculadas y estimadas. Esta condición se puede presentar debido a la obstrucción de la tubería causada por un sólido en suspensión con lo cual la presión aumentaría repentinamente. Otra de las razones por la cual el sistema presenta esta condición se puede deber a la condición de cavitación dentro del sistema. Existe otra razón por la cual se puede presentar esta condición dentro del sistema y esta puede ser provocada por una apertura y cierre de válvulas repentino, dando lugar a lo que se conoce como golpe de ariete.

En la figura 4.5 se muestra la gráfica de la relación de presiones para el estado de falla. En dicha gráfica se observa que las presiones calculadas son líneas rectas y las presiones medidas oscilan. Para que el sistema determine el estado de falla en cualquiera de las secciones de la tubería, es necesario que la presión medida se encuentre ubicada en el intervalo superior, en este caso la presión debe de ubicarse dentro del intervalo de los 160 a 200 kPa y para el flujo de 24 a 30 lpm.

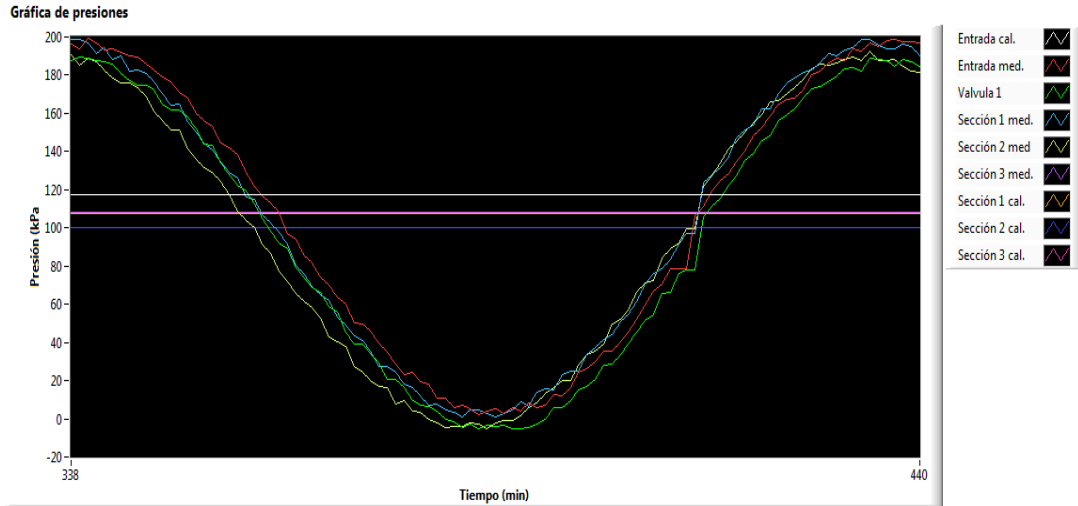


Figura 4.5. Gráfica de presiones para el estado de falla en un nivel de trabajo.

La tabla 4.5 muestra la relación de las presiones medidas y calculadas. Lo que se aprecia en dicha tabla es que todas las presiones medidas son mayores que las calculadas, con lo cual todas las diferencias entre ellas son de signo negativo. Esto es de esperarse debido a que para que las fallas se presenten, el sistema debe de tener una medición más alta en comparación del cálculo. Para el flujo las condiciones deben de ser las mismas, el flujo medido debe de ser mayor al estimado. En la figura 4.6 se muestran estas condiciones.

Tabla 4.5. Valores medidos y calculados de presión en estado de falla en nivel de trabajo.

Variable	Calculada (kPa)	Medida (kPa)	Diferencia (kPa)
Presión de entrada	117.67	196.74	-79.07
Presión sección 1	108.05	183.779	-66.29
Presión sección 2	107.59	189.56	-81.97
Presión sección 3	100.25	181.936	-81.68

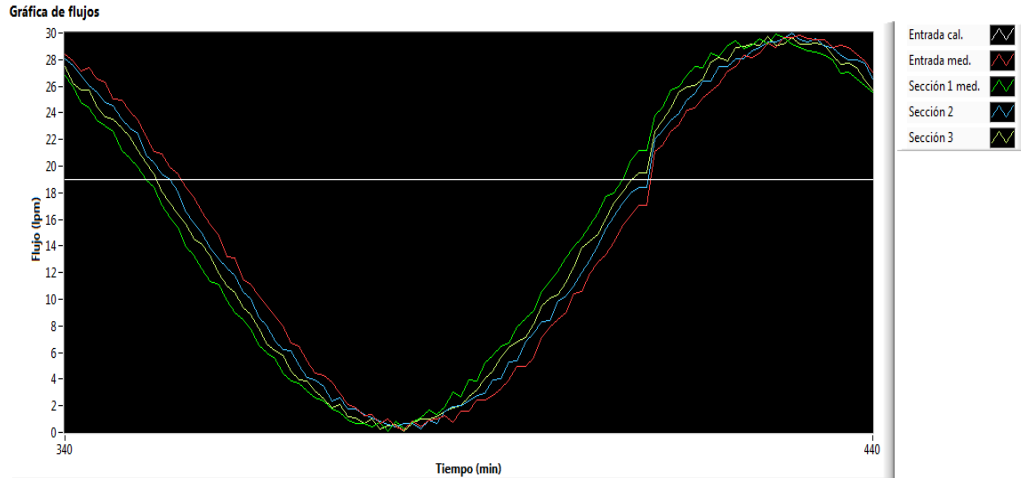


Figura 4.6. Gráfica de flujos para el estado de falla en un nivel de trabajo.

En este caso las presiones medidas deben de sobrepasar el intervalo de los 12 lpm a 24 lpm para que el sistema pueda detectar una condición de falla. El valor del flujo estimado así como del medido se encuentra en la tabla 4.6.

Tabla 4.6. Valores medidos y calculados de flujo en estado de falla en nivel de trabajo.

Variable	Estimado (lpm)	Medido (lpm)	Diferencia (lpm)
Flujo de entrada	19	27.09	-8.09
Flujo sección 1	19	25.56	-6.56
Flujo sección 2	19	26.57	-7.57
Flujo sección 3	19	25.72	-6.72

4.3 Modo de operación de fuga

La fuga se detecta en el sistema cuando existe una diferencia entre los intervalos o que se tenga una caída de presión o reducción de flujo significativo. De manera física la fuga se presenta cuando cierta cantidad de líquido que entró al sistema no llega a su punto de destino, esto puede deberse a una fractura dentro de alguna de las secciones del sistema o del desacoplo de alguno de sus accesorios. Cuando la fuga se presenta se pierde líquido y con ello se pierde presión con lo

cual el sistema al comparar estas dos variables es capaz de detectar dicho estado. Para la prueba del sistema de la condición de fuga se tomaron los valores Altos de la tabla 4.1. La relación de presión se representa en la figura 4.7.

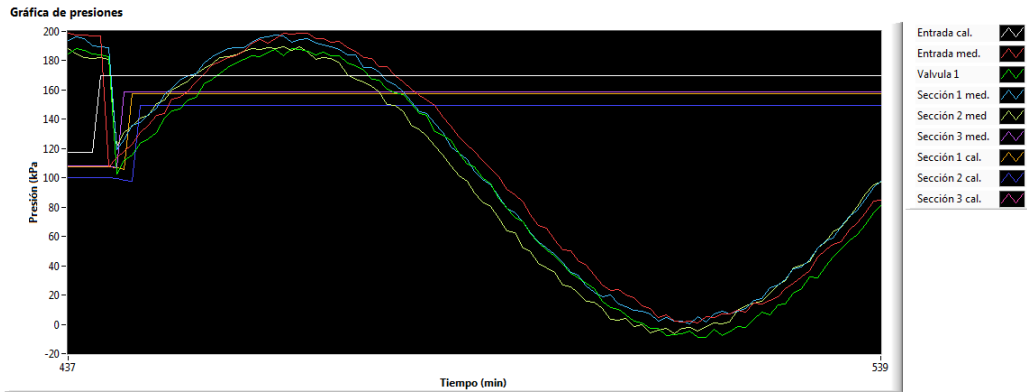


Figura 4.7. Gráfica de presiones para el estado de fuga en un nivel Alto.

En este caso las presiones que se encuentren por debajo de los 160 kPa representan una pérdida significativa de presión, con lo cual el sistema determina que se trata de una fuga. En la tabla 4.7 se representan los valores de estas condiciones:

Tabla 4.7 Valores medidos y calculados de presión en estado de fuga en nivel alto.

Variable	Calculada (kPa)	Medida (kPa)	Diferencia (kPa)
Presión de entrada	170	83.79	86.21
Presión sección 1	158.67	88.27	81.73
Presión sección 2	157.36	101.57	55.86
Presión sección 3	149.16	103.03	45.86

Al caso contrario que el de falla, en el estado de fuga la diferencia entre las presiones medidas y las calculadas son positivas, ya que la presión calculada debe de ser mayor que la medida. En estas condiciones el sistema tiene todo un intervalo para poder determinar si se trata de una fuga o no, ya que si bien la presión puede caer de manera drástica debido a una falla dentro de la bomba de

alimentación o una apertura o cierre de válvulas. Si no se tuviesen los intervalos de las funciones de membresía al detectar un pequeño cambio dentro de la presión el sistema de monitoreo detectaría inmediatamente que se trata de una fuga en vez una posible falla o falta de agua para el suministro.

En el caso del flujo es similar el comportamiento tal y como se observa en la figura 4.8. Dentro de esta figura se aprecian los valores de caída del flujo medido dentro del sistema. Al igual que con la presión una reducción de flujo repentina puede deberse a que el sistema se ha quedado sin suministro o que la bomba falló, para poder detectar la fuga el sistema debe de cruzar la barrera de la función de membresía anterior.

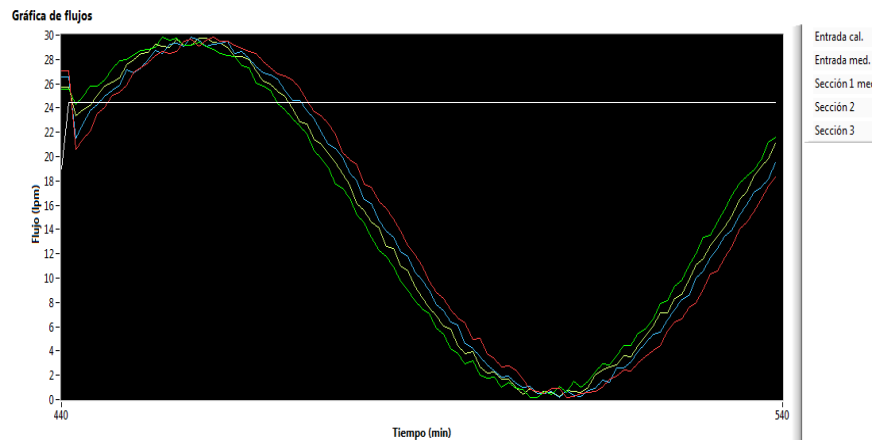


Figura 4.8. Gráfica de flujos para el estado de fuga en un nivel Alto.

La relación de flujo para esta prueba se representa en la tabla 4-8. En dicha tabla se observa que todos los valores de la presión se encuentran por debajo de los valores de flujo estimado.

Tabla 4.8 Valores medidos y calculados de flujo en estado de falla en nivel de trabajo.

Variable	Estimado (lpm)	Medido (lpm)	Diferencia (lpm)
Flujo de entrada	24.44	18.97	5.47
Flujo sección 1	24.44	22.90	1.54
Flujo sección 2	24.44	19.91	4.53
Flujo sección 3	24.44	21.76	2.68

4.4 Costos

Dentro de la parte de costos del presente trabajo solo se contemplaron los siguientes puntos:

- Levantamiento.
- Cálculos.
- Modificaciones.
- Diseño del controlador difuso.

La parte correspondiente para la instalación así como la puesta en marcha del sistema no se tomar en cuenta dentro del alcance del presente trabajo, sin embargo se incluye en el trabajo de forma adicional, ya que representa una parte importante para los trabajos futuros o si se desea implementar el sistema. Los datos se muestran en la tabla 4.9, la cual muestra a grandes rasgos los costos del sistema. Para la implementación es necesaria una lista de materiales y equipos, como se muestra en la tabla 4.8.

Tabla 4.8 Lista de Materiales y Equipos

CANTIDAD	MATERIAL	ESPECIFICACIONES
4	Válvulas de Compuerta	Marca: Spirax Sarco; Modelo: AP-10; Diámetro: 1 ½"
4	Transmisores de Presión	Marca: Emerson Process Management; Modelo: Rosemount 3051; Input: 9-32 VCD ; Output: 4-20 mA y Protocolo Profibus PA; Rango: 0-20 psi (ajustable)

Ya teniendo los materiales y equipos a utilizar, también se tienen que tomar en cuenta las licencias del software, mano de obra, costo de la ingeniería de detalle, etc. Esto se muestra en la tabla 4.9.

Tabla 4.9 Cotización de la instalación del sistema de monitoreo difuso para la detección de fugas

COTIZACION DE LA INSTALACION DE UN SISTEMA DE MONITOREO DIFUSO PARA LA DETECCION DE FUGAS			
FECHA	22-oct-11	REVISION	0
CANTIDAD	CONCEPTO	UNITARIO	TOTAL
1	LICENCIA DEL SOFTWARE (LABVIEW 2011) VERSIÓN PROFESIONAL POR 2 AÑOS	\$ 42, 211.00	\$ 42, 211.00
1	LABVIEW SIGNAL EXPRES PARA WINDOWS	\$ 15, 385.00	\$ 15, 385.00
1	LABVIEW PID & FUZZY LOGIC TOOLKIT	\$ 15, 385.00	\$ 15, 385.00
1	LEVANTAMIENTO DE LAS INSTALACIONES Y CÁLCULOS REALIZADOS	\$8,000.00	\$8,000.00
1	INGENIERIA DE DETALLE LA CUAL INCLUYE PLANOS, ESPECIFICACIONES Y DIAGRAMAS ELÉCTRICOS	\$ 10, 000.00	\$ 10, 000.00
1	IMPLEMENTACIÓN , ARRANQUE Y PRUEBA DEL SISTEMA DE MONITORES DIFUSO.	\$ 25, 000.00	\$ 25, 000.00
1	MATERIALES Y EQUIPOS	\$ 120, 000.00	\$ 120, 000.00
1	MANO DE OBRA	\$ 90, 000.00	\$ 90, 000.00
1	TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS, MODELO: NI USB 6210	\$ 9, 685.00	\$ 9, 685.00
TOTAL			\$342,666.00

Los precios de las licencias y de la tarjeta de adquisición fueron tomados en cuenta de la página oficial de National Instruments, los precios de la mano de obra e ingeniería de detalle son referenciados a la compañía Tecnocontrol y Sistemas S. A. de C. V. como parte de una consulta que se tuvo con ellos.

CONCLUSIONES

Se obtuvo un sistema de monitoreo para la detección de fugas en base a la lógica difusa, así como la realización de una HMI para su implementación. Las conclusiones principales del presente trabajo son:

- El modelado difuso permitió desarrollar un método de detección de fugas robusto y de una implementación sencilla.
- La interfaz hombre-máquina permite un manejo agradable al usuario y un acceso cómodo a los datos del sistema.
- El sistema desarrollado no detecta la ubicación exacta de la fuga, sin embargo detecta la sección donde se ubica.
- El programa de monitoreo difuso es capaz de implementarse en sistemas de distribución similares al utilizado en este trabajo.

Al realizar las pruebas de las diferentes condiciones del sistema se determinó que el método de solución propuesto dentro de este trabajo cumple con el objetivo principal el cual es realizar un sistema de monitoreo difuso. La diferencia del presente método con respecto a otros presentados dentro de este trabajo es su fácil implementación y su adaptabilidad. Si bien las funciones de membresía se realizaron en base al sistema propuesto, estas son fáciles de modificar para cualquier otro sistema a la vez de que el propio sistema puede adaptar sus funciones de membresía dependiendo de la caída de presión del sistema.

Otra ventaja que representa es que no es necesario personal altamente capacitado para su desarrollo o su implementación, basta común técnico que conozca bien las condiciones de trabajo del sistema para poder realizar en base a su experiencia el modelo difuso. A su vez el método no está restringido para tuberías de un solo material o de un diámetro en específico. Puede servir también

como auxiliar a algún otro método de detección existente, delimitando la sección de la que se ubica la fuga.

Por otro lado el sistema cuenta con la desventaja de que al utilizar el método de Moody para las pérdidas de presión del sistema, este método no es correcto para altas presiones y altas temperaturas, ya que en un sistema más grande, la caída de presión es equivalente a la evaporación de líquido dentro de la tubería.

Un aspecto que también puede representar una desventaja es el costo de la licencia del software de programación. Si bien su costo es un poco elevado para el tamaño del sistema tratado, este costo sería muy similar al de implementarlo dentro de un sistema más grande de distribución, a su vez de que puede aprovechar la instrumentación ya instalada en el sistema.

TRABAJOS FUTUROS

El sistema desarrollado en el presente trabajo puede ser utilizado para otros tipos de líquidos que presenten características similares al agua. Tomando en cuenta la limitante del método de Moody para sistemas de alta presión y elevado flujo. Por otro lado esta limitante puede ser superada utilizando algún otro método similar al de Moody.

El programa realizado es capaz de ser utilizado como respaldo para algún otro sistema de monitoreo que utilice técnicas convencionales, lo que le da una redundancia al sistema de monitoreo inicial.

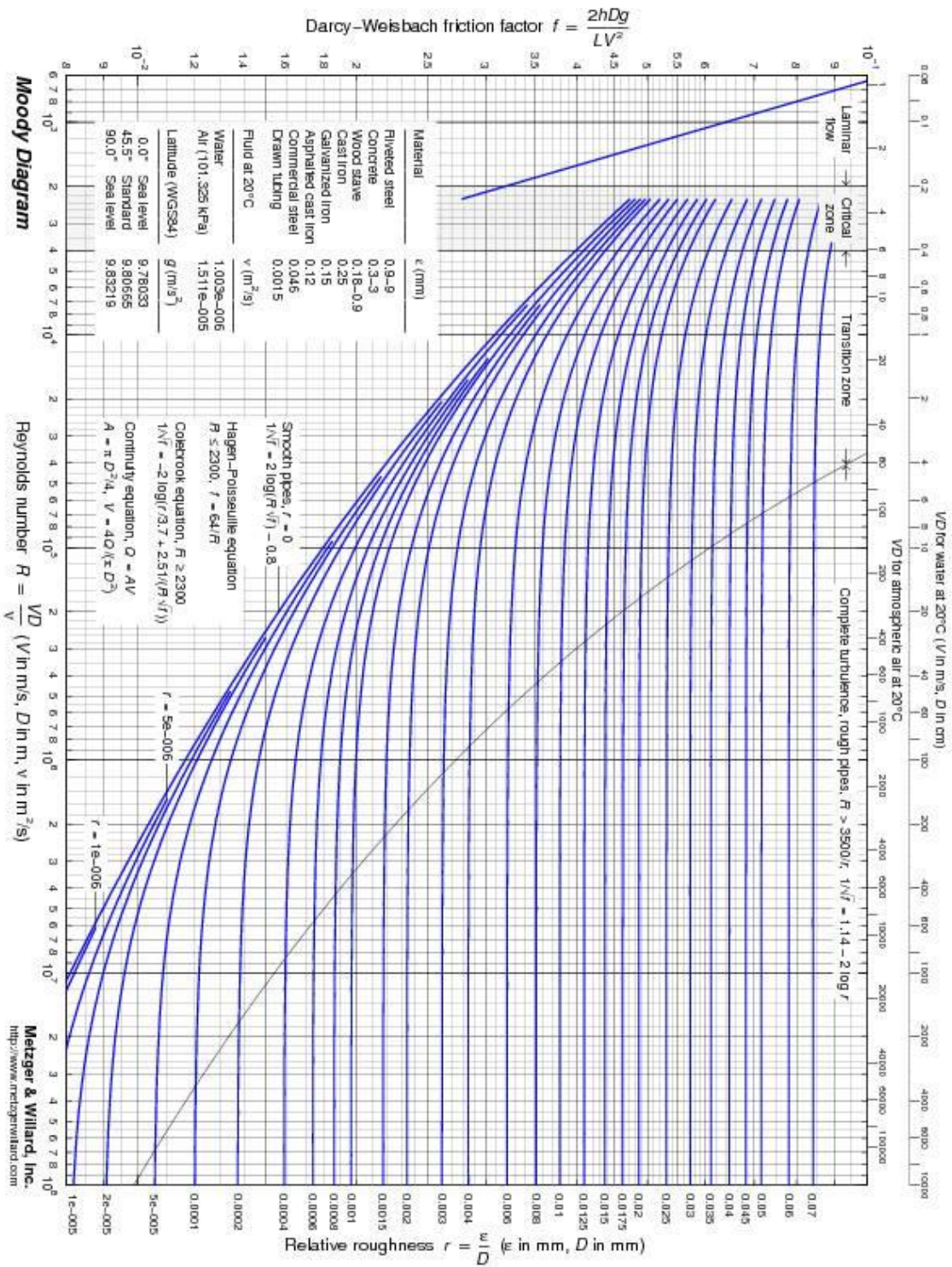
En cuestión a la detección de fugas el método presente, puede ser utilizado como discriminante para un método más avanzado que detecte el punto exacto de la ubicación de la fuga, ya que al delimitar la sección de donde se presenta la fuga, puede activar el llamado del método más avanzado, haciendo con ello que se tenga una reducción en la capacidad de procesamiento computacional necesario para detectar la ubicación exacta.

A sí mismo el modelado difuso puede ser utilizado para crear un sistema adaptativo, en el cual no sea necesario realizar una gran cantidad de cálculos para caracterizar el sistema a implementar, sino que bastaría con implementar el sistema y este se adaptaría en automático a las características del sistema de distribución instalado.

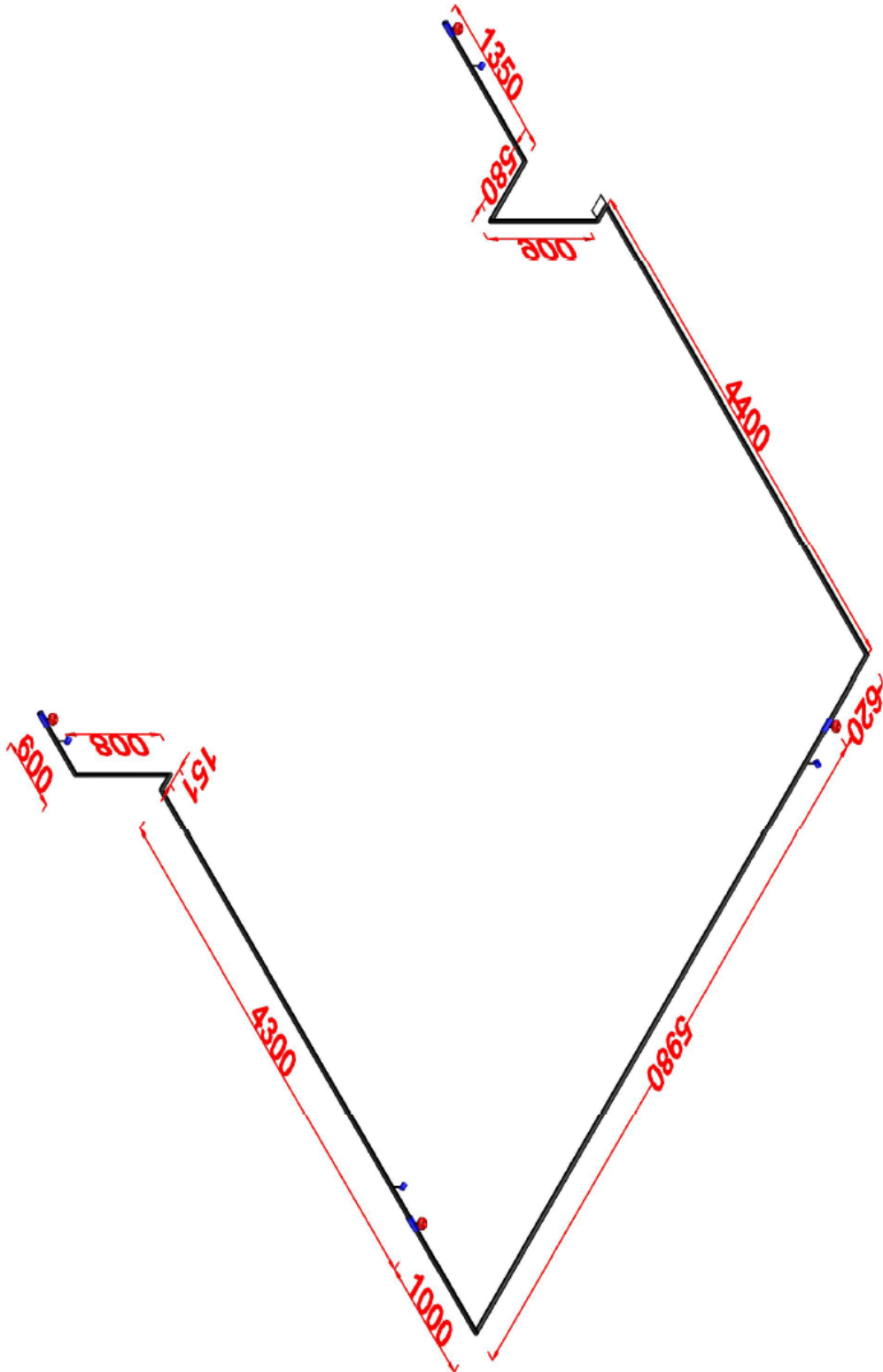
BIBLIOGRAFÍA

- [1] Enciclopedia MedlinePlus. Agua en la dieta. Julio 2011.
- [2] UNESCO. Informe de las naciones unidas sobre el desarrollo de recursos hídricos en el mundo “agua para todos, agua para la vida”. Marzo 2003.
- [3] Banco Mundial. Agua y pobreza, ¿Sabes cuál es su relación? Marzo 2011.
- [4] B. Greyvenstein y J. E. van Zyl. An experimental investigation into the pressure-leakage relationships of some failed water pipes, IWA Publishing, Journal of Water Supply: Research and Technology, AQUA, Vol. 56. 2007.
- [5] Johana Robles. Se desperdicia 38% de agua en la ciudad, El universal. Enero del 2009.
- [6] Washington Department of Health. Water Use Efficiency, Water Use Efficiency Guidebook, Tercera edición, Enero 2011.
- [7] Selecciones. ¿Cómo es la canalización del agua? 2003.
- [8] Richard Pilcher. Water Loss, Leak detection practices and techniques: a practical approach, IWA Publishing, Water, Vol. 21. Diciembre 2003.
- [9] Washington Department of Health. Reduce Leaks using water audits and leak detection surveys. Febrero 2008.
- [10] MathWorks. Fuzzy Logic Toolbox 2, user's guide. Versión en línea. Septiembre 2010.
- [11] Leonid Reznik. Fuzzy Controllers, BH Newnes, primera edición. 1997.
- [12] William C. Dunn. Fundamentals of Industrial Instrumentation and Process Control, Mc Graw Hill. Marzo 2005.
- [13] Craine. Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías, Mc Graw Hill.
- [14] Aquilino Rodríguez Penin. SISTEMAS SCADA, 2 Edición, Marcombo. 2007
- [15] Henry Antonio Mendiburu Díaz. Instrumentación Virtual Industrial, PERÚ-MMVI. Julio 2006.
- [16] David Bailey, Edwin Wright. Practical SCADA for Industry, Newnes. 2003.

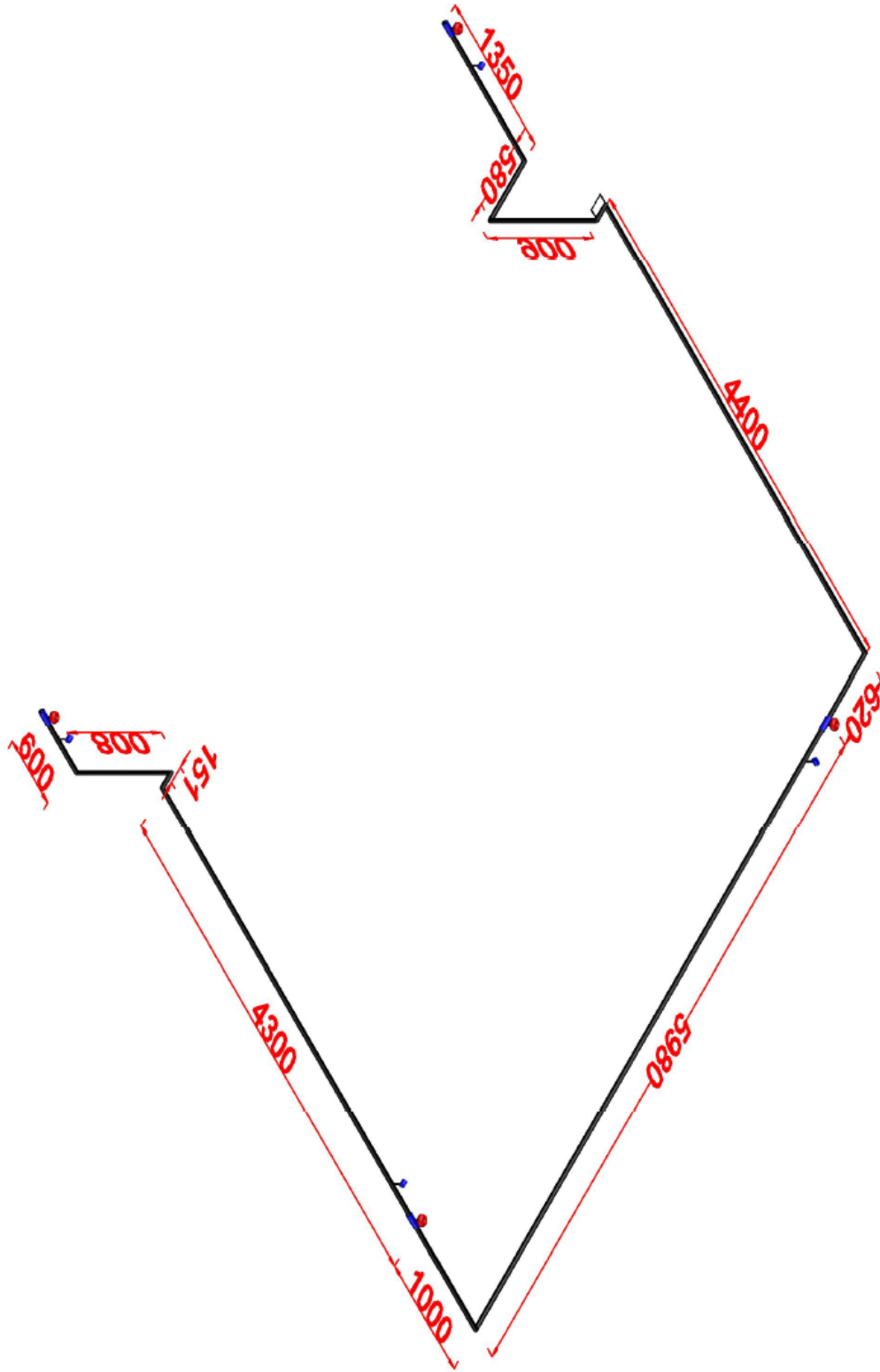
ANEXO A. DIAGRAMA DE MOODY



ANEXO B. INSTALACIÓN ACTUAL



ANEXO C. INSTALACIÓN PROPUESTA



ANEXO D. CONJUNTO DE REGLAS DIFUSAS

1. SI 'presión calculada' ES 'bajo' Y 'presion medida' ES 'Baja' Y 'flujo medido' ES 'Bajo' Y 'flujo estimado' ES 'Bajo' ENTONCES 'estado' ES 'corecto'
2. SI 'presión calculada' ES 'bajo' Y 'presion medida' ES 'Baja' Y 'flujo medido' ES 'Bajo' Y 'flujo estimado' ES 'Trabajo' ENTONCES 'estado' ES 'fallo'
3. SI 'presión calculada' ES 'bajo' Y 'presion medida' ES 'Baja' Y 'flujo medido' ES 'Bajo' Y 'flujo estimado' ES 'Sobreflujo' ENTONCES 'estado' ES 'fuga'
4. SI 'presión calculada' ES 'bajo' Y 'presion medida' ES 'Baja' Y 'flujo medido' ES 'Trabajo' Y 'flujo estimado' ES 'Bajo' ENTONCES 'estado' ES 'fallo'
5. SI 'presión calculada' ES 'bajo' Y 'presion medida' ES 'Baja' Y 'flujo medido' ES 'Trabajo' Y 'flujo estimado' ES 'Trabajo' ENTONCES 'estado' ES 'corecto'
6. SI 'presión calculada' ES 'bajo' Y 'presion medida' ES 'Baja' Y 'flujo medido' ES 'Trabajo' Y 'flujo estimado' ES 'Sobreflujo' ENTONCES 'estado' ES 'fuga'
7. SI 'presión calculada' ES 'bajo' Y 'presion medida' ES 'Baja' Y 'flujo medido' ES 'Sobreflujo' Y 'flujo estimado' ES 'Bajo' ENTONCES 'estado' ES 'fallo'
8. SI 'presión calculada' ES 'bajo' Y 'presion medida' ES 'Baja' Y 'flujo medido' ES 'Sobreflujo' Y 'flujo estimado' ES 'Trabajo' ENTONCES 'estado' ES 'fallo'
9. SI 'presión calculada' ES 'bajo' Y 'presion medida' ES 'Baja' Y 'flujo medido' ES 'Sobreflujo' Y 'flujo estimado' ES 'Sobreflujo' ENTONCES 'estado' ES 'corecto'
10. SI 'presión calculada' ES 'bajo' Y 'presion medida' ES 'Trabajo' Y 'flujo medido' ES 'Bajo' Y 'flujo estimado' ES 'Bajo' ENTONCES 'estado' ES 'fallo'
11. SI 'presión calculada' ES 'bajo' Y 'presion medida' ES 'Trabajo' Y 'flujo medido' ES 'Bajo' Y 'flujo estimado' ES 'Trabajo' ENTONCES 'estado' ES 'corecto'
12. SI 'presión calculada' ES 'bajo' Y 'presion medida' ES 'Trabajo' Y 'flujo medido' ES 'Bajo' Y 'flujo estimado' ES 'Sobreflujo' ENTONCES 'estado' ES 'corecto'
13. SI 'presión calculada' ES 'bajo' Y 'presion medida' ES 'Trabajo' Y 'flujo medido' ES 'Trabajo' Y 'flujo estimado' ES 'Bajo' ENTONCES 'estado' ES 'fallo'

14. SI 'presión calculada' ES 'bajo' Y 'presion medida' ES 'Trabajo' Y 'flujo medido' ES 'Trabajo' Y 'flujo estimado' ES 'Trabajo' ENTONCES 'estado' ES 'fallo'
15. SI 'presión calculada' ES 'bajo' Y 'presion medida' ES 'Trabajo' Y 'flujo medido' ES 'Trabajo' Y 'flujo estimado' ES 'Sobreflujo' ENTONCES 'estado' ES 'corecto'
16. SI 'presión calculada' ES 'bajo' Y 'presion medida' ES 'Trabajo' Y 'flujo medido' ES 'Sobreflujo' Y 'flujo estimado' ES 'Bajo' ENTONCES 'estado' ES 'fallo'
17. SI 'presión calculada' ES 'bajo' Y 'presion medida' ES 'Trabajo' Y 'flujo medido' ES 'Sobreflujo' Y 'flujo estimado' ES 'Trabajo' ENTONCES 'estado' ES 'fallo'
18. SI 'presión calculada' ES 'bajo' Y 'presion medida' ES 'Trabajo' Y 'flujo medido' ES 'Sobreflujo' Y 'flujo estimado' ES 'Sobreflujo' ENTONCES 'estado' ES 'fallo'
19. SI 'presión calculada' ES 'bajo' Y 'presion medida' ES 'sobrepresion' Y 'flujo medido' ES 'Bajo' Y 'flujo estimado' ES 'Bajo' ENTONCES 'estado' ES 'fallo'
20. SI 'presión calculada' ES 'bajo' Y 'presion medida' ES 'sobrepresion' Y 'flujo medido' ES 'Bajo' Y 'flujo estimado' ES 'Trabajo' ENTONCES 'estado' ES 'fallo'
21. SI 'presión calculada' ES 'bajo' Y 'presion medida' ES 'sobrepresion' Y 'flujo medido' ES 'Bajo' Y 'flujo estimado' ES 'Sobreflujo' ENTONCES 'estado' ES 'corecto'
22. SI 'presión calculada' ES 'bajo' Y 'presion medida' ES 'sobrepresion' Y 'flujo medido' ES 'Trabajo' Y 'flujo estimado' ES 'Bajo' ENTONCES 'estado' ES 'fallo'
23. SI 'presión calculada' ES 'bajo' Y 'presion medida' ES 'sobrepresion' Y 'flujo medido' ES 'Trabajo' Y 'flujo estimado' ES 'Trabajo' ENTONCES 'estado' ES 'fallo'
24. SI 'presión calculada' ES 'bajo' Y 'presion medida' ES 'sobrepresion' Y 'flujo medido' ES 'Trabajo' Y 'flujo estimado' ES 'Sobreflujo' ENTONCES 'estado' ES 'fallo'
25. SI 'presión calculada' ES 'bajo' Y 'presion medida' ES 'sobrepresion' Y 'flujo medido' ES 'Sobreflujo' Y 'flujo estimado' ES 'Bajo' ENTONCES 'estado' ES 'fallo'
26. SI 'presión calculada' ES 'bajo' Y 'presion medida' ES 'sobrepresion' Y 'flujo medido' ES 'Sobreflujo' Y 'flujo estimado' ES 'Trabajo' ENTONCES 'estado' ES 'fallo'
27. SI 'presión calculada' ES 'bajo' Y 'presion medida' ES 'sobrepresion' Y 'flujo medido' ES 'Sobreflujo' Y 'flujo estimado' ES 'Sobreflujo' ENTONCES 'estado' ES 'fallo'

28. SI 'presión calculada' ES 'trabajo' Y 'presion medida' ES 'Baja' Y 'flujo medido' ES 'Bajo' Y 'flujo estimado' ES 'Bajo' ENTONCES 'estado' ES 'fuga'
29. SI 'presión calculada' ES 'trabajo' Y 'presion medida' ES 'Baja' Y 'flujo medido' ES 'Bajo' Y 'flujo estimado' ES 'Trabajo' ENTONCES 'estado' ES 'fuga'
30. SI 'presión calculada' ES 'trabajo' Y 'presion medida' ES 'Baja' Y 'flujo medido' ES 'Bajo' Y 'flujo estimado' ES 'Sobreflujo' ENTONCES 'estado' ES 'fuga'
31. SI 'presión calculada' ES 'trabajo' Y 'presion medida' ES 'Baja' Y 'flujo medido' ES 'Trabajo' Y 'flujo estimado' ES 'Bajo' ENTONCES 'estado' ES 'fallo'
32. SI 'presión calculada' ES 'trabajo' Y 'presion medida' ES 'Baja' Y 'flujo medido' ES 'Trabajo' Y 'flujo estimado' ES 'Trabajo' ENTONCES 'estado' ES 'fallo'
33. SI 'presión calculada' ES 'trabajo' Y 'presion medida' ES 'Baja' Y 'flujo medido' ES 'Trabajo' Y 'flujo estimado' ES 'Sobreflujo' ENTONCES 'estado' ES 'fuga'
34. SI 'presión calculada' ES 'trabajo' Y 'presion medida' ES 'Baja' Y 'flujo medido' ES 'Sobreflujo' Y 'flujo estimado' ES 'Bajo' ENTONCES 'estado' ES 'fallo'
35. SI 'presión calculada' ES 'trabajo' Y 'presion medida' ES 'Baja' Y 'flujo medido' ES 'Sobreflujo' Y 'flujo estimado' ES 'Trabajo' ENTONCES 'estado' ES 'fallo'
36. SI 'presión calculada' ES 'trabajo' Y 'presion medida' ES 'Baja' Y 'flujo medido' ES 'Sobreflujo' Y 'flujo estimado' ES 'Sobreflujo' ENTONCES 'estado' ES 'fuga'
37. SI 'presión calculada' ES 'trabajo' Y 'presion medida' ES 'Trabajo' Y 'flujo medido' ES 'Bajo' Y 'flujo estimado' ES 'Bajo' ENTONCES 'estado' ES 'corecto'
38. SI 'presión calculada' ES 'trabajo' Y 'presion medida' ES 'Trabajo' Y 'flujo medido' ES 'Bajo' Y 'flujo estimado' ES 'Trabajo' ENTONCES 'estado' ES 'fuga'
39. SI 'presión calculada' ES 'trabajo' Y 'presion medida' ES 'Trabajo' Y 'flujo medido' ES 'Bajo' Y 'flujo estimado' ES 'Sobreflujo' ENTONCES 'estado' ES 'fuga'
40. SI 'presión calculada' ES 'trabajo' Y 'presion medida' ES 'Trabajo' Y 'flujo medido' ES 'Trabajo' Y 'flujo estimado' ES 'Bajo' ENTONCES 'estado' ES 'fallo'
41. SI 'presión calculada' ES 'trabajo' Y 'presion medida' ES 'Trabajo' Y 'flujo medido' ES 'Trabajo' Y 'flujo estimado' ES 'Trabajo' ENTONCES 'estado' ES 'corecto'

42. SI 'presión calculada' ES 'trabajo' Y 'presion medida' ES 'Trabajo' Y 'flujo medido' ES 'Trabajo' Y 'flujo estimado' ES 'Sobreflujo' ENTONCES 'estado' ES 'fuga'
43. SI 'presión calculada' ES 'trabajo' Y 'presion medida' ES 'Trabajo' Y 'flujo medido' ES 'Sobreflujo' Y 'flujo estimado' ES 'Bajo' ENTONCES 'estado' ES 'fuga'
44. SI 'presión calculada' ES 'trabajo' Y 'presion medida' ES 'Trabajo' Y 'flujo medido' ES 'Sobreflujo' Y 'flujo estimado' ES 'Trabajo' ENTONCES 'estado' ES 'fallo'
45. SI 'presión calculada' ES 'trabajo' Y 'presion medida' ES 'Trabajo' Y 'flujo medido' ES 'Sobreflujo' Y 'flujo estimado' ES 'Sobreflujo' ENTONCES 'estado' ES 'corecto'
46. SI 'presión calculada' ES 'trabajo' Y 'presion medida' ES 'sobrepresion' Y 'flujo medido' ES 'Bajo' Y 'flujo estimado' ES 'Bajo' ENTONCES 'estado' ES 'fallo'
47. SI 'presión calculada' ES 'trabajo' Y 'presion medida' ES 'sobrepresion' Y 'flujo medido' ES 'Bajo' Y 'flujo estimado' ES 'Trabajo' ENTONCES 'estado' ES 'fallo'
48. SI 'presión calculada' ES 'trabajo' Y 'presion medida' ES 'sobrepresion' Y 'flujo medido' ES 'Bajo' Y 'flujo estimado' ES 'Sobreflujo' ENTONCES 'estado' ES 'fallo'
49. SI 'presión calculada' ES 'trabajo' Y 'presion medida' ES 'sobrepresion' Y 'flujo medido' ES 'Trabajo' Y 'flujo estimado' ES 'Bajo' ENTONCES 'estado' ES 'fallo'
50. SI 'presión calculada' ES 'trabajo' Y 'presion medida' ES 'sobrepresion' Y 'flujo medido' ES 'Trabajo' Y 'flujo estimado' ES 'Trabajo' ENTONCES 'estado' ES 'fallo'
51. SI 'presión calculada' ES 'trabajo' Y 'presion medida' ES 'sobrepresion' Y 'flujo medido' ES 'Trabajo' Y 'flujo estimado' ES 'Sobreflujo' ENTONCES 'estado' ES 'fallo'
52. SI 'presión calculada' ES 'trabajo' Y 'presion medida' ES 'sobrepresion' Y 'flujo medido' ES 'Sobreflujo' Y 'flujo estimado' ES 'Bajo' ENTONCES 'estado' ES 'fallo'
53. SI 'presión calculada' ES 'trabajo' Y 'presion medida' ES 'sobrepresion' Y 'flujo medido' ES 'Sobreflujo' Y 'flujo estimado' ES 'Trabajo' ENTONCES 'estado' ES 'fallo'
54. SI 'presión calculada' ES 'trabajo' Y 'presion medida' ES 'sobrepresion' Y 'flujo medido' ES 'Sobreflujo' Y 'flujo estimado' ES 'Sobreflujo' ENTONCES 'estado' ES 'fallo'
55. SI 'presión calculada' ES 'sobrepresión' Y 'presion medida' ES 'Baja' Y 'flujo medido' ES 'Bajo' Y 'flujo estimado' ES 'Bajo' ENTONCES 'estado' ES 'fallo'

56. SI 'presión calculada' ES 'sobrepresión' Y 'presión medida' ES 'Baja' Y 'flujo medido' ES 'Bajo' Y 'flujo estimado' ES 'Trabajo' ENTONCES 'estado' ES 'fuga'
57. SI 'presión calculada' ES 'sobrepresión' Y 'presión medida' ES 'Baja' Y 'flujo medido' ES 'Bajo' Y 'flujo estimado' ES 'Sobreflujo' ENTONCES 'estado' ES 'fuga'
58. SI 'presión calculada' ES 'sobrepresión' Y 'presión medida' ES 'Baja' Y 'flujo medido' ES 'Trabajo' Y 'flujo estimado' ES 'Bajo' ENTONCES 'estado' ES 'fallo'
59. SI 'presión calculada' ES 'sobrepresión' Y 'presión medida' ES 'Baja' Y 'flujo medido' ES 'Trabajo' Y 'flujo estimado' ES 'Trabajo' ENTONCES 'estado' ES 'fuga'
60. SI 'presión calculada' ES 'sobrepresión' Y 'presión medida' ES 'Baja' Y 'flujo medido' ES 'Trabajo' Y 'flujo estimado' ES 'Sobreflujo' ENTONCES 'estado' ES 'fuga'
61. SI 'presión calculada' ES 'sobrepresión' Y 'presión medida' ES 'Baja' Y 'flujo medido' ES 'Sobreflujo' Y 'flujo estimado' ES 'Bajo' ENTONCES 'estado' ES 'fallo'
62. SI 'presión calculada' ES 'sobrepresión' Y 'presión medida' ES 'Baja' Y 'flujo medido' ES 'Sobreflujo' Y 'flujo estimado' ES 'Trabajo' ENTONCES 'estado' ES 'fallo'
63. SI 'presión calculada' ES 'sobrepresión' Y 'presión medida' ES 'Baja' Y 'flujo medido' ES 'Sobreflujo' Y 'flujo estimado' ES 'Sobreflujo' ENTONCES 'estado' ES 'fuga'
64. SI 'presión calculada' ES 'sobrepresión' Y 'presión medida' ES 'Trabajo' Y 'flujo medido' ES 'Bajo' Y 'flujo estimado' ES 'Bajo' ENTONCES 'estado' ES 'fuga'
65. SI 'presión calculada' ES 'sobrepresión' Y 'presión medida' ES 'Trabajo' Y 'flujo medido' ES 'Bajo' Y 'flujo estimado' ES 'Trabajo' ENTONCES 'estado' ES 'fuga'
66. SI 'presión calculada' ES 'sobrepresión' Y 'presión medida' ES 'Trabajo' Y 'flujo medido' ES 'Bajo' Y 'flujo estimado' ES 'Sobreflujo' ENTONCES 'estado' ES 'fuga'
67. SI 'presión calculada' ES 'sobrepresión' Y 'presión medida' ES 'Trabajo' Y 'flujo medido' ES 'Trabajo' Y 'flujo estimado' ES 'Bajo' ENTONCES 'estado' ES 'fallo'
68. SI 'presión calculada' ES 'sobrepresión' Y 'presión medida' ES 'Trabajo' Y 'flujo medido' ES 'Trabajo' Y 'flujo estimado' ES 'Trabajo' ENTONCES 'estado' ES 'fallo'
69. SI 'presión calculada' ES 'sobrepresión' Y 'presión medida' ES 'Trabajo' Y 'flujo medido' ES 'Trabajo' Y 'flujo estimado' ES 'Sobreflujo' ENTONCES 'estado' ES 'fuga'

70. SI 'presión calculada' ES 'sobrepresión' Y 'presión medida' ES 'Trabajo' Y 'flujo medido' ES 'Sobreflujo' Y 'flujo estimado' ES 'Bajo' ENTONCES 'estado' ES 'fallo'
71. SI 'presión calculada' ES 'sobrepresión' Y 'presión medida' ES 'Trabajo' Y 'flujo medido' ES 'Sobreflujo' Y 'flujo estimado' ES 'Trabajo' ENTONCES 'estado' ES 'fallo'
72. SI 'presión calculada' ES 'sobrepresión' Y 'presión medida' ES 'Trabajo' Y 'flujo medido' ES 'Sobreflujo' Y 'flujo estimado' ES 'Sobreflujo' ENTONCES 'estado' ES 'fuga'
73. SI 'presión calculada' ES 'sobrepresión' Y 'presión medida' ES 'sobrepresión' Y 'flujo medido' ES 'Bajo' Y 'flujo estimado' ES 'Bajo' ENTONCES 'estado' ES 'correcto'
74. SI 'presión calculada' ES 'sobrepresión' Y 'presión medida' ES 'sobrepresión' Y 'flujo medido' ES 'Bajo' Y 'flujo estimado' ES 'Trabajo' ENTONCES 'estado' ES 'fuga'
75. SI 'presión calculada' ES 'sobrepresión' Y 'presión medida' ES 'sobrepresión' Y 'flujo medido' ES 'Bajo' Y 'flujo estimado' ES 'Sobreflujo' ENTONCES 'estado' ES 'fuga'
76. SI 'presión calculada' ES 'sobrepresión' Y 'presión medida' ES 'sobrepresión' Y 'flujo medido' ES 'Trabajo' Y 'flujo estimado' ES 'Bajo' ENTONCES 'estado' ES 'fallo'
77. SI 'presión calculada' ES 'sobrepresión' Y 'presión medida' ES 'sobrepresión' Y 'flujo medido' ES 'Trabajo' Y 'flujo estimado' ES 'Trabajo' ENTONCES 'estado' ES 'correcto'
78. SI 'presión calculada' ES 'sobrepresión' Y 'presión medida' ES 'sobrepresión' Y 'flujo medido' ES 'Trabajo' Y 'flujo estimado' ES 'Sobreflujo' ENTONCES 'estado' ES 'fuga'
79. SI 'presión calculada' ES 'sobrepresión' Y 'presión medida' ES 'sobrepresión' Y 'flujo medido' ES 'Sobreflujo' Y 'flujo estimado' ES 'Bajo' ENTONCES 'estado' ES 'fallo'
80. SI 'presión calculada' ES 'sobrepresión' Y 'presión medida' ES 'sobrepresión' Y 'flujo medido' ES 'Sobreflujo' Y 'flujo estimado' ES 'Trabajo' ENTONCES 'estado' ES 'fallo'
81. SI 'presión calculada' ES 'sobrepresión' Y 'presión medida' ES 'sobrepresión' Y 'flujo medido' ES 'Sobreflujo' Y 'flujo estimado' ES 'Sobreflujo' ENTONCES 'estado' ES 'correcto'

ANEXO E. CÓDIGO DE LA PROGRAMACIÓN DEL SISTEMA

