

Automatización del Proceso de Calibración Para Medidores de Gas de Tipo Diafragma, Rotativo,  
Turbina Y Ultrasónico

Brayan Fabian Vargas Burgos

Id: 000275470

Universidad Pontificia Bolivariana

Septiembre 23 de 2019



Brayan Fabian Vargas Burgos, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad  
Pontificia Bolivariana

Esta práctica empresarial ha sido financiada por la Corporación CDT de Gas

La correspondencia relacionada con esta práctica empresarial debe ser dirigida a Brayan Fabian  
Vargas Burgos

Universidad Pontificia Bolivariana, Bucaramanga Km 7 vía Piedecuesta

Contacto: [BrayanV1215@gmail.com](mailto:BrayanV1215@gmail.com)

Automatización del Proceso de Calibración Para Medidores de Gas de Tipo Diafragma, Rotativo,  
Turbina Y Ultrasónico

Brayan Fabian Vargas Burgos

Id: 000275470

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de  
INGENIERO ELECTRÓNICO

Director:

Juan Carlos Mantilla Saavedra  
Ingeniero Electrónico

Supervisor:

Christian Alexander Rovira  
Ingeniero Electrónico

Universidad Pontificia Bolivariana

Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica

Programa de Ingeniería Electrónica

Práctica Empresarial

Bucaramanga

2019

## Dedicatoria

*Dedicado con amor a mi mamá  
por su apoyo incondicional  
a lo largo del proceso.*

## Tabla de Contenidos

Introducción:.....	3
1. Generalidades de la empresa.....	4
2. Diagnóstico de la empresa.....	5
3. Objetivos.....	6
3.1 Objetivo General.....	6
3.2 Objetivos Específicos.....	6
4. Plan de trabajo.....	7
4.1 Actividades.....	7
5. Banco De Calibración De Alto Caudal.....	8
5.1 Calibración.....	8
5.2 Proceso de calibración de medidores de gas.....	9
5.2.1 Modelo matemático.....	11
5.3 Medidor tipo diafragma.....	13
5.4 Medidor tipo rotativo.....	14
5.5 Medidor tipo turbina.....	15
5.6 Medidor ultrasónico.....	16
6. Descripción del banco.....	17
6.1 Instrumentación del banco.....	20
6.1.1 Presión atmosférica.....	21
6.1.2 Presión diferencial.....	22
6.1.3 Transmisores de temperatura.....	22
6.1.4 Temperatura ambiente y Humedad relativa.....	23
6.1.5 Amplificadores de pulsos y sensor óptico.....	24
6.2 Actuadores.....	25
6.2.1 Variadores de frecuencia y blowers.....	25
6.2.2 Actuadores neumáticos y electroválvulas.....	26
7. Automatización del banco de calibración.....	28
7.1 Plataforma SNAP PAC SYSTEM de OPTO 22.....	28
7.2 Arquitectura SNAP PAC SYSTEM del banco de calibración.....	30
7.2.1 Controladores.....	30
7.2.2 Módulos de entradas y salidas.....	31
7.2.3 Tarjetas de montaje.....	36
7.3 Descripción del procedimiento de las estrategias.....	39
7.3.1 Estrategia de Aseguramiento metrológico.....	41
7.3.2 Procedimiento de calibración.....	42
7.3.2.1 Datos del servicio.....	42
7.3.2.2 Datos de calibración.....	44
7.3.2.3 Verificación de instrumentos.....	46
7.3.2.4 Prueba de fugas.....	47
7.3.2.5 Calibración de medidores.....	48
8. Diseño del controlador.....	50
8.1 Identificación de la planta.....	50
8.2 Diseño del controlador.....	52
8.3 Ganancia programada.....	54

8.4 Identificación de escenarios .....	55
8.5 Bucle de calibración .....	59
9. Pruebas de operación.....	61
9.1 Pruebas estrategia de aseguramiento metrológico .....	61
9.2 Pruebas estrategia de calibración de medidores.....	63
9.2.1 Resultados medidor de gas tipo turbina .....	64
9.2.2 Resultados medidor de gas tipo rotativo .....	66
10. Otras actividades .....	69
11. Conclusiones y recomendaciones .....	70
Bibliografía .....	71
Apéndice A: Documentación del sistema automatizado .....	71
Apéndice B. Cambios físicos en el Banco de Calibración de alto caudal.....	75
Apéndice C. Reporte de similitud Turnitin .....	78

## Listado de Tablas

Tabla 1: Escenarios de Calibración.....	19
Tabla 2: Características de los medidores patrón. ....	20
Tabla 3: Variables implicadas en el banco de calibración. ....	21
Tabla 4: Barómetro Honeywell.....	21
Tabla 5: Tabla transmisores de presión diferencial. ....	22
Tabla 6: Tabla de transmisor de temperatura. ....	23
Tabla 7: Tabla termo-higrómetro.....	23
Tabla 8: Tabla de amplificadores de señal y sensor óptico. ....	24
Tabla 9: Instrumentación empleada en el banco de calibración. ....	24
Tabla 10: Tabla de variadores de velocidad. ....	26
Tabla 11: Tabla de motores. ....	26
Tabla 12: Actuador neumático.....	27
Tabla 13: Válvula Solenoide .....	27
Tabla 14: Especificaciones controladores R1 y R2. ....	31
Tabla 15: Listado de instrumentación, actuadores y sus respectivas señales.....	32
Tabla 16: Listado de módulos y cantidades requeridas.....	33
Tabla 17: Especificaciones módulo SNAP-AIMA-4.....	33
Tabla 18: Especificaciones módulo SNAP-IDC5-FAST.....	34
Tabla 19: Especificaciones módulo SNAP-ODC5RFM.....	34
Tabla 20: Especificaciones módulo SNAP-AOA23 .....	35
Tabla 21: Especificaciones módulo SNAP-OAC5. ....	36
Tabla 22: Especificaciones tarjeta de montaje de 8 puertos.....	36
Tabla 23: Asignación de la instrumentación o actuadores en el controlador SNAP-PAC-R1 .....	37
Tabla 24: Asignación de la instrumentación o actuadores en el controlador SNAP-PAC-R2 .....	38
Tabla 25: Datos del servicio .....	43
Tabla 26: Datos del medidor bajo prueba .....	44
Tabla 27: Especificaciones del medidor bajo prueba.....	44
Tabla 28 Escenarios operativos del BAC.....	58
Tabla 29 Características del medidor de gas tipo turbina .....	64
Tabla 30 Resultados estrategia anterior, medidor tipo turbina .....	64
Tabla 31 Resultados calibración 1 estrategia nueva, medidor tipo turbina.....	64
Tabla 32 Resultados calibración 2 estrategia nueva, medidor tipo turbina.....	65
Tabla 33 Características del medidor de gas tipo rotativo .....	66
Tabla 34 Resultados estrategia anterior, medidor tipo rotativo .....	66
Tabla 35 Resultados calibración 1 estrategia nueva, medidor tipo rotativo.....	66
Tabla 36 Resultados calibración 2 estrategia nueva, medidor tipo rotativo.....	67

## Listado de Figuras

Figura 1. Método de Calibración – Comparación directa .....	10
Figura 2: Resultado de calibración .....	13
Figura 3: Medidor de diafragma tipo G1.6.....	14
Figura 4: Medidor rotativo, 4 ciclos completan una revolución.....	15
Figura 5: Medidor de turbina RMG TRZ-03.....	15
Figura 6: Medidor ultrasónico con 2 transductores .....	16
Figura 7: Trazado del banco .....	18
Figura 8: Arquitectura SNAP PAC SYSTEM del banco de calibración .....	29
Figura 9 Diagrama de flujo de la estrategia de aseguramiento metrológico .....	39
Figura 10: Diagrama de flujo del procedimiento de calibración .....	40
Figura 11: Ventana de interfaz de aseguramiento metrológico .....	41
Figura 12: Ventana de interfaz de datos del servicio .....	43
Figura 13: Ventana de interfaz de datos de calibración .....	45
Figura 14: Ventana de verificación de instrumentos .....	46
Figura 15: Ventana de prueba de fugas.....	47
Figura 16: Ventana de calibración de medidores.....	48
Figura 17. Representación de planta .....	50
Figura 18 Planta a controlar.....	51
Figura 19: Esquema del lazo de control.....	51
Figura 20 Estructura del sistema de control adaptativo .....	53
Figura 21 Modelado matemático de un sistema .....	54
Figura 22 Estructura de un sistema con ganancia programada.....	54
Figura 23 PID Viewer .....	57
Figura 24 Diagrama de control de caudal .....	59
Figura 25 Ajuste de caudal .....	60
Figura 26 Ventana de calibración de transmisores de temperatura .....	61
Figura 27 Ventana de calibración de transmisores de presión diferencial .....	62
Figura 28 Diagrama calibración medidor tipo turbina.....	65
Figura 29 Diagrama calibración medidor tipo rotativo.....	67

**RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO**

**TITULO:** AUTOMATIZACIÓN DEL PROCESO DE CALIBRACIÓN PARA MEDIDORES DE GAS DE TIPO DIAFRAGMA, ROTATIVO, TURBINA Y ULTRASÓNICO

**AUTOR(ES):** BRAYAN FABIAN VARGAS BURGOS

**PROGRAMA:** Facultad de Ingeniería Electrónica

**DIRECTOR(A):** JUAN CARLOS MANTILLA SAAVEDRA

**RESUMEN**

En este trabajo se presenta el desarrollo e implementación de la automatización de un banco de calibración de medidores de volumen de gas tipo diafragma, rotativo, turbina y ultrasónico. Se inicia la ejecución de este proyecto con la definición y documentación del proceso de calibración a automatizar. Acto seguido, se describe la selección de la instrumentación y actuadores requeridos para las acciones de mejora en el banco patrón. Referente a la automatización, esta es llevada a cabo empleando la arquitectura SNAP PAC de Opto 22, y se ejerce modificando la configuración preexistente de módulos de entrada-salida y controladores. Finalmente, se desarrollaron las estrategias de calibración de manera simultánea con el diseño de las interfaces hombre-maquina, necesarias para la operación del banco de calibración así como de sus actividades de aseguramiento metroológico. Como resultado de este proyecto, se ha establecido un banco automatizado para calibrar medidores de gas de diversos tipos con un alcance de operación entre 3,2 m³/h hasta 4800 m³/h.

**PALABRAS CLAVE:**

Calibración, automatización, instrumentación

V\* B\* DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO



**GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE**

**TITLE:** AUTOMATION OF THE CALIBRATION PROCESS FOR DIAPHRAGM, ROTARY, TURBINE AND ULTRASONIC GAS METERS

**AUTHOR(S):** BRAYAN FABIAN VARGAS BURGOS

**FACULTY:** Facultad de Ingeniería Electrónica

**DIRECTOR:** JUAN CARLOS MANTILLA SAAVEDRA

**ABSTRACT**

This work presents the development and implementation for the automation of a calibration bank of gas volume meters such as diaphragm, rotary, turbine and ultrasonic. The execution of this project begins with the definition and documentation of the calibration process to be automated. Next, the selection of the instrumentation and actuators required for the improvement of the master bank's performance is described. Regarding automation, it was carried out using the SNAP PAC architecture from Opto 22; adding modifications for the pre-existing configuration of input-output modules and controllers. Finally, the calibration strategies were developed simultaneously with the design of the human-machine interfaces (HMI), necessary for the operation of the calibration bank as well as its metrological assurance activities. As a result of this project, an automated bank to calibrate gas meters of various types with an operating range from 3.2 m<sup>3</sup>/h to 4800 m<sup>3</sup>/h has been established.

**KEYWORDS:**

Calibration, Automation, Instrumentation

V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK

### **Introducción:**

La corporación Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas o CDT de GAS es una entidad de derecho privado con carácter científico y tecnológico, que hace parte del Sistema Nacional de Ciencia Tecnología e Innovación (SNCTI) con reconocimiento de Colciencias, el cual busca impulsar la productividad de las empresas del sector de gas mediante la oferta de servicios de metrología, el desarrollo en tecnología, la inspección y formación de talento humano.

Actualmente, la corporación busca automatizar el proceso de calibración del banco de alto caudal, con el propósito de facilitar la comparación de las indicaciones del patrón con respecto a las de medidores de gas de tipo diafragma, rotativo, turbina y ultrasónico, equipado con la plataforma Snap Pac System de OPTO 22. De este modo, se reduce la intervención humana necesaria para este proceso y se optimiza el tiempo que implica la prestación de este servicio. Así mismo, se promueve la calibración automática en jornadas nocturnas, en especial de medidores de más alto caudal, los cuales usualmente generan un mayor ruido durante la prueba. Gracias a ello, se lograría aumentar la eficiencia de la corporación, en pro de fomentar la competitividad de las empresas del sector gas.

Es por ello que, para efectuar la realización del proyecto se llevan a cabo diferentes procesos; primero, se realiza una definición y documentación del proceso de calibración a automatizar; segundo, se selecciona la instrumentación y actuadores que son requeridos para el mejoramiento del banco patrón; finalmente, se elabora una nueva estrategia de calibración y adquisición de datos en simultaneo con el desarrollo de la HMI y finalmente, se evalúa el correcto funcionamiento de la automatización desarrollada a través de pruebas de operación.

## 1. Generalidades de la empresa

Nombre de la empresa: Corporación centro de desarrollo tecnológico del Gas.

Actividad Económica: El CDT busca impulsar la productividad de las empresas del sector de gas mediante la oferta de servicios de metrología.

Número de empleados: 72 empleados.

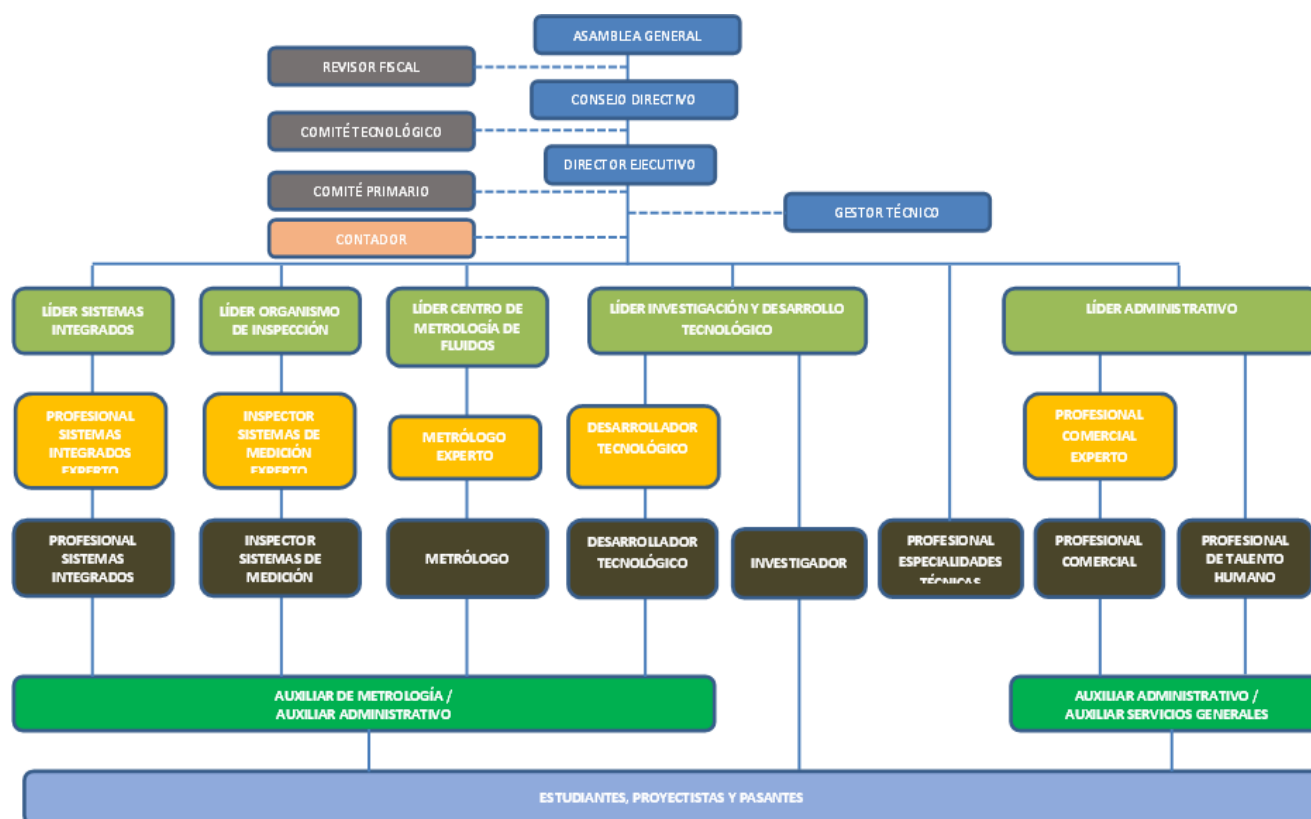
Teléfono: 6543800.

Dirección: Parque Tecnológico UIS Guatiguará, Km 2 vía Refugio.

Descripción del área específica de trabajo: Laboratorio del centro de metrología de fluidos.

Nombre y Cargo del Supervisor Técnico (Empresa): Christian Alexander Rovira

Estructura Organizacional:



## **2. Diagnóstico de la empresa**

Actualmente, la corporación busca automatizar el proceso de calibración del banco de alto caudal, con el propósito de facilitar la comparación de las indicaciones del patrón con respecto a las de medidores de gas de tipo diafragma, rotativo, turbina y ultrasónico, equipado con la plataforma Snap Pac System de OPTO 22. De este modo, se reduce la intervención humana necesaria para este proceso y se optimiza el tiempo que implica la prestación de este servicio. Así mismo, se promueve la calibración automática en jornadas nocturnas, en especial de medidores de más alto caudal, los cuales usualmente generan un mayor ruido durante la prueba. Gracias a ello, se lograría aumentar la eficiencia de la corporación, en pro de fomentar la competitividad de las empresas del sector gas.

### **3. Objetivos**

#### **3.1 Objetivo General**

Automatizar un banco de calibración para medidores de gas de tipo diafragma, rotativo, turbina y ultrasónico mediante la plataforma OPTO 22 de la corporación CDT de GAS.

#### **3.2 Objetivos Específicos.**

- Elaborar estrategias de control, para la ejecución de calibraciones utilizando el banco patrón.
- Elaborar HMI, para la ejecución de calibraciones del banco patrón usando OPTO 22.
- Validación del método automatizado a través de pruebas de calibración y caracterización con la estrategia diseñada.

## 4. Plan de trabajo

### 4.1 Actividades

Se propone realizar las siguientes actividades para la realización de este proyecto.

- Definición y documentación del proceso de calibración a automatizar
  - Marco teórico acerca del proceso de calibración de volumen usando un banco patrón.
- Diseño de estrategia de control del proceso de calibración
  - Diagramación de flujo del proceso.
  - Programación de una estrategia de calibración.
  - Pruebas de laboratorio con la estrategia diseñada.
- Diseño de HMI del proceso de calibración
  - Programación de HMI sobre plataforma OPTO 22.
  - Pruebas de laboratorio con la HMI diseñada.
- Validación Del Método Automatizado
  - Pruebas de calibración y caracterización con la estrategia diseñada.
  - Validar el criterio de estabilidad de caudal bajo diferentes escenarios de calibración.
- Entrega de resultados
  - Documentación del proceso de calibración y del programa desarrollado.

## **5. Banco De Calibración De Alto Caudal**

El tema principal de esta práctica es automatizar un banco de calibración para medidores de gas para medidores de gas tipo diafragma, rotativo, turbina y ultrasónico. Por tanto, antes de ahondar en detalles referentes al desarrollo de la automatización se hace una descripción de la estructura y del proceso de calibración, con el fin de contextualizar al lector. Se inicia con una definición de calibración y revisión de otros conceptos importantes según el Vocabulario Internacional de Metrología (VIM). Posterior a ello, se presenta el proceso de calibración empleado en el banco, continuando con una breve descripción de las tecnologías de medidores de gas que pueden ser calibrados en el banco. Finalmente, en el siguiente numeral se presenta el banco a automatizar, sus componentes y aspectos funcionales a destacar.

### **5.1 Calibración**

El banco de alto caudal, o BAC, se automatiza para realizar con este, un proceso de “calibración” de medidores de gas. Por ello, es pertinente primero tener conocimiento de la definición de calibración:

Operación que, bajo condiciones específicas, en una primera etapa, establece una relación entre los valores de las magnitudes con sus incertidumbres de medición asociadas obtenidas a partir de los patrones de medición y las correspondientes indicaciones con sus incertidumbres asociadas y, en segunda etapa, utiliza esta información para establecer una relación que permita obtener un resultado de medida a partir de una indicación.

(JCGM, 2012, pág. 47)

Es decir, el proceso de calibración es una comparación que busca establecer una relación entre las magnitudes de entrada, patrón, y magnitudes bajo prueba.

Particularmente, el banco de calibración de alto caudal emplea el método de comparación directa para establecer la relación entre las mediciones de volumen entregado a un medidor bajo prueba y a un patrón o patrones de medición del banco, a partir de sus caudales asociados. Por tanto, este proceso requiere la medición de dos tipos de magnitudes: volumen y caudal. Por una parte, tenemos que el caudal es la cantidad de fluido que pasa a través de una sección transversal de referencia en un tiempo determinado. Esta magnitud se expresa en unidades de volumen por unidad de tiempo ( $\text{m}^3/\text{h}$ , caudal volumétrico).

Por otro parte, un concepto más para tener en cuenta, presente en la definición de calibración, es la incertidumbre. La cual se conoce como “parámetro no negativo que caracteriza la dispersión de los valores atribuidos a un mensurando, basado en la información utilizada” (JCGM, 2012). En otras palabras, es la duda existente en cualquier resultado de medición.

## **5.2 Proceso de calibración de medidores de gas**

El método de calibración empleado en este caso es denominado como Comparación Directa. Este método busca relacionar el volumen registrado en un medidor bajo prueba (de acuerdo con las especificaciones del banco puede ser de tipo diafragma, rotativo, turbina y ultrasónico) y el volumen registrado por el banco de uno o la combinación de sus patrones (dos rotativos y tres turbinas en este caso) empleando aire a condiciones atmosféricas como fluido de calibración.



La calibración de medidores usando el método descrito anteriormente se basa en comparaciones de volumen aplicado tanto para: el medidor patrón MM<sup>1</sup>, las tuberías y accesorios asociados entre los medidores, y el medidor bajo prueba MUT<sup>2</sup>; Para que este método funcione apropiadamente, se debe: contar con un sistema hermético y aplicarse bajo las mismas condiciones termodinámicas, a fin de evitar variaciones de este volumen respecto al tiempo. Por ende, se debe tener una medición constante de las variables de presión y temperatura, tanto en el MM como MUT.

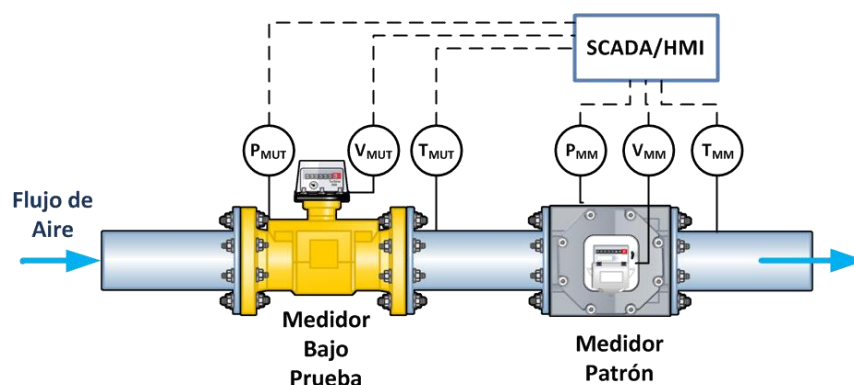


Figura 1. Método de Calibración – Comparación directa.

Fuente: CDT de GAS.

Finalmente, como resultado a este proceso se obtiene el mensurando o magnitud que se desea medir, correspondiendo al error del MUT (%E). No obstante, este error no sería representativo si tan solo se evaluase en un solo punto o caudal, por tanto, debe ser evaluado en diferentes caudales dentro del intervalo de medición de este.

<sup>1</sup> MM: por sus siglas en inglés “Master meter”

<sup>2</sup> MUT: por sus siglas en inglés “Meter under test”

### 5.2.1 Modelo matemático

El resultado obtenido del proceso de calibración es el error de medición del MUT, esta relación se calcula mediante el modelo matemático determinado siguiendo los lineamientos del reglamento de pruebas PTB tomo 29. Esta expresión calcula el porcentaje de error llevando las mediciones de volumen del medidor patrón al estado termodinámico del medidor bajo prueba, teniendo en cuenta varias consideraciones metrológicas.

Con el objetivo de obtener adecuados resultados de una calibración, no sería correcto simplemente comparar las indicaciones de los medidores (MM y MUT), por ende, se deben tener en cuenta los errores asociados a las medidas de volumen tanto del patrón como del medidor bajo prueba. Para una mayor claridad, a continuación se presenta una breve explicación del desarrollo del modelo matemático:

En la Ecuación 1 se aprecia forma de calcular el error del medidor patrón:

$$E_{MM}[\%] = \frac{V_{MM} - V'}{V'} \times 100\% \quad 1)$$

Donde:

$V_{MM}$	$[m^3]$	Volumen indicado por el patrón
$V'$	$[m^3]$	Volumen real que ha pasado por el patrón

Basados en la Ecuación 1, se obtiene el volumen real que ha pasado por el medidor patrón:

$$V' = \frac{V_{MM}}{1 + \frac{E_{MM}[\%]}{100}} \quad 2)1$$

De igual forma que la Ecuación 1, se obtiene el error del medidor bajo prueba:

$$E_{MUT}[\%] = \frac{V_{MUT} - V}{V} \times 100\% \quad 3)$$

Donde:

$V_{MUT}$	$[m^3]$	Volumen indicado por el medidor bajo prueba
$V$	$[m^3]$	Volumen real que ha circulado por el medidor bajo prueba

El volumen real  $V$  que ha circulado por el MUT se obtiene convirtiendo el volumen real del patrón  $V'$  a las condiciones termodinámicas del medidor bajo prueba gracias a la ecuación de los gases ideales.

$$V = V' \cdot \frac{P_{MM} \cdot T_{MUT}}{P_{MUT} \cdot T_{MM}} \quad 4)$$

Donde  $P_{MM}$  [mbar] y  $T_{MM}$  [°K], corresponden a la presión y temperatura del medidor patrón. De igual forma, las variables  $P_{MUT}$  [mbar] y  $T_{MUT}$  [°K], corresponden a la presión y temperatura del medidor bajo prueba.

Finalmente, haciendo uso de las anteriores ecuaciones se deduce la expresión para el error relativo del medidor bajo prueba en la Ecuación 5 como:

$$E_{MUT}[\%] = \left[ \left( \frac{V_{MUT}}{V_{MM}} \cdot \left( \frac{P_{MUT} \cdot T_{MM}}{P_{MM} \cdot T_{MUT}} \right) \cdot \left( 1 + \frac{\%ep}{100} \right) \right) - 1 \right] \times 100 \quad 5)$$

Donde:

$E_{MUT}$	$[\%]$	Porcentaje de Error en la indicación del medidor
$V_{MUT}$	$[m^3]$	Volumen registrado por el medidor
$V_{MM}$	$[m^3]$	Volumen registrado por el patrón
$P_{MUT}$	$[mbar]$	Presión Absoluta del fluido de calibración en el medidor
$P_{MM}$	$[mbar]$	Presión Absoluta del fluido de calibración en el patrón

$T_{MM}$	[°K]	Temperatura del fluido de calibración en el patrón
$T_{MUT}$	[°K]	Temperatura del fluido de calibración en el medidor
%ep	[%]	Porcentaje de error del medidor patrón

La anterior ecuación es fundamental, ya que esta define el error relativo del medidor bajo prueba y muestra las variables que deben ser medidas durante el proceso de calibración. Para finalizar, se muestra la Figura 2 que ilustra el resultado obtenido de una calibración:

No	Caudal	Volumen	Error	Desv. Est.	U	k	DP
	m <sup>3</sup> /h	m <sup>3</sup>	%	%	%	-	mbar
1	127,5	7,00	0,66	0,030	0,30	1,97	-0,02
2	204,1	11,00	0,08	0,007	0,29	1,97	-0,02
3	357,0	18,00	0,38	0,023	0,29	1,97	-0,02
4	509,9	26,00	0,86	0,016	0,29	1,97	-0,02
Repetibilidad Máxima						0,030	
Máximo Error Pico-Pico ( $Q_{max} \geq *Qt$ )						0,78	
Máximo Error ( $Q_{min} \leq *Qt$ )						-1000,00	
Máximo Error ( $Q_{max} \geq *Qt$ )						0,86	
*Qt $\leq$ 0,2 · Qmax							

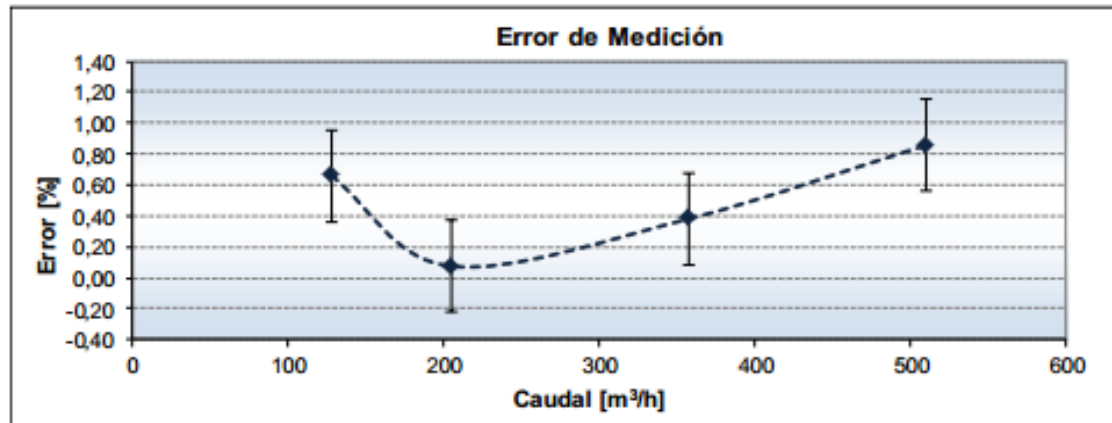


Figura 2: Resultado de calibración

Fuente: CDT de GAS

### 5.3 Medidor tipo diafragma.

Los medidores de tipo diafragma son comúnmente empleados para uso gas residencial. Estos medidores son de desplazamiento positivo cuyo principio de operación está constituido por

cuatro cámaras de gas, separadas por dos diafragmas internas, que producen distintos diafragmas de conducción de presión en su interior. Posteriormente, estos valores volumétricos se envían a un odómetro por medio de transmisiones para que este pueda arrojar un valor de medición. A continuación, un ejemplo de medidor tipo diafragma.



*Figura 3:* Medidor de diafragma tipo G1.6

*Fuente:* [www.tuvalrep.com.co](http://www.tuvalrep.com.co)

#### **5.4 Medidor tipo rotativo**

Los medidores de tipo rotativo son medidores de desplazamiento positivo, estos pueden medir directamente el volumen de fluido que circula a través del propio medidor. Esto es posible, ya que el fluido se va represando dentro de los compartimientos del medidor causando rotación en los componentes, teniendo una relación lineal entre la velocidad a la cuál estos componentes se mueven y la velocidad del fluido, ya que el caudal del fluido es la causa de su rotación. Para el caso de estos medidores de flujo mecánico, estos componentes se conectan a través de un tren de engranes para impulsar al contador mecánico que permitirá visualizar volumen totalizado. En la siguiente figura podemos apreciar mejor su funcionamiento.

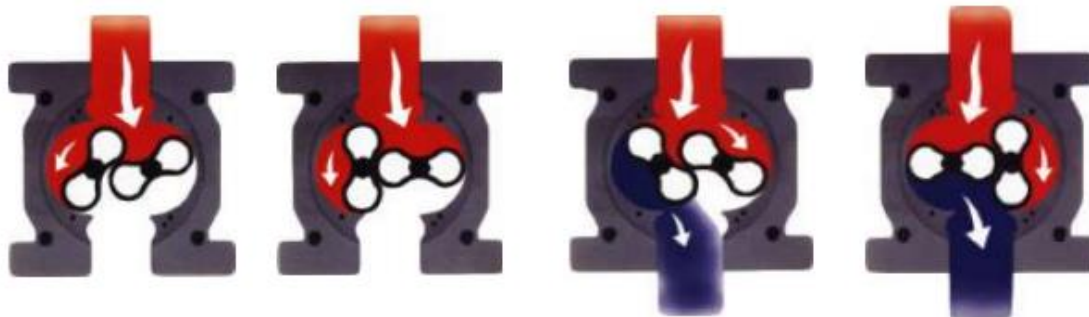


Figura 4: Medidor rotativo, 4 ciclos completan una revolución

Fuente: [www.indisa.com](http://www.indisa.com)

### 5.5 Medidor tipo turbina

Los medidores de tipo turbina se basan en la medición de la variación de velocidad del fluido al pasar por un área constante. Este medidor consta de una especie de turbina instalada dentro de la tubería interna, y esta gira con velocidad angular proporcional al flujo. La medición de esta velocidad se hace mediante convertidores electromagnéticos de dos tipos: De inductancia y de reluctancia. El medidor de turbina RMG TRZ-03 con medición reluctiva se observa en la Figura 5.

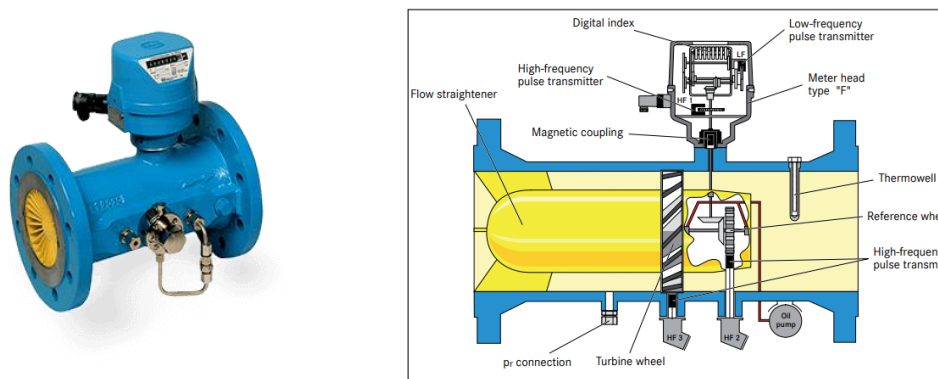


Figura 5: Medidor de turbina RMG TRZ-03

Fuente: Dresser (s.f.)

## 5.6 Medidor ultrasónico

Los medidores ultrasónicos miden la velocidad del fluido interno a través de ondas acústicas. Para ello se emplea el tiempo que toma un pulso acústico en viajar desde un transductor A hasta un transductor B con una trayectoria de ángulo  $\phi$  respecto al eje de tubería con distancia L.

La principal limitante de esta primera generación tecnológica de medición radica en la limitate de presión, teniéndose la necesidad de someterlos a una presión ( $>100$  psi), reduciendo su campo de acción. Un ejemplo de medidor ultrasónico sencillo se observa en la Figura 6.



Figura 6: Medidor ultrasónico con 2 transductores

Fuente: OPTISONIC (2009)

## 6. Descripción del banco

El banco de calibración es una facilidad tecnológica construida para la calibración de medidores de gas de alto. En adición, el CDT de GAS solicitó ciertos requerimientos listados a continuación:

- Calibrar medidores de flujo de gas con alcance de operación entre 4 m<sup>3</sup>/h hasta 4800 m<sup>3</sup>/h.
- Permitir la reproducción de caudales a través de líneas de 2" hasta 12".
- Calibración de medidores bien sea rotativos, turbinas, diafragmas o ultrasónicos.
- Asegurar la estabilidad térmica dada la criticidad del proceso según el método de calibración.

Para llevar a cabo estas consideraciones, el banco requirió de varios elementos para garantizar su pleno cumplimiento, entre los más destacables se encuentran:

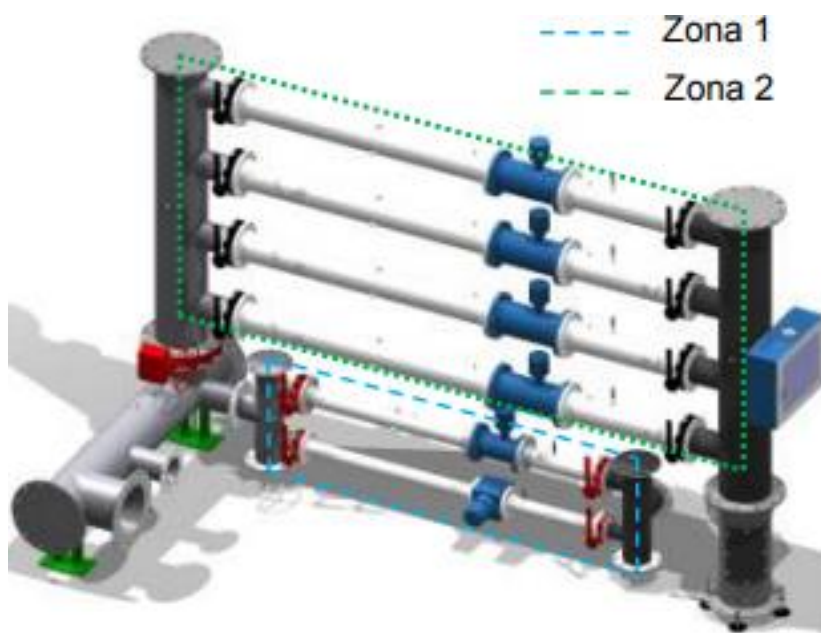
- Patrones de trabajo para las calibraciones, que cuentan con trazabilidad a patrones internacionales.
- Sensores de presión, temperatura y humedad empleados para la determinación de variables de proceso necesarias.
- Variadores de frecuencia para controlar la fuente que provee al banco del fluido de calibración.
- Sistema de adquisición de datos y software, el cual permita mantener de manera estable la condición caudal, como también una lectura estable de la temperatura y presión durante el tiempo que requiera la prueba.



Como se mencionaba anteriormente, el banco de calibración de alto caudal es una facilidad tecnológica que fue construida para la calibración de medidores de gas de tipo diafragma, turbina, rotativo y ultrasónico, que se encuentren comprendidos en un rango de caudal desde los 4 m<sup>3</sup>/h hasta 4800 m<sup>3</sup>/h.

El ensamble estructural comprende de dos partes: la primera es donde se procede a hacer la instalación del MUT, siendo a su vez la entrada del fluido de calibración que en este caso es aire. Esta zona posee dos bridas de conexión final, una de 6" y la otra de 12", las cuales permiten la reproducción a los diferentes caudales, posibilitando la conexión de medidores de entre 2" a 12", mediante un sistema de tuberías y/o reducciones.

Por otro lado, la segunda parte está compuesta en dos zonas, teniendo en total cinco líneas de tuberías, que poseen cada una dos válvulas de mariposa con actuador manual, dispuestas para los MM's, los cuales se encuentran repartidos de la siguiente manera:



*Figura 7: Trazado del banco*

*Fuente: CDT de Gas*

Zona 1: 1) Un medidor rotativo G-40 de la marca Dresser que opera desde 4 m<sup>3</sup>/h hasta 65 m<sup>3</sup>/h,  
2) Un medidor rotativo G-400 Dresser empleado para calibración de entre 65 m<sup>3</sup>/h a 650 m<sup>3</sup>/h.

Zona 2: 3) Tres medidores tipo turbina G-1000 de la marca RMG con un rango operativo desde 80 a 1600 m<sup>3</sup>/h cada uno, empleados a partir 650 m<sup>3</sup>/h de forma aditiva dependiendo del escenario de calibración presente en la Tabla 1.

En adición, estas dos partes se encuentran conectadas mediante un sistema de tuberías que permiten el pleno funcionamiento de esta facilidad tecnológica. La correcta unión entre el medidor bajo prueba y los medidores patrón es indispensable puesto que esta permite el desarrollo de la comparación entre los mismos, y como se mencionaba anteriormente es indispensable tener una hermeticidad en todo el sistema (CDT de gas, 2009).

Tabla 1: *Escenarios de Calibración*

<u>Caudal a calibrar</u>	<u>Medidor patrón</u>				
	<u>G-40 mm2</u>	<u>G-400 mm1</u>	<u>G-1000 mm3</u>	<u>G-1000 mm4</u>	<u>G-1000 mm5</u>
3,2 a 65	X				
65 a 650		X			
650 a 1600			X		
1600 a 3200			X	X	
3200 a 4800			X	X	X

Nota: Los patrones G-1000 empleados de entre 650 a 3200 m<sup>3</sup>/h son los recomendados por defecto, cabe aclarar que es posible emplear combinaciones de estos manteniendo el número de patrones en uso.

*Fuente: Autor*

A continuación, se tienen los medidores patrones empleados en el banco junto con sus principales características tales como: alcance, tipo de patrón, K factor y diámetro.

Tabla 2: Características de los medidores patrón.

<u>Características</u>	<u>Medidor patrón (MM2)</u>	<u>Medidor patrón (MM1)</u>	<u>Medidores patrón (MM3, MM4 y MM5)</u>
			
Fabricante	Dresser	Dresser	RMG
Tipo	Rotativo	Rotativo	Turbina
Modelo	IM-RM G-40 ANSI 50	IM-RM G-400 TWIN ANSI 150	TRZ-03-E
Rango	3,2 a 65 m <sup>3</sup> /h	3,2 a 650 m <sup>3</sup> /h	80 a 1600 m <sup>3</sup> /h
Meter factor	14479,9 pulsos/m <sup>3</sup>	2024.00 pulsos/m <sup>3</sup>	3781.53 pulsos/m <sup>3</sup>
Diámetro	2 pulgadas	6 pulgadas	6 pulgadas
Salida pulsos	NAMUR	NAMUR	NAMUR
Clase	± 1 pulso	± 1 pulso	± 1 pulso
Peso	10 Kg	45 Kg	100 Kg

*Fuente: CDT de Gas.*

Los caudales a ser ejecutados son dependientes de las características del medidor bajo prueba, entre ellas está: tamaño del medidor, tipo del medidor, caudal mínimo y máximo de operación. Estos caudales de prueba, junto con todos los requerimientos necesarios para la prueba se encuentran especificados en el PTB<sup>3</sup> (Dietrich, 2003).

## 6.1 Instrumentación del banco

En esta sección se hace una revisión de la instrumentación presente en el banco de alto caudal, seleccionados para cumplir los lineamientos presentes en el PTB. Por último, se seleccionan los actuadores necesarios para que el proceso de calibración en el banco sea de forma automática.

<sup>3</sup> Reglamento de Prueba del PTB, Tomo 29

En primer lugar, antes de proceder a la revisión a la instrumentación actual en el banco de alto caudal, en la Tabla 3 se tiene una lista de las variables que requieren monitoreo:

Tabla 3: *Variables implicadas en el banco de calibración.*

Variables		Abreviatura
Presión	Atmosférica	$P_{atm}$
	Diferencial en medidores patrón	$P_{MMn}$
	Diferencial en medidor bajo prueba	$P_{MUT}$
Temperatura	Ambiente	$T_{atm}$
	Medidores patrón	$T_{MMn}$
	Medidor bajo prueba	$T_{MUT}$
Volumen	Volumen de medidor patrón	$V_{MMn}$
	Volumen de medidor bajo prueba	$V_{MUT}$
Humedad	Humedad relativa	$Hr$

*Fuente: Autor*

### 6.1.1 Presión atmosférica

El barómetro Honeywell mostrado a continuación, fue seleccionado por sus excelentes características, baja incertidumbre y amplio rango de medición. Este instrumento es empleado para obtener la presión absoluta, y junto con los diferenciales de presión es relacionado para obtener la presión a la cual se encuentran los medidores durante la calibración.

Tabla 4: *Barómetro Honeywell*



Fabricante	Honeywell
Modelo	HPB100W2DA-AF
Alcance	500 a 1200 mbar
Clase	$\pm 0,8$ mbar
Deriva	0,25 mbar/año
Señal salida	RS-232

*Fuente: CDT de Gas*

### 6.1.2 Presión diferencial

Tabla 5: *Tabla transmisores de presión diferencial.*



Fabricante	Ashcroft	Ashcroft	Ashcroft	Ashcroft
Modelo	CXLdp	DXLdp	DXLdp	DXLdp
Alcance	0 a 5 mbar	0 a 25 mbar	0 a 50 mbar	0 a 63 mbar
Clase	$\pm 0.40$ % span	$\pm 0.50$ % span	$\pm 0.25$ % span	$\pm 0.25$ % span
Deriva	$\leq \pm 0.25$ % span/año	$\leq \pm 0.25$ % span/año	$\leq \pm 0.25$ % span/año	$\leq \pm 0.25$ % span/año
Señal salida	4 – 20mA	4 – 20mA	4 – 20mA	4 – 20mA

*Fuente: CDT de Gas*

El control de presión en los medidores es vital en el proceso de calibración, e influye directamente en el modelo matemático de error actual. Los diferentes alcances de medición se deben a la variedad de medidores presentes en el banco.

### 6.1.3 Transmisores de temperatura

Para la medición de esta variable secundaria se seleccionaron las RTD Pyromation ya que su clase se ajusta a la requerida. La inestabilidad térmica durante la calibración afectan la repetibilidad de la misma, y generan un incremento en la incertidumbre de medición (Garcia & Covelli, 2010).

Tabla 6: *Tabla de transmisor de temperatura.*

Fabricante	Pyromation
Modelo	450 series
Medición	-51 a 160 °c
Clase	$\pm 0,1$ °c
Deriva	$\pm 0,1$ °c/año
Señal salida	4 – 20mA

*Fuente: CDT de Gas.*

#### 6.1.4 Temperatura ambiente y Humedad relativa

Debido a que la operación de altos caudales puede generar variaciones en la densidad del aire acumulada en las líneas de flujo y que la no corrección de esto puede generar aumentos considerables en la incertidumbre de medición, se optó por monitorear las condiciones ambientales (Garcia & Covelli, 2010).

Tabla 7: *Tabla termo-higrómetro*


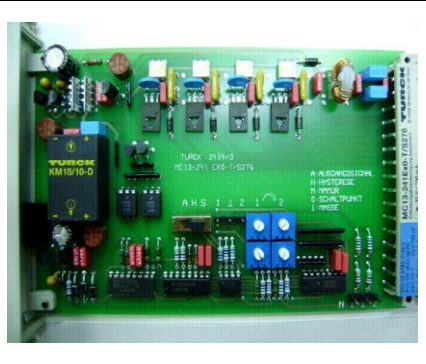

Fabricante	Dwyer
Modelo	WHT series
Medición Humedad	0 a 100 % $\pm 2$
Medición Temperatura	-40 a 60 °C $\pm 0.3$ °C
Clase	$\pm 0,8$ mbar
Deriva	0,25 mbar/año
Señal salida	RS-232

*Fuente: CDT de Gas.*

### 6.1.5 Amplificadores de pulsos y sensor óptico

Los amplificadores de alta frecuencia toman los pulsos tipo NAMUR y lo convierten en pulsos de voltaje a una amplitud que pueda ser detectada por el controlador. Por otra parte, el sensor óptico es empleado cuando la señal de salida del MUT que se tiene es de forma visual.

Tabla 8: Tabla de amplificadores de señal y sensor óptico.

			
Fabricante	Turck	Turck	Sunx
Modelo	IM1-12EX-T	MC13-241EX0-T/S276	Fx-301
Medición	1 canal	2 canales	1 canal
Señal entrada	NAMUR	NAMUR	Óptica
Conmutación	NPN-PNP colector abierto	NPN-PNP colector abierto	NPN colector abierto

Fuente: CDT de Gas.

Para finalizar con esta sección referente a la instrumentación necesaria en el banco de calibración de alto caudal, se tiene a forma de resumen el listado presente en la Tabla 10, la cual contiene datos relevantes como su abreviatura, variable a medir y ubicación en el banco.

Tabla 9: Instrumentación empleada en el banco de calibración.

<u>Instrumento</u>	<u>Abreviatura</u>	<u>Variable a medir</u>	<u>Ubicación</u>
Barómetro	PT1	Presión Absoluta	Panel principal
Detector resistivo de temperatura	TT1	Temperatura	Tubería MM1
	TT2		Tubería MM2
	TT3		Tubería MM3
	TT4		Tubería MM4
	TT5		Tubería MM5
	TT6		Tubería MUT

Transmisor de presión diferencial	DPT1	Presión Diferencial	Panel secundario
	DPT2		
	DPT3		
	DPT4		
	DPT5		
	DPT6		
	DPT6		
	DPT7		Brazo móvil de conexiones
Amplificador de conmutación	ST1	Volumen	Panel principal
	ST2		
	ST3		
	ST4		
	ST5		
	ST6		
Sensor óptico	ST7		Brazo móvil de conexiones
Termohigrómetro	MT1	Humedad	Laboratorio
	TT7	Temperatura	

*Fuente: Autor*

## 6.2 Actuadores



La operación del banco depende de dos tipos de actuadores: Primero tenemos el conjunto de variadores/blowers o ventilador de succión, que es el encargado de abastecer el fluido de calibración al banco durante la prueba. Por otra parte, se encuentran los actuadores neumáticos de las válvulas, y los solenoides que se encargan ejercer el control y posicionar los actuadores.

### 6.2.1 Variadores de frecuencia y blowers

De manera sencilla, los variadores de frecuencia ajustan energía entregada al motor, lo que se traduce en una disminución o aumento de la velocidad en el mismo. En el banco de alto son empleados dos variadores (ver Tabla 10), ya que se tiene dos motores a controlar de 5 HP y 30 HP (ver Tabla 11) para las zonas 1 y 2 respectivamente.





Tabla 10: *Tabla de variadores de velocidad.*

		
Fabricante	EMERSON	EMERSON
Modelo	VFK2202	VFK4202
Control	Motor 5HP	Motor 30HP
Señal control	4 – 20mA	4 – 20mA
Salida	220 VAC trifásico	220 VAC trifásico

*Fuente: CDT de Gas.*

Tabla 11: *Tabla de motores.*

		
Fabricante	EMERSON	EMERSON
Modelo	EK72	EK89
Potencia	5HP	30HP
RPM	3500	3535
Alimentación	208 - 230 VAC trifásico	208 - 230 VAC trifásico
Conexión	Estrella paralela	Delta paralela

*Fuente: CDT de Gas.*

### 6.2.2 Actuadores neumáticos y electroválvulas

La habilitación de las líneas de los medidores patrón es efectuada mediante actuadores neumáticos que requieren una presión determinada para su correcto funcionamiento. Por ende, este tipo de actuadores requieren el uso de solenoides que trabajan a 110 VAC para tener un control desde la plataforma OPTO 22 sobre las líneas.

Tabla 12: *Actuador neumático.*

Fabricante	Dwyer
Modelo	DA-07
Tipo	Neumático doble efecto
Alcance	0-80 psi

*Fuente: CDT de Gas.*

En la Tabla 12 se puede apreciar las características de los actuadores neumáticos seleccionados por criterios de diseño mecánico del banco. Por otra parte, en la siguiente tabla, se puede observar una muestra de los solenoides por los cuales se optó, ya que pertenecen al mismo fabricante y cumplen el criterio de ayudar al control de las válvulas

Tabla 13: *Válvula Solenoide*

Fabricante	Dwyer
Modelo	Sn-5 <sup>a</sup>
Tipo	Solenoides Namur
Control	On/off
Alimentación	110 VAC

*Fuente: CDT de Gas.*

## 7. Automatización del banco de calibración

### 7.1 Plataforma SNAP PAC SYSTEM de OPTO 22

El objetivo principal de esta práctica es automatizar el proceso de calibración de un banco de calibración. En primer lugar, para lograr dicho propósito es requerido una serie de instrumentos y actuadores, los cuales fueron abordados en el capítulo anterior, junto con la plataforma de control y adquisición de datos. Por consiguiente, la herramienta empleada para llevar a cabo esta automatización es el SNAP PAC SYSTEM de la empresa OPTO 22, el cual posee un sistema integrado de hardware y software ideal para el control industrial, monitoreo y adquisición de datos.

Este sistema consiste en 4 elementos básicos: software, controladores, cerebros (brains) y módulos de entradas y salidas (E/S). Ahora bien, según (OPTO 22, 2018) el software llamado PAC PROJECT, se encuentra compuesto de los siguientes elementos:

**PAC CONTROL:** Es una herramienta de programación basada en diagramas de flujo y un lenguaje de programación propio llamado OPTO SCRIPT. En este programa es posible crear, descargar y ejecutar programas de control en controladores SNAP PAC de series S y R.

**PAC DISPLAY:** Es un software que permite la creación de interfaces humano maquina (HMI<sup>4</sup>), permitiendo la interacción del operador con los controladores.

**PAC MANAGER:** Se trata de una herramienta de configuración y mantenimiento empleada para la asignación de direcciones IP, actualización de firmware y configuración de dispositivos de E/S.

---

<sup>4</sup> HMI: por sus siglas en inglés “Human-Machine Interface”

**OPTODATALINK:** Permite el intercambio de información del PAC PROJECT con bases de datos. Además de bases, el destino de estos datos puede ser a archivos de texto plano.

Para la automatización del banco en cuestión, fue utilizado el PAC PROJECT Profesional 9.6, versión que permite completo acceso a los programas anteriormente mencionados. Por otra parte, los controladores SNAP PAC se encargan de ejecutar las estrategias de control, brindar comunicación a todo el sistema, procesar las señales de entrada y salida presente en los módulos, además de suministrar datos a la HMI. En comparación con los controladores, los brains están diseñados para sistemas de control distribuido contando con características diferenciadoras, como su montaje en solitario. Para finalizar, se tienen los módulos de entradas y salidas, estos manejan y adecuan señales análogas, digitales y seriales; para tales fines, OPTO 22 ofrece una gran variedad de módulos buscando adaptarse a las necesidades del proceso según (OPTO 22, 2011).

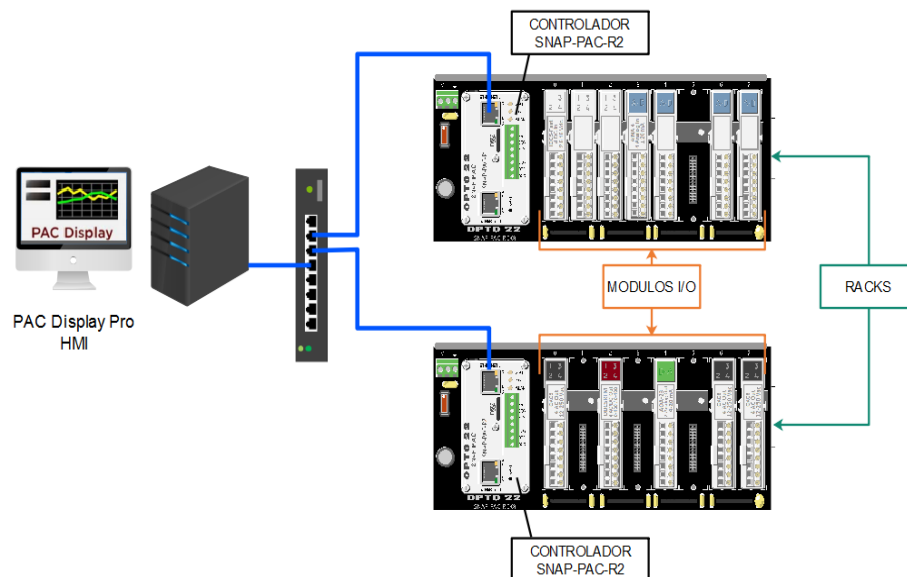


Figura 8: Arquitectura SNAP PAC SYSTEM del banco de calibración

Fuente: Autor

En la Figura 8, se puede observar la arquitectura de automatización del SNAP PAC SYSTEM empleada en el banco de calibración. En la imagen se muestra el uso de 3 elementos básicos: controladores, módulos y software presente en la estación de trabajo.

## **7.2 Arquitectura SNAP PAC SYSTEM del banco de calibración**



Ya que la automatización del banco de calibración amerita robustez en el proceso, se requiere una arquitectura de SNAP PAC SYSTEM que se acople a las necesidades del procedimiento. Por tanto, se ha optado por emplear dos controladores destinando a uno estos como maestro y el otro como esclavo, de esta forma se distribuye la operación de la estrategia de automatización. Del mismo modo se ha seleccionado una agrupación de módulos de entrada para leer las señales por parte de la instrumentación y de salida para la ejecución de los actuadores. Finalmente, para cada controlador es requerido un Rack o tarjeta de montaje para realizar el acople entre controlador – módulos. A continuación, se describe cada uno de los elementos utilizados en el banco de calibración:

### **7.2.1 Controladores**

Los SNAP-PAC de la serie R son sistemas de control básicos de procesos o BPCS (ANSI/ISA, 2009), visualmente son iguales y cuentan con características físicas similares tales como: un puerto serial RS-232, dos puertos Ethernet 10/100 Mbps, procesador de 32 bit a 200 MHz, compatibilidad con todos los módulos y controladores SNAP. De igual forma, sus características analógicas son similares tal como: linealización de RTD's, escalado de valores, temporizadores de chequeo y una posibilidad de manejo de más de 96 lazos PID. Por otra parte, la diferencia radica en las características digitales: el controlador SNAP-PAC-R2 es una simplificación del SNAP-PAC-R1, el cual posee características tales como generación de pulsos

y latching entre otras cosas, mientras que este último cuenta adicionalmente con conteo de alta frecuencia y conteo en cuadratura principalmente, además de su diferencia de precio, el controlador R1 es aproximadamente 15 % más costoso que el controlador R2.

Tabla 14: *Especificaciones controladores R1 y R2.*

 SNAP PAC R1   SNAP PAC R2	Alimentación	5.0 – 5.2 VDC @ 1.5 A máx.
	Unidad central de procesamiento	200 MHz 32-bit ColdFire® 5475 integrado con unidad de punto flotante (FPU).
	- Memoria RAM	- Modelos cableados e inalámbricos de 32 MB (10 MB disponibles para la estrategia de Control PAC y 4 MB para el almacenamiento de archivos. Otros modelos de 16 MB (5 MB disponibles para la estrategia de Control PAC y 2 MB para el almacenamiento de archivos)
	- Memoria RAM, con respaldo de energía	- 2 MB (1 MB disponible para la estrategia de Control PAC)
	- Flash	- 8 MB (3.25 MB disponibles para la estrategia de Control; 384 KB disponibles para archivos)
	- Almacenamiento removible	- MicroSD o MicroSDHC de hasta 32 Gb
Temperatura de operación	-20 °C a 60°C	
Humedad	0 – 95 % de humedad relativa	

*Fuente: CDT de Gas.*

### 7.2.2 Módulos de entradas y salidas

Los módulos son seleccionados respecto al tipo de señal que es entregada de cada uno de los instrumentos de medición y en el caso de los actuadores al tipo de señal que requieren para su control. Para facilitar la selección de módulos se realizó un listado de actuadores, instrumentación, tipos de señal y cantidades que posee el banco. Gracias al listado es posible evaluar los módulos que se requieren para llevar a cabo la automatización.

Tabla 15: Listado de instrumentación, actuadores y sus respectivas señales

<b>Instrumentos</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Tipo de señal</b>	<b>Tipo de módulo</b>
Barómetro Honeywell HPB100W2DA-AF	1	RS-232	Controlador R1 <sup>5</sup>
Transmisor de presión diferencial Ashcroft modelo CXLdp	1	Entrada 4-20 mA	SNAP-AIMA-4
Transmisor de presión diferencial Ashcroft modelo DXLdp	6	Entrada 4-20 mA	SNAP-AIMA-4
Termo-higrómetro Dwyer modelo WHT series	1	Entrada 4-20 mA	SNAP-AIMA-4
	1	Entrada 4-20 mA	SNAP-AIMA-4
Transmisor de temperatura Pyromation modelo 450	6	Entrada 4-20 mA	SNAP-AIMA-4
Amplificador de pulsos Turck modelo IM1-12EX-T	1	Entrada Digital	SNAP-IDC5-FAST
Sensor óptico			
Amplificador de pulsos Turck modelo IM1-22EX-T	1	Entrada Digital	SNAP-IDC5-FAST
Amplificador de pulsos Turck modelo MC13-241EX0-T/S276	5	Entrada Digital	SNAP-IDC5-FAST
Variador Emerson modelo VFK2202	1	Convertor D-A	SNAP-AOA23
	2	Salida VDC	SNAP-ODC5RFM
	1	Entrada Digital	SNAP-IDC5-FAST
Variador Emerson modelo VFK4202	1	Convertor D-A	SNAP-AOA23
	2	Salida VDC	SNAP-ODC5RFM
	1	Entrada Digital	SNAP-IDC5-FAST
<b>Actuadores</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Tipo de señal</b>	<b>Tipo de módulo</b>
Relés (a contactores)	2	Salida VAC	SNAP-OAC5
Válvulas solenoides	6	Salida VAC	SNAP-OAC5

Fuente: Autor

<sup>5</sup> El barómetro es de comunicación serial RS-232 y se conecta directamente al puerto serial del controlador R1

Del anterior listado nace la siguiente tabla con el listado final que contiene los módulos necesarios que satisfacen las necesidades, y las cantidades de estos.


Tabla 16: *Listado de módulos y cantidades requeridas.*

Módulos	Descripción	Canales requeridos	Canales por módulo	Total módulos
SNAP-AIMA 4	Entrada 4-20 mA	15	4	4
SNAP-IDC5-FAST	Entrada Digital	8	4	3 <sup>6</sup>
SNAP-ODC5RFM	Salida VDC	4	4	1
SNAP-AOA23	Convertor D-A	2	2	1
SNAP-OAC5	Salida AC	8	4	3 <sup>7</sup>

*Fuente: Autor*

Como se puede apreciar, se decidió emplear los módulos SNAP-AIMA-4 (ver Tabla 17) para la adquisición de señales analógicas de los lazos de corriente 4-20 mA para toda la variedad de instrumentos que entregan este tipo de señal.

Tabla 17: *Especificaciones módulo SNAP-AIMA-4.*

 <p>SNAP-AIMA-4</p>	Canales por módulo	4
	Rango de voltaje a la entrada	-20 mA a +20 mA
	Resistencia de entrada al canal	200 Ohms
	Exactitud	0,05% (10 $\mu$ A)
	Alimentación lógica	5 VDC $\pm$ 0.25 VDC @ 170mA
	Temperatura de operación	-20 °C a 70°C

*Fuente: CDT de Gas.*


<sup>6</sup> A pesar de requerir un módulo menos, se decide usar otro modulo por si se llegasen a requerir canales adicionales

<sup>7</sup> A pesar de requerir un módulo menos, se decide separar el control de actuadores de relés y válvulas



Los amplificadores de pulsos y los relés de indicación de estado de los variadores entregan señales digitales de alta frecuencia las cuales son leídas por los módulos SNAP-IDC5-Fast, dicha versión Fast del módulo IDC5, brinda mayor rapidez de adquisición de los pulsos.


Tabla 18: Especificaciones módulo SNAP-IDC5-FAST.

 <p>SNAP-IDC5-FAST</p>	Canales por módulo	4
	Rango de voltaje a la entrada	2.5-16 VDC
	Voltaje de entrada nominal	5 VDC
	Aislamiento entre canales	300 VA
	Alimentación lógica	5 VDC $\pm$ 0.25 VDC @ 150mA
	Tiempo encendido	500 uSec
	Tiempo apagado	500 uSec
	Temperatura de operación	-20 °C a 70°C

Fuente: CDT de Gas.

Se emplea un módulo SNAP-ODC5RFM (ver Tabla 20) el cual brinda una salida de voltaje de 5 VDC, los canales de este módulo son empleados para las conexiones de los variadores y la alimentación de los módulos convertidores D-A.


Tabla 19: Especificaciones módulo SNAP-ODC5RFM.

 <p>SNAP-ODC5RFM</p>	Canales por módulo	4
	Rango de voltaje a la entrada	0-100 VDC 0-130 VAC
	Alimentación lógica	5 VDC $\pm$ 0.25 VDC @ 50mA máx
	Tiempo encendido	500 uSec
	Tiempo apagado	500 uSec
	Temperatura de operación	-20 °C a 70°C

Fuente: CDT de Gas.

Se selecciona el módulo SNAP-AOA-23, ya que posee dos canales que proveen lazos de corriente 4-20 mA. Dicha señal es usada como entrada a los variadores de frecuencia y estos a su vez, se encargan de alimentar los blowers con un VAC proporcional a la corriente que este proveniente del módulo.


Tabla 20: Especificaciones módulo SNAP-AOA23

 <p>SNAP-AOA23</p>	Canales por módulo	4				
	Entrada	12 bits seriales				
	Salida	4-20mA				
	Resolución	3.9 $\mu$ A				
	Exactitud	0,1% rango de salida				
	Alimentación de lazo (VDC) - Resistencia de lazo (Ohms)	8 250	12 450	15 650	24 1050	32 1450
	Alimentación lógica	5 VDC $\pm$ 0.25 VDC @ 150mA				
	Temperatura de operación	-20 °C a 70°C				

Fuente: CDT de Gas.

Finalmente, los módulos SNAP-OAC5 desempeñan una función de interruptor ON/OFF, los canales necesarios son activados automáticamente dentro de la estrategia según el escenario requerido, ejerciendo el control sobre los actuadores presentes en banco de calibración.

Tabla 21: *Especificaciones módulo SNAP-OAC5.*

 <p>SNAP-OAC5</p>	Canales por módulo	4
	Rango de voltaje a la entrada	12-250 VAC
	Voltaje línea nominal	120/240 VAC
	Rango de corriente	3A por módulo
	Alimentación lógica	5 VDC $\pm$ 0,25VDC @ 50mA máx
	Frecuencia de operación	25-65 Hz
	Temperatura de operación	-20 °C a 70°C

Fuente: CDT de Gas.

### 7.2.3 Tarjetas de montaje

Los racks o tarjetas de montaje se seleccionan dependiendo del número de módulos que se requiera comunicar con cada controlador. De acuerdo a numerales anteriores se determina que la automatización requiere como mínimo dos racks de 8 posiciones, uno para cada controlador.

Tabla 22: *Especificaciones tarjeta de montaje de 8 puertos.*

	SNAP-PAC-R series	SNAP-PAC-EB series
 <p>SNAP- PAC-RCK8</p>	Compatibilidad de procesadores	R1 R2 R1-FM R2-FM R1-W R2-W
	Alimentación	5.0 – 5.2 VDC @ 4.2 A máx.
	Capacidad de módulos E/S	8

Fuente: CDT de Gas.

Finalmente, se presenta la distribución de las E/S en las tarjetas de montaje dando por concluida la configuración de la plataforma SNAP PAC SYSTEM. Partiendo de la asignación de señales que ya existía en el banco y en relación a las modificaciones efectuadas necesarias para la automatización del BAC, se establecen las tablas de la distribución. Esta asignación se hace agrupando los módulos de acuerdo a la señal que estos manejan, en el primer controlador se sitúan las señales de entrada digital y seguidas de las señales de entrada analógicas Por otra parte, en el controlador R2 tenemos los módulos requeridos para la manipulación de los actuadores. A continuación, se describe esta asignación de canales en la Tabla 23 y Tabla 24.

Tabla 23: *Asignación de la instrumentación o actuadores en el controlador SNAP-PAC-R1*

Unidad Controlador_ R1		Canal	Nombre	Tipo
[00]	SNAO-IDC5-FAST	0	Pulsos MUT	Entrada Digital
		1	Pulsos MM2	Entrada Digital
		2	Pulsos MM3	Entrada Digital
		3	---	---
[01]	SNAO-IDC5-FAST	0	Pulsos MM4	Entrada Digital
		1	---	---
		2	Pulsos MM5	Entrada Digital
		3	---	---
[02]	SNAO-IDC5-FAST	0	Pulsos MM1	Entrada Digital
		1	---	---
		2	E_VF30_HP	Entrada Digital
		3	E_VF5_HP	Entrada Digital
[03]	SNAP-AIMA-4	0	Presión MM2	Entrada Analógica
		1	Temperatura MM1	Entrada Analógica
		2	Diferencial de presión MUT	Entrada Analógica
		3	---	---
[04]	SNAP-AIMA-4	0	Temperatura MUT	Entrada Analógica
		1	Temperatura MM2	Entrada Analógica
		2	Temperatura MM3	Entrada Analógica

		3	Temperatura MM4	Entrada Analógica
[05]	---	---	---	---
[06]	SNAP-AIMA-4	0	Temperatura MM5	Entrada Analógica
		1	Temperatura Ambiente	Entrada Analógica
		2	Presión MUT	Entrada Analógica
		3	Presión MM1	Entrada Analógica
[07]	SNAP-AIMA-4	0	Presión MM3	Entrada Analógica
		1	Presión MM4	Entrada Analógica
		2	Presión MM5	Entrada Analógica
		3	Humedad	Entrada Analógica

*Fuente: Autor*

Tabla 24: *Asignación de la instrumentación o actuadores en el controlador SNAP-PAC-R2*

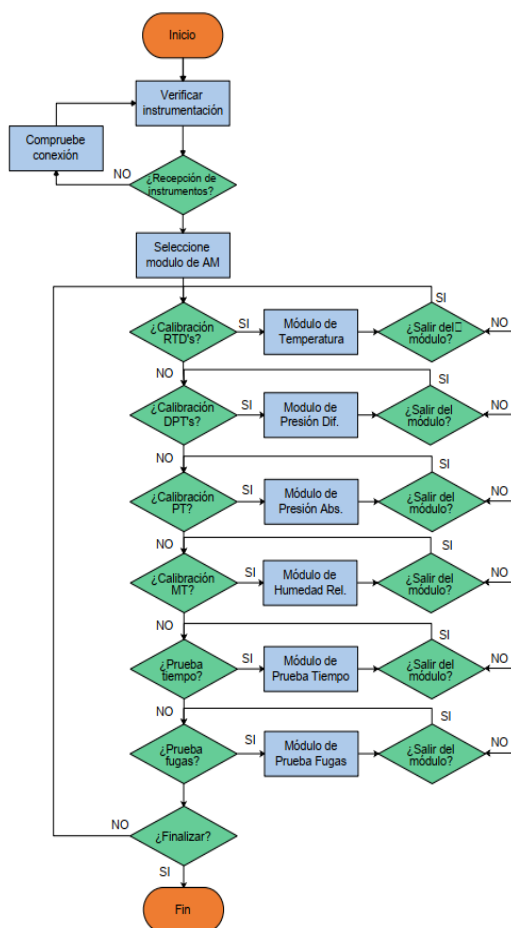
Unidad Controlador_ R2		Canal	Nombre	Tipo
[00]	SNAP-OAC5	0	Rele1_VF30_Hp	Salida Digital
		1	Rele1_VF5_Hp	Salida Digital
		2	---	---
		3	---	---
[01]	---	---	---	---
[02]	SNAP-ODC5RFM	0	ODC_0V_VF30Hp	Salida Digital
		1	ODC_24V_VF5Hp	Salida Digital
		2	OUT_IVF5_Hp	Salida Digital
		3	OUT_IVF30_Hp	Salida Digital
[03]	---	---	---	---
[04]	SNAP-AOA-23	0	Loop_4a20_VF30HP	Salida Analógica
		1	Loop_4a20_VF5HP	Salida Analógica
[05]	---	---	---	---
[06]	SNAP-OAC5	0	FCV1	Salida Digital
		1	FCV2	Salida Digital
		2	FCV3	Salida Digital
		3	FCV4	Salida Digital
[07]	SNAP-OAC5	0	FCV5	Salida Digital

		1	FCV6	Salida Digital
		2	---	---
		3	---	---

*Fuente: Autor*

### 7.3 Descripción del procedimiento de las estrategias

Para el desarrollo es importante una estructura que permita interpretar adecuadamente cada etapa de la actividad de calibración. De manera que, se implementa la metodología de diagrama de flujo que permite organizar las diferentes fases del proceso a automatizar. A continuación, se presentan los diseños de los diagramas de flujo:



*Figura 9* Diagrama de flujo de la estrategia de aseguramiento metrológico

*Fuente: Autor*

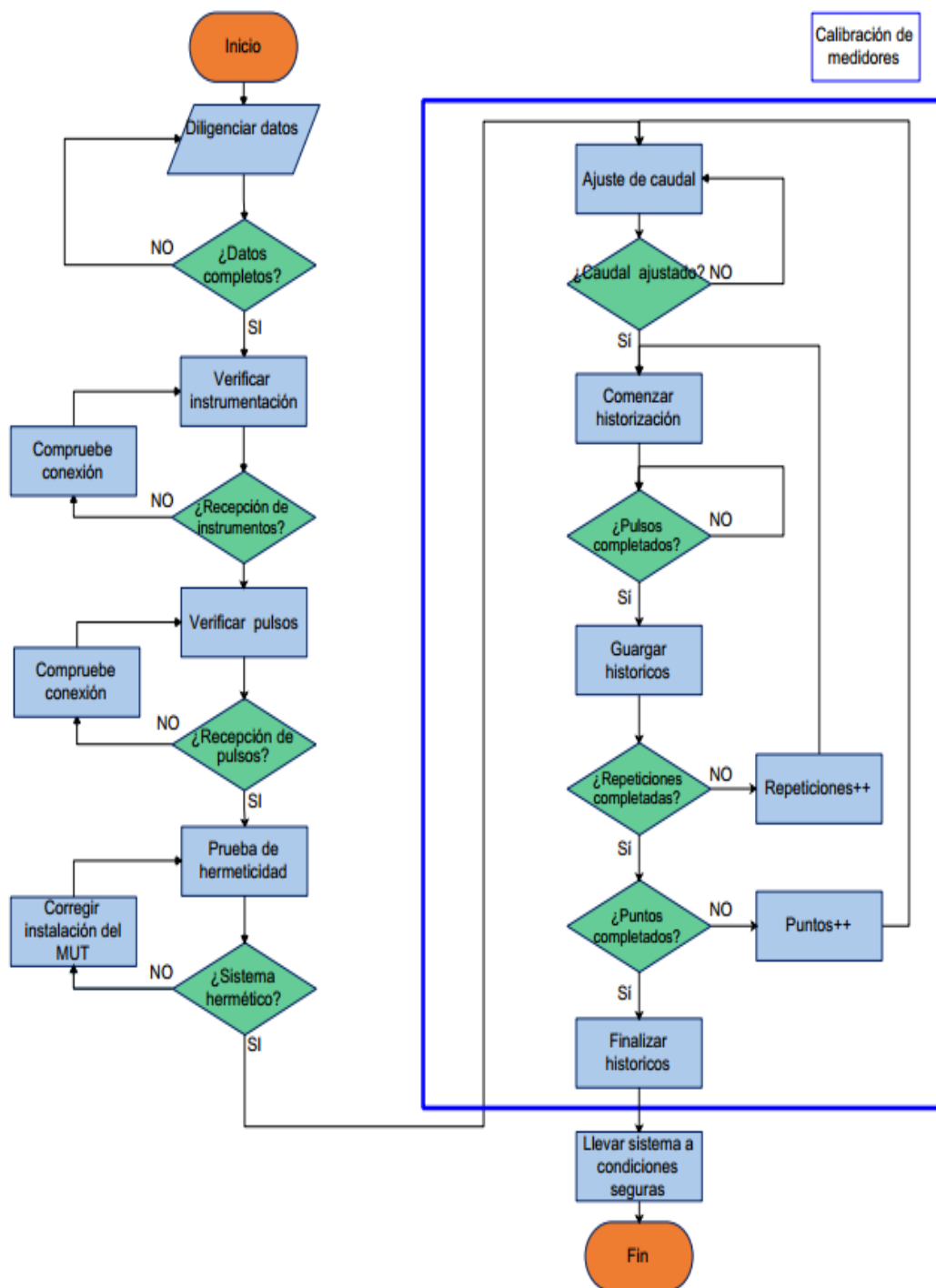


Figura 10: Diagrama de flujo del procedimiento de calibración

Fuente: Autor

### 7.3.1 Estrategia de Aseguramiento metrológico

El aseguramiento metrológico es un proceso de actividades que le permiten a la empresa garantizar la correcta medición y funcionamiento de la instrumentación. En términos generales, la estrategia permite verificar el estado de los instrumentos y visualizar sus lecturas con el fin de poder calibrar los instrumentos, a su vez, comprobar que los errores de medición de estos se encuentren dentro de las especificaciones establecidas por el laboratorio.

Como parte del proceso de automatización del banco de calibración de alto caudal se crea una estrategia con su respectiva interfaz, la cual permite la realización de las labores de aseguramiento metrológico en el banco de calibración. En la Figura 11, se aprecia la interfaz creada para este fin.



Figura 11: Ventana de interfaz de aseguramiento metrológico

Fuente: CDT de Gas



### **7.3.2 Procedimiento de calibración**

El procedimiento de calibración de medidores de gas del banco de calibración de alto caudal se divide en tres grandes partes, los cuales buscan la obtención de un porcentaje de error en la indicación de volumen del medidor bajo prueba, respecto a los medidores patrón (ver Ecuación 5). A continuación, se presentan las actividades principales:

- Actividades preliminares
- Calibración
- Análisis de datos y generación de un certificado de calibración

Antes que nada, las actividades que se ejercen en la presente automatización son únicamente las referentes a la calibración de medidores de gas. Sin embargo, las demás tareas son igualmente importantes y no se dejan de lado. Por una parte, se encuentran las actividades preliminares de las cuales está la recepción del medidor al cual se le prestará el servicio, se debe hacer una verificación de funcionamiento de este. Para el caso de los medidores tipo turbina se hace un “spin time test”, de igual manera para los medidores rotativos se debe cerciorarse de que sus lóbulos no se encuentren bloqueados y finalmente en los medidores diafragma una inspección al estado de sus odómetros. Por otro lado, como parte de las tareas del servicio, se tiene el análisis de datos, para esta labor se hace uso de una herramienta desarrollada por el área de sistemas del CDT de Gas.

#### **7.3.2.1 Datos del servicio**

En un servicio de calibración el operario consigna una serie de datos directamente a la HMI del banco (ver Figura 12), esta información se encuentra subdividida en tres grupos dentro de la

interfaz. En el primer grupo se encuentran los datos del servicio (ver Tabla 25), el segundo grupo está comprendido por los datos del medidor bajo prueba (ver Tabla 26) y el último grupo se encuentra compuesto por las especificaciones del medidor bajo prueba (ver Tabla 27).

Figura 12: Ventana de interfaz de datos del servicio

Fuente: Autor

Tabla 25: Datos del servicio

Datos	Descripción
Solicitante	Nombre de la empresa o cliente que solicita el servicio de calibración
Dirección	Dirección del cliente
ID del servicio	Número o código asignado al servicio
Calibrado por	Nombre el operario que realiza la calibración
Fecha	Fecha en la que se realiza la calibración

*Fuente: CDT de gas*

Tabla 26: *Datos del medidor bajo prueba*

<b>Datos</b>	<b>Descripción</b>
Fabricante	Nombre del fabricante del medidor bajo prueba
Modelo	Nombre del modelo del medidor
Designación	Valor numérico de las dimensiones del MUT, precedido de la letra G
Número de serie	Número de serie del medidor
Tipo de medidor	Tipo de medidor a calibrar: Diafragma, rotativo, ultrasónico o turbina

*Fuente: CDT de gas*

Tabla 27: *Especificaciones del medidor bajo prueba*

<b>Datos</b>	<b>Descripción</b>
Estado	Estado actual del medidor
Diámetro	Diámetro nominal interno del medidor
Kfactor	Relación numérica del medidor entre pulsos y volumen
Unidad Kfactor	Unidad de la relación del Kfactor
Qmáx	Caudal máximo al que puede operar el medidor
Qmín	Caudal mínimo al que puede operar el medidor
Tipo de señal	Tipo de señal que arroja el medidor bajo prueba

*Fuente: CDT de gas*

Una vez el operario ingrese todos los datos correctamente, la interfaz permite continuar pulsando el botón de siguiente.

### 7.3.2.2 Datos de calibración

En la ventana de datos de calibración (ver Figura 13), se encontrarán los caudales propuestos para la calibración, el número de repeticiones por punto, el número de pulsos, el volumen esperado, la duración en minutos de cada repetición y el medidor patrón a emplear para



### 7.3.2.3 Verificación de instrumentos

Una vez se validen los datos de calibración, se abrirá la ventana de verificación de instrumentos (Figura 14), este proceso busca cerciorarse que la instrumentación secundaria del banco se encuentra conectada y en funcionamiento justo antes de la calibración. En caso tal que se halle alguna anomalía en la lectura de señales, la herramienta de análisis arrojará una advertencia para que el operario pueda corregirla, no obstante el sistema posee la opción de saltar estas advertencias y continuar con la prueba, esto bajo responsabilidad del profesional que realice la calibración.

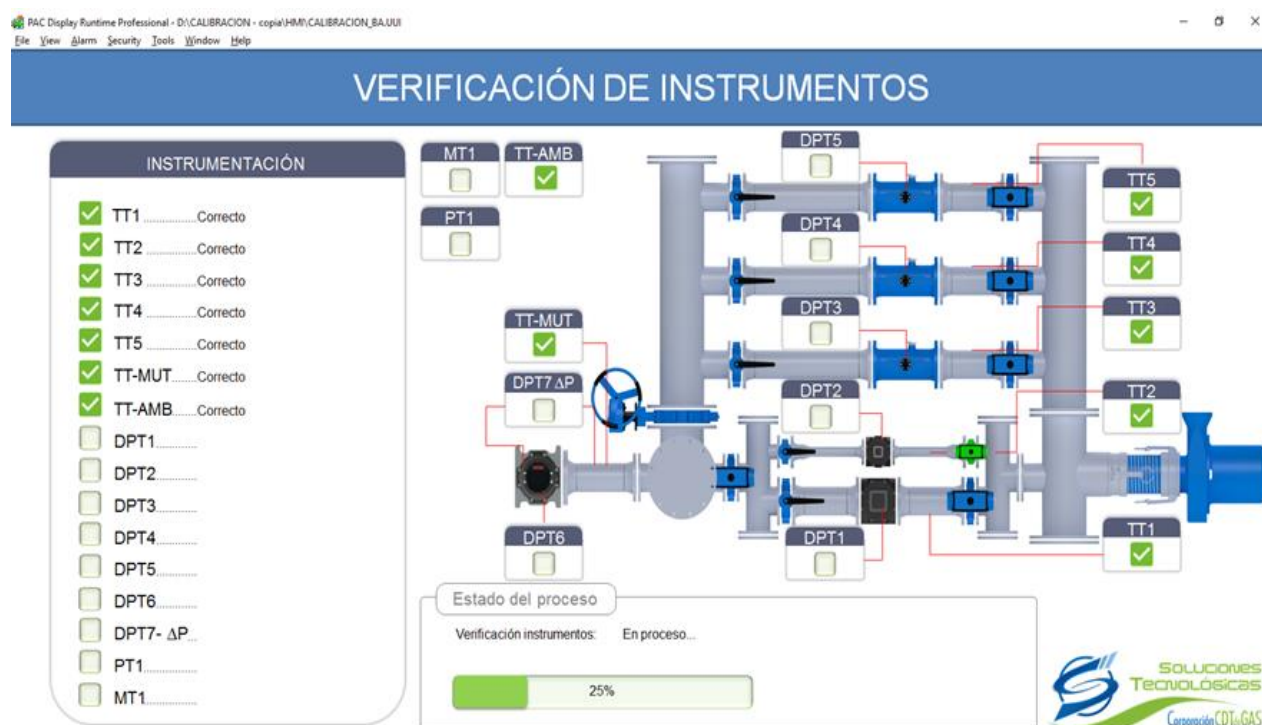


Figura 14: Ventana de verificación de instrumentos

Fuente: Autor

### 7.3.2.4 Prueba de fugas

Después de realizar la verificación de instrumentos, se realiza una prueba de fugas (ver Figura 15). El propósito de la prueba es garantizar una hermeticidad en el montaje realizado para el medidor bajo prueba, y de esta forma asegurar que el volumen comparado entre los medidores, patrón y MUT, es el mismo.

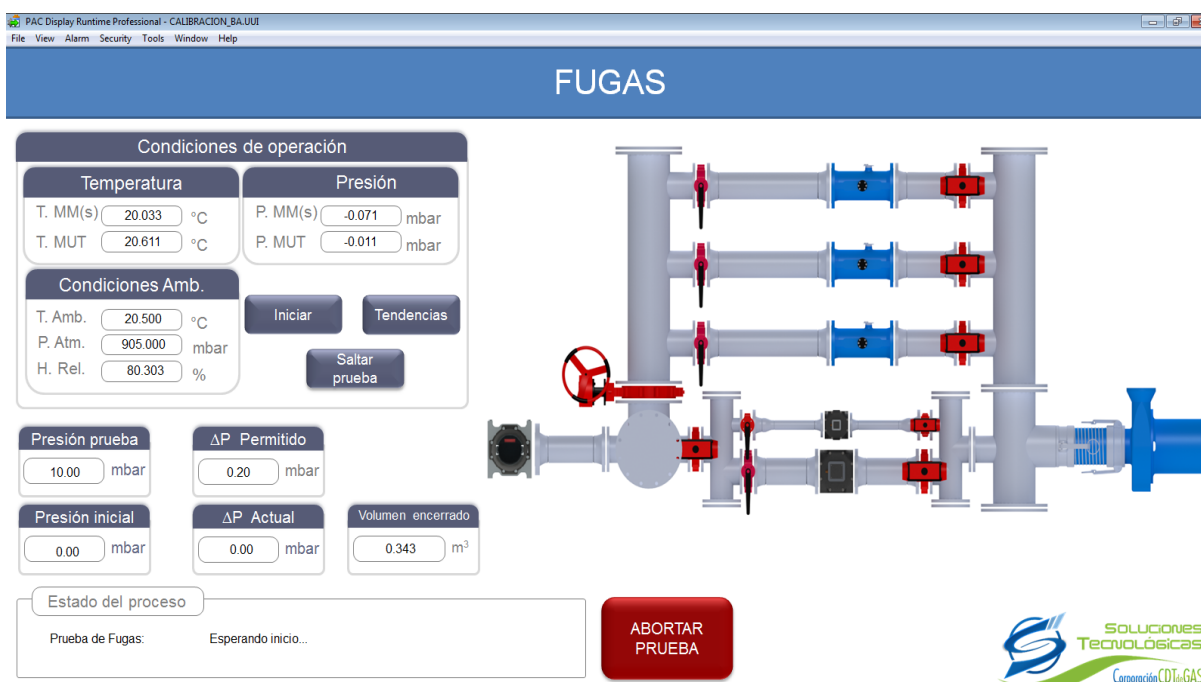


Figura 15: Ventana de prueba de fugas

Fuente: Autor

En adición a las actividades preliminares, se efectúa una verificación de recepción de pulsos. Este proceso busca verificar que el variador que abastece al sistema se encuentra energizado, que el patrón a usar y el medidor bajo prueba estén registrando volumen. De esta forma finalizan las actividades previas para garantizar una indicación de error apropiada, y así se da por iniciado el bucle de calibración.

### 7.3.2.5 Calibración de medidores

En este bucle calibración, se ejecuta de forma automática cada uno de los puntos establecidos en la ventana de calibración; en cada uno de los punto se ejecuta un número determinado de veces o repeticiones; en cada una de las repeticiones se hace pasar un determinado volumen por el medidor patrón y el medidor bajo prueba; volumen que a su vez es cuantificado en un número de pulsos que registran los medidores.

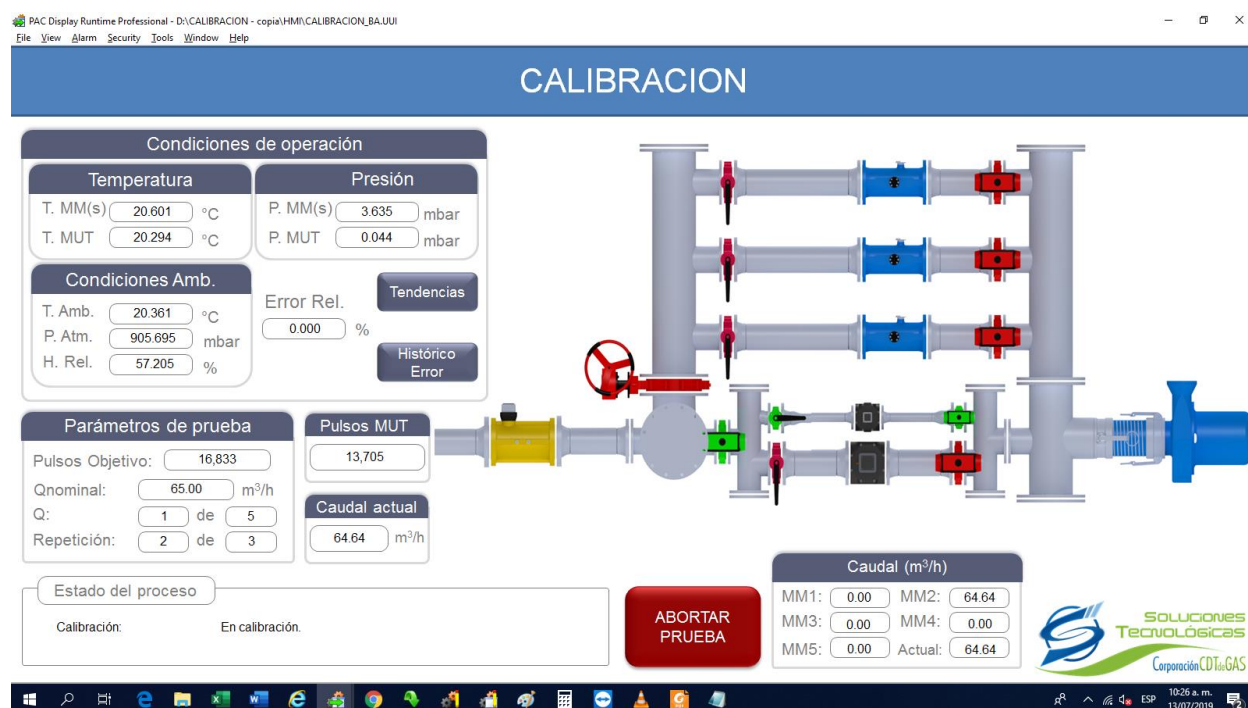


Figura 16: Ventana de calibración de medidores

Fuente: Autor

Para empezar, la ejecución de un punto de calibración comienza con el ajuste de caudal que se requiera, durante esta actividad se ejerce un control en las válvulas según el escenario presente y por otra parte se lleva al sistema al caudal de trabajo establecido (más información en el siguiente numeral). Una vez se lleve el sistema al set-point, se procede a registrar las variables necesarias para la estimar el error de medición como se describe en el modelo matemático.

Durante este proceso se lleva un conteo de los pulsos que registran el MUT y los patrones; cuando este conteo finaliza, se procede a guardar datos y continuar con la siguiente repetición. El proceso descrito se vuelve a ejecutar hasta finalizar el número de muestras o repeticiones que requiere el punto, luego de esto, el bucle se reinicia y continúa con el siguiente punto.

Mientras el proceso de calibración se encuentra en ejecución, la HMI muestra el estado del proceso, los valores de las variables secundarias, como también los datos concernientes a la calibración actual: repeticiones, puntos, caudal y pulsos del MUT (Figura 16). Una vez finaliza el proceso de calibración se finaliza la historización de los datos, se lleva el sistema a un modo seguro y la interfaz a una ventana de finalización.



## 8. Diseño del controlador

El banco de calibración requiere que el ajuste de los diferentes caudales de calibración sea de forma automática, por tanto, se deben conocer y establecer antes diferentes factores. En primer lugar, se procede a identificar planta o proceso, lazos de control y escenarios operativos de este. Posteriormente, se diseña un controlador que se ajuste a las características de operación deseadas, y finalmente antes de su implementación se procede a verificar que el controlador diseñado tenga un comportamiento acorde al esperado, en caso tal que se requiera se hace un ajuste a los parámetros del controlador.

### 8.1 Identificación de la planta

Referente a un sistema, o planta (P), se conoce como conjunto de procesos caracterizados por un cierto número de entradas ( $\mu$ ) y salidas ( $\gamma$ ), como se aprecia en la Figura 17.

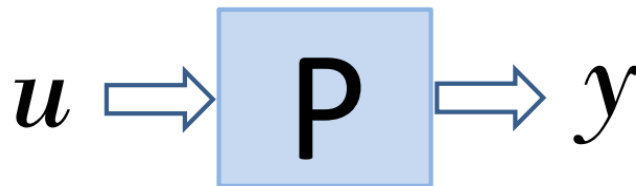


Figura 17. Representación de planta

Fuente: (Ioannou & Sun, 1995).

Para este caso, la planta se encuentra conformada por los medidores patrón, el medidor bajo prueba, los plenum, las secciones de tubería variable al MUT, acondicionadores de flujo, mangueras, filtros y los blowers (ver Figura 18). Referente a la etapa de potencia y el transductor se tienen los variadores de frecuencia, que transforman la entrada corriente del lazo de control 4-20 mA en una determinada frecuencia para los blower, obteniendo como resultado o salida un caudal.

La variable a controlar en el proceso de calibración es el caudal volumétrico, esta variable se obtiene a partir de la medición de dos magnitudes: volumen y tiempo. Por una parte, el volumen es medido por medio de los patrones y el controlador Snap Pac R1, mientras que el tiempo es medido gracias al controlador R1.

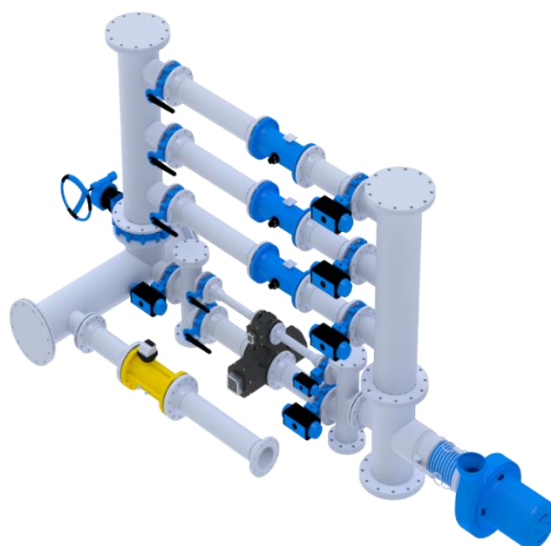


Figura 18 Planta a controlar

Fuente: CDT de Gas

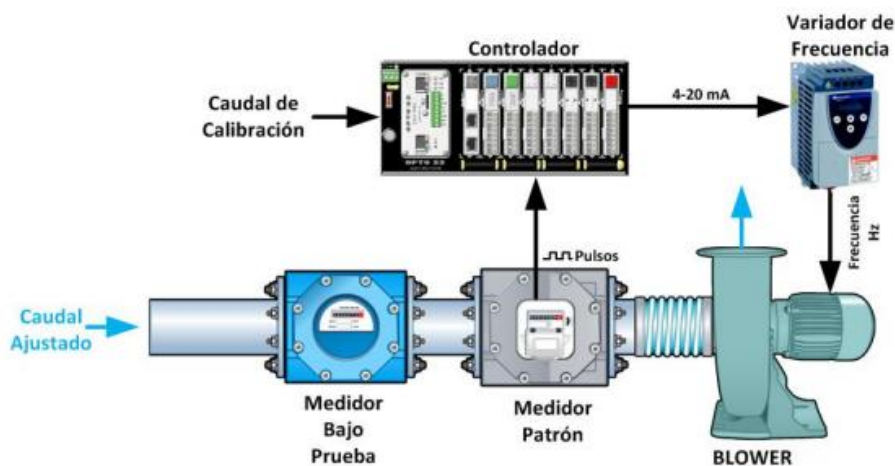


Figura 19: Esquema del lazo de control

Fuente: CDT de Gas

## 8.2 Diseño del controlador

Para realizar el modelado de una planta se requiere conocer a fondo el mecanismo de procesamiento de esta, hasta el punto de poder describirla en forma de ecuaciones matemáticas. Sin embargo, se debe tener en cuenta que la complejidad de algunos sistemas físicos ocasiona que su descripción exacta por medio de un modelo matemático sea casi imposible e inclusive existiendo un modelo, las no linealidades o variaciones del sistema en el tiempo ocasionan que la descripción se aparte del proceso real, por tanto, un diseño más simple generalmente conduce a un controlador simple que es mucho más fácil de comprender y con un mejor desempeño. (Iaonnou & Sun, 1995).

Por lo general, los modelos de plantas se han desarrollado aplicando leyes físicas o caracterizando el comportamiento dinámico de las entradas/salidas del sistema a través de experimentos. Estos modelos matemáticos suelen resultar complicados y requieren algunas simplificaciones. Estas modificaciones suelen obtenerse gracias a los siguientes métodos:

- Linealizar alrededor del punto de operación
- Técnicas de reducción de orden de los modelos

El primer método de simplificación de los modelos arroja una buena descripción alrededor del punto de operación, pero no resulta tan útil para otras regiones de operación. Por otra parte, el segundo método de aproximación causa que los modelos omitan características particulares del sistema.

Tomando como referencia la información anterior expuesta, y dado que el banco posee una gran versatilidad permitiendo la calibración de distintos tipos de medidores, tales como rotativos y turbinas, en diferentes diámetros e intervalos de medición; su amplio alcance, 4 a 4800 m<sup>3</sup>/h, para lo cual cuenta con sus cinco medidores patrón. Es evidente que este sistema es muy variante en el tiempo, dado que para cada medidor bajo prueba la planta física cambia, y con ello su función de transferencia. Por estos motivos se opta por emplear un enfoque diferente al tradicional para el diseño del controlador.

El control adaptativo es el enfoque a utilizar, se define como un control con parámetros ajustables y un mecanismo para ajustar estos parámetros (Astrom & Wittenmark, 1994). Dada la estructura del controlador, se puede considerar como una doble realimentación, una realimentación típica en un sistema de lazo cerrado y un lazo de ajuste de los parámetros del controlador (ver Figura 20). Dentro de los modelos de control adaptativo, se optó específicamente por el modelo de ganancia programada (“Gain-scheduling”).

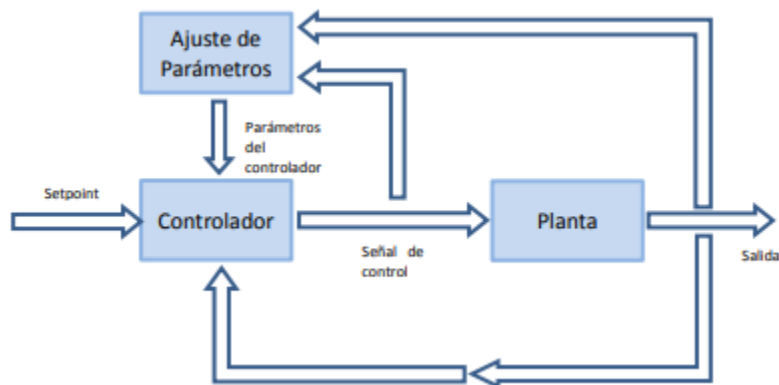


Figura 20 Estructura del sistema de control adaptativo

Fuente: (Ioannou & Sun, 1995).

### 8.3 Ganancia programada

$$\begin{aligned}\dot{x} &= A_i x + B_i u \\ y &= C_i x + D_i u \\ x(0) &= x_0\end{aligned}$$

Figura 21 Modelado matemático de un sistema

Fuente: (Astrom & Wittenmark, 1994)

Tomando como referencia el modelo de la Figura 21, donde para cada punto de operación  $i=1,2,\dots,N$ , los parámetros  $A_i$ ,  $B_i$ ,  $C_i$  y  $D_i$  son conocidos. Para un punto de operación  $i$ , se puede diseñar un controlador con ganancia constante  $\theta_i$  que cumpla con las características de desempeño especificadas. Esto nos lleva a diseñar un controlador  $C(\theta)$  con ganancias  $\{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_i, \dots, \theta_N\}$  siendo  $N$  los puntos de operación (Ioannou & Sun, 1995). Una vez se detecta el punto de operación  $i$ , las ganancias del controlador pueden cambiar a las establecidas para este punto  $\theta_i$ . Los dos elementos esenciales para realizar este tipo de control son una tabla con una lógica adecuada en donde se almacenan los valores  $\theta_i$  y una medición auxiliar de la planta que se encuentre relacionada con los cambios en los puntos de operación. El esquema para este tipo de controladores se muestra en la Figura 22.

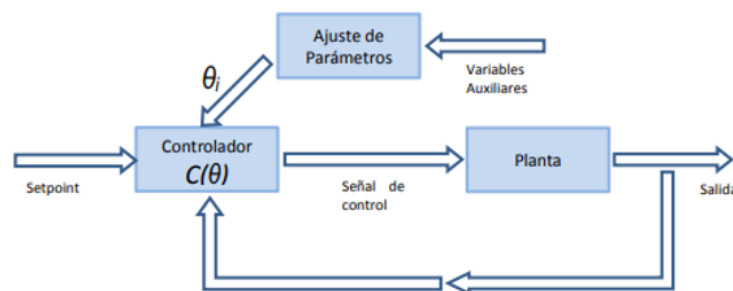


Figura 22 Estructura de un sistema con ganancia programada.

Fuente: (Ioannou & Sun, 1995).

Para este caso se tiene como variables auxiliares el tipo de medidor, la secuencia y el patrón o patrones a utilizar para la calibración.

#### **8.4 Identificación de escenarios**

Los escenarios operativos del banco de alto caudal, se encuentran estrechamente relacionados con las variables auxiliares utilizadas para ajustar los parámetros del controlador. De esta manera se diferencian los escenarios, teniendo en cuenta el patrón a utilizar durante la calibración, secuencia y tipo de medidor bajo prueba. Se toman como escenarios diferentes las calibraciones en ascenso y descenso ya que según el caso cambia el comportamiento del sistema (ver Tabla 28).

Para la sintonización del controlador en los diferentes escenarios operativos se hizo uso de la herramienta PID viewer™ del software Pac Control Basic de Opto 22. Dicha herramienta permite manipular las constantes: proporcional (Gain), integral (Tune\_I), derivativa (Tune\_D) y tiempo de muestreo; además grafica en tiempo real la entrada, setpoint y salida del controlador de esta forma se observó el comportamiento del sistema ante el cambio de sus parámetros. PID viewer ofrece dentro de sus opciones cuatro algoritmos para el controlador PID:

- Velocidad
- ISA
- Paralela
- Interactiva

El algoritmo PID seleccionado para este caso es el de velocidad, ya que presenta las mejores características de respuesta para el sistema ante cambios súbitos grandes en el punto de ajuste y además es útil en la supresión de correcciones excesivas en el sistema de control (Iaonnou & Sun, 1995). Este algoritmo posee las siguientes ecuaciones:

$$Salida = Gain \cdot Span \cdot (Term\_P + Term\_I + Term\_D) \quad 6)$$

Donde encontramos la ecuación de relación del Span, como también las expresiones empleadas para el control de los términos P, I y D:

$$Span = \frac{(Salida_{max} - Salida_{min})}{(Entrada_{max} - Entrada_{min})} \quad 7)$$

$$Term\_P = Error - Error_{-1} \quad 8)$$

$$Term\_I = Tune\_I \cdot Tiempo_{muestreo} \cdot Error \quad 9)$$

$$Term\_D = \frac{Tune\_D}{Tiempo_{muestreo}} \cdot (Var_{proceso} - 2 \cdot Var_{proceso-1} + Var_{proceso-2}) \quad 10)$$

Definiendo el error como:

$$Error = Var_{proceso} - Setpoint \quad 11)$$



Figura 23 PID Viewer

Fuente: (OPTOTUTORIAL: SNAP PAC PID, 2012)

Los especificaciones de operación deseadas para la sintonización del controlador son: en estado estacionario se requiere un error absoluto no mayor al 5 % en los casos más críticos, por otra parte, en estado transitorio se precisa que el sistema no presente sobreimpulsos mayores al 10 % y se cuente con un tiempo de esblecimiento no mayor a 180 segundos. En base a estos criterios, para cada uno de los escenarios se obtienen las siguientes constantes para el controlador:



Tabla 28 Escenarios operativos del BAC.

Zona 1 (Rotativos)								
Esc	Pendiente	Cambio de Patrón		Obs.	Constantes PID			
		Anterior	Actual		Kp	Ki	Kd	Ts
1	Subida	MM2	MM2	-----	-0,6	0,36	0,35	3
2	Subida	MM2	MM1	Cambio MM (Modo seguro y Esc. 4)				
3	Subida	MM1	MM2	No existe				
4	Subida	MM1	MM1	-----	-0,48	0,16	0,35	2
Zona 2 (Turbinas)								
5	Subida	ZONA 1	UN MM	Cambio MM (Modo seguro y Esc. 6)				
6	Subida	UN MM	UN MM	-----	-0,5	0,3	0,35	2
7	Subida	UN MM	DOS MM	Cambio MM (Modo seguro y Esc. 8)				
8	Subida	DOS MM	DOS MM	-----	-0,5	0,28	0,35	2
9	Subida	UN MM	TRES MM	Cambio MM (Modo seguro y Esc. 11)				
10	Subida	DOS MM	TRES MM	Cambio MM (Modo seguro y Esc. 11)				
11	Subida	TRES MM	TRES MM	-----	-0,4	0,2	0,35	2
Zona 2 (Turbinas)								
Esc	Pendiente	Cambio de Patrón		Obs.	Constantes PID			
		Anterior	Actual		Kp	Ki	Kd	Ts
12	Bajada	TRES MM	TRES MM	-----	-0,4	0,2	0,35	2
13	Bajada	TRES MM	DOS MM	Cambio MM (Modo seguro y Esc. 15)				
14	Bajada	TRES MM	UN MM	Cambio MM (Modo seguro y Esc. 17)				
15	Bajada	DOS MM	DOS MM	-----	-0,5	0,28	0,35	2
16	Bajada	DOS MM	UN MM	Cambio MM (Modo seguro y Esc. 17)				
17	Bajada	UN MM	UN MM	-----	-0,5	0,3	0,35	2
18	Bajada	UN MM	ZONA 1	Cambio MM (Modo seguro y Esc. 19)				
Zona 1 (Rotativos)								
19	Bajada	MM1	MM1	-----	-0,3	0,5	0,5	2
20	Bajada	MM1	MM2	Cambio MM (Modo seguro y Esc. 22)				
21	Bajada	MM1	MM2	No existe				
22	Bajada	MM2	MM2	-----	-0,45	0,4	0,5	3

Fuente: Autor

## 8.5 Bucle de calibración

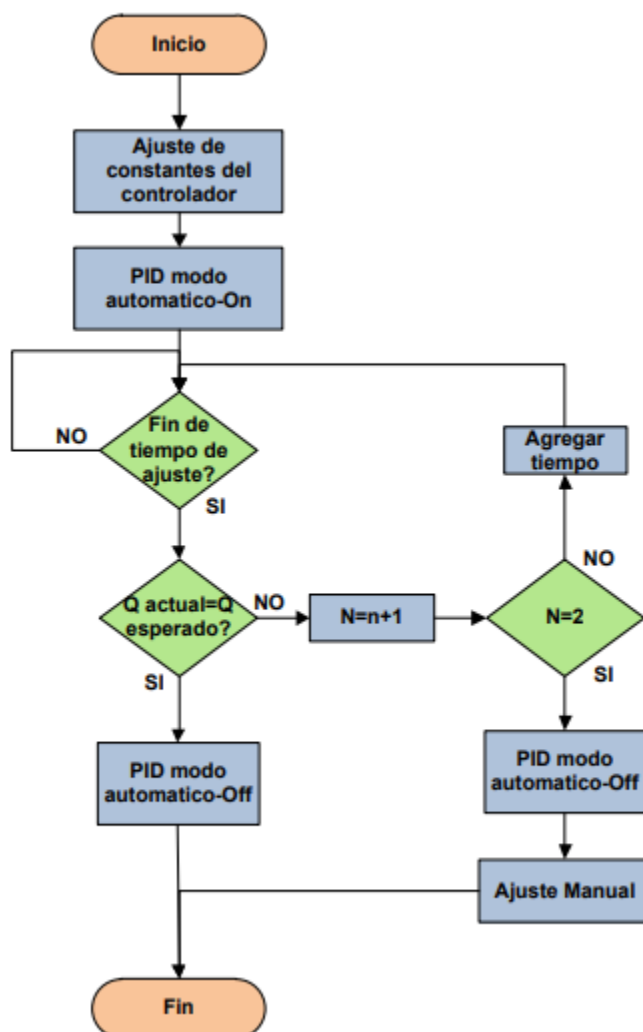


Figura 24 Diagrama de control de caudal

Fuente: CDT de Gas

Cada vez que se realice calibración en un nuevo punto se inicia la rutina de control de caudal, en primera instancia la rutina identifica el escenario operativo que se va a trabajar (ver Tabla 28). Una vez se verifique el escenario, se cargan las constantes PID al controlador y se da inicio a un temporizador, al cabo de 3 minutos se procede a evaluar si el caudal actual se encuentra dentro del esperado. Si el valor de caudal se encuentra ajustado, se procederá a apagar el control PID y se continuará con el proceso de calibración. Por otra parte, si el caudal actual no se encuentra

dentro de los límites de operación, se dará 1 minuto extra y nuevamente se evaluará si se encuentra en el Setpoint. Si dado el caso no se ha logrado el caudal esperado, se apagará el modo automático y el operario deberá realizar el ajuste de manera manual mediante unos botones que le permitirán aumentar o disminuir el caudal.



Figura 25 Ajuste de caudal

Fuente: CDT de Gas

## 9. Pruebas de operación

Finalmente, dentro de las labores ejecutadas dentro del presente proyecto se encuentran las pruebas de operación de las dos estrategias desarrolladas (Calibración y Aseguramiento metrológico). En los siguientes numerales se encuentra la descripción de algunas de las pruebas ejecutadas con el fin de verificar la completa funcionalidad de las estrategias.

### 9.1 Pruebas estrategia de aseguramiento metrológico

Las pruebas que fueron ejecutadas en la estrategia de aseguramiento metrológico corresponden en calibración en lazo cerrado de la instrumentación secundaria del banco. En el caso de los instrumentos de medición de temperatura se empleó como patrón una RTD Pt-100 de cuatro hilos con indicador digital que cumple con las características técnicas requeridas para el proceso de calibración según el método aplicado por el laboratorio, donde su incertidumbre de medida debe ser por lo menos un tercio del error máximo permisible del instrumento a calibrar.



Figura 26 Ventana de calibración de transmisores de temperatura

Fuente: CDT de Gas

De igual forma, la calibración de los instrumentos de presión diferencial se efectuó empleando la interfaz desarrollada (ver Figura 27). Como patrón se utilizó una celda de presión con indicador digital que cumple con las especificaciones requeridas del método de calibración.

The screenshot shows a software application window titled "PRESIÓN DIFERENCIAL" with the following data:

Transmisor	No Corregida (mbar)	Corregida (mbar)	m	b
DPT1	0.410	0.302	0.99540	-0.10890
DPT2	0.341	0.350	0.99630	0.00850
DPT3	1.521	1.544	1.00060	0.01820
DPT4	1.613	1.536	0.99840	-0.07720
DPT5	1.562	1.496	0.99750	-0.06210
DPT6	-0.009	-0.020	1.00320	-0.01120
DPT7-ΔP	-0.004	0.021	1.00280	0.02540

Figura 27 Ventana de calibración de transmisores de presión diferencial

Fuente: CDT de Gas

Adicional a las pruebas de calibración de los instrumentos en lazo cerrado, se ejecutaron pruebas de operación para las demás funciones de la estrategia de aseguramiento (calibración de barómetro, prueba de fugas para los patrones y prueba tiempo). La verificación de estos módulos, permitió corroborar la completa funcionalidad de la estrategia e interfaz desarrollada.

## 9.2 Pruebas estrategia de calibración de medidores

De igual forma que se ejecutaron pruebas para verificar el óptimo funcionamiento de la estrategia de aseguramiento, se realizaron pruebas para garantizar la correcta operación tanto de la estrategia como de la interfaz de calibración. Dentro de las pruebas de validación, se encuentra la calibración completa de dos de medidores (turbina y rotativo) con las dos versiones de las estrategias de calibración, la provista al banco y la de forma manual con la que se disponía.

Cabe destacar que la desviación de los resultados obtenidos de los medidores bajo prueba respecto al banco patrón son inherentes a cada medidor. Para evaluar la concordancia de los resultados se utiliza el error normalizado o índice de comparabilidad, el cual se calcula mediante la Ecuación 12.

$$E_n = \frac{x - X}{\sqrt{u^2 + u_{ref}^2}} \quad 12)$$

Donde:

X	Resultado de la medición
X	Valor de referencia
U	Incertidumbre asociada al resultado de medición
u <sub>ref</sub>	Incertidumbre asociada al valor de referencia

El criterio de aceptación del error normalizado presentado en la Ecuación 12 se aplica utilizando la Ecuación 13.

$$|E_n| \leq 1 \quad 13)$$

### 9.2.1 Resultados medidor de gas tipo turbina

A continuación, se enseñan las características del medidor tipo turbina empleado para validar los resultados:

Tabla 29 *Características del medidor de gas tipo turbina*

Ítem	Especificación
Fabricante:	DRESSER
Designación:	G250
Qmin:	20 m <sup>3</sup> /h
Qmax:	400 m <sup>3</sup> /h
Kfactor:	1912,16 pulsos/m <sup>3</sup>
Tipo de señal:	NAMUR

*Fuente: CDT de Gas*

Como resultado de las calibraciones se tienen los siguientes datos:

Tabla 30 *Resultados estrategia anterior, medidor tipo turbina*

Caudal Promedio [m <sup>3</sup> /h]	Volumen de Prueba [m <sup>3</sup> ]	Error Promedio [%]	Desviación Estándar [%]	± U [%]	k	Meter Factor
40,83	2,00	0,61	0,026	0,19	2,0	0,9940
101,34	5,00	0,85	0,006	0,19	2,0	0,9915
161,01	8,00	0,62	0,023	0,2	2,0	0,9938
280,62	14,00	0,37	0,028	0,2	2,0	0,9963
400,45	20,00	0,43	0,018	0,21	2,0	0,9958

*Fuente: CDT de Gas*

Tabla 31 *Resultados calibración 1 estrategia nueva, medidor tipo turbina*

Caudal Promedio [m <sup>3</sup> /h]	Volumen de Prueba [m <sup>3</sup> ]	Error Promedio [%]	Desviación Estándar [%]	± U [%]	k	Meter Factor	En	Criterio de aceptación
39,85	2,00	0,58	0,021	0,21	2,0	0,9943	0,1052	Satisfactorio
99,66	5,00	0,85	0,013	0,19	2,0	0,9915	0,0048	Satisfactorio
160,24	8,00	0,62	0,036	0,2	2,0	0,9938	0,0008	Satisfactorio
280,31	14,00	0,42	0,020	0,19	2,0	0,9958	0,1827	Satisfactorio
398,93	20,00	0,43	0,034	0,19	2,0	0,9957	0,0044	Satisfactorio

*Fuente: CDT de Gas*

Tabla 32 Resultados calibración 2 estrategia nueva, medidor tipo turbina

Caudal Promedio [m <sup>3</sup> /h]	Volumen de Prueba [m <sup>3</sup> ]	Error Promedio [%]	Desviación Estándar [%]	± U [%]	k	Meter Factor	En	Criterio de aceptación
39,90	2,00	0,57	0,016	0,2	2,0	0,9943	0,1241	Satisfactorio
99,84	5,00	0,84	0,029	0,19	2,0	0,9917	0,0443	Satisfactorio
160,16	8,00	0,62	0,028	0,19	2,0	0,9938	0,0081	Satisfactorio
280,15	14,00	0,42	0,015	0,18	2,0	0,9959	0,1693	Satisfactorio
398,93	20,00	0,43	0,029	0,19	2,0	0,9958	0,0015	Satisfactorio

Fuente: CDT de Gas

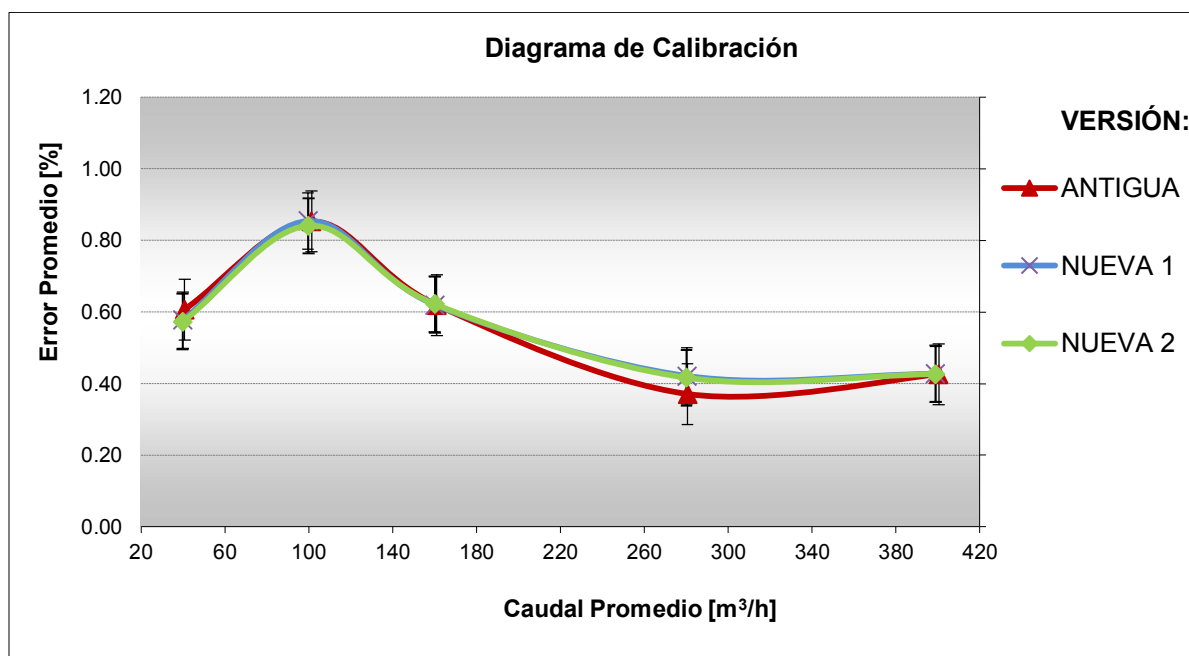


Figura 28 Diagrama calibración medidor tipo turbina

Fuente: CDT de Gas

De acuerdo a la gráfica anterior (ver Figura 28), se observa una alta reproducibilidad dada la cercanía de los datos obtenidos en todas las calibraciones. Además, según el criterio de aceptación del error normalizado, se obtiene un desempeño satisfactorio en todos los puntos de calibración.



## 9.2.2 Resultados medidor de gas tipo rotativo

A continuación, se enseñan las características del medidor tipo rotativo empleado para validar los datos:

Tabla 33 Características del medidor de gas tipo rotativo

Ítem	Especificación
Fabricante:	DRESSER
Designación:	G65
Qmin:	4 m <sup>3</sup> /h
Qmax:	100 m <sup>3</sup> /h
Kfactor:	10 pulsos/m <sup>3</sup>
Tipo de señal:	CONTACTO SECO

Fuente: CDT de Gas

Tabla 34 Resultados estrategia anterior, medidor tipo rotativo

Caudal Promedio [m <sup>3</sup> /h]	Volumen de Prueba [m <sup>3</sup> ]	Error Promedio [%]	Desviación Estándar [%]	± U [%]	k --	Meter Factor --
4,16	0,29	-1,64	0,151	0,3	2,2	1,0167
10,25	0,48	-0,63	0,011	0,2	2,0	1,0063
25,44	1,25	-0,31	0,011	0,2	2,0	1,0031
40,20	1,92	-0,03	0,030	0,21	2,0	1,0003
69,38	3,50	0,04	0,023	0,19	2,0	0,9996
99,62	5,00	0,10	0,021	0,21	2,0	0,9990

Fuente: CDT de Gas

Tabla 35 Resultados calibración 1 estrategia nueva, medidor tipo rotativo

Caudal Promedio [m <sup>3</sup> /h]	Volumen de Prueba [m <sup>3</sup> ]	Error Promedio [%]	Desviación Estándar [%]	± U [%]	k --	Meter Factor --	En  --	Criterio de aceptación --
3,83	0,30	-1,64	0,156	0,3	2,2	1,0167	0,003	Satisfactorio
10,01	0,50	-0,64	0,041	0,21	2,0	1,0064	0,036	Satisfactorio
25,02	1,30	-0,30	0,031	0,21	2,0	1,0030	0,034	Satisfactorio
39,87	2,00	-0,03	0,057	0,21	2,0	1,0003	0,004	Satisfactorio
69,45	3,50	0,04	0,030	0,19	2,0	0,9996	0,018	Satisfactorio
99,62	5,00	0,10	0,017	0,21	2,0	0,9990	0,011	Satisfactorio

Fuente: CDT de Gas

Tabla 36 Resultados calibración 2 estrategia nueva, medidor tipo rotativo

Caudal Promedio [m <sup>3</sup> /h]	Volumen de Prueba [m <sup>3</sup> ]	Error Promedio [%]	Desviación Estándar [%]	± U [%]	k	Meter Factor	En	Criterio de aceptación
3,89	0,30	-1,64	0,156	0,3	2,2	1,0167	0,001	Satisfactorio
10,03	0,50	-0,64	0,052	0,21	2,0	1,0064	0,036	Satisfactorio
25,00	1,30	-0,27	0,062	0,22	2,0	1,0027	0,128	Satisfactorio
39,87	2,00	-0,02	0,065	0,22	2,0	1,0002	0,038	Satisfactorio
69,45	3,50	0,04	0,030	0,19	2,0	0,9996	0,018	Satisfactorio
99,62	5,00	0,10	0,017	0,21	2,0	0,9990	0,011	Satisfactorio

Fuente: CDT de Gas

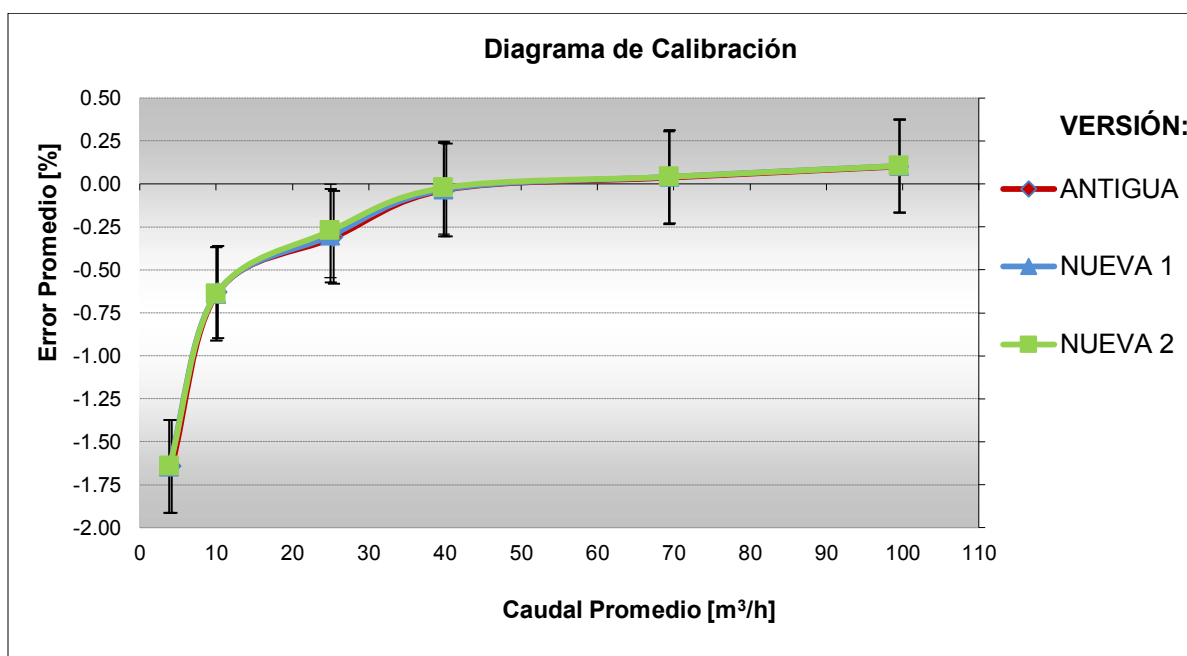


Figura 29 Diagrama calibración medidor tipo rotativo

Fuente: CDT de Gas

En la Figura 29 se aprecian los resultados de las calibraciones realizadas con el banco caudal como patrón, empleando las dos versiones de estrategias de calibración, poseen una alta repetibilidad y reproducibilidad lo cual demuestra una alta concordancia en los resultados emitidos con las dos estrategias de calibración. La información permite confirmar la

confiabilidad del uso de la nueva estrategia de calibración a través del criterio de evaluación de desempeño aplicado.

Los resultados obtenidos indican un desempeño satisfactorio, con un Error Normalizado inferior a uno ( $|En| < 1$ ), sobre el intervalo de medición de caudal. De esta forma se validó la fiabilidad de los resultados que se obtienen de un proceso de calibración con el banco de alto caudal, equipado ahora con una nueva estrategia de calibración.

## 10. Otras actividades

- Cotización de actuadores requeridos
- Instalación y cableado de fuentes de alimentación para la instrumentación y actuadores.  
(ver Anexo B)
- Diseño de planos eléctricos (ver Anexo A)
- Diseño de P&ID del proceso (ver Anexo A)
- Realización de manual de procedimiento técnico operación
- Realización de instructivo para la operación de la estrategia de calibración del banco de alto caudal
- Actualización de las estrategias de los demás bancos de calibración que cuentan con Opto 22 en la corporación CDT de Gas
- Capacitación en Snap Pac System de Opto 22 (programación y arquitectura)
- Se recibió formación en: incertidumbre, tecnologías de medición de gas, Termometría, Manometría, Aseguramiento metrológico y metrología básica

## 11. Conclusiones y recomendaciones

- Se desarrolló una nueva estrategia de control y adquisición de datos que permite hacer un seguimiento al proceso, además de ejercer un constante monitoreo en las variables implicadas, favoreciendo así su ejecución y facilitando las labores del operario.
- Pese a que el proyecto consistía concretamente en automatizar el proceso de calibración, siguiendo los lineamientos del reglamento de pruebas PTB tomo 29 se implementaron mejoras a las actividades preliminares y de Aseguramiento Metrológico en el banco patrón, minimizando así la probabilidad de obtener resultados erróneos.
- Se dotó de importantes mejoras a la funcionalidad del banco de calibración que son reflejadas en la productividad de la corporación. Sin embargo, se superó en un 25% el presupuesto inicial dispuesto para el proyecto.
- Como resultado de las pruebas de funcionamiento y caracterización, se logró verificar la funcionalidad y estabilidad del controlador diseñado en base a las especificaciones del proceso deseadas, presentando un error absoluto en estado estable menor al 5% en los casos más críticos y hasta menor al 1% en algunos escenarios.
- Se observó que la adaptabilidad térmica durante los cambios de patrón suele tomar más tiempo del habitual si el banco ha estado fuera de operación en horas previas. Por ende, se incorporó un procedimiento de operación adicional en dados casos.
- Se desarrolló la evaluación de desempeño aplicando el criterio de Error Normalizado para confirmar la concordancia de los resultados obtenidos con la estrategia manual versus la nueva estrategia que opera de forma automática, obteniendo valores satisfactorios en todos los intervalos de las pruebas, esto demuestra la correcta implementación de toda la programación desarrollada.

## Bibliografía

- Astrom, K., & Wittenmark, B. (1994). *Adaptative Control, 2nd Ed.* MA, USA: Addison-Wesley Longman Publishing Co.
- Iaonnou, P., & Sun, J. (1995). *Robust Adaptative Control.* NJ, USA: Prentice Hall, Inc.
- JCGM, 2. (2012). *International vocabulary of metrology - Basic and general concepts and associated terms (VIM).* (3ra ed.).
- OPTO22. (2012). *OPTOTUTORIAL: SNAP PAC PID.* Retrieved from [http://documents.opto22.com/1641\\_OptoTutorial\\_SNAP\\_PAC\\_PID.pdf](http://documents.opto22.com/1641_OptoTutorial_SNAP_PAC_PID.pdf)
- OPTO22. (n.d.). *About US - Opto 22.* Retrieved from [www.opto22.com/about-us](http://www.opto22.com/about-us)
- ANSI/ISA. (2009). *ANSI/ISA-5.1-2009 Instrumentation Symbols and Identification.*
- CDT de gas. (2009). *CONSTRUCCIÓN DE UNA FACILIDAD TECNOLÓGICAS PARA LA CALIBRACIÓN DE MEDIDORES DE GAS DE ALTO CAUDAL Y EL ANÁLISIS DE LOS FENÓMENOS DE FLUJO QUE AFECTAN LA MEDICIÓN.*
- Dietrich, H. (2003). *PTB Testing Instructions. Vol. 29. Measuring Instruments for Gas. 29.*
- Dresser. (s.f.). *Turbine Meter TRZ 03 Serving the Gas Industry Worldwide.*
- Garcia, E., & Covelli, G. (2010). Desarrollo del banco de calibracion para medidores de gas a alto caudal de la corporacion CPT de GAS. *Centro Nacional de Metrologia SM2010-S1B-4*, 1–10.
- OPTISONIC. (2009). *Ultrasonic Gas Flowmeter.* <https://doi.org/10.1006/jhev.1996.0021>
- OPTO 22. (2011). *SNAP PAC System - specification guide.*
- OPTO 22. (2018). *SOFTWARE PAC PROJECT.* 1–10.

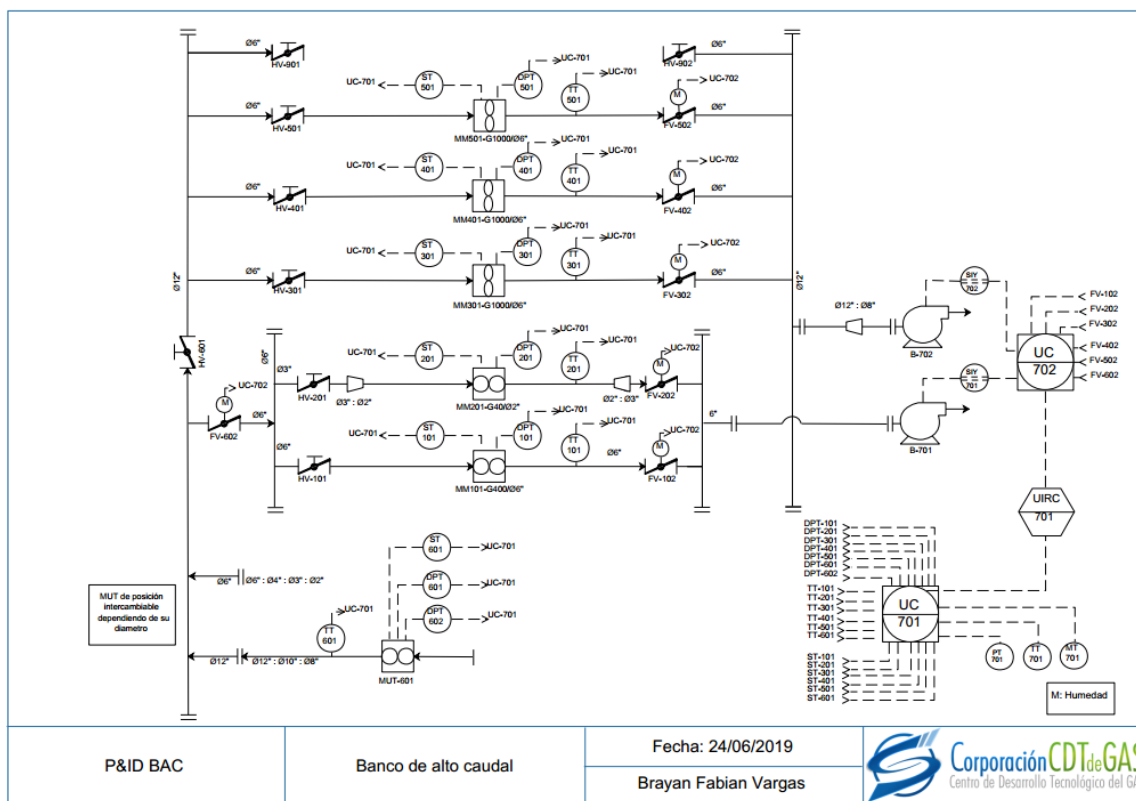
## Apéndice A: Documentación del sistema automatizado

En cualquier proyecto la documentación es una parte fundamental, esta permite preservar información relevante respecto al mismo. A la hora de documentar, se busca que los datos sean de fácil entendimiento para los implicados, como también para personas no relacionadas directamente con la elaboración del proyecto.

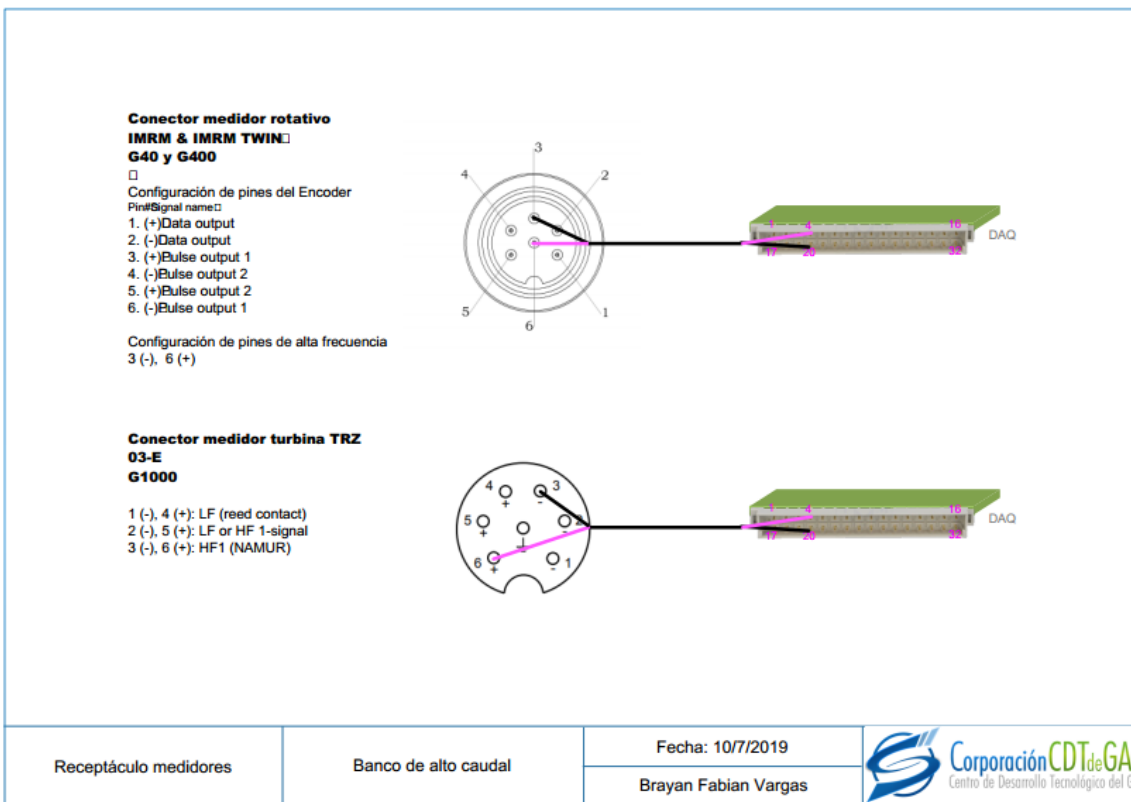
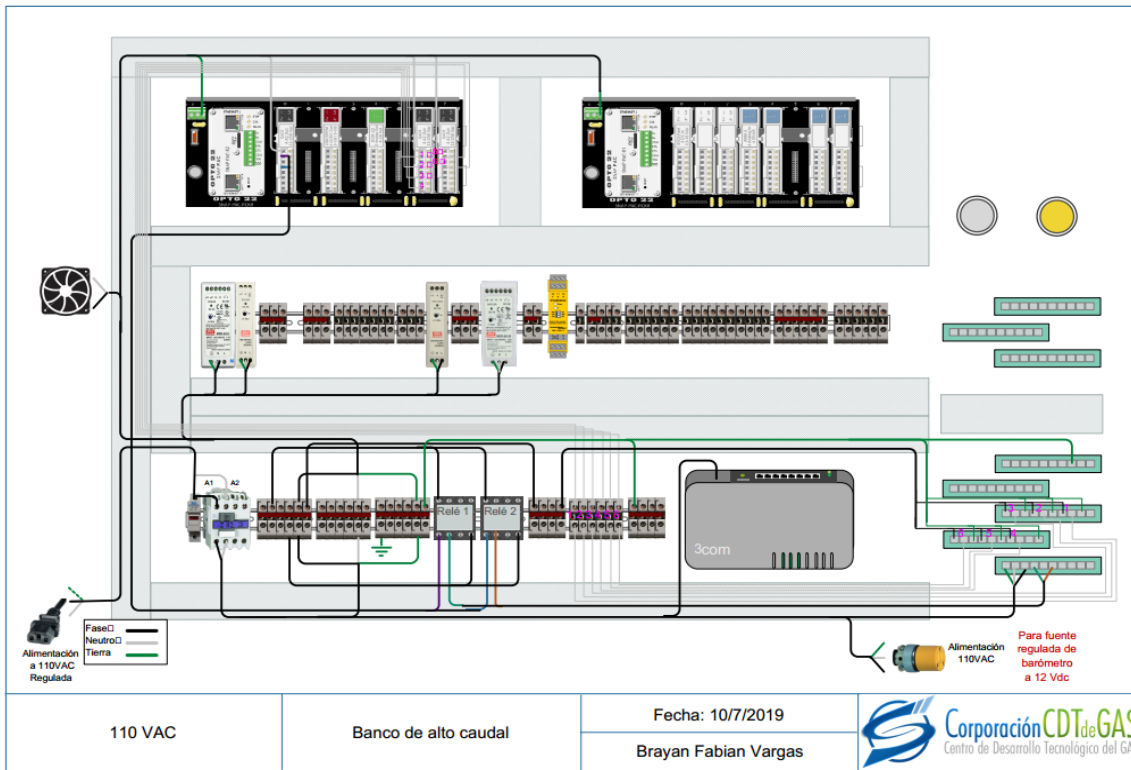
Por la naturaleza de este proyecto hace que la documentación se genere sea bajo las recomendaciones de las normas ISA (Instrumentation, Systems, and Automation Society):

- ISA 5.1 Instrumentation Symbols and Identification

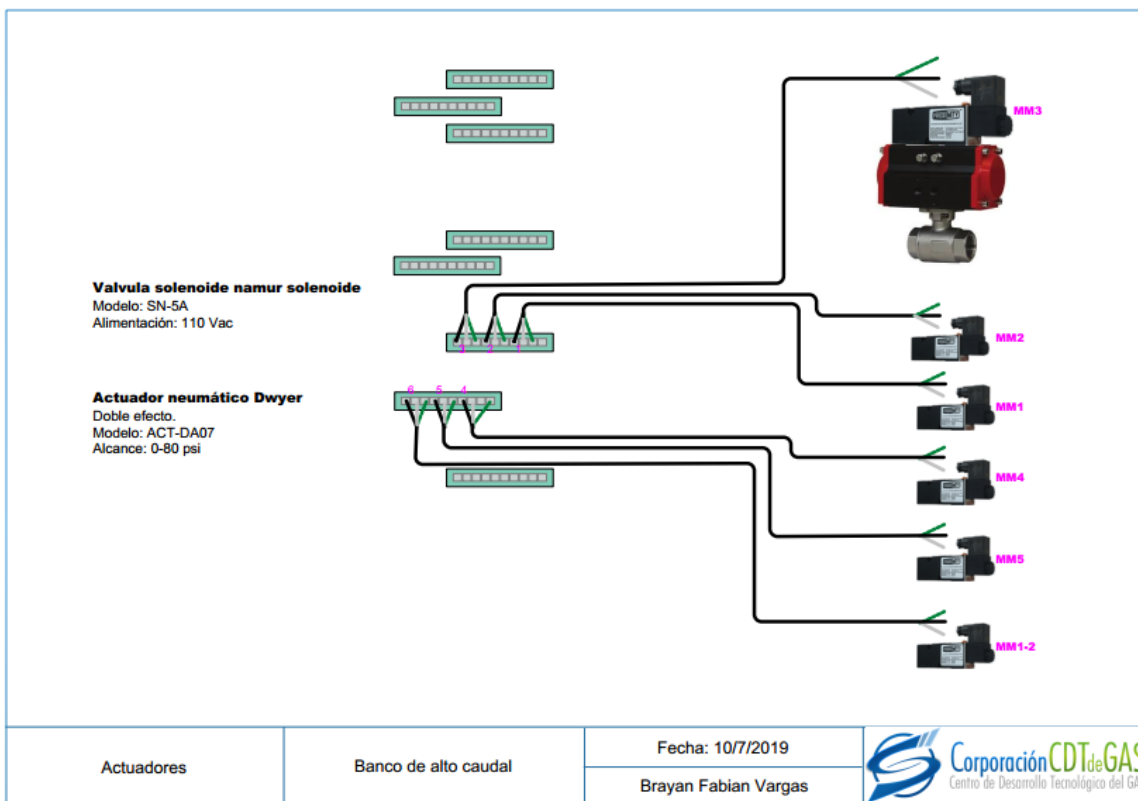
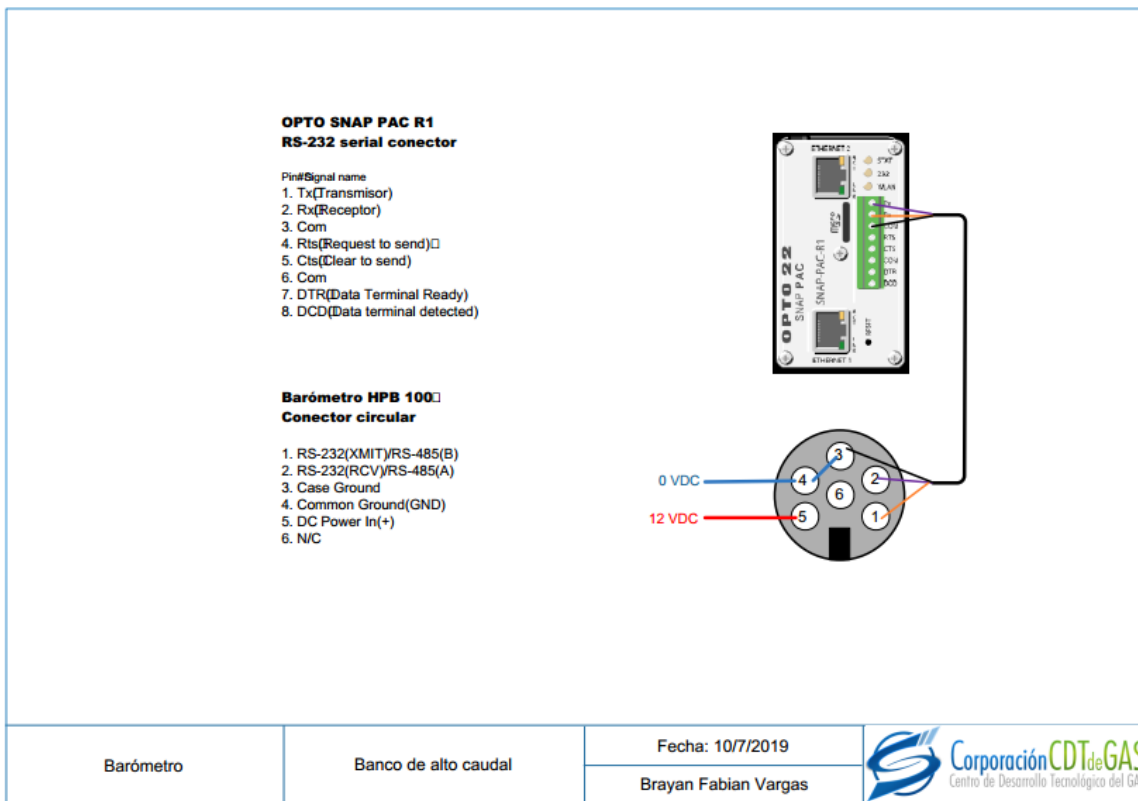
### Diagrama de tubería e instrumentación (P&ID) del BAC



### Planos de conexión eléctrica del BAC

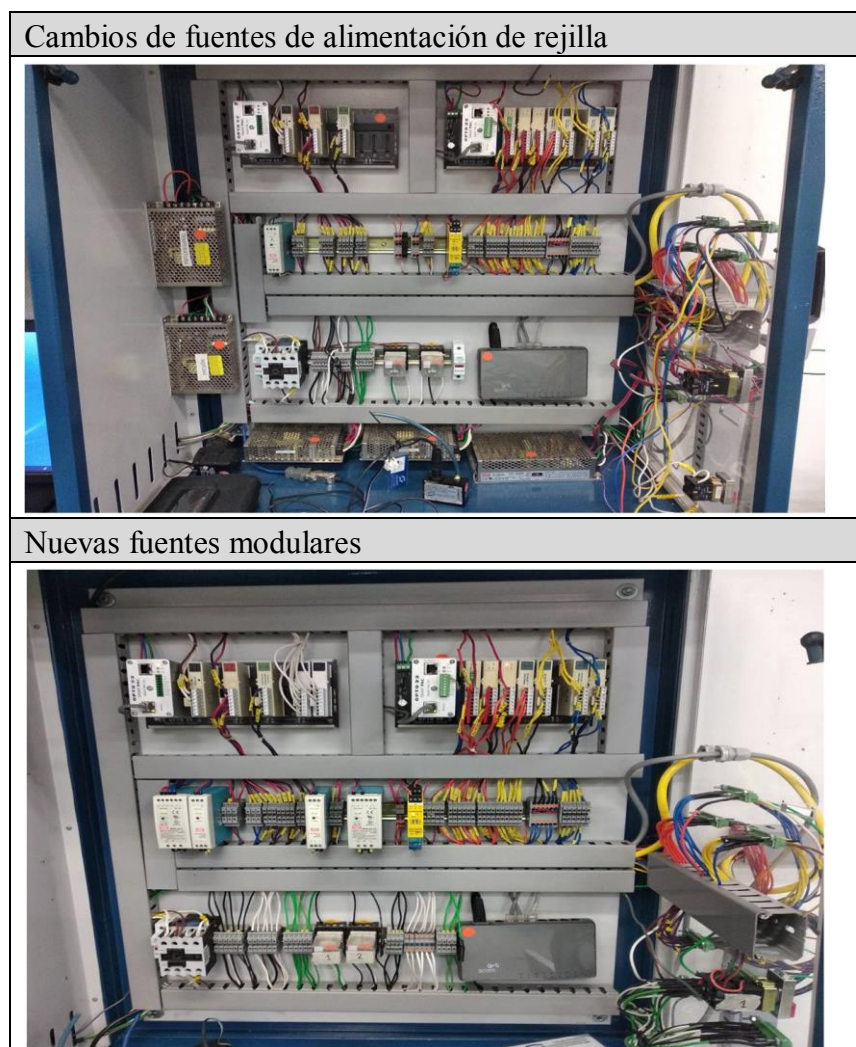






## Apéndice B. Cambios físicos en el Banco de Calibración de alto caudal

### Cambio de fuentes de alimentación:



Tras realizar estos cambios se verificó toda la instrumentación con el fin de validar el correcto desempeño metrológico, todos los resultados fueron satisfactorios. Además, cabe mencionar que la instrumentación no es afectada por la alimentación, la razón se basa en que son transmisores de corriente y solo se requiere mantener un diferencial de potencial adecuado para su funcionamiento.

### Instalación de amplificador de señal:

Se independizó el canal de entrada para la amplificación de señal por parte de los medidores patrón MM1 y MM2. Como se aprecia en las siguientes imágenes, previo al desarrollo del proyecto, debía seleccionarse manualmente según el patrón a emplear.

Eliminar switch de selección del patrón



Instalación de nuevo amplificador para independizar la señal de los patrones.



### Instalación de nuevos actuadores electroneumáticos:

Para automatizar completamente el banco fue necesario instalar actuadores a cada tramo, los cuales permiten independizar cada sección cuando se requiera.


Banco de calibración sin válvulas completas



Instalación de nuevos actuadores.



### Apéndice C. Reporte de similitud Turnitin


Brayan Vargas | Entrega Final

Resumen de coincidencias 6 %

Automatización del Proceso de Calibración Para Medidores de Gas de Tipo Diafragma, Rotativo, Turbina Y Ultrasonico

Brayan Fabian Vargas Burgos  
Id. 000275470  
Universidad Pontificia Bolivariana  
Septiembre 23 de 2019

#	Fuente de Internet	Porcentaje
1	repository.upb.edu.co... Fuente de Internet	2 %
2	Entregado a Universidad... Trabajo del estudiante	1 %
3	Entregado a Universidad... Trabajo del estudiante	<1 %
4	Entregado a Politécnic... Trabajo del estudiante	<1 %
5	www.meeting.com Fuente de Internet	<1 %
6	docslide.us Fuente de Internet	<1 %
7	m3slab.com Fuente de Internet	<1 %
8	www.scribd.com Fuente de Internet	<1 %
9	repository.upb.edu.co Fuente de Internet	<1 %
10	docplayer.es Fuente de Internet	<1 %
11	Entregado a Universidad... Trabajo del estudiante	<1 %