

**TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS Y CONTROL DE UN  
BANCO DE PRUEBAS PARA REGULADORES DE GAS**

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
Por el Br. Sánchez R., Leonardo A.  
Para optar al Título de  
Ingeniero Electricista

Caracas, 2017

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS Y CONTROL DE UN  
BANCO DE PRUEBAS PARA REGULADORES DE GAS**

Tutor académico: Ing. José Romero.

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
Por el Br. Sánchez R., Leonardo A.  
Para optar al Título de  
Ingeniero Electricista

Caracas, 2017

## CONSTANCIA DE APROBACIÓN

Caracas, 01 de noviembre de 2017

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Eléctrica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el Br. Leonardo A. Sánchez R., titulado:

### “DISEÑO DE UN SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS Y CONTROL DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA REGULADORES DE GAS”

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Electricista en la opción de Electrónica y Control, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor, lo declaran APROBADO.

Prof. Támara Pérez  
Jurado

Prof. Alejandro González  
Jurado

Prof. José Romero  
Tutor Académico

## **DEDICATORIA**

A mis padres, gracias por todo su apoyo y comprensión.

A mi hermano Franco, espero siempre ser un buen ejemplo para ti.

## **RECONOCIMIENTOS Y AGRADECIMIENTOS**

Primero mi inmenso agradecimiento es para mi madre Marlene Rondón, la mujer más maravillosa y noble que existe. Luego y definitivamente no menos importante, para mi padre Franklin Sánchez, un trabajador incansable ejemplo de perseverancia; mi más grande agradecimiento por educarme y formarme. A ustedes dos les debo quién soy.

Le agradezco a la Universidad Central de Venezuela y a todos los profesores que han formado parte de mi actividad académica y social. En esta institución siento que he podido madurar como persona y aprender sobre muchos aspectos de la vida.

Le agradezco al profesor José Romero por brindarme la oportunidad de trabajar en este proyecto de tesis tan interesante y muchos otros más en los que he participado en el Instituto de Materiales y Modelos Estructurales. En general las actividades que he realizado en el instituto me han proporcionado gran experiencia y aprendizaje.

Y por último y no menos importante les quiero agradecer a mis amigos y amigas con los que he compartido; Douglas la Rosa, Aarón Rodríguez, Alejandro Cropper. Fátima Pérez, José Iriza, Jonathan Reyes, Marita Fernández, Ángel Oramas, Cinthia Jiménez, entre muchos más que harían este párrafo muy largo; gracias por su amistad y por muchas enseñanzas, buscaré siempre corresponder la amistad brindada.

**Sánchez R., Leonardo A.**

## **DISEÑO DE UN SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS Y CONTROL DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA REGULADORES DE GAS**

**Tutor académico: Ing. José Romero. Tesis. Caracas. U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Eléctrica. Ingeniero Electricista. Opción: Electrónica, Computación y Control. Institución: Instituto de Materiales y Modelos Estructurales (IMME). Trabajo de Grado. 2017. 121 Hojas + Anexos**

**Palabras clave:** Norma ANSI B109.4 (1998), Banco de pruebas, Tarjeta NI USB-6009, LabVIEW.

**Resumen.** El presente trabajo plantea el diseño e implementación de un sistema de adquisición de datos y control de un banco de pruebas para la aplicación de la Norma ANSI B109.4 (1998). La norma está orientada a certificar el desempeño de reguladores de servicio de gas natural con carcasa metálica para tuberías cuyo diámetro sea igual o inferior a 1 ¼ de pulgada. El banco está estructurado en módulos; el módulo físico contempla los elementos que conforman el circuito neumático que interactúa con las variables físicas de interés que son presión y flujo de aire, el módulo de adquisición y control contiene la electrónica de instrumentación necesaria para la medición de los transductores y el control de los actuadores, por último el módulo de programas que mediante rutinas de programación elaboradas en la plataforma de desarrollo LabVIEW, se encarga de gestionar la adquisición de los datos y el control de los actuadores, además de servir de interfaz de usuario. En términos generales el trabajo se centró en tres aspectos fundamentales, la investigación teórica sobre los componentes que conforman el banco de pruebas, el diseño de las distintas soluciones tanto en hardware como en software y por último la implementación de los diseños planteados. Ya finalizada la implementación del banco se realizaron pruebas para verificar su funcionamiento, dando resultados satisfactorios.

## ÍNDICE GENERAL

Constancia de aprobación.....	iii
Dedicatoria .....	iv
Reconocimientos y agradecimientos .....	v
Resumen .....	vi
Índice general.....	vii
Índice de figuras.....	xi
Índice de tablas .....	xiv
INTRODUCCIÓN .....	1
CAPÍTULO I.....	2
<b>1 MARCO REFERENCIAL.....</b>	<b>2</b>
1.1 Antecedentes y justificación .....	2
1.2 Planteamiento del problema.....	2
1.3 Objetivo general .....	3
1.4 Objetivos específicos .....	3
1.5 Organización del documento.....	4
CAPÍTULO II.....	5
<b>2 MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>5</b>
2.1 Introducción. ....	5
2.2 Reguladores de gas.....	5
2.2.1 <i>Funcionamiento</i> .....	6
2.2.2 <i>Tipos</i> .....	6
2.2.3 <i>Usos</i> .....	7
2.2.4 <i>Mecanismos de seguridad de un regulador ante fallas.</i> .....	7
2.3 Norma ANSI B109.4 (1998) .....	7
2.3.1 <i>Descripción de las pruebas de calificación para el rendimiento del regulador de servicio</i> .....	8
2.3.1.1 Prueba de carga de cantiléver.....	8
2.3.1.2 Fuga.....	9
2.3.1.3 Punto de operación.....	9

2.3.1.4	Histéresis .....	9
2.3.1.5	Bloqueo .....	10
2.3.1.6	Sensibilidad ante la presión de entrada .....	10
2.3.1.7	Capacidad de flujo.....	10
2.3.1.8	Punto de operación de la válvula de alivio.....	11
2.3.1.9	Prueba de desempeño de la válvula de alivio.....	11
2.3.1.10	Prueba de rendimiento.....	11
2.3.1.11	Prueba de presión de la carcasa.....	12
2.3.1.12	Pruebas ambientales .....	12
2.4	Estructura y funcionamiento del banco de pruebas.....	13
2.5	Medición de la presión de entrada del banco. ....	15
2.5.1	<i>Transformadores lineales diferenciales variables (LVDT)</i> .....	15
2.5.2	<i>Acondicionamiento de señal para LVDT</i> .....	16
2.6	Medición de la presión de salida del banco. ....	17
2.6.1	<i>Transductor capacitivo</i> .....	17
2.6.2	<i>Tipos</i> .....	18
2.6.3	<i>Acondicionamiento de señal para sensor capacitivo</i> .....	19
2.7	Medición del flujo másico del banco .....	19
2.7.1	<i>Medidores de flujo másico</i> .....	19
2.7.2	<i>Medidores de flujo por efecto térmico</i> .....	19
2.7.3	<i>Medidores calorimétricos</i> .....	20
2.8	Lazo de corriente 4 – 20 mA.....	20
2.9	Electroválvulas .....	22
2.9.1	<i>Electroválvula simple</i> .....	22
2.9.2	<i>Electroválvula asistida</i> .....	22
2.9.3	<i>Electroválvulas direccionales</i> .....	23
2.10	Motores de paso a paso .....	23
2.11	Puente H. ....	24
2.11.1	<i>Elementos y funcionamiento</i> .....	24
2.12	PIC ( <i>Peripheral Interface Controller</i> ) .....	25
2.13	Conversión analógico-digital. ....	27



2.14	Filtro antialiasing. ....	28
2.15	Tarjetas de adquisición de datos. ....	29
2.16	Plataforma de desarrollo LabVIEW.....	29
<b>CAPÍTULO III .....</b>		<b>32</b>
<b>3</b>	<b>ELEMENTOS DEL BANCO .....</b>	<b>32</b>
3.1	Introducción .....	32
3.2	MÓDULO FÍSICO.....	32
3.2.1	<i>Características:</i> .....	33
3.2.2	<i>Elementos principales utilizados en el módulo físico</i> .....	33
3.2.2.1	Sensor de presión HBM Modelo P11.....	33
3.2.2.2	Transductor de presión Bourdon Sedeme E914.....	34
3.2.2.3	Medidor de flujo másico FCI ST75V.....	36
3.2.2.4	Electroválvula M3 107B .....	37
3.2.2.5	Actuador rotativo VSI2034DE y electroválvula A1E250.....	38
3.2.2.6	Válvula reguladora de flujo o válvula de descarga. ....	39
3.2.2.7	Regulador automático de presión.....	40
3.3	MÓDULO DE ADQUISICIÓN Y CONTROL.....	44
3.3.1	<i>Tarjeta de adquisición de datos NI USB-6009.</i> ....	45
3.3.2	<i>Tarjeta acondicionadora de señal para sensor de alta presión.</i> ....	48
3.3.3	<i>Tarjeta amplificadora y con filtros antialiasing.</i> ....	50
3.3.4	<i>Tarjeta de control de potencia para electroválvulas.</i> ....	51
3.3.5	<i>Tarjeta secuenciadora para el motor de paso.</i> ....	52
3.3.6	<i>Tarjeta para el manejo de potencia del motor de paso</i> .....	53
3.3.7	<i>Fuentes de poder.</i> .....	54
3.3.8	<i>Caja de instrumentación.</i> .....	54
<b>CAPÍTULO IV.....</b>		<b>56</b>
<b>4</b>	<b>LOS PROGRAMAS .....</b>	<b>56</b>
4.1	Introducción .....	56
4.2	MÓDULO DE PROGRAMAS.....	56
4.2.1	<i>Funcionamiento general del programa elaborado</i> .....	57

4.2.1.1 Aspectos generales de las rutinas elaboradas en el módulo de programas	58
4.2.2 Rutina de adquisición de datos (DAQ.vi)	59
4.2.3 Rutina para de control de electroválvulas (Valvulas.vi)	61
4.2.4 Panel dinámico (Panel dinamico.vi)	62
4.2.5 Preparación (Preparacion.vi)	64
4.2.6 Punto de operación (Punto_operacion.vi)	67
4.2.7 Prueba de bloqueo (Bloqueo.vi)	73
4.2.8 Prueba de histéresis (Histeresis.vi)	76
4.2.9 Prueba de sensibilidad ante la presión de entrada (Sens_PEnt.vi)	80
4.2.10 Prueba de capacidad de flujo (Capacidad de Flujo.vi)	83
4.2.11 Punto de operación de la válvula de alivio (P.O.V.A.vi)	86
4.2.12 Prueba de rendimiento (Prueba_Rendimiento.vi)	89
4.2.13 Prueba de desempeño de la válvula de alivio (D_Val_Alivio.vi)	92
4.2.14 Prueba de carga de cantiléver (Cantilever.vi)	94
4.2.15 Prueba de fuga (FUGA.vi)	97
4.2.16 Prueba de presión de la carcasa (PRESION_CASCARON.vi)	99
4.3 Programa para el regulador automático	101
4.3.1 Diseño conceptual	101
4.3.2 Implementación	102
<b>CAPÍTULO V</b>	<b>106</b>
<b>5 RESULTADOS</b>	<b>106</b>
5.1 Introducción	106
5.2 Resultados de la prueba punto de operación	106
5.3 Resultados de la prueba de bloqueo	107
5.4 Resultados de la prueba de histéresis	108
5.5 Resultados de la prueba de sensibilidad ante la presión de entrada	109
5.6 Resultados de la prueba de capacidad de flujo	111
5.7 Resultados de la prueba del punto de operación de la válvula de alivio	113
<b>CONCLUSIONES</b>	<b>115</b>
<b>RECOMENDACIONES</b>	<b>117</b>

<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>118</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>120</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2. 1. Regulador de gas .....	6
Figura 2. 2. Recomendación de la disposición para el despliegue de los ensayos. ....	13
Figura 2. 3. LVDT. ....	16
Figura 2. 4. Etapas del circuito acondicionador de señales para un LVDT. ....	17
Figura 2. 5. Ejemplo de un sensor Capacitivo. ....	18
Figura 2. 6. Tipos de sensores capacitivos. ....	18
Figura 2. 7. Esquema del circuito de acondicionamiento de señales para sensor capacitivo. .....	19
Figura 2. 8. Ejemplo de un medidor de flujo másico de inserción. ....	20
Figura 2. 9. Elementos de un circuito de lazo de corriente 4 – 20 mA . ....	21
Figura 2. 10. Diagrama motor de pasos unipolar y bipolar. ....	23
Figura 2. 11. Elementos del circuito puente h. ....	25
Figura 2. 12. Gráfico de tamaños (memoria vs físico) de PICs, de acuerdo a la evolución de su arquitectura.....	26
Figura 2. 13. Etapas de la conversión analógico-digital.....	27
Figura 2. 14. Filtro RC utilizado como antialiasing. ....	28
Figura 2. 15. Elementos del instrumento virtual en LabVIEW. ....	31
Figura 3. 1. Estructura general del banco de pruebas.....	32
Figura 3. 2. Estructura interna del sensor HBM P11.....	34
Figura 3. 3. Sensor Capacitivo Bourdon sedeme E914. ....	35
Figura 3. 4. Medidor de flujo másico ST75V.....	37

Figura 3. 5. Electroválvula M3 107B. ....	38
Figura 3. 6. Actuador rotativo y Electroválvula de la casa API. ....	39
Figura 3. 7. Válvula de descarga. ....	40
Figura 3. 8. Vista del regulador manual y regulador automático. ....	41
Figura 3. 9. Diagrama neumático. ....	43
Figura 3. 10. Implementación del módulo físico. ....	44
Figura 3. 11. Diagrama módulo de adquisición y control. ....	45
Figura 3. 12. Tarjeta de adquisición de datos NI USB6009. ....	46
Figura 3. 13. Conexión física de la NI USB-6009. ....	48
Figura 3. 14. Diagrama de tarjeta acondicionadora HBM Messkonverter MC2. ....	49
Figura 3. 15. Conexión física de la tarjeta HBM Messkonverter MC2. ....	49
Figura 3. 16. Tarjeta amplificadora y con filtros antialiasing. ....	51
Figura 3. 17. Circuito y diagrama de conexiones de la tarjeta controladora de potencia para electroválvulas. ....	52
Figura 3. 18. Esquema funcionamiento tarjeta de control. ....	53
Figura 3. 19. Módulo L298. ....	54
Figura 3. 20. Caja de instrumentación. ....	55
Figura 4. 1. Rutinas elaboradas en el módulo de programas. ....	57
Figura 4. 2. Diagrama del funcionamiento general del programa elaborado. ....	58
Figura 4. 3. Diagrama de flujo de la rutina de adquisición de datos. ....	60
Figura 4. 4. Diagrama de flujo de la rutina para control de electroválvulas. ....	62
Figura 4. 5. Diagrama de flujo para la rutina panel dinámico. ....	63
Figura 4. 6. Panel frontal rutina de panel dinámico. ....	64
Figura 4. 7. Diagrama de flujo de la rutina de preparación. ....	65
Figura 4. 8. Panel frontal de la rutina de preparación. ....	67

Figura 4. 9. Diagrama de flujo para la rutina del punto de operación. ....	68
Figura 4. 10. Diagrama de flujo del control para la válvula motorizada. ....	70
Figura 4. 11. Diagrama de flujo para sistemas de seguridad del regulador automático. ....	71
Figura 4. 12. Panel frontal de la rutina Punto de operación. ....	73
Figura 4. 13. Diagrama de flujo para rutina de bloqueo. ....	74
Figura 4. 14. Panel frontal de la rutina de bloqueo. ....	76
Figura 4. 15. Diagrama de flujo de la rutina de Histéresis. ....	78
Figura 4. 16. Panel frontal de la rutina de histéresis. ....	80
Figura 4. 17. Diagrama de flujo de la rutina de sensibilidad ante la presión de entrada. ....	81
Figura 4. 18. Panel frontal de la rutina de sensibilidad ante la presión de entrada. ....	82
Figura 4. 19. Diagrama de flujo para rutina de capacidad de flujo. ....	84
Figura 4. 20. Panel frontal para rutina de capacidad de flujo. ....	86
Figura 4. 21. Diagrama de flujo para rutina de punto de operación de la válvula de alivio. ....	87
Figura 4. 22. Panel frontal para rutina de punto de operación de la válvula de alivio. ....	88
Figura 4. 23. Diagrama de flujo para rutina de prueba de rendimiento. ....	90
Figura 4. 24. Panel frontal para rutina de prueba de rendimiento. ....	91
Figura 4. 25. Diagrama de flujo para rutina de prueba de desempeño de la válvula de alivio. ....	93
Figura 4. 26. Panel frontal para rutina de prueba de desempeño de la válvula de alivio. ....	94
Figura 4. 27. Diagrama de flujo para rutina de prueba de carga en cantiléver. ....	95
Figura 4. 28. Panel frontal para rutina de prueba de carga en cantiléver. ....	97
Figura 4. 29. Diagrama de flujo para rutina de fuga. ....	98
Figura 4. 30. Panel frontal para rutina de fuga. ....	99
Figura 4. 31. Diagrama de flujo para rutina de prueba de presión de carcasa. ....	100
Figura 4. 32. Panel frontal para rutina de prueba de presión de cascaron. ....	101

Figura 4. 33. Grafico explicativo.....	102
Figura 4. 34. Diagrama de flujo.....	103
Figura 4. 35. Código elaborado en CCS.....	105
Figura 5. 1. Gráficos obtenidos del registro del punto de operación.....	107
Figura 5. 2. Gráficos obtenidos del registro de la prueba de bloqueo. ....	108
Figura 5. 3. Gráficos de obtenidos del registro de la prueba de histéresis. ....	109
Figura 5. 4. Panel frontal de la prueba sensibilidad ante la presión de entrada.....	110
Figura 5. 5. Gráficos de obtenidos del registro de la prueba de sensibilidad ante la presión de entrada. ....	111
Figura 5. 6. Panel frontal de la prueba sensibilidad capacidad de flujo. ....	112
Figura 5. 7. Gráficos de obtenidos del registro de la prueba de capacidad de flujo. ....	112
Figura 5. 8. Gráfico obtenido del registro de la prueba del punto de operación de la válvula de alivio. ....	113

### ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3. 1. Rango de trabajo utilizado del sensor Bourdon Sedeme E914 .....	36
Tabla 3. 2. Características tarjeta NI USB-6009. ....	46

## INTRODUCCIÓN

Actualmente en el marco de proyecto de Gasificación Nacional, la empresa estatal PDVSA-GAS está llevando a cabo la implementación de redes de distribución de gas metano comercial, con el fin de llevar el servicio de gas doméstico desde los sitios de almacenamiento hasta el usuario final a nivel nacional.

El presente trabajo está enmarcado en el proyecto de gasificación nacional, el cual plantea el diseño e implementación de un sistema de adquisición de datos y control de un banco de pruebas para la aplicación de la Norma ANSI B109.4-1998 a reguladores de gas.

La norma ANSI B109.4-1998, está orientada a certificar el desempeño de reguladores de servicio de gas natural de tipo diafragma auto-operado, específicamente está diseñada para verificar el funcionamiento de reguladores de gas doméstico con carcasa metálica para tuberías cuyo diámetro sea igual o inferior a 1 ¼ de pulgada (32 mm), con presiones de entrada que no superen los 125 psig y una presión máxima de salida de 14 pulgadas de agua.

En el desarrollo de esta investigación, se contempla implementar un sistema de adquisición de datos y control de los dispositivos que así lo permitan para cumplir con los requerimientos establecidos en la norma referida.

El banco de pruebas se utilizará en una primera etapa para verificar el funcionamiento de los reguladores según el estándar de la norma ANSI B109.4-1998. En una segunda etapa el banco de ensayos servirá como herramienta de control de calidad por la empresa nacional durante la producción en serie de los reguladores.

PDVSA GAS como empresa interesada en adquirir reguladores de gas que serán producidos por la empresa nacional, le asigna la responsabilidad al Instituto de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad Central de Venezuela, de llevar a cabo el diseño y construcción del banco de pruebas para la verificación de los reguladores según la norma ANSI 109.4-1998.

# CAPÍTULO I

## 1 MARCO REFERENCIAL

### 1.1 Antecedentes y justificación

La empresa estatal PDVSA GAS enmarcada en el proyecto de gasificación nacional, está realizando la construcción de redes de distribución de gas metano comercial para poder llevar el servicio de gas doméstico desde sitios de almacenamiento hasta el usuario final a nivel nacional.

La demanda de reguladores para satisfacer los requerimientos del proyecto representa una cuantiosa inversión y debido a que estos equipos han sido adquiridos tradicionalmente mediante su importación, la empresa nacional decidió comenzar con el montaje de una línea de producción nacional de estos dispositivos. Sin embargo para incorporarlos al proyecto de gasificación nacional, los reguladores deben cumplir con la norma ANSI 109.4-1998 por exigencia de PDVSA GAS.

La norma ANSI B109.4-1998 está diseñada para verificar el correcto funcionamiento de reguladores de servicio de gas natural auto-operado, por tanto, su implementación sobre la producción de reguladores de gas doméstico, permitirá no solo la administración y optimización en la calidad de producción, sino también como una herramienta clave en la elaboración de prototipos experimentales.

### 1.2 Planteamiento del problema

Al iniciarse la producción nacional de reguladores de gas doméstico, se debe verificar experimentalmente el funcionamiento según lo establece la norma ANSI B109.4, para permitir así su incorporación al proyecto de gasificación nacional de acuerdo con las exigencias establecidas por PDVSA GAS.



La empresa nacional requiere un banco de pruebas para reguladores, que cumpla con la norma ANSI B109.4-1998. El objetivo del banco es verificar el desempeño de los reguladores, de tal forma que se ajusten a los estándares antes mencionados.

Hasta el momento la parte física del banco de pruebas está completa (tuberías, válvulas, transductores de presión y sensor de flujo), solo falta el diseño y construcción de un sistema de adquisición de datos y control para obtener de forma digital las lecturas de presión y flujo, y además que permita manejar un par de electroválvulas neumáticas. Igualmente se espera tener la posibilidad de ejecutar las distintas pruebas estipuladas en la norma de forma automática o en su defecto con la menor intervención posible del operador.

### **1.3 Objetivo general**

Diseñar e implementar un sistema de adquisición y control para un banco de pruebas de reguladores de gas según la norma ANSI B109.4-1998.

### **1.4 Objetivos específicos**

- 1- Estudiar la norma ANSI B109.4-1998 y las diferentes pruebas que establece dicha norma.
- 2- Estudiar el funcionamiento de los componentes de conducción de aire y de los instrumentos de medición que se utilizaran en el banco de pruebas.
- 3- Diseñar e implementar los circuitos necesarios para realizar el acondicionamiento de señales proveniente de los sensores instalados en el banco de pruebas.
- 4- Diseñar e implementar circuitos de potencia necesarios para el manejo de las electroválvulas.
- 5- Diseñar e implementar un sistema de adquisición de datos digital.
- 6- Programar un conjunto de rutinas, mediante el uso de la plataforma LabVIEW, que permita adquisición y el almacenaje de los datos de los sensores, el control del estado

de las electroválvulas, según las pruebas especificadas en la norma ANSI B109.4-1998.

- 7- Realizar una interfaz de usuario que funcione como programa principal y que permita seleccionar la rutina correspondiente a la prueba de la norma que se desea realizar.
- 8- Realizar pruebas de funcionamiento y puesta a punto del sistema.
- 9- Realizar un manual de operación del banco de pruebas.

## **1.5 Organización del documento**

En el capítulo II se exponen los conceptos básicos para poder adentrarse en el tema. Inicialmente se dará una descripción sobre reguladores de gas y cómo funcionan. Se dará una descripción de la norma ANSI B109.4, sus procedimientos de prueba y las características que debe poseer el banco de pruebas para realizarlas. Por último se describirán los fundamentos teóricos de los elementos que posee el banco y los elementos necesarios para su automatización.

En el capítulo III se describen los elementos físicos que se utilizaron en el banco de pruebas implementado, se exponen tanto los elementos asociados al circuito neumático como la instrumentación electrónica necesaria para la adquisición y control de los elementos instalados.

En el capítulo IV se hace una descripción de los programas implementados en la plataforma de programación LabVIEW para la adquisición de los datos provenientes de los sensores, el control de los actuadores instalados, la ejecución de los procedimientos de pruebas según lo establece la norma y la interfaz de usuario.

En el capítulo V se muestran los resultados de varios de los procedimientos de pruebas realizados en el banco, para de esa manera corroborar el correcto funcionamiento del banco tanto en software como en hardware.

Al finalizar el capítulo V se muestran las conclusiones y recomendaciones.

## CAPÍTULO II

### 2 MARCO TEÓRICO

#### 2.1 Introducción.

Este capítulo se centra en establecer las bases teóricas necesarias para la mejor comprensión del proyecto a realizar. Inicialmente se dará una descripción de que son los reguladores de gas, como funcionan y cuáles son sus principales componentes. Seguido a esto se hará una descripción de los aspectos principales de la norma ANSI B109.4 (1998), haciendo énfasis especialmente en los procedimientos de prueba a los que deberán ser sometidos los reguladores.

En base a los requerimientos que establecen los procedimientos de pruebas, se hará una descripción de los componentes que deberá poseer el banco de pruebas, además de una explicación de su funcionamiento, luego se darán definiciones sobre los elementos físicos que se utilizan y los elementos teóricos que se deben manejar para poder implementar el sistema deseado.

#### 2.2 Reguladores de gas

Un regulador de presión de gas, es un dispositivo diseñado para mantener una presión de descarga constante mediante la manipulación del flujo de gas. En general, un regulador dispone de tres componentes principales (Figura 2. 1 a) que se mencionan a continuación.

**Elemento de restricción:** el cual permite que el gas fluya a través del regulador a una presión reducida para satisfacer la demanda aguas abajo. En la mayoría de los casos se trata de un orificio y un tapón de goma.

**Elemento de medición:** este dispositivo detecta continuamente cambios en la presión de descarga causados por cambios en la demanda de gas, y transmite una señal para abrir o cerrar el elemento restrictivo en consecuencia. Este elemento es típicamente un diafragma.

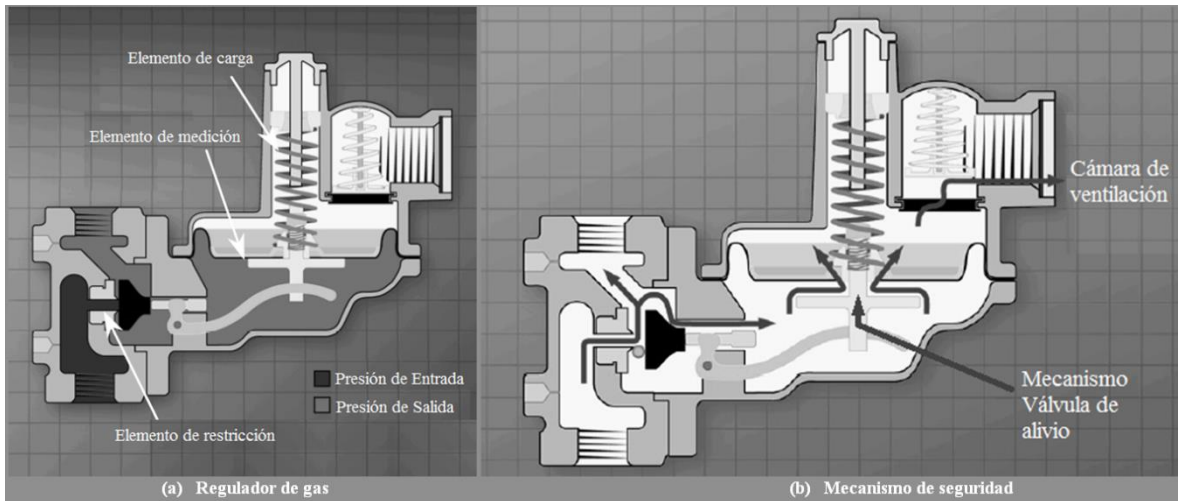


Figura 2. 1. Regulador de gas [13].

**Elemento de carga:** ejerce una fuerza ajustable que se compara continuamente con la presión aguas abajo por medio del elemento de medición, para determinar que señal transmitir al elemento de restricción.

### 2.2.1 Funcionamiento

Un regulador, básicamente es una válvula de recorrido ajustable conectada mecánicamente a un diafragma. El diafragma se equilibra, mediante la presión de salida y por una fuerza aplicada del lado contrario a la cara que tiene contacto con la presión de salida. La fuerza aplicada del lado opuesto al diafragma puede ser suministrada por un resorte, un peso o presión aportada por otro instrumento denominado piloto.

### 2.2.2 Tipos

Con pocas excepciones, los reguladores de presión de gas pueden clasificarse en cualquiera de las dos categorías siguientes:

- **Reguladores auto operados o autónomos:** en los cuales el elemento de carga es un resorte, que conjuntamente con el diafragma ejerce la acción de control de la presión de salida.

- **Reguladores pilotados:** están conformados por un pequeño regulador o piloto, que es utilizado como control del regulador principal. El piloto, amplificador o multiplicador tiene la habilidad de traducir los pequeños cambios en la presión aguas abajo, en grandes cambios aplicados sobre el instrumento de medida (diafragma).

### **2.2.3 Usos**

Los reguladores de gas reducen la alta presión proveniente de los cilindros, los tanques estacionarios o el suministro de gas natural, a un nivel utilizable a medida que pasa hacia otros equipos tales como calefactores, secadoras o estufas en instalaciones residenciales, comerciales e industriales.

### **2.2.4 Mecanismos de seguridad de un regulador ante fallas.**

Una posible causa de falla, podría ser que un objeto extraño quede atrapado entre el tapón y el orificio de la válvula del regulador, trayendo esto como consecuencia que aumente la presión de salida a niveles peligrosos, ésta situación puede provocar explosiones por sobrepresión en las tuberías aguas abajo, fugas o incendios. La válvula de alivio es un mecanismo de seguridad que se encuentra en algunos reguladores de gas (ver Figura 2. 1 b), ésta actúa en caso de falla del regulador. La válvula generalmente es un dispositivo de resorte que permitirá liberar la presión a la atmósfera a través de una cámara de ventilación, después que la presión de salida supere el valor preestablecido por encima de la presión de operación normal. La liberación del gas a la atmósfera podrá ser detectada debido al olor que expide el gas, dando esto señales claras de fallas en el regulador.

### **2.3 Norma ANSI B109.4 (1998)**

La norma está diseñada para certificar la correcta operación de reguladores de gas doméstico de carcasa metálica para tuberías cuyo diámetro sea igual o inferior a 1 ¼ de pulgada (32mm), para una presión máxima de entrada de 125 psig y con una presión de salida máxima de 14 pulgadas de agua (plg agua). En la misma se contemplan los requerimientos de diseño que debe cumplir los reguladores, así como las características que debe poseer el banco para realizar las pruebas de desempeño mecánico sobre reguladores de gas según lo establece la norma.

La norma define los términos (unidades, pruebas a realizar, elementos del regulador, entre otros.) que son de uso frecuente, además se dan a conocer los requerimientos de diseño de cada uno de los componentes que conforman el regulador de gas (dimensiones, materiales, método constructivo, capacidades, entre otros.).

Una vez que se verifica el cumplimiento de las premisas anteriores, continua la sección de pruebas de calificación para el rendimiento del regulador, en la cual se presenta la metodología de los ensayos de capacidad del regulador, capacidad válvula de alivio, punto de consigna, rendimiento de bloqueo, resistencia de los materiales entre otros factores con influencia en el desempeño del regulador.

### **2.3.1 Descripción de las pruebas de calificación para el rendimiento del regulador de servicio**

**Generalidades:** establece las condiciones en las cuales se debe encontrar el regulador a ser probado, siendo las de mayor importancia la posición y la temperatura.

**Equipo de prueba:** establece cuales deben ser las características que deben poseer los sensores que se utilizarán en los procedimientos de prueba (tipo, rango de operación y precisión), así como la ubicación respecto al regulador que deben tener estos sensores en el banco de pruebas.

**Procedimientos de prueba:** establece que un mínimo de dos reguladores de un lote del fabricante serán sometidos a un número establecido de pruebas, siendo necesario que cada regulador pase todas las pruebas para cumplir con el estándar. El orden de las pruebas se hará a discreción del fabricante, a continuación se describen los procedimientos de prueba que establece la norma.

#### **2.3.1.1 Prueba de carga de cantiléver**

Esta prueba establece que el regulador debe ser sometido a una carga de 250 lbs (113,4 kg) previamente calibrada, durante un lapso de 10 minutos. Con el regulador presurizado en la entrada a la presión de operación, la carga será aplicada en el punto más alejado del eje central de la tubería, además deberá estar condición de bloqueo (sin flujo de aire a la salida del regulador) y con el diafragma orientado horizontalmente. El regulador pasará la prueba si no muestra evidencia de fractura, deformación permanente o desempeño desmejorado; para ello se verificará que no existan variaciones importantes en la presión de entrada durante y después de la prueba y que no existan fugas a través de la carcasa aplicando una solución jabonosa y observando la ausencia de fuga de aire a través del cuerpo del regulador.

### **2.3.1.2 Fuga**

Esta prueba establece que con el regulador sumergido en agua a una profundidad no mayor a 2 pulgadas (5,1 cm) y con la ventilación obstruida, deberá aplicarse una presión de 2 psig (13,8 kPa) a través del puerto de salida por un mínimo 20 segundos. Las fugas a la atmosfera serán detectadas vigilando si existe una ráfaga continua de burbujas que no debe exceder una burbuja por segundo independientemente del tamaño de las burbujas. También puede realizarse la prueba de fuga por cualquier método aceptable como por ejemplo aplicando una solución de detección de fugas o por decaimiento de la presión.

### **2.3.1.3 Punto de operación**

Esta prueba sirve como marco de referencia para poder realizar distintos ensayos que exigen como paso previo tener el regulador en funcionamiento bajo condiciones de operación preestablecida. La norma establece que con el diafragma del regulador dispuesto verticalmente, el valor de la presión en el puerto de entrada debe ser de  $40 \pm 1$  psig, la presión en el puerto de salida de  $7 \pm 0,1$  pulgadas de agua (plg agua), y la tasa flujo debe ser de  $39 \pm 1$  pies cúbicos por hora estándar (scf/h ó standart cubic feet for hour) de aire equivalentes a 50 sfc/h de gas con gravedad específica igual a 0,6; otro aspecto importante, es que durante la prueba el regulador debe mostrar un comportamiento estable, sin evidencia de silbido o golpeteo. También es posible establecer otro punto de operación siempre y cuando se haga un acuerdo previo con el fabricante.

### **2.3.1.4 Histéresis**

Como paso previo para hacer esta prueba se deberá ajustar el regulador al punto de operación (sección 5.3.3 de la norma). En la primera etapa de la prueba, se cerrará la válvula de salida a una velocidad consistente durante un periodo de tiempo de 5 segundos, una vez cerrada se esperaran 5 segundos y seguidamente se abrirá la válvula de salida a una velocidad consistente durante un periodo de 5 segundos habiendo alcanzado la condición inicial de flujo (39 scf/h de aire o 50scf/h de gas), se esperaran 5 segundos y se tomará el valor de la medición de la presión de salida del regulador, este ciclo de histéresis se debe repetir tres veces.

En la segunda etapa de la prueba, se abrirá la válvula de salida a una velocidad consistente durante un periodo de 5 segundos hasta alcanzar 200 scf/h de aire, una vez alcanzado el flujo deseado se esperará 5 segundos y seguidamente se cerrará la válvula de

salida a una velocidad consistente durante un periodo de 5 segundos habiendo alcanzado la condición inicial de flujo (39 scf/h de aire o 50 scf/h de gas), se esperaran 5 segundos y se tomara el valor de la medición de la presión de salida del regulador, este ciclo de histéresis se debe repetir tres veces. Para que el regulador pase la prueba los valores de la presión de salida registrados deberán estar dentro de un rango de  $\pm 0,5$  plg agua del punto de operación establecido.

#### **2.3.1.5 Bloqueo**

Como paso previo para hacer esta prueba se deberá ajustar el regulador al punto de operación (sección 5.3.3 de la norma). Luego de ajustado, se cerrará totalmente la válvula de salida durante un lapso de 10 segundos mientras se mide paralelamente la presión de salida. En esta prueba se evalúa el comportamiento de los reguladores de gas bajo la condición de flujo nulo (equivalente a cero consumo de gas). Bajo esta condición, la medición de la presión de salida del regulador no deberá superar 3 plg agua sobre el valor de operación.

#### **2.3.1.6 Sensibilidad ante la presión de entrada**

Esta prueba establece que con el punto de operación ajustado previamente (sección 5.3.3 de la norma), se disminuirá la presión de entrada hasta 5 psig para luego incrementarla en pasos de 10 psig hasta llegar a 125 psig o la máxima presión establecida por el fabricante. Luego de llegar a la máxima presión establecida por el fabricante, se disminuirá la presión de entrada en pasos de 10 psig hasta llegar nuevamente a 5 psig. Una vez alcanzado un valor específico de presión de entrada, se debe esperar como mínimo 10 segundos y registrar el valor de la presión de entrada y salida. Los datos de las presiones de entrada y salida en cada uno de los pasos de la prueba serán suministrados al fabricante para su posterior estudio.

#### **2.3.1.7 Capacidad de flujo**

Como paso previo para hacer esta prueba se debe ajustar el regulador al punto de operación (sección 5.3.3 de la norma). Luego de ajustado, se incrementará lentamente el flujo de salida de aire abriendo la válvula de salida. Este procedimiento se hará hasta que la presión de salida se incremente 2 plg agua o disminuya 1 plg agua del punto de operación establecido. Alcanzado este punto, se registrará el flujo y se expresará dicha capacidad de flujo en scf/h de gas con gravedad específica de 0,6. *Cabe destacar que en todo momento de la prueba se debe mantener el valor de la presión de entrada constante que sirva como*



*marco referencial*. Otras capacidades de flujo podrán ser determinadas para presiones de entrada diferentes a la de operación si se acuerda previamente con el fabricante.

#### **2.3.1.8 Punto de operación de la válvula de alivio**

Para realizar la prueba, una presión controlada de 40 psig de aire debe ser introducida lentamente en el puerto de salida del regulador a través de un orificio de 0,013 pulgadas de diámetro. Para tener uniformidad y consistencia en la prueba, la presión deberá tener una tasa de flujo de aproximadamente 1 pie<sup>3</sup>/hora, esto causará que el regulador se bloquee, lo cual resultará en una situación de presión excedida para la válvula de alivio. La válvula de alivio debería comenzar a aliviar a medida que la presión de salida se eleve hasta  $9\pm 3$  plg agua por encima de punto de operación del regulador.

Para determinar el punto de resellado de la válvula de alivio, se deberá bloquear la presión del lado de salida del regulador y observar la presión a la cual la válvula de alivio deja de aliviar la presión. La válvula de alivio debería asentarse nuevamente a un mínimo de 2 plg de agua por encima de la presión de bloqueo, la presión de reasentamiento deberá ser vigilada para cerciorarse que permanezca constante por un mínimo de 10 segundos.

#### **2.3.1.9 Prueba de desempeño de la válvula de alivio**

Como paso previo para realizar esta prueba, se debe causar una falla mecánica en el regulador, separando la conexión entre el diafragma del regulador y la válvula de alivio. Con la válvula de salida del banco cerrada para generar la condición de flujo nulo, se someterá el regulador a cambios en la presión de entrada desde cero psig hasta la máxima presión de entrada recomendada por el fabricante, mientras se observa el valor de la presión de salida, una vez alcanzado el valor máximo de presión de entrada, se debe registrar el valor de presión de salida. La norma establece que la válvula de alivio estará diseñada de manera que sea capaz de liberar la presión de la cámara del regulador a una tasa tal que limite la presión de salida a un máximo de 2 psig cuando la presión de entrada sea la máxima permitida por el fabricante.

#### **2.3.1.10 Prueba de rendimiento**

Para realizar ésta prueba se debe disponer de un mecanismo el cual sea capaz de abrir y cerrar totalmente el flujo de aire tanto en la entrada como en la salida del regulador de gas,

para así poder presurizar y despresurizar el sistema. Como paso previo para hacer esta prueba se debe ajustar el regulador al punto de operación (sección 5.3.3 de la norma). En principio se encontrará la válvula de entrada cerrada y la válvula de salida abierta, esto traerá como consecuencia que el regulador no se encuentre presurizado. Al comenzar la prueba se cerrará la válvula de salida y abrirá la válvula de entrada, luego se cerrará la válvula de entrada dejando así el sistema presurizado, para luego abrir la válvula de salida despresurizando el regulador. El conjunto de pasos anteriormente mencionados conforman un ciclo de cierre apertura del mecanismo interno del regulador, la norma establece que la prueba tiene que ejecutarse a una tasa de 20 a 30 ciclos por minuto.

Después de cada 25.000 ciclos de cierre y apertura de la válvula del regulador, se verificará el punto de operación y realizará la prueba de bloqueo. La norma exige para esta prueba que la presión de salida se encuentre dentro de un rango de  $\pm 1$  plg agua alrededor de la presión del punto de operación y que la presión de bloqueo no sobrepase las 3 plg agua sobre el valor de operación. La prueba culminará habiéndose cumplido 100.000 ciclos de apertura y cierre del mecanismo del regulador.

#### **2.3.1.11 Prueba de presión de la carcasa**

La carcasa que durante operación normal contiene la presión de salida, será sujeta a una presión mínima de 10 psig por 5 minutos, el cajón deberá contener la presión sin deformación o ruptura.

El cuerpo de la válvula el cual durante operación normal contiene la presión de entrada, deberá ser sujeto a una presión mínima de 200 psig por 5 minutos, las partes deberán contener la presión sin deformación o ruptura.

#### **2.3.1.12 Pruebas ambientales**

Esta prueba establece que el regulador deberá resistir el bloqueo completo de la ventilación debido al agua depositada en el a 32°F (0°C) o por debajo de los 32°F. Para ello la norma contiene un procedimiento que simula la lluvia congelada y prueba el desempeño del regulador, bajo condiciones climáticas adversas. Sin embargo, estas condiciones climáticas son improbables debido a la ubicación geográfica y el tipo de clima que se presenta en el país y en general los países de la región tropical. Por dicha razón se considera que las

pruebas ambientales no son necesarias ni presentan impedimento alguno para la utilización de los reguladores de gas hechos en el país.

## 2.4 Estructura y funcionamiento del banco de pruebas.

Para cumplir con los procedimientos de pruebas de desempeño mecánico sobre reguladores de gas establecidos en la sección 5.3 de la Norma ANSI B109.4, se consideran las recomendaciones dadas en ella para la construcción de un banco de pruebas, en el cual se establece la disposición de los distintos elementos que deberán conformar el banco de pruebas para realizar los ensayos requeridos.

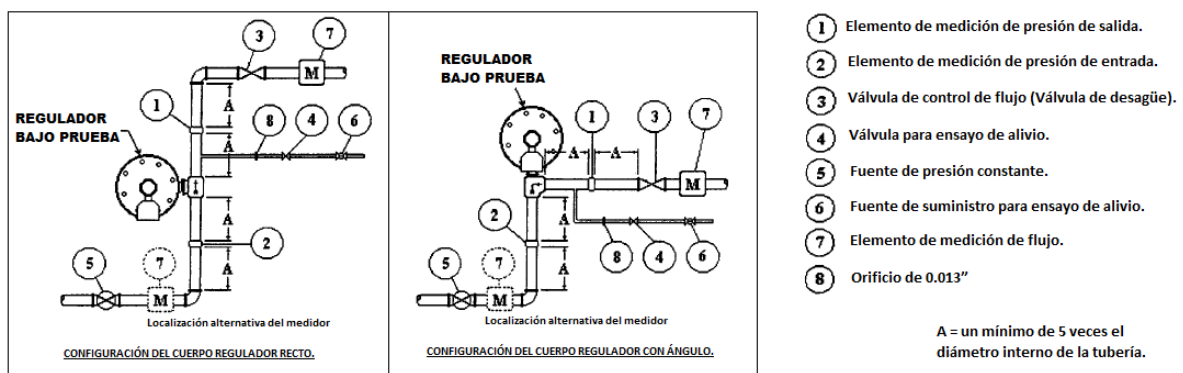


Figura 2. 2. Recomendación de la disposición para el despliegue de los ensayos [2].

En la Figura 2. 2 se muestran los diagramas que se indican en la norma, donde se establecen los ocho (8) elementos principales conectados por tuberías, en una configuración específica para la realización de los ensayos. En base a las recomendaciones proporcionadas por la norma, el personal del Instituto de Materiales y Modelos Estructurales (IMME) construyó la estructura física del banco de pruebas en base a estos elementos. A continuación se dará una descripción de cada uno de los elementos instalados en el circuito neumático elaborado en el IMME.

- 1- Elemento de medición de la presión de salida: En el caso del banco de pruebas construido en el instituto, se utilizó un medidor de presión de tipo electrónico. La norma establece en la sección 5.2.1 que al ser de tipo electrónico, el transductor de presión deberá tener una precisión mayor a 0,25% de su escala completa. Además, el instrumento instalado debe ser capaz de cubrir el rango máximo de presión de salida establecida en los procedimientos de pruebas.

- 2- Elemento de medición de la presión de entrada: El IMME utilizó un sensor de presión electrónico. Al igual que el sensor de presión de salida, la norma establece que este elemento deberá tener una precisión mayor a 0,25% del máximo de su escala de medición. Además, el instrumento instalado debe ser capaz de cubrir el rango máximo de presión de entrada establecida en los procedimientos de pruebas.
- 3- Válvula de control de flujo: La válvula de control de flujo o válvula de descarga, será la encargada de simular diferentes condiciones de demanda de los elementos a los que el regulador suministra gas. En varios de los procedimientos de pruebas que establece la norma, es necesario variar la condición de flujo, para determinar la respuesta del regulador disminuyendo o aumentando el flujo de aire que atraviesa la tubería, para ello el personal del instituto instaló de un conjunto de tres válvulas de bola manuales y una válvula reguladora de flujo.
- 4- Válvula para prueba de alivio: Ésta válvula dará acceso al aire comprimido a 40 psi, que deberá ir a través de la tubería hacia la restricción de 0,013 pulgadas durante el ensayo del punto de operación de la válvula de alivio. Para ello se instaló una válvula manual de bola de ½ pulgada.
- 5- Fuente de presión constante: Es el elemento encargado de suministrar el valor de presión que requiera la prueba que se esté realizando. Una vez ajustado el valor de la presión, ésta deberá mantenerse constante. En el banco se utilizaron inicialmente dos reguladores de presión manual de 0 a 175 psi.
- 6- Fuente de suministro para el ensayo de alivio: consiste en la entrada de aire comprimido necesaria para realizar el ensayo del punto de operación de la válvula de alivio. Esta fuente deberá mantener una presión fija de 40 psig. Para el banco se implementó esta etapa utilizando un regulador de presión manual 0 a 175 psi.
- 7- Elemento de medición del flujo: La norma establece que independientemente del tipo de medidor de flujo, este deberá tener una precisión mayor al 1% de la tasa de flujo medida. Para el banco se utilizó un sensor de flujo calorimétrico de inserción electrónico, que cubre las capacidades de flujo requeridas en las pruebas.
- 8- Orificio de 0,013 pulgadas: es el elemento de restricción (tubo capilar) necesario para la prueba del punto de operación de la válvula de alivio. Éste elemento al tener en su entrada aire comprimido a 40 psi generará un flujo de 1 pie cúbico de aire por hora.

Con el banco de pruebas construido a partir de los ocho elementos que recomienda la norma, se podrán realizar la mayoría de los procedimientos de prueba requeridos. Sin embargo, para la prueba de resistencia, la norma exige ciclos de apertura y cierre del mecanismo interno del regulador bajo ciertas condiciones, para lo cual se utilizó un par de electroválvulas, una instalada a la entrada y otra a la salida del regulador que permitirán realizar los ciclos de presurización y despresurización del regulador de manera automática. Es conveniente hacer que el control de las electroválvulas se lleve a cabo de manera electrónica.

Si bien el banco se encuentra construido en su parte física, también se requiere de la instrumentación necesaria para la correcta medición de las variables, y la instrumentación necesaria para el control de los actuadores y la implementación del regulador automático con sus tarjetas de control. Además, el proyecto está enmarcado en la idea de que los resultados de las mediciones y las acciones de control puedan ser visualizados desde la pantalla de un computador. Para ello se requieren elementos de acondicionamiento de señales, elementos de conversión analógico-digital y un software capaz de gestionar todas las señales de entrada y salida del sistema, así como poder generar una interfaz gráfica adecuada para las pruebas ejecutadas.

## **2.5 Medición de la presión de entrada del banco.**

Para la medición de la presión de entrada del banco se utilizó un sensor de presión de membrana que esta instrumentado con un LVDT, de esa manera se mide la presión de forma indirecta midiendo la deformación de la membrana ante cambios de presión. Por ello, puede afirmarse que el elemento sensor puede tratarse como un sensor de desplazamiento que guarda una relación directa con la presión de entrada del banco de pruebas. A continuación se definirán las características principales de los sensores de desplazamiento tipo LVDT.

### **2.5.1 Transformadores lineales diferenciales variables (LVDT)**

Un LVDT (Figura 2. 3) consiste en un arreglo de bobinas y un núcleo móvil. El arreglo puede constar de dos o tres bobinas de alambre bobinado en forma hueca. El núcleo de material permeable puede deslizarse libremente entre los embobinados. Un LVDT mide el desplazamiento asociando un valor de señal específico para cualquier posición dada del núcleo móvil. Esta asociación de un valor de señal a una posición, se produce mediante el

acoplamiento electromagnético de una señal de excitación de corriente alterna en el devanado primario con el núcleo y el o los devanados secundarios.

Para el caso de un LVDT de tres bobinas, la posición del núcleo determina cuán estrechamente está acoplada la señal de la bobina primaria a cada una de las bobinas secundarias. Las dos bobinas secundarias son opuestas en serie, lo que significa que se enrollan en serie pero en direcciones opuestas. Esto da como resultado que las dos señales en cada secundaria estén desfasadas 180 grados. Por lo tanto, la fase de la señal de salida determina la dirección y su amplitud, la distancia.

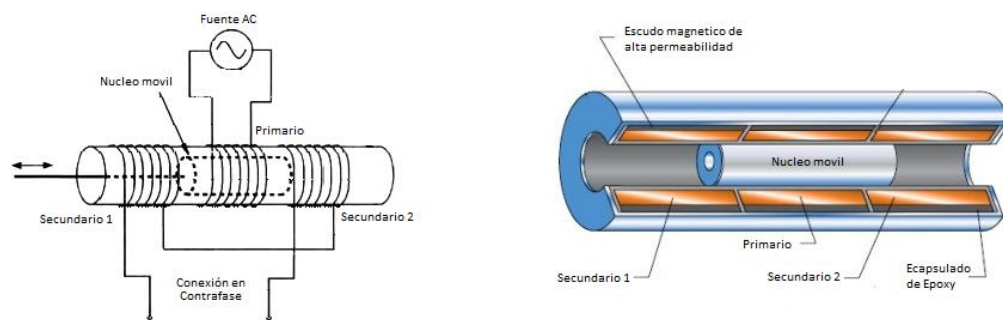


Figura 2. 3. LVDT [12].

### 2.5.2 Acondicionamiento de señal para LVDT

Debido a que la salida de un LVDT es una onda de corriente alterna. La magnitud de la salida de un LVDT aumenta independientemente de la dirección de movimiento desde el cero eléctrico. Para determinar en qué posición se encuentra el núcleo, se debe considerar la fase de la salida respecto de la fuente de excitación alterna del devanado primario. La electrónica de acondicionamiento de la señal debe combinar información sobre la fase de la salida con información sobre la magnitud de la salida, para que el usuario pueda saber la dirección en que se ha movido el núcleo, así como la distancia desde la posición de cero eléctrico que se ha movido.

Los acondicionadores de señal para LVDT (Figura 2. 4) generan una señal sinusoidal como fuente de excitación para la bobina primaria. El circuito de acondicionamiento de señales demodula de forma sincrónica la señal de salida secundaria con la misma fuente de excitación primaria. La tensión continua resultante es proporcional al desplazamiento del

núcleo. La polaridad de la tensión continua indica si el desplazamiento fue realizado en una dirección o en la contraria respecto al centro.

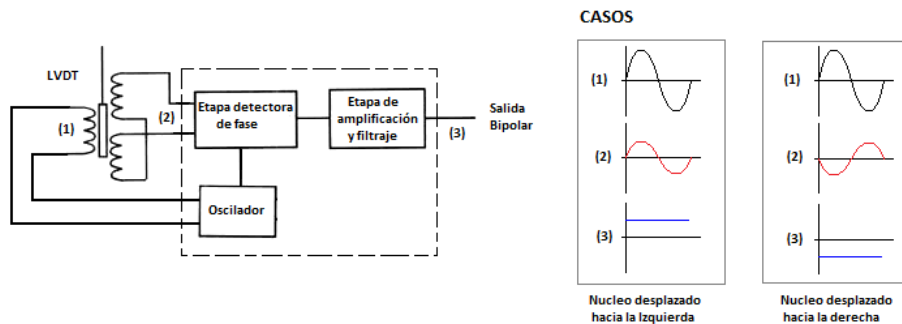


Figura 2. 4. Etapas del circuito acondicionador de señales para un LVDT [11].

## 2.6 Medición de la presión de salida del banco.

Para la medición de la presión de salida se utiliza un transductor de tipo capacitivo. A continuación se expondrán los conceptos necesarios para la comprensión de este elemento de medición y su configuración interna.

### 2.6.1 Transductor capacitivo

El transductor capacitivo básico consiste de dos placas paralelas separadas por un dieléctrico. La variación de capacitancia puede ser obtenida por cambios de la distancia entre placas, cambios en el área común de coincidencia de las placas o cambios físicos o químicos en el dieléctrico. Las variaciones de capacitancia, producidas por un desplazamiento, pueden convertirse en variaciones de tensión utilizando una fuente de excitación de corriente alterna que alimenta un puente de Wien. A la salida del puente deberá existir un circuito de acondicionamiento de señal capaz de demodular la señal resultante para su fácil procesamiento.

Durante la operación del transductor, el diafragma y el fluido de llenado en ambas cámaras conducen la presión de proceso y la presión de referencia a los platos capacitivos que conforman el elemento sensor, la Figura 2. 5 muestra un ejemplo de un sensor capacitivo. La presión ejercida sobre los diafragmas es la que se ve reflejada como un cambio en la capacitancia del sensor. Los diafragmas se deforman en relación a la presión diferencial ejercida en ellos y esto a su vez genera un cambio en la señal que emiten las placas capacitivas. En el caso de la presión manométrica, la cámara de baja del sensor de presión

diferencial es colocada a la atmósfera. En el caso de los transmisores de presión absoluta una presión de referencia es mantenida en la cámara de baja.

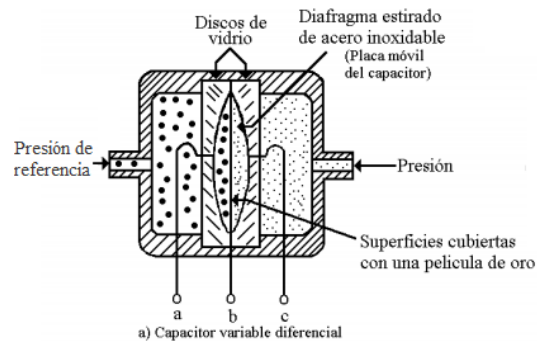


Figura 2. 5. Ejemplo de un sensor Capacitivo [15].

## 2.6.2 Tipos

Los tipos de sensores de presión digitales básicamente se diferencian por su aplicación en cuanto al tipo de presión a medir. La parte constructiva de sus membranas son diseñadas y calculadas para captar el tipo de presión deseada, el procesamiento de la señal del sensor es muy parecida entre todos los tipos hasta llegar a su procesamiento de manera digital.

Entre los principales tipos tenemos:

- Sensor digital de presión manométrica (Figura 2. 6 b).
- Sensor digital de presión Absoluta (Figura 2. 6 a).
- Sensor digital de presión Diferencial (Figura 2. 6 c).

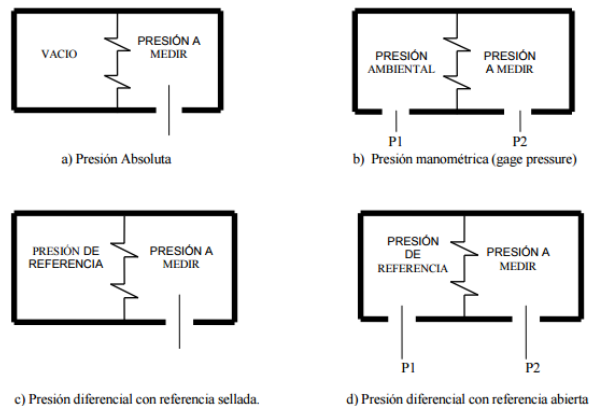


Figura 2. 6. Tipos de sensores capacitivos.



### 2.6.3 Acondicionamiento de señal para sensor capacitivo

Para convertir la presión diferencial existente entre las placas de un transductor capacitivo en una señal eléctrica de fácil procesamiento, se debe disponer de un circuito de acondicionamiento de señales. Este circuito está conformado por una fuente de excitación de corriente alterna (oscilador) que alimenta el circuito capacitivo (dispuesto en un puente de Wien), una etapa amplificadora que aumenta el voltaje diferencial debido al cambio de capacitancias por la presión aplicada en una de las placas y una etapa de filtraje que transforma esta señal de corriente alterna en una señal analógica de corriente continua. El orden en que están dispuestas cada una de las etapas se puede apreciar en la Figura 2. 7.

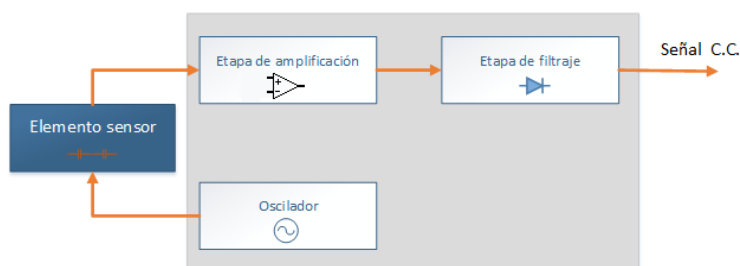


Figura 2. 7. Esquema del circuito de acondicionamiento de señales para sensor capacitivo.  
Elaboración propia.

## 2.7 Medición del flujo másico del banco

Para la medición del flujo másico se utilizó un transductor de tipo calorimétrico de inserción. A continuación se exponen los conceptos necesarios para la comprensión de este elemento de medición y su configuración interna.

### 2.7.1 Medidores de flujo másico

Los medidores de flujo másico determinan el caudal en masa de fluido que atraviesa una cierta sección de tubería. Entre estos instrumentos están los medidores de flujo por efecto térmico y los medidores giroscópicos.

### 2.7.2 Medidores de flujo por efecto térmico

Los medidores térmicos de flujo se fundamentan en la medición del efecto que se produce en un fluido cuando dentro de éste se introduce una cantidad conocida de calor. Los

medidores térmicos de flujo se pueden clasificar en dos categorías. Los calorimétricos y los anemométricos.

### 2.7.3 Medidores calorimétricos

Cuando a un fluido que circula por una tubería se le introduce una cantidad conocida de calor, éste se calienta y el aumento de temperatura depende del flujo másico. Midiendo el aumento de temperatura y el flujo de calor introducido se puede obtener el flujo másico que circula por la tubería. Los medidores calorimétricos pueden ser de dos tipos: medidores de inserción (Figura 2. 8), los cuales colocan una fuente de calor y sondas RTD dentro de la tubería por donde circula el fluido para medir el diferencial de temperatura entre las sondas. Y medidores de tubo calentado que trabajan bajo el mismo principio, pero calentando directamente el tubo por donde pasa el fluido.

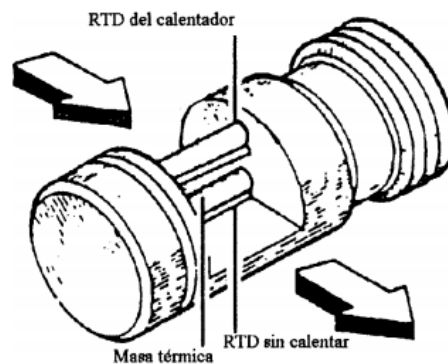


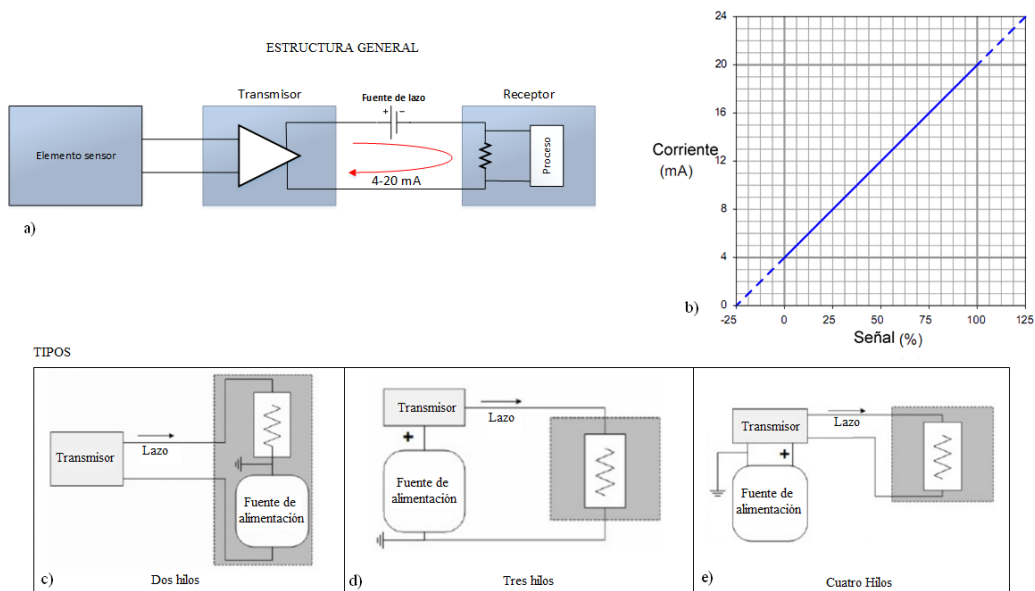
Figura 2. 8. Ejemplo de un medidor de flujo másico de inserción [15].

### 2.8 Lazo de corriente 4 – 20 mA

Los lazos de corriente de 4-20mA son una norma industrial usada para transmitir la información desde los sensores, que miden parámetros físicos como por ejemplo la temperatura, caudal, presión, velocidad, entre otros. La señal física es convertida a una señal de corriente donde típicamente 4 mA representa el cero del sensor y 20 mA representa la salida de fondo de escala del sensor. Cualquier valor entre 4 mA y 20 mA representa un porcentaje entre 0% y 100% de la medida (Figura 2. 9 b).

La principal ventaja de utilizar los lazos de corriente es que son útiles cuando la información tiene que ser transmitidas a largas distancias. Aunque largas distancias producen

caídas de tensión debido a la resistencia de los cables, esto no reduce la corriente si el lazo está calculado correctamente.



**Figura 2. 9. Elementos de un circuito de lazo de corriente 4 – 20 mA [7].**

Un circuito de lazo de corriente de 4-20 mA, consta de por lo menos 4 elementos. El elemento sensor, un convertidor de voltaje a corriente también llamado transmisor o acondicionador de señal, una fuente de alimentación para el lazo, y un receptor (Figura 2. 9 a). Generalmente los sensores proveen una salida de voltaje cuyo valor representa la variable física que es medida. El transmisor amplifica y acondiciona la salida del sensor, luego convierte el voltaje a un nivel de corriente directa en un rango de 4-20 mA, que circula en serie a través de un lazo cerrado. El receptor, normalmente es una sección o parte de un medidor o sistema de adquisición de datos, que convierte la corriente entre 4-20mA de regreso a voltaje, el cual podrá ser utilizado en algún proceso posterior. La salida en el transmisor es de corriente y es proporcional a la variable física medida. La fuente de alimentación del lazo, generalmente proporciona, cualquier requerimiento de energía tanto al transmisor como al receptor, u algún otro componente del lazo.

Entre los transmisores de corriente más comunes están: los transmisores a dos hilos, donde la alimentación es proporcionada por una fuente de alimentación incorporada en el lazo y externa al transmisor (Figura 2. 9 c), esto es posible porque el transmisor es capaz de

regular el nivel de corriente, de forma que esta intensidad represente un parámetro físico, los transmisores a tres hilos (Figura 2. 9d) incluyen un tercer hilo que no transporta señal, sino la alimentación para el transmisor, de los dos restantes, uno transporta el valor de la corriente que representa la medida de la variable de proceso y el hilo que queda sirve de retorno de las corrientes de alimentación y señal, por último tenemos los transmisores a cuatro hilos (Figura 2. 9 d) que utilizan dos conductores para la alimentación y los otros dos para transmitir la señal 4-20mA. Esta configuración tiene como ventaja frente a los de tres hilos que al estar separada la alimentación de la señal, es más difícil que ruido en la alimentación pueda afectar a la medida.

## **2.9 Electroválvulas.**

Son dispositivos utilizados para controlar el paso de un fluido a través de una tubería. Están conformados por dos elementos principales. El primer elemento es la válvula que permitirá el paso del flujo o no dentro de la tubería. El segundo elemento es un solenoide el cual se activara ejerciendo una acción mecánica cuando circule corriente a través de su embobinado. Ambos elementos se encuentran acoplados mecánicamente, en consecuencia, la activación o desactivación del solenoide actuará sobre el mecanismo de la válvula. Generalmente trabajan en dos posiciones, completamente cerrada y completamente abierta, obstruyendo o permitiendo totalmente el flujo de un fluido a través de la tubería.

Existen varios tipos de electroválvulas, a continuación se mencionan algunos de ellas.

### **2.9.1 Electroválvula simple**

Consiste en un mecanismo el cual tiene en una posición específica a la válvula (normalmente cerrada o normalmente abierta), mediante una fuerza aplicada por un resorte. Para cambiar el estado inicial de la válvula, se debe energizar el solenoide, el cual debe ser capaz de vencer la fuerza del resorte y así poder abrir o cerrar el paso del fluido a través de la tubería. Una vez se deje de energizar el solenoide de la válvula vuelve a su estado inicial.

### **2.9.2 Electroválvula asistida**

Funciona de manera similar a la válvula simple, sin embargo en este tipo de electroválvula el solenoide no controla la válvula directamente sino que controla una válvula

piloto secundaria y la energía para la actuación de la válvula principal la suministra la presión del propio fluido de entrada.

### 2.9.3 Electroválvulas direccionales

Estas electroválvulas en lugar de abrir y cerrar lo que hacen es conmutar el flujo de entrada entre varias salidas. En esta categoría existen múltiples configuraciones posibles y generalmente son utilizadas para el control de flujo en algún proceso industrial o ejercer control sobre actuadores.

### 2.10 Motores de paso a paso

El motor paso a paso es un dispositivo electromecánico que convierte una serie de impulsos eléctricos en desplazamientos angulares discretos, lo que significa que es capaz de girar una cantidad de grados dependiendo de sus entradas de control. Este motor presenta las ventajas de tener precisión y repetitividad en cuanto al posicionamiento. Dependiendo de la cantidad de inducidos que posean en su configuración interna, los motores de paso se dividen en dos categorías, los unipolares (4 inducidos) y los bipolares (2 inducidos).

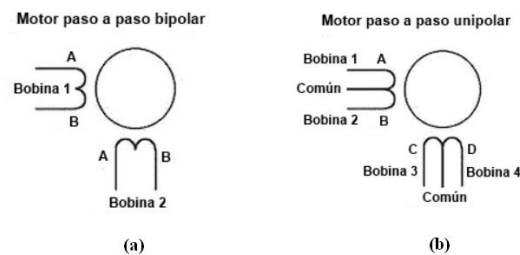


Figura 2. 10. Diagrama motor de pasos unipolar y bipolar [18].

Los motores de paso unipolares (Figura 2. 10 b) suelen tener 5 o 6 cables de salida dependiendo de su conexión interna y se caracterizan por ser más simples de controlar, utilizan un cable común a la fuente de alimentación y posteriormente se van colocando las otras líneas a tierra en un orden específico para generar cada paso. Un motor unipolar de 6 cables puede ser usado como un motor bipolar si se deja las líneas del común al aire.

Los motores de paso bipolares (Figura 2. 10 a) tienen generalmente 4 cables de salida. Usualmente utilizan un circuito que contiene internamente dos puentes h para ser controlados, debido a que requieren del cambio de dirección del flujo de la corriente a través de las bobinas en la secuencia apropiada para realizar un movimiento.

Según el *método constructivo*, existen tres tipos fundamentales de motores de paso a paso, el motor de imán permanente, el motor de reluctancia variable, y el motor híbrido.

El motor de pasos de imán permanente posee un imán que aporta el campo magnético para la operación, por esta razón permite mantener un par diferente de cero cuando el motor no está energizado. Dependiendo de la construcción del motor, es posible obtener pasos angulares de 7.5, 11.25, 15, 18, 45 o 90°. El ángulo de rotación se determina por el número de polos en el estator.

El motor de pasos de reluctancia variable posee un rotor de hierro dulce que en condiciones de excitación del estator, y bajo la acción de su campo magnético, ofrece menor resistencia a ser atravesado por su flujo en la posición de equilibrio. El tipo de motor de reluctancia variable consiste en un rotor y un estator cada uno con un número diferente de dientes. Ya que el rotor no dispone de un imán permanente, gira libremente si no tiene corriente alimentándolo, o sea que no tiene torque de detención. Por otro lado el motor de pasos híbrido combina las mejores características de los de reluctancia variable y de imán permanente. Se construyen con estatores multidentados y un rotor de imán permanente. Los motores híbridos estándar tienen 200 dientes en el rotor y giran en pasos de 1,8 grados. Existen motores híbridos con configuraciones de 0,9° y 3,6°. Dado que poseen alto torque estático y dinámico y se mueven a muy altas velocidades de pulso, se los utiliza en una amplia variedad de aplicaciones industriales.

## **2.11 Puente H.**

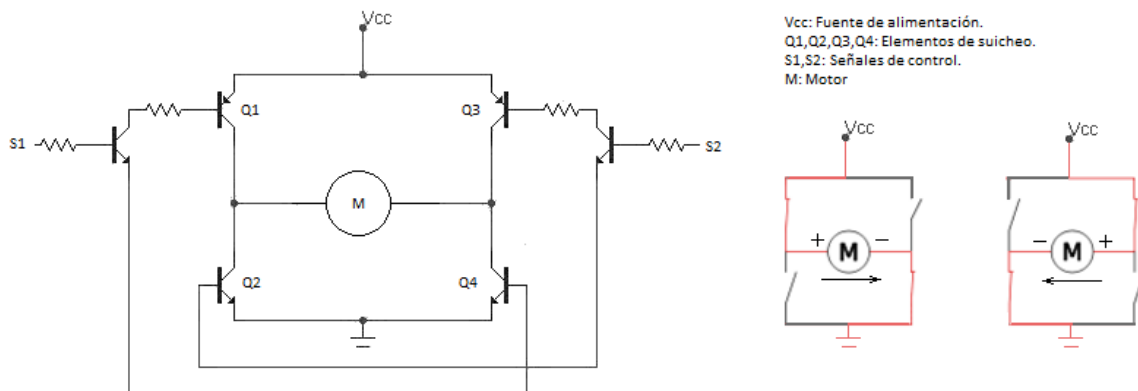
El puente H recibe su nombre debido a que el circuito que lo conforma está dispuesto en forma de letra h, estos circuitos sirven para controlar la polaridad de la tensión aplicada a una carga, o dicho de otra manera, controlar la dirección del flujo de corriente a través de dicha carga. Generalmente la carga es un motor de corriente continua, y la inversión de la polaridad traerá como consecuencia el cambio del sentido de giro del motor.

### **2.11.1 Elementos y funcionamiento**

El puente h está compuesto por cuatro elementos (Figura 2. 11) para su funcionamiento los cuales son:

- La fuente de alimentación: la cual suministrara la energía que requiere la carga.

- Elementos de conmutación controlada: los cuales permitirán o impedirán el paso de corriente a través de ellos dependiendo de las señales de control.
- Señales de control: estas darán información a los elementos de conmutación controlada para que permitan el paso de la corriente en la dirección deseada.
- Motor o carga: elemento final que quedara polarizado dependiendo del sentido en que la corriente atraviese sus terminales.



**Figura 2. 11. Elementos del circuito puente h.**  
 Elaboración propia.

Cada una de las señales de control está asociada a dos elementos de conmutación, de manera que S1 controla la conmutación de Q1 y Q4, y S2 controla la conmutación de Q2 y Q3. Entonces, para que el motor gire en un sentido o en el contrario, deberá estar activa una señal de control y la otra inactiva. Las otras dos posibles combinaciones para S1 y S2, mantendrán el motor detenido.

Si bien se ha dicho que los puentes h generalmente se utilizan para el control de motores de corriente continua, También es posible el control de motores de paso a paso bipolares con la utilización de dos puentes h, uno para cada inducido del motor. En este caso se contará entonces con cuatro señales de control que trabajaran en una secuencia específica para polarizar los dos inducidos del motor de paso, de manera que permitan su movimiento.

## 2.12 PIC (*Peripheral Interface Controller*)

Los PIC's son microcontroladores diseñados y producidos por la empresa *Microchip*, la cual se encarga de realizar diversos componentes electrónicos de uso doméstico, aficionado e industrial. Durante más de 24 años a medida que ha avanzado la tecnología se

han encargado de producir, microcontroladores con mayor capacidad de procesamiento y operación, mayor robustez, memoria, fiabilidad y módulos de interfaz entre el mismo y otros periféricos.

Dentro de los PIC's más elementales, se encuentran familias 12, 16 y 18, en donde se diferencian por la gama de cada uno, esto está referido a las palabras de las instrucciones que procesa. Quiere decir que un grupo de PIC's de las familias 12 y 16, que manejan instrucciones de 12bits se les considera de gama baja; algunos de las familias 16 y 18 que manejan instrucciones de 14bits, son nombrados de gama media, mientras que muchos de la familia 18 de última producción, que poseen diversas cantidades de módulos de comunicación y periféricos, manipulan instrucciones de 16bits, por lo que son llamados de gama alta. En la Figura 2. 12 puede observarse un gráfico que muestra por familia de PIC's el tamaño físico respecto a su memoria.

Cabe destacar, que dentro de sus productos también se encuentran microcontroladores de gama alta, de longitudes superiores de datos como los son los dsPIC que trabajan con palabras de 16bits, además de poseer un procesador digital de señales. Asimismo, dentro de sus últimos lanzamientos se encuentran PIC's 32 con manejo de datos de 32bits, mayor capacidad de procesamiento y velocidad.

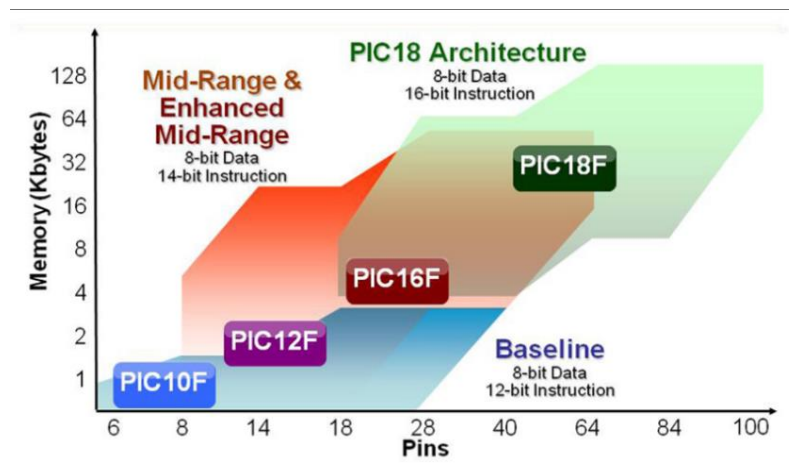


Figura 2. 12. Gráfico de tamaños (memoria vs físico) de PICs, de acuerdo a la evolución de su arquitectura [16].

Algunos de los periféricos o módulos de mayor uso en los PIC's son principalmente los de comunicación serial, de conversión ADC (Analógica - Digital), de comparación y



captura, modulación por ancho de pulso (PWM), así como controladores de pantallas LCD (*Liquid Crystal Displays*). En cuanto a comunicación, estos microcontroladores permiten hacer uso de estándares como RS232, RS485, SPI (*Serial Peripheral Interface*), I<sup>2</sup>C, CAN (*Controller Area Network*), Ethernet, entre otros.

### 2.13 Conversión analógico-digital.

Consiste en la transcripción de señales analógicas en señales digitales, con el propósito de facilitar su procesamiento (codificación, compresión, entre otros) y hacer la señal resultante (digital) más inmune al ruido y otras interferencias a las que son más sensibles las señales analógicas. Para realizar esa tarea, el conversor tiene que efectuar tres procesos los cuales son el muestreo, la cuantización y la codificación.

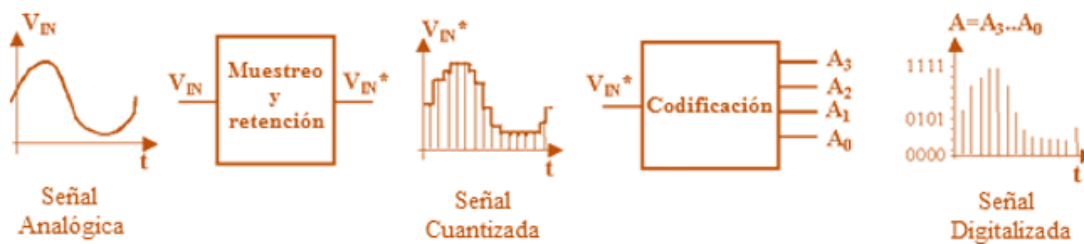


Figura 2. 13. Etapas de la conversión analógico-digital [6].

El muestreo consiste en tomar diferentes muestras de tensiones en diferentes puntos de la onda analógica, La frecuencia a la que se realiza la medición se denomina frecuencia de muestreo. Durante el proceso de muestreo se asignan valores numéricos equivalentes a la tensión existente en diferentes puntos de la señal.

Una vez realizado el muestreo, el siguiente paso es la cuantización de la señal analógica. Para esta parte del proceso los valores continuos de la señal analógica se convierten en series de valores numéricos decimales discretos, correspondientes a los diferentes niveles o variaciones de voltajes que contiene la señal analógica original.

Después de realizada la cuantización, los valores de las tomas de voltajes se representan numéricamente por medio de códigos y estándares previamente establecidos. Lo más común es codificar la señal digital en código numérico binario. Los sistemas de conversión analógica digital son necesarios cuando se realiza procesamiento digital de

señales, ya que permiten el nexo entre ambos espacios, del mundo real y el digital. Son muy utilizados en sistemas de instrumentación y adquisición de datos. En todo convertidor analógico digital el conjunto de bits obtenidos a la salida será un reflejo lo más exacto posible del valor analógico correspondiente. Si el convertidor está situado a la salida de un sensor (que habitualmente aporta una señal de amplitud débil) es esencial que en la etapa de conversión no se genere un nivel de ruido que impida la conversión real de la señal de entrada. La Figura 2. 13 muestra las etapas que conforman la conversión analógica digital.

### 2.14 Filtro antialiasing.

En instrumentación, es en muchas ocasiones necesario limitar el ancho de banda antes de la conversión analógico digital, debido al ruido de alta frecuencia. Estas señales de interferencia o ruido pueden ser procedentes de sensores, armónicos en la red o inclusive ser ondas electromagnéticas provenientes del ambiente. Por ello, antes de realizar una conversión analógico digital se incluye una etapa previa con un filtro pasa bajo (antialiasing) cuya función es atenuar la amplitud de la señal para frecuencias superiores a la frecuencia de corte y deja pasar aquellas frecuencias que son menores que la frecuencia de corte. Con ello se asegura afectar lo mínimo posible la señal analógica original. En la Figura 2. 14 se muestra un filtro pasa bajo RC el cual puede ser usado como filtro antialiasing.

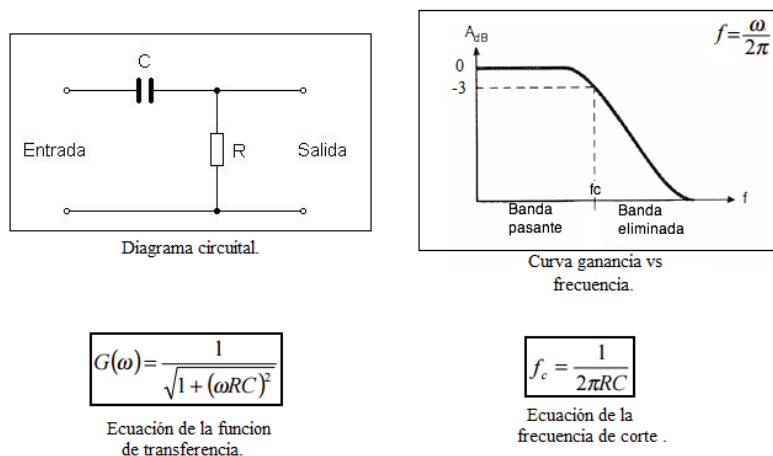


Figura 2. 14. Filtro RC utilizado como antialiasing.

Elaboración propia.

En instrumentación, este circuito se considera un circuito de acondicionamiento de señal para la salida de sensores. Se encargará de eliminar en la medida de lo posible el ruido de alta frecuencia para obtener un mejor resultado en la conversión analógico digital.

## **2.15 Tarjetas de adquisición de datos.**

El hardware de adquisición de datos, actúa como la interfaz entre un computador y señales del mundo exterior. Funciona principalmente como un dispositivo que digitaliza señales analógicas entrantes para que un computador pueda interpretarlas. Los componentes clave de una tarjeta de adquisición de datos, usada para medir una señal son el convertidor analógico digital (ADC) y un bus de comunicación con el computador. Varios dispositivos DAQ incluyen otras funciones para automatizar sistemas de medidas y procesos. Por ejemplo, los convertidores digital-analógicos envían señales analógicas, las líneas de E/S digital reciben y envían señales digitales y los contadores/temporizadores cuentan y generan pulsos digitales.

Las señales analógicas de los sensores deben ser convertidas en digitales antes de ser manipuladas por un equipo digital como un computador. Un convertidor analógico-digital es un chip que proporciona una representación digital de una señal analógica en un instante de tiempo. En la práctica, las señales analógicas varían continuamente con el tiempo y un ADC realiza mediciones periódicas de la señal a una razón predefinida. Estas mediciones continuas son transferidas a un computador a través de un bus, el cual se conecta por medio de una ranura o puerto. El bus del computador sirve como la interfaz de comunicación entre el dispositivo DAQ y el computador para pasar los datos medidos e instrucciones. Las tarjetas de adquisición de datos se ofrecen en los buses más comunes, incluyendo USB, PCI, PCI Express y Ethernet.

## **2.16 Plataforma de desarrollo LabVIEW.**

La plataforma LabVIEW (*Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*) de *National Instruments* es un entorno de desarrollo integrado especializado en informática industrial y científica, su particularidad es que se basa en la programación gráfica. Permite el desarrollo de programas informáticos complejos de manera más sencilla, en consecuencia, disminuye los plazos de desarrollo. Gracias a sus librerías de funciones dedicadas a la adquisición de datos, la instrumentación, al análisis matemático de las mediciones y la visualización, es adecuado para desarrollar bancos de pruebas y mediciones en laboratorio.

Con LabVIEW, la programación se hace con íconos los cuales representan funcionalidades, ligados entre ellos por cables que representan el flujo de datos. Esta

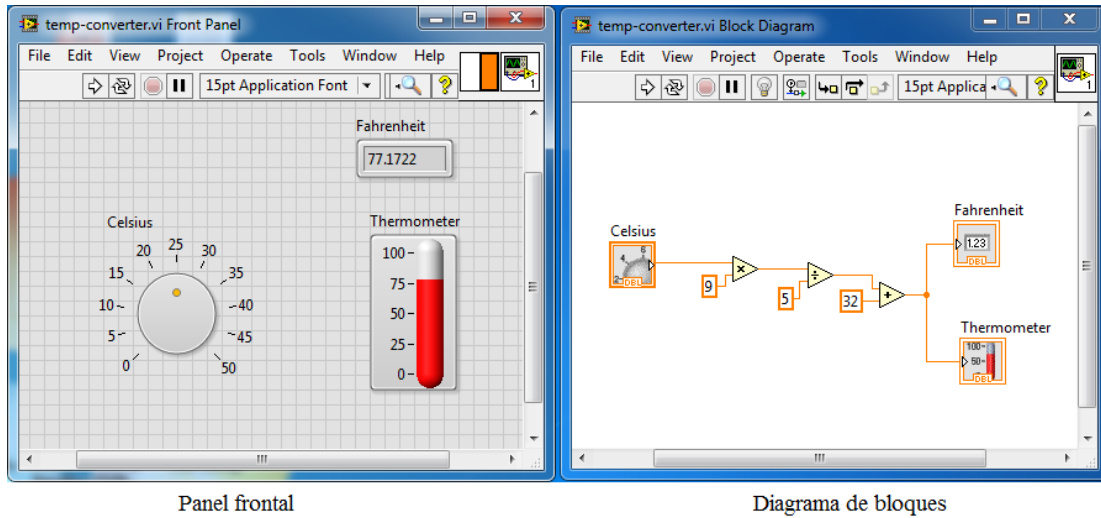
representación del código está más cerca de la concepción del diseño de programas basados en esquemas, característica que, facilita mucho el trabajo que necesita la programación del concepto. Esta abstracción del lenguaje gráfico no requiere de un experto en programación para desarrollar un programa sencillo.

Los programas realizados en LabVIEW son llamados instrumentos virtuales (Figura 2. 15), Cada instrumento virtual consta de dos partes diferenciadas:

- **Panel Frontal:** El Panel Frontal es la interfaz con el usuario, se utiliza para interactuar con el usuario cuando el programa se está ejecutando. Los usuarios podrán observar los datos del programa actualizados en tiempo real. En ésta interfaz se definen los controles (los usamos como entradas, y pueden ser botones, selectores, marcadores, entre otros.) e indicadores (los usamos como salidas, y pueden ser gráficos, indicadores lumínicos, indicadores numéricos, entre otros.).

- **Diagrama de Bloques:** es el programa propiamente dicho, donde se define su funcionalidad, aquí se colocan íconos que realizan una determinada función y se interconectan entre ellos generando así el código que controla el programa.

En el panel frontal, encontraremos todo tipo de controles o indicadores, donde cada uno de estos elementos tiene en el diagrama de bloques un ícono asociado. Mientras el diagrama de bloque contiene la parte funcional del proceso informático que se lleva a cabo. El usuario podrá diseñar un proyecto en el panel frontal con controles e indicadores, donde estos elementos serán las entradas y salidas. Podemos observar en el diagrama de bloques, todos los valores de los controles e indicadores, como van fluyendo entre ellos cuando se está ejecutando un programa o instrumento virtual.



**Figura 2. 15. Elementos del instrumento virtual en LabVIEW [17].**

En resumen, LabVIEW es una herramienta gráfica de programación. Al tener ya prediseñados una gran cantidad de bloques de funciones, se le facilita al usuario la creación del proyecto, con lo cual en vez de utilizar una gran cantidad de tiempo en programar bloques de funciones, se le permite invertir mucho menos tiempo y dedicarse un poco más en la interfaz gráfica y la interacción con el usuario final.

## CAPÍTULO III

### 3 ELEMENTOS DEL BANCO

#### 3.1 Introducción

El objetivo del proyecto es poder realizar pruebas sobre reguladores de gas auto-operados según lo establece la norma ANSI B109.4. Para ello, el banco se estructuró en tres módulos principales. Como puede observarse en la Figura 3. 1, los tres módulos se relacionan mediante el flujo de información. Cada módulo del banco posee características que lo diferencian de los demás. Sin embargo, están diseñados para que el flujo de datos entre ellos se haga de manera efectiva.

En este capítulo se presentan los aspectos principales de la instrumentación electrónica necesaria para el funcionamiento del banco de pruebas, se explican en detalle las principales características que conforman tanto el módulo físico como el módulo de adquisición y control.

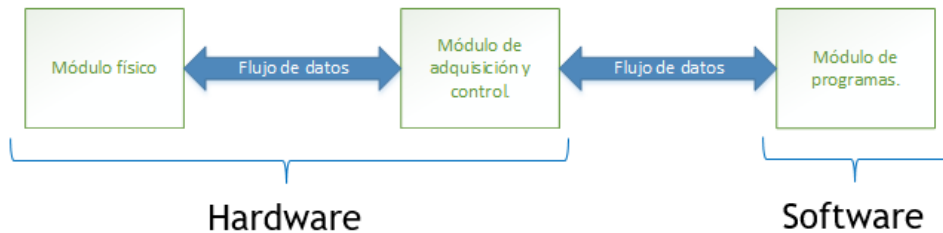


Figura 3. 1. Estructura general del banco de pruebas.

Elaboración propia.

#### 3.2 MÓDULO FÍSICO

El módulo físico incluye los elementos de conducción de aire presentes en el banco de ensayo. Para el armado se utilizó tubería de aluminio de 22 mm de diámetro externo para la conducción de aire, y para conectar los distintos elementos que conforman el banco se emplearon conexiones tipo rápida, lo cual brinda al usuario la opción de reconfigurar su disposición para realizar pruebas sobre reguladores en diferentes condiciones geométricas.

Los elementos de conducción de aire de control manual y con mando eléctrico se pueden configurar para adaptarse a los requerimientos de cada prueba a realizar. Las magnitudes de las presiones y flujos alcanzados en este módulo durante la ejecución de las

pruebas representan la información a ser registrada, procesada y finalmente almacenada por los otros módulos del banco de pruebas.

### **3.2.1 Características:**

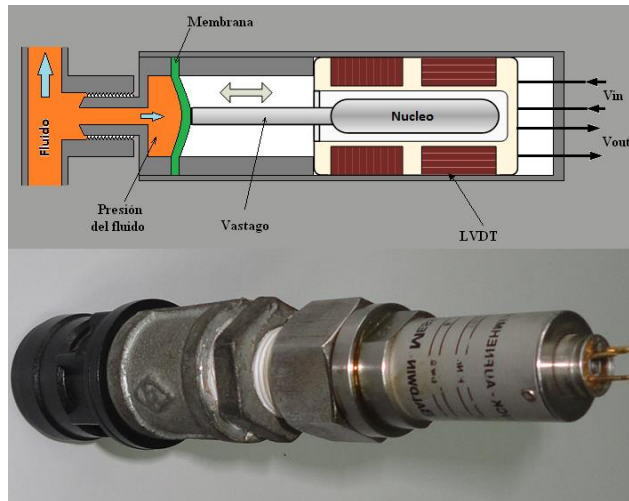
El modulo es en esencia un circuito neumático, en el cual el regulador de gas bajo prueba es el elemento principal. Posee dos etapas de operación, una de alta presión en la entrada del regulador y una de baja presión a la salida del regulador. En la etapa de alta presión los principales elementos que fueron instalados son: la fuente neumática, de donde proviene el aire comprimido que alimenta el banco, dos reguladores de presión, una electroválvula neumática, una válvula manual y un sensor de la presión de entrada. En la etapa de baja presión los elementos principales que fueron instalados son: un sensor de presión de salida, un sensor de flujo de salida, una electroválvula neumática de salida y un conjunto de válvulas manuales.

### **3.2.2 Elementos principales utilizados en el módulo físico**

A continuación se da una descripción detallada de los elementos utilizados en el módulo físico implementado en el instituto de materiales y modelos estructurales.

#### **3.2.2.1 Sensor de presión HBM Modelo P11**

Este dispositivo es utilizado como sensor de la presión de entrada al regulador y está constituido por un mecanismo el cual acopla de manera mecánica una membrana con el vástago de un LVDT. La presión ejercida por el aire sobre el sensor actúa sobre una de las caras de la membrana, la cual se deforma linealmente respecto a los aumentos de presión. Del otro lado de la membrana se encuentra el acople mecánico que la une con el vástago del LVDT, en consecuencia, el sensor determina el valor de presión mediante la medición de la deformación que sufre la membrana. La Figura 3. 2 muestra la estructura interna del sensor de presión instrumentado con LVDT.



**Figura 3. 2. Estructura interna del sensor HBM P11.**  
**Elaboración propia.**

Las características que presenta este sensor son:

- Rango de operación: 0 - 150 [psi].
- Rango de servicio de la tensión de excitación: 1 – 6 [Volts] (RMS).
- Tensión nominal de excitación:  $2,5 \pm 5\%$  [Volts] (RMS).
- Frecuencia de oscilación:  $4.8 \pm 1\%$  [kHz].

### **3.2.2.2 Transductor de presión Bourdon Sedeme E914**

Este transductor mide la presión de salida del regulador bajo prueba. Posee un elemento sensor tipo capacitivo y está diseñado para la medición de la presión absoluta ya que contiene una cámara de vacío. El elemento sensor está construido con tecnología TRANSBAR de cerámica capacitiva la cual es capaz de manejar fluidos agresivos.

El dispositivo incluye la electrónica para el acondicionamiento de señal. Para su funcionamiento solo se requiere alimentar el sensor; de sus terminales de salida se obtendrá un valor voltaje directamente proporcional a la presión que se está midiendo.





**Figura 3. 3. Sensor Capacitivo Bourdon sedeme E914 [5].**

Características:

- Tipo: presión absoluta.
- Rango: 0 – 1 [bar].
- Tensión de alimentación: 11 – 40 [Volts].
- Tensión de salida: 1 – 5 [Volts].
- Precisión:  $\pm 0.2\%$ .

El transductor de baja presión Bourdon Sedeme E914 (ver Figura 3. 3) está diseñado para trabajar en condición de vacío. A nivel del mar la presión atmosférica es 1.013 bar, lo cual haría el sensor inapropiado para medir presión debido a que ya se encuentra en el máximo de su rango de medición. Sin embargo, a medida que se incrementa la altura disminuye la presión atmosférica. Debido a que la altitud de la ciudad de Caracas respecto al nivel del mar es en promedio 900 metros, la presión atmosférica en la ciudad se encuentra por debajo de 1.013 bar, específicamente en un valor alrededor de 0,9071 bar, lo cual proporciona un rango de 0.0928 bar para poder medir presión a partir de 0,9071 bar. La conversión de los 0,0928 bar a pulgadas de agua da como resultado 37,29 plg agua, lo cual proporciona un rango de medición de baja presión adecuado para la mayoría de los ensayos que se realizaran en el banco de pruebas.

Existe un procedimiento de prueba en el cual se deberá aplicar una presión a la salida del regulador de 2 psi (55.5 plg agua), claramente esto excede el rango máximo de medición del sensor, sin embargo, la cantidad de pulgadas de agua excedente se encuentra por debajo del límite de seguridad del sensor de presión el cual es del 30% de la escala total, por esta razón, inclusive excediendo alrededor de 30 plg agua por encima del máximo del sensor,

puede emplearse el sensor para la medición de la presión de salida instalado en el banco sin problema. En la Tabla 3. 1 puede apreciarse los rangos del trabajo del sensor Bourdon Sedeme E914 obtenidos de forma experimental.

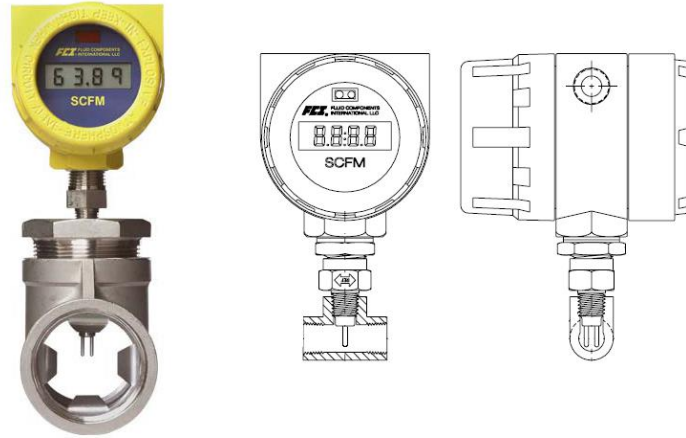
**Tabla 3. 1. Rango de trabajo utilizado del sensor Bourdon Sedeme E914 .**

Elaboración propia.

<b>Constante de calibración del sensor [psi/Voltio]</b>	<b>Tensión [Voltios]</b>	<b>Presión [psi]</b>	<b>Presión [plg agua]</b>	<b>Presión diferencial [psi]</b>	<b>Presión diferencial [plg agua]</b>
<b>3,626</b>	<b>4,743</b>	<b>13,572</b>	<b>375,672</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
	<b>5</b>	<b>14,504</b>	<b>401,47</b>	<b>0,932</b>	<b>25,798</b>
	<b>5,3</b>	<b>15,592</b>	<b>431,586</b>	<b>2,02</b>	<b>55,914</b>

### **3.2.2.3 Medidor de flujo másico FCI ST75V**

El medidor de flujo másico FCI ST75V (ver Figura 3. 4) utiliza la tecnología de dispersión térmica, la cual consiste en la medición de pérdida de calor o efecto de enfriamiento de un cilindro calentado al recorrer un fluido por su superficie. Dispone de dos detectores RTD, insertos en termopozos y separados por un pequeño espacio. Se aplica calor a un solo RTD, generando una diferencia de temperatura entre ambos. Esta temperatura diferencial alcanza su punto máximo ante la ausencia de flujo y va disminuyendo a medida que éste aumenta, enfriando así el RTD calentado. Los cambios en la velocidad del flujo o la inmersión del elemento de flujo en un líquido afectan directamente la forma en la que se disipará el calor y a su vez, la magnitud de la diferencia térmica entre los RTD. Puesto que la relación entre la velocidad del caudal y el efecto de enfriamiento guarda directa relación con la masa en las aplicaciones de gas. La tecnología de dispersión térmica, combinada con circuitos de linealización de señales, se utiliza para proporcionar una medición precisa y repetible de las velocidades de flujo másico de gas o aire.



**Figura 3. 4. Medidor de flujo másico ST75V [8].**

Características:

- Rango: de 20 a 1500 scf/h.
- Precisión:  $\pm 1\%$  a plena escala.
- Instalación: tipo “T”, NTP o tubo en línea.
- Temperatura de operación: 0°F a 250°F [-18°C a 121°C].
- Tensión de alimentación: 18 - 36 [Volts<sub>DC</sub>] 85 – 265 [Volts<sub>AC</sub>].
- Señal de salida: 4 – 20 [mA] o 0-10 [Volts<sub>DC</sub>], asignables al flujo o temperatura.
- Puerto de comunicación: RS-232C estándar.
- Indicador: Pantalla LCD de 4 dígitos (9999 conteos), caracteres de 11,4 mm de altura. Ampliable por el usuario a unidades de velocidad de flujo o de 0 al 100%.

#### **3.2.2.4 Electroválvula M3 107B**

Esta electroválvula es utilizada para presurizar controladamente el regulador bajo prueba en el ensayo de resistencia, posee internamente un mecanismo de diafragma asistido. Es normalmente cerrada. Por ser de tipo asistida, la energía necesaria para la apertura o cierre de la válvula la proporciona la misma fuente de aire. El solenoide que en este dispositivo tiene la función de piloto solo efectúa la acción de control, por ello el consumo de energía eléctrica de este tipo de electroválvula es mínimo. En la Figura 3. 5 puede apreciarse la válvula con su simbología neumática y sus posiciones de funcionamiento.

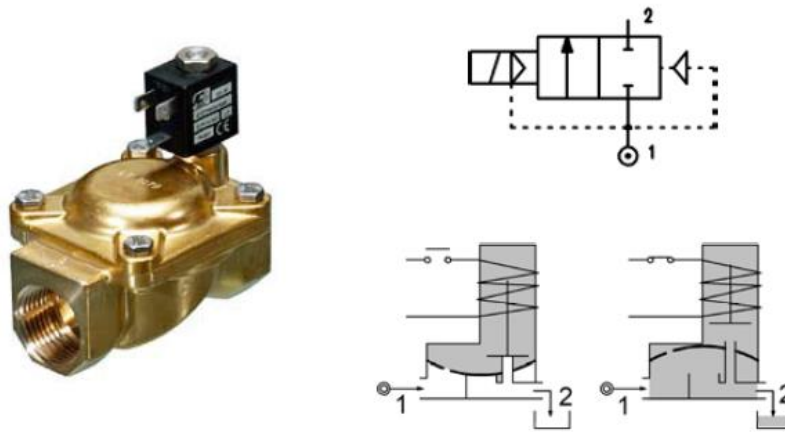


Figura 3. 5. Electroválvula M3 107B [1].

Características:

- Posición: Normalmente cerrada.
- Presión diferencial mínima: 0.15 [bar].
- Presión diferencial máxima: 15 [bar].
- Tensión de alimentación: 110 [Volts<sub>AC</sub>].

### 3.2.2.5 Actuador rotativo VSI2034DE y electroválvula A1E250

Estos dispositivos trabajan en conjunto y son utilizados para mantener presurizado y despresurizar el regulador bajo prueba de forma controlada en el ensayo de resistencia. El actuador rotativo (Figura 3. 6 a) está conformado por una válvula de bola que esta acoplada mediante engranajes a dos cámaras para poder ejercer la rotación de la válvula. La válvula de bola se encontrará insertada en la tubería principal y permitirá el paso o la obstrucción total del fluido. Para que este actuador rotativo funcione correctamente se deberá presurizar una de las cámaras y la otra deberá estar despresurizada, en caso de querer cambiar la posición del actuador se debe despresurizar la cámara presurizada y se presurizará la cámara despresurizada.

Con el objetivo de alternar las presiones en las cámaras del actuador rotativo se utiliza una electroválvula de 5 vías (Figura 3. 6 b). Dos de las vías de esta electroválvula estarán destinadas a las cámaras del actuador rotativo, una de las vías será la de suministro a la electroválvula y por último las dos vías restantes serán las de desahogo. Mientras el solenoide se encuentra desactivado, la disposición mecánica de la válvula da acceso al fluido de entrada

directamente a una de las cámaras de la válvula rotativa, mientras la otra entrada de la válvula rotativa estará directamente conectada con su desahogo correspondiente. Una vez energizado el solenoide, la acción mecánica ejercida sobre la válvula, hará que el fluido de entrada ahora se dirija a la cámara opuesta del actuador rotativo y la entrada de la cámara que se encontraba presurizada ahora se encuentre conectada a su desahogo correspondiente.



Figura 3. 6. Actuador rotativo y electroválvula de la casa API [3].

Características actuador rotativo VSI2034DE:

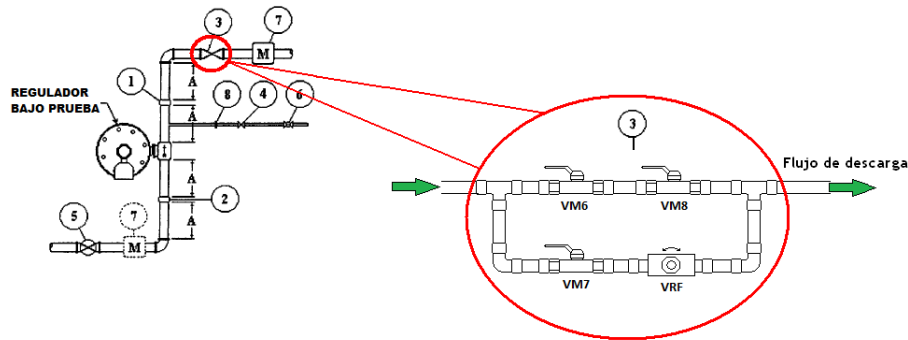
- Fluido de control: aire comprimido.
- Rango de presión: 2 – 8 [bar].
- Tubería:  $\frac{3}{4}$  [pulgadas].
- Temperatura de operación: de -20 a 80 [°C].

Características electroválvula A1E250:

- Tipo: Solenoide muelle.
- Fluido de operación: Aire comprimido.
- Rango de presión: 1 – 10 [bar].
- Tamaño de orificio:  $\frac{1}{4}$  [pulgada].
- Temperatura de operación: de -10 a 60 [°C].
- Tensión de operación: 120 [Vac].

### 3.2.2.6 Válvula reguladora de flujo o válvula de descarga.

Para el circuito neumático implementado en el banco de pruebas, el personal del IMME instaló la válvula de descarga la cual consta de un conjunto de cuatro válvulas dispuestas según se muestra en la Figura 3. 7.



**Figura 3. 7. Válvula de descarga.**

**Elaboración propia.**

Las válvulas de bola manuales VM6 y VM7 de  $\frac{3}{4}$  de pulgadas se utilizarán para permitir o impedir el flujo de aire a través de su sección de tubería. La válvula de bola manual VM8 de  $\frac{3}{4}$  se utilizara para graduar los flujos máxicos altos, modificando la apertura de su mecanismo interno. La válvula reguladora de flujo VRF, se encargara de la regulación de los flujos máxicos bajos (en un rango de 0-60 scf/h).

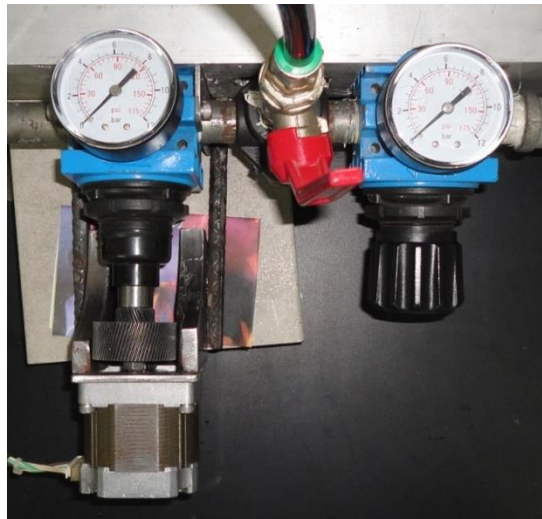
### **3.2.2.7 Regulador automático de presión.**

El banco de pruebas para reguladores de gas fue previamente construido en el Instituto de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad Central de Venezuela. La construcción del mismo se realizó según los requerimientos que establece la norma ANSI B109.4. Sin embargo, varias de las pruebas que se realizan *requieren que la presión de entrada sea continuamente ajustada*, acción que lleva a cabo un operador. Enmarcado en la visión general del proyecto, la cual persigue en hacer el sistema lo más automatizado posible para así mejorar la precisión y aligerar la carga sobre el operador del banco. Se decidió motorizar el regulador de presión de entrada manual del banco.

Inicialmente se disponía de un regulador manual de 0 – 175 psi, el cual modificaba su presión de salida debido a dos factores, la presión de entrada o alimentación y la apertura de la válvula. La apertura de la válvula es controlada manualmente por un operador, el cual gira una manilla que esta acoplada mecánicamente al sistema de restricción de la válvula.

Para motorizar el regulador de la presión de entrada, se utilizó un motor de paso modelo KH56KM2, el cual se acoplo mecánicamente al mando del regulador manual de entrada mediante un arreglo de engranajes. Con la ayuda del personal y los equipos

disponibles en el taller mecánico de IMME, se llevó a cabo el ensamblaje del conjunto motor – regulador y el resultado de esta implementación se observa en la Figura 3. 8.



**Figura 3. 8. Vista del regulador manual y regulador automático.  
Elaboración propia.**

El control del regulador automático se realizará desde el computador, además se debe implementar una tarjeta secuenciadora y utilizar de driver de potencia para tal fin. Con este arreglo se podrá ajustar la dirección de giro y la velocidad de giro de forma automática.

A continuación se mencionan todos los elementos pertenecientes al módulo físico.

- VM1: Válvula manual de bola para presurizar el banco de ensayos.
- VM2: Válvula manual de bola para presurizar electroválvula 2.
- RPM: regulador de presión manual de 0 a 175 psig con manómetro.
- VM3: Válvula manual de bola para el paso de presión hacia el puerto de salida del regulador bajo prueba.
- RPA: Regulador de presión automático de 0 a 90 psig con manómetro.
- VM4: Válvula manual de bola para presurizar la entrada del regulador bajo prueba.
- EV1: Electroválvula M3 107B para la prueba de resistencia.
- SPE: Sensor de presión de entrada HBM P11.
- R: Regulador de presión auto-operado.
- VM5: Válvula manual de bola para el paso de presión hacia el puerto de salida del regulador bajo prueba.

- TPS: Transductor de presión de salida Bourdon Sedeme E914.
- VM6: Válvula manual de bola para el paso de flujos altos.
- VM7: Válvula manual de bola para el paso de flujos bajos.
- VM8: Válvula manual de bola para ajuste de flujos altos (160 – 1500 scf/h).
- VRF: Válvula reguladora de flujo de baja capacidad (0 – 60 scf/h).
- EV2: Electroválvula A1E250, que sirve como piloto para el actuador rotativo.
- AR: Actuador rotativo VSI2034DE.
- TF: Transmisor de flujo FCI S75V.

En la Figura 3. 9 se muestra el diagrama neumático y en la Figura 3. 10 la implementación física del banco con todos los sensores y actuadores instalados del circuito neumático.



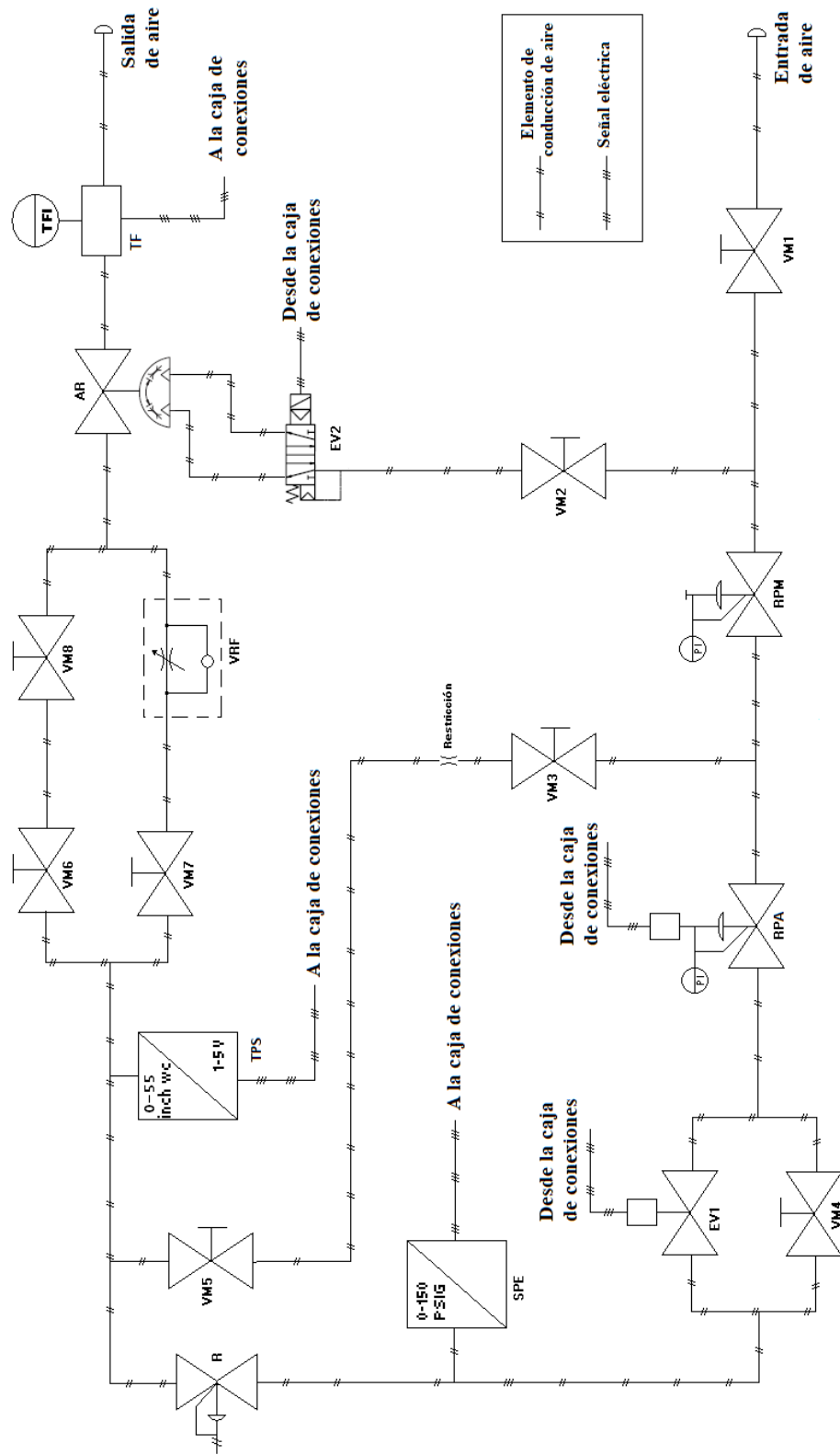
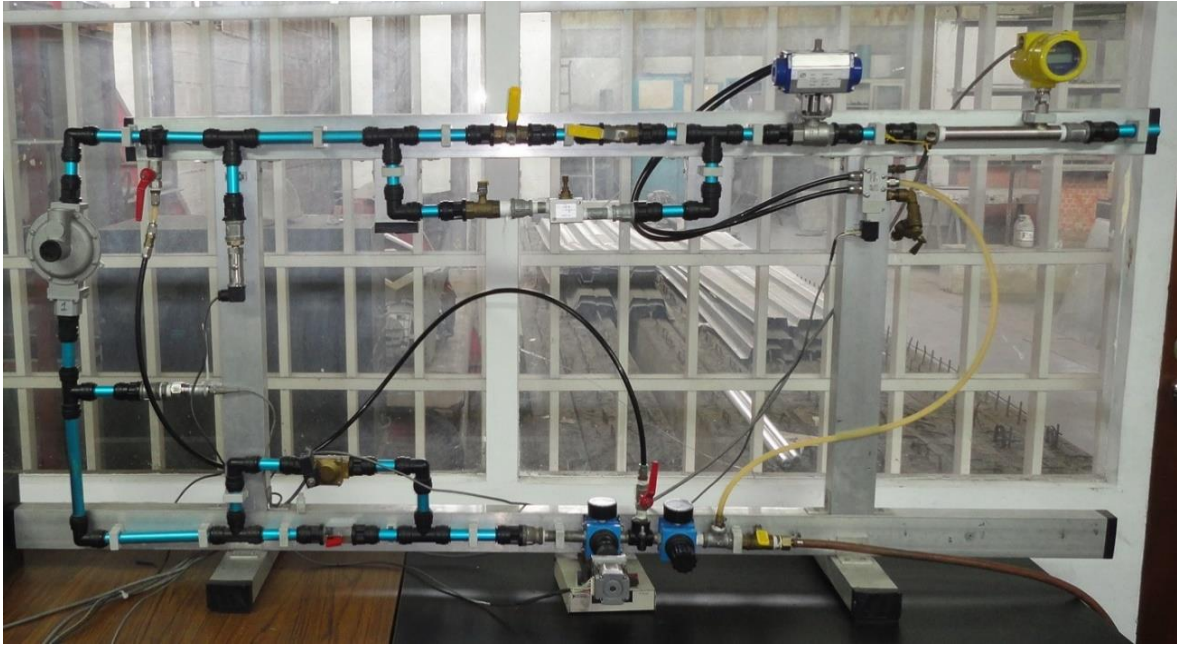


Figura 3. 9. Diagrama neumático.

Elaboración propia.



**Figura 3. 10. Implementación del módulo físico.  
Elaboración propia.**

### **3.3 MÓDULO DE ADQUISICIÓN Y CONTROL**

Este módulo incluye a todos los elementos que conforman la instrumentación electrónica necesaria para el funcionamiento del banco. Los elementos que conforman el banco, son en general los sensores, con sus respectivos circuitos de acondicionamiento de señal. Los actuadores, con sus respectivos circuitos para manejo de potencia. Y por último la tarjeta de adquisición de datos. La tarjeta de adquisición de datos es la interface entre el computador y las señales de entrada y salida de los sensores y hacia los actuadores.

Los elementos que se utilizaron en el módulo de adquisición y control, y el diagrama que los relaciona (Figura 3. 11) se exponen a continuación.

- Tarjeta de adquisición de datos NI USB-6009.
- Tarjeta acondicionadora de señal para sensor de alta presión.
- Tarjeta amplificadora y con filtros antialiasing.
- Tarjeta de control de potencia para electroválvulas.
- Tarjeta secuenciadora para el motor de paso.
- Tarjeta para el manejo de potencia del motor de paso.
- Fuentes de poder.

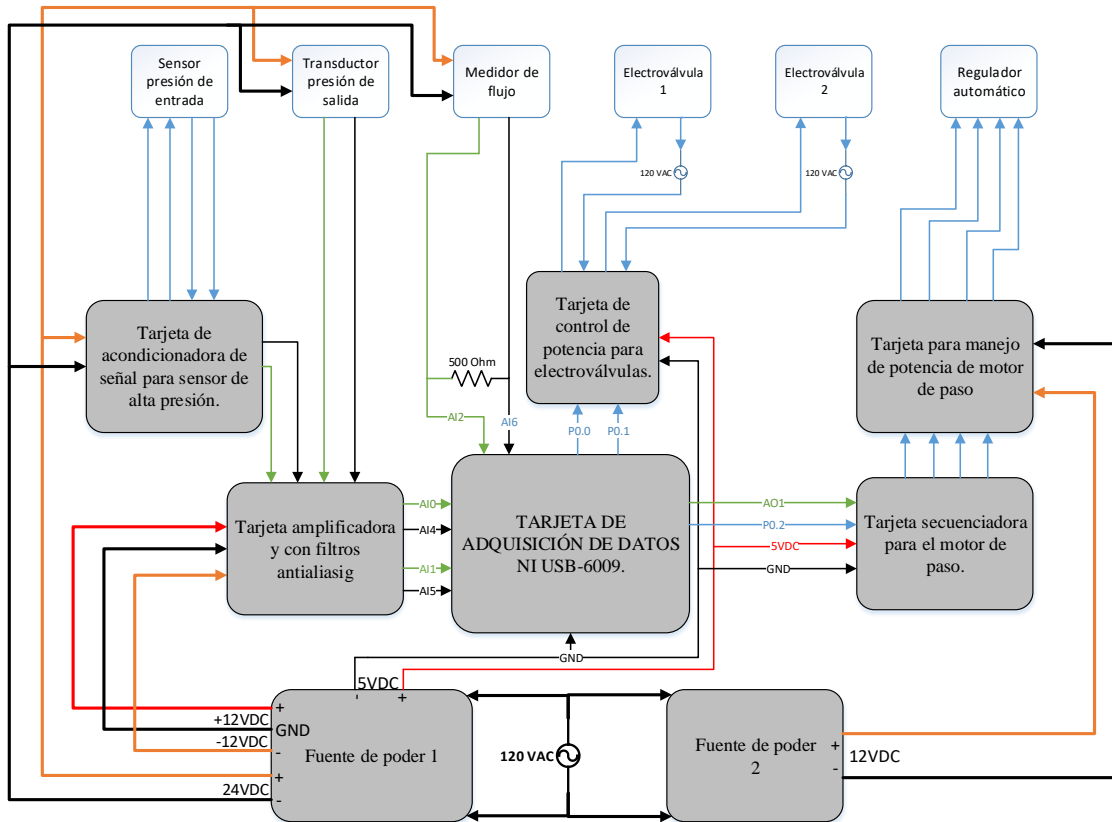


Figura 3. 11. Diagrama módulo de adquisición y control.

Elaboración propia.

Por último y no menos importante se hará referencia al cajón de instrumentación donde se instaló toda la electrónica implementada. A continuación, se definirán en detalle todos los procedimientos relacionados con la instalación y funcionamiento de la instrumentación requerida para el manejo de las señales provenientes de los sensores y el control de los actuadores del banco de pruebas.

### 3.3.1 Tarjeta de adquisición de datos NI USB-6009.

Este dispositivo de la casa *National Instruments* brinda funcionalidad DAQ básica para aplicaciones como registro de datos, medidas portátiles y experimentos académicos de laboratorio. Posee varias entradas analógicas las cuales medirán el voltaje proveniente de los sensores, además, también poseen salidas analógicas que permiten ejercer acciones de control. En el ámbito digital, posee canales de entrada/salida configurables por software que se encargan de la lectura o escritura de señales digitales proveniente de sensores discretos o hacia actuadores en el cual la señal de control es una señal digital. Por sus dimensiones y bus

de conexión esta tarjeta permite portabilidad y facilidad de uso. La Figura 3. 12 muestra la tarjeta utilizada en la implementación del banco.



**Figura 3. 12. Tarjeta de adquisición de datos NI USB6009 [10].**

En la Tabla 3. 2 se muestran las características principales de la tarjeta de adquisición de datos utilizada.

**Tabla 3. 2. Características tarjeta NI USB-6009 [10].**

Generales	Modelo	NI USB 6009
	Parámetro de medición	Voltaje
	Bus de comunicación	USB
	Tensión de operación	5V
	Máxima corriente en operación	200 mA
	Temperatura de operación	0°C – 55°C
	Impedancia de entrada	144 kOhm
Entradas analógicas	Cantidad total	8
	Cantidad en modo referenciado	8
	Cantidad en modo diferencial	4
	Rango de operación	$\pm 10$ Volts
	Resolución	13 bits en modo referenciado, 14 bits en modo diferencial
	Precisión mínima	7.73mV en un rango de $\pm 10V$
	Precisión máxima	1,53mV en un rango de $\pm 1V$
	Frecuencia de muestreo	48kHz
Salidas analógicas	Cantidad	2
	Rango de operación	0 - 5 Volts
	Resolución	12 bits
	Precisión	7 mV

	Frecuencia de Actualización	150 Hz
Entradas-Salidas Digitales	Cantidad	12 configurables por software
	Rango de operación	0 - 5 Volts
Contador	Cantidad	1
	Resolución	32 bits
	Máxima frecuencia de entrada	5 MHz

Gracias a las características de la tarjeta de adquisición de datos NI USB-6009 se considera adecuada para utilizarla en el módulo de adquisición y control del proyecto.

Para la adquisición de los datos provenientes de los sensores, se utilizaron tres canales de entrada analógica en modo diferencial (configuradas previamente por software). En el canal analógico cero se instalaron los terminales asociados al sensor de alta presión. En el canal analógico uno, se instalaron los terminales asociados al transductor de baja presión. En el canal analógico dos, se instalaron los terminales asociados al medidor de flujo másico.

Para el control de las electroválvulas, se utilizaron dos canales E/S previamente configurados como salidas digitales. Desde el canal digital cero del puerto 0 (P0.0) se instaló un terminal que con respecto a tierra, será el encargado de transmitir la señal de control para la electroválvula 1. Desde el canal digital uno del puerto 0 (P0.1) se instaló un terminal que con respecto a tierra, será el encargado de transmitir la señal de control para la electroválvula 2.

Para ajustar la presión de referencia del regulador automático desde la tarjeta de adquisición de datos, se generan una señal analógica y una digital. Desde el canal digital dos del puerto cero (P0.2), se instaló el terminal encargado de transmitir la señal de encendido/apagado del motor de paso del regulador automático. Desde el canal de salida analógico cero (AO0), se instalaron los terminales que serán los encargados de enviar la señal analógica de control de velocidad y sentido de giro del motor de paso del regulador automático. En la Figura 3. 13 se presenta un gráfico con las conexiones físicas de la tarjeta de adquisición de datos.

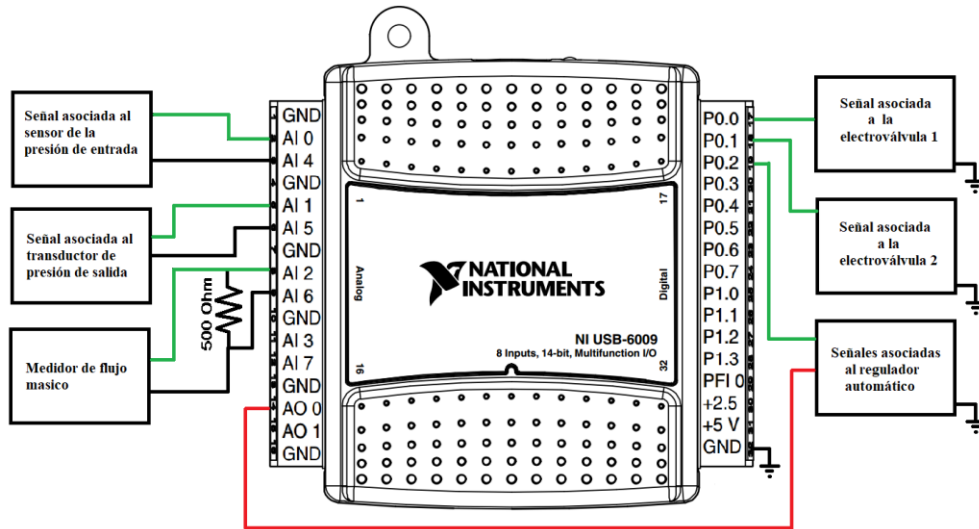


Figura 3. 13. Conexión física de la NI USB-6009.

Elaboración propia.

Cabe destacar que los instrumentos de medición de presión de entrada, de presión de salida y los actuadores atraviesan etapas intermedias antes de interactuar con la tarjeta. Sin embargo, el medidor de flujo se conectó directamente a la tarjeta de adquisición de datos. El medidor de flujo posee internamente la electrónica de acondicionamiento de señales, la salida de este sensor es un lazo de corriente de 4-20 mA, y mediante una resistencia de precisión de 500 Ohmios, genera señales de tensión entre 2 y 10 voltios.

### 3.3.2 Tarjeta acondicionadora de señal para sensor de alta presión.

Se dispone en el banco de un sensor de alta presión HBM Modelo P11. Para acondicionar la señal de salida del sensor se utilizó una tarjeta acondicionadora de señal HBM Messkonverter MC2. Este cuenta con un amplificador de medición tipo MC2, el cual está diseñado para realizar la medición en transductores de tipo inductivo de la marca HBM.

Entre sus propósitos está proporcionar una tensión de alimentación para el medio puente inductivo y además se encarga de que la señal del transductor conectado (LVDT) se convierta en una tensión continua proporcional al desplazamiento. En la Figura 3. 14 se muestra un diagrama detallado de las etapas que conforman el acondicionador de señales HBM Messkonverter MC2.

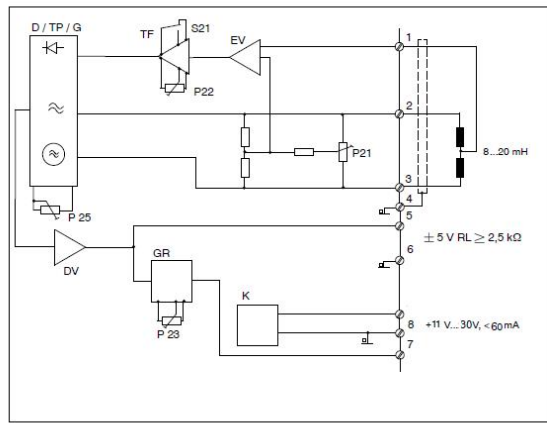


Diagrama de bloque del circuito



EV: Amplificador de entrada.  
 TF: Amplificador de frecuencia portadora.  
 S21: Selector de modo de operación  
 P21: Potenciómetro de ajuste a cero.  
 P22: Ajuste fino de rango.  
 D/TP/G: Demodulador, filtro, generador.  
 P25: Fase de referencia.  
 DV: Amplificador diferencial.  
 GR: Suiche limitador  
 P23: Potenciómetro de ajuste límite.

Figura 3. 14. Diagrama de tarjeta acondicionadora HBM Messkonverter MC2 [9].

Las características que posee este acondicionador de señal son:

- Rango de tensión de alimentación: 11- 30 [Volts].
- Tensión de excitación del puente:  $2 \pm 10\%$  [Volts](RMS).
- Frecuencia del oscilador:  $5 \pm 1\%$  [kHz].
- Salida bipolar:  $\pm 5$  [Volts].
- Precisión: 0.1%.

La función de la tarjeta es generar una señal de alimentación al sensor, y recibir la señal de respuesta del sensor para acondicionarla. De esa manera se obtiene una señal de tensión en corriente continua entre 0 y 5 voltios. En la Figura 3. 15 se presenta un gráfico con las conexiones físicas de la tarjeta de adquisición de datos.

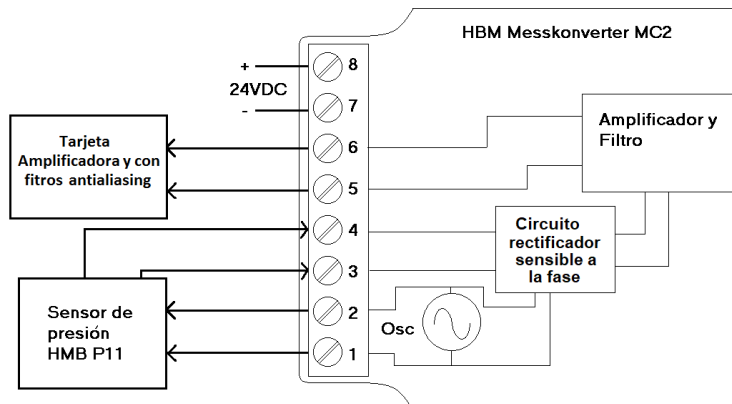


Figura 3. 15. Conexión física de la tarjeta HBM Messkonverter MC2.

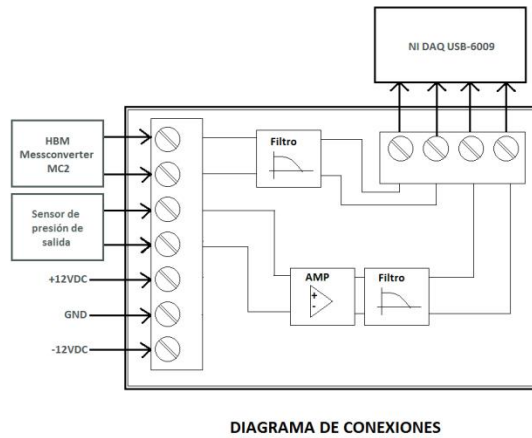
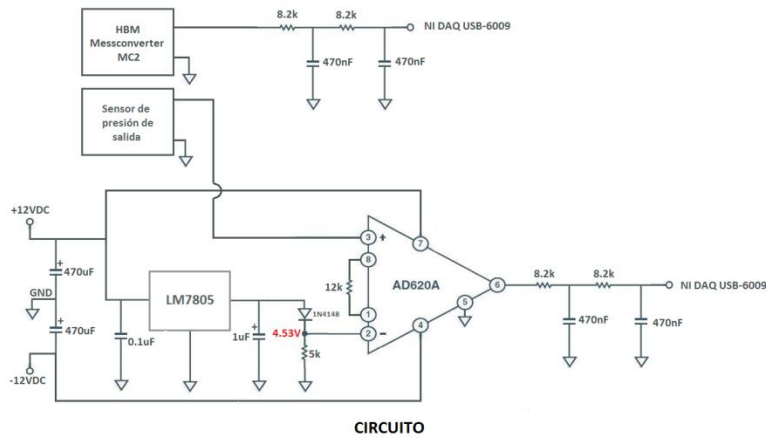
Elaboración propia.

### **3.3.3 Tarjeta amplificadora y con filtros antialiasing.**

Esta tarjeta tendrá la función de acondicionar las señales de los sensores de presión de entrada y presión de salida de manera que puedan ser leídos adecuadamente por la tarjeta de adquisición de datos. La señal asociada a la presión de entrada, será la proveniente de la tarjeta HBM Messkonverter MC2, y únicamente pasara por un filtro antialiasig de segundo orden configurado para que su frecuencia de corte sea de 41.29 Hertz con lo cual se limita el ancho de banda de la señal antes de ser leída por la tarjeta de adquisición de datos.

La señal proveniente del sensor de presión de salida pasa por una etapa amplificadora basada en un amplificador instrumental AD620 con una ganancia diferencial de 5,1166. La tensión diferencial, será la diferencia entre la tensión del sensor de presión de salida y una tensión de referencia proveniente de un regulador LM7805. A la salida del circuito se conectó un filtro antialiasing de las mismas características del utilizado para el sensor de alta presión. Experimentalmente se obtuvo una tensión de referencia de 4.53 voltios a la salida del diodo; además, tomando en cuenta la etapa de filtraje y con el circuito conectado a la tarjeta de adquisición de datos, se obtuvo de forma experimental el valor de la ganancia total la cual dió 4.653. Las conexiones físicas y el circuito implementado pueden apreciarse en la Figura 3. 16.





**Figura 3. 16. Tarjeta amplificadora y con filtros antialiasing.  
Elaboración propia.**

### 3.3.4 Tarjeta de control de potencia para electroválvulas.

Las electroválvulas funcionan con los 120 Volts suministrados por la red, esta tensión alterna alimenta los inducidos de sus solenoides. Para poder controlar la activación o desactivación de las electroválvulas, se implementaron circuitos capaces de conectar y desconectar los solenoides a la tensión de la red a partir de señales de control de tipo TTL emanadas de la tarjeta de adquisición de datos. Este circuito consta de un *triac* y un optoacoplador. El *triac* cumple la función de conmutador de corriente alterna y el optoacoplador provee aislamiento galvánico entre la señal de control de la tarjeta de adquisición de datos y la red. En la Figura 3. 17 se puede observar el circuito electrónico que conforma esta tarjeta y el diagrama de conexiones físicas de la misma.

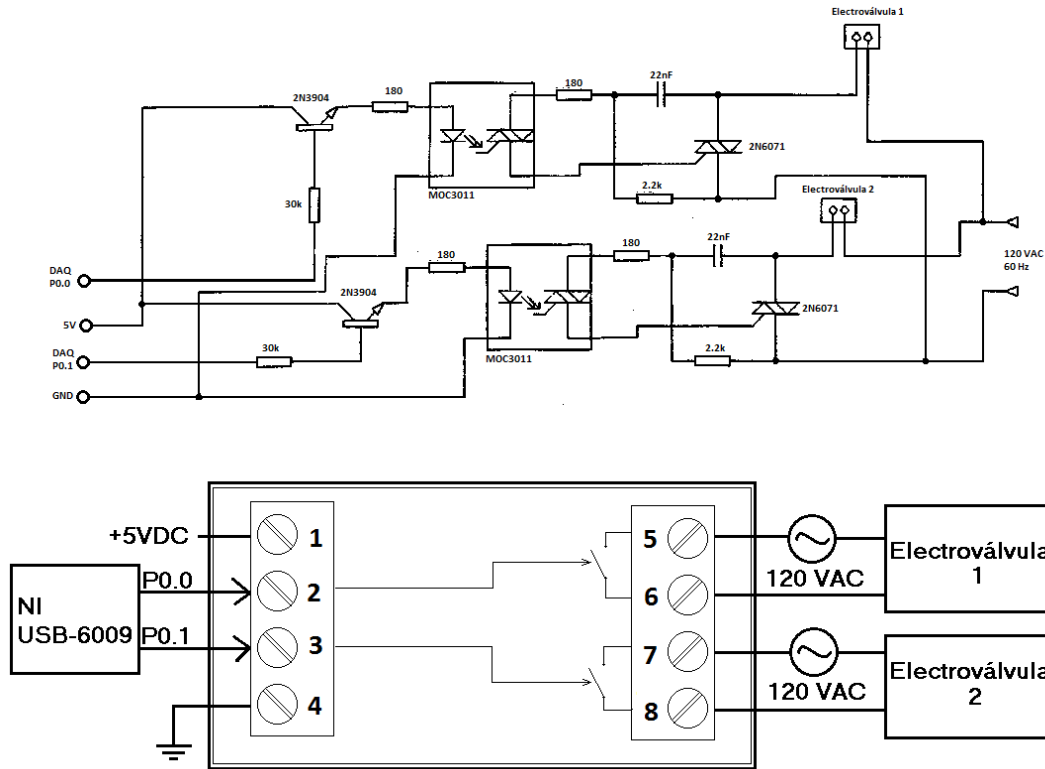


Figura 3. 17. Circuito y diagrama de conexiones de la tarjeta controladora de potencia para electroválvulas.  
Elaboración propia.

### 3.3.5 Tarjeta secuenciadora para el motor de paso.

Un regulador de presión manual permite ajustar la presión que será aplicada a la entrada del regulador de gas bajo prueba. Para realizar el cambio en el ajuste de la presión de entrada de forma automática, se acopló un motor de paso mediante un engranaje al eje de mando del regulador. Mediante el accionamiento del motor de paso se fija la presión de entrada, la cual trata de imponer el regulador. Esta condición se ve perturbada cuando se presentan cambios en el flujo de aire que es requerido por el dispositivo bajo prueba, generándose así cambios ligeros en la presión regulada. Para compensar el efecto de la perturbación de carga se debe reajustar la presión de referencia hasta que se alcance el valor de presión deseado.

Para esto es necesario implementar una tarjeta secuenciadora que se encargue del accionamiento del motor de paso. Esto se logra al generar una secuencia de señales de tipo booleana a partir de dos señales de entrada, una de tipo digital y otra de tipo analógica. La señal digital habilita o deshabilita la tarjeta, mientras que la señal analógica define el sentido

de giro y la velocidad. Ambas señales provienen de la tarjeta de adquisición de datos. El esquema de funcionamiento de la tarjeta secuenciadora se muestra en la Figura 3. 18.

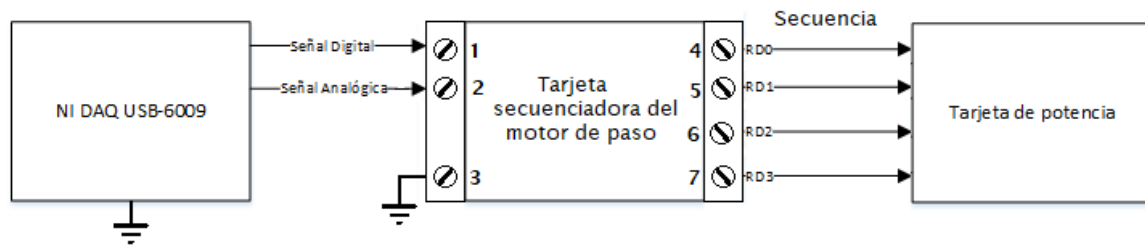


Figura 3. 18. Esquema funcionamiento tarjeta secuenciadora.

Elaboración propia.

Para implementar la tarjeta secuenciadora, se utilizó un microcontrolador PIC 16F877, su programación es tal que reacciona en función a las señales de entrada y genera las salidas en consecuencia para accionar la dirección y la velocidad de giro del motor de paso.

### 3.3.6 Tarjeta para el manejo de potencia del motor de paso

Las señales de control del motor proporcionadas por el microcontrolador PIC 16F877, no son capaces de manejar el nivel de potencia que requiere el motor de paso para su accionamiento. Por lo tanto es necesario implementar una etapa entre el actuador y la tarjeta secuenciadora que se encargue de replicar las señales de control con los niveles de potencia adecuados.

El módulo L298 posee dos puentes H, que tienen la capacidad de manejar e invertir la polaridad de la corriente que requieren las bobinas del motor. Cada puente H se encargará del manejo de una bobina y estará ligado a dos señales de control que conmutaran según la secuencia requerida. En la Figura 3. 19 se muestra el circuito del controlador y las conexiones físicas realizadas desde la tarjeta controladora y hacia el motor.

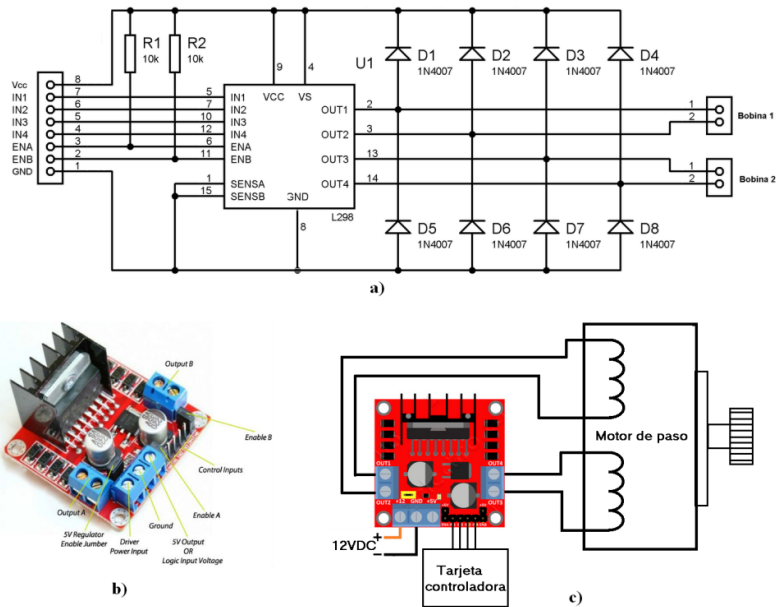


Figura 3. 19. Módulo L298 [14].

### 3.3.7 Fuentes de poder.

Los elementos fundamentales del módulo de adquisición y control son las tarjetas acondicionadoras de señales y de potencia. Las fuentes de poder suministran la energía necesaria para la alimentación de todas las tarjetas e instrumentos electrónicos presentes en el banco de pruebas. Para esto se utilizaron dos fuentes de poder conmutadas, una se encarga de alimentar los sensores y las tarjetas acondicionadoras, y la otra de suministrar energía al motor de paso y los elementos de ventilación. La primera maneja tensiones de 5,  $\pm 12$  y 24 voltios, mientras la otra fuente maneja tensiones de 12 y 5 voltios.

### 3.3.8 Caja de instrumentación.

Todos los circuitos de instrumentación y control se instalaron dentro de un cajón metálico el cual se adecuo para tal fin, en él se alojaron todas las tarjetas instaladas con sus conexiones eléctricas. Los sensores y los actuadores se enlazan con la electrónica de control mediante el uso de conectores apropiados. El bus de datos entre la tarjeta de adquisición de datos y el computador consiste en un puerto serial tipo USB, el cual se ubica en una abertura en el lateral izquierdo del cajón de instrumentación. Por último, en la parte trasera del cajón se encuentra el suiche de encendido de las fuentes de poder, un fusible de protección para

las electroválvulas y el cable conector de las fuentes de poder con la tensión de la red. En la Figura 3. 20 se puede observar la caja de instrumentación elaborada para el banco de pruebas.



**Figura 3. 20. Caja de instrumentación.  
Elaboración propia.**

## CAPÍTULO IV

### 4 LOS PROGRAMAS

#### 4.1 Introducción

La programación de las rutinas de adquisición de datos, de los procedimientos de pruebas y del programa principal, está enmarcada dentro de la estructura general del banco de pruebas (Figura 3. 1). La metodología utilizada consta de dos etapas fundamentales, la primera es el diseño de la solución para cada problema planteado mediante diagramas de flujo y la segunda su implementación mediante la plataforma de programación LabVIEW.

Por último se explica la estructura del programa realizado en lenguaje C para el microcontrolador PIC16F877 que genera la secuencia de accionamiento del motor de paso acoplado al regulador de la presión de entrada al banco de pruebas. Para la programación del PIC se adoptó la misma metodología que contempla el diseño de un diagrama de flujo y la implementación del código para su funcionamiento.

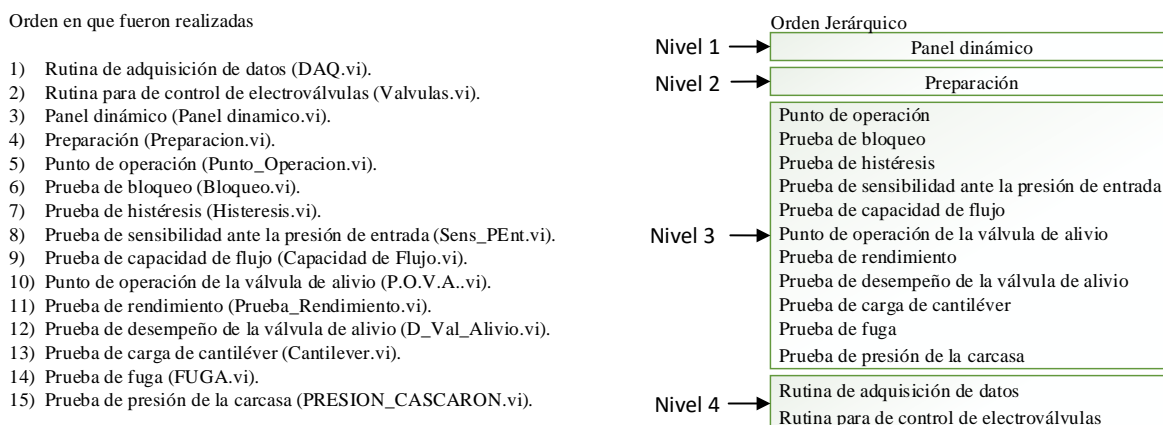
#### 4.2 MÓDULO DE PROGRAMAS.

El módulo de programas consta de 15 rutinas o instrumentos virtuales elaborados en la plataforma de programación LabVIEW versión 8.0. El módulo se estructuró de forma que el usuario del computador pueda acceder a la rutina de prueba que desee desde un menú principal. El programa principal permite al usuario el acceso de manera práctica e intuitiva a cualquier rutina de prueba para realizar un ensayo determinado.

De las 15 rutinas implementadas una hace de programa principal, desde el cual será posible llamar a la rutina de preparación o cualquiera de las 11 rutinas para la ejecución de las pruebas. La rutina de preparación permite determinar los niveles de referencia cuando los instrumentos de medición del banco se encuentran en su condición de arranque inicial (banco despresurizado), y los establece como cero eléctrico para así reportar las mediciones a partir del nivel de referencia. Las otras 11 rutinas corresponden ya propiamente a los procedimientos de pruebas que establece la norma en la sección 5.3.

Además existen dos rutinas fundamentales, la primera se encarga de la adquisición de los datos provenientes de los sensores y su conversión a magnitudes físicas y la segunda está relacionada con el control de las electroválvulas.

El control del regulador automático se realiza desde la rutina de prueba que lo requiera. En la Figura 4. 1 se muestran cada uno de los instrumentos virtuales implementados en el módulo de programas en el orden en que fueron realizados y la estructura jerárquica que poseen.

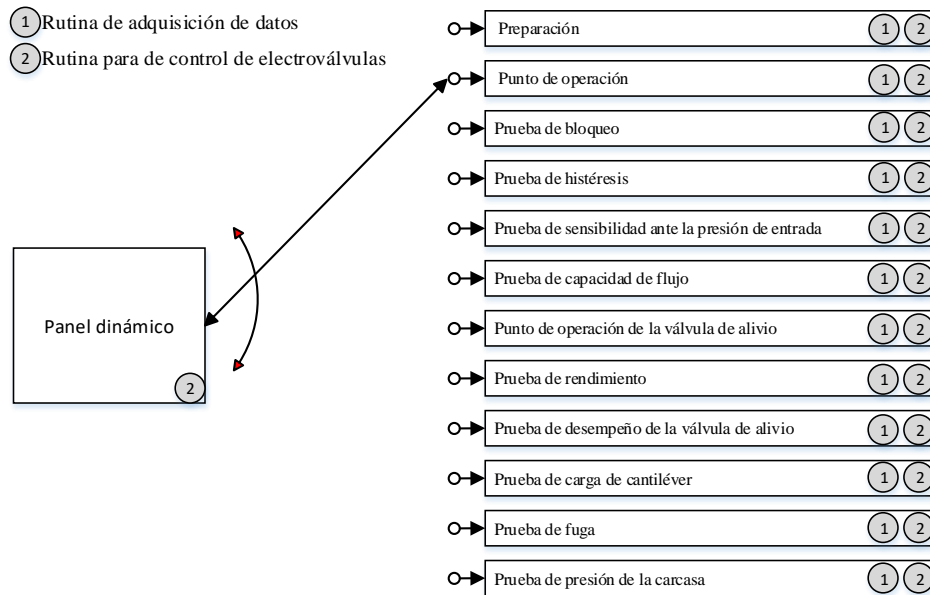


**Figura 4. 1. Rutinas elaboradas en el módulo de programas.**

**Elaboración propia.**

#### 4.2.1 Funcionamiento general del programa elaborado

Desde la rutina panel dinámico, se hace un llamado a la rutina de prueba con el procedimiento que se quiere realizar. Una vez realizada la prueba, el programa se devuelve al panel dinámico para así poder realizar cualquier llamado a otra prueba incluyendo la ya ejecutada. La Figura 4. 2 muestra un diagrama con la estructura del funcionamiento general del programa elaborado.



**Figura 4. 2. Diagrama del funcionamiento general del programa elaborado.**  
**Elaboración propia.**

#### **4.2.1.1 Aspectos generales de las rutinas elaboradas en el módulo de programas**

El panel frontal de las rutinas implementadas es la interfaz con el usuario de computador. En él se observan todos los indicadores de las variables físicas de interés en tiempo real, así como el estado en el que se encuentran los actuadores durante las pruebas.

Todas las rutinas son implementadas en lenguaje ‘G’ mediante diagramas de bloques. El arreglo de los bloques funcionales tendrá como objetivo realizar las operaciones de adquisición y control bajo las condiciones que establezca la prueba en ejecución.

Los paneles frontales poseen una maqueta que muestra la ubicación espacial de los elementos que conforman el modulo físico, de esta forma se puede ubicar de manera intuitiva el elemento que ejecuta la medición o realiza una acción de control en el banco.

Para todas las rutinas implementadas se garantiza que las electroválvulas (*on/off*) estarán en un estado inicial (sus solenoides no tendrán tensión de excitación aplicada). Por esta razón la electroválvula que se encuentra en la etapa de alta presión se encontrará normalmente cerrada y la electroválvula que se encuentra en la etapa de baja presión se encontrará normalmente abierta.



El estado de las electroválvulas será controlado de manera automática desde las rutinas de pruebas si su accionamiento es requerido. Estas válvulas poseen dos estados, cerrado y abierto, cada estado estará asociado a un color, por ello el cambio de estado de las electroválvulas se verá reflejado de manera dinámica en los paneles frontales como un cambio de color, permitiendo la fácil comprensión del funcionamiento del banco en tiempo real.

Para todas las rutinas implementadas se garantiza que la válvula motorizada esta desactivada al iniciar cada prueba. Su activación será ejecutada solo si es requerido el ajuste de la presión de entrada en la prueba que se esté ejecutando.

El banco posee instaladas una serie de válvulas manuales, como no es posible controlarlas desde el computador, esta acción será realizada por un operador. Sin embargo, el programa le indicará al operador del banco la posición que deben tener las válvulas manuales mediante la condición de los indicadores dinámicos que se encuentran en el panel frontal de las rutinas de prueba.

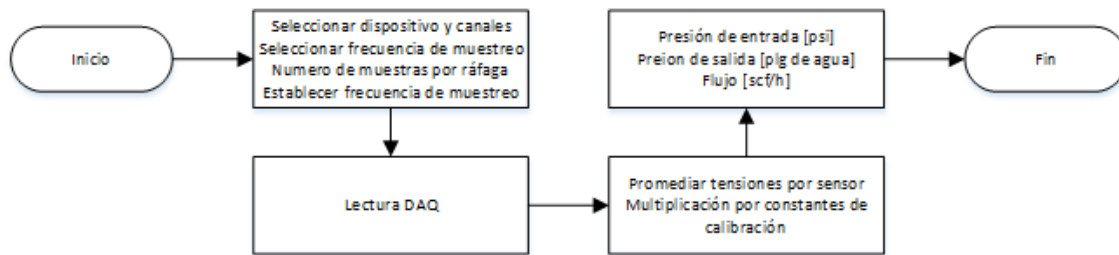
Es importante recalcar que el módulo de programas tiene dos objetivos, uno referente a la funcionalidad y el otro es referente a la interactividad con el usuario final. La funcionalidad, está ligada a que se realice de manera efectiva la medición de las variables físicas del banco y el correcto accionamiento de los actuadores bajo una serie de pasos que requiera la prueba que se esté ejecutando. La interactividad se refiere a la interfaz entre el usuario y el computador, la cual persigue mostrar fielmente el comportamiento del banco de pruebas. Ambos objetivos están íntimamente ligados y la implementación del módulo de programas los contempla para hacerlo eficiente y de fácil manejo.

A continuación se muestra en detalle los procedimientos realizados para la implementación de cada una de las rutinas realizadas en el módulo de programas.

#### **4.2.2 Rutina de adquisición de datos (DAQ.vi).**

Consiste en un instrumento virtual que se encargará de gestionar la información proveniente de la tarjeta de adquisición de datos. Su codificación está centrada en establecer los parámetros bajo los cuales la tarjeta realizara la medición. Una vez la tarjeta de adquisición de datos realiza la medición, envía de manera digital a través del bus de datos los valores de tensión asociados a la medición de los sensores. Por último se multiplicaran por

la constante de calibración asociada a cada sensor y así de esa manera se obtendrá el valor de la variable física medida en sus unidades correspondientes. Esta rutina no requiere ningún tipo de señal de entrada y solo se ejecuta cuando lo requieren los programas de pruebas, una vez ejecutada la rutina devolverá los valores de presión de entrada, presión de salida y flujo para que sean utilizados por los programas de donde fue llamada la rutina.



**Figura 4. 3. Diagrama de flujo de la rutina de adquisición de datos.**

**Elaboración propia.**

En cuanto a la configuración de la tarjeta de adquisición de datos, se escogieron los canales 0, 1 y 2 (CH0, CH1 y CH2) como entradas analógicas en modo diferencial. Se estableció la cantidad de muestras tomadas por medición en un valor de 498 muestras a una frecuencia de muestreo será de 1000 Hz. Se configuró el rango de medición de voltaje de la tarjeta entre -1 y 5 voltios. La tarjeta realizará un proceso de conversión analógico digital y enviará a través del bus los datos un arreglo con todos los elementos almacenados. Las 498 muestras almacenadas se promediarán para mejorar la precisión de la medición y así de esa manera tener un solo valor medido de la tensión en un lapso menor a medio segundo, con mayor precisión que cualquiera de las muestras tomadas individualmente; con ello se asegura que se realizarán dos mediciones por segundo de los sensores y transductores tal como lo establece la norma ANSI B109.4. En la Figura 4. 3 puede observarse el diagrama de flujo elaborado para esta rutina.

A partir de los valores de voltaje medido se realizó un proceso de conversión a las unidades físicas de medición, mediante la utilización de la constante de calibración de cada sensor. Los valores de calibración que se utilizaron en la rutina de adquisición se mencionan a continuación:

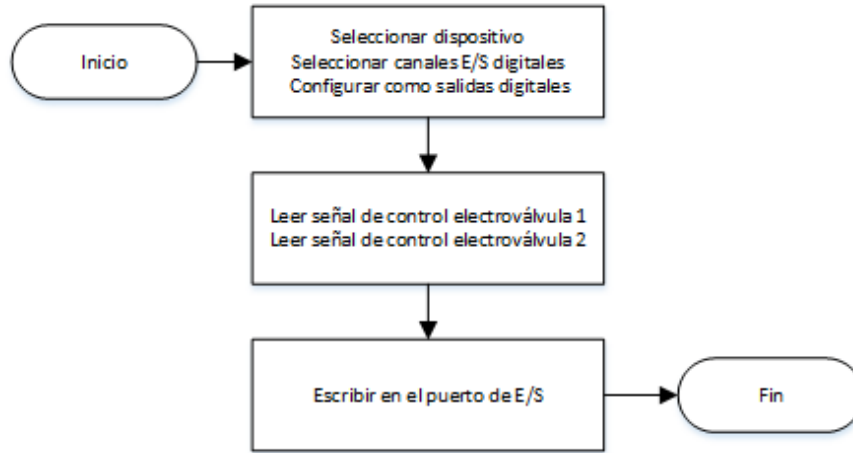
- Para el sensor de alta presión la constante será 28.4 [psi/V], esto convertirá el valor de tensión medido a psi.

- Para el sensor de baja presión será 3.75 [psi/V] para convertir a psi y luego 27.68067 [plg agua/psi] para convertir a pulgadas de agua.
- Se multiplicara el valor de tensión del sensor de flujo por 188.76 [(scf/h)/V] y al resultado de esto se le restara 377.48 [scf/h] ya que la medición comienza a partir de los 2 voltios.

La rutina entonces tendrá como salida la medición de la presión de entrada en psi, de la presión de salida en plg agua y el flujo en scf/h a una tasa de dos mediciones por segundo. La medición de estas variables físicas será presentada por los indicadores presentes en la rutina de prueba que demande la medición y además podrán ser guardadas en el momento que se requiera.

#### **4.2.3 Rutina para de control de electroválvulas (Valvulas.vi).**

Consiste en instrumento virtual que se encarga de configurar las salidas digitales que servirán como señales de control para las electroválvulas. Dos de los canales digitales de entrada/salida de la tarjeta de adquisición de datos se configuraron como salidas digitales, los cambios o conmutaciones en la salida digital de la tarjeta de adquisición de datos serán el reflejo de las señales de control que se ejecutan desde los programas de pruebas. En resumen, cuando una rutina de prueba se está ejecutando y se requiere un cambio en el estado de las electroválvulas, se hará el llamado a la rutina de control de válvulas para que ejecute la acción de control. Una vez se termina de ejecutar la rutina dejará el ultimo valor que estableció en las salidas y solo lo modificara si se vuelve a acceder a la rutina de control con una nueva configuración de entrada. En la Figura 4. 4 puede observarse el diagrama de flujo planteado para esta rutina.



**Figura 4. 4. Diagrama de flujo de la rutina para control de electroválvulas.**  
Elaboración propia.

En cuanto a la configuración de la tarjeta de adquisición de datos, se configuraron los canales 0 y 1 (P0.0 y P0.1) como salidas digitales. Una vez sea llamada la rutina, esta se encargará de replicar los valores lógicos que entran en ella, en las salidas físicas del puerto de la tarjeta.

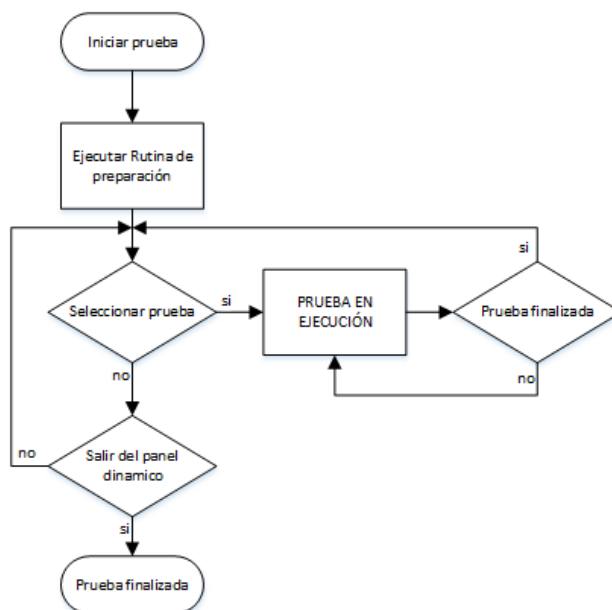
#### **4.2.4 Panel dinámico (Panel dinamico.vi).**

El panel dinámico, funciona de enlace entre todos los instrumentos virtuales de pruebas que se realizaron en el banco, es la rutina de inicio, y se ejecuta previamente a cualquier rutina de prueba que se desee realizar. Su diseño tiene forma de menú principal, desde el cual se hace un llamado a otras rutinas de prueba de manera dinámica. Las rutinas de prueba que pueden ser llamadas a ejecución desde el panel dinámico se aprecian en la Figura 4. 2.

Cuando la rutina “panel dinamico.vi” se encuentra en ejecución, puede observarse en el panel frontal del instrumento virtual una serie de pulsadores desde los cuales se decide cuál rutina de prueba quiere ejecutarse. Una vez el operador presione el botón de la prueba que quiere realizar, de manera automática se despliega la rutina de prueba en cuestión. Al finalizar la prueba se devolverá al panel dinámico para escoger otra prueba si es requerido.

**Diseño:** En principio, para cada una de las pruebas que exige la norma se requiere un instrumento virtual que la ejecute. Para evitar tener que trabajar las pruebas de manera individual, se decidió implementar una rutina que fuera capaz de contener todas las rutinas

que se encontraban por separado dentro de un mismo menú, de esa manera, el manejo de todos los programas de pruebas pueden ejecutarse desde una misma ventana del computador. Bajo este concepto se elaboró un diagrama de flujo de lo que se busca, al querer implementar esta rutina.



**Figura 4. 5. Diagrama de flujo para la rutina panel dinámico.**  
Elaboración propia.

Además de su función principal la cual es la de seleccionar la rutina de prueba deseada, el panel dinámico es capaz de almacenar los niveles de referencia pertenecientes a los sensores del banco y enviarlos a la rutina de prueba que requiera dichos niveles de referencia. Los ceros eléctricos provienen específicamente de la rutina de preparación y serán enviados desde el panel dinámico a los demás programas de ejecución de pruebas. En la Figura 4. 5 puede observarse el diagrama de flujo elaborado para la rutina de panel dinámico.

**Implementación:** Se elaboró un instrumento virtual, en el cual el diagrama de bloques se configuró para que la selección de cada una de las rutinas se haga a través de un llamado referenciado a la dirección donde se encuentra el instrumento virtual requerido (archivo “.vi”). Se configuró de manera tal, que abra la ventana del instrumento virtual maximizada y que dicho instrumento arranque automáticamente. Otra característica implementada en el diagrama de bloques será la de guardar los niveles de referencia provenientes de la rutina de preparación en registros dedicados para tal fin, esta información

archivada será utilizada por las demás rutinas de pruebas que se realizan. En el panel frontal se dispusieron una serie de controles asociados a cada una de las pruebas que se quiere realizar para ser utilizados por el usuario. En la Figura 4. 6 puede apreciarse el panel frontal elaborado para la rutina panel dinámico.



**Figura 4. 6. Panel frontal rutina de panel dinámico.**  
**Elaboración propia.**

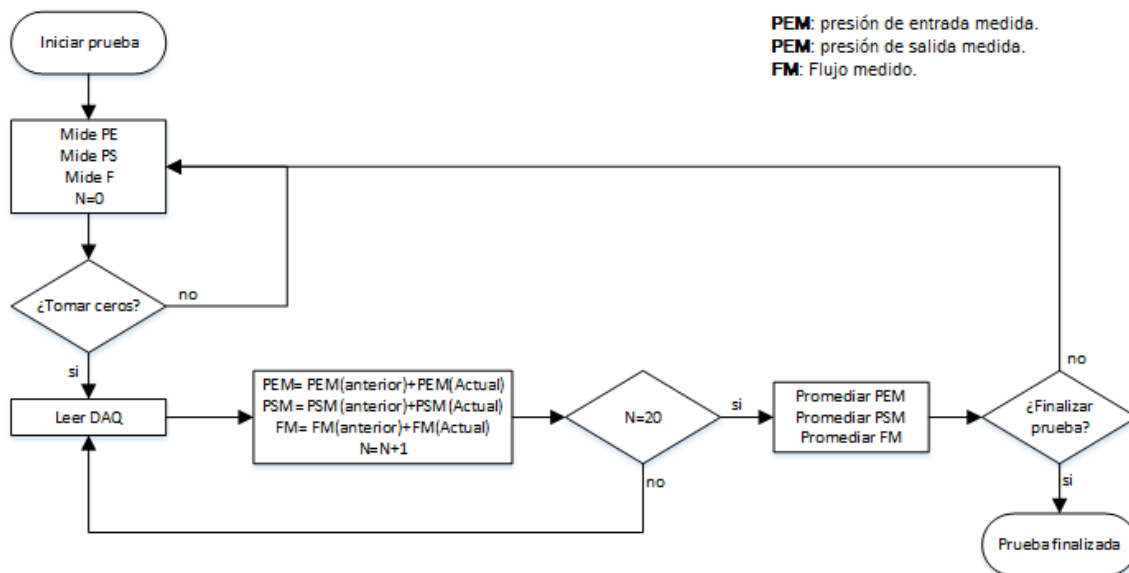
#### **4.2.5 Preparación (Preparacion.vi).**

Esta rutina de programación, tiene como objetivo principal determinar los niveles de *offset* de los instrumentos y establecerlos como niveles de referencia para los equipos de medición. Una vez determinados los niveles de referencia, en esta rutina de programación se podrá realizar la medición de la presión de entrada, de la presión de salida y el flujo correctamente. Además, la rutina de preparación permitirá probar el funcionamiento de las electroválvulas para cerciorarse que podrán ser utilizadas en las rutinas de pruebas que lo requiera.

**Diseño:** para poder realizar la medición de los parámetros físicos que miden los sensores, se debe ajustar previamente los niveles de referencia de los instrumentos de medición. Para este proyecto, el nivel de tensión de referencia es el voltaje medido por la tarjeta de adquisición de datos, cuando los elementos de medición se encuentran energizados y el circuito neumático del módulo físico no se encuentra alimentado. Esto significa que las

presiones en ambos sensores es cero y el flujo medido también es nulo. En esas condiciones se deberá entonces medir los niveles de tensión y establecerlos como el nivel cero desde el cual se comenzara a medir los parámetros.

En base a lo previamente establecido se elaboró un diagrama de flujo (Figura 4. 7) que determina la forma en que se establecerán los ceros de los instrumentos de medición. Es importante mencionar que la formación de los ceros será transferida al panel dinámico, ya que serán utilizados por las demás rutinas de pruebas.



**NOTA:** Para el ajuste de los niveles de referencia el banco debe estar despresurizado

**Figura 4. 7. Diagrama de flujo de la rutina de preparación.**

**Elaboración propia.**

Como a la salida de la rutina DAQ.vi se obtienen los resultados no en tensión sino en la unidad física del elemento de medición, un nivel de tensión de referencia es proporcional a un nivel de presión o flujo de referencia. Por esta razón siempre que se quiera medir una presión o un flujo, se deberá hacer con respecto a los niveles de referencia de cada elemento de medición. Para demostrar esto de manera más clara se exponen las siguientes ecuaciones.

$$PE_{medida} = PE_{DAQ} - PE_{referencia}$$

$$PS_{medida} = PS_{DAQ} - PS_{referencia}$$

$$F_{medido} = F_{DAQ} - F_{referencia}$$

Respecto a la manipulación de las electroválvulas, esto se podrá llevar a cabo siempre y cuando no se esté ejecutando el promedio de los niveles de referencia, y el accionar de cada una de ellas se configuró de manera que se podrá hacer a voluntad del usuario del computador, el cual al cambiar la condición de entrada al bloque de válvulas cambiara el estado de la válvula inmediatamente.

**Implementación:** El diagrama de bloques contiene una sección que ejecutará la lectura utilizando la rutina “DAQ.vi” una cantidad de 20 veces para almacenar los valores de la presión de entrada, de la presión de salida y del flujo de referencia. Luego de almacenados, determina el promedio obteniendo así los ceros o niveles de referencia del sistema con mayor precisión. Fuera de la estructura que ejecuta la toma de los ceros, el diagrama estará codificado de manera que medirá continuamente la presión de entrada, de salida y el flujo. Además podrá cambiarse los estados de las electroválvulas.

En el panel frontal se utilizó una maqueta la cual representa de manera bastante aproximada la ubicación de los componentes de conducción del banco. Sobre esta maqueta se colocaron los indicadores tipo manómetro y tipo numérico para reflejar las presiones de entrada y de salida, y además un indicador tipo numérico para el flujo. Tendrá un control tipo botón que dará la orden de tomar los ceros del sistema. Las acciones de conmutación de las electroválvulas se efectuaran presionando con el cursor sobre sus representaciones en la maqueta. El cambio de estado será representado por un cambio de color. En la Figura 4. 8 se muestra el panel frontal de la rutina de preparación.



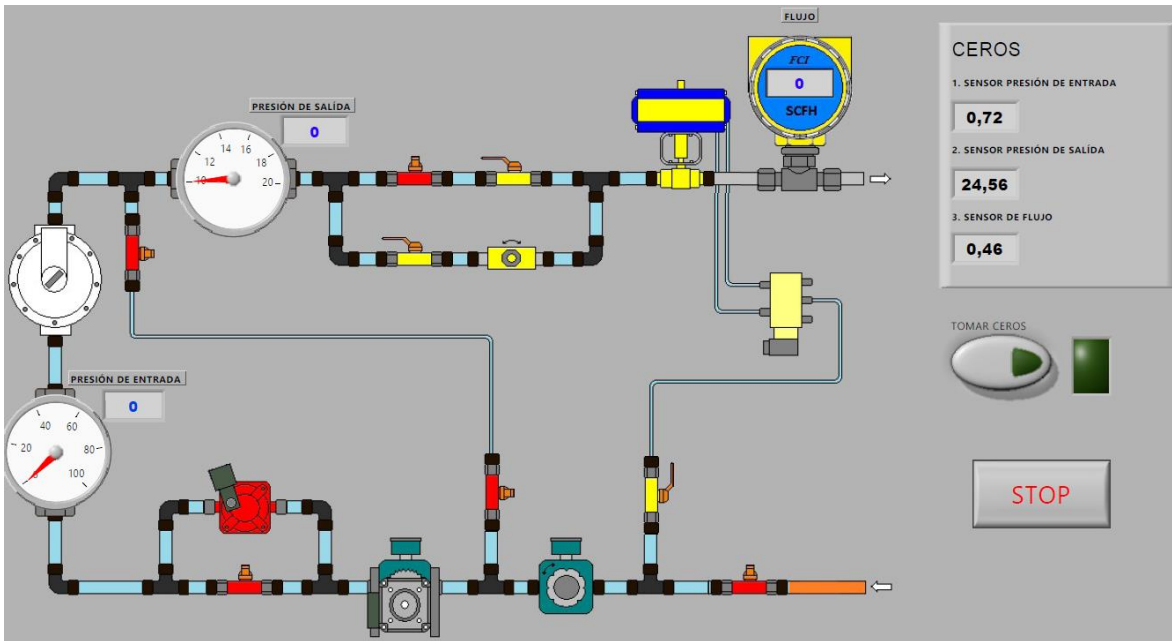


Figura 4. 8. Panel frontal de la rutina de preparación.

Elaboración propia.

#### 4.2.6 Punto de operación (Punto\_operacion.vi)

El objetivo de esta rutina es realizar un procedimiento de prueba de acuerdo a lo establecido en la sección 5.3.3 de la norma ANSI B109.4, la cual busca establecer, un punto de operación en el regulador bajo prueba como marco de referencia para distintas pruebas que se ejecutaran.

Para conseguir este objetivo, se deberá tener un punto de operación previamente acordado con el fabricante. La prueba se completará cuando los valores medidos por los sensores se encuentren dentro de un rango aceptable alrededor de los valores de consigna. Una vez ajustado el punto de operación, se podrá guardar la información sobre las mediciones hechas, en un archivo de texto que generara la rutina de forma automática. El archivo se guardara en un directorio del computador que el usuario escoja.

**Diseño:** El objetivo de la rutina punto de operación, es lograr que los parámetros que se miden en el banco se encuentren dentro de un rango cercano a los valores de consigna establecidos por el usuario. Para ello se estructuró un procedimiento el cual persigue lograr este objetivo mediante la constante comparación entre el valor medido de la variable y el

valor deseado de la variable. En Figura 4. 9 se muestra el diagrama de flujo que contempla el diseño para la rutina punto de operación.

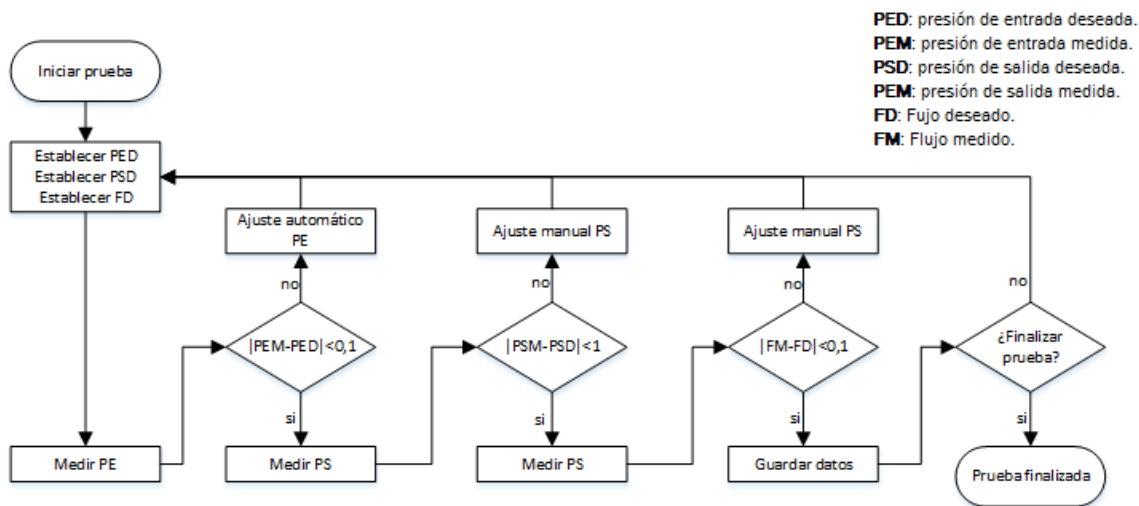


Figura 4. 9. Diagrama de flujo para la rutina del punto de operación.

Elaboración propia.

En todo momento el sistema medirá las presiones y el flujo. El usuario introducirá los valores del punto de operación que desee e inmediatamente se inicie la prueba, el proceso de comparación se llevara a cabo mediante la resta de las variables que se miden y las establecidas por el usuario. Del resultado de esta diferencia, se verifica cuan cercano o cuan alejado se encuentra el valor medido del deseado. Las acciones de control que deberá ejecutar el computador y el operador del banco también dependerán de estos resultados. A continuación se detalla por elemento de medición las características de cada procedimiento:

Para el sensor de presión de entrada, el resultado de la medición será adecuado, siempre y cuando la presión de entrada se encuentre en un rango menor a 1 psi por arriba o por debajo de la presión de entrada deseada. Si esto no es así, se realizará un ajuste automático accionando el regulador automático de la presión de entrada, el cual disminuirá la presión de entrada cerrando la válvula si la presión de entrada medida se encuentra por arriba de la presión de entrada deseada y abriéndola para aumentarla si la presión de entrada medida se encuentra por debajo de la presión deseada.

Para el transductor de presión de salida, el resultado de la medición será adecuado, si la presión medida se encuentra en un rango menor a 0,1 plg agua por arriba o por debajo de

la presión de salida que se quiere. De no ser así el operador deberá ajustarla graduando el mecanismo interno del regulador (válvula, membrana, resorte) mediante la manipulación de un tornillo que ajusta la regulación. Esto suele ser un proceso iterativo y deben realizarse los ajustes hasta que la presión de salida entre en el rango establecido.

En cuanto al medidor de flujo, el resultado de la medición será adecuado siempre y cuando el flujo se encuentre dentro de un rango de 1 scf/h por arriba o por debajo de su valor de consigna. De no ser así, se deberá ajustar manualmente el flujo de salida mediante la manipulación de la válvula reguladora de flujo, la cual podrá abrirse o cerrarse para aumentar o disminuir el flujo de aire que circula por la tubería.

Una vez que los tres parámetros se encuentren dentro del rango aceptable, se puede afirmar que el regulador se encuentra en el punto de operación. Luego de esto se podrá guardar los valores de los tres parámetros medidos. Ya en este punto la prueba o el ajuste del punto de operación habrá terminado.

#### **Ajuste automático de la presión de entrada.**

Para ajustar la presión de entrada del sistema, se realiza el control del regulador automático instalado en el banco de pruebas, este regulador se diseñó para funcionar como un actuador, por esta razón el control no lo hace directamente la tarjeta secuenciadora del motor de paso sino que se realiza desde el computador.

**Control del regulador automático desde el computador:** el regulador automático se diseñó para que tuviera dos señales de control, una digital que sirve de habilitador y una analógica la cual dará sentido de giro y velocidad. Ambas señales de control se generan desde el computador y se enviarán a la tarjeta secuenciadora por medio de la tarjeta de adquisición de datos. En la Figura 4. 10 se muestra el diagrama de flujo elaborado para el control del regulador automático además de su esquema de control.

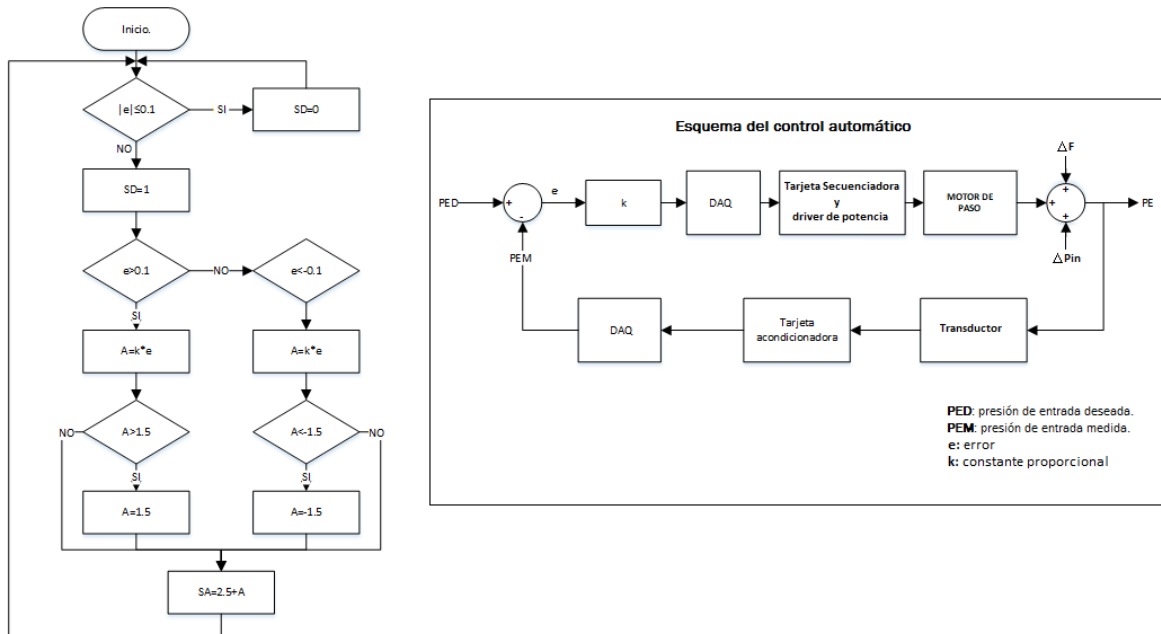


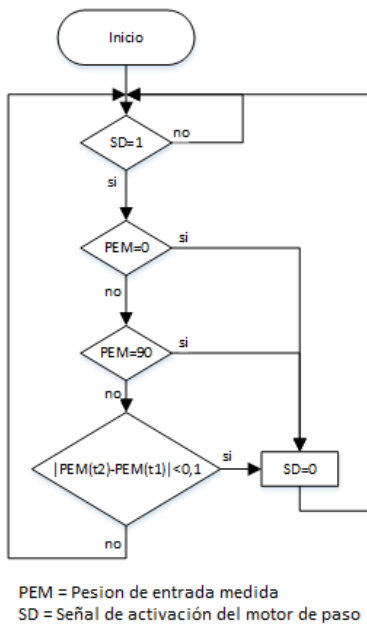
Figura 4. 10. Diagrama de flujo del control para la válvula motorizada.  
Elaboración propia.

Al resultado de la resta de la presión de entrada deseada menos la presión de entrada medida lo denominaremos error. Si el valor absoluto del error es mayor a 0.1 psi, la señal digital de activación será 1 (válvula activada). Si el regulador se activa, y el error es positivo, significa que la presión de entrada medida se encuentra por debajo de la presión deseada, lo que generará una señal analógica que le indique al motor que deberá abrir el regulador, ésta señal generada será mayor a 2,5 voltios, y tendrá como tope 4 voltios. La velocidad de giro la establecerá el nivel de tensión analógico resultante de la suma entre el nivel de referencia (2,5V), y el producto del error por una constante proporcional (k). En caso que la multiplicación del error por la constante proporcional sea mayor a 1,5 voltios, se establecerá la salida analógica en su valor máximo de 4 voltios lo cual implicará que el motor irá a su máxima velocidad de apertura.

Por el contrario, si el error es negativo, significa que la presión medida se encuentra por arriba de la presión deseada. De ser así, se generará una señal analógica que le indique al motor que debe cerrar el regulador, esta señal será menor a 2,5 voltios y tendrá como mínimo valor 1 voltio. La velocidad de giro la establecerá el nivel de tensión analógico resultante entre la suma del nivel de referencia y el producto del error por la constante proporcional (k), en caso que el resultado de la multiplicación entre el constante proporcional y el error de

menor a -1,5 voltios, se establecerá la salida analógica en su valor mínimo de 1 voltio, lo cual implicará que el motor funcionará en su máxima velocidad de cierre.

**Sistemas de seguridad para el regulador automático:** el regulador automático no posee sistemas de seguridad para la protección de sus mecanismos internos por fallos en el suministro de presión de entrada; tampoco posee finales de carrera que indiquen cuando debe apagarse el motor por haber llegado a sus límites operativos. Por esta razón, aparte del funcionamiento normal del regulador, se diseñó también los sistemas de seguridad para la protección del mismo. Éste diseño está pensado para que trabaje en conjunto con la operación normal del regulador automático siempre y cuando se encuentre activo el motor. La Figura 4. 11 muestra el diagrama de flujo de los sistemas de seguridad para el regulador automático.



**Figura 4. 11. Diagrama de flujo para sistemas de seguridad del regulador automático.**

**Elaboración propia.**

Al estar encendido el motor (SD=1), éste estará modificando el valor de la presión de entrada, si la presión de entrada medida llegase a ser 0 psi o llegase a ser mayor o igual a 90 psi, automáticamente inhabilita al motor, esto hace el papel de los finales de carrera para la presión mínima y la presión máxima.

Si el motor se encuentra encendido, se debe comparar constantemente la presión actual con respecto a un valor anterior en un intervalo de tiempo definido. Si después de pasado el tiempo estipulado, se comparan las presiones anterior y actual y resultan ser

iguales, significa que no ha cambiado la presión estando el motor activo. Esto se debe a fallas en la presión que se suministra en la entrada del regulador automático, por esta razón se procederá a apagar el motor del regulador. El propósito de este procedimiento será entonces apagar el motor en caso que no existan cambios de presión a la salida del regulador en momentos que si debe estarlo.

*Es de gran importancia mencionar que el procedimiento de ajuste automático de la presión de entrada se utilizará en varias de las rutinas de pruebas que establece la norma ANSI B109.4, donde se requiera ajustes continuos de la presión de entrada.*

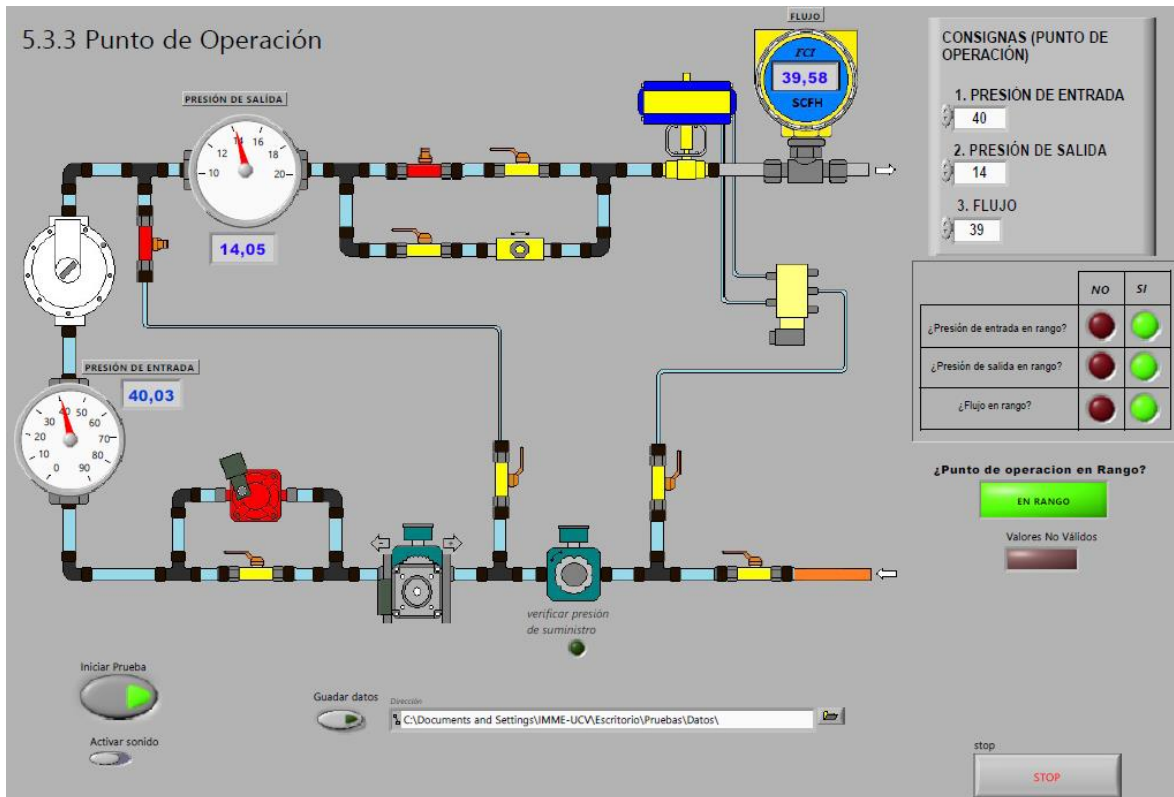
**Implementación:** En el diagrama de bloques se contemplan todos los aspectos mencionados en el diseño de la rutina. La estructura principal se ejecutará siempre, y se encargara únicamente de la medición. La estructura interna se encarga de todos los aspectos de la prueba mencionados en el diseño, incluido el control del regulador automático con sus sistemas de seguridad. En un nivel de anidamiento mayor se encuentran una estructura encargada de guardar los datos de las tres variables que forman parte del punto de operación siempre y cuando se encuentre en rango y el operador indique que desea guardar dicha información.

Como características resaltantes, puede mencionarse que se utilizaron dos bloques funcionales que contienen la configuración de la tarjeta de adquisición de datos para que en sus salidas tanto digital como analógica se refleje fielmente las señales de control que entran en dichos bloques, los nombres asignados a los bloques serán: MotAN que se encargará de la señal analógica de control y MotDIG será el bloque que se encargará de la señal digital de control del motor del regulador automático.

En el panel frontal, se observa la maqueta que contiene todos los elementos del módulo físico. Se colocó un botón de iniciar prueba, desde el cual la rutina comenzará la comparación y ejecutará las acciones de control. Se estructuró un sub-panel donde el usuario podrá modificar los valores de la consigna del punto de operación a conveniencia. También instaló un sub-panel que indicará por elemento de medición si los valores de la medición se encuentran dentro del rango establecido por la norma o fuera de dicho rango. Se instaló un indicador que solo se activará si los tres parámetros medidos se encuentran en rango, dando la información de que el punto de operación se encuentra en rango. Por último se colocó un

botón desde el cual el usuario podrá guardar de manera manual los valores medidos del punto de operación.

Respecto al regulador automático, su representación en la maqueta cambiará de color gris a color verde si llegase a encenderse su motor además tendrá indicadores que darán información si está incrementándose o disminuyendo la presión de entrada al sistema. La Figura 4. 12 muestra el panel frontal elaborado para la rutina punto de operación.



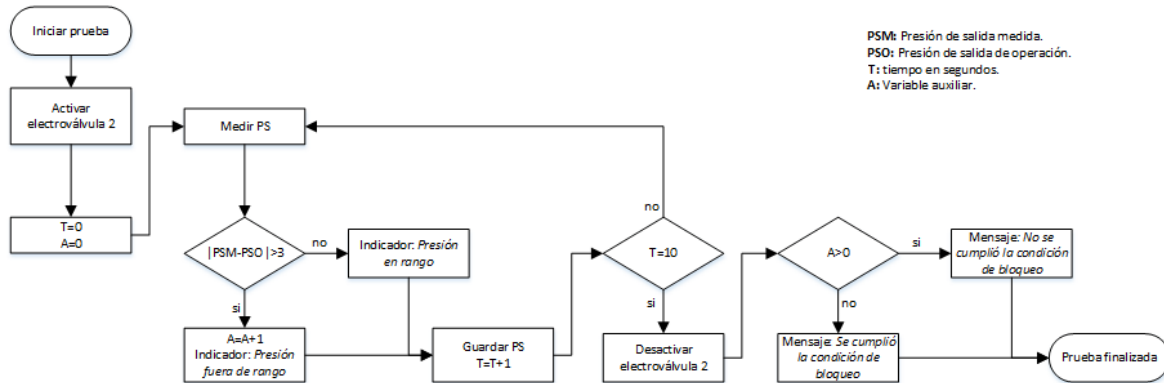
**Figura 4. 12. Panel frontal de la rutina Punto de operación.  
Elaboración propia.**

#### 4.2.7 Prueba de bloqueo (Bloqueo.vi)

El objetivo de esta rutina es realizar un procedimiento de prueba de acuerdo a lo establecido en la sección 5.3.5 de la norma ANSI B109.4, la cual establece que la presión de salida no debe exceder las tres pulgadas de agua por arriba de la presión de salida del punto de operación cuando la condición de flujo es nula. Para lograr esta condición de flujo nulo, se bloqueará el camino del aire al activar la electroválvula 2 del banco. Luego de bloqueado el flujo de aire, se medirá durante un lapso de 10 segundos verificando en todo momento la

presión de salida, culminados los 10 segundos se desactivará la electroválvula 2 permitiendo de nuevo el flujo de aire. La información sobre el comportamiento de la presión de salida durante la ejecución de la prueba se guardará en un archivo de texto de manera automática para su posterior estudio.

**Diseño:** la norma establece que previamente a la realización de la prueba, se deberá ajustar el regulador al punto de operación según el procedimiento establecido en la sección 5.3.3 de la norma. Partiendo de esta premisa, se realizó el diseño de una rutina que realice los procedimientos necesarios para ejecutar la prueba de bloqueo que exige la norma. En el diagrama que se muestra en la Figura 4. 13 se ven reflejado los procedimientos que debe ejecutar la rutina.



**Figura 4. 13. Diagrama de flujo para rutina de bloqueo.**  
Elaboración propia.

En todo momento el sistema medirá la presión de entrada, la presión de salida y el flujo. Una vez iniciada la prueba, se activará la electroválvula 2, lo cual implica que el actuador rotativo obstruirá el flujo de aire por la tubería para generar la condición de flujo nulo. Una vez generada la condición deseada, se medirá la presión de salida y se guardará su valor automáticamente en un archivo de texto direccionado previamente en alguna ubicación del computador. También, paralelamente al guardado de la información se realizará la verificación de si la presión de salida se encuentra dentro del rango que establece la norma, si llegase a excederse del rango establecido la información de presión excedida quedará registrada.



El procedimiento de medición, guardado y verificación del rango operativo, constituye un ciclo de operación de la rutina, y se ejecuta en un lapso de 1 segundo. La rutina ejecutará entonces 10 ciclos para cumplir con los requerimientos mínimos que establece la norma. Una vez cumplidos los 10 segundos en condición de bloqueo, se desactivará la electroválvula 2 y mostrará un mensaje indicando si se cumplió la condición de bloqueo o no se cumplió. Para indicar que no se cumplió la condición de bloqueo, se utilizará la información registrada sobre la presión de bloqueo excedida.

**Implementación:** el diagrama de bloques contendrá la estructura funcional del sistema para cumplir con el procedimiento de prueba que establece la norma. Para cumplir con los procedimientos dispuestos en el diseño, se utilizó una estructura llamada “*flat sequence*”, esta estructura ejecuta una secuencia de pasos en orden lineal, el bloque de secuencias se configuró en tres pasos, el primer paso realizará la activación de la electroválvula 2, el segundo paso ejecutará los 10 ciclos de medición guardando y verificando el rango operativo de la presión de salida, por último, el tercer paso de la secuencia se configuró para desactivar la electroválvula 2 y mostrar el mensaje del resultado de la prueba, la información sobre si la presión estuvo en rango o no durante la prueba provendrá del segundo paso de la secuencia. Una vez realizados los tres pasos concluirá la prueba.

En cuanto al panel frontal del instrumento virtual, se podrá apreciar la maqueta con la configuración del banco donde se podrán observar en todo momento los valores de las variables medidas. Tendrá indicadores que determinan si los parámetros medidos se encuentran dentro del rango deseado. Se utilizó un control tipo botón que servirá para dar la orden de inicio a la prueba. Se colocaron dos indicadores de tipo numérico, uno para indicar cuanto tiempo de la ejecución de la prueba ha transcurrido, y otro que indica la diferencia entre la presión medida y la presión de operación, dando como resultado la sobrepresión que se genera por estar en condición de bloqueo. Por último se colocó un indicador tipo booleano que durante la ejecución de la prueba indicará si la sobrepresión debida al bloqueo se encuentra en el rango que establece la norma o si en su defecto se salió de dicho rango. La Figura 4. 14 muestra el panel frontal elaborado para la rutina de bloqueo.

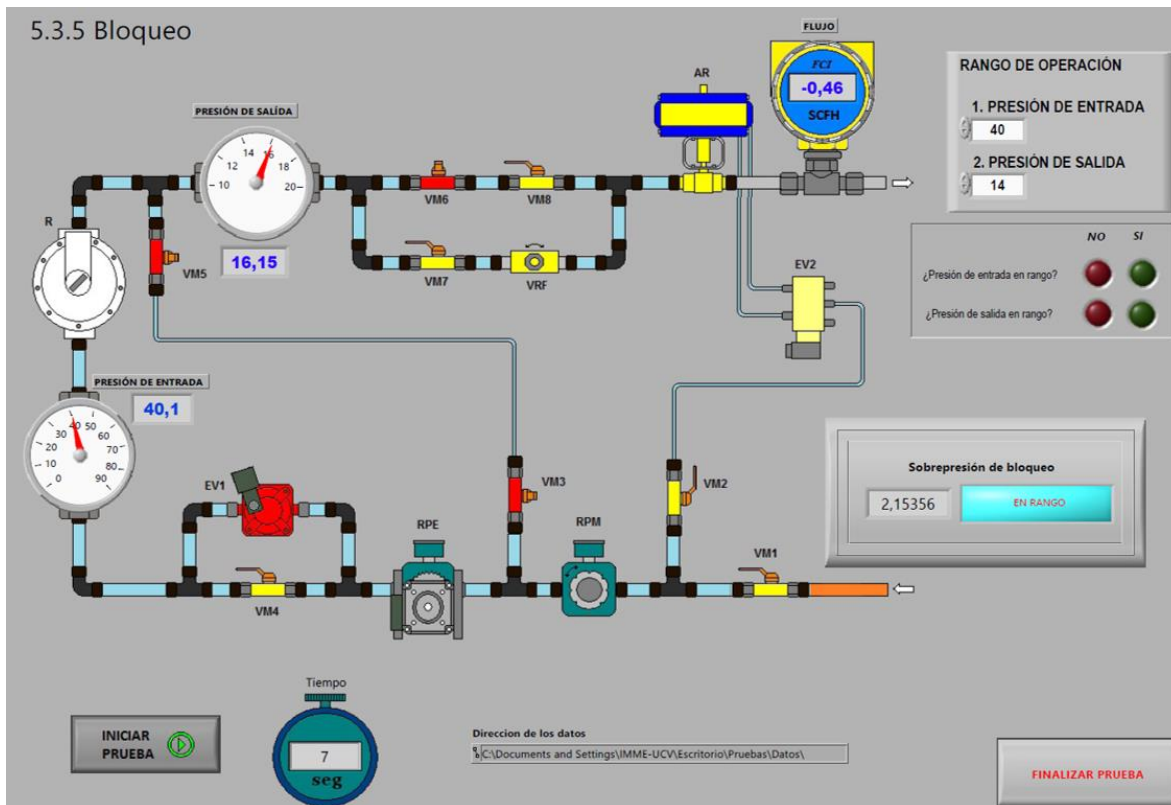


Figura 4. 14. Panel frontal de la rutina de bloqueo.

Elaboración propia

#### 4.2.8 Prueba de histéresis (Histeresis.vi).

La rutina de histéresis busca realizar un procedimiento de prueba enmarcado en lo establecido en la sección 5.3.4 de la norma ANSI B109.4. El procedimiento de prueba exige como paso previo ajustar el regulador al punto de operación según el procedimiento establecido por la norma. Al iniciar la prueba, se realizarán una serie de acciones de control sobre la válvula de descarga del banco bajo los procedimientos mencionados en la sección 2.3.1.4 del capítulo 2.

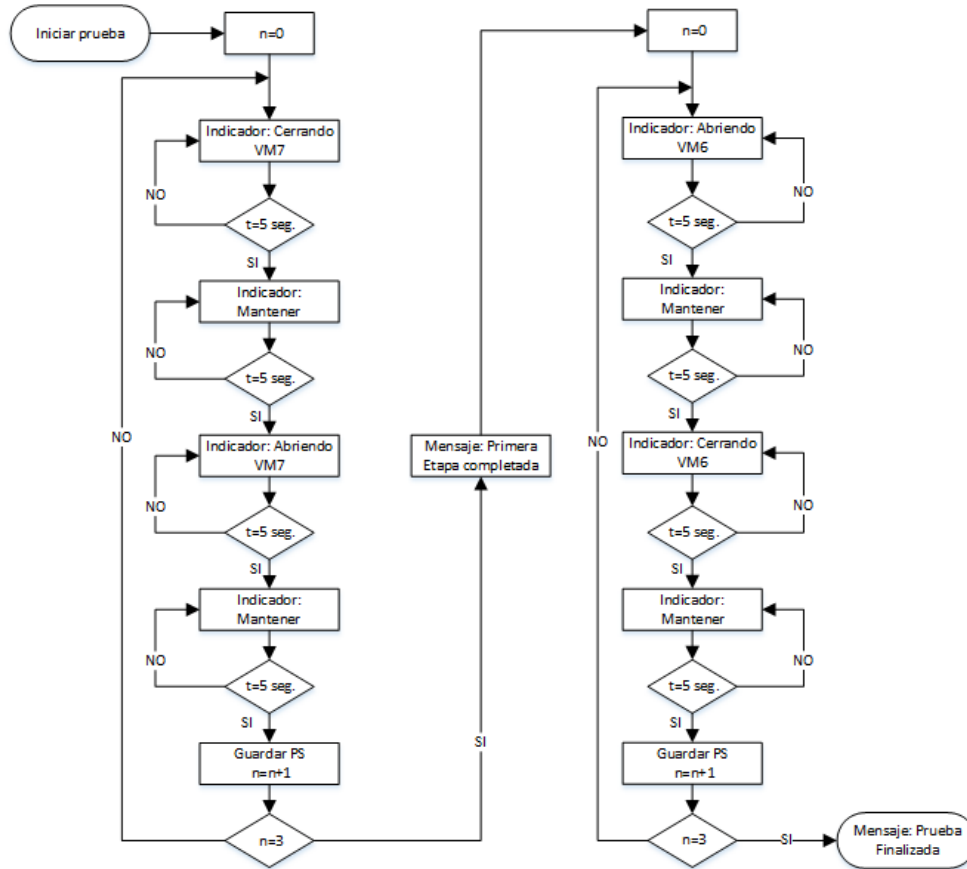
La válvula de descarga no es automática, por esta razón las acciones de control sobre el banco de pruebas las llevará a cabo un operador. Lo que en principio la norma denomina válvula de descarga, en el banco de pruebas será un conjunto de cuatro válvulas, tres válvulas de bola y una reguladora de flujo (Figura 3. 1). Dos válvulas de bola (VM6 y VM7) serán de paso total y obstrucción total. La válvula reguladora de flujo estará graduada a un flujo de 50

scf/h de gas (39 scf/h de aire) y la válvula de bola faltante (VM8) estará graduada para regular el flujo a una tasa de 200 scf/h de aire (256 scf/h de gas). De manera que:

- Si VM6 y VM7 están cerradas habrá un flujo de 0 scf/h.
- Si VM6 está cerrada y VM7 abierta habrá un flujo de salida de 50 scf/h de gas (39 scf/h de aire).
- Si VM6 y VM7 están abiertas generaran un flujo de 200 scf/h de aire (256 scf/h de gas).
- Entonces al manipular las válvulas manuales VM6 y VM7 se podrán generar las condiciones que establece la norma para los ciclos de histéresis.

La rutina de programación entonces, tendrá la tarea de indicar al operador cuál de las válvulas manuales tendrá que manipular, indicando también los tiempos de ejecución, deberá también guardar la presión de salida, según lo establecido en el procedimiento de prueba.

**Diseño:** para poder cumplir con las operaciones establecidas por la norma para la ejecución de la prueba, se elaboró un diagrama de flujo que se adapte a los procedimientos requeridos. El diseño de la rutina se basa en el diagrama de flujo que se muestra en la Figura 4. 15.



**Figura 4. 15. Diagrama de flujo de la rutina de histéresis.**  
**Elaboración propia.**

El diseño de la rutina se centra en que las acciones que llevara a cabo el operador, las mismas serán regidas por indicadores, que de manera clara y precisa ejecutarán las señalizaciones de apertura y cierre de las válvulas manuales cumpliendo con los tiempos que establece el procedimiento de prueba que dicta la norma.

**Implementación:** se elaboró un diagrama de bloques que utilizó una combinación de estructuras de secuencias que establecerán el estado de los indicadores. En cada uno de los pasos estará un conjunto de bloques funcionales que se encargarán de aplicar con precisión los tiempos de ejecución de cada paso en los ciclos de histéresis de la prueba, así como el guardado automático de la presión de salida finalizado cada ciclo.

El panel frontal del instrumento virtual para esta rutina, refleja de manera más clara las acciones que realiza el diagrama de bloques. En dicho panel se utilizó la maqueta que muestra la estructura del banco, con los indicadores de medición asociados a cada sensor.

Respecto a los indicadores que se utilizaron, se resaltó intencionalmente las válvulas VM6 y VM7, que permitirán el control del flujo previamente calibrado para válvulas VM8 y VRF. Las representaciones de las válvulas VM6 y VM7 mostrarán de manera dinámica el estado en que el operador deberá colocarlas con cambios de colores y posición. Dichos indicadores son una representación gráfica aproximada de las válvulas manuales. Sus cambios de estados serán determinados según la siguiente descripción:

- Válvula en posición abierta y color amarillo, permitirá el flujo de aire a través de la tubería que la contiene instalada.
- Válvula en posición cerrada y color rojo, bloqueará el flujo de aire a través de la tubería que la tiene instalada.

Además de los indicadores que representan gráficamente las válvulas, también se colocaron indicadores de tipo booleano asociados a cada válvula, que informaran al operador la acción que deberá estar ejecutando (abriendo o cerrando) en los lapsos de tiempo establecidos. Se agregaron dos indicadores comunes a las dos etapas de pruebas, uno de tipo booleana, asociado a la acción de mantener cualquiera de las dos válvulas y uno numérico asociado al tiempo transcurrido en cada paso del ciclo de histéresis. Respecto a los controles, se instaló un control tipo botón el cual una vez presionado por el usuario, dará inicio al procedimiento de prueba y un campo donde el usuario podrá establecer el nombre y la ubicación del archivo de texto donde se guardaran los resultados de la prueba. La Figura 4.16 muestra el panel frontal elaborado para la rutina de histéresis.

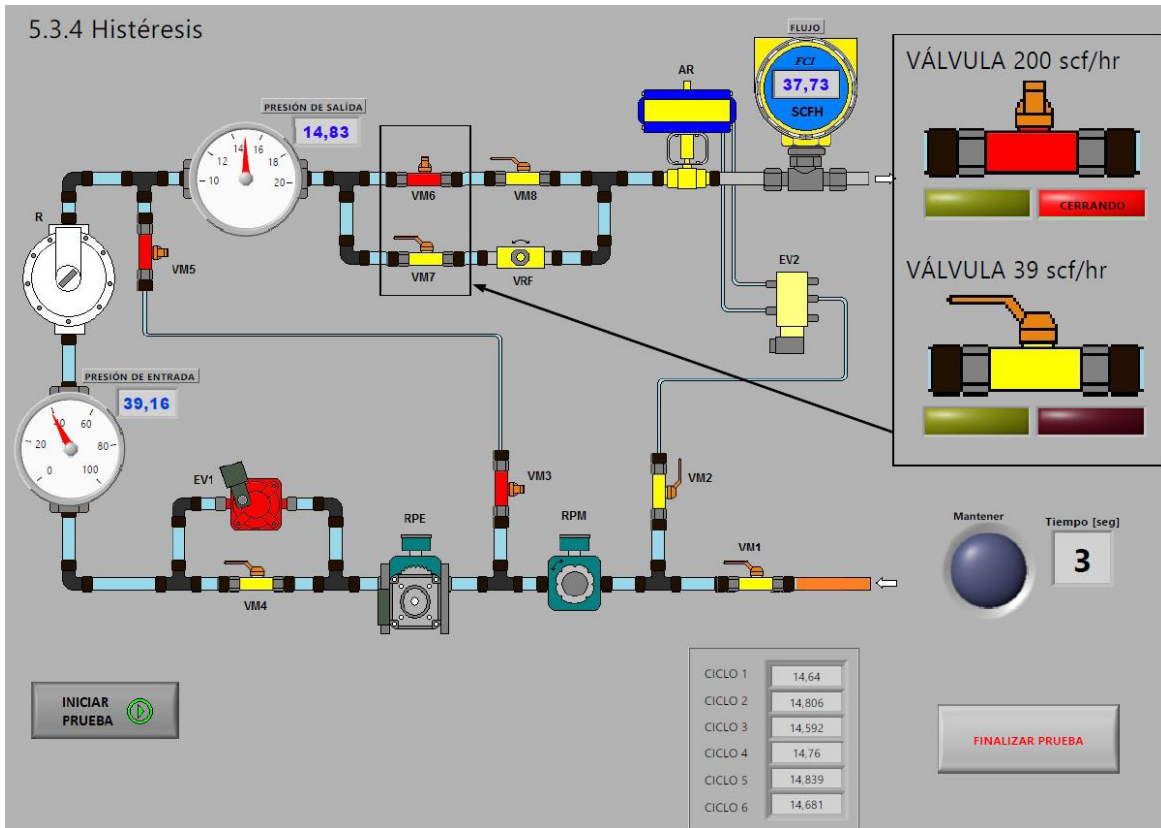


Figura 4. 16. Panel frontal de la rutina de histéresis.

Elaboración propia.

#### 4.2.9 Prueba de sensibilidad ante la presión de entrada (Sens\_PEnt.vi).

El objetivo de esta rutina es realizar un procedimiento de prueba que cumpla con lo establecido en la sección 5.3.6 de la norma ANSI B109.4. En principio se debe tener ajustado el regulador en el punto de operación según el procedimiento establecido en la sección 5.3.3 de la norma. Al iniciar la prueba, se debe ajustar la presión de entrada a 5 psi para luego incrementarla en pasos de 10 psi hasta llegar a 125 psi o hasta la máxima presión de entrada permitida por el fabricante. Luego se deberá disminuir la presión de entrada en pasos de 10 psi hasta llegar nuevamente a 5psi. En cada paso de la prueba, luego de ajustar un valor de presión de entrada, se debe esperar como mínimo 10 segundos para registrar los valores de presión de entrada y presión de salida.

Para realizar los procedimientos anteriormente descritos, se realizó una rutina la cual se encargue de controlar de manera automática la presión de entrada para que sea igual a la presión de consigna deseada en cada paso del procedimiento de prueba. Luego del ajuste

automático realizado se podrán guardar los valores de la presión de entrada y la presión de salida medidos en un archivo de texto direccionado en una ubicación del computador.

**Diseño:** Para realizar el procedimiento de prueba que exige la norma, se realizó un diagrama de flujo (Figura 4. 17) el cual contendrá de manera metódica los pasos que deberá cumplir la rutina a implementar. El diagrama de flujo se estructuró de manera tal que el usuario seleccione la presión de entrada a voluntad. Una vez seleccionada, la presión de entrada deseada, se ejecutará el ajuste automático de la presión de entrada con la apertura o cierre controlado del regulador automático, hasta llegar a la consigna de presión establecida. Una vez ajustada la presión de entrada, transcurrirán 10 segundos y se guardaran los valores de la medición de la presión de entrada y salida en un archivo de texto.

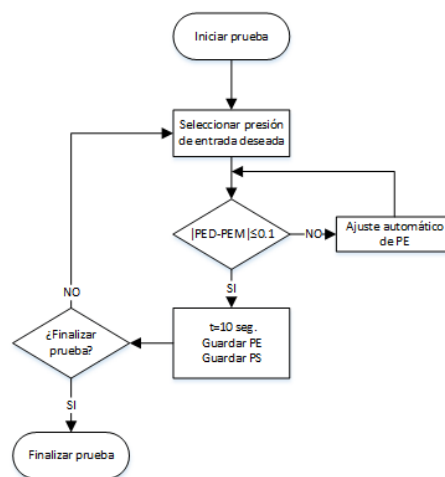


Figura 4. 17. Diagrama de flujo de la rutina de sensibilidad ante la presión de entrada.

Elaboración propia.

**Implementación:** en el diagrama de bloques, se utilizaron varias estructuras de casos, en caso que el usuario decida iniciar la prueba, se comparará la presión de entrada establecida por el usuario (selector) con la presión medida. De no estar la presión medida muy cercana a la presión deseada, la rutina realizará el ajuste automático de la presión de entrada utilizando el mismo código implementado en la rutina punto de operación. Una vez ajustada la presión, existirá una estructura de caso que tiene anidada una estructura de secuencia para realizar el guardado de los datos, la secuencia consta de tres pasos, el primer paso será esperar 10 segundos, el segundo será guardar la información de la presión de entrada y presión de salida en el archivo de texto y el último paso será dibujar el punto guardado en un gráfico ‘xy’,

donde la presión de entrada corresponderá a la coordenada “x” y la presión de salida corresponde a la coordenada “y”. El gráfico se irá construyendo a partir de cada punto generado en la gráfica para cada variación en la presión de entrada.

En el panel frontal, se utilizó una maqueta que muestra la configuración del banco con sus indicadores de medición de las variables. Se utilizó un control tipo botón para poder iniciar la prueba, un selector para establecer cuál será la presión que deberá tener en la entrada el regulador y un gráfico de presión de entrada vs presión de salida, que irá mostrando el comportamiento del sistema durante la ejecución de la prueba. También se utilizó un indicador dinámico asociado al motor del regulador automático, que cambiara de color si el motor se encuentra encendido o apagado. La Figura 4. 18 muestra el panel frontal elaborado en LabVIEW para la rutina sensibilidad ante la presión de entrada.

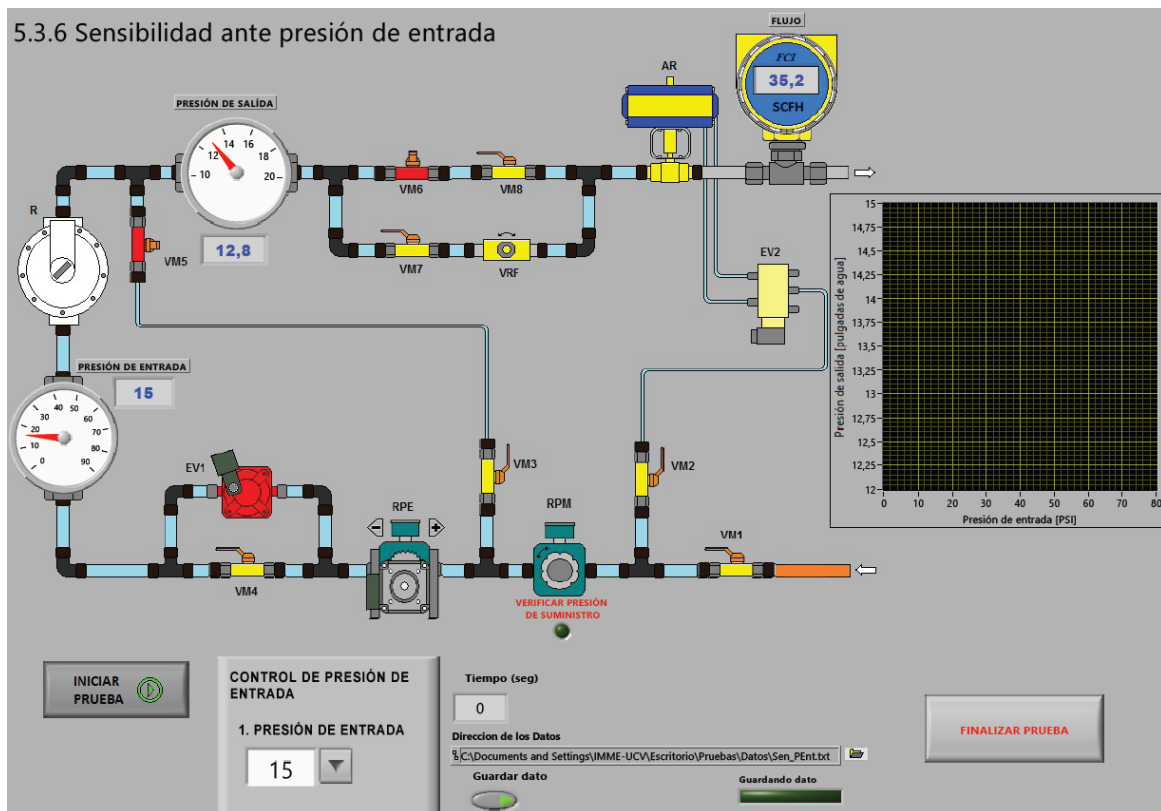


Figura 4. 18. Panel frontal de la rutina de sensibilidad ante la presión de entrada.

Elaboración propia.



#### **4.2.10 Prueba de capacidad de flujo (Capacidad de Flujo.vi).**

Esta rutina de programación, está enmarcada dentro de los procedimientos establecidos en la sección 5.3.7 de la norma ANSI B109.4. La cual establece que una vez ajustado el punto de operación del regulador, se deberá abrir lentamente la válvula de descarga hasta que la presión de salida del regulador incremente dos pulgadas de agua por arriba del punto de operación o disminuya 1 pulgada de agua por debajo de la presión de salida del punto de operación. El flujo medido cuando se alcance alguna de las dos posibilidades para la presión de salida será la capacidad de flujo del regulador. Cabe destacar, que en todo momento de la ejecución de la prueba, se deberá mantener la presión de entrada constante, ya que este valor de presión servirá de referencia para la ejecución del procedimiento de prueba.

**Diseño:** La rutina estará diseñada para medir los cambios de la presión de salida con respecto a cambios de flujo manteniendo la presión de entrada constante. Una vez iniciada la prueba, el operador comienza a abrir la válvula de descarga, como el sensor de flujo posee una respuesta lenta debido a la electrónica de acondicionamiento de señales, se tiene que esperar que el sensor de flujo se estabilice y muestre la medición correcta. Por ello, el procedimiento de prueba se hace por pasos, bajo la siguiente metodología:

- Se realizará una apertura leve en la válvula de descarga, lo cual implica una variación en la condición de flujo.
- Se espera que el sensor de flujo se estabilice y una vez se logre, se medirá la presión de salida y el flujo.
- Se verifica si la presión de salida está 2 plg agua por arriba o 1 pulgada de agua por debajo de la presión de salida del punto de operación. Si alguna de las condiciones se logró, se dará por terminado el procedimiento de prueba. De no ser así se repetirán los pasos anteriores hasta lograrlo.

El procedimiento de pruebas descrito, debe llevarse a cabo con la presión de entrada constante, por ello se debe ejecutar en todo momento el ajuste automático de la presión de entrada con la ayuda del regulador automático. El diagrama de flujo mostrado en la Figura

4. 19, contempla los aspectos mencionados del diseño que se realizó para la rutina de capacidad de flujo.

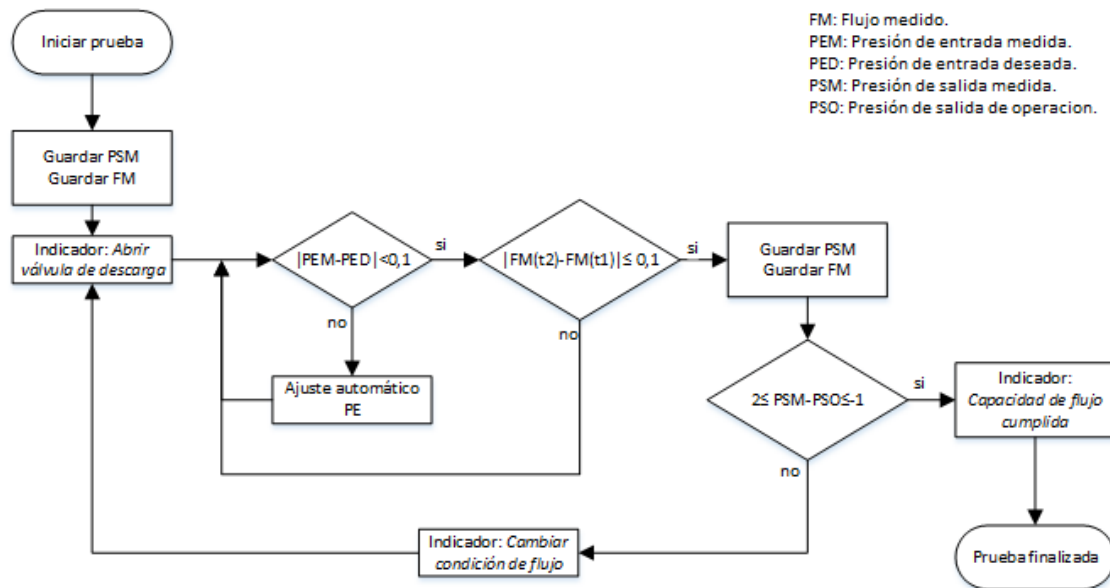


Figura 4. 19. Diagrama de flujo para rutina de capacidad de flujo.

Elaboración propia.

Respecto al flujo medido, se realizara un proceso constante de medición y comparación, la rutina medirá el flujo en un instante de tiempo t1 que guardara en un registro de memoria. Al realizar la siguiente medición del flujo lo comparará con el registro guardado previamente, si el resultado de la comparación se encuentra dentro de un rango aceptable, significará que la medición del flujo se estabilizó. De no ser así, seguirá realizando el proceso de comparación hasta lograrlo.

Luego de estabilizada la medición del flujo, se procede a guardar los datos de las mediciones del flujo y la presión de salida. El siguiente procedimiento, es determinar si se cumplió la capacidad de flujo, al verificar si la presión de salida del regulador se excede por arriba o por debajo los límites que establece la norma, si se llegase a cumplir la capacidad de flujo, finalizará el procedimiento de prueba. De no cumplirse, el operador abrirá la válvula de descarga para cambiar la condición de flujo, comenzando así de nuevo el procedimiento de verificación de la capacidad de flujo.

**Implementación:** Para implementar los procedimientos descritos en el diseño de la rutina, se utilizaron varias estructuras en el diagrama de bloques. La estructura principal, se encarga únicamente la medición de los parámetros físicos presentes en el banco. La información de las mediciones, será enviada a otro bloque, el cual, en caso de estarse ejecutando la prueba, verifica si la condición de capacidad de flujo se cumplió, monitoreando el valor de la medición de la presión de salida del sistema. Además realizará la constante comparación entre registros que contienen mediciones de flujo tomadas en instantes de tiempo diferentes, para determinar si la medición del flujo se estabilizó. En caso de estabilizarse el flujo, habrá otra estructura que se encargará de guardar la información de la presión de salida y el flujo en un archivo de texto y arreglar dichos datos para que se aprecien en un gráfico xy.

Paralelamente a el procedimiento descrito, en todo momento que se ejecute la prueba, se estará realizando el constante monitoreo de la presión de entrada, si la presión de entrada varía por haber cambiado la condición de flujo del sistema, el programa implementado en el diagrama de bloques llevará a cabo el ajuste automático de la presión de entrada con la misma estructura utilizada en la rutina del punto de operación.

En el panel frontal, aparte de la maqueta que muestra la configuración del banco de pruebas y los indicadores asociados a cada sensor, se instalaron una serie de controles e indicadores necesarios para realizar el procedimiento de prueba. Entre ellos tres controles tipo botón, uno para iniciar el procedimiento de prueba, el segundo para guardar la presión de salida inicial en caso de no ser la se operación y un pulsador que permitirá guardar los datos una vez se haya estabilizado el sensor de flujo. Habrá un control de tipo numérico, donde se podrá establecer presiones de entrada diferentes a la de operación para determinar diferentes capacidades de flujo. En cuanto a los indicadores, se utilizó uno que informa al operador cuando debe cambiar la condición de flujo, se instaló otro indicador que dará información de cuando se cumplió la capacidad de flujo y un gráfico presión de salida vs flujo que generara las curvas a partir de la información que se guarda en los archivos de texto. La Figura 4. 20 muestra el panel frontal elaborado para la rutina de capacidad de flujo.

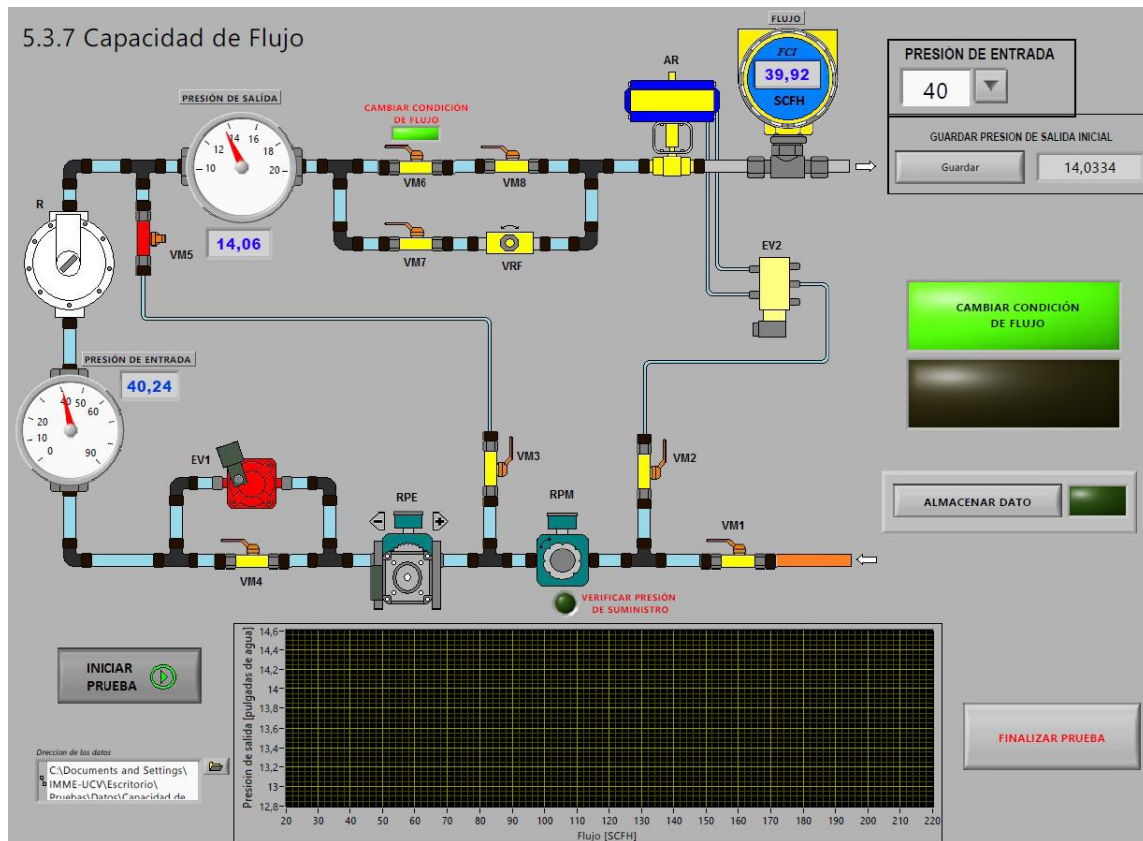


Figura 4. 20. Panel frontal para rutina de capacidad de flujo.

Elaboración propia.

#### 4.2.11 Punto de operación de la válvula de alivio (P.O.V.A..vi).

El objetivo de esta rutina, es realizar un procedimiento de prueba que cumpla con la sección 5.3.8 de la norma ANSI B109.4. La prueba persigue ajustar el punto de operación de la válvula de alivio para que se encuentre dentro del rango que establece la norma. Para ello se aplicara una presión de 40 psi a través de una boquilla de restricción de 0.013 pulgadas, esto garantiza que un flujo de 1 pie cubico por hora entrará por el lado de baja presión del regulador, con ello se generará una sobrepresión en el lado de baja presión, que hará que la válvula de alivio entre en acción. La norma establece que bajo las condiciones anteriormente mencionadas la válvula de alivio deberá garantizar que mantendrá una presión de salida en un rango de  $9 \pm 3$  plg agua por arriba de la presión de salida del punto de operación. De no ser así el operador deberá ajustar manualmente el mecanismo de la válvula de alivio existente dentro del regulador hasta que se encuentre en el rango adecuado. Para determinar la presión de resellado, se deberá cerrar el flujo de aire que entra en la zona de baja presión y observar

a cuál presión la válvula deja de aliviar presión. La presión de resellado deberá estar en un mínimo de 2 plg agua por encima de la presión de bloqueo.

La rutina entonces deberá, una vez se inicie el procedimiento de prueba medir en todo momento el valor de la presión de salida del regulador y verificar si se encuentra dentro del rango que establece la norma o fuera de él. De no estar en el rango adecuado, deberá indicar al operador que debe ajustar el mecanismo de la válvula de alivio.

**Diseño:** el diseño de la rutina se enfocó en la medición de la presión de salida. La norma no establece valores para la presión de entrada, por ello se decidió restringir la presión a la entrada del regulador para esta prueba, y el regulador al encontrarse en condición de bloqueo su flujo será nulo. En principio se garantiza que en la tubería que contiene la restricción hayan 40 psi, como la tubería que contiene la restricción se encuentra ubicada antes de la válvula motorizada, el ajuste de esta presión, se hará mediante el manejo del regulador de presión manual (RPM). Al iniciar la prueba, el operador abrirá las válvulas VM3 y VM5, permitiendo que el flujo de aire acceda a la sección de baja presión del banco. A partir de ese momento, la rutina medirá la presión de salida y determinará si se encuentra en rango o fuera de él. De encontrarse fuera de rango, indicara al operador que debe hacer un ajuste a la válvula de alivio. Estos procedimientos se verán reflejados en el diagrama de flujo que se muestra en la Figura 4. 21.

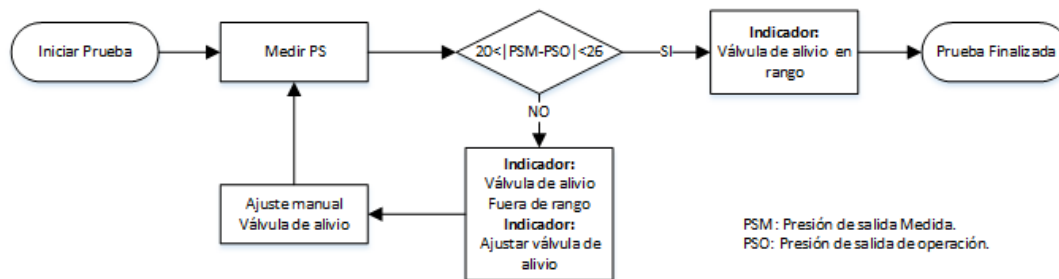


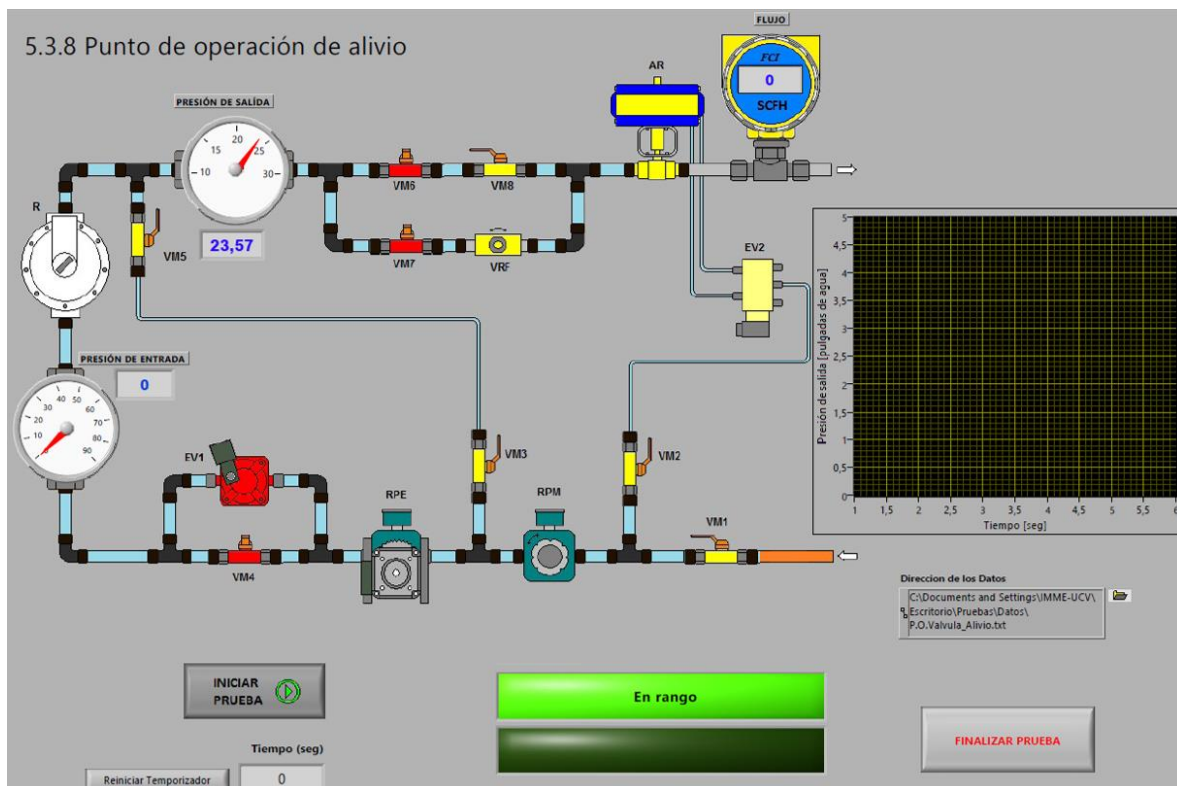
Figura 4. 21. Diagrama de flujo para rutina de punto de operación de la válvula de alivio.

Elaboración propia.

**Implementación:** En el diagrama de bloques, se utilizó una estructura de secuencias que contiene dos pasos, el primero dejará transcurrir un tiempo de 1 segundo, y el segundo paso de la secuencia medirá la presión a la salida del regulador, la guardará en un archivo de texto, determinará si la presión se encuentra dentro o fuera del rango y establecerá a partir

de estos valores el estado de los indicadores; dentro del segundo paso de la secuencia también realizará el arreglo de los datos para generar una gráfica de presión respecto al tiempo transcurrido. Luego de realizado ambos pasos de la secuencia saldrá de la estructura. La estructura de secuencia está dispuesta dentro del diagrama de bloques para que se ejecute continuamente, hasta que el usuario lo considere pertinente, de manera que obtendrá una gráfica actualizada cada segundo con la presión de salida respecto al tiempo. Los valores de la presión de resellado se determinarán a partir de los datos guardados de las mediciones de la presión a la salida del regulador luego de haber cerrado las válvulas VM3 y VM5.

En el panel frontal, se colocó un control tipo botón para iniciar la prueba, un indicador dinámico que muestra si la presión medida se encuentra en rango o fuera de él, un gráfico presión vs tiempo y un indicador dinámico que informa al operador que deberá ajustar la válvula de alivio en caso de encontrarse fuera de rango. La Figura 4. 22 muestra el panel frontal elaborado para la rutina del punto de operación de la válvula de alivio.



**Figura 4. 22. Panel frontal para rutina de punto de operación de la válvula de alivio.**

Elaboración propia.

#### **4.2.12 Prueba de rendimiento (Prueba\_Rendimiento.vi).**

Esta rutina tiene el objetivo de realizar un procedimiento de prueba de acuerdo a lo establecido en la sección 5.3.10 de la norma ANSI B109.4. La prueba consiste en generar ciclos en los cuales se presuriza y despresuriza el regulador bajo prueba, para abrir y cerrar su mecanismo de válvula. Para lograr el cumplimiento de un ciclo, partiendo de que ambas electroválvulas se encuentren desactivadas, se deberán ejecutar las siguientes operaciones de control:

- Activar la electroválvula 2, esto bloquea el paso de aire hacia la atmósfera.
- Activar la electroválvula 1, esta acción presuriza el regulador (cierra el mecanismo de válvula del regulador).
- Desactivar la electroválvula 1, esto mantendrá el sistema presurizado.
- Desactivar la electroválvula 2, esto permite despresurizar el sistema (abre el mecanismo de válvula del regulador).

Los pasos anteriormente mencionados constituyen 1 ciclo de la prueba, en la prueba se deberán ejecutar 100000 ciclos en cuatro etapas de 25000 ciclos cada una, los ciclos deberán cumplirse a una tasa de 20 a 30 ciclos por minuto. Después de cada etapa de 25000 ciclos, se deberán realizar los procedimientos de punto de operación (sección 5.3.3 de la norma) y bloqueo (sección 5.3.5 de la norma).

La rutina entonces deberá contener los procedimientos de control para la ejecución y conteo exacto de cada ciclo que se realice. También, después de cumplida cada etapa de 25000 ciclos, deberá ser capaz de realizar las verificaciones del punto de operación y bloqueo sin salir de la rutina.

**Diseño:** para poder cumplir con los procedimientos que establece la norma, se implementará una rutina que ejecute con precisión los ciclos de apertura y cierre del mecanismo de válvula del regulador. En la Figura 4. 23 se muestra un diagrama de flujo que se elaboró, el cual contiene la estructura del diseño de la rutina de prueba de rendimiento.

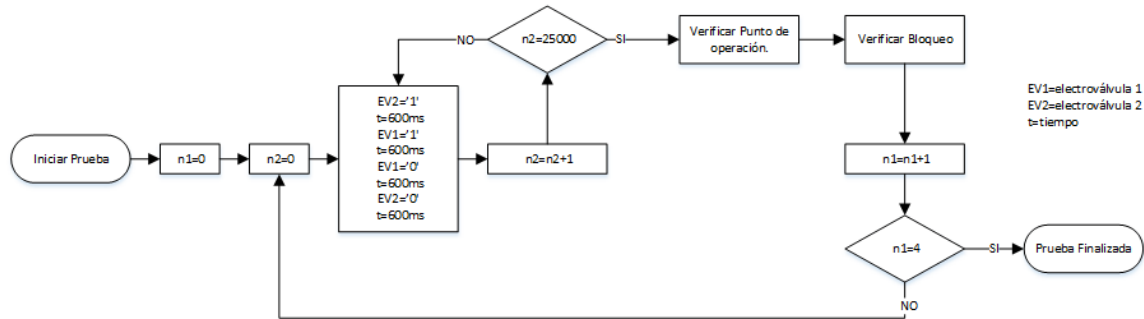


Figura 4. 23. Diagrama de flujo para rutina de prueba de rendimiento.

Elaboración propia.

Para este diseño se establecieron tiempos de espera entre apertura y cierre de cada electroválvula de 600 ms, con ello se garantiza que la acción mecánica pueda ejecutarse satisfactoriamente, después de terminado un ciclo, se incrementa en 1 un contador que tendrá como límite 25000 ciclos. Una vez cumplidos, automáticamente esperará a que el usuario realice las verificaciones del punto de operación y bloqueo. En esta se incluye la rutina de punto de operación y bloqueo.

**Implementación:** Como la rutina de prueba de rendimiento contempla tres procedimientos de prueba, se implementó una configuración que los hagan mutuamente excluyentes entre ellos, es decir, que cuando se esté ejecutando el conteo de ciclos, no podrá ejecutarse la verificación del punto de operación ni la verificación del bloqueo. De la misma manera ocurre con los otros dos procedimientos de prueba. Para ejecutarlo de esta forma se utilizaron estructuras de casos, entonces, en caso de que se ejecute una prueba no podrán ejecutarse las otras.

En el diagrama de bloques, en el caso que se encarga de las acciones de control sobre las electroválvulas, el conteo de los ciclos y los tiempos de espera entre acciones de control, se implementaron dentro de una estructura de secuencia dividida en 4 pasos que contemplan todas las acciones de control sobre el banco. Ésta estructura de secuencia se encontrará anidada dentro de dicho caso y se ejecutará continuamente hasta que termine la cantidad de ciclos estipulada o el usuario detenga la prueba. Respecto a los otros dos procedimientos de prueba que pueden ejecutarse, la estructura es una réplica de los diagramas originales, y se encontraran anidadas en su caso correspondiente.



El panel frontal reflejará de manera más clara el comportamiento del banco durante la ejecución de los ciclos, ya que posee una serie de controles e indicadores que permitirán ver los procedimientos de pruebas y saber en tiempo real que proceso de la prueba se está ejecutando. Aparte de la maqueta con la configuración del banco de pruebas, se colocó un indicador asociado a cada válvula, estos indicadores informaran si la válvula se encuentra abierta o cerrada, con un mensaje del estado y el color de dicho estado. Entonces, si una válvula se encuentra abierta, la representación gráfica de la válvula en la maqueta estará en amarillo al igual que su indicador asociado con su mensaje del estado. Los cambios en los estados podrán apreciarse de manera dinámica durante la ejecución de la prueba. Se colocó un indicador de tipo numérico que informara sobre el conteo de los ciclos que se han ejecutado en la prueba. Se colocaron tres controles tipo botón, uno para iniciar la prueba, y los otros dos para las pruebas de verificación. Se instaló un control tipo selector para establecer cuál de las cuatro etapas de la prueba se ejecutara. La Figura 4. 24 muestra el panel frontal elaborado en el software LabVIEW para la rutina de prueba de rendimiento.

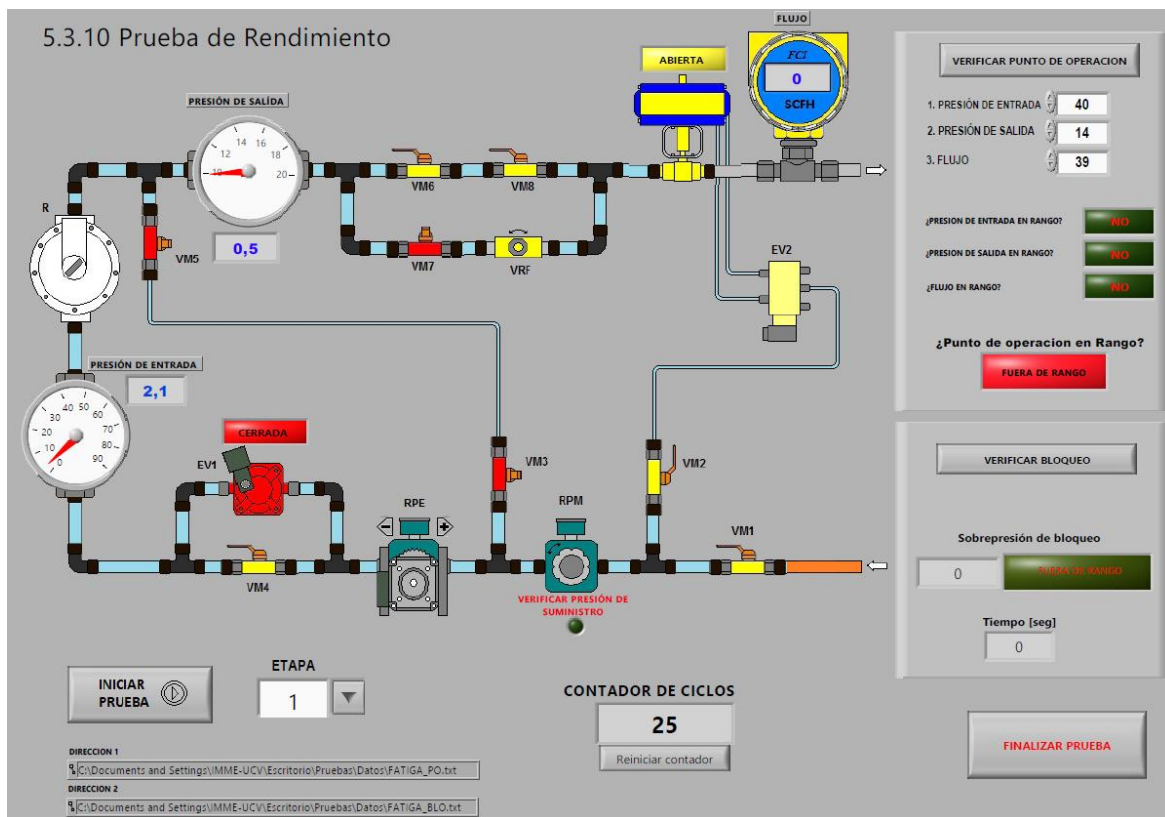


Figura 4. 24. Panel frontal para rutina de prueba de rendimiento.

Elaboración propia.

#### **4.2.13 Prueba de desempeño de la válvula de alivio (D\_Val\_Alivio.vi).**

Esta rutina de programación, busca realizar un procedimiento de prueba de acuerdo a lo establecido en la sección 5.3.9 de la norma ANSI B109.4. La prueba consiste en medir la presión a la salida del regulador, para presiones de entrada desde 0 psi hasta la máxima presión de entrada permitida por el fabricante cuando el mecanismo de regulación de la válvula falla. Para que el mecanismo del regulador falle, se deberá romper el enlace mecánico existente entre el sistema de control de presión (Membrana y resorte) y la válvula de restricción del regulador, generalmente este enlace es una palanca. La norma establece que la presión de salida no deberá exceder de los 2 psi (55 plg agua) cuando la presión de entrada del regulador sea la máxima permitida por el fabricante.

En resumen, la rutina deberá verificar el buen funcionamiento de la válvula de alivio cuando se genera intencionalmente una falla mecánica en el regulador bajo prueba. Indicando en todo momento si la presión de salida se encuentra dentro del rango establecido por la norma y permitiendo guardarla cuando la presión de entrada sea máxima.

**Diseño:** La rutina de programación para la prueba de desempeño de la válvula de alivio, estará centrada en dos aspectos principales. El primero será el ajuste de la presión de entrada, el cual se hace de forma automática una vez el usuario seleccione la presión que desee, este ajuste es posible gracias al control del regulador automático. El segundo es la medición de la presión de salida, determinando también si se encuentra dentro del rango que establece la norma, además, permitirá guardar los datos de la presión de entrada y la presión de salida para su posterior estudio. El esquema de diseño que se utilizó para esta rutina se muestra en el diagrama de flujo de la Figura 4. 25.

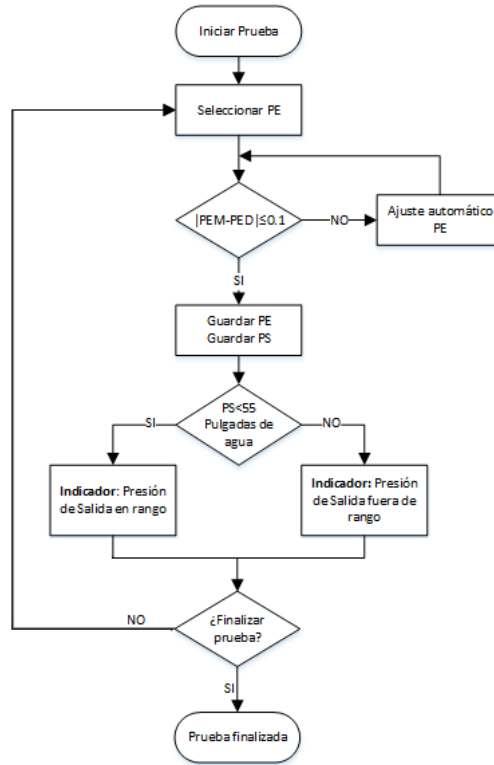


Figura 4. 25. Diagrama de flujo para rutina de prueba de desempeño de la válvula de alivio.

Elaboración propia.

**Implementación:** En el diagrama de bloques del instrumento virtual elaborado, se utilizó una estructura que en caso que se inicie el procedimiento de prueba, realizará la medición de la presión de salida del regulador y verificará si se encuentra dentro del rango establecido por la norma. Tendrá un bloque funcional asociado a un selector para dar información al programa de la presión de entrada que establece el usuario, para el control automático de la presión de entrada, se utilizó la misma configuración de bloques funcionales empleada en la rutina de punto de operación.

En el panel frontal, se utilizó un control tipo botón para que el usuario inicie la prueba. Un selector de 0 a 85 psi en pasos de 5 psi, para variar las presiones de entrada. Un botón que permitirá guardar los datos de las mediciones de la presión de entrada y la presión de salida. Un indicador de tipo booleano que informará si la presión de salida se encuentra en rango o fuera de rango según lo establecido por la norma. Un par de indicadores numéricos que en todo momento en que se esté realizando la prueba dará información acerca de la presión de salida tanto en pulgadas de agua como en psi. Por último, se incluyó un gráfico de presión de entrada vs presión de salida el cual mostrará el comportamiento del sistema a

partir de los datos guardados. La Figura 4. 26 muestra el panel frontal de la prueba de desempeño de la válvula de alivio.

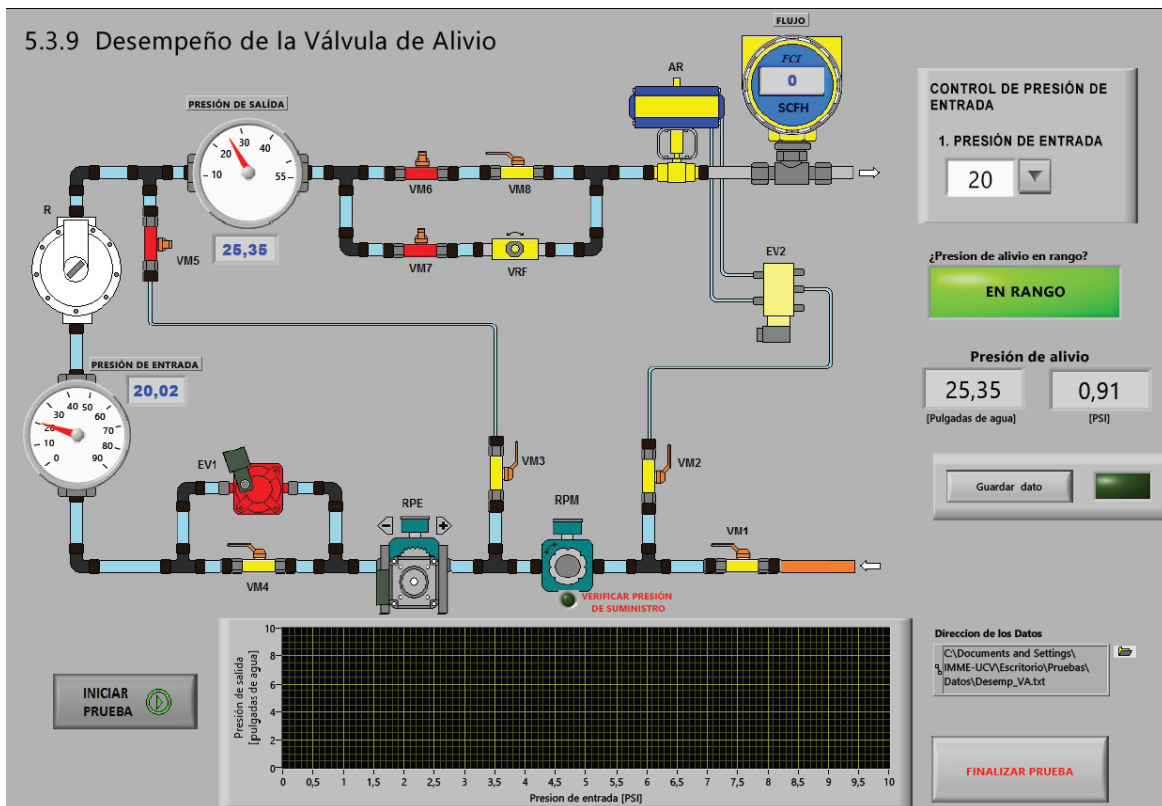


Figura 4. 26. Panel frontal para rutina de prueba de desempeño de la válvula de alivio.

Elaboración propia.

#### 4.2.14 Prueba de carga de cantiléver (Cantilever.vi).

Esta rutina tiene el objetivo de realizar un procedimiento de prueba de acuerdo a lo establecido en la sección 5.3.1 de la norma ANSI B109.4. La prueba consiste en aplicar una carga previamente calibrada al regulador de 113.4 kg durante un lapso de 10 minutos, con la intención de verificar si dicho regulador no muestra evidencia de fractura, deformación permanente o desempeño desmejorado. Para poder realizar la prueba se deberán cumplir las siguientes condiciones:

- El regulador estará dispuesto en voladizo y con el diafragma orientado horizontalmente.
- Se deberá aplicar la presión de entrada de operación al regulador y mantenerlo en condición de bloqueo.

- La carga deberá ser aplicada en el punto más alejado del eje central de la tubería.

Durante la ejecución de la prueba, se verificará que no existan fugas a través del cascaron aplicando solución jabonosa, además de supervisar que no existan variaciones importantes en la presión de entrada. La rutina de programación entonces, se encargará de ajustar la presión de entrada del sistema en una etapa inicial, para luego medir el tiempo de ejecución de la prueba y supervisar que no existan variaciones importantes en la presión de entrada con la información suministrada por la medición.

**Diseño:** La rutina de programación estará dispuesta de manera que el proceso de ajuste de la presión de entrada y el proceso de contabilización del tiempo transcurrido y medición de la presión de entrada sean mutuamente excluyentes. Por esta razón, si se está realizando el procedimiento de prueba, no se podrá ajustar la presión de entrada. El ajuste de la presión de entrada será un paso previo a la realización de la prueba. Una vez se inicie el procedimiento de prueba, comenzará a contabilizar el tiempo que transcurre y medirá en todo momento la presión de entrada, si llegase a haber alguna variación de la presión de entrada considerable, un indicador dará un mensaje de alerta. Para cumplir con los procedimientos requeridos de la prueba, se elaboró un diagrama de flujo el cual se muestra en la Figura 4.27.

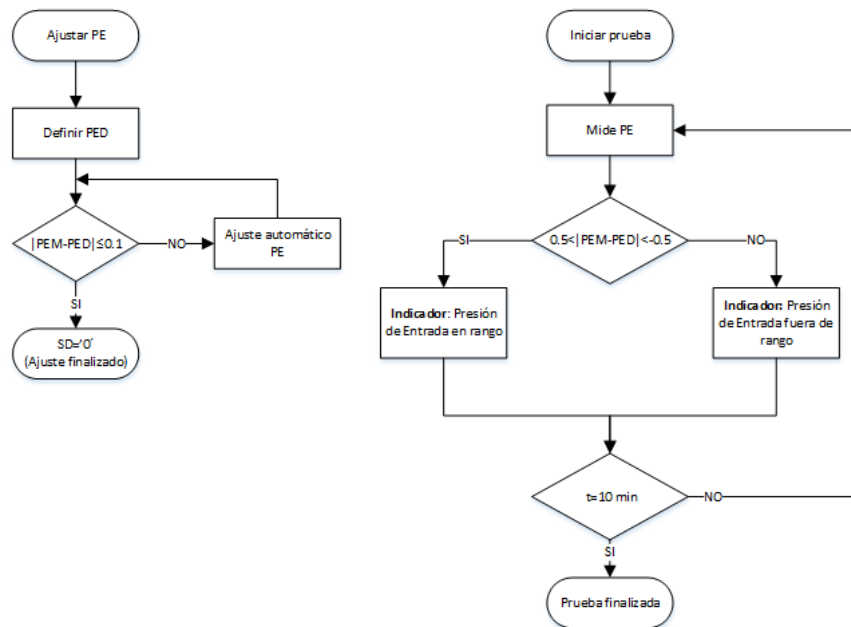


Figura 4.27. Diagrama de flujo para rutina de prueba de carga en cantiléver.

Elaboración propia.

**Implementación:** para el diagrama de bloques del instrumento virtual, se utilizó una estructura con dos casos, uno que hará el ajuste de la presión de entrada con la misma estructura que se utilizó en la rutina del punto de operación. El otro caso se encargará de realizar la medición, la temporización y la verificación del rango de operación. Una vez transcurran los 10 minutos la prueba terminará automáticamente.

En el panel frontal, se mostrará una maqueta con la configuración del banco necesaria para ejecutar esta prueba, en esta configuración solo se utilizaron el regulador de presión de entrada manual, el regulador de presión automático, el sensor de presión de entrada y el regulador de presión auto-operado bajo prueba. En cuanto a los controles, se utilizó un control numérico donde se introducirá la presión de entrada de operación deseada, se utilizaron tres controles tipo botón, uno para ajustar la presión de entrada, el segundo para iniciar la prueba y el último para reiniciar el temporizador en caso de ser necesario. En cuanto a los indicadores, aparte del indicador tipo manómetro que da información de la presión de entrada medida, se utilizaron indicadores de tipo numérico para mostrar el conteo del tiempo transcurrido en la prueba, así como indicadores de tipo booleano que dan información de si la prueba se encuentra en ejecución y si la presión de entrada se encuentra en un rango aceptable. La Figura 4. 28 muestra el panel frontal elaborado para la rutina de prueba de carga en cantiléver.



**Figura 4. 28. Panel frontal para rutina de prueba de carga en cantiléver.**

**Elaboración propia.**

#### **4.2.15 Prueba de fuga (FUGA.vi).**

Esta rutina tiene el objetivo de realizar un procedimiento de prueba enmarcado en lo establecido en la sección 5.3.2 de la norma ANSI B109.4. La prueba consiste en que teniendo sumergido el regulador en agua a una profundidad no mayor a dos pulgadas (5.1 cm), se deberá aplicar una presión en el puerto de salida del regulador de 2 psi por un mínimo de 20 segundos. En estas condiciones, se debe verificar visualmente si existe una ráfaga de burbujas; de existir, no deberá tener una tasa mayor a una burbuja por segundo independientemente del tamaño de la burbuja. Cabe destacar que el ajuste de la presión aplicada a la boquilla de salida del regulador lo hará el operador de forma manual, manipulando el regulador de presión manual (RPM). Además, tanto el puerto de entrada como la cámara de ventilación deberán estar completamente selladas para la ejecución de la prueba.

Como en el procedimiento de prueba la verificación de la característica de fuga la realiza el operador de forma visual, la rutina solo podrá medir la presión aplicada a la boquilla

de salida del regulador en todo momento. Además, deberá tener un temporizador el cual iniciará el conteo del tiempo un vez se inicie la prueba.

**Diseño:** La rutina de programación estará diseñada para que solo realice la medición de la presión aplicada a la boquilla de salida del regulador, y además contará cuanto tiempo ha transcurrido desde que se inicia la prueba hasta que el usuario y el operador lo consideren pertinente. La Figura 4. 29 muestra el diagrama de flujo que contempla los aspectos del diseño realizado para la rutina que se implementó.

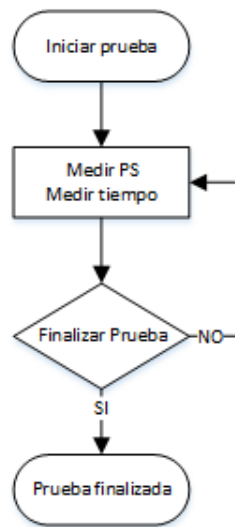


Figura 4. 29. Diagrama de flujo para rutina de fuga.

Elaboración propia.

**Implementación:** El diagrama de bloques tendrá una estructura principal que medirá la presión aplicada a la salida del regulador en todo momento, habrá también una estructura anidada en la estructura principal que se encargara de contar el tiempo transcurrido en caso que se inicie la prueba.

En el panel frontal se utilizó una maqueta la cual contiene la configuración del banco para la prueba de fuga. Además, en dicho panel frontal se colocaron dos controles tipo botón, uno para iniciar la prueba y el otro para reiniciar el temporizador en caso de ser requerido. Se instalaron indicadores numéricos que darán información del tiempo que ha transcurrido y un indicador booleano que informa si la prueba se encuentra en ejecución. La Figura 4. 30 muestra el panel frontal elaborado para la rutina de fuga.



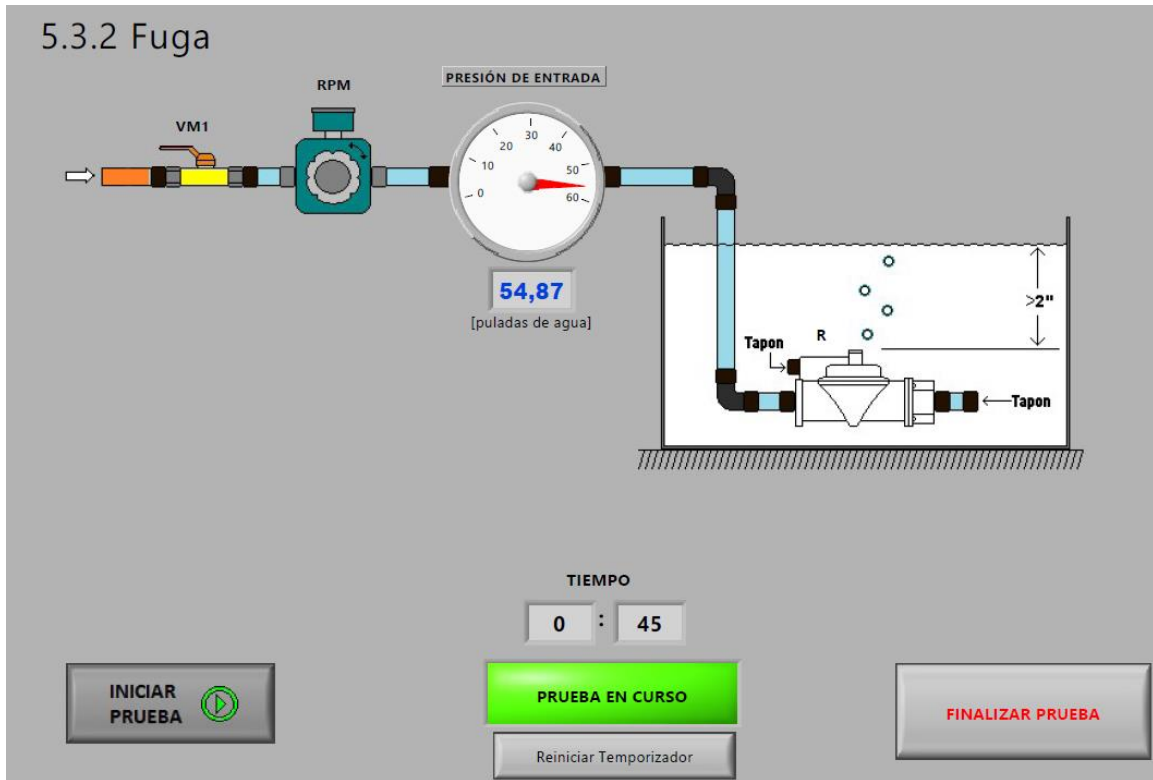


Figura 4. 30. Panel frontal para rutina de fuga.

Elaboración propia.

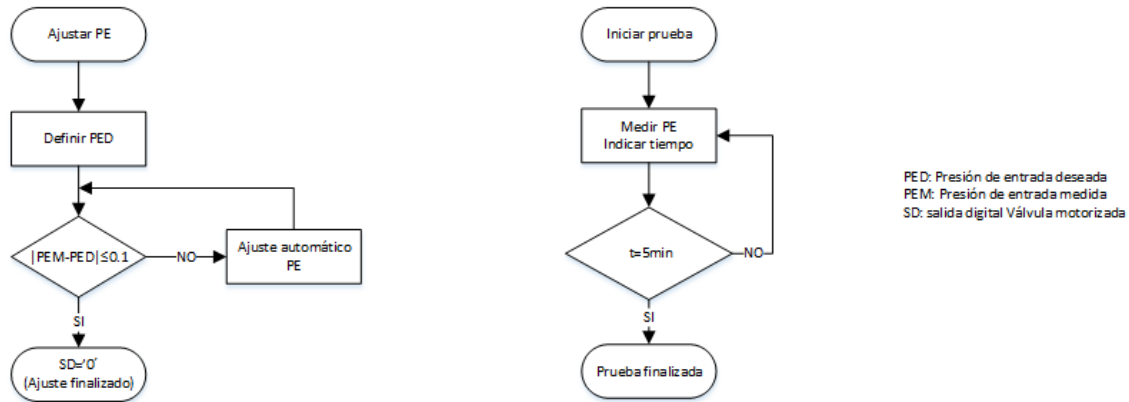
#### 4.2.16 Prueba de presión de la carcasa (PRESION\_CASCARON.vi).

La rutina de programación deberá ejecutarse bajo los procedimientos establecidos en la sección 5.3.11 de la norma ANSI B109.4. La prueba consiste en aplicar como mínimo una presión de 10 psi por 5 minutos a la carcasa que contiene la presión de salida del regulador. Para ello, se deberá desarmar el regulador y separar el cascaron protector de los demás elementos del regulador. Luego de seleccionar la pieza a ser probada, se debe sellar mecánicamente el cascaron protector de manera que pueda ser sometido a presión durante la prueba. La carcasa deberá contener la presión sin evidencia de deformación o ruptura, de la inspección de estos aspectos se encargara el operador.

La rutina de programación deberá entonces hacer el ajuste de la presión aplicada al cascaron y realizar la medición de la presión mientras contabiliza el tiempo de la prueba. Una vez transcurridos los 5 minutos, la prueba finalizara automáticamente.

**Diseño:** el diseño de la rutina se estructuró en dos etapas diferenciadas, una realizará el ajuste automático de la presión de entrada, y la otra etapa, la medición de la presión de

entrada y la medición del tiempo transcurrido durante la ejecución de la prueba. La estructura del diseño de la rutina se refleja de forma clara en diagrama de flujo que se muestra en la Figura 4. 31.



**Figura 4. 31. Diagrama de flujo para rutina de prueba de presión de carcasa.**  
Elaboración propia.

Cabe destacar que los procedimientos son mutuamente excluyentes, por tanto, durante la ejecución de la prueba no se hará ajuste automático de la presión de entrada. El ajuste de la presión de entrada será entonces un procedimiento inicial para generar la condición de presión que exige la norma.

**Implementación:** En el diagrama de bloques, se utilizaron estructuras de casos. En el caso que el usuario desee ajustar la presión de entrada del sistema, se ejecutará un ajuste automático igual al implementado en la rutina punto de operación. En el caso que se quiere realizar el procedimiento de prueba, realizará constantemente la medición de la presión mientras contabiliza el tiempo. Ambos casos se encuentran anidados dentro de la estructura principal que únicamente medirá la presión del sistema implementado.

El panel frontal, el cual sirve de interfaz usuario-maquina, contendrá la maqueta con la configuración del banco para la prueba. Tendrá tres controles tipo botón, uno para hacer el ajuste de la presión, el segundo para iniciar el procedimiento de prueba y el último para reiniciar el temporizador en caso de ser requerido. Respecto a los indicadores, se utilizaron indicadores numéricos que darán información sobre el tiempo transcurrido de la prueba y otro indicador booleano que dará información sobre si se está ejecutando el procedimiento de prueba. La Figura 4. 32 muestra el panel frontal elaborado en LabVIEW para la rutina de la prueba de presión de la carcasa.

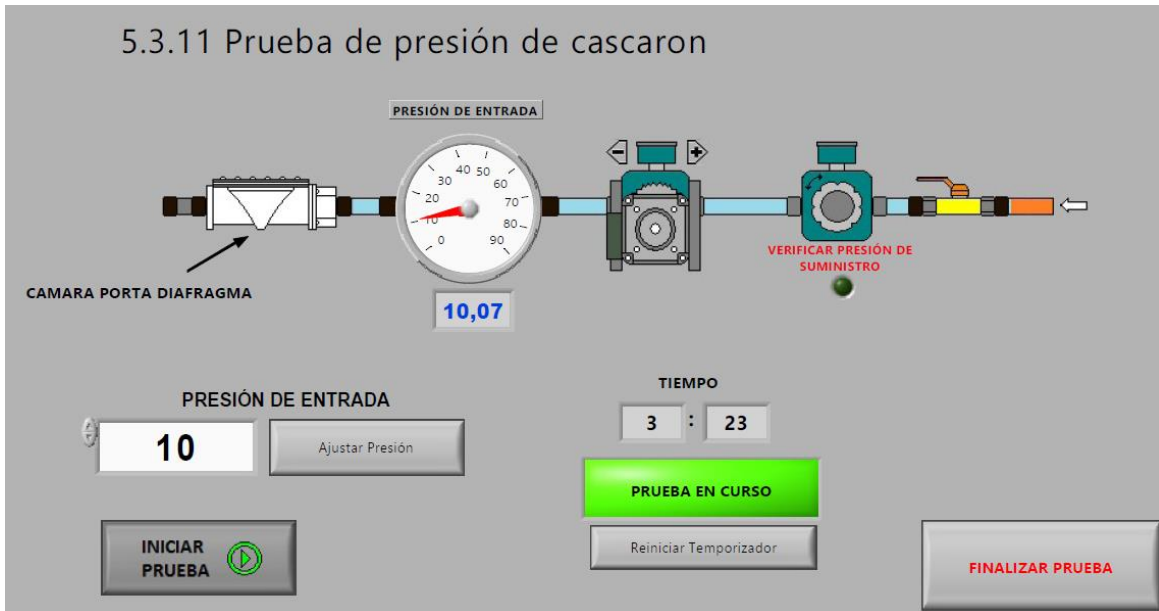


Figura 4. 32. Panel frontal para rutina de prueba de presión de cascarron.  
Elaboración propia.

### 4.3 Programa para el regulador automático.

Para el control del regulador automático se implementó una tarjeta secuenciadora con un PIC1F877. Sin embargo, aparte de la elaboración física de la tarjeta se requiere de un programa que a partir de las señales provenientes de la tarjeta de adquisición de datos pueda tomar decisiones sobre en qué sentido debe girar el motor de paso del regulador y la velocidad a la cual hacerlo. En esta sección del capítulo de programas se expone el diseño conceptual y la implementación del programa requerido.

#### 4.3.1 Diseño conceptual

En cuanto al diseño, se establecieron condiciones para el funcionamiento del motor del regulador automático. Como condición principal, la señal digital será un “1” lógico lo cual permitirá que el sistema tome decisiones a partir de la señal analógica. Se decidió que la señal analógica tenga un rango entre 1 y 4 voltios bajo las siguientes condiciones.

Para tensiones mayores a 2.5 voltios, el motor de paso del regulador girará en sentido horario; a medida que la tensión aumente por encima de los 2,5 voltios, la velocidad del motor aumentara hasta un valor máximo (señal de entrada en 4 voltios).

Para tensiones menores a 2.5 Voltios, el motor girará en sentido anti horario; a medida que la tensión disminuya por debajo de los 2,5 voltios, la velocidad del motor aumentará hasta un valor máximo (señal de entrada en 1 voltio).

Si la señal analógica se encuentra en un umbral muy cercano a 2,5 voltios, el motor se debe detener.

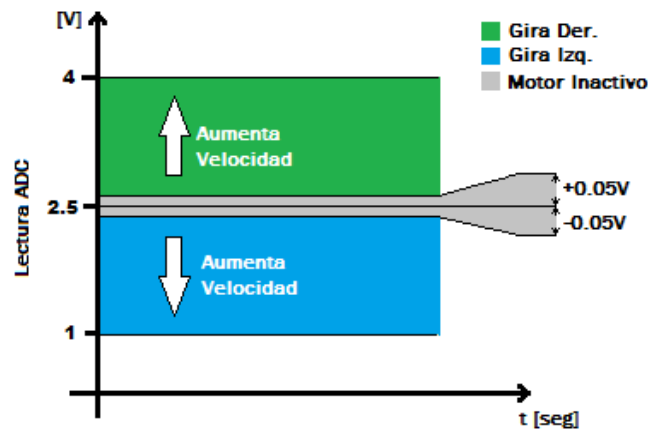


Figura 4. 33. Grafico explicativo.

Elaboración propia.

La señal de salida de la tarjeta secuenciadora, estará conformada por cuatro señales digitales TTL, que conmutaran sus valores en una secuencia específica para así lograr que el motor se mueva. La secuencia está conformada por cuatro pasos los cuales tienen sus valores asignados. El periodo de tiempo que tarda entre paso y paso determina la velocidad del motor y el sentido en el cual se genera la secuencia de pasos, dará la dirección de giro.

#### 4.3.2 Implementación.

Se elaboró un diagrama de flujo en el cual se refleja la toma de decisiones y las acciones de control que deberán cumplirse para el funcionamiento del motor. En la Figura 4. 34 (a) se muestra dicho diagrama de flujo.

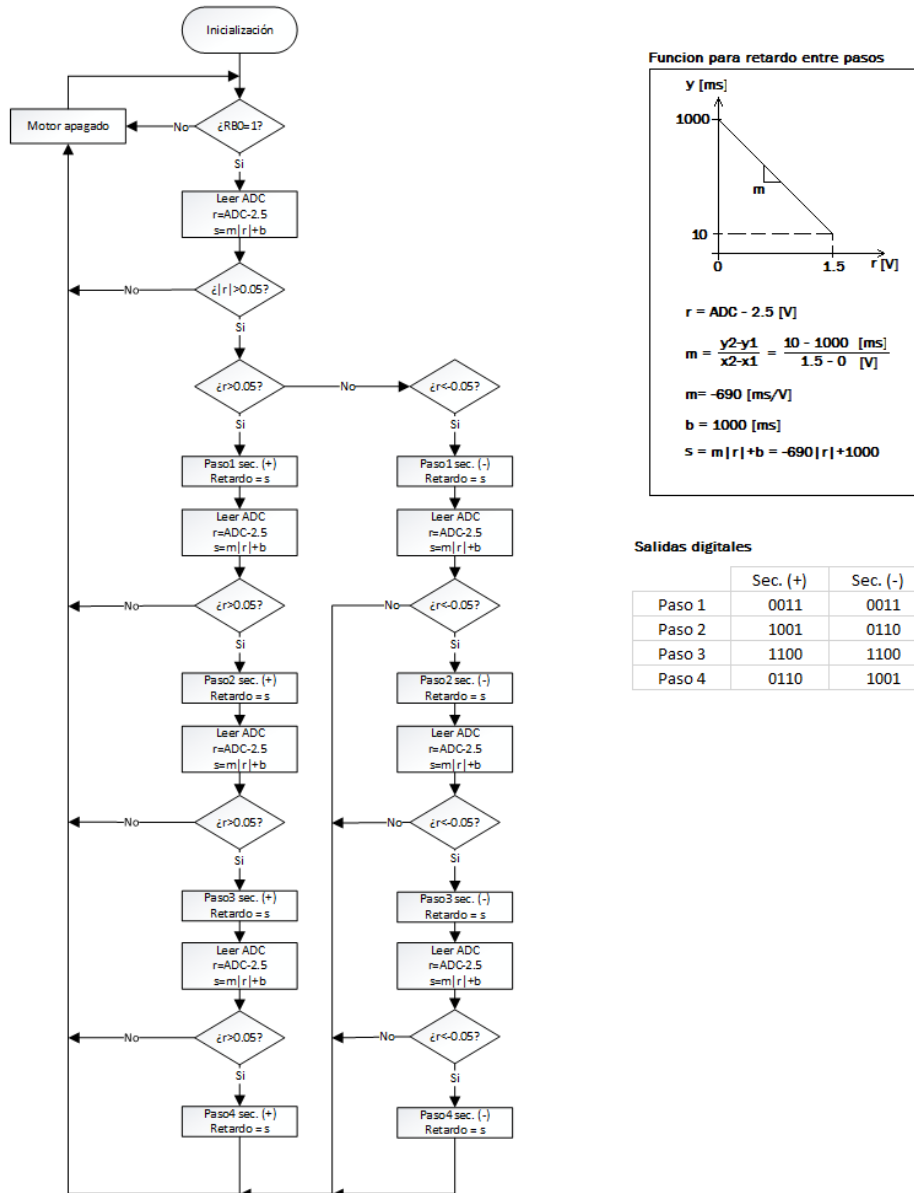


Figura 4. 34. Diagrama de flujo

Elaboración propia.

Para resumir, en el diagrama de flujo, la toma de decisiones se hace con la ayuda de un nivel de referencia de 2.5 voltios. A la lectura del voltaje analógico medido con la ayuda de un convertidor analógico digital del PIC, se le restará el nivel de referencia, con lo cual se establecerá la dirección de giro del motor gracias al signo, y la velocidad, gracias al valor absoluto de dicho resultado.

El período de actualización entre paso y paso establece la velocidad del motor y estará definido mediante una función lineal cuya variable de entrada es el módulo de la señal de

entrada referenciada y cuya salida es el retardo entre los pasos de la secuencia. Después de cada lectura ejecutada por el ADC, se actualizará el valor del periodo de tiempo entre paso y paso, esto permite ajustar la de velocidad y el sentido de rotación del motor.

A partir del diagrama de flujo se elaboró un programa en lenguaje C utilizando la plataforma de programación CCS. El programa elaborado se estructuró de manera modular para hacer más rápida su elaboración y más sencilla su comprensión. Consta de una rutina principal y cinco subrutinas con funciones específicas. A continuación se mencionan los módulos que conforman el programa y sus funciones:

**main ():** programa principal, dentro de él se ejecutaran todas las subrutinas necesarias para el funcionamiento global del sistema.

**inicia ():** Subrutina de inicialización, configura los puertos como entradas o salidas físicas del microcontrolador.

**lectura\_adc ():** efectúa la lectura del voltaje en la entrada analógica del PIC. Con el valor del voltaje leído se determina el tiempo de retardo entre pasos.

**secuencia ():** decide en qué sentido girará el motor a partir del valor de la diferencia entre el voltaje medido y el voltaje de referencia.

**secuenciapositiva ():** pone en el puerto digital de salida los valores de la secuencia para que el motor gire en el sentido de la secuencia positiva. Después de cada paso actualizará el valor de su velocidad y verificará si debe estar encendido.

**secuencianegativa ():** Cumple las mismas funciones que la rutina de secuencia positiva, pero en este caso pondrá a la salida del puerto digital la secuencia negativa.

En la Figura 4. 35 se muestra parte del código realizado para el control del motor.

```
1 #include <16F877.H>
2 #device adc=10
3 #fuses NOPROTECT,NOBROWNOUT,XT,NOLVP //codigo para quemado
4 #use delay (clock=4000000) //de acuerdo al crystal
5 #byte PORTA=0x05
6 #byte TRISA=0x05
7 #byte PORTB=0x06
8 #byte TRISB=0x06
9 #byte PORTD=0x08
10 #byte TRISD=0x08
11 #bit Entrada=PORTB.0
12 //Declaracion de variables a utilizar en el programa
13 int16 q=0;
14 float p=0;
15 float r=0;
16 int16 s=0;
17 float u=0;
18 int8 N=0;
19
20 void inicia() //inicializacion de variables y configuracion de puertos
21 {
22 PORTA=0x00;
23 TRISA=0x05;
24 PORTB=0x00; //para asegurarnos q D, estará en 0 al inicio
25 TRISB=0x06; //PORTB entrada
26 PORTD=0x00; //para asegurarnos q D, estará en 0 al inicio
27 TRISD=0x08;
28 }
29
30
31
32 void lectura_adc()//Lectura analógico digital
33 {
34 u=0;
35 for (N=0;N<20;N++)
36 {
37 setup_adc_ports (AN0);
38 setup_adc_clock (CLOCK_INTERNAL);
39 set_adc_channel (0);
40 delay_us (20);
41 q=read_adc();
42 p=(0.0*q)/1024.0;
43 u+=p;
44 }
45 p=u/20; //filtro Promediador
46 r=p-2.5;
47 if (abs(r)<=1.5)
48 {
49 s=(-690*abs(r))+1000;
50 }
51 else
52 {
53 s=10;
54 }
55 }
56 void secuenciapositiva()
57 {
58 PORTD=0x03;
59 delay_ms(5);
60 }
```

Figura 4. 35. Código elaborado en CCS.  
Elaboración propia.

## CAPÍTULO V

### 5 RESULTADOS

#### 5.1 Introducción.

En la última etapa del proyecto se realizaron diversas pruebas del banco implementado para verificar su funcionamiento, las pruebas se realizaron según los procedimientos establecidos en la sección 5.3 de la norma ANSI B109.4. Este capítulo se centra en la exposición de los resultados registrados de varias de las pruebas realizadas en el banco de ensayos, principalmente para verificar el comportamiento de los elementos de medición utilizados. Para la ejecución de las pruebas, el IMME cuenta con un regulador de muestra el cual se utilizó en todos los procedimientos de pruebas realizados.

La mayoría de las rutinas de pruebas programadas permiten hacer un registro de los datos los cuales se guardarán en un archivo de texto en el computador para su posterior estudio. En base a estos resultados se pueden apreciar aspectos importantes como son la estabilidad y consistencia en las mediciones realizadas y el comportamiento físico del elemento bajo prueba con el fin de verificar si cumple con las condiciones que establece el estándar. Los procedimientos de pruebas que se expondrán en este capítulo serán:

- Punto de operación.
- Prueba de bloqueo.
- Prueba de histéresis.
- Prueba de sensibilidad ante la presión de entrada.
- Prueba de capacidad de flujo.
- Punto de operación de la válvula de alivio.

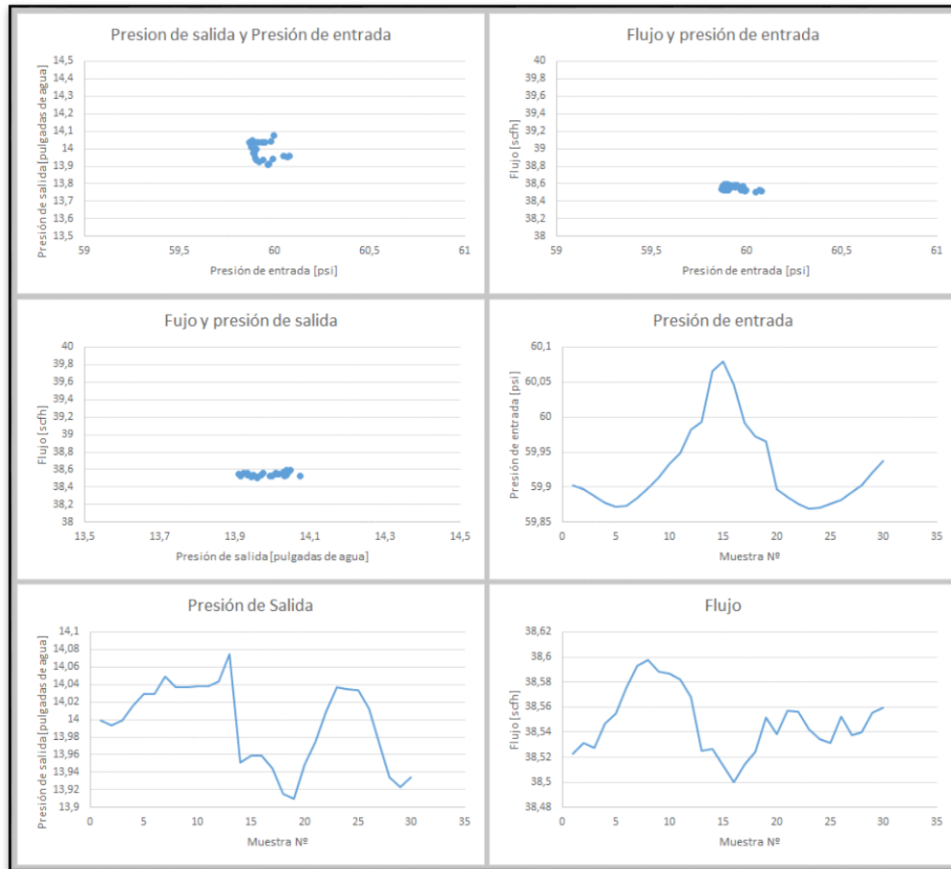
Cabe destacar que las pruebas expuestas en este capítulo contiene también los aspectos principales de las rutinas que no se contemplaron, por ello se considera una condición suficiente para la elaboración del mismo. A continuación se muestra por procedimiento de prueba los resultados obtenidos.

#### 5.2 Resultados de la prueba punto de operación.

Para este procedimiento de prueba se tomaron 30 registros obtenidos de la rutina punto de operación, una vez que el punto de operación se encuentre en rango, la rutina



permitirá al usuario guardar un registro de la medición de la presión de entrada, la presión de salida y el flujo. En la Figura 5. 1 se pueden apreciar los gráficos obtenidos a partir los registros de los datos de la prueba punto de operación.



**Figura 5. 1. Gráficos obtenidos del registro del punto de operación.**

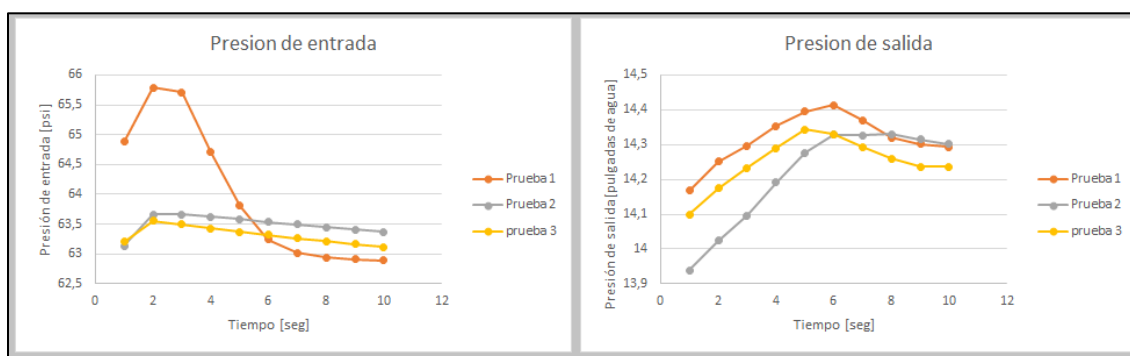
**Elaboración propia.**

Para las pruebas realizadas con el regulador de muestra, se estableció que el punto de operación es de  $60 \pm 1$  psi para la presión de entrada,  $14 \pm 0.1$  plg agua para la presión de salida y  $39 \pm 1$  scf/h para el flujo. En los gráficos puede apreciarse que efectivamente los elementos de medición se comportan de manera estable, y que las variaciones de los parámetros asociadas a la electrónica de instrumentación son pequeñas, lo cual permite realizar la medición del desempeño mecánico del regulador de forma confiable.

### **5.3 Resultados de la prueba de bloqueo.**

En la prueba de bloqueo realiza el registro de los datos inmediatamente después de generar la condición de bloqueo y durante un lapso 10 segundos a una tasa de 1 muestra por segundo. Para verificar el comportamiento del regulador ante la condición de bloqueo se

realizó el procedimiento de prueba tres veces. En la Figura 5. 2 se puede apreciar los gráficos resultantes a partir de los datos registrados en las pruebas realizadas.



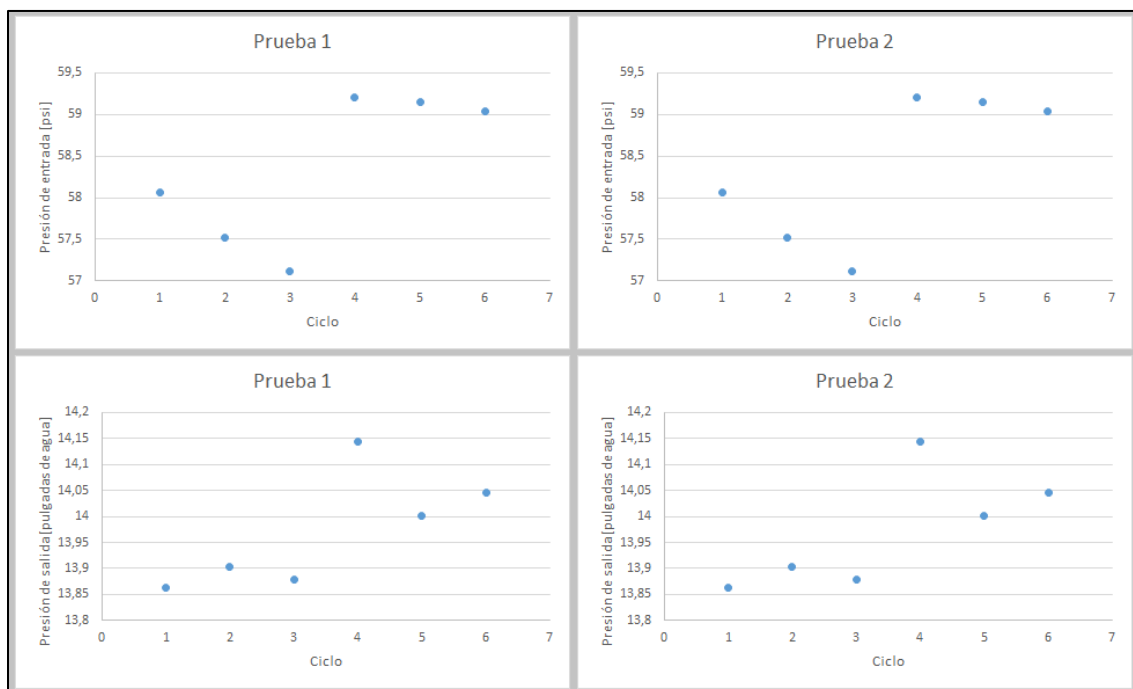
**Figura 5. 2. Gráficos obtenidos del registro de la prueba de bloqueo.**

**Elaboración propia.**

La norma establece que la presión de salida no deberá exceder 3 plg agua por encima del punto de operación. En los gráficos puede apreciarse que el regulador ensayado no excede las 17 plg agua, por tanto, cumple con lo exigido por la norma para esta prueba. A partir de los gráficos puede concluirse que una vez se genera la condición de bloqueo la presión de salida experimenta una etapa transitoria en la cual en un principio incrementa abruptamente para luego estabilizarse.

#### **5.4 Resultados de la prueba de histéresis.**

En la prueba de histéresis el registro de los datos se realiza inmediatamente después de terminar cada ciclo de histéresis aplicado al regulador. La prueba consta de dos etapas que contienen seis ciclos. Los primeros tres ciclos aplicados son de bajada y la condición de flujo se disminuye a 0 scf/h y devuelve a la condición inicial, y los tres ciclos restantes son de subida y la condición de flujo se aumenta a 200 scf/h y devuelve a la condición inicial. Todos los procedimientos se realizan bajo lo establecido en la norma para la prueba de histéresis. En la Figura 5. 3 se puede apreciar los gráficos resultantes a partir de los datos registrados en las pruebas realizadas.



**Figura 5. 3. Gráficos de obtenidos del registro de la prueba de histéresis.**

**Elaboración propia.**

En los gráficos puede apreciarse que para los primeros tres ciclos la presión de salida registrada se encuentra por debajo de la presión de salida del punto de operación, mientras que para los tres ciclos restantes la presión de salida registrada se encuentra por encima de la presión de salida del punto de operación. La norma establece que la presión de salida no deberá exceder 0,5 plg agua por encima o por debajo del punto de operación. En el regulador ensayado la máxima variación de la presión de salida está en el orden de 0,15 plg agua tanto por arriba como por debajo, por tanto, cumple con lo exigido por la norma para esta prueba.

### **5.5 Resultados de la prueba de sensibilidad ante la presión de entrada.**

En la prueba de sensibilidad ante la presión de entrada, el registro de los datos se realiza después de transcurrir 10 segundos luego que la presión de entrada alcance su valor de consigna. Los datos registrados corresponden a la presión de entrada y la presión de salida, y en el panel frontal de la rutina de programación dedicado a tal fin puede apreciarse el gráfico de la presión de salida respecto a los cambios en la presión de entrada. En la Figura 5. 4 se puede apreciar el panel frontal del procedimiento de prueba en ejecución.

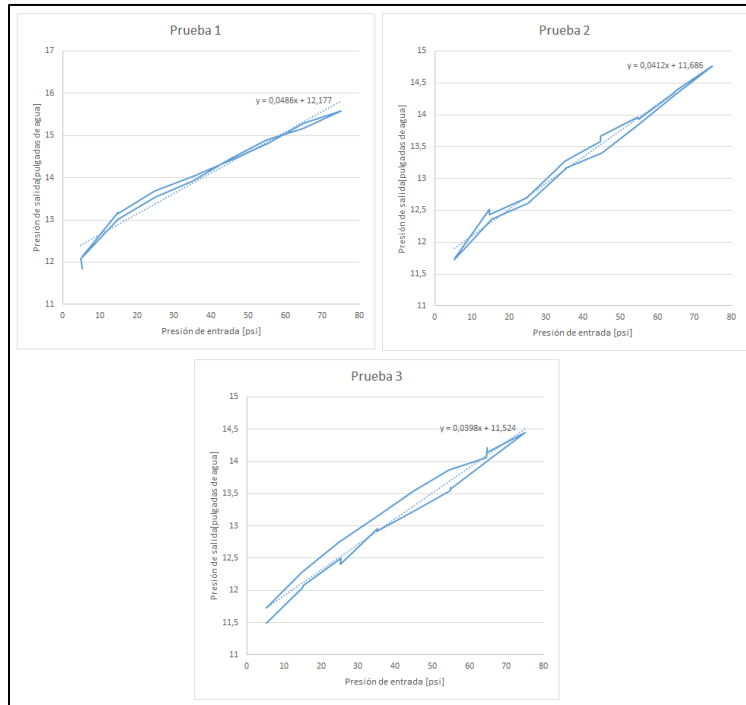
### 5.3.6 Sensibilidad ante presión de entrada



Figura 5. 4. Panel frontal de la prueba sensibilidad ante la presión de entrada.  
Elaboración propia.

Para la prueba de sensibilidad ante la presión de entrada, se realizó el procedimiento de prueba sobre el regulador tres veces, y los datos registrados se observaron de forma clara en los gráficos contenidos en la Figura 5. 5.

La prueba tiene el fin de determinar el comportamiento de la presión de salida ante diferentes presiones de entrada. De las tres pruebas realizadas sobre el regulador ensayado puede apreciarse que el regulador presenta un comportamiento consistente ante cambios en la presión de entrada y que pueden realizarse una aproximación lineal para obtener la curva de sensibilidad del regulador. De las curvas obtenidas se puede afirmar que el regulador ensayado tiene una sensibilidad aproximada de 0.04 [plg agua/psi], esto quiere decir que ante el aumento o disminución de 1 psi en la presión de entrada, habrá en consecuencia un aumento o disminución de 0.04 plg agua en la presión de salida.



**Figura 5. 5. Gráficos de obtenidos del registro de la prueba de sensibilidad ante la presión de entrada.  
Elaboración propia.**

## **5.6 Resultados de la prueba de capacidad de flujo.**

En la prueba de capacidad de flujo, el registro de los datos se realiza después de que el sensor de flujo alcance la estabilidad y la medición del flujo sea la correcta. Los datos registrados corresponden a la presión de salida y al flujo, y en el panel frontal de la rutina de programación dedicado a tal fin (Figura 5. 6) puede apreciarse el gráfico de la presión de salida respecto a los aumentos en el flujo.

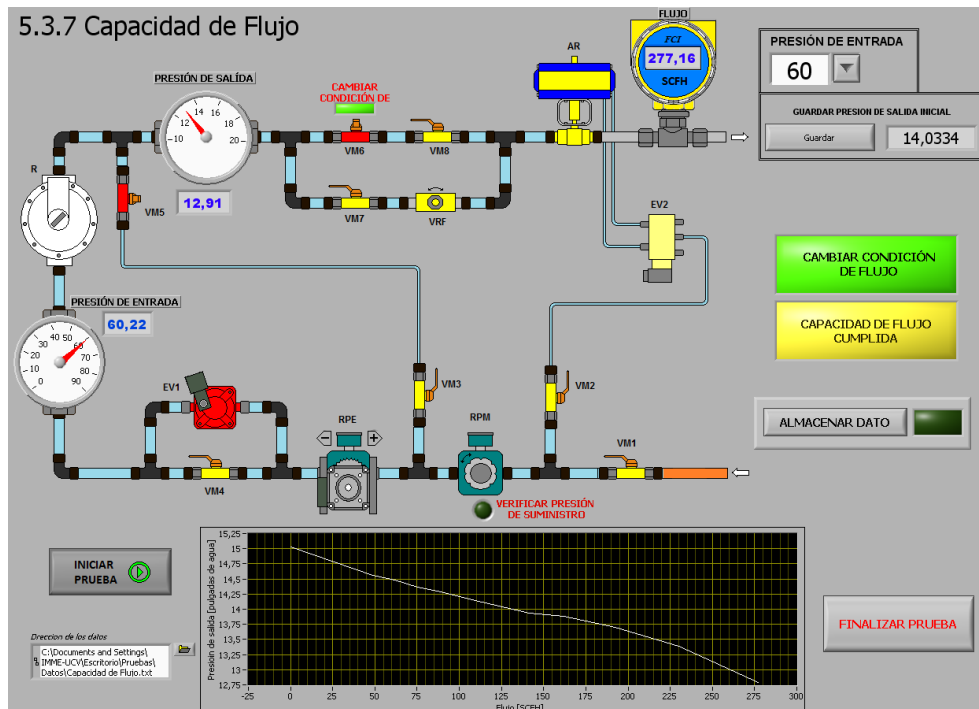


Figura 5. 6. Panel frontal de la prueba sensibilidad capacidad de flujo.

Elaboración propia.

Para la prueba de capacidad de flujo, se realizó el procedimiento de prueba sobre el regulador tres veces, y los datos registrados se observaran de forma clara en los gráficos contenidos en la Figura 5. 7.

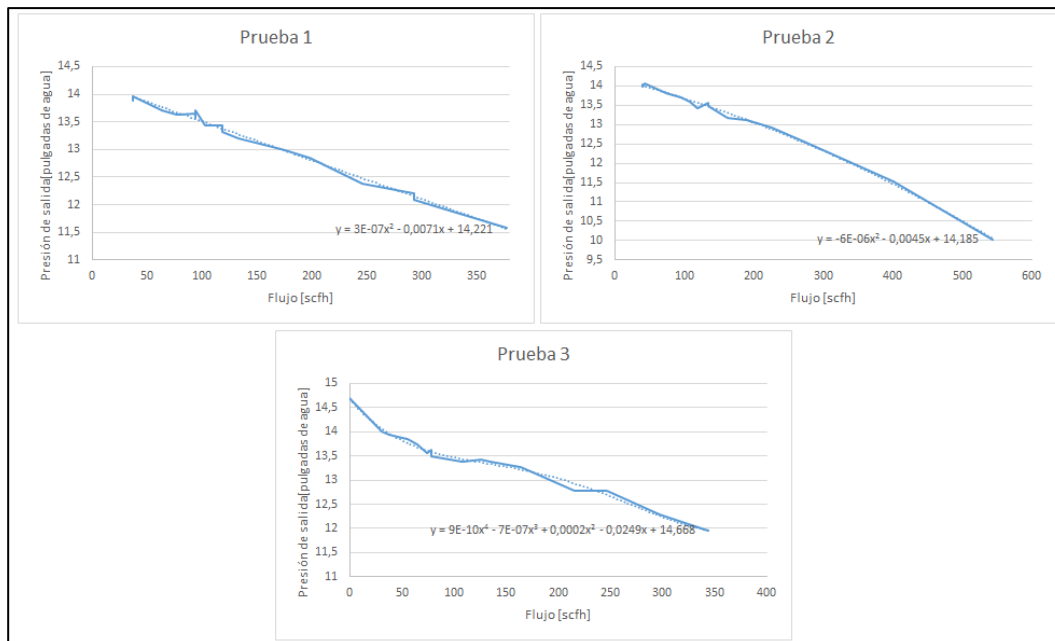


Figura 5. 7. Gráficos de obtenidos del registro de la prueba de capacidad de flujo.

Elaboración propia.

La prueba tiene el fin de determinar la capacidad de flujo del regulador. Para el regulador bajo prueba, la capacidad de flujo será el flujo medido cuando la presión de salida disminuya 2 plg agua por debajo de la presión de salida inicial. De las tres pruebas realizadas sobre el regulador ensayado puede apreciarse que el regulador presenta un comportamiento consistente entre cada una de las pruebas. De las curvas obtenidas se puede afirmar que el regulador ensayado tiene una capacidad de flujo de aproximadamente de 350 scf/h cuando la presión de salida alcanza las 12 plg agua con una presión de entrada constante de 60 psi.

### 5.7 Resultados de la prueba del punto de operación de la válvula de alivio.

En la prueba del punto de operación de la válvula de alivio el registro de los datos se hará cada segundo una vez se inicie la prueba. El registro será únicamente de la presión a la salida del regulador y en todo momento se verificará que se encuentre en un rango adecuado. Para la prueba punto de operación de la válvula de alivio, se realizó el procedimiento de prueba una vez, y los datos registrados se observan de forma clara en el gráfico contenido en la Figura 5. 8.

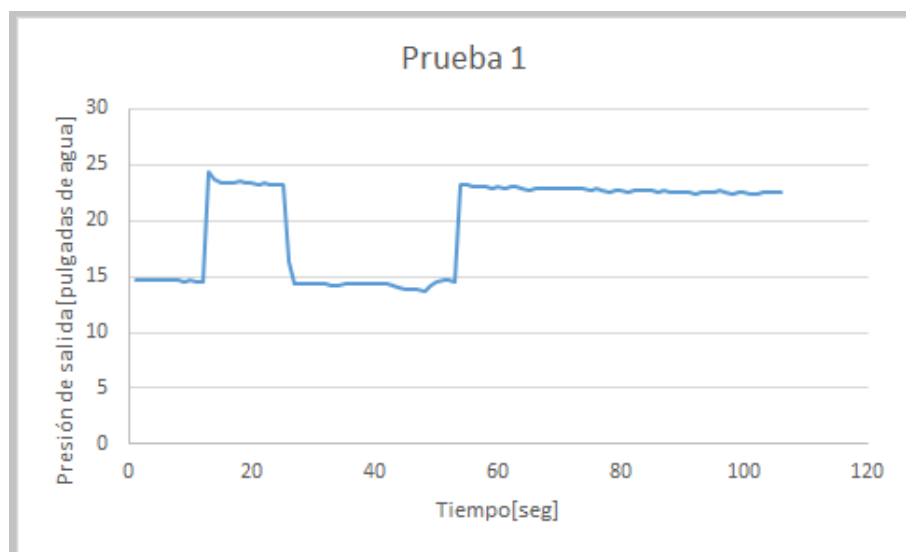


Figura 5. 8. Gráfico obtenido del registro de la prueba del punto de operación de la válvula de alivio.

Elaboración propia.

La norma establece que la presión de alivio del regulador deberá ser de  $9 \pm 3$  plg agua sobre la presión de salida del punto de operación. Entonces, para el regulador ensayado la presión de alivio deberá estar entre 20 y 26 plg agua para cumplir con lo establecido en la norma. La prueba se realizó durante un lapso de 105 segundos en los cuales se aplicó en dos oportunidades sobrepresión en la cámara de baja presión del regulador para que entre en

funcionamiento la válvula de alivio. Puede afirmarse a partir de la gráfica que la válvula de alivio funciona correctamente ya que la presión de alivio se encuentra dentro del rango establecido por la norma.



## CONCLUSIONES

Con la culminación del presente trabajo se logró la implementación de un sistema de adquisición y control para el banco de pruebas de reguladores de gas que se encuentra en las instalaciones del Instituto de Materiales y Modelos Estructurales (IMME).

El banco de pruebas permite verificar el desempeño de los reguladores de gas importados y de fabricación nacional, de tal forma que se ajusten al estándar definido por la empresa nacional PDVSA GAS (Norma ANSI B109.4).

Se logró la implementación exitosa de un programa de control basado en la plataforma de programación LabVIEW, en un computador equipado con una tarjeta de adquisición de datos. Esto permitió el desarrollo de un sistema capaz de ejecutar las pruebas requeridas por la norma ANSI B109.4, algunas de manera automática y otras de forma guiada. Durante el proceso de prueba se puede monitorear, controlar y registrar las variables de presión y flujo en los puntos de interés.

La interfaz gráfica se realizó de tal forma de hacer lo más fácil e intuitivo el proceso que se está ejecutando durante las pruebas. Se dedicó gran esfuerzo para mostrar de manera dinámica los cambios de estado de todos los indicadores en tiempo real.

Adicional a los objetivos planteados en el anteproyecto, se diseñó e implementó un control automático del regulador de presión de entrada, que originalmente se operaba de forma manual. Esto se logró gracias a la incorporación de un motor de pasos acoplado al eje de mando del regulador mediante un engranaje. Para el accionamiento se diseñaron y construyeron circuitos basados en un microcontrolador y un driver de potencia que en conjunto con el programa de control alojado en el computador, ofrece la capacidad de ajustar la posición y velocidad del motor y en consecuencia permite controlar la presión de entrada del regulador bajo prueba. La realización de este regulador automático permitió mejorar en gran medida la precisión y los tiempos de ajuste de la presión de entrada del banco de pruebas. Se incluyeron por software mecanismos de seguridad como son los finales de carrera y la verificación de los cambios en la regulación siempre que el motor se encuentra encendido. Esto brinda mayor robustez al regulador automático, minimizando el riesgo a la integridad física del regulador por exceder los límites operativos.

De los resultados de la prueba punto de operación realizada en el banco de pruebas puede observarse que efectivamente los valores de presión de entrada, presión salida y el flujo cumplen con lo establecido en la norma en cuanto a la tolerancia y muestran un comportamiento consistente y estable.

Algunos de los instrumentos virtuales realizados presentan gráficos de los parámetros medidos en tiempo real, lo cual ofrece una gran ventaja respecto a solo registrar los valores medidos, ya que a partir de los gráficos observados se puede inferir tendencias en el comportamiento dinámico del regulador bajo prueba.

En términos generales el trabajo se centró en tres aspectos fundamentales, la investigación teórica sobre los componentes que conforman el banco de pruebas, el diseño de las distintas soluciones tanto en software como en hardware y por último la implementación de los diseños planteados. Estos aspectos puestos en práctica traen como consecuencia un gran aprendizaje y experiencia en el ámbito teórico y práctico. Puede asegurarse que proyectos de este tipo son muy completos y dotan de gran experiencia al profesional que lo realice.

## RECOMENDACIONES

Sustituir las válvulas manuales que conforman la válvula de descarga y el conjunto de la electroválvula de salida por una única válvula de descarga que permita abrir y cerrar el paso de aire totalmente, así como posicionarse en etapas intermedias para regular el flujo de descarga de forma automática.

Afinar de forma experimental el modelo de regulación de los reguladores de presión de entrada para así determinar cuánto influyen los cambios en el flujo sobre la presión que intentan mantener.

Para aumentar la capacidad de regular presiones altas en el banco de pruebas se recomienda sustituir el motor de paso del regulador automático por uno de mayor par torque, o en su defecto, cambiar la relación de los engranajes para mejorar el par del regulador automático.

Para aumentar la velocidad de los ciclos de presurización y despresurización del regulador a ensayar en la prueba de rendimiento, se recomienda sustituir la electroválvula 1 que se encuentra a la entrada del regulador por una de las mismas características de la del conjunto electroválvula y actuador rotativo que se encuentra a la salida del regulador del banco de pruebas.

Se recomienda en el ensayo de carga en cantiléver, incluir una celda de carga con su respectivo circuito de acondicionamiento de señales y su código de adquisición en LabVIEW, para la medición de la carga aplicada al regulador en dicha prueba.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ACL. *Solenoid valve 2 way normally closed with servo-assisted diaphragm*. M3107B data sheet .
- [2] American Gas Association. (1998). *Self-operated diaphragm-type natural gas service regulators*. Texas: American National Standar.
- [3] API. *Synthetic catalogue 1113* .
- [4] API. *Valves series A1 specifications*.
- [5] Bourdon Sedeme. *E910 Transmisores de presion*.
- [6] Crespo, E. (30 de Marzo de 2015). *Conversión analógico digital*. Obtenido de Aprendiendo arduino: <https://aprendiendoarduino.wordpress.com/tag/conversor-digital-analogico/>
- [7] Departamento de Ingeniería y Servicios COMIND. Ltda. (Octubre de 2009). Obtenido de Comind: <https://es.scribd.com/doc/101982717/Art-Lazo-de-Corriente-4-20mA-Comind-1>
- [8] Fluid components international LLC. *ST75 Mass flow meter, installation and operation guide* .
- [9] HBM Operating manual MC2. *Measuring amplifiers for inductive transducers* .
- [10] National Instruments. *Device specifications NI USB-6009, Bus-Powered Multifunction DAQ USB Device* .
- [11] Nationals Instruments. (12 de Septiembre de 2016). [www.ni.com](http://www.ni.com). Obtenido de Measuring Position and Displacement with LVDTs: <http://www.ni.com/white-paper/3638/en/>
- [12] Otto, E. (11 de Marzo de 2015). *Machine Design*. Obtenido de <http://www.machinedesign.com/linear-motion/untangling-some-confusing-lvdt-terms>.
- [13] Shaw, K. (2003). *Fundamental principles of pressure regulators*. Owenton, kentucky: american school of gas measurement technology.

- [14] ST Microelectronics. *L298 Dual full-bridge driver data sheet* .
- [15] Webster, J. (1999). *The measurement, instrumentation and sensors handbook*. Folrida, EEUU: CRC Press LLC.
- [16] Microchip Technology Inc. (1998-2017). *Microchip*. Recuperado el 22 de Mayo de 2017, de <https://www.microchip.com/>
- [17] National Instruments. *National instruments LabVIEW*. Obtenido de <http://www.ni.com/academic/students/learn-labview/esa/>
- [18] Diymakers. (28 de Diciembre de 2013). Recuperado el 26 de Mayo de 2017, de <http://diymakers.es/mover-motores-paso-paso-con-arduino/>
- [19] Wikipedia. (12 de Febrero de 2017). <https://es.wikipedia.org>. Obtenido de Electroválvula: <https://es.wikipedia.org/wiki/Electrov%C3%A1lvula>

## BIBLIOGRAFÍA

- American gas association. (1998). *Self-operated diaphragm-type natural gas service regulators*. Texas: American National Standar.
- Caraballo, a., & Milá de la Roca, c. (15 de junio de 2007). *Mediciones industriales 7ma*. Obtenido de sensor de presion capacitivo: <http://aitunexpo.blogspot.com/2007/06/sensor-digital-de-presion-capacitivo.html>
- Cárdenas, o. (26 de abril de 2011). *Universidad de los andes*. Obtenido de transductores industriales: [http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/oscaror/cursosdictados/web%20instrumentacion%20industrial/1%20transductores%20para%20procesos%20industriales/libro%20pdf/cap%202%20medicion\\_presion\\_2009.pdf](http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/oscaror/cursosdictados/web%20instrumentacion%20industrial/1%20transductores%20para%20procesos%20industriales/libro%20pdf/cap%202%20medicion_presion_2009.pdf)
- Dulhoste v, j. F. (05 de marzo de 2016). *Universidad de los andes*. Obtenido de guía de instrumentación: [http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/djean/index\\_archivos/instrumentacion.html](http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/djean/index_archivos/instrumentacion.html)
- Microchip technology inc. (1998-2017). *Microchip*. Recuperado el 22 de mayo de 2017, de <https://www.microchip.com/>
- National instruments. *Device specifications ni usb-6009, bus-powered multifunction daq usb device* .
- National Instruments. *National instruments LabVIEW*. Obtenido de <http://www.ni.com/academic/students/learn-labview/esa/>
- Nationals instruments. (12 de septiembre de 2016). *Www.ni.com*. Obtenido de measuring position and displacement with lvdt: <http://www.ni.com/white-paper/3638/en/>
- Otto, e. (11 de marzo de 2015). *Machine design*. Obtenido de <http://www.machinedesign.com/linear-motion/untangling-some-confusing-lvdt-terms>.
- Shaw, k. (2003). *Fundamental principles of pressure regulators*. Owenton, kentucky: american school of gas measurement technology.
- Training & consulting group. (s.f.). *Http://www.trainingconsultinggroup.com*. Obtenido de introduccion a lo lazos de corriente:

<http://www.trainingconsultinggroup.com/tips/detail/introduccion-a-los-lazos-de-corriente-parte-2>

- Webster, j. (1999). *The measurement, instrumentation and sensors handbook*. Folrida, EEUU: crc press llc.
- Wikipedia. (12 de febrero de 2017). *Https://es.wikipedia.org*. Obtenido de electroválvula: <https://es.wikipedia.org/wiki/electrov%c3%a1lvula>