

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE AUTOMATIZACIÓN PARA UNA CÁMARA DE  
VACÍO EMPLEADA PARA LA CALIBRACIÓN DE BARÓMETROS EN PRESIÓN  
ABSOLUTA.**

**LAURA LUCIA GUTIERREZ CORTÉS**

**Proyecto Integral de Grado para optar al título de  
INGENIERO MECÁNICO**

**Orientador**

**Wilmar Martínez Urrutia**

**Ingeniero Electrónico**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA**

**FACULTAD DE INGENIERÍAS**

**PROGRAMA INGENIERÍA MECÁNICA**

**BOGOTÁ D.C.**

**2022**

**NOTA DE ACEPTACIÓN**

---

---

---

---

---

---

---

Nombre

Firma del Director

---

Nombre

Firma del Presidente Jurado

---

Nombre

Firma Jurado

---

Nombre

Firma Jurado

Bogotá D.C. Mayo de 2022

## **DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD**

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

**Dr. MARIO POSADA GARCÍA-PEÑA**

Consejero institucional

**Dr. LUIS JAIME POSADA GARCÍA-PEÑA**

Vicerrectora Académica y de Investigaciones

**Dra. ALEXANDRA MEJÍA GUZMÁN**

Vicerrector Administrativo y Financiero

**Dr. RICARDO ALFONSO PEÑARANDA CASTRO**

Secretario General

**Dr. JOSE LUIS MACIAS RODRIGUEZ**

Decana de la Facultad de Ingeniería

**Dr. NALINY PATRICIA GUERRA PRIETO**

Directora de Programa de Ingeniería Mecánica

**Dra. MARIA ANGELICA ACOSTA PEREZ**

## **DEDICATORIA**

Dedico este proyecto de grado a mi padre Jesús Hernando Gutierrez Gómez que siempre estuvo a mi lado dándome todo el apoyo, amor, y comprensión; por enseñarme lo importante de luchar por los sueños y objetivos, por creer en ideales y por amar lo que hago. Al papá orgulloso de su hija, dedico este logro como símbolo de su legado, como muestra de su meta alcanzada y como el final de sus preocupaciones. Padre mío me encantaría compartir este momento contigo, aunque en cuerpo ya no estés.

Dedico este proyecto de grado, a mi madre Patricia Cortés Sierra, por su apoyo incondicional, por darme esperanza en los momentos difíciles, por su amor, dedicación y acompañamiento durante este proceso y toda mi vida.

Finalmente dedico a mi hermana por estar siempre conmigo dando luz.

**Laura Lucia Gutierrez Cortés**

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero agradecer a mis padres y mi hermana por darme el apoyo y la motivación todos los días de este proceso, y de mi vida en general. En especial quiero agradecer a mi tío José Gutierrez Gómez y familia, por su gesto de bondad, amor, por su apoyo, acompañamiento y, sobre todo, por brindarme la oportunidad de seguir en este sueño.

Igualmente quiero agradecer a profesor, ingeniero Wilmar Martínez Urrutia por su dedicación, compromiso y conocimientos compartidos para el desarrollo de este proyecto.

Agradezco a la Fundación Universidad de América por brindarme herramientas formativas a través su equipo administrativo y docente, ya que mediante su orientación brindaron sus conocimientos profesionales, los cuales serán empleados en una vida profesional capaz.

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los diferentes criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

# TABLA DE CONTENIDO

	<b>pág,</b>
<b>RESUMEN</b>	12
<b>INTRODUCCIÓN</b>	13
<b>1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA</b>	15
1.1. Justificación	15
1.2. Objetivos del proyecto	16
<i>1.2.1. Objetivo general</i>	16
<i>1.2.2. Objetivos específicos</i>	16
1.3. Planteamiento del problema	16
<b>2. MARCO REFENCIAL</b>	19
2.1. Antecedentes	19
2.2. Marco Teórico	25
<b>3. SISTEMA ACTUAL</b>	30
3.1. Caracterización del proceso de calibración en cámara de vacío	30
<i>3.1.2. Norma de calibración</i>	36
3.2. Selección de alternativas para el diseño automatizado	38
<i>3.2.1. Método de Scoring</i>	39
<i>3.2.2. Matriz DOFA</i>	41
<b>4. DISEÑO CONCEPTUAL Y DETALLADO DEL SISTEMA AUTOMATIZADO</b>	44
4.1. Diseño conceptual	44
<i>4.1.1. Caracterización del funcionamiento de la cámara de vacío</i>	44
4.2. Análisis Dinámico	48
<i>4.2.1. Función de transferencia</i>	48
4.3. Diseño automatizado	54
4.4. Programación del PLC	58
4.5. Análisis de resultados	65
<b>5. MANUALES</b>	72

<b>5.1. Manual de instalación y operación</b>	72
<b>5.2. Manual de mantenimiento</b>	79
<b>6. ANALISIS DE COSTOS TOTALES</b>	83
<b>6.1. Costos de diseño</b>	83
<b>6.2. Costos de materiales</b>	84
<b>7. CONCLUSIONES</b>	86
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	89
<b>ANEXOS</b>	92



## LISTA DE FIGURAS

	<b>pág.</b>
<b>Figura 1.</b> Diagrama causa y efecto	17
<b>Figura 2.</b> Secuencia de calibración 1	20
<b>Figura 3.</b> Secuencia de calibración de un laboratorio.	23
<b>Figura 4.</b> Secuencia 1 de calibración de manómetros.	24
<b>Figura 5.</b> Secuencia 1 de calibración de manómetros.	25
<b>Figura 6.</b> Diagrama de flujo	26
<b>Figura 7.</b> Diagrama del sistema actual	30
<b>Figura 8.</b> Cámara de vacío	31
<b>Figura 9.</b> Bloque de válvulas.	32
<b>Figura 10.</b> Patrón de calibración.	34
<b>Figura 11.</b> Diagrama de flujo del proceso de calibración	35
<b>Figura 12.</b> Representación gráfica de la secuencia A.	36
<b>Figura 13.</b> Representación gráfica de la secuencia B.	37
<b>Figura 14.</b> Representación gráfica de la secuencia C.	37
<b>Figura 15.</b> Matriz DOFA	41
<b>Figura 16.</b> Ubicación del lugar donde se realizan la toma de datos	45
<b>Figura 17.</b> Presión de salida Vs Presión en la cámara	46
<b>Figura 18.</b> Porcentaje de apertura Vs presión de salida.	47
<b>Figura 19.</b> Porcentaje de apertura Vs presión interna de la cámara.	47
<b>Figura 20.</b> Representación gráfica de un sistema para la determinación de una función de transferencia.	49
<b>Figura 21.</b> Caracterización de la presión al interior de la cámara y la presión de salida.	50
<b>Figura 22.</b> Función de transferencia para la presión al interior de la cámara y la presión de salida.	50
<b>Figura 23.</b> Porcentaje de apertura Vs presión de salida	51
<b>Figura 24.</b> Función de transferencia para el Porcentaje de apertura Vs presión de salida.	51
<b>Figura 25.</b> Porcentaje de apertura VS Presión al interior de la cámara de vacío.	52

<b>Figura 26.</b> Función de transferencia para el Porcentaje de apertura VS Presión al interior de la cámara de vacío.	52
<b>Figura 27.</b> Funciones comparadas por Matlab	53
<b>Figura 28.</b> Función de transferencia seleccionada por Matlab como la más aproximada.	54
<b>Figura 29.</b> Circuito electroneumático	55
<b>Figura 30.</b> Parametrización de la válvula proporcional.	56
<b>Figura 31.</b> Muestra de ejecución se secuencias.	56
<b>Figura 32.</b> Parte 1 de la programación del PLC	59
<b>Figura 33.</b> Parte 2 de la programación del PLC	60
<b>Figura 34.</b> Parte 3 de la programación del PLC.	61
<b>Figura 35.</b> Subfunción de temporización	62
<b>Figura 36.</b> Programación en C de los multiplicadores	63
<b>Figura 37.</b> Programación de la subfunción precargas. ¡Error! Marcador no definido.	66
<b>Figura 38.</b> Función de transferencia voltaje Vs salida presión	65
<b>Figura 39.</b> Polos y ceros de función de transferencia voltaje vs salida presión válvula.	67
<b>Figura 40.</b> Polos y ceros de función de transferencia porcentaje de apertura Vs presión de salida	68
<b>Figura 41.</b> Comparación del comportamiento de las dos funciones	69
<b>Figura 42.</b> Configuración del ajuste del error	70
<b>Figura 43.</b> Componentes sistema automatizado.	72
<b>Figura 44.</b> Conexiones eléctricas para el PLC Schneider del sistema automatizado	74
<b>Figura 45.</b> Conexiones eléctricas y neumáticas para la válvula proporcional.	75
<b>Figura 46.</b> Gabinete eléctrico.	76
<b>Figura 47.</b> Conexión neumática	76

## LISTA DE TABLAS

	<b>pág.</b>
<b>Tabla 1.</b> Características de las secuencias de calibración.	38
<b>Tabla 2.</b> Criterios y selección de alternativas	39
<b>Tabla 3.</b> Tabla de calibración	57
<b>Tabla 4.</b> Tabla de errores	58
<b>Tabla 5.</b> Tabla de fallas e inspecciones	80
<b>Tabla 6.</b> Fallas y actividades a realizar	81
<b>Tabla 7.</b> Rubros generados para el diseño	83
<b>Tabla 8.</b> Costos de los materiales y elementos necesarios para la operación del sistema	84
<b>Tabla 9.</b> Costo total proyecto.	84
<b>Tabla 10.</b> Total de ingresos estimados por calibración al año.	85

## RESUMEN

En el presente documento se realizará el diseño de un sistema automatizado para una cámara de vacío utilizada para la calibración de instrumentos de medición de presión absoluta. El desarrollo del proyecto inicia con la identificación de la necesidad de automatizar el proceso de calibración de instrumentos que trabajan en condiciones de presión absoluta; posteriormente se hace la caracterización del sistema como se encuentra actualmente; luego, se realizará la descripción de la norma técnica que se aplica para la calibración. En la descripción de esta, se aclarará cuáles de las secuencias serán empleadas para la calibración de los instrumentos. Después, por medio de estrategias de selección fue posible establecer que una válvula proporcional es la opción adecuada para la automatización.

Con la válvula proporcional como la mejor opción para el desarrollo de la automatización, se realiza en primer lugar un análisis dinámico del sistema actual, para lo cual será necesario hacer un muestreo experimental, usando Matlab; con esta caracterización se realiza la selección de una válvula proporcional y un PLC para posteriormente hacer el diseño de su programación. Esto el objetivo de poder emigrar de una calibración manual a una automatizada sin producir afectaciones nocivas de acuerdo con lo contemplado por la norma DKD-R-6

Posteriormente, se realizan los manuales de mantenimiento, operación e instalación con el fin de poder entregar un diseño completo y duradero del sistema automatizado. Finalmente se hace un análisis de costos, para definir la inversión aproximada que debe realizarse para la automatización del sistema.

**Palabras clave:** Automatización, válvula proporcional, calibración, análisis dinámico.

## INTRODUCCIÓN

La automatización de los procesos de calibración se da como respuesta a la necesidad de lograr optimizar todos los procesos industriales, mejorando tiempos de calibración, entrega y de igual manera proporcionar eficiencia en la calibración de los instrumentos que trabajan bajo condiciones de presión absoluta.

En la actualidad se tiene la *cámara de vacío*, como una de las herramientas utilizadas para la calibración de instrumentos, debido a este método proporciona las condiciones físicas necesarias. La calibración de los instrumentos se realiza de manera manual, pero, aunque actualmente se realiza así, esta ejecución no es totalmente eficiente, teniendo en cuenta existen altas probabilidades de error durante la ejecución de esta. Es por eso que se hace necesario un control automatizado del proceso, donde se garantiza la estabilidad de los elementos primarios que controlan la presión del sistema y donde se pueda obtener la mayor exactitud que sea posible, garantizado una repetibilidad con menor histéresis durante el proceso de calibración.

Por las razones anteriormente mencionadas se tiene como principal objetivo diseñar un sistema de control automático, para una cámara de vacío que permita la calibración de instrumentos, que funcionan bajo intervalos de presión absoluta.

Para llevar a cabo este proyecto es necesario desarrollar en su totalidad los objetivos que durante el avance del desarrollo del proyecto encontraremos en los siguientes apartados:

- ✓ El primer objetivo de identificar los elementos relevantes del proceso los encontramos en el inciso 3.1.
- ✓ El segundo objetivo, donde se encontrará la selección de la mejor alternativa de calibración, la encontramos en el inciso 3.2.
- ✓ Posteriormente encontramos en el capítulo 4 el diseño conceptual y detallado del sistema automatizado.
- ✓ Continuando con los manuales de instalación, operación y mantenimiento ubicados en el capítulo 5.

- ✓ Finalmente ubicamos el análisis de costos del proyecto en el capítulo 6 del documento.

El alcance del proyecto, consiste en el diseño de un sistema de automatización para una cámara de vacío empleada para la calibración de barómetros en presión absoluta que permita la calibración en presiones absolutas, con ajuste y diferencial de cierre para barómetros y de instrumentos que funcionen bajo intervalos de presión absoluta ubicados entre los 110 y los 1100 milibares. implementando procesos estandarizados siguiendo las normas internacionales y de alta calidad, requeridos por la empresa Calibration Service S.A.S.

## **1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA**

### **1.1. Justificación**

El principal motivo de este proyecto de grado, es contribuir a la solución a la necesidad existente en la empresa Calibration Service S.A.S, empresa acreditada dedicada a la calibración de instrumentos de todo tipo de industria. La calibración adecuada de un instrumento de medición brinda exactitud en la medición. En Calibration Service S.A.S se prestan servicios que garantizan las especificaciones técnicas requeridas, respondiendo a los requisitos establecidos en las normas de calidad, garantizando la exactitud en las mediciones. En este orden de ideas, es posible llegar a resultados con calidad en las medidas, pues no se perderá confianza en la calidad del servicio prestado.

El proyecto presentado tiene como aporte importante el proceso de automatización de un procedimiento que normalmente se realiza de manera manual. Donde los errores humanos influyen directamente en la calidad de la calibración de los instrumentos, aunque se encuentren estandarizados los procedimientos, con la automatización se permitirá la reducción de tiempos, garantizado repetibilidad con menor histéresis y errores más pequeños durante el proceso de calibración, con el fin de hacerlos más competitivos para el mercado.

De no desarrollarse este proyecto, se deberá buscar otro tipo de alternativa para la mejora del método de calibración, atrasando completamente el desarrollo de los diferentes tipos de proyectos con los que cuenta la empresa. Teniendo en cuenta también que los instrumentos en la industria están expuestos a daños que afectan el estado de la calibración de los mismos, estas fallas por ende pueden repercutir en la medición realizada durante el proceso industrial donde sean empleados variando resultados o alterando el proceso.

## **1.2. Objetivos del proyecto**

### **1.2.1. Objetivo general**

Diseñar un sistema de control automático adecuado, para una cámara de vacío que permita la calibración de barómetros e instrumentos, que funcionen bajo rangos de presión absoluta.

### **1.2.2. Objetivos específicos**

1. Identificar elementos relevantes para el procedimiento de calibración en cámara de vacío.
2. Seleccionar la mejor alternativa de automatización.
3. Elaborar el diseño conceptual y detallado del sistema automatizado.
4. Crear manuales de operación, instalación y mantenimiento.
5. Realizar análisis de costos totales.

## **1.3. Planteamiento del problema**

Actualmente, Calibration Service S.A.S tiene como proyecto prestar el servicio de calibración de manovacúómetros y de instrumentos que funcionen bajo intervalos de presión absoluta, todo bajo estándares de calidad metrológica estipuladas en la norma ISO 17025:2017, que busca la acreditación de este proceso; para esto es necesario el automatizar una cámara de vacío ya existente que requiere funciones de apertura y cierre automáticas, acorde a las presiones establecidas por patrones de medición, que se ajuste a las necesidades y limitaciones del proceso. De acuerdo con la experiencia de servicio y los estudios de mercado colombiano realizados por la empresa Calibration Service S.A.S. se concluye que actualmente para el servicio de calibración de barómetros y de instrumentos que funcionen bajo intervalos de presión absoluta, en Colombia no se oferta un servicio basado en un sistema de calibración automatizado para barómetros, actualmente según el directorio de búsqueda de la ONAC existen 31 laboratorios acreditado bajo la norma ISO 17025:2017 [1], que prestan un servicio de calibración de instrumentos que trabajan en condiciones de presión absoluta, pero estos no son sistemas

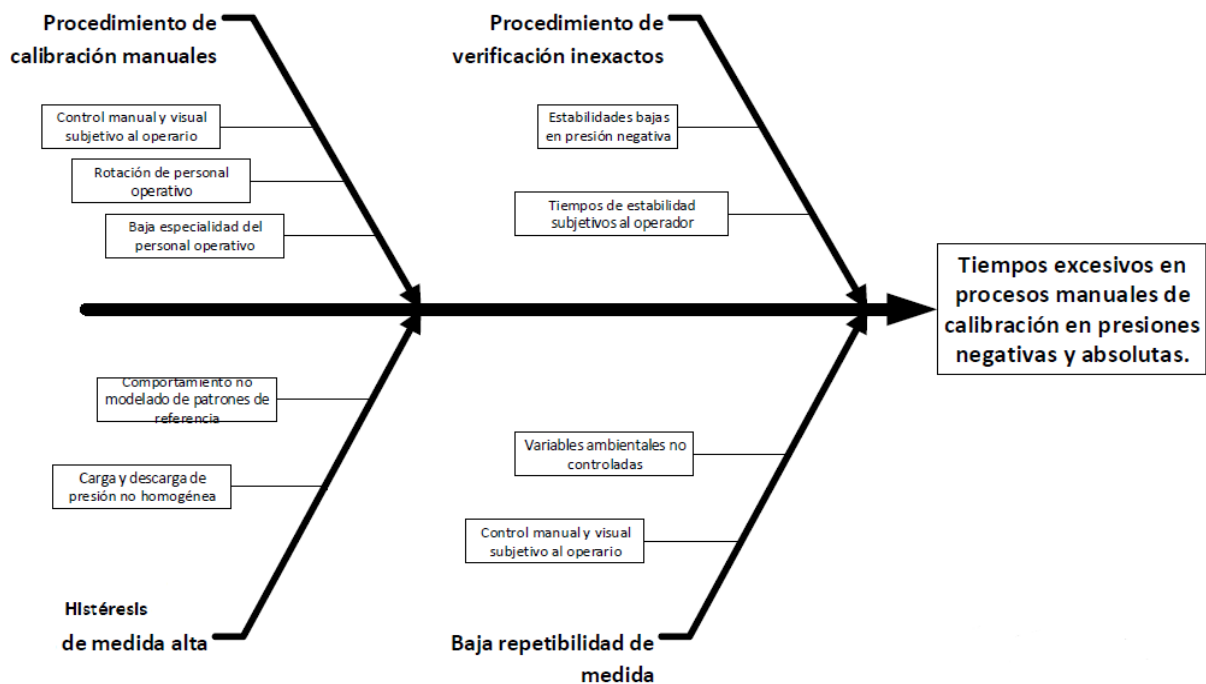


automatizados, con tiempos de servicio muy prolongados, basados en la norma DKD-R 6-1 "Calibración de instrumentos medidores de presión", Edición 03/2014 [2], CEM ME-017. También el "Procedimiento para la calibración de transductores de presión con salida eléctrica" [4], edición digital 1, Procedimiento ME-003 Calibración de manómetros, vacuómetros y manovacúómetros. CEM, edición digital 3, 2019 [4], y Guidelines on the Calibration of Electromechanical and Mechanical Manometers EURAMET Calibration Guide No. 17 Versión 4.0 (04/2019) [6]. Todos estos servicios con tiempos de entrega superiores a 12 días hábiles, que son tiempos excesivos para la gran mayoría de industrias que solicitan este tipo de calibración.

Por lo tanto, es necesario un control de ciclo automatizado que garantice una estabilidad de los elementos primarios que controlan la presión del sistema, donde se obtengan la mayor exactitud posible, garantizando una repetibilidad con menor histéresis en la medida y una gran estabilidad, sin depender de la manipulación humana y toda la incertidumbre que esto conlleva. Se presenta a continuación un diagrama causa efecto para el problema planteado en la figura 1.

**Figura 1.**

*Diagrama causa y efecto*



**Nota.** En la figura se muestra el diagrama donde se define la problemática actual.

Lo que hace identificar la pregunta problema,

¿Cuál es el diseño de automatización y control adecuado para una cámara de vacío dedicada a la calibración de barómetros y de instrumentos que funcionen bajo intervalos de presión absoluta?

## 2. MARCO REFENCIAL

### 2.1. Antecedentes

En esta sección del documento se presentarán tres (3) secuencias y procedimientos de calibración de instrumentos de medición de presión, que se han realizado en algunos países. Mostrando las diferencias y similitudes presentes en cada una de las secuencias.

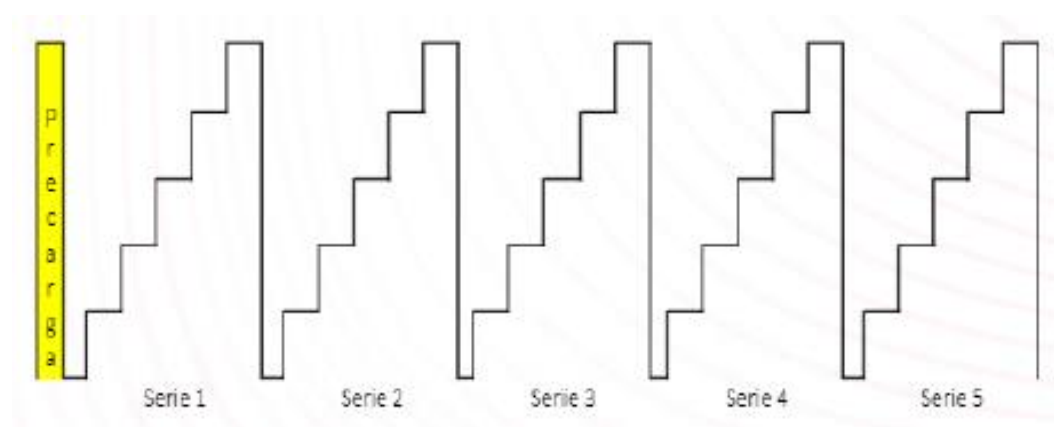
#### Antecedente N° 1

Uno de los diferentes métodos análogos de la calibración de instrumentos que trabajan en condiciones de presión, realizado en Perú: [7]

- ✓ Se realiza la conexión del patrón de la cámara barométrica
- ✓ Se seleccionan valores de presión a calibrar
- ✓ Colocar el barómetro a calibrar dentro de la cámara barométrica, la posición del barómetro dentro de la cámara será aquella que permita su uso y/o aquella que indique en el manual del barómetro a calibrar.
- ✓ Cerrar la cámara barométrica verificando que la que sistema quede completamente aislado y no presente variaciones de presión.
- ✓ Registrar las condiciones ambientales iniciales.
- ✓ Iniciar el proceso de calibración para lo cual se debe buscar los valores de presión de menor a mayor valor.
- ✓ Para el caso de barómetros análogos y digitales de cambio instantáneo de presión, buscar y fijar los valores de presión a calibrar en el instrumento patrón, anotando en dicho momento la indicación dada en el instrumento a calibrar. Realizar este proceso cinco veces para cada valor de presión a calibrar. En la figura 2 encontramos la secuencia de calibración.

## Figura 2.

### Secuencia de calibración 1



**Nota.** En la figura representa la secuencia empleada en el proceso de calibración ejecutado en Perú. Tomado de D. I. C. L., Procedimiento para la calibración de instrumentos de medición de presión absoluta (barómetros), Lima, Perú: Laboratorio de la fuerza y presión, 2018.

- ✓ Para el caso de barómetros digitales de cambio de presión lenta (cada 1;5;10;15, etc. minutos) es necesario buscar y fijar el valor de presión solicitado en el instrumento patrón. Luego de haber logrado aproximar al valor solicitado y/o punto de calibración seleccionado, se espera el cambio de presión en el barómetro a calibrar, en dicho instante anotar ambos valores de presión.
- ✓ En la calibración de barómetros analógicos hacer vibrar ligeramente la cámara barométrica junto con el barómetro a calibrar antes de registrar para eliminar el error de fricción de la aguja indicadora.
- ✓ Registrar las condiciones ambientales finales.

Esta técnica de calibración de instrumentos que trabajan en condiciones de presión absoluta análogos o digitales se basa en: [8] el método de comparación directa, el cual consiste en comparar las indicaciones del barómetro a calibrar respecto a las indicaciones dadas en el instrumento de medición de presión absoluta patrón (instrumento patrón), estando el barómetro dentro de la presión aislada (cámara barométrica), en el cual se puede variar la presión absoluta de forma continua y controlada.

## **Antecedente N°2**

Otra norma de calibración de instrumentos de medición de presión absoluta, encontrada por medio de búsqueda documental, está como por ejemplo en procedimiento ejecutado por el Centro Español de Metrología CEM [4]:

Con el generador o compresor se irá generando presión hasta alcanzar un valor cercano al primer punto definido de presión, a continuación, con el volumen variable se ajustará la presión hasta que la lectura del patrón o instrumento sea la deseada. Se recomienda fijar la indicación de la aguja del manómetro a los trazos de la escala cuando el manómetro a calibrar sea analógico y, por el contrario, fijar la indicación del patrón cuando el manómetro a calibrar sea digital.

En el caso de que el manómetro a calibrar sea analógico, la lectura del mismo se realizará después de haberle hecho vibrar ligeramente para evitar errores producidos por fricciones mecánicas.

La medida será válida siempre que el sistema sea estable y no se observen saltos o variaciones en las indicaciones del patrón e instrumento.

Se repetirá este paso con los siguientes puntos de calibración, siempre aumentando la presión hasta llegar al valor máximo definido.

El mismo proceso se realizará, pero ahora en sentido de presiones decrecientes hasta llegar al cero del manómetro.

Se realizará la lectura del cero, siempre que sea posible, y se volverá a iniciar el ciclo.

Se recomienda realizar dos series de medidas para manómetros de clase de precisión 0,25 o peor y tres series de medida para manómetros de clase de precisión mejor de 0,25. Las series se realizarán siguiendo los ciclos definidos anteriormente: creciente y decreciente, con lo cual obtendremos cuatro valores por punto de calibración para el primer caso y seis para el segundo.

Una vez finalizada la calibración y antes de quitar el montaje conviene analizar los datos obtenidos por si fuese necesario repetir algún punto de valor dudoso.

También se puede evidenciar que existe una secuencia de calibración generada para un laboratorio de metrología esta secuencia consiste en: [9]

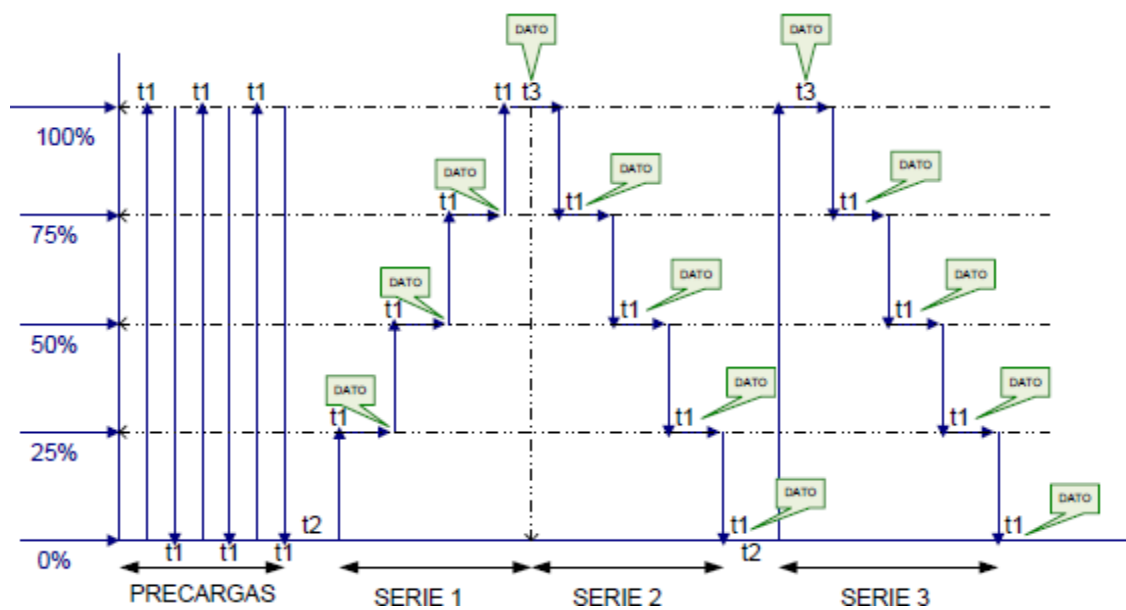
- Se deben realizar tres precargas al manómetro que se va a calibrar, con el fin, de acondicionarlo a la medición y disminuir la generación de histéresis en los resultados, llevando la presión al valor máximo de la escala (100% de su carga) y mantenerlo en ese estado por treinta segundos (30s). Enseguida hay que volver a su valor mínimo despresurizando el sistema y permanecer igualmente por 30s.
- Luego de haber realizado la anterior precarga y repetirla hasta completar una serie de tres precargas, es conveniente mantener el sistema en reposo por cinco minutos y luego comenzar con la serie de mediciones.
- Partiendo de cero por ciento (0%) de la carga, se debe llevar con el compresor de presión o con el suministro de presión deseado, hasta el 25% de la carga total permitida por ítem en calibración y permanecer por 30s mientras se registra el valor mostrado por ambos instrumentos utilizados en la medición a manera de comparación. De esta manera continuar el registro de los datos en el 50%, 75% y el 100% y en su máximo valor de presión añadir diez minutos de permanencia a los 30s de cada aumento. Con la finalización de este tiempo de espera de 10m 30s, junto con la toma de datos se completa la sección de medidas ascendentes y se continua con la medición descendente de los valores de presión por comparación.
- Ahora en lugar de aumentar la presión se debe reducir el valor desde el 100% hasta cero, pasando por los mismos valores anteriores de subida (75%, 50% y 25%) y en el momento que el manómetro señale cero con aguja indicadora, se debe esperar por un tiempo de cinco minutos para continuar con la tercera serie del procedimiento.
- Esta última fracción de la toma de datos en la calibración de presión inicia con la carga total, se comprueba que el patrón se encuentra indicando el máximo valor del instrumento que se calibra, se mantiene ese valor por diez minutos y se registran los valores expuestos por ambos.

- De igual forma como se hizo en a serie de mediciones descendentes se realiza la toma de datos, como la intención de comprobar la similitud de los valores y hallar muestras de error en la medición. Pausando cada 25% de la presión en disminución por 30s y registrando la información conjunta de manómetros.

En la figura 3 se referencia la secuencia empleada para la calibración de instrumentos de presión.

**Figura 3.**

*Secuencia de calibración de un laboratorio.*



**Nota.** En la figura representa la secuencia empleada en el proceso de calibración ejecutado en España. Tomado de C. E. d. M. CEM, Procemiento ME-003 de calibración de manómetros, vacuómetros y manovacuómetros, Madrid, España, 2019.

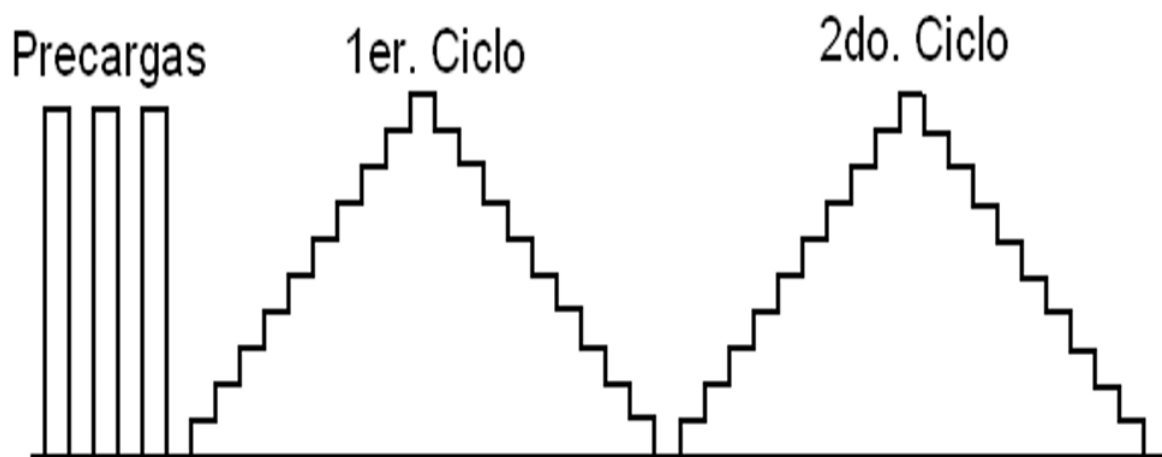
### Antecedente N°3

En México, la calibración a diferentes presiones estáticas, por el método de ciclos. [10] Para un manómetro que se calibró a tres diferentes presiones estáticas, 20 kPa, 50 kPa y hasta 100 kPa. Antes de iniciar la medición de los puntos seleccionados, se aplican tres precargas al manómetro a una presión diferencial de 3,5 kPa, permitiendo lapsos de reposo, entre el sistema presurizado y el sistema libre de presión diferencial de 5 min, así mismo, entre cada punto de medición se deja estabilizar la lectura durante 5 min. El método de toma de lecturas fue el mismo para las diferentes presiones estáticas. Entre cada calibración, a diferente presión

estática, se permitió que el manómetro diferencial se relajara a presión atmosférica por lo menos durante 16 h. Cada calibración consta de dos ciclos y cada ciclo de dos series que se miden en sentido ascendente y descendente, en cada serie se miden diez puntos distribuidos de manera homogénea. El procedimiento de calibración se ilustra en la figura 4.

**Figura 4.**

*Secuencia 1 de calibración de manómetros.*



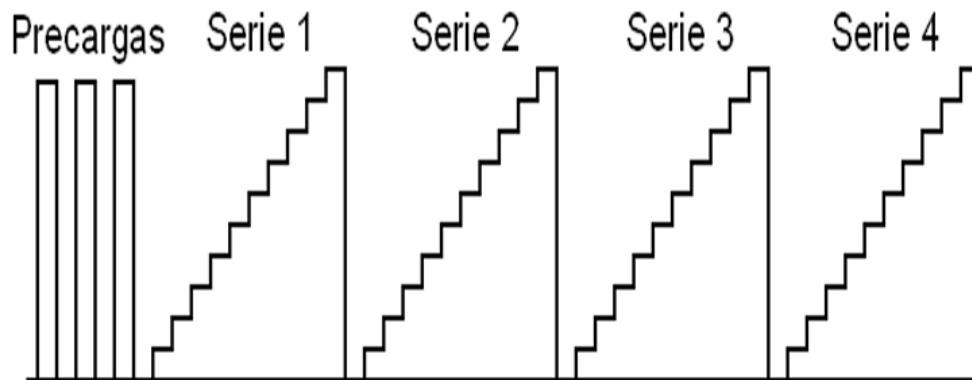
Nota. En la figura representa una de las secuencias empleadas en uno de los procesos de calibración ejecutados en México. Tomando de S. Zúñiga, P. Olvera y J. Torres, Caracterización de un Manómetro Diferencial Digital Usado como Patrón de Transferencia a 3,5 kPa, Santiago de Querétaro, México: Centro Nacional de Metrología, 2008.

También, en México se evidenció un ciclo de calibración de un manómetro Diferencial por el método de series ascendentes. Que consiste en [10] la calibración a una presión estática de 20 kPa, se hacen las precargas de manera similar al punto anterior, excepto que después de terminar cada serie se permite un tiempo de estabilización de 15 min antes de iniciar las mediciones en la siguiente. El método se ilustra en la figura 5.



## Figura 5.

*Secuencia 1 de calibración de manómetros.*



**Nota.** En la figura representa una de las secuencias empleadas en uno de los procesos de calibración ejecutados en México. Tomando de S. Zúñiga, P. Olvera y J. Torres, Caracterización de un Manómetro Diferencial Digital Usado como Patrón de Transferencia a 3,5 kPa, Santiago de Querétaro, México: Centro Nacional de Metrología , 2008.

## 2.2. Marco Teórico

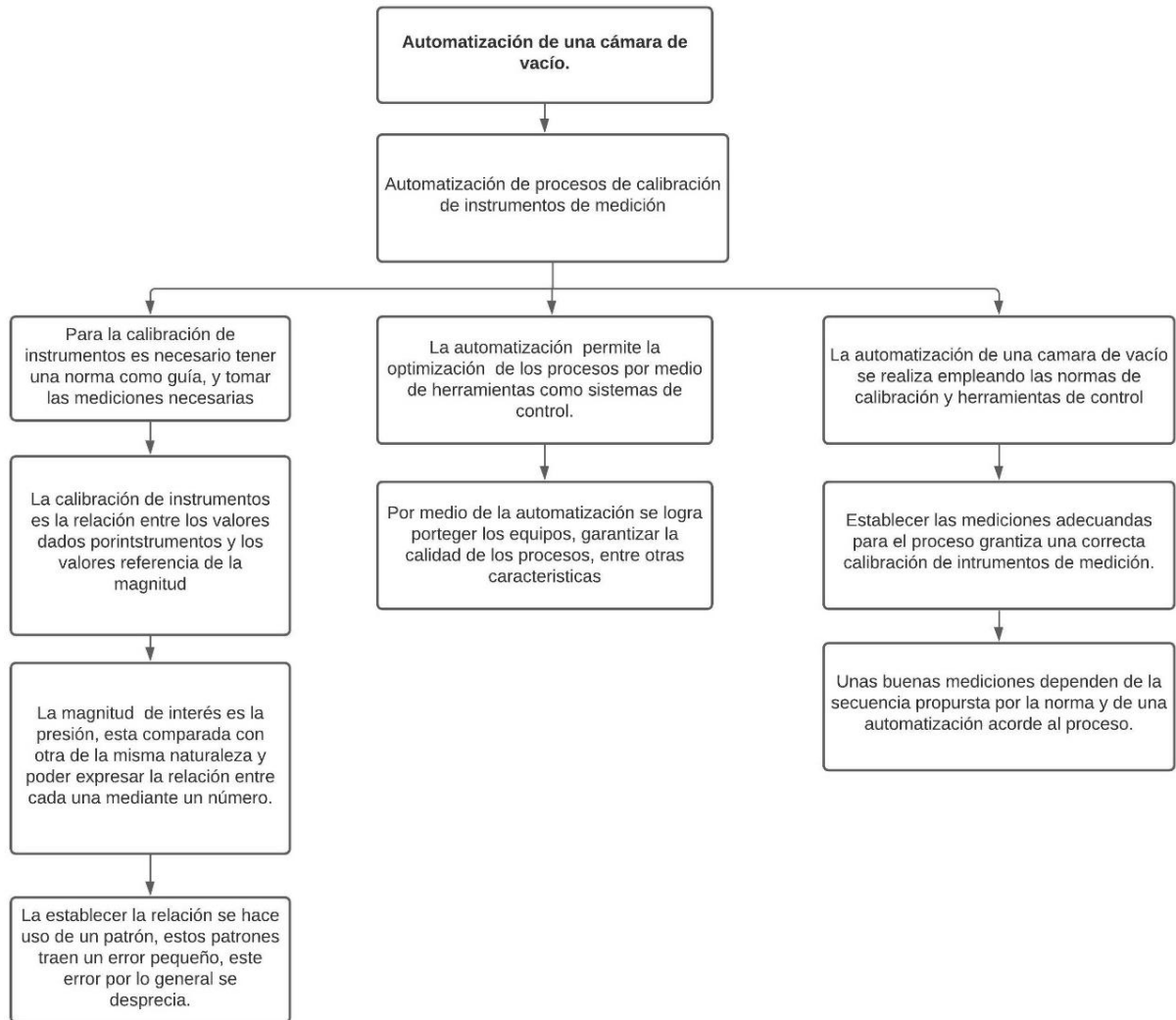
La metrología actualmente cuenta con la calibración de los instrumentos de medición ya que un instrumento bien calibrado toma datos más exactos. Los instrumentos que trabajan en presión absoluta pueden calibrarse en cámaras de vacío, esta calibración puede basarse o guiarse según la norma europea DKD-R-6 [2] ya que esta ayuda a garantizar una buena calibración.

La calibración puede definirse como la relación existente entre los valores dados por el instrumento con los valores referencia de una magnitud o un patrón [10]. El proceso de calibración puede realizarse de forma automatizada, optimizando y aportando control al procedimiento ya que es importante tener en cuenta que durante un proceso de calibración solo se debe cambiar una variable a la vez [12]. Con la automatización se reducen tiempos de calibración, se reduce el error y se elimina en parte la intervención humana, que en muchos casos aporta gran error e incertidumbre en los resultados alcanzados durante un proceso totalmente manual. Con la automatización se logra garantizar buena calibración de los instrumentos, la estabilidad del sistema y exactitud.

En la figura 6 que corresponde a un diagrama de flujo en el que se puede identificar la relación existente entre la calibración de instrumentos y la automatización del proceso, junto con todos los factores que durante el desarrollo del proceso intervienen.

**Figura 6.**

*Diagrama de flujo*



**Nota.** En la figura se establece la relación de los términos con sus definiciones con el desarrollo del proyecto.

En esta sección se realizará una breve introducción de algunos conceptos fundamentales [13] para poder comprender el desarrollo de este proyecto y de este proyecto de grado.

En cuanto al proceso de calibración es importante tener en cuenta que [12] durante la calibración, solo se debe cambiar una variable a la vez, en condiciones estáticas. La comparación se hace con un estándar de referencia, que debe ser rastreable al laboratorio de estándares. También debe tenerse en cuenta que, se está haciendo en condiciones controladas de carga, es decir, en condiciones ideales para que los instrumentos pueden mostrar un conjunto de errores diferentes durante el uso bajo condiciones reales.

La operación que bajo condiciones especificadas establece, en una primera etapa, una relación entre otros valores y sus incertidumbres de medida asociadas obtenidas a partir de los patrones de medida, en una segunda etapa, se utiliza la información tomada para poder establecer una relación que permita obtener un resultado de medición, el cual se expresa mediante gráficos, funciones, tablas o una curva de calibración. [9]

Teniendo en cuenta que una magnitud como la presión que se define como una fuerza por unidad de superficie y puede expresarse en unidades tales como pascal, bar, atmósferas, kilogramos por centímetro cuadrado y psi (libras por pulgada cuadrada). En el Sistema Internacional (S.I.) está normalizada en pascal [8]. La presión [14] es una de las magnitudes de más uso en cualquier tipo de industria, ya que por medio de la presión se puede determinar con facilidad variables como volumen, flujo y densidad, en consecuencia, es de gran importancia que la medición de la presión sea correcta. Para llegar a una toma de datos correctos es necesario de los instrumentos estén debidamente calibrados.

Mundialmente, la ciencia a cargo de la calibración de instrumentos es la metrología, que se define como la ciencia de las medidas, así como el estudio, el mantenimiento y la aplicación del sistema de pesos y medidas. La metrología es una herramienta que protege a la industria de medidas incorrectas y promueve la calidad, el desarrollo de los productos y la industria, así como la competitividad en los mercados. [15]. La metrología en la actualidad [16] juega un importante papel tanto en la industria como en el comercio mundial como en Colombia, donde la metrología ha tomado gran relevancia por todo lo que aporta a nivel industrial, salud y en otros campos donde se puede ver esta ciencia. Hoy en día en Colombia la regulación y normatividad está establecida, desarrollada y controlada por la

Super Intendencia de Industria y Comercio (SIC) y por el Centro de Control de Calidad y Metrología (CCCM).

Una forma de calibrar instrumentos que trabajan bajo presión absoluta es mediante el uso de cámaras de vacío, donde por medio del uso de vacío, que es la ausencia de las moléculas de gas dentro de un recinto cerrado o un sistema; con una temperatura constante esto se llevara a la reducción de la presión del gas. Esta es una tecnología que en la actualidad es indispensable en muchas ramas de la industria, la investigación y la ciencia, tanto, que resulta imposible enumerar la cantidad de aplicaciones que esta tecnología puede ser empleada. El vacío es la diferencia de presiones entre la presión atmosférica existente y la presión absoluta, es decir, es la presión medida por debajo de la atmosférica [8].

La calibración de instrumentos se logra mediante mediciones, las cuales hacen parte de un proceso que consiste en obtener experimentalmente uno o varios valores que pueden atribuirse razonablemente a una magnitud, no son de aplicación a propiedades cualitativas. [9]

Las mediciones se realizan en instrumentos de medición que son los dispositivos usados para medir magnitudes físicas, estos instrumentos se clasifican por el tipo de medición que realizan, si son de medición directa o de medición indirecta [17]. Las mediciones se comparan, estas comparaciones realizan con el uso de un patrón, un objeto que materializa una unidad o una magnitud determinada, con el mayor grado de precisión posible y con la máxima inalterabilidad [17].

En el proceso de calibración existen diferentes tipos de patrones de medición, que se definen como representación física de una unidad de medición, según Jordi Chiva estos patrones se clasifican de la siguiente manera: [15]

Patrones internacionales: Se definen por acuerdos internacionales. Representan ciertas unidades de medida con la mayor exactitud que permite la tecnología de producción y medición. Los patrones internacionales se evalúan y verifican periódicamente con mediciones absolutas en términos de unidades fundamentales.

Patrones primarios: También llamados básicos, se encuentran en los laboratorios de patrones nacionales en diferentes partes del mundo. Los patrones primarios representan unidades fundamentales y algunas de las unidades mecánicas y

eléctricas derivadas, se calibran independientemente por medio de mediciones absolutas en cada uno de los laboratorios nacionales.

Patrones secundarios: Son los patrones básicos de referencia que se usan en los laboratorios industriales de medición. Estos patrones se conservan en la industria particular interesada y se verifican localmente con otros patrones de referencia en el área. La responsabilidad del mantenimiento y calibración de los patrones secundarios depende del laboratorio industrial. Patrones de trabajo Son las herramientas principales en un laboratorio de mediciones. Se utilizan para verificar y calibrar la exactitud y comportamiento de las mediciones efectuadas en las aplicaciones industriales.

El proyecto en desarrollo contempla la automatización de una cámara de vacío, la automatización cuya definición proviene de la palabra la automática, como el conjunto de métodos y procedimientos para la sustitución del operario en tareas físicas y mentales previamente programadas. De esta definición original se desprende la definición de la automatización como la aplicación de la automática al control de procesos industriales [18].

### 3. SISTEMA ACTUAL

#### 3.1. Caracterización del proceso de calibración en cámara de vacío

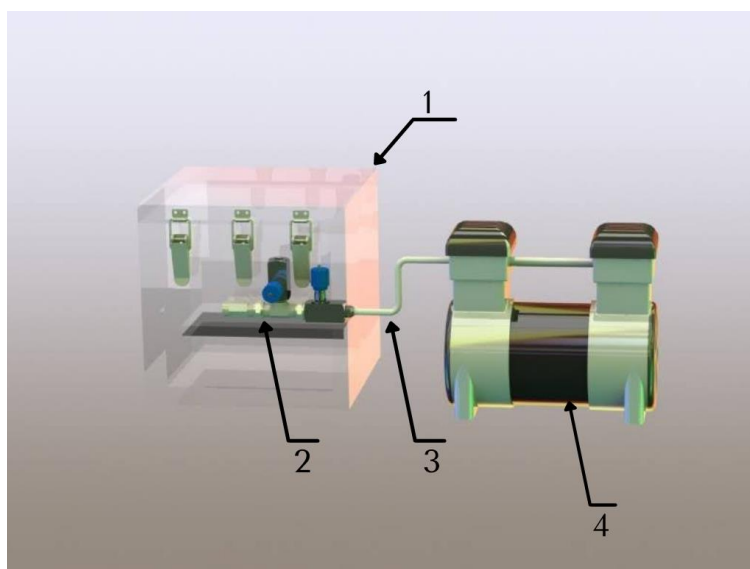
El sistema de calibración de instrumentos de medición de presión absoluta tiene en la actualidad los siguientes componentes; componentes que se evidencian en figura 7:

1. Cámara de vacío, hecha totalmente en acrílico.
2. Bloque de válvulas, ver especificaciones en el anexo 2
3. Manguera neumática de  $\frac{1}{4}$  de diámetro.
4. Compresor.

El intervalo de presión utilizada para el procedimiento está ente los 110 y los 1100 milibares.

**Figura 7.**

*Diagrama del sistema actual*



**Nota.** En la figura está el montaje actual del sistema, se encuentran numerados para ser relacionado con los incisos de los componentes del sistema. El CAD del compresor es tomado de: GrabCommunity. “Free oil motor”, <https://grabcad.com/library/free-oil-compressor-1> [En línea]. Acceso [09 de agosto].

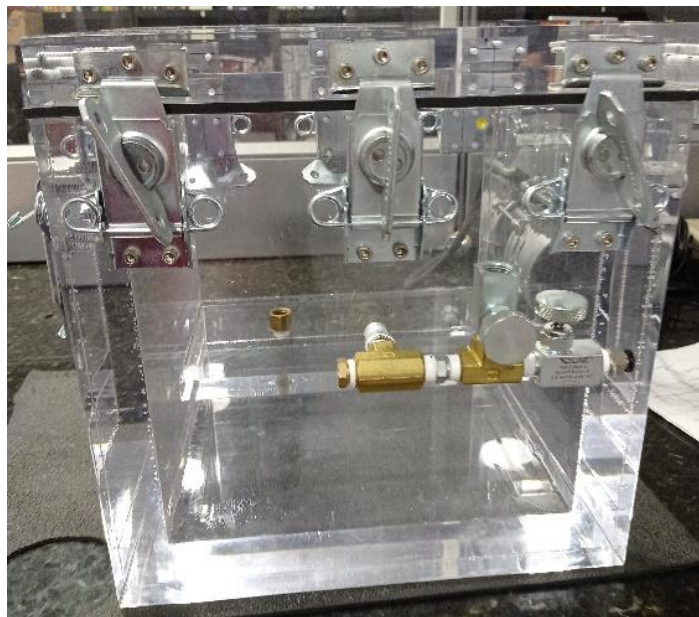
### **3.1.1. Proceso actual de calibración**

Actualmente, Calibration Service S.A.S no cuenta con un proceso automatizado establecido para calibración de instrumentos de medición de presión absoluta, por el momento se realizan pruebas de funcionamiento y se establecen parámetros.

Las pruebas actuales del proceso dan inicio con las conexiones eléctricas y neumáticas del sistema, la conexión del compresor a una fuente de 120V y la conexión neumática del compresor al bloque de válvulas para el suministro del sistema. Luego, se verifica que en general el sistema y todos sus elementos se encuentre en buen estado. Una vez realizado lo anterior, se debe colocar en el interior de la cámara de vacío con dimensiones de 335mm X 300 mm X 335mm y espesor de 30mm, mostrada en la figura 8, el patrón de calibración junto con el instrumento de medición que se desea calibrar.

**Figura 8.**

*Cámara de vacío*



**Nota.** En la figura se identifica la fotografía de la cámara de vacío que actualmente tiene la empresa, el inciso 1 de los componentes actuales del sistema.

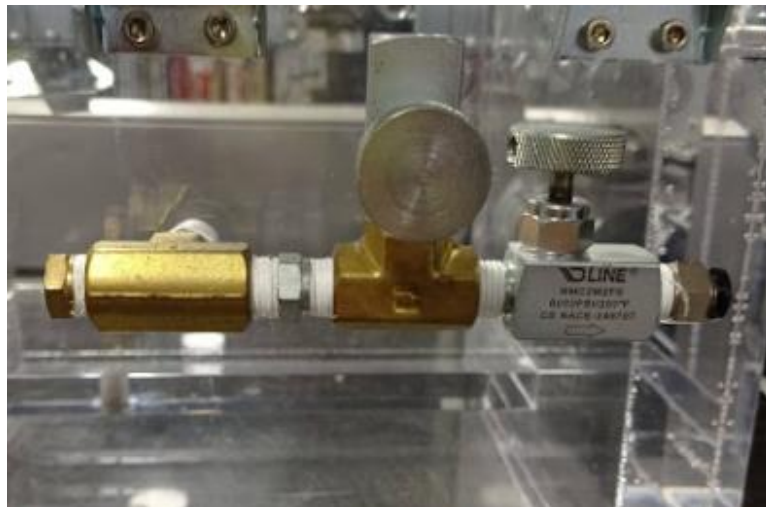
Durante el proceso de pruebas, es necesario establecer una secuencia de calibración, para poder establecer la secuencia se usa la norma DKD-R-6, norma encargada de establecer parámetros para la calibración de instrumentos de

medición de presión. Una vez seleccionada la secuencia, se debe retirar la tapa de la cámara de vacío, abriendo los cerrojos metálicos que se encuentran alrededor de la tapa y la cámara. Luego se pone en el interior de la cámara el patrón y el instrumento a calibrar, ese instrumento no lleva conexión a algún sistema al igual que el patrón, después se coloca la tapa de la cámara de vacío de la figura 8, esta es ajustada con el uso de cerrojos y por medio de un sello garantizar la hermeticidad del sistema; luego, se hace la verificación de las válvulas identificadas en la figura 9, asegurando que estas se encuentren totalmente cerradas.

Posteriormente, se energiza el compresor generando presión e iniciando la secuencia de calibración seleccionada, estas secuencias, según la norma deben estar precedidas por unas precargas, donde se lleva la presión hasta el punto máximo abriendo la válvula con conexión neumática, para luego con el cambio de dirección de flujo del compresor llevarlo hasta la presión mínima; el número de precargas varía según la secuencia seleccionada.

**Figura 9.**

*Bloque de válvulas.*



**Nota.** En la figura se identifica la fotografía del bloque de válvulas que actualmente tiene la empresa, el inciso 2 de los componentes actuales del sistema.

Una vez hechas las precargas, después según la secuencia seleccionada se van tomando una serie de mediciones y datos necesarios para poder determinar el estado y calibración del instrumento de medición; esto se hace mediante la apertura y cierre secuencial de las válvulas evidenciadas en la figura 9, cada apertura y cierre



de las válvulas significa un aumento o disminución de presión, según el punto en el que se encuentre se busca estabilizar el sistema y hacer tomas de mediciones más exactas. Para el aumento de la presión de forma escalonada se debe ir abriendo la válvula que tiene la conexión neumática cada 1/4 de vuelta por un periodo corto de tiempo, y mantener cerrada la que tiene apertura al ambiente, y luego, nuevamente se cierra que tiene la conexión neumática, esperando alcanzar la estabilidad del sistema; posteriormente, de nuevo se abre la válvula con conexión neumática para aumentar la presión, pero a esa apertura se le suma otro 1/4 de vuelta más, para completa media vuelta y hacer el segundo escalón, este proceso se repite según el número de escalones de la secuencia en ascenso. Para el descenso, una vez se llegue al escalón final de ascenso de la secuencia, entonces se cambia la dirección del flujo del compresor, y con la apertura y cierre de la misma válvula que tiene la conexión neumática, se va disminuyendo la presión al interior de la cámara, esto también se hará de forma escalonada con variación de vuelta de 1/4, esperando que cada escalón cumpla con el tiempo establecido para la secuencia y alcanzar la estabilidad del sistema. Este proceso repite el número indicado de escalones según la secuencia empleada.

Con el patrón digital, que se ilustra en la figura 10, el cual, es utilizado para el proceso de calibración, muestra la presión que existe en el interior de la cámara, de forma que permita la comparación con el instrumento y el desfase existente del instrumento que se encuentra en el proceso de calibración comparado con el patrón. El desfase que existe entre el patrón y el instrumento permite saber con qué precisión toma los datos el instrumento en el campo en donde se desempeñe.

Una vez hechas las precargas y las mediciones escalonadas se finaliza la secuencia de calibración; es necesario llevar el sistema a presión de condición atmosférica para poder realizar la apertura de la cámara de manera segura y así poder retirar del interior de la cámara el instrumento de medición. Para poder retirar el instrumento, nuevamente es necesario abrir los cerrojos metálicos alrededor de la tapa y la cámara, y de manera cuidadosa retirar totalmente la tapa de la cámara, y con delicadeza retirar el instrumento. Posteriormente se cierra nuevamente la cámara de vacío. Las pruebas terminan apagando y desconectando los componentes eléctricos y neumáticos del sistema, dejando en condiciones óptimas para próximas pruebas a realizar.

**Figura 10.**

*Patrón de calibración.*

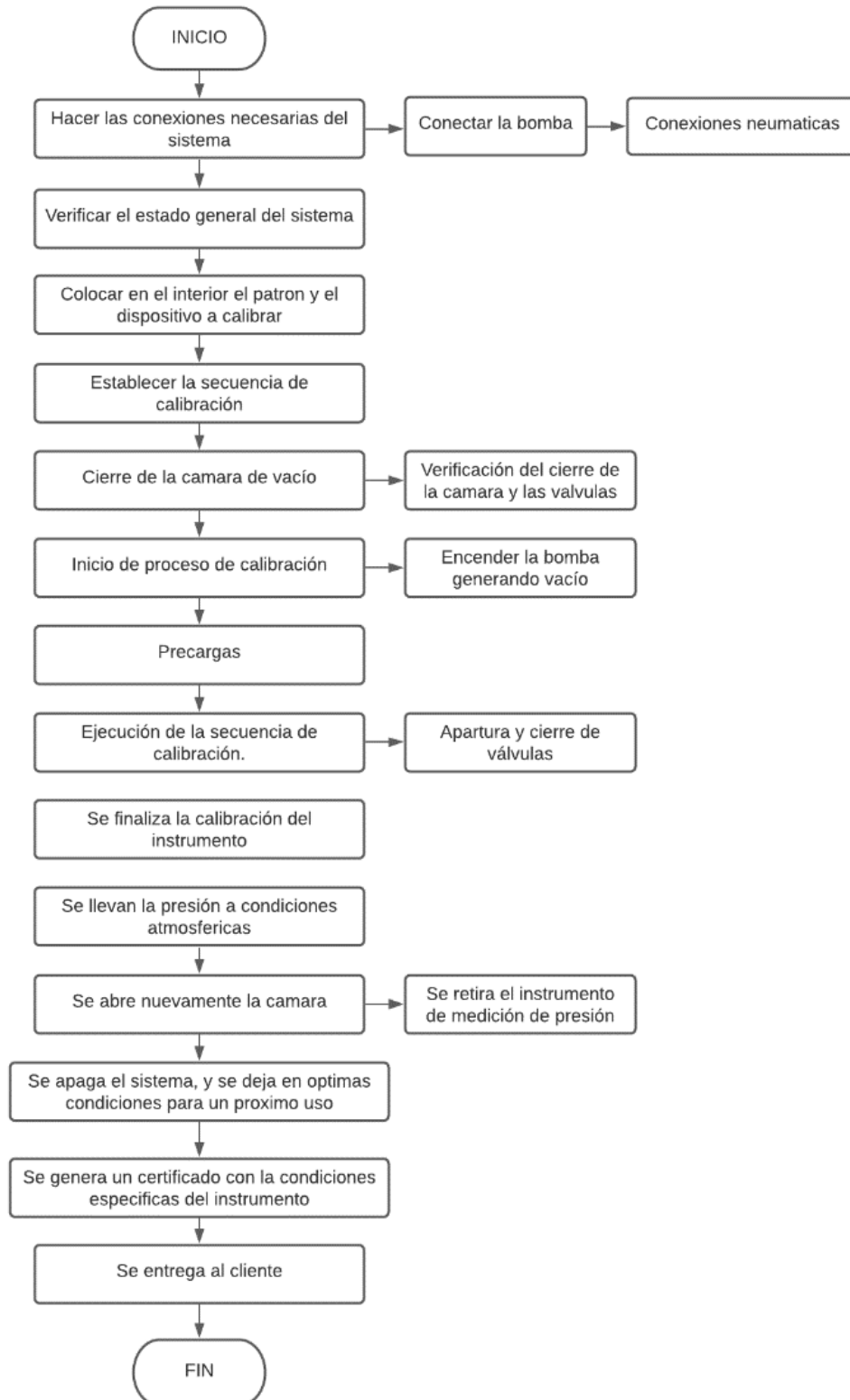


**Nota.** En la figura se identifica la fotografía del patrón que actualmente tiene la empresa. De elaboración propia.

El proceso finaliza con la entrega del instrumento y la realización de un certificado emitido por la empresa para el cliente, donde se establece el estado en el que se encuentra el instrumento y los intervalos sobre los cuales trabaja. Todo el proceso de uso y calibración actual se encuentra simplificado en el diagrama de flujo de la figura 11, que se encuentra a continuación, tiene como objetivo dar una paso a paso del proceso, de manera simple y sencilla.

**Figura 11.**

*Diagrama de flujo del proceso de calibración*



**Nota.** En la figura se desmenuza en un paso a paso del proceso que se lleva actualmente.

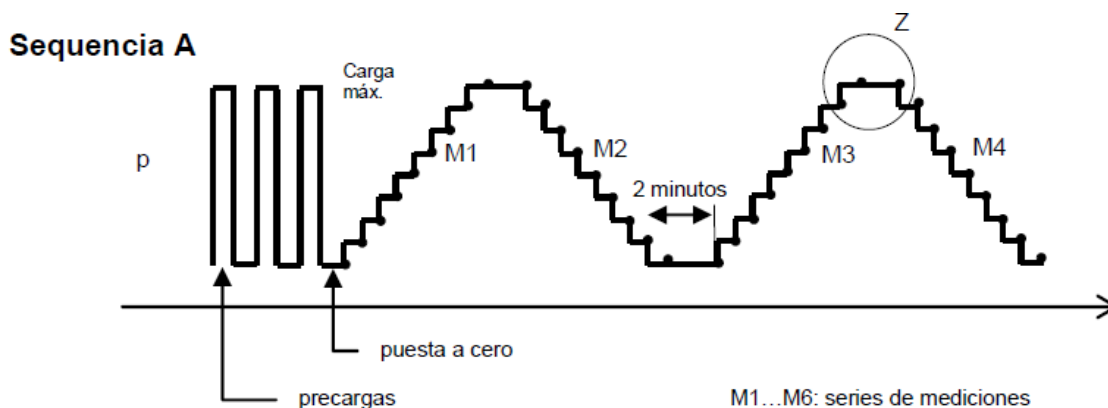
### 3.1.2. Norma de calibración

La norma empleada para la calibración de instrumentos de medición de presión en Calibration Service S.A.S, es desarrollada por, Deutscher Kalibrierdienst (DKD) o el Servicio Alemán de Calibración [2]. Esta directriz o norma, contempla tres métodos de calibración, estos métodos son usados en la empresa para la calibración de manómetros y también para calibración de instrumentos que trabajan bajo condiciones de presión absoluta.

La secuencia A, inicia con tres precargas, desde una presión mínima, hasta llevarla a la más grande y se comienza a medir desde el mínimo de presión. Se toman mediciones M1, de manera ascendente como se evidencia en la figura 12; la medición M2 se toma de manera descendente, luego, la medición M3 de nuevo se toma en ascensión, se repite el procedimiento con la medición M4, M5 y M6 dando como total tres escalas, cada una con una participación del 30%, 60% y 100%, determinando la incertidumbre del equipo y obteniendo un instrumento correctamente calibrado. Esta secuencia requiere de mayor tiempo de calibración.

**Figura 12.**

*Representación gráfica de la secuencia A.*



**Nota.** En la figura se representa gráficamente el número de precargas y de número de escalones de ascenso y descenso de la secuencia A de la norma DKD R-6-1. Tomando de [2]Deutscher Kalibrierdienst (DKD), Calibración de instrumentos medidores de presión, Braunschweig, 2014.

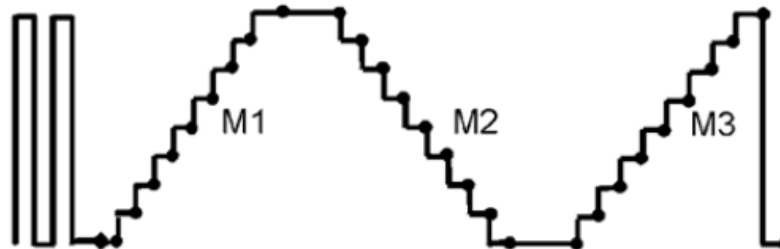
La secuencia B, tiene dos precargas que como en la secuencia anterior inicia desde una presión mínima, hasta llevarla a la más grande y se comienza a medir desde el mínimo de presión, luego, de forma ascendente se hace la medición M1, luego, la

medición M2 se toma de manera descendente, luego, la medición M3 de nuevo se toma en ascensión, finalizando la secuencia, como se muestra en la figura 13.

**Figura 13.**

*Representación gráfica de la secuencia B.*

**Secuencia B**



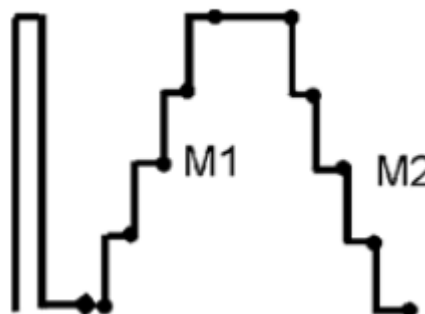
**Nota.** En la figura se representa gráficamente el número de precargas y de numero de escalones de ascenso y descenso de la secuencia B de la norma DKD R-6-1. Tomando de Deutscher Kalibrierdienst (DKD), Calibración de instrumentos medidores de presión, Braunschweig, 2014.

La secuencia C y última propuesta en la norma, inicia solamente con una precarga, que nuevamente va desde una presión mínima, hasta llevarla a la más grande y se comienza a medir desde el mínimo de presión. Esta sin duda es la más corta de las secuencias, se realizan dos mediciones, M1 de forma ascendente y M2 de forma descendente, como se muestra en la figura 14.

**Figura 14.**

*Representación gráfica de la secuencia C.*

**Secuencia C**



**Nota.** En la figura se representa gráficamente el número de precargas y de numero de escalones de ascenso y descenso de la secuencia C de la norma DKD R-6-1. Tomando de [2]Deutscher Kalibrierdienst (DKD), Calibración de instrumentos medidores de presión, Braunschweig, 2014.

Las secuencias de calibración de los instrumentos de medición de presión absoluta en Calibration Service S.A.S, se seleccionaron debido a que las especificaciones (tolerancias) de los fabricantes e instrumentos suelen estar relacionadas al intervalo de medida. En la tabla 1 se establece la incertidumbre deseada en porcentaje del intervalo de medida. Teniendo en cuenta que los instrumentos que se desean calibrar en la cámara de vacío tienen una incertidumbre en porcentaje de intervalo de medida entre 0,1 a 0,6 y mayor a 0,6; se establecen las secuencias B y C para la calibración de instrumentos de medición de presión absoluta en cámara de vacío [2]; la secuencia A podrá ser utilizada en casos especiales de calibración determinados por la empresa.

**Tabla 1.**

*Características de las secuencias de calibración.*

Secuencia	Incertidumbre deseada en % del intervalo de medida  (*)	Número mínimo de puntos de medición  con punto cero asc/ desc	Número de precargas	Cambio de carga+tiempo de permanencia  (**)  segundos	Tiempo de permanencia en el valor final del rango de medición  (***)  minutos	Número de series de mediciones	
						asc	desc
A	< 0,1	9	3	> 30	2	2	2
B	0,1 ... 0,6	9	2	> 30	2	2	1
C	> 0,6	5	1	> 30	2	1	1

**Nota.** En la tabla se establece las características de las secuencias de la norma DKD R-6-1. Tomando de [2] Deutscher Kalibrierdienst (DKD), Calibración de instrumentos medidores de presión, Braunschweig, 2014.

### 3.2. Selección de alternativas para el diseño automatizado

Para la automatización de la cámara de vacío se tienen dos alternativas, la primera consiste en el cambio de válvulas manuales, por una válvula proporcional para el control de la presión. Como segunda opción, se tiene el control y automatización del compresor con el que la empresa actualmente cuenta.

Para la selección de la mejor alternativa se procedió a emplear el método de Scoring.

### 3.2.1. Método de Scoring

El método de Scoring o ponderación lineal es un método que permite abordar situaciones de incertidumbre o con pocos niveles de información. En dicho método se construye una función de valor para cada una de las alternativas [19].

Para la selección de alternativas, se utilizará el método de Scoring, este método permite establecer por medio de criterios puntajes, estos puntajes en cada criterio deben sumarse, y arroja un total, este total nos da la opción a seleccionar. En la tabla 2 está representada la selección.

El rango de clasificación se da ente 0 y 10, siendo 0 el puntaje más bajo y 10 el más alto. Este rango de calificación se establece para poder identificar la selección de manera sencilla.

**Tabla 2.**

*Criterios y selección de alternativas*

Criterios	Cambio y control de las válvulas	Control y regulación del compresor
1. Estabilidad de la variable.	10	6
2. Consumo energético.	8	5
3. Posibilidad de generar rampas de presión.	9	7
4. Costo.	7	7
6. Entrega de presión necesaria.	8	6
Score	42	31

**Nota.** En la tabla se establece los puntajes otorgados de acuerdo a los criterios establecidos para la selección de la mejor alternativa.

En la tabla 2 encontramos los criterios establecidos para la selección de la alternativa de una automatización adecuada son:

1. Estabilidad de la variable.

Proporcionar estabilidad de las variables es importante durante el proceso de calibración, teniendo en cuenta que en un sistema de control la manipulación de las variables a controlar debe alcanzar valores fijados con anterioridad. Es por eso que

como requisito de un sistema control es necesario garantizar la estabilidad y evitar perturbaciones y errores en los modelos [20].

El elemento para el control que proporciona estabilidad en la variable es la válvula proporcional, porque la presión puede ser variada por valores nominales eléctricos y se adapta a las diferentes exigencias del proceso. [21]

Por el contrario, con el control del compresor existen problemáticas como las caídas de presión que eventualmente suceden con los compresores, lo que dificulta la estabilidad de la presión.

## 2. Consumo energético.

En este criterio de selección se destacan las válvulas proporcionales, debido a que el consumo de energía que tiene un compresor de  $\frac{3}{4}$  HP es alrededor de 559.5 Watts conectado 120 Voltios, que comparados con el consumo máximo de potencia eléctrica de 4.2 Watts. Lo que da como resultado el score alto para el cambio y control de las válvulas.

## 3. Posibilidad de generar rampas de presión.

La generación de las rampas de presión es un criterio de gran importancia, debido a que por medio de estas depende y se realiza la calibración de instrumentos, es importante tener en cuenta, que para el compresor con una potencia de  $\frac{3}{4}$  HP, es posible generar estas rampas, pero también es posible que no pueda sostenerla debido a las caídas de presión. Por el contrario, las válvulas generan y sostienen de manera precisa las rampas de presión, haciéndola segura para la toma de datos.

## 4. Costo.

El costo de una válvula proporcional de presión es elevado, pero teniendo en cuenta que el sistema en su mayoría depende del funcionamiento de la válvula proporcional para obtener un excelente comportamiento del mismo, es necesario realizar la inversión, debido a que se tienen más beneficios para el proceso con la implementación de la válvula proporcional. Teniendo en cuenta que el consumo de una válvula es bajo y afecta muy poco el consumo general del sistema beneficiando a largo plazo a la empresa.

## 5. Entrega de presión necesaria.

Teniendo en cuenta que la regulación y control de un compresor depende también de su capacidad y los requisitos de carga que este tenga, ya que los ciclos de



arranque / parada pueden causar eventualmente un desgaste, y esto puede provocar caídas de presión o sobre cargas, y afectar el proceso [22].

Las válvulas proporcionales, por medio de la programación de sistema de control se encargan de la entrega correcta de presión; presión que es necesaria y está establecida para el proceso de calibración.

Teniendo en cuenta el método de Scoring y todos los factores que se tuvieron en cuenta anteriormente, se puede definir el cambio de las válvulas tipo aguja que se encuentran actualmente en el sistema por una válvula proporcional, es la opción con más viabilidad para el diseño del sistema automatizado.

### 3.2.2. Matriz DOFA

Con relación a la selección hecha por el método Scoring del cambio de válvulas tipo agujas que actualmente tiene el sistema, por una válvula proporcional de presión como la opción más viable para la automatización del sistema, se realizará una matriz DOFA, mostrada en la figura 15, con el objetivo de identificar las fortaleza, debilidades, oportunidades y amenazas de la selección de una válvula proporcional.

**Figura 15.**

Matriz DOFA

<p style="text-align: center;"><b>FORTALEZAS</b></p> <p>Permite estabilidad al interior de sisitema. Entrega la presión necearia para la calibración. Tiene un consumo energetico pequeño.</p>	<p style="text-align: center;"><b>DEBILIDADES</b></p> <p>Mantenimiento especializado de las valvulas proporcionales. Costo de la válvula proporcional.</p>
<p style="text-align: center;"><b>OPORTUNIDADES</b></p> <p>Permite mejorar la calidad de la toma de mediciones. Puede mejorarse el proceso de calibración.</p>	<p style="text-align: center;"><b>AMENAZAS</b></p> <p>Una incorrecta apertura o cierre puede alterar la toma de datos y fallas en la calibración. En una variación de voltaje se puede alterar la configuración en la programación del PLC.</p>

**Nota.** En la figura se establece las ventajas, desventajas, oportunidades y debilidades de a selección de una válvula proporcional.

A continuación, se hará una explicación de la matriz DOFA:

### **Fortalezas**

Las fortalezas identificadas en la selección de una válvula proporcional de presión, para el control del sistema, fueron:

- Permite estabilidad al interior del sistema, esta fortaleza nos garantiza que la presión sea estable, no existan caídas y permite una mejor lectura del instrumento en calibración.
- Entrega la presión necesaria para la calibración; durante el proceso es bueno tener en cuenta que se debe mantener estable la presión, de esta manera se garantiza la calidad de la calibración y la seguridad de la persona que realiza y supervisa el proceso.
- Anteriormente se habló de consumo energético que tiene una válvula proporcional y lo bajo que es, por eso es considerado como una fortaleza en la selección.

### **Debilidades**

La selección de una válvula proporcional tiene debilidades para el desarrollo del proceso y fueron identificadas. Estas debilidades es necesario tenerlas en cuenta para trabajar de manera óptima y poder mejorar en los siguientes aspectos.

- El alto costo de una válvula proporcional es una importante debilidad, ya que en ocasiones se limita su acceso, haciendo difícil su implementación y uso.
- El mantenimiento especializado de una válvula proporcional es una debilidad, porque en caso de una falla importante, probablemente la empresa tenga que recurrir a un tercero para la solución del problema, lo que acarrea en más costos y tiempo que tendría que emplear la empresa.

### **Oportunidades**

Las oportunidades de mejora encontradas durante el proceso de selección de la alternativa de automatizan son las siguientes:

- Permite mejorar la calidad de la toma de datos. Emplear una válvula proporcional en un sistema de control que accionadas eléctricamente que permiten la modificación de la presión de salida de forma continua, según el nivel de corriente aplicada. Es decir, la función de un regulador de presión proporcional.

[23]

- Puede mejorar el proceso de calibración. A medida que la empresa tiene la constante necesidad de ampliar y mejorar sus procesos, la válvula proporcional es un instrumento que facilita el ingreso de nuevas posibilidades o mejoras para el proceso de calibración, incluyendo más métodos de calibración para la oferta de Calibration Service S.A.S.

### **Amenazas**

- Una incorrecta apertura o cierre puede alterar la toma de datos y fallas en la calibración.
- Característica de una válvula, que, al producirse la pérdida de suministro de energía actuante, hace que el elemento de cierre, se cierre o abra por completo, o permanezca en la última posición, la que sea que se defina como necesaria para proteger al proceso y al equipo. La acción puede implicar el uso de controles auxiliares conectados al actuador. [24]
- En una posible variación de voltaje se puede alterar la configuración en la programación del PLC y daños en la válvula proporcional. Un suceso de estos puede afectar de forma permanente los componentes que acompañan al PLC, poniendo en riesgo los procesos de calibración. Existe la posibilidad que la válvula sufra daños que dañen la toma de datos para la calibración de instrumentos, entregando presiones erradas y haciendo de forma incorrecta las rampas de presión.

Para el diseño de un sistema de calibración automatizado, como la mejor de las alternativas presentadas, es en definitiva muy conveniente hacer uso de una válvula proporcional, ya que, mediante la programación de la misma, se logrará proporcionar estabilidad al sistema de calibración debido a que esta entrega la presión necesaria para cada punto de la secuencia de calibración. Con el uso de una válvula proporcional se hará más provecho de las fortalezas que proporciona la automatización. No obstante, esta alternativa cuenta con algunas debilidades, el aporte al proceso de calibración será en diferentes aspectos superior, a un proceso manual.

## 4. DISEÑO CONCEPTUAL Y DETALLADO DEL SISTEMA AUTOMATIZADO

### 4.1. Diseño conceptual

El diseño conceptual de un proyecto parte de la identificación de los objetivos y todo aquello que requiere una sistematización. La fase del diseño conceptual es de gran importancia ya que requiere del análisis del problema y con esto se analiza el entorno para encontrar una conceptualización general para la automatización del proceso de calibración actual. Con esto definido se pueden proponer un diseño basado en los resultados obtenidos.

Para el desarrollo del diseño conceptual del proceso de calibración, es necesario poder describir el funcionamiento actual de la cámara y todos los componentes implicados en el desarrollo del proceso.

#### 4.1.1. *Caracterización del funcionamiento de la cámara de vacío*

En principio fue necesario hacer pruebas de funcionamiento de todos los elementos para poder establecer que todo está en condiciones óptimas para el desarrollo y la toma de datos. Con todo lo anterior verificado, se inicia el muestreo para poder establecer el comportamiento de la presión a la entrada, salida del sistema, apertura y cierre de válvulas, con el objetivo de hacer un análisis dinámico de la cámara de vacío.

- Primero se establece un intervalo de presiones a los cuales se debe llevar al sistema; dentro de la cámara se encuentra un patrón, el cual nos va a indicar la presión en el instante, el primer intervalo de presión seleccionado se encuentra entre los 700mbar y 400 mbar.
- Posteriormente se establece el nivel de la apertura que debe tener las válvulas instaladas actualmente en el sistema, para hacer apertura paulatina de la válvula y así poder variar la cantidad de aire que ingresa al sistema. El proceso arranca con el encendido del compresor, generando presión al interior de la cámara con la apertura del 3% de la válvula que tiene conexión neumática, porcentaje que irá aumentando en ascenso y disminuyendo en descenso según el avance de la calibración. Con ayuda de un cronómetro, se establece el tiempo que tarda el compresor en generar presión o vacío. Con el patrón que se encuentra al interior de la cámara de vacío muestra la presión que existe internamente, una vez el

sistema alcanza los 700 mbar se cierran las válvulas y se suspende la generación de presión. Se debe esperar a que el sistema se estabilice y poder tomar el dato de la medición.

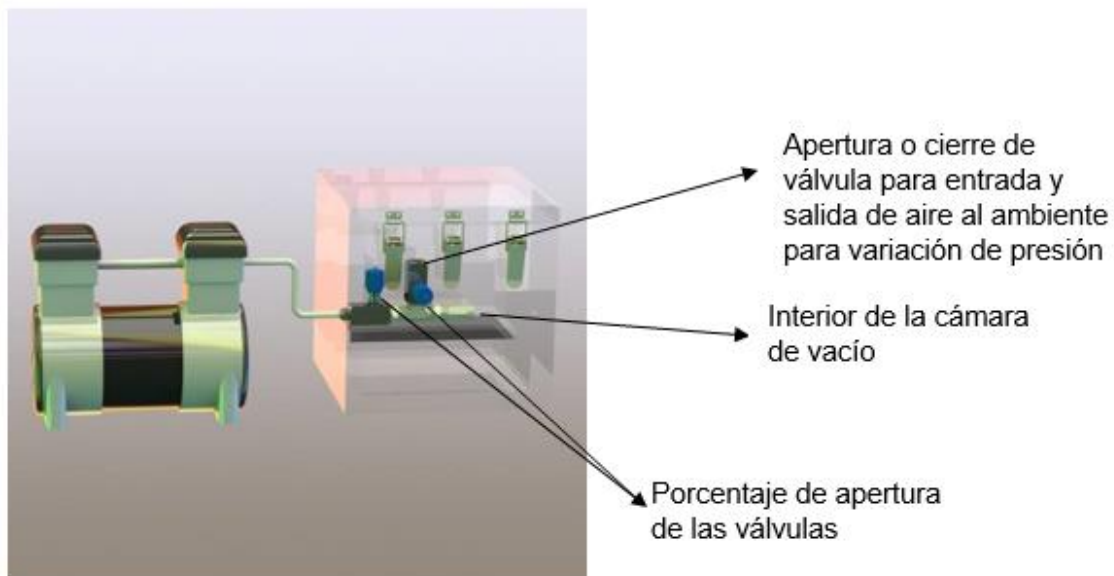
- Luego, manualmente se hace cambio de la dirección del flujo del compresor, con el objetivo de generar vacío al interior de la cámara de vacío y llevarla de nuevo a los 400 mbar, esto se debe hacer partiendo del porcentaje de apertura con el que terminó la toma de datos en ascenso. Se debe tener en cuenta que ese porcentaje variará según avance el proceso de pruebas.
- Estos pasos se repitieron al menos 20 veces más hasta llegar a un punto donde se pudo establecer una tendencia del sistema.

De la ejecución de los pasos anteriores se pudieron obtener datos fueron tabulados inicialmente en Excel, donde se hace un análisis del funcionamiento de la cámara de vacío.

Es importante identificar físicamente el lugar en el cual fueron realizadas la toma de datos, en la figura 16 se muestran cada uno de los puntos de muestreo.

### Figura 16.

*Ubicación del lugar donde se realizan la toma de datos*

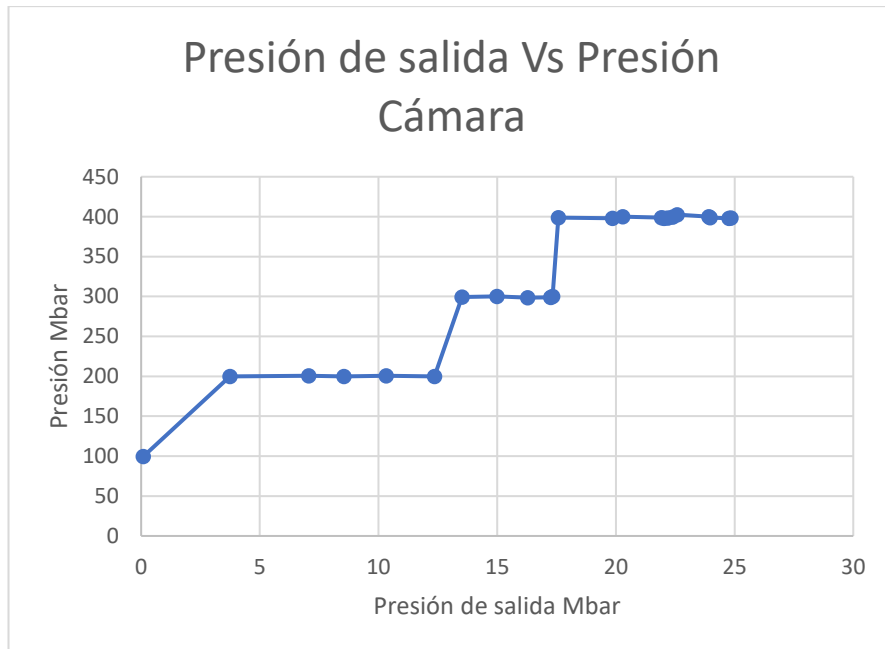


**Nota.** En la figura se identifican los sitios de manipulación para generar presión o vacío. El CAD del compresor es tomado de: GrabCommunity. "Free oil motor", <https://grabcad.com/library/free-oil-compressor-1> [En línea]. Acceso [09 de agosto].

En las siguientes imágenes muestran las diferentes características que tiene el sistema y poder entender el comportamiento del mismo.

**Figura 17.**

*Presión de salida Vs Presión en la cámara*

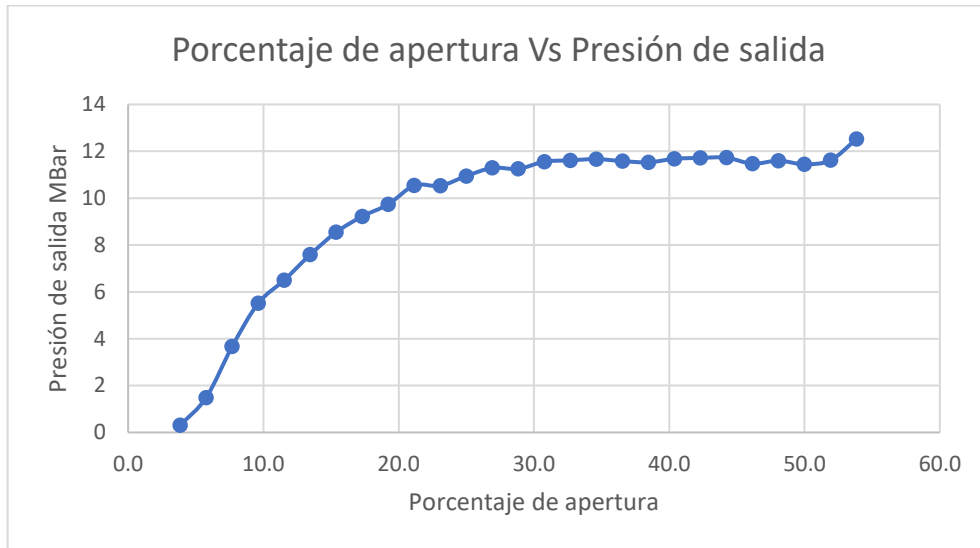


**Nota.** En la figura representa gráficamente los datos obtenidos durante el proceso realizado experimentalmente y luego llevados a su análisis en Excel.

Los datos de la figura 17 representan el comportamiento de la presión de salida de la cámara versus la presión que se encuentra al interior de la cámara de vacío.

**Figura 18.**

*Porcentaje de apertura Vs presión de salida.*

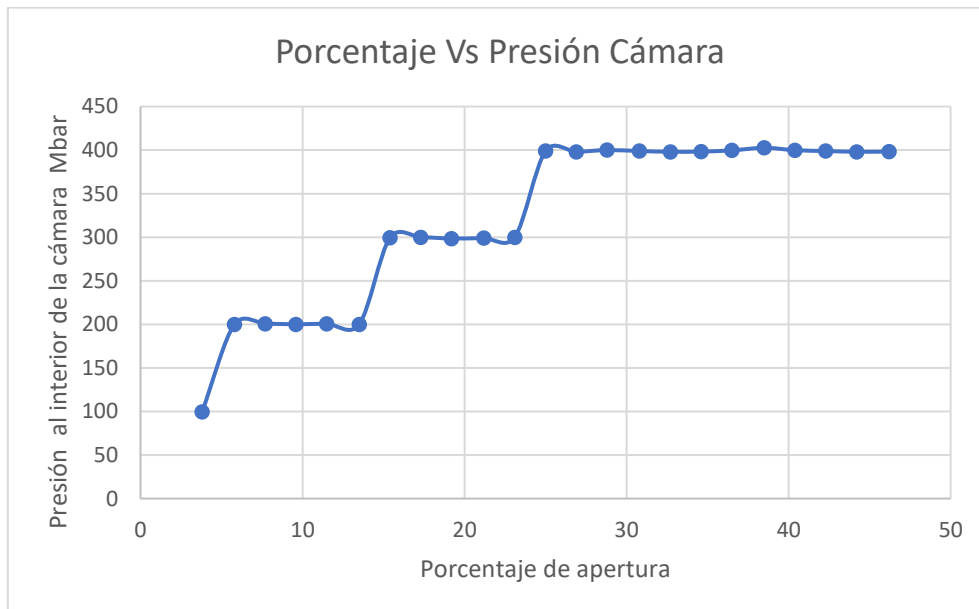


**Nota.** En la figura representa gráficamente los datos obtenidos durante el proceso realizado experimentalmente y luego llevados a su análisis en Excel.

Los datos de la figura 18 representan el comportamiento de la relación entre el porcentaje de apertura de la válvula versus la presión de salida del sistema.

**Figura 19.**

*Porcentaje de apertura Vs presión interna de la cámara.*



**Nota.** En la figura representa gráficamente los datos obtenidos durante el proceso realizado experimentalmente y luego llevados a su análisis en Excel.

Los datos de la figura 19 representan el comportamiento de la relación entre el porcentaje de apertura de la válvula versus la presión al interior de la cámara de vacío.

La figura 17 es útil para poder determinar la presión que se puede alcanzar en la salida del sistema usando la válvula que tiene apertura y cierre al ambiente, versus la presión que se encuentra al interior de la cámara de vacío, caracterizando la variación de presión al interior de la cámara de vacío; en la figura 18, se identifica el porcentaje de apertura de las válvulas; sabiendo que porcentaje de apertura varía la presión a la salida de la válvula que tiene apertura y cierre al ambiente. Por último, en la figura 19, se caracteriza el porcentaje de apertura de las válvulas y como este porcentaje de apertura o cierre de las válvulas influyen en la presión que varía al interior de la cámara de vacío. Las imágenes proporcionan información del comportamiento del sistema y como este aumenta o disminuye la presión según la necesidad.

## **4.2. Análisis Dinámico**

### **4.2.1. Función de transferencia**

Para un sistema, la función de transferencia está definida como la relación de la transformada de Laplace de la variable de salida a la transformada de la variable de entrada, con todas las condiciones iniciales y consideradas igual a cero [25].

Se puede decir que la función de transferencia depende de tres cosas: [25]

1. De la entrada del sistema.
2. De la salida del sistema.
3. Del tipo de sistema que se está analizando y de los elementos con los que cuenta el sistema en estudio.

Para poder determinar una función de transferencia de cualquier tipo de proceso existen diferentes formas. La primera se puede lograr mediante la linealización de la ecuación diferencial y resolverla mediante la transformadas de Laplace. La otra opción es utilizar técnicas de identificación de sistemas como Matlab, de los datos tomados del proceso. Esta segunda opción es la que será utilizada para la solución de las ecuaciones del sistema de la cámara de vacío.

Determinar la función de transferencia de un sistema, tiene como finalidad, poder definir las características de un sistema estacionario o dinámico describiéndola



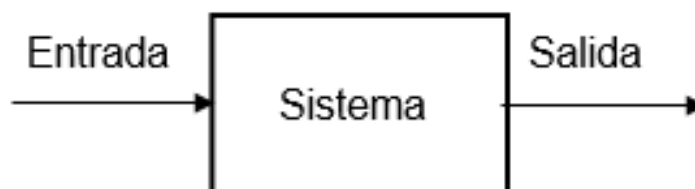
mediante una ecuación diferencial lineal; una función de transferencia permite especificar condiciones en cuanto a estabilidad del sistema [26].

Para hacer el análisis dinámico del sistema fue necesario tomar los datos de presión desde la cámara y usar como herramienta Matlab, la cual tiene un sistema de identificación dentro del toolbox ident del programa. Este sistema proporciona funciones aplicadas para construir modelos matemáticos de sistemas dinámicos a partir de datos medidos de entrada y salida; Además permite crear y utilizar modelos de sistemas dinámicos que no se pueden modelar fácilmente a partir de los principios o especificaciones [27].

Por tal razón, usando Matlab se calcula el modelo matemático. Este modelo matemático realiza aproximaciones haciendo la comparación de numerosas funciones y seleccionando la función más aproximada a los datos experimentales ingresados, este proceso comparativo se realiza muchas veces hasta lograr un porcentaje de acercamiento por encima de 70% de similitud. En la figura 20 se ve representado un sistema con una entrada y unas salidas.

**Figura 20.**

*Representación gráfica de un sistema para la determinación de una función de transferencia.*



**Nota.** En la figura representa gráficamente el proceso de un sistema y ayuda a la comprensión de la función de transferencia. De elaboración propia.

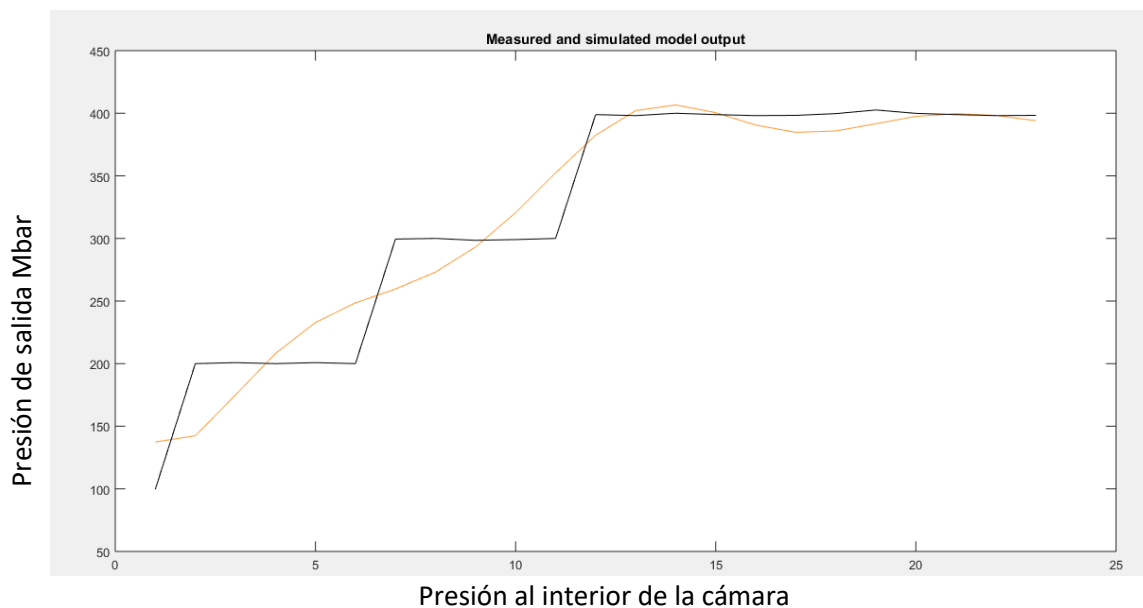
### **Análisis dinámico de la presión al interior de la cámara y la presión de salida.**

Haciendo uso del toolbox ident de Matlab y los datos tomados experimentalmente de la cámara de vacío como una entrada y una salida fue posible obtener una caracterización del sistema. En la figura 21 se ven dos caracterizaciones, la que se evidencia en color negro es la caracterización hecha inicialmente en Excel

representada en la figura 17; en color naranja está la aproximación realizada por Matlab para poder buscar la función de transferencia. Este modelo matemático lo alcanza por medio de evaluaciones de diferentes funciones de transferencia, que para este punto realizaron 188 evaluaciones, seleccionando la mejor aproximación, graficándola, con un porcentaje de acercamiento de 72.14%; una vez hechas las evaluaciones se genera la función de transferencia para esta parte del proceso, visible en la figura 22.

**Figura 21.**

*Caracterización de la presión al interior de la cámara y la presión de salida.*



**Nota.** En la figura se caracteriza gráficamente el proceso del sistema de la obtención de la función de transferencia de la presión al interior de la cámara y la presión de salida.

**Figura 22.**

*Función de transferencia para la presión al interior de la cámara y la presión de salida.*

$$5.399 (+/- 46.03) s + 0.2005 (+/- 18.96)$$

✓

-----

$$s^4 + 0.6935 (+/- 7.535) s^3 + 0.4932 (+/- 2.718) s^2 + 0.2166 (+/- 2.632) s + 0.01936 (+/- 1.019)$$

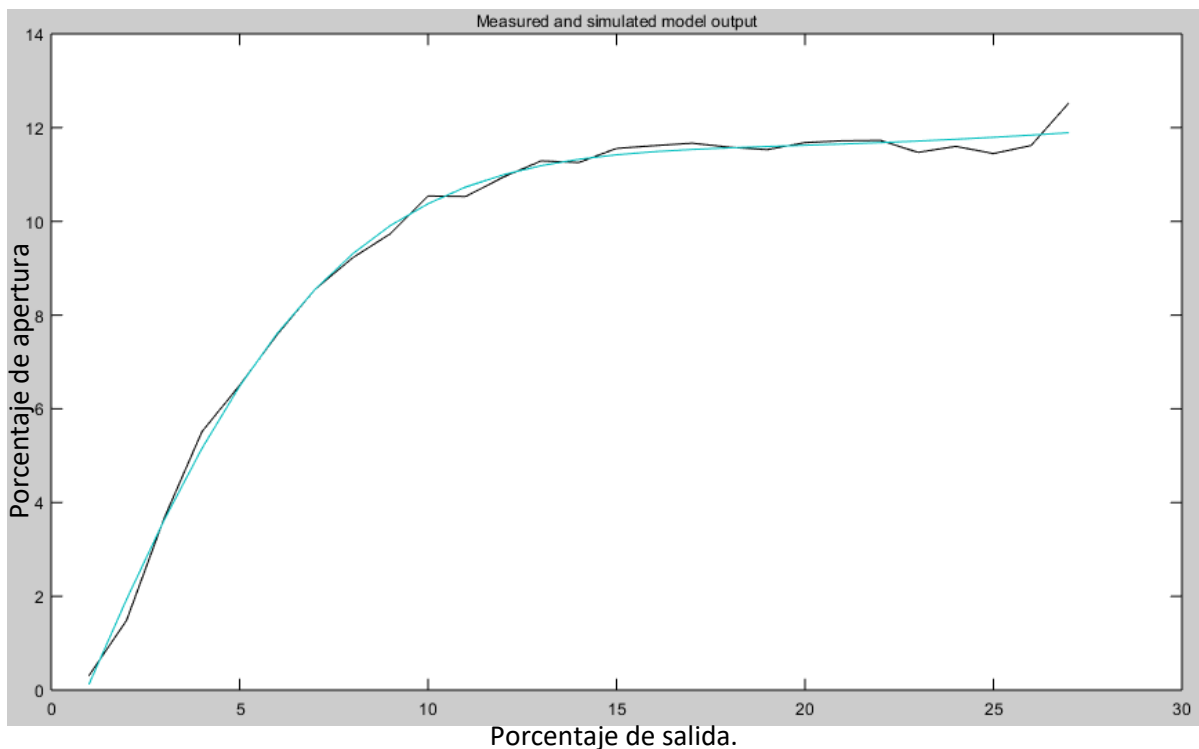
**Nota.** La figura muestra la función generada por Matlab al ingresar los datos del interior de la cámara y la presión de salida.

### **Análisis dinámico del porcentaje de apertura Vs presión de salida.**

Nuevamente se hace el ingreso de los datos tomados, para poder hallar la aproximación de los datos iniciales por medio del número de evaluaciones de funciones, encontrando que se encuentra aproximada en un 93.48% entre la figura 18 y el número de evaluaciones realizadas que en total fueron 116. Entregándonos la figura 23 y la función de transferencia correspondiente en la figura 24.

#### **Figura 23.**

*Porcentaje de apertura Vs presión de salida*



**Nota.** En la figura se caracteriza gráficamente el proceso del sistema de la obtención de la función de transferencia del porcentaje de apertura Vs la presión de salida.

#### **Figura 24.**

*Función de transferencia para el Porcentaje de apertura Vs presión de salida.*

$$\frac{0.3651 \text{ (+/- } 0.282) \text{ s} + 0.002308 \text{ (+/- } 0.001311)}{s^2 + 0.3988 \text{ (+/- } 0.2039) \text{ s} + 0.06693 \text{ (+/- } 0.04293)}$$

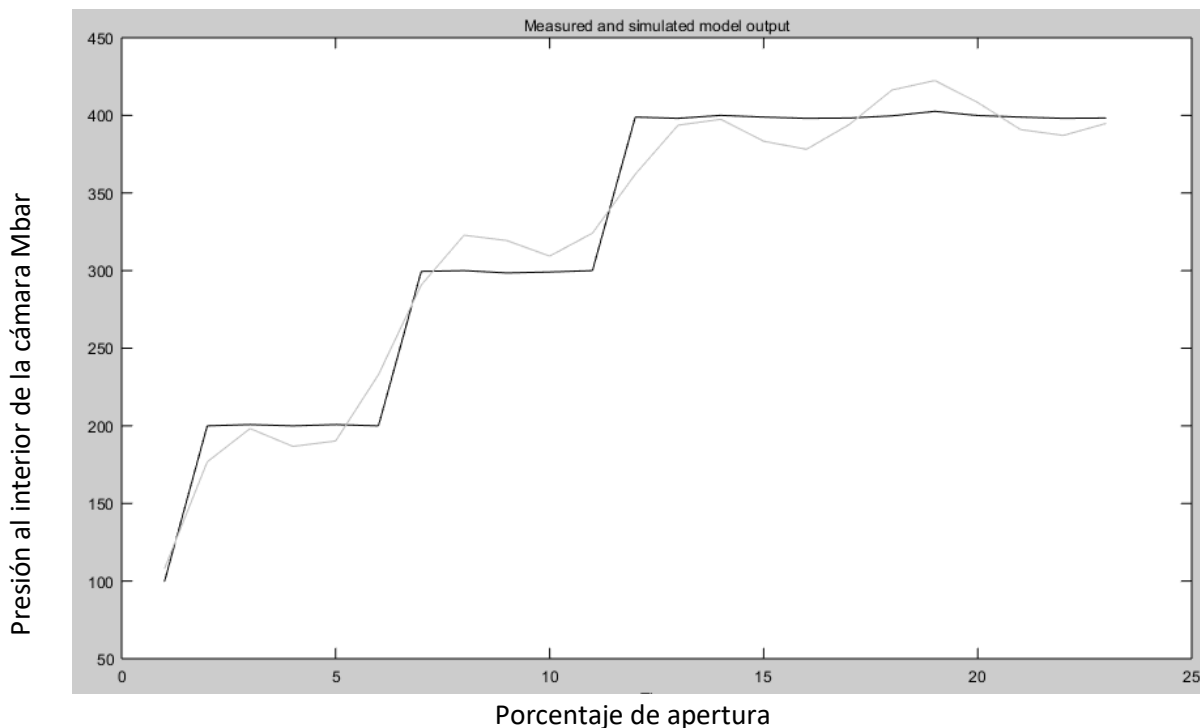
**Nota.** La figura muestra la función generada por Matlab al ingresar los datos del porcentaje de apertura Vs la presión de salida.

## Análisis dinámico porcentaje de apertura versus la presión al interior de la cámara de vacío.

Comparando los datos de la figura 19, con los datos analizados por Matlab por medio del mismo método de evaluación de funciones, que para este caso en especial se realizaron 234 comparaciones, de esta forma se pudo determinar que tiene un acercamiento del 81.6%, lo que nos lleva a una importante aproximación de la práctica experimental y a la entrega de la figura 25 junto con su respectiva función de transferencia en la figura 26.

**Figura 25.**

*Porcentaje de apertura VS Presión al interior de la cámara de vacío.*



**Nota.** La figura se caracteriza gráficamente el proceso del sistema de la obtención de la función de transferencia del porcentaje de apertura Vs la presión al interior de la cámara de vacío.

**Figura 26.**

*Función de transferencia para el Porcentaje de apertura VS Presión al interior de la cámara de vacío.*

$$\frac{24.45 (+/- 10.01) s - 1.25 (+/- 0.7996)}{s^3 + 0.1059 (+/- 0.1171) s^2 + 1.322 (+/- 0.08541) s + 6.599e-05 (+/- 0.112)}$$

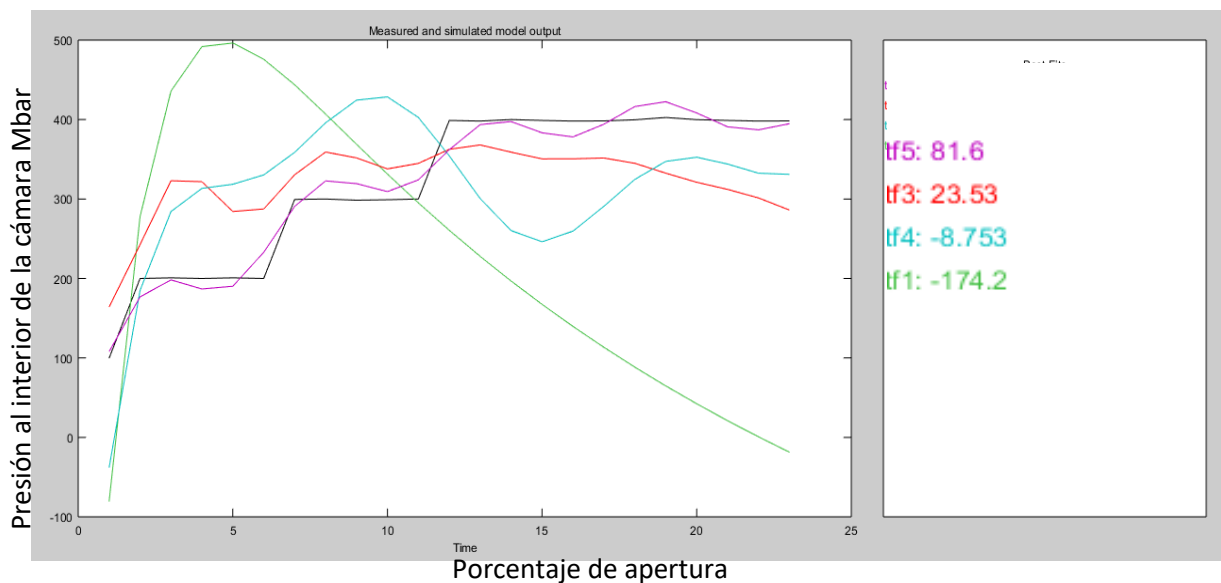
**Nota.** La figura muestra la función generada por Matlab al ingresar los datos del porcentaje de apertura Vs la presión al interior de la cámara de vacío.

## Análisis dinámico comparativo de Matlab para la definición de la función de transferencia.

En la figura 27 se puede evidenciar el método empleado por el toolbox ident de Matlab, por medio de evaluaciones lograr la mayor proximidad a la obtenida mediante la toma de datos. Así Matlab arroja una función de estado más cercana y de esta manera es posible caracterizar el sistema mediante un modelo. En la figura se puede ver algunas de estas comparaciones, mostrando en verde la más alejada del modelo con un porcentaje de proximidad de -174.2%, hasta la más cercana que se encuentra en color morado y mencionada anteriormente con un porcentaje de aproximación de 81.6%. Para esta muestra también se generó nuevamente la función de transferencia evidenciada en la figura 28.

**Figura 27.**

*Funciones comparadas por Matlab*



**Nota.** La figura muestra la función generada por Matlab al ingresar los datos del Porcentaje de apertura VS Presión al interior de la cámara de vacío.

### Figura 28.

*Función de transferencia seleccionada por Matlab como la más aproximada.*

$$\frac{24.45 s - 1.25}{s^3 + 0.1059 s^2 + 1.322 s + 6.599e-05}$$

**Nota.** La figura muestra la función seleccionada por Matlab como la más cercana a los datos ingresados.

La función de transferencia de la figura 28 es la función que será la función utilizada como criterio que determinará la selección de una válvula proporcional, debido a que esta función relaciona el porcentaje de apertura de la válvula con la presión en la salida del sistema. Es debido a eso, que para la sección de una válvula proporcional del sistema de calibración debe tener en cuenta el cumplimiento de la apertura y cierre adecuada de la válvula proporcional, lográndose mediante la variación del voltaje y que esta afecte directamente la presión a la salida del sistema.

Esta función de transferencia es útil nuevamente una vez el sistema de calibración sea automatizado, ya que permite hacer una comparación con la función de transferencia para el sistema automatizado, con el objetivo de identificar los beneficios de la automatización y uso de una válvula proporcional.

#### 4.3. Diseño automatizado

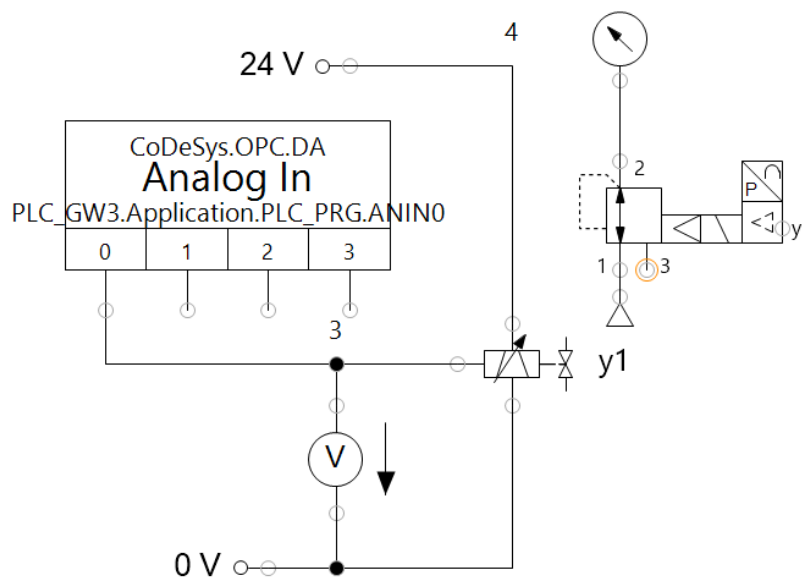
Con la elección de una válvula proporcional como la mejor alternativa de automatización y el análisis dinámico del sistema de calibración manual, fue posible determinar la válvula que se desea emplear para la automatización del sistema, utilizando el catálogo de ASCO NEUMATICS, encontrado en el anexo 3, fue posible establecer la válvula 614357D001106 de ASCO NEUMATICS y un PLC Schneider de referencia SR2B122BD. Elementos los cuales se ajustan a las necesidades presentadas durante el desarrollo del diseño del sistema automatizado.

Utilizando programas como Fluid Sim y Codesys como herramientas de simulación para la realización del diseño automatizado, se propone un sistema con una programación del PLC en Codesys, para luego en Fluid Sim usar el PLC y poder simular el proceso de calibración

A continuación, en la figura 29 se evidencia el circuito electroneumático de la simulación del sistema automatizado; donde se encuentra un voltímetro, un manómetro, el PLC y la válvula proporcional con el solenoide identificado con Y1. Todos los elementos puestos en el circuito son usados para determinar valores y datos importantes del proceso del sistema automatizado

**Figura 29.**

*Circuito electroneumático*



**Nota.** La figura muestra el plano electroneumático del diseño automatizado.

La válvula proporcional está parametrizada con las especificaciones que se pueden encontrar indicadas en el catálogo de ASCO NEUMATICS, los datos de esta configuración están ingresados en Fluid Sim para poder simular el sistema con condiciones adecuadas para el sistema, esta parametrización se puede ver establecida en la figura 30.

Es importante tener en cuenta que la válvula proporcional está en capacidad de trabajar en intervalos de presión en milibares, ya que estas son las unidades necesarias y de funcionamiento del sistema automatizado, la secuencia presentada en la figura 31 se hace como muestra del funcionamiento y de la capacidad de la válvula proporcional seleccionada, de generar secuencias de calibración según la necesidad, la norma DKD R-6 y del instrumento a calibrar.

**Figura 30.**

*Parametrización de la válvula proporcional.*

Identificación / Marca: ?1379  Indicadores  
 Descripción: Válvula de presión proporc  Indicadores

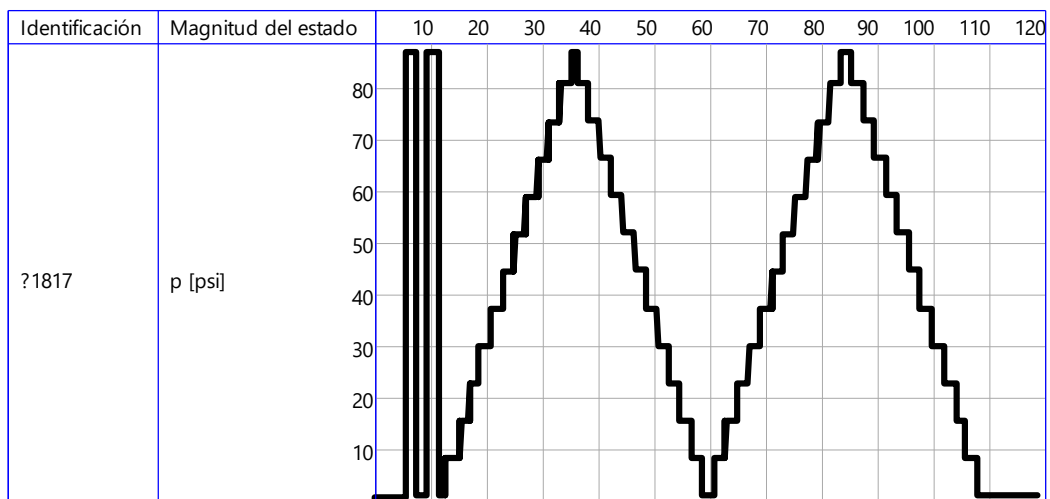
Parámetros de componentes	Indicadores	Variable
<b>Características</b>		
Caudal nominal normal	1400 l/min	<input type="checkbox"/> D <input type="checkbox"/> V <input type="checkbox"/> U <input type="checkbox"/> q0
<b>Curva característica p_set(U_in)</b>		
Tensión (Mín.)	0 V	<input type="checkbox"/> D <input type="checkbox"/> V <input type="checkbox"/> U <input type="checkbox"/> U_min
Tensión (Máx.)	10 V	<input type="checkbox"/> D <input type="checkbox"/> V <input type="checkbox"/> U <input type="checkbox"/> U_max
Presión nominal (U_min)	0 bar	<input type="checkbox"/> D <input type="checkbox"/> V <input type="checkbox"/> U <input type="checkbox"/> p1
Presión nominal (U_max)	6 bar	<input type="checkbox"/> D <input type="checkbox"/> V <input type="checkbox"/> U <input type="checkbox"/> p2

Mostrar todos los ajustes Aceptar Cancelar

**Nota.** Los parámetros utilizados para la válvula proporcional provienen del catálogo de la válvula.

**Figura 31.**

*Muestra de ejecución se secuencias.*



**Nota.** La figura muestra la secuencia programada con el objetivo de demostrar su funcionamiento.



De la figura 31 y los datos arrojados por la simulación fue posible realizar la tabla de calibración, mostrada a continuación en la tabla 3.

**Tabla 3.**

*Tabla de calibración*

Lecturas	Lectura del patrón	Lectura al interior de la cámara	Lectura del patrón	Lectura al interior de la cámara	Lectura del patrón	Lectura al interior de la cámara	Lectura del patrón	Lectura al interior de la cámara
	Ascenso 1		Descenso 1		Ascenso 2		Descenso 2	
Lectura1	0	8.24	90.64	81.1	8.24	8.24	90.64	81.1
Lectura2	16.48	15.5	82.4	73.8	16.48	15.5	82.4	73.8
Lectura3	24.72	22.8	74.16	66.6	24.72	22.8	74.16	66.6
Lectura4	32.96	30.0	65.92	59.3	32.96	30	65.92	59.3
Lectura5	41.2	37.3	57.68	52.1	41.2	37.3	57.68	52.1
Lectura6	49.44	44.6	49.44	44.8	49.44	44.6	49.44	44.8
Lectura7	57.68	51.8	41.2	37.5	57.68	51.8	41.2	37.5
Lectura8	65.92	59.1	32.96	30.3	65.92	59.1	32.96	30.3
Lectura9	74.16	66.4	24.72	23	74.16	66.4	24.72	23
Lectura10	82.4	73.6	16.48	15.7	82.4	73.6	16.48	15.7
Lectura11	90.64	80.9	8.24	8.46	90.64	80.9	8.24	8.46
Lectura12	98.88	87.0	0.00	1.2	98.88	87	0	1.2

**Nota.** La tabla tiene los valores que registra el patrón y los debería registrar el instrumento que estaría en calibración.

De la tabla 3, se pueden determinar los errores en la medición, ubicados en la tabla 4. Con los datos de errores definidos para el ascenso y descenso de cada parte de la secuencia, se determina la repetibilidad y la histéresis del sistema automatizado.

**Tabla 4.***Tabla de errores*

Lecturas	Errores de las mediciones			
	Ascenso	Descenso	Ascenso	Descenso
Lectura1	0	-9.54	0	-9.54
Lectura2	-0.98	-8.6	-0.98	-8.6
Lectura3	-1.92	-7.56	-1.92	-7.56
Lectura4	-2.96	-6.62	-2.96	-6.62
Lectura5	-3.9	-5.58	-3.9	-5.58
Lectura6	-4.84	-4.64	-4.84	-4.64
Lectura7	-5.88	-3.7	-5.88	-3.7
Lectura8	-6.82	-2.66	-6.82	-2.66
Lectura9	-7.76	-1.72	-7.76	-1.72
Lectura10	-8.8	-0.78	-8.8	-0.78
Lectura11	-9.74	0.22	-9.74	0.22
Lectura12	-11.88	1.2	-11.88	1.2

**Nota.** La tabla de los valores que registra el patrón y los registrados por el instrumento.

De la tabla 4, se puede concluir que el sistema tiene una repetibilidad máxima en ascenso igual 0 mbar, pero su repetibilidad máxima en descenso fue de igual manera de 0 mbar como resultado de una simulación, este resultado se acerca a un sistema real, que es lo que este proyecto busca. Lo que nos permite afirmar que el sistema automatizado garantizaría un cien por ciento de precisión en la calibración. Con la tabla anterior también fue posible determinar la histéresis, siendo igual a 13.08 mbar tanto en ascensos y descensos correspondientes a la secuencia.

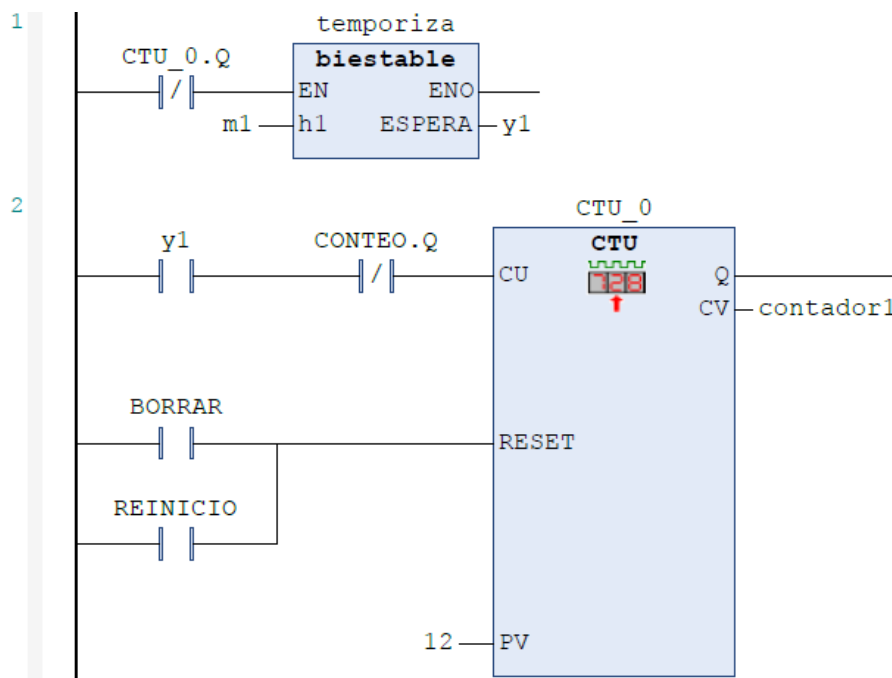
#### **4.4. Programación del PLC**

El programa para la automatización del proceso de calibración de instrumentos de medición en una la cámara de vacío está realizado en Codesys, este programa es un ambiente de desarrollo para la programación de controladores. Este programa trabaja bajo estándar industrial internacional IEC 61131- 3 que consiste en la estandarización de los lenguajes de programación para la automatización industrial.

A continuación, se hará una breve explicación de la programación del PLC. En principio es necesario partir de la premisa de que la presión a la salida de la válvula depende enteramente del valor de voltaje ingresado, es decir, entre más o menos voltaje se le dé al solenoide Y1, este será correspondido con la apertura o cierre de la válvula y en consecuencia se verá la variación de la presión. En las imágenes 32, 33 y 34 podemos encontrar la programación del PLC completa.

**Figura 32.**

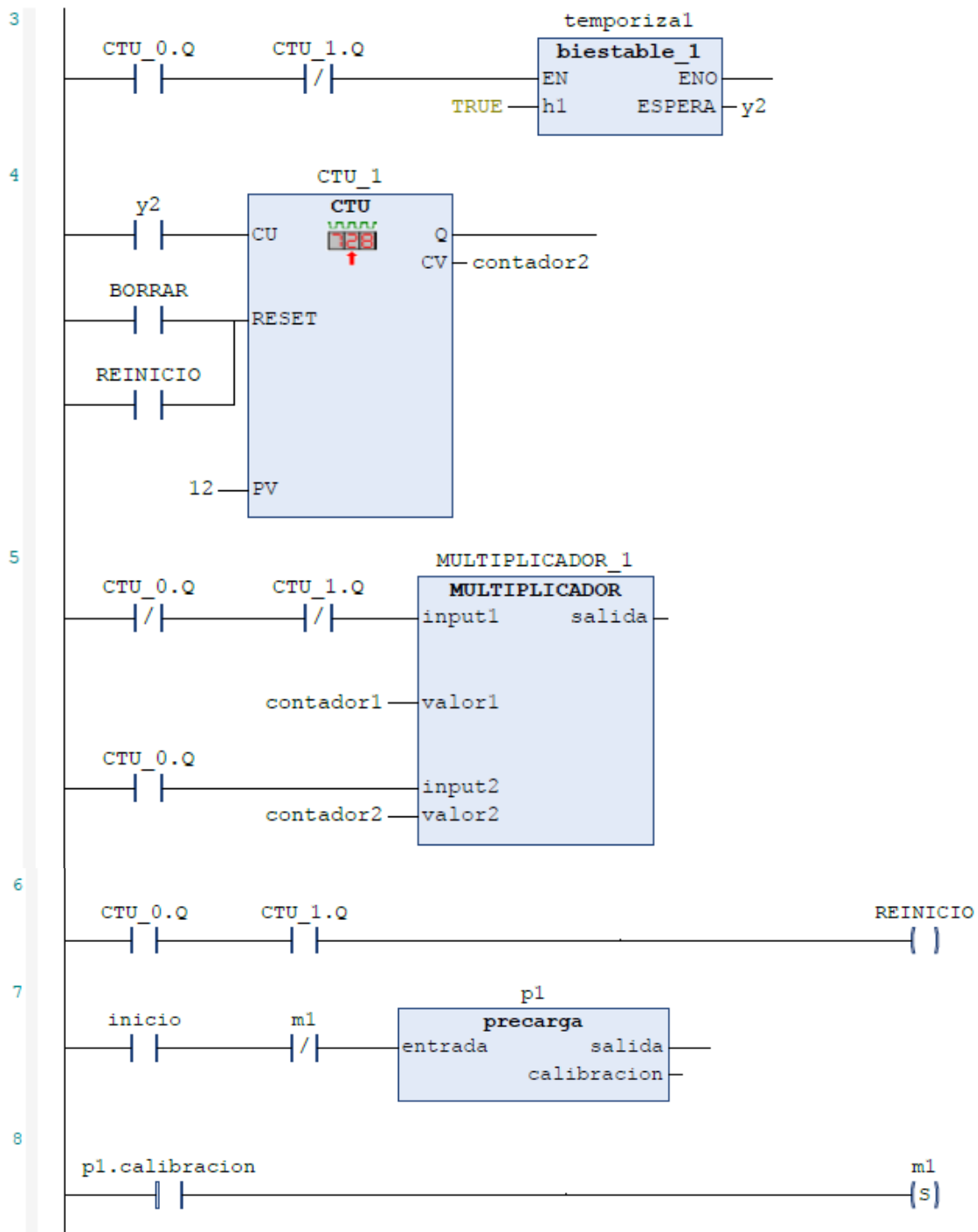
*Parte 1 de la programación del PLC*



**Nota.** La figura tiene la sección inicial de la programación general del PLC donde se encuentran los contadores y temporizadores.

**Figura 33.**

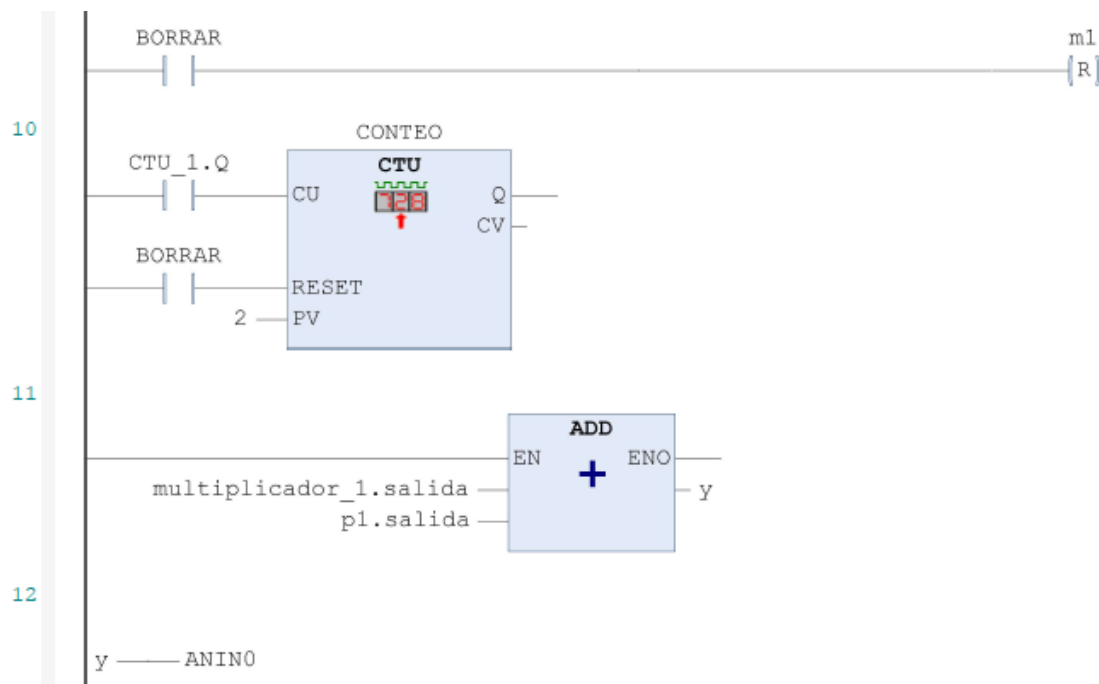
*Parte 2 de la programación del PLC*



**Nota.** La figura tiene la segunda sección de la programación general del PLC donde se encuentran los contadores, temporizadores, los multiplicadores y precargas.

**Figura 34.**

*Parte 3 de la programación del PLC.*



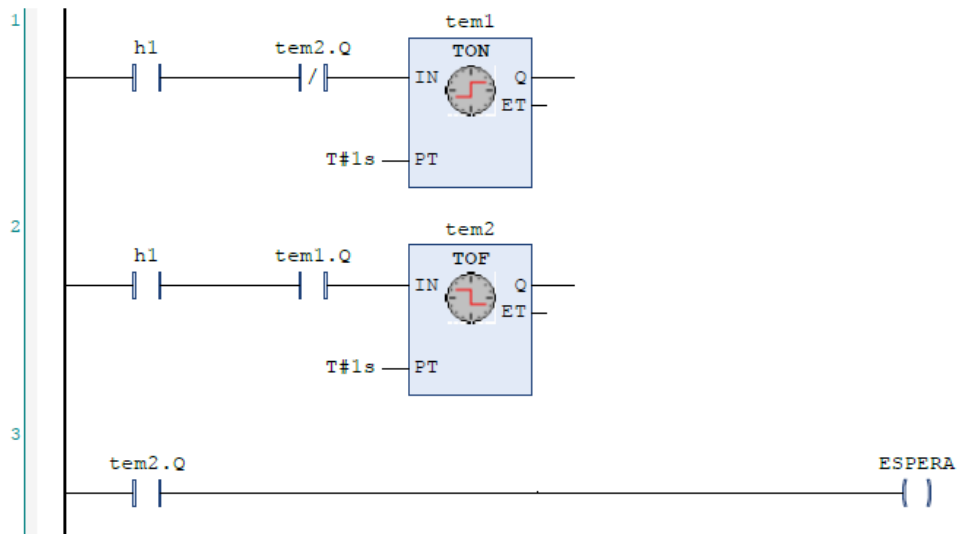
**Nota.** La figura tiene la tercera sección de la programación general ingresada al PLC, donde se encuentran los contadores y un multiplicador.

El programa, cuenta con un botón de inicio el cual se encuentra en la rama siete como un contacto normalmente abierto y un reset, presente en los contadores. Este programa también tiene algunas subfunciones y diferentes tipos de programación. La programación general del PLC se realiza usando lenguaje Ladder.

La primera subfunción es la de temporización, que se encuentra en la rama uno precedida por un contacto normalmente cerrado que se abre cuando el contador CTU\_0 cero finalice el conteo de los escalones de ascenso; esta subfunción CTU\_0 cuenta con dos temporizadores, uno con activación a la conexión y otro a la desconexión mostrados en la figura 35, estos tienen sus señales cruzadas, las señales cruzadas generan intermitencia en el funcionamiento, esta intermitencia se hace con el fin de tener un espacio de tiempo determinado, el cual le permite al PLC poder cambiar el valor del voltaje para un nuevo escalón.

**Figura 35.**

*Subfunción de temporización*



**Nota.** Subfunción programada para poder hacer cada uno de los escalones generados para la secuencia programada.

Posteriormente en la rama 2, encontramos un contacto normalmente abierto y1, que corresponde a la espera producida por la temporización, cuando este se activa, energiza el contador, contador que cuenta con contactos normalmente abiertos de inicio y reset. Luego, en la rama tres se encuentra el temporizador 1, el cual está precedido por un contacto normalmente cerrado que se abre cuando él contador CTU\_1 se activa, y un contacto normalmente abierto de CTU\_0, con una espera nombrada y2. Para después activar un nuevo contador nombrado CTU\_1, con funcionamiento similar al anterior. Con los temporizadores ubicados en la rama uno del programa, los cuales están programados así con el objetivo de que, en otra parte del programa, en otra subfunción, usando contadores CTU\_0 y CTU\_1, estos se puedan modificar según la necesidad de escalones a contar de subida o bajada. Los contadores se logran por medio de programación en lenguaje C y se asocian a unos multiplicadores de acuerdo a los valores requeridos por el conversor digital análogo del PLC.

### Figura 36.

#### *Programación en C de los multiplicadores*

```
1     IF input1 = TRUE THEN
2         salida := ( valor1 * 2735 ) ;
3     END_IF
4     IF input2 = TRUE THEN
5         salida := 32820 - ( valor2 * 2735 ) ;
6     END_IF
7
```

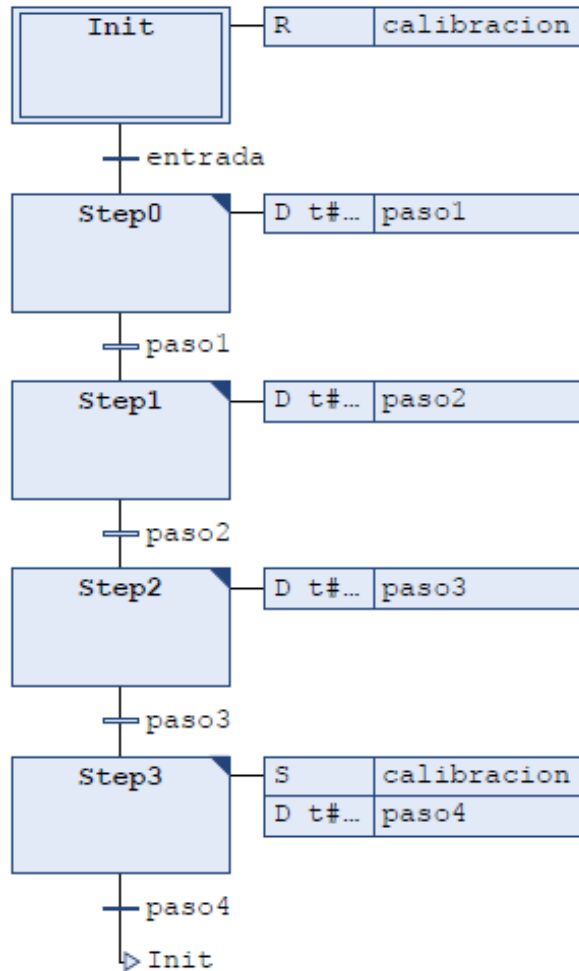
**Nota.** Subfunción programada en C, por medio de operaciones relaciona el voltaje necesario para la apertura y cierre de la válvula.

Los multiplicadores por medio de operaciones programadas en C como se muestra en la figura 36 se pueden enviar una señal a Fluid Sim la cual será recibida en voltios. Luego en la rama seis se encuentra el reset del sistema, el cual está precedido por dos contactos normalmente abiertos que se cierran una vez los contadores hayan finalizado el conteo programado.

Posteriormente encontramos la rama siete, donde se encuentran programadas las precargas, que también está precedido por dos contactos, uno normalmente abierto que corresponde al inicio del sistema por medio de un pulsador y otro, normalmente cerrado que corresponde a la relación con temporización inicial del programa. Las precargas se encuentran programadas exteriormente en GRAFCET pero interiormente en lenguaje C, con la intención de poder hacer el ingreso del número de precargas según la secuencia de calibración seleccionada.

**Figura 37.**

*Programación de la subfunción precargas.*



**Nota.** Programación en pasos de las precargas, cada paso se encuentra programado con C.

Luego, en la rama 8 con un contacto normalmente abierto, que se activa una vez la precarga programada finalice. En la rama 10 se encuentra un contador el cual funciona de la misma manera que los anteriores contadores, es cual tiene una activación con un contacto normalmente abierto de CTU\_1 y un reset.

En la parte final del programa encontramos un sumador en la rama 11, el cual tiene dos entradas, el primero para los multiplicadores y otro para las precargas, mientras alguno de los dos esté habilitado, el otro debe tener un valor de 0, cuando se activa el del multiplicador, aquí, el sumador dará un valor de salida el cual se lleva a una entrada análoga. Esta entrada análoga es la numero 0 del PLC programado en Fluid Sim como se puede evidenciar en la figura 29.



Ejecutando el programa, comprobando el buen funcionamiento del mismo, fue posible poder determinar la relación entre el nivel de voltaje y la presión que, entregada por la válvula proporcional, teniendo en cuenta que se utilizan intervalos y condiciones de funcionamiento máximos y mínimos mencionados en el catálogo del cual se logró hacer la selección de la válvula. De esta manera se puede probar que la válvula cumple con las condiciones de funcionamiento para el sistema.

#### 4.5. Análisis de resultados

Con el programa de calibración automatizado definido en la sección 4.4 es posible conocer el requerimiento de voltaje para el funcionamiento de la válvula y entrega de presión. Con estos datos se puede nuevamente realizar un análisis en Matlab y con el uso del toolbox ident definir la función de transferencia del sistema con la secuencia automatizada; el resultado es visible en la figura 38 por medio del mismo proceso usado con los datos experimentales.

Gracias a esta herramienta también es posible encontrar polos y ceros, indicando gráfica y textualmente la posición y cantidad de estos. El proceso se hace con los datos encontrados de forma experimental mostrados en la figura 28 y con los datos obtenidos mediante la automatización del sistema, teniendo en cuenta la linealidad entre el nivel de apertura y el voltaje de operación de la válvula seleccionada.

#### Figura 38.

*Función de transferencia voltaje Vs salida presión*

```
tfl =

From input "u1" to output "y1":
  117.8 s + 51.38
-----
s^2 + 3.236 s + 5.956

Name: tfl
Continuous-time identified transfer function.

Parameterization:
Number of poles: 2   Number of zeros: 1
Number of free coefficients: 4
Use "tfdata", "getpvec", "getcov" for parameters and their uncertainties.
```

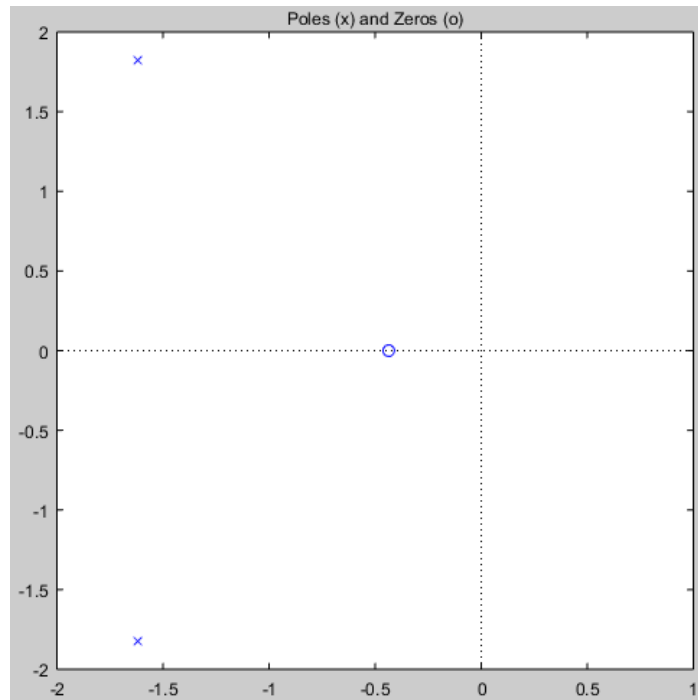
**Nota.** La función de transferencia de voltaje Vs salida de presión que encontramos en la figura es el resultado a todo el análisis realizado por Matlab para el proceso automatizado

Con base a esta función de transferencia del proceso automatizado y la que se halló experimentalmente, se determinó el diagrama de polos y ceros, para ambos casos; estos diagramas se utilizan mayormente con el objetivo de definir el comportamiento o la estabilidad del sistema que se esté analizando. Los ceros representados con una "O" se obtienen igualando el polinomio del numerador a cero y los polos representados con "X" se obtienen igualando también el polinomio del denominador a cero. Los polos y ceros obtenidos se deben colocar en un plano imaginario  $S$ . Esto se define mediante la identificación del lado en el que se encuentren graficados los polos y ceros, siendo que si se encuentran del lado derecho se puede decir que es un sistema inestable, pero, si por lo contrario se encuentra al lado izquierdo, entonces, se puede decir que es un sistema estable.

Teniendo en cuenta, lo anteriormente mencionado es posible identificar en la figura 39 se puede decir que la ubicación de los polos y ceros para función de transferencia del voltaje vs la salida de presión del proceso automatizado, determinan que se tiene un sistema que con tiempo se mantiene estable. Las dos X en ambas posiciones en el plano, indican que el sistema tiende a llevar la presión por encima del set point o valor fijado, como un sobre impulso, pero con el tiempo la presión también tenderá a alcanzar ese valor y mantenerse en el mismo, por lo que nos lleva a afirmar, que, para este caso, los sobre impulsos no afectan la calibración ni el sistema. La velocidad a la cual el sistema encuentre la estabilidad está relacionada con la distancia a la que está el O de la coordenada (0,0) del plano. Con esto podemos decir que entre más alejado del eje (0,0) esté el O, entonces será más rápido alcanzar el valor fijado.

**Figura 39.**

*Polos y ceros de función de transferencia  
voltaje vs salida presión válvula.*



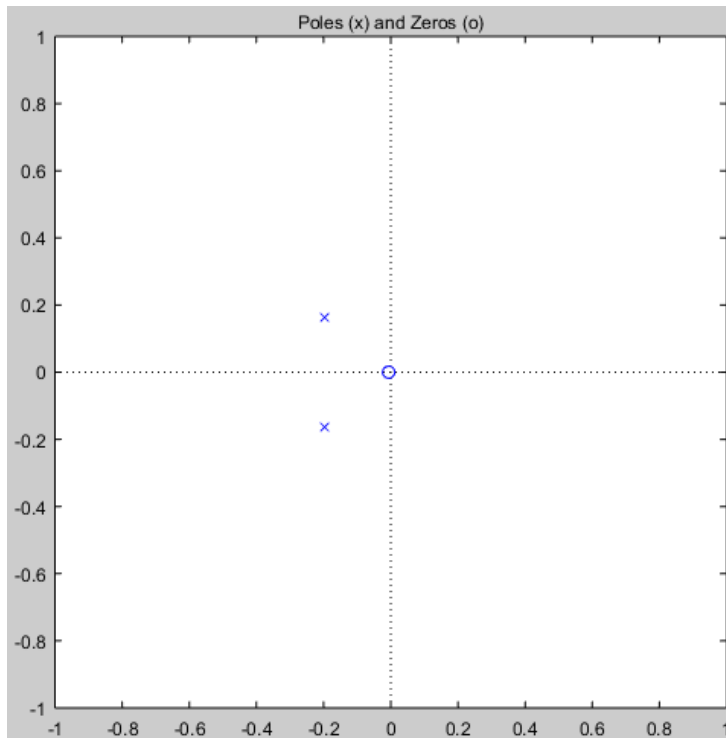
**Nota.** El diagrama de polos y ceros realizada por Matlab permite determinar la estabilidad del sistema.

Para la función de transferencia del porcentaje de apertura Vs presión de salida del proceso experimental en la figura 40, también fue posible conocer la cantidad y posición de polos y ceros de la función.

Para este caso se tiene un sistema estable, de igual manera que la figura 39 de polos y ceros anterior, tiene dos polos que indican que el sistema tiende a llevar la presión por encima del set point o valor fijado, como un sobre impulso, pero con el tiempo la presión también tenderá a alcanzar ese valor fijado y mantenerse en el mismo, este sobre impulso tampoco afecta el proceso de calibración ni el sistema en general. En el caso de la figura 40, el cero del plano esta casi encima de la coordenada (0,0). Esta posición se puede expresar como la velocidad que tarda el sistema automatizado en alcanzar el set point. La posición de este cero no modifica en nada la estabilidad del sistema, esté se mantiene estable, pero será mayor el tiempo necesario para alcanzar la estabilidad del sistema.

**Figura 40.**

*Polos y ceros de función de transferencia  
porcentaje de apertura Vs presión de salida*

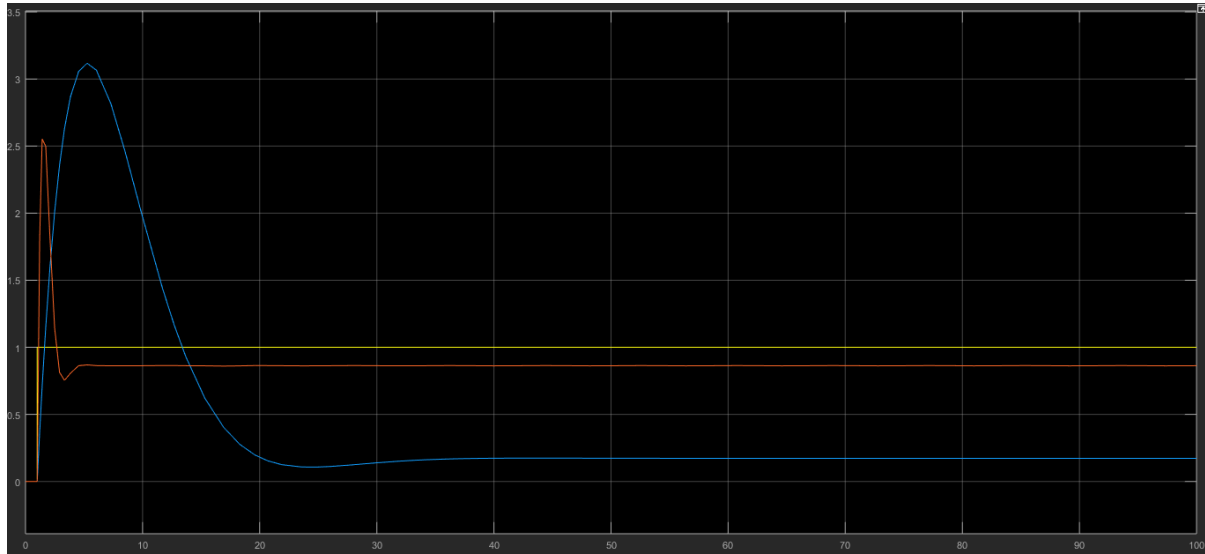


**Nota.** El diagrama de polos y ceros realizada por Matlab permite determinar la estabilidad del sistema automatizado.

Para poder entender el comportamiento que tiene cada función de transferencia y poder realizar una comparación adecuadamente, entonces, en la figura 41 se evidencia tres gráficas, una de color amarilla, una azul y una naranja. Estas representan datos logrados mediante el análisis y uso de Matlab. Estas gráficas reflejan los diferentes comportamientos uno del sistema manual y otro del sistema automatizado.

**Figura 41.**

*Comparación del comportamiento de las dos funciones*



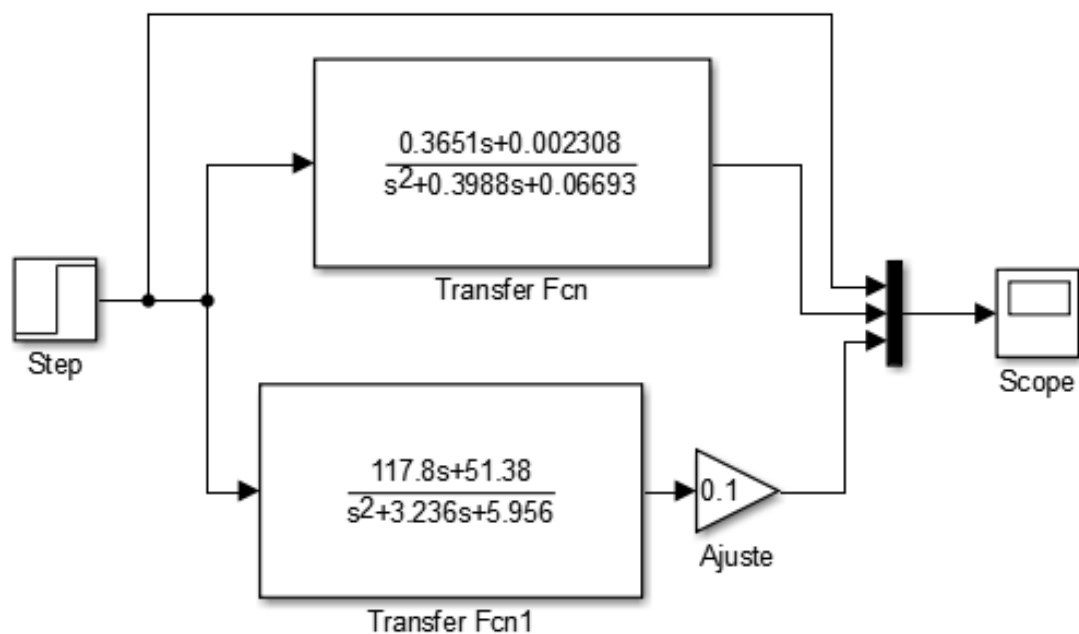
**Nota.** Figura que representa la comparación del sistema automatizado vs el sistema actual, manual.

- ✓ Encontramos la entrada, en amarillo, el set point; el valor consigna que para este caso se estableció con el objetivo de establecer una comparación entre las gráficas de las funciones de transferencia.
- ✓ En azul, encontramos la graficas de la función de transferencia de porcentaje de apertura Vs presión de salida del proceso experimental. Esta figura nos muestra el tiempo el cual son treinta segundos que tarda el sistema trabajando de manera manual en estabilizarse. Experimentalmente se pudo evidenciar que gracias al sobre impulso que recibía el sistema se hacía complejo poder llegar a un valor deseado, tardando más tiempo en alcanzarlo. Por otro lado, teniendo en cuenta que esta calibración tiene un error bastante considerable al estar tan alejada del set point, después de cierto tiempo y maniobras con las válvulas se lograba la estabilidad del sistema. Lo anterior permite decir que se trataba de un proceso tedioso y demorado para la persona que realizara el trabajo de calibración de instrumentos.
- ✓ En color naranja, encontramos el comportamiento de la función de transferencia de voltaje vs salida presión válvula del proceso automatizado, que comparada con la anterior toma alrededor de 3 segundos alcanzar la estabilidad; también comparada con el set point el sobre impulso no tiene gran notoriedad y

afectación, lo que muestra una reducción significativa del tiempo que tomaría el proceso de calibración con el uso de una válvula proporcional. Además, se evidencia menos error con la implementación de una válvula proporcional y el uso de un PLC, pero también se puede lograr una disminución del error mediante ajustes en el PLC, este ajuste se logra mediante un escalón unitario que se utilizan para establecer la capacidad del sistema de control y así poder alcanzar el objetivo. En la figura 42, el ajuste empleado para la reducción es de 0.1 este puede variar según necesidad y objetivos

**Figura 42.**

*Configuración del ajuste del error*



**Nota.** Figura que representa el ajuste del 0.1 para la función de transferencia del sistema automatizado.

El proceso manual de calibración de un instrumento medidor de presión absoluta, se torna largo y complicado, ya que por medio de éste es difícil tener un ajuste y alcanzar objetivos, el comportamiento del sistema lo dificulta, debido a lo difícil de controlar y de alcanzar puntos exactos, ya que el tiempo para que el sistema se estabilizara era prolongado, este proceso manual implica tiempo para alcanzar buenos resultados en cuanto a calibración. Con las desventajas que tiene un proceso manual es posible decir, que la automatización de este proceso es la mejor opción para alcanzar buenos resultados en un espacio de tiempo más corto. El uso

de una válvula proporcional con la programación de un PLC propone mejores opciones para la solución de la problemática, ya que, por medio del proceso de control del sistema, es posible alcanzar puntos o valores en un lapso de tiempo más cortos, también alcanza una estabilidad de manera que se pueden tomar valores acertados, lo que nos permite optimizar el proceso para la calibración de instrumentos que trabajan bajo presión absoluta.

## 5. MANUALES

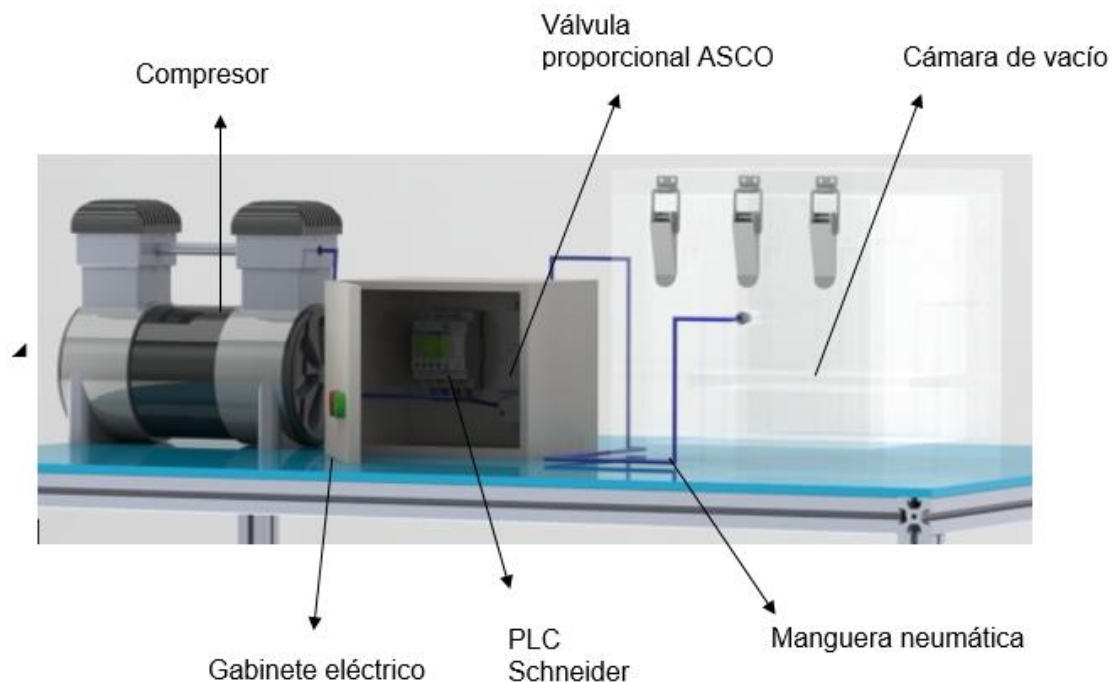
### 5.1. Manual de instalación y operación

Para llevar a cabo la instalación del equipo se deben cumplir con los siguientes requerimientos y el listado de pasos. Teniendo en cuenta la figura 43, donde se muestran los componentes del sistema automatizado.

- Requerimientos.
- Paso 1. Realizar las conexiones eléctricas y neumáticas
- Paso 2. Verificación del estado de los componentes del sistema
- Paso 3. Evaluación del funcionamiento del sistema
- Paso 4. Operación del sistema.

#### Figura 43.

*Componentes sistema automatizado.*



**Nota.** Figura que representa los componentes a utilizar para el sistema automatizado del sistema de calibración. El CAD del compresor es tomado de: GrabCommunity. “Free oil motor”, <https://grabcad.com/library/free-oil-compressor-1> [En línea]. Acceso [09 de agosto].



## REQUERIMIENTOS

Es necesario para la instalación tener todos los elementos que hacen parte e influyen en el funcionamiento del sistema.

- Se debe tener un espacio apropiado de trabajo, el cual pueda contener todos los componentes del sistema.
- Este espacio debe tener cercanamente una toma de corriente de 110V-60HZ.
- Componentes necesarios para la instalación y uso del sistema del sistema

Compresor

Cámara de vacío

Empaque la tapa de la cámara de vacío

2 racores hembra macho de  $\frac{1}{4}$

PLC Schneider

Válvula proporcional

Conector M12 para entrada de frecuencia.

Manguera neumática de un  $\frac{1}{4}$  de diámetro

Cables para conexiones eléctricas

Patrón

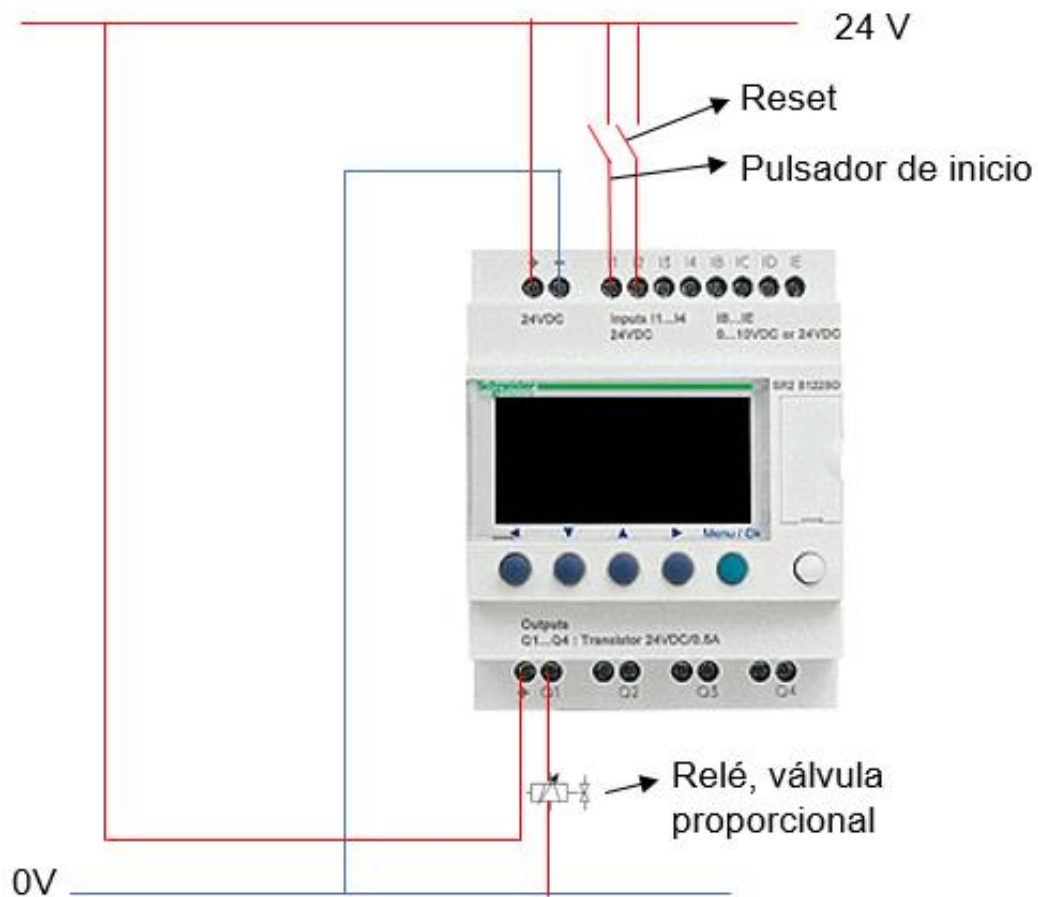
Gabinete eléctrico

### PASO 1

En la figura 44 se encuentra la conexión eléctrica del PLC, esta se realiza con el uso de una fuente de 24V DC en color rojo, y en azul se encuentra el negativo, 0V. Se debe realizar la conexión del pulsador de inicio y el reset al PLC, también la conexión del relé de activación de la válvula proporcional.

**Figura 44.**

*Conexiones eléctricas para el PLC Schneider del sistema automatizado*



**Nota.** Conexiones eléctricas para el PLC. Figura del PLC tomado de GrabCommunity disponible en línea <https://grabcad.com/library/plc-schneider-electric-zelio-logic-1>

En la figura 45 encontrará las conexiones neumáticas y eléctricas necesaria para la válvula proporcional, es necesario el uso de racores neumáticos de ¼ para la conexión neumática, maguera neumática y para las conexiones eléctrica una conector M12 para la entrada de frecuencia.

## Figura 45.

*Conexiones eléctricas y neumáticas para la válvula proporcional.*



**Nota.** Conexiones neumáticas y eléctricas para la válvula proporcional Figura de la válvula proporcional tomada de DirectIndustry disponible en línea <https://www.directindustry.es/prod/asco/product-7472-1174153.html>

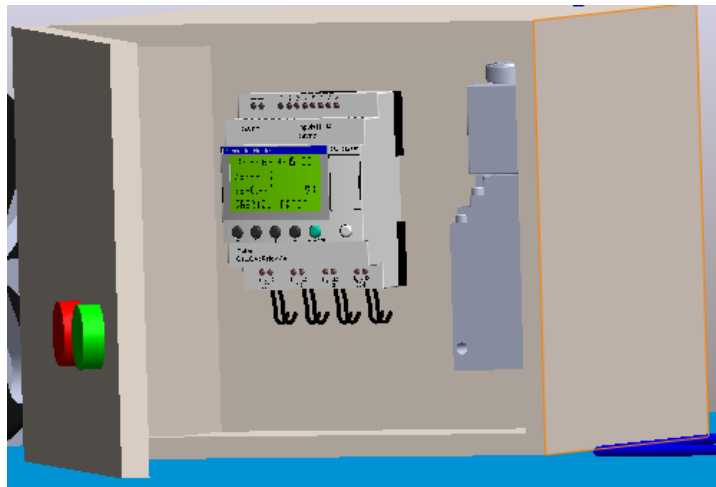
### ADVERTENCIA

Las conexiones neumáticas que se dirigen a la válvula proporcional se deben realizar utilizando dos mangueras diferentes. Tenga en cuenta que el operario debe realizar el cambio de flujo del aire desde el compresor de manera manual. Conectando la manguera necesaria para el instante en el que se encuentre la secuencia de calibración.

### NOTA

La instalación del PLC y la válvula proporcional debe estar realizada al interior de un gabinete eléctrico mostrado en la figura 46, de esta forma se garantiza la seguridad del operario, orden en el espacio de trabajo, el cuidado de los dispositivos y facilita la operación de todos los dispositivos del sistema de calibración.

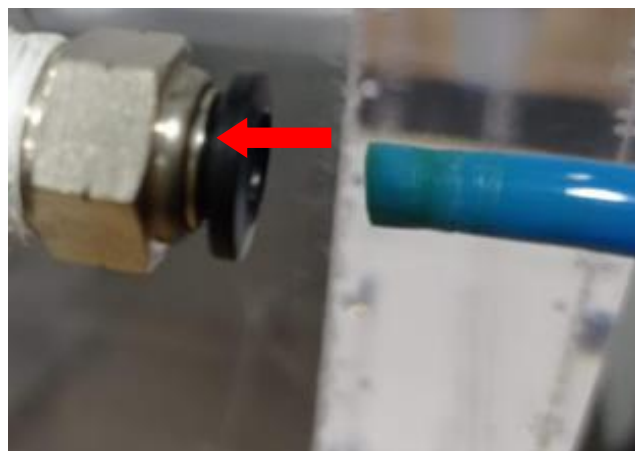
**Figura 46.**  
*Gabinete eléctrico.*



**Nota.** Montaje del gabinete eléctrico. El CAD la válvula proporcional es tomada de PartCommunity disponible en línea [https://b2b.partcommunity.com/3d-cad-models/vppe-v%C3%A1lvula-de-presi%C3%B3n-proporcional-festo?info=festo%2Fparts\\_cat%2Fvalves%2Fprop%2Fp\\_press%2Fvppe.prj&cwid=4704](https://b2b.partcommunity.com/3d-cad-models/vppe-v%C3%A1lvula-de-presi%C3%B3n-proporcional-festo?info=festo%2Fparts_cat%2Fvalves%2Fprop%2Fp_press%2Fvppe.prj&cwid=4704)

Para la conexión neumática que generará presión o vacío en el interior de la cámara solo es necesario emplear manguera neumática y ajustar el racor de  $\frac{1}{4}$  al orificio destinado para el ingreso y salida del aire. Como se muestra en la figura 47.

**Figura 47.**  
*Conexión neumática*



**Nota.** Conexión de manguera neumática de  $\frac{1}{4}$  con racor de  $\frac{1}{4}$ . Fuente:

## **PASO 2**

Cerciórese que todos los componentes del sistema se encuentren en buenas condiciones para el uso y trabajo, teniendo en cuenta que con el buen estado de los dispositivos se garantiza el buen funcionamiento del sistema.

- ✓ Verifique que las conexiones eléctricas en el gabinete eléctrico, el PLC y la válvula proporcional estén en su lugar, de esa forma se evitan daños eléctricos de los dispositivos.
- ✓ También tenga en cuenta el cable de poder del compresor, que esté conectado a la toma de corriente, que nos tenga peladuras y no se encuentre trozado.
- ✓ Asegúrese que la manguera neumática no se encuentre rota o mal conectada a los racores, ya que al presurizar el sistema se pueden causar incidentes o simplemente no funcione correctamente el sistema.
- ✓ Tenga en cuenta que el uso del sello de la tapa de la cara es indispensable, ya que este proporciona hermeticidad al sistema, por eso es necesario que no se encuentre roto o con fracturas, de lo contrario la cámara no trabajaría correctamente.
- ✓ Verifique que el PLC, la cámara de vacío, la válvula proporcional y el patrón se encuentren en perfecto estado, que no tengan abolladuras, golpes o en malas condiciones.

## **PASO 3**

Una vez realizadas todas las conexiones eléctricas y neumáticas se deben hacer pruebas de funcionamiento, se deben realizar los siguientes pasos:

- ✓ Estas pruebas inician energizando el sistema. Una vez energizado, se debe verificar que no haya cortos circuitos o sobrecalentamiento de algún componente eléctrico.
- ✓ Al cerciorarse que el sistema no tenga problemas eléctricos, se debe presurizar el sistema, el sistema se presuriza verifique que el sistema no tenga fugas de aire y que los componentes neumáticos cumplan con los requisitos para generar presión al interior de la cámara de vacío.

- ✓ Con la verificación del estado del sistema realizada, nuevamente despresurice. Una vez el sistema esté a presión atmosférica destape la cámara de vacío, abriendo los cerrojos que se encuentran alrededor de toda la tapa. Con la tapa retirada ponga en el interior de la cámara de vacío el patrón de calibración.
- ✓ Nuevamente energice y presurice el sistema, y seleccione un número de precargas. Estas precargas sirven para establecer que el funcionamiento del sistema sea adecuado. El patrón le ayudará a determinar la variación de la presión al interior de la cámara de vacío.
- ✓ Una vez terminadas las pruebas de funcionamientos despresurice nuevamente el sistema.

#### **PASO 4**

##### **OPERACIÓN**

En este paso se explicará la correcta operación del sistema de calibración automatizado.

- ✓ Identificar el instrumento el cual se desea calibrar.
- ✓ Seleccione una las secuencias que deben estar previamente programadas en el PLC.

##### **NOTA**

La secuencia de calibración debe ser seleccionada previamente, tenga en cuenta que está la secuencia A, B y C, seleccione según la incertidumbre establecida por el fabricante del instrumento.

- ✓ Una vez energizado, presurizado el sistema y seleccionada la secuencia de calibración, se da inicio a la calibración del instrumento.
- ✓ Primero, con el pulsador de inicio se generará la primera sección de la secuencia, se realizarán las precargas necesarias para luego iniciar el ascenso escalonado de la presión, de esta forma se va aumentando la presión al interior de la cámara.

##### **NOTA**

La cantidad de precargas varía según la secuencia de calibración seleccionada.

- ✓ Posteriormente, cuando la secuencia seleccionada se encuentre el punto más alto, el operario debe utilizar el tiempo de estabilización para cambiar manualmente la dirección del flujo de aire. Este cambio debe hacerse de forma ágil y precisa.

## **NOTA**

Es conveniente tener 2 mangueras neumáticas conectadas a la válvula proporcional, para facilitar el cambio directamente en el compresor.

- ✓ Con el cambio de flujo del aire realizado se inicia el descenso escalonado de la presión, así generará vacío.
- ✓ Una vez el sistema alcance el nivel admitido de vacío, también se generará un tiempo de estabilización del sistema, este tiempo debe ser empleado nuevamente para el cambio de dirección del flujo de aire, para poder ascender escalonadamente la presión.

## **ADVETENCIA**

Esta operación debe realizarse repetidas veces según la secuencia de calibración seleccionada.

- ✓ Una vez realizada la secuencia seleccionada, la válvula se cerrará totalmente. Con el proceso terminado apague el compresor, desenergice y despresurice el sistema llevándolo a condiciones atmosféricas.
- ✓ Con el sistema en condiciones de presión atmosféricas puede nuevamente destapar la cámara de vacío.
- ✓ Para destapar la cámara de vacío gire nuevamente los cerrojos que se encuentran alrededor de la tapa de la cámara de vacío. La tapa debe ser retirada empujándola hacia arriba.
- ✓ Por último, puede retirar el instrumento calibrado.

## **5.2. Manual de mantenimiento**

Con el uso de un manual o un plan de mantenimiento, se puede prevenir fallas y garantizar el correcto funcionamiento de todos los componentes del sistema. Es por eso que se da a conocer los componentes en los cuales se desea conocer las

posibles fallas, junto con la frecuencia de las inspecciones que se debidamente se deben realizar. A continuación, en la tabla 5, se mostrará cada componente, su revisión, junto con su posible falla y la frecuencia con la cual se debe realizar esta revisión.

**Tabla 5.**

*Tabla de fallas e inspecciones*

Sistema	Elemento	Inspección	Falla	Frecuencia de inspección
Estructural	Cámara de vacío	Revisar el interior y el exterior	Fisura o rotura	6 meses
	Empaque	Verificar que se encuentre en buenas condiciones	Fisura o rotura	6 meses
Electroneumático	PLC	Revisar el funcionamiento de la tarjeta de circuitos	Cortocircuito	6 meses
		Revisar conexiones	Cortocircuito	Diario
	Válvula proporcional	Verificación de fugas	Perdida de presión en el sistema	3 meses
		Verificar el cable conector M12	Cortocircuito	Diario
	Racores	Revisar el ajuste y sello del racor	Desgaste	3 meses
	Mangueras neumáticas	Verificar fugas de aire	Rotura	3 meses
	Cables y conectores	Verificar que no tengan peladura o rupturas	Cortocircuito	Diario
Neumático	Compresor	Revisar la presencia de agua	Desgaste o corrosión	6 meses

**Nota** Esta tabla muestra los sistemas presentes, los elementos que lo componen, fallas y la frecuencia con la cual se debe realizar las inspecciones de mantenimiento.



Una vez identificadas las fallas de los componentes de los sistemas presentes en el sistema de calibración, se pueden realizar actividades de mantenimiento al presentarse fallas. En la tabla 6, se identifican los sistemas, los componentes con sus fallas y por último la actividad de mantenimiento a realizar. Esto debe suceder en una posible falla o cuando el elemento lo requiera.

**Tabla 6.**

*Fallas y actividades a realizar*

Sistema	Elemento	Falla	Actividad
Estructural	Cámara de vacío	Fisura o rotura	Reparación preventiva
	Empaque	Fisura o rotura	Cambio de empaque
Electroneumático	PLC	Cortocircuito	Limpieza del polvo de la tarjeta de circuitos
		Cortocircuito	Cambio de conexiones
	Válvula proporcional	Perdida de presión en el sistema	Cambio de conexiones
		Cortocircuito	Cambio de conexiones
	Racores	Desgaste	Revestimiento de pintura anticorrosión
	Mangueras neumáticas	Rotura	Cambio de racores
	Cables y conectores	Cortocircuito	Cambio de manguera
Neumático	Compresor	Desgaste o corrosión	Revestimiento de pintura anticorrosión

**Nota** Esta tabla muestra los sistemas presentes, los elementos, las fallas correspondientes a cada uno y la actividad de mantenimiento a realizar.

El correcto funcionamiento y durabilidad de los componentes del sistema dependen en gran manera de la ejecución de los pasos de instalación, operación y la realización de mantenimiento presentados, con el objetivo de preservar la calidad del sistema y el estado óptimo de los componentes.

## 6. ANALISIS DE COSTOS TOTALES

### 6.1. Costos de diseño

El análisis de costos totales da una visión general de los recursos económicos necesarios para la ejecución del proyecto, contemplando el diseño propuesto y materiales. Los costos de diseño están indicados en la tabla 7.

**Tabla 7.**

*Rubros generados para el diseño*

ITEMS	CANTIDAD	UNIDAD	COSTO POR UNIDAD	TOTAL	FINANCIACIÓN
<b>Talento Humano</b>					
Investigador	250	Horas	\$8,000	\$2,000,000	Investigador
Director	30	Horas	\$20,000	\$600,000	Universidad América
<b>Subtotal</b>				\$2,600,000	
<b>Gastos Computacionales</b>					
Computador	-	-	-	\$1,000,000	Investigador
Softwares	-	-	-	\$200,000	Universidad América
<b>Subtotal</b>				\$1,200,000	
<b>Consumibles</b>					
Papelería/Tinta/ Internet	-	-	-	\$300,000	Investigador
<b>Subtotal</b>				\$300,000	
<b>Otros</b>					
Servicios públicos	-	-	-	\$700,000	Investigador
Transporte	-	-	-	\$30,000	Investigador
<b>Subtotal</b>				\$730,000	
<b>COSTO TOTAL DISEÑO</b>				<b>\$ 4,830,000</b>	

**Nota** Esta tabla relaciona los rubros empleados para el diseño del sistema automatizado.

## 6.2. Costos de materiales

A continuación, en la tabla 8 se relacionan los rubros empleados para los materiales necesarios para el desarrollo del proyecto.

**Tabla 8.**

*Costos de los materiales y elementos necesarios para la operación del sistema*

CANTIDAD	UNIDAD	COMPONENTE	VALOR UNITARIO	TOTAL
1	-	PLC	\$1,007,684	\$1,007,684
1	-	Válvula proporcional ASCO	\$2,988,291	\$2,988,291
2	-	Pulsadores	\$10,000	\$20,000
10	-	Tornillos	\$100	\$1,000
-	-	Suministros eléctricos	-	\$70,000
2	Metros	Manguera neumática	\$2,200	\$4,400
<b>TOTAL, COSTOS MATERIALES</b>				<b>\$4,091,375</b>

**Nota** Esta tabla relaciona los costos de los materiales necesarios para el uso e instalación del sistema.

El costo total de la inversión, para el desarrollo del proyecto proviene de la sumatoria de los costos de diseño y los rubros para los materiales. Esta sumatoria se evidencia en la tabla 9.

**Tabla 9.**

*Costo total proyecto.*

<b>COSTO TOTAL DISEÑO</b>	\$4,830,000
<b>TOTAL, COSTOS</b>	\$4,091,375
<b>COSTO TOTAL DEL PROYRCTO</b>	<b>\$8,921,375</b>

**Nota** Esta tabla relaciona los costos de los materiales y de diseño, englobando el costo general del proyecto.

El costo empleado en la inversión para el desarrollo del proyecto, puede ser recuperado con la ejecución de calibraciones de instrumentos según como se muestra en la tabla 10.

**Tabla 10.**

*Total de ingresos estimados por calibración al año.*

Costo actual de calibración	\$800,000
Estimación de instrumentos calibrados al año	10
<b>Total, de ingresos estimados</b>	<b>\$8,000,000</b>

***Nota** Esta tabla relaciona el total de ingresos que puede llegar a recibir la empresa Calibration Service. S.A.S.*

Con las tablas anteriormente relacionadas es posible decir que para que la empresa Calibration Service S.A.S, una vez realizada la inversión puede recuperar esa inversión en un tiempo estimado de catorce meses. Estimando la calibración de al menos diez instrumentos al año, y contando con que el costo actual de calibración de estos instrumentos se encuentra en 800 mil pesos.

## 7. CONCLUSIONES

Actualmente Calibration Service S.A.S, tiene como proyecto incluir el servicio de calibración de instrumentos de medición que trabajan bajo presión absoluta usando una cámara de vacío; este servicio debe cumplir con estándares de calidad, como la indica la norma ISO 17025:2017, norma que acreditará el proceso, buscando que los laboratorios de calibración garanticen resultados válidos y confiables. Con la implementación del diseño automatizado es posible entregar resultados acertados y confiables, ya que cuenta este diseño automatizado con una precisión del cien por ciento, lo que indica alta precisión en el proceso automatizado, y una histéresis de 13.08 mbar en ambos sentidos de la secuencia, cumpliendo con los requerimientos de calidad propuestos por la norma ISO 17025:2017. Una vez el proceso se encuentre acreditado proporcionará alta competitividad para la empresa Calibration Service S.A.S ampliando su portafolio de servicios.

Se evidenció que el diseño automatizado y de control para el proceso de calibración se basa en la implementación de una válvula proporcional, controlada por un PLC programado con los requerimientos de la norma de calibración; haciendo este diseño el más adecuado para una cámara de vacío para la calibración de instrumentos que funciones bajo intervalos de presión absoluta.

De acuerdo con la comparación de los análisis dinámicos tanto del sistema manual y el sistema automatizado, es posible concluir que el diseño de calibración automatizado debe incluir una válvula proporcional, ya que tiene mejores cualidades en aspectos de control y consumo energético, para poder reemplazarla en sistema de calibración manual y emplearla en el sistema de calibración automatizado, ya que proporciona estabilidad en las variables y del sistema, debido a su funcionamiento entrega la presión necesaria para los puntos de la secuencia de calibración, mejorando totalmente el tiempo hasta de más o menos de 10 minutos menos, comparado con el tiempo que pueda tomarse el proceso de calibración manual, con menos error y mejorando la histéresis, sin aumentar costos de consumo, alcanzando el objetivo general planteado y dando respuesta a la pregunta problema planteada en el proyecto.

Con la comparación realizada entre los sistemas dinámicos, las funciones de transferencia obtenidas y los diagramas de polo y ceros tanto en el sistema manual, como en el automatizado con el uso de una válvula proporcional, se encontró que ambos sistemas tienen en común que son sistemas estables, pero, este sistema manual tiene un sobre impulso que de forma experimental dificulta el poder alcanzar el set point, generando error que puede ser generado por el humano y alejándolo de la consigna, aumentando el tiempo de calibración; también fue evidente que este proceso puede generar calibraciones que no cumplan con las normas de calidad, haciéndolo no acreditable. En comparación con el sistema automatizado que evidenció estabilidad a pesar de que también cuenta con un sobre impulso, requiere de un tiempo más corto para poder alcanzar el set point; esto sucede debido a que la válvula proporcional solamente requiere de la variación del voltaje para poder realizar apertura o cierre necesario de la presión. En el sistema automatizado también es posible encontrar un error que puede ser corregido con un ajuste en la función de transferencia del sistema automatizado. Teniendo en cuenta lo anterior es posible concluir que, el diseño automatizado propuesto, usando una válvula proporcional controlada con un PLC, es el diseño de automatización adecuado para una cámara de vacío empleada en la calibración de instrumentos que trabajen en condiciones de presión absoluta. Aunque para este proceso automatizado no fue posible retirar en un cien por ciento la intervención humana, el error generado por el operario será despreciable.

Teniendo en cuenta que el diseño del sistema automatizado proporciona mejoras en el proceso de calibración dando solución a las necesidades planteadas. Con el análisis de costos se concluye que este diseño es rentable para poder ser implementado en la empresa Calibration Service S.A.S. Ya que la recuperación de la inversión se puede realizar en más o menos un año; una vez el diseño automatizado pase por el proceso de acreditación y se encuentre acreditado.

Durante el desarrollo del manual de operación, instalación y mantenimiento fue posible notar la facilidad que existe durante el momento de instalación y de operación, debido a que el sistema no cuenta con elementos numerosos ni componentes de alta complejidad, facilitando la operación y comprensión del sistema para el operario. Para el mantenimiento se identificó que es un sistema que requiere

inspecciones seguidas de forma preventiva, así se puede garantizar la constancia en el servicio de calibración.



## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Organismo Nacional de Acreditación de Colombia - ONAC, «Acreditación de Laboratorios de Calibración,» [En línea]. Available: <https://onac.org.co/servicios/laboratorios-de-calibracion/>. [Último acceso: 12 Julio 2021].
- [2] Deutscher Kalibrierdienst (DKD), *Calibración de instrumentos medidores de presión.*, Braunschweig, 2014.
- [3] Centro español de metrología, *Procedimiento ME017 Calibración de madidores de presión con salida eléctrica*, Madrid, España.
- [4] Centro Español de Metrología, CEM, «Procemiento ME-003 de calibración de manómetros, vacuómetros y manovacúómetros,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.cem.es/es/divulgacion/documentos/me-003-procedimiento-calibracion-manómetros-vacuómetros-manovacúómetros>. [Último acceso: 14 Septiembre 2021].
- [5] European Association of National Metrology Institutes EURAMET, *Guidelines on the Calibration of Electromechanical Manometers*, Brunswick, Alemania, 2019.
- [6] D. I. C. L., *Procedimiento para la calibración de instrumentos de medición de presión absoluta (barómetros)*, Lima, Perú: Laboratorio de la fuerza y presión, 2018.
- [7] A. Creus Solé, *Instrumentación industrial*, 8va Edición ed., Mexico: Alfaomega grupo editorial, 2010.
- [8] Á. F. Aguilar Jiménez, *Documentación de los procedimientos técnicos y organizacionales de un laboratorio de metrología de presión bajo la norma ISO/IEC 17025*.
- [9] S. Zúñiga, P. Olvera y J. Torres, *Caracterización de un Manómetro Diferencial Digital Usado como Patrón de Transferencia a 3,5 kPa*, Santiago de Querétaro, México: Centro Nacional de Metrología , 2008.
- [10] OMS Organización Mundial de la Salud, «Buenas Prácticas para Laboratorios Nacionales de Control Farmacéutico.,» 2002.
- [11] S. Sheel, *Instrumentation: Theory and Applications*, Oxford: Alpha Science Internation Limited, 2013.
- [12] S. M. J.M, *Diseño e implemtación de instrumentación científica basada en tecnología de vacío*, Madrid, España: Facultad de Física, Universidad de Madrid, 2014.
- [13] SERVICIO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN , «SERVICIO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN,» 2018. [En línea]. Available:

<http://inenmetrologia.blogspot.com/2018/09/la-presion-y-sus-tipos-de-medicion.html>. [Último acceso: 2021].

- [14] J. Chiva Boix , *Metrología y calibración de variables de control utilizadas en sistemas variables e industriales*, Barcelona: Facultad Nautica de Barcelona, 2014.
- [15] «Super intendencia de insdustria y comercio,» 2021. [En línea]. Available: <https://www.sic.gov.co/sistema-internacional-de-unidades>. [Último acceso: 05 Mayo 2021].
- [16] F. Diaz del Catrillo Rodriguez, *Metrología dimensional*, Cuautitlán : FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN FACU, 2010.
- [17] P. Ponsa y T. Granollers, *Diseño y automatización industrial*, Barcelona: Univeridad de Cataluña, 2007.
- [18] H. Toskano Hurtado y B. Gérard , *El Proceso de análisis jerárquico (AHP) como herramienta para la toma de decisiones en la selección de proveedores : aplicación en la selección del proveedor para la Empresa Gráfica Comercial MyE S.R.L.*, Lima, Perú : Universidad Mayor de San Marcos, 2005.
- [19] M. Gutierrez y S. Iturrade, *Fundamentos básicos de instrumentación y control.*, Santa Elena: Edistorial UPSE, 2017.
- [20] Hutter, J; Kretz, D.; Liedhegener, F.; Schenkel, W.; Schmitt, A., Libro de información y estudio de válvulas proporcioanles y servoválvulas y de los componentes electrónicos utilizados en mandos y cirucitos de regulación., Sulzbach: Mannesmann RexrothGmbH.
- [21] A. Parr, *Hydraulics and Pneumatics*, Kidlington UK: Butterworth-Heinemann, 2011.
- [22] A. Guillén Salvador, *Introducción a la neumática*, Barcelona: Marcombo S.A, 1993.
- [23] Emerson Automation Solutions de Emerson Electric Co, *Guía de válvulas de control*, Marshalltown, Iowa: Fisher Controls International LLC, 2017.
- [24] J. L. Domiguez Ponce de Leon, *FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA Y SUS APLICACIONES*, Monterrey, Mexico: INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE MONTERREY, 1967.
- [25] C. A. Smith y A. B. Corripio, *Control automatico de procesos, Teoria y practica*, México, D.F.: LIMUSA, S.A, 1991.
- [26] «Matlab,» [En línea]. Available: <https://la.mathworks.com/help/ident/>. [Último acceso: 30 Octubre 2021].
- [27] J. Aracil, *Dinámica de sistemas*, Madrid: Isfede, 1995.

- [28] J. W. Forrester, Diseñando el futuro, Sevilla España, 1998.
- [29] Calibration Service S.A.S, «Calbration service,» 2021, [En línea]. Available: <http://sof.calibrationservicesas.com/Pagina/>. [Último acceso: 02 Agosto 2021].
- [30] CEM Centro Español de Metrología., «Procedimiento ME-001 para la calibración de medidores de vacío.,» 2021. [En línea]. Available: <https://www.cem.es/es/divulgacion/documentos/me-001-procedimiento-calibracion-medidores-vacio>. [Último acceso: 02 Agosto 2021].

## **ANEXOS**

## ANEXO 1

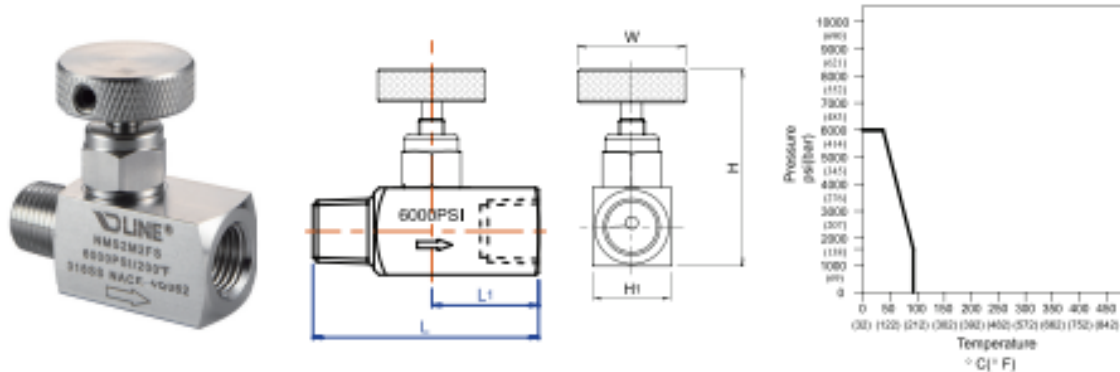
### RECOMENDACIONES

Una vez finalizado el proyecto es importante tener en cuenta las siguientes recomendaciones:

- ✓ Es indispensable leer los manuales de instalación y operación del sistema de calibración, de esta manera se evita realizar una mala instalación y uso que puede generar un mal funcionamiento de la misma, además de llegar a tener un accidente.
- ✓ Se recomienda contactar a personal experto para la instalación de las conexiones tanto neumáticas como eléctricas que se proponen en el sistema.
- ✓ Se debe tener en cuenta el manual de mantenimiento propuesto del sistema, de esta manera se extiende la vida útil del sistema, previniendo cualquier tipo de falla durante el proceso de calibración.
- ✓ La programación del PLC debe ser traducida del lenguaje actual del diseño a el lenguaje de programación con el que cuente el PLC que se desee usar.

## ANEXO 2

### DIMENSIONES DE LA VÁLVULA TIPO AGUJA DEL SISTEMA ACTUAL.



#### MATERIAL OF CONSTRUCTION



#### FEATURES

- Maximum working pressure: 6000 psi (41.4bar) at 100°F (38°C)
- Working temperature: Metal: -22°F (-30°C) to 392°F (200°C) Delrin Seat: -22°F (-28°C) to 200°F (93°C) .
- Mini valves facilitate safe, compact and economical installations.
- Valve seating is interchangeable between "Hard" or "Soft" without changing the bonnet assembly. When soft seat becomes damaged, it can be removed and leave a metal seated valve to extend service life.
- O-rings below threads prevents lubricant washout, thread corrosion and keep thread from process con-tamination.
- Hydro test performed with pure water at 1.5 times of working pressure.
- 100% factory test hydro
- Material traceability
- Sour gas service conforms to NACE MR0175

#### Dimensions

A	L	L1	H	H1	Bore (ORIFICE)	W
1/4" NPT-M+F	1.89	.94	1.91	.75	.13	1.02

Component	Valve Body Material	
	316L S.S.	Carbon Steel
Body	316L S.S./A479	Carbon Steel/A108
Bonnet	316L S.S./A479	Carbon Steel/A108
Stem	316L S.S./A276	316L S.S./A276
Handle	303 S.S./A276	Carbon Steel/A108
Fixing Screw	302 S.S./A276	Zinc plated steel
O-Ring	Viton®	Viton®
Back-Up Ring	PTFE	PTFE
Washer	316 S.S./A276	316 S.S./A276
Soft Seat	Delrin®	Delrin®

## ANEXO 3

### CATALOGO ASCO PARA LA SELECCIÓN DE LA VÁLVULA PROPORCIONAL.


**VÁLVULAS PROPORCIONALES  
DE REGULACIÓN DE PRESIÓN**  
serie 614  
**CON ELECTRÓNICA DIGITAL**  
**SENTRONIC<sup>PLUS</sup>**  
roscado 1/8", 1/4", 1/2" o 1"



Fluidos	aire, gases neutros, filtrado a 50 µm, sin condensados, lubricado o no
Rango de presión	ver cuadro de selección
Temperatura del fluido	0°C a +60°C
Temperatura ambiente	0°C a +50°C
Caudal (Qv a 6 bar)	G1/8 = 210 l/min, G1/4 = 700 l/min, G1/2 = 1400, G1 = 5600 l/min
Consigna eléctrica	0-10 V / 4-20 mA
Salida captador	0-10 V / 4-20 mA
Histeresis	< 1 % del máx. de la zona de regulación (PMR)
Linealidad - repetibilidad	< 0,5 % del máx. de la zona de regulación (PMR)
Cuerpo	G1/8 = latón, G1/4-G1 = aluminio
Guarniciones	FPM (elastómero fluoreado) y NBR (nitrilo)
Tensión standard CC (V)	24 V ± 10 %

- Comunicación y tecnología de regulación numérica
- Pantalla digital y pomos pulsadores integrados
- Válvula de mando directo
- Gran precisión en aplicación dinámica
- Utilizable en circuito de aire comprimido standard (Filtración 50 µm)

### SU SELECCIÓN

	zona de regulación bar	presión máxima admisible bar	consumo máx. W	Ø raccor- daje G	caudal a 6 bar (ANR) l/min	salida fábrica			
						código		10 días	
						con pantalla		sin pantalla	
	punto de consigna 0-10V	punto de consigna 4-20mA	punto de consigna 0-10V	punto de consigna 4-20mA					
<b>cuerpo roscado</b>									
	0 - 6					614357D701106	614357D723106	614357E701106	614357E723106
	0 - 10	12	12	1/8	210	614357D701110	614357D723110	614357E701110	614357E723110
	0 - 20	22				614357D701120	614357D723120	614357E701120	614357E723120
	0 - 6	12				614357D001106	614357D023106	614357E001106	614357E023106
	0 - 10	12	24	1/4	700	614357D001110	614357D023110	614357E001110	614357E023110
	0 - 20	22				614357D001120	614357D023120	614357E001120	614357E023120
	0 - 6	12				614357D101106	614357D123106	614357E101106	614357E123106

