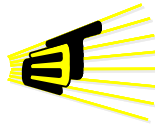


AUTOMATIZACIÓN DE UN BANCO DE CALIBRACIÓN PARA MEDIDORES DE GAS TIPO DIAFRAGMA, ROTATIVO Y TURBINA.

YAMITH DAVID ZABALETA MOLINA.



ESCUELA DE INGENIERÍAS
ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA
Y DE TELECOMUNICACIONES



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2012

**AUTOMATIZACIÓN DE UN BANCO DE CALIBRACIÓN PARA MEDIDORES DE
GAS TIPO DIAFRAGMA, ROTATIVO Y TURBINA.**

YAMITH DAVID ZABALETA MOLINA.

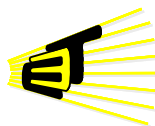
**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO
ELECTRÓNICO.**

**DIRECTOR
ALFREDO RAFAEL ACEVEDO PICÓN.**

**CODIRECTOR
OSCAR YAZIT SALAH GARCÍA.**



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA
Y DE TELECOMUNICACIONES**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2012.**

AGRADECIMIENTO.

AGRADEZCO A MI FAMILIA POR EL APOYO Y COMPRENSIÓN QUE SIEMPRE ME HAN BRINDADO.

A OSCAR SALAH Y ALFREDO ACEVEDO POR GUIARME E INSTRUIRME DURANTE TODAS LAS ETAPAS DE ESTE PROCESO.

A LA COPORACIÓN CDT DE GAS POR DARME LA OPORTUNIDAD DE DESARROLLAR ESTE PROYECTO, EN ESPECIAL AL EXCELENTE GRUPO DE PERSONAS QUE TRABAJÓ ARDUAMENTE PARA QUE ESTE LLEGARA A FELIZ TERMINO: CESAR SIERRA, RAUL ANAYA, JOSÉ FUENTES, PAHOLA TERAN, YENNY PEÑA, SANDRA SILVA.

CONTENIDO.

INTRODUCCIÓN.....	17
1. EL BANCO DE CALIBRACIÓN PARA MEDIDORES DE GAS TIPO DIAFRAGMA, ROTATIVO Y TURBINA.	18
1.1 Calibración.....	18
1.2 Proceso de calibración de medidores de gas.	19
1.3 Modelo matemático.....	21
1.4 Medidores de gas tipo diafragma.....	24
1.5 Medidores de gas tipo rotativo.....	25
1.6 Medidores de gas tipo turbina.....	26
1.7 Descripción de banco.	27
2. INSTRUMENTACIÓN DEL BANCO DE CALIBRACIÓN.	33
2.1 El modelo matemático aplicado en la calibración e identificación de variables.....	33
2.2 Selección de los instrumento del banco calibración.	36
2.2.1 Presión absoluta y Temperatura.	39
2.2.2 Presión diferencial.....	48
2.2.3 Amplificador de Pulsos.....	49
2.2.4 Sensor de fibra Óptica.....	50

2.3	Actuadores.....	51
2.3.1	Ventilador Radial de Alta presión (Blower).....	51
2.3.2	Variador de frecuencia.	59
2.3.3	Válvulas solenoides.....	60
3.	AUTOMATIZACIÓN DEL BANCO DE CALIBRACIÓN DE MEDIDORES DE GAS TIPO DIAFRAGMA ROTATIVO Y TURBINA	63
3.1	Plataforma Snap Pac system de Opto 22.	63
3.2	Arquitectura SNAP PAC SYSTEM para el banco de calibración.	65
3.2.1	El controlador.	65
3.2.2	Módulos entrada salida.	67
3.2.3	Tarjeta de Montaje.	74
3.3	Aseguramiento Metrológico.	76
3.4	Procedimiento de calibración.....	77
4.	DISEÑO DEL CONTROLADOR.	85
4.1	Identificación del sistema.....	85
4.2	Enfoque para el diseño del controlador.	87
4.3	Ganancia programada.	90
4.4	Identificación de escenarios.....	91
4.5	Bucle de control de caudal.....	95

5.	PRUEBAS DE OPERACIÓN.....	98
5.1	Pruebas Estrategia de Aseguramiento Metrológico.....	98
5.2	Pruebas Estrategia de Calibración de Medidores.....	102
5.2.1	Resultados medidor de gas tipo turbina.....	103
5.2.2	Resultados medidor de gas tipo rotativo.....	106
5.3	Características Definitivas del Banco de Calibración.....	109
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	111
7.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	112
Anexo A.	Documentación del sistema automatizado.....	114

LISTADO DE FIGURAS.

Figura 1. Sistema de medición.....	20
Figura 2. Resultado de Calibración.....	21
Figura 3. Medidor tipo diafragma.	25
Figura 4. Principio de operación del medidor rotativo.	25
Figura 5. Medidor tipo rotativo.....	26
Figura 6. Componentes de un medidor tipo turbina.	26
Figura 7. Medidor tipo turbina.	27
Figura 8. Diagrama de flujo del proceso, conexión vertical.....	29
Figura 9. Diagrama de flujo del proceso, conexión horizontal.....	30
Figura 10. Resultados Estimación de Incertidumbre con PTX610-50PSIA.....	43
Figura 11. Resultados Estimación de Incertidumbre con DIGIQUARTZ 1650-001.	43
Figura 12. Resultados Estimación de Incertidumbre con HPB100.....	44
Figura 13. Resultados Estimación de Incertidumbre con Dwyer TTW.	46
Figura 14. Resultados Estimación de Incertidumbre con MIST 22.....	47
Figura 15. Blower.....	52
Figura 16. Punto de operación de un sistema.....	53
Figura 17. Sistema de medición y turbina G-400.	54

Figura 18. Curva del sistema MUT.....	56
Figura 19. Arquitectura SNAP PAC System™ del banco de calibración.....	64
Figura 20. Interfaz Aseguramineto metrológico.....	76
Figura 21. Datos del servicio.....	79
Figura 22. Datos de calibración.....	81
Figura 23. Verificacion de instrumentos.	81
Figura 24. Prueba de fugas.....	82
Figura 25. Calibración de medidores	84
Figura 26. Diagrama de flujo del proceso de calibración.	83
Figura 27. Planta.....	85
Figura 28. Planta a controlar.....	86
Figura 29. Lazo de Control.....	87
Figura 30. Estructutra de sistema con control adaptativo.	89
Figura 31. Modelo matemático de un sistema.	90
Figura 32. Estructura de un sistema con ganacia programada.....	91
Figura 33. PID viewer.....	94
Figura 34. Diagrama de flujo del control de caudal	96
Figura 35. Ajuste de caudal.....	97
Figura 36. Ventana de calibración transmisores de temperatura.....	99

Figura 37. Montaje utilizado para la calibracion de las RTDs.	99
Figura 38. Ventana de calibración bárometros.....	100
Figura 39. Montaje usado para calibración de barómetros.	101
Figura 40. Diagrama de Calibración medidor tipo turbina.	105
Figura 41. Diagrama de calibración medidor tipo rotativo.	108
Figura 42. Banco de calibración, GMP650.....	110

LISTADO DE TABLAS.

Tabla 1. Características de los medidores patrones.....	28
Tabla 2. Caudales de calibración medidores rotativos y turbinas.....	31
Tabla 3. Caudales de calibración medidores de diafragma.....	32
Tabla 4. Posibles señales de salida del MUT.....	35
Tabla 5. Listado de variables a medir.....	36
Tabla 6. Listado de instrumentos.....	38
Tabla 7. Fuentes de Incertidumbre.....	41
Tabla 8. Comparación de Barómetros.....	42
Tabla 9. Comparación de transmisores de temperatura.....	45
Tabla 10. Comparación de Transmisores de presión diferencial.....	48
Tabla 11. Comparación amplificadores de pulsos.....	49
Tabla 12. Comparación sensores ópticos	51
Tabla 13. Caracterización sistema de medición y turbina G-400.....	55
Tabla 14. Estimación de caída de presión del sistema a 650 m ³ /h.....	57
Tabla 15. Opciones de blowers.....	58
Tabla 16. Características variador de frecuencia	60
Tabla 17. Especificaciones válvula solenoide AZ Pneumatic.....	61

Tabla 18. Especificaciones válvula solenoide BI-TORQ.....	62
Tabla 19. Especificaciones válvula SMC.....	62
Tabla 20. Especificaciones técnicas controlador R1-W.....	66
Tabla 21. Inventario de instrumentos, actuadores y sus respectivas señales.	67
Tabla 22. Lista de módulos y cantidades.	68
Tabla 23. Especificaciones del módulo SNAP PAC AIMA 8.....	69
Tabla 24. Especificaciones del módulo SNAP PAC AOA 3.....	70
Tabla 25. Especificaciones del módulo SNAP PAC IDC5-FAST.....	71
Tabla 26. Especificaciones del módulo SNAP PAC OAC5.....	72
Tabla 27. Especificaciones del módulo SNAP PAC ODC5-I.	73
Tabla 28. Especificaciones del módulo SNAP PAC SCM 232.	74
Tabla 29. Asignació de instrumentación o Actuadores para cada módulo.	75
Tabla 30. Datos del servicio.	78
Tabla 31. Datos del medidor.....	78
Tabla 32. Especificaciones del medidor.	79
Tabla 33. Identificación de escenarios.	92
Tabla 34. Constantes del controlador.....	95
Tabla 35. Criterios de evaluación.	103
Tabla 36. Características del medidor de gas tipo turbina.....	103

Tabla 37. Resultados de calibración Banco de Alto Caudal, medidor tipo turbina.	104
Tabla 38. Resultados de calibración 1 GMP650, medidor tipo turbina.	104
Tabla 39. Resultados de calibración 2 GMP650, medidor tipo turbina.	104
Tabla 40. Resultados de calibración 3 GMP650, medidor tipo turbina.	105
Tabla 41. Características del medidor de gas tipo rotativo.	106
Tabla 42. Resultados de calibración banco de alto caudal, medidor tipo rotativo.	106
Tabla 43. Resultados de calibración 1 GMP650, medidor tipo rotativo.	107
Tabla 44. Resultados de calibración 2 GMP650, medidor tipo rotativo.	107
Tabla 45. Características definitivas del Banco de Calibración.	109

RESUMEN.

TÍTULO: AUTOMATIZACIÓN DE UN BANCO DE CALIBRACIÓN PARA MEDIDORES DE GAS TIPO DIAFRAGMA, ROTATIVO Y TURBINA.¹

Autor: Yamith David Zabaleta Molina.²

Palabras claves: Calibración, instrumentación, automatización.

En el presente trabajo se desarrolló e implementó la automatización de un banco de calibración de medidores para gas tipo diafragma, rotativo y turbina. Para llevar a buen término el proyecto se identificaron las variables a medir de acuerdo al modelo matemático que rige este proceso de calibración. Una vez identificadas estas variables se realizó la selección de la instrumentación, teniendo como criterio de selección el aporte de cada instrumento a la incertidumbre total del banco de calibración. Simultáneamente se seleccionaron los actuadores necesarios para la operación automatizada del banco.

La automatización se desarrolló utilizando controladores SNAP PAC de OPTO22™. Para esto se seleccionó el controlador, la tarjeta de montaje o RACK y los módulos de entrada-salida adecuados para el proceso, teniendo en cuenta las señales que entregan cada uno de los instrumentos y las que requiere los actuadores para su operación. Se desarrollaron las estrategias de control e interfaces de usuario (HMI) necesarias para el aseguramiento metrológico y la operación del banco de calibración. Adicionalmente se realizó la documentación de los instrumentos y actuadores del banco utilizando la norma ISA 5.1 e ISA 20. Como resultado final de este proyecto se cuenta con un banco automatizado para calibración medidores de gas tipo diafragma, rotativo y turbina.

¹ Proyecto de Grado

² Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Ingeniería Eléctricas, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Alfredo Rafael Acevedo Picón. Codirector: Oscar Yazit Salah García.

ABSTRACT.

TITLE: AUTOMATION OF FACILITY FOR CALIBRATION OF DIAPHRAGM, ROTARY AND TURBINE GAS METER³

Author: Yamith David Zabaleta Molina.⁴

Key words: Calibration, Instrumentation, Automation.

In this work is presented the development and implementation of the automation of a calibration bench for diaphragm, rotary and turbine gas meter type. To the successfully implementation of this project were identified all variables to be measured according to the mathematical model that governs the process of calibration. Once these variables were identified the selection of the instrumentation was made, having as selection criteria the contributions of each instrument to the total uncertainty the calibration bench has. Simultaneously, were selected the actuators needed for automated operation of the facility.

The automation was developed using SNAP PAC controller from OPTO22™. To do so, the controller, mounting cards or RACK and the input - output modules suitable for the process were selected; according to the signal each instrument in the calibration bench use and the signal each actuator needs to operate. The control strategies and user interfaces (HMI) required for metrological assurance and operation of the calibration facility was developed. Additionally the documentation of the instruments and actuators of the facility was performed using the standards ISA 5.1 and ISA 20. As a final result of this project is an automated facility to calibrate diaphragm, rotary and turbine gas meter type.

³ Degree Work

⁴ Physics-Mechanics Engineering Faculty. School of Electrical, Electronic and Telecommunications Engineering.
Director: Alfredo Rafael Acevedo Picón. Co-director: Oscar Yazit Salah García.

INTRODUCCIÓN.

La corporación CDT de GAS, como parte de su misión, genera desarrollos tecnológicos en materia de metrología de fluidos. Estos desarrollos están dirigidos a apoyar a las empresas del sector gas en su propósito de asegurar sus mediciones, sustentar transparencia en la entrega del mismo y cumplir con la reglamentación vigente. Siendo lo anterior suficiente motivación, se desarrolla un banco de calibración para medidores de gas tipo diafragma, rotativo y turbina.

El problema a resolver en este proyecto de grado consiste en dotar al banco de calibración de una estrategia de automatización y adquisición de datos que permitan mantener la incertidumbre asociada al proceso de calibración dentro de un rango aceptable, debe requerir poca intervención del usuario. Además se hace necesario desarrollar una interfaz hombre -máquina desde la cual se pueda manejar el banco de calibración, hacer seguimientos del proceso y observar el valor de las distintas variables involucradas. Las actividades llevadas a cabo y los resultados obtenidos en este proyecto de grado son plasmados en este documento.

Para dar solución a este problema se inicia con la recopilación de información, con la cual se definen los requerimientos de automatización del banco de calibración. A partir de estos se selecciona la instrumentación y actuadores necesarios para el proceso de calibración. Una vez definidos los instrumentos y actuadores se selecciona la plataforma de automatización y se procede a diseñar e implementar las estrategias de automatización y adquisición de datos, y simultáneamente se hace el desarrollo de la HMI.

Por último se encuentran las conclusiones y recomendaciones. La documentación elaborada para describir el banco de calibración, utilizando como referencias las normas ISA, es un resultado de este trabajo y se presenta en el ANEXO A.

1. EL BANCO DE CALIBRACIÓN PARA MEDIDORES DE GAS TIPO DIAFRAGMA, ROTATIVO Y TURBINA.

En este primer capítulo se hace una descripción de la estructura y del proceso de calibración. Se inicia con la definición de calibración y otros conceptos importantes de acuerdo al Vocabulario Internacional de Metrología VIM. Se explica el proceso de calibración usado y se muestra en detalle el modelo matemático en el cual se basan las calibraciones realizadas en este banco. Se da un resumen acerca del funcionamiento de las diferentes tecnologías de medidores de gas que pueden ser calibrados con el banco, como lo son medidores de gas tipo diafragma, tipo rotativo y tipo turbina. Por último se describe cada una de las etapas que componen el banco y los aspectos más destacados de su funcionamiento.

1.1 Calibración.

El banco de calibración se construye y automatiza para realizar con él un proceso de calibración de medidores de gas. Se debe aclarar que calibración se define como: “operación que bajo condiciones especificadas establece, en una primera etapa, una relación entre los valores y sus incertidumbres de medición asociadas obtenidas a partir de los patrones de medición, y las correspondientes indicaciones con sus incertidumbres asociadas y, en una segunda etapa, utiliza esta información para establecer una relación que permita obtener un resultado de medición a partir de una indicación” [1]. En particular el proceso de calibración que se realiza en este banco tiene como objetivo establecer la relación entre las indicaciones de volumen del medidor bajo prueba y del medidor patrón.

Otro concepto importante que se encuentra en la definición de calibración es el de incertidumbre, conociéndose este como: “parámetro no negativo que caracteriza la dispersión de los valores atribuidos a un mensurando, a partir de la información

que se utiliza” [1]. En otras palabras la incertidumbre es una duda razonable que existe en el resultado de una medición.

1.2 Proceso de calibración de medidores de gas.

En este proceso de calibración se usa el método de comparación directa entre el volumen de gas totalizado por un medidor bajo prueba (que de acuerdo a especificaciones del banco puede ser de tipo diafragma, tipo rotativo o tipo turbina) y el volumen de gas totalizado por un medidor patrón (en este caso de tipo rotativo) a condiciones termodinámicas (presión y temperatura) del medidor bajo prueba.

Para esto se requiere de un montaje con los siguientes elementos:

- Un sistema de tuberías en el que en una primera sección se encuentre el o los medidores patrones de referencia o MM⁵ y una segunda sección en la que se encuentra el medidor bajo prueba o MUT⁶, todo esto en una configuración en serie como se observa en la **Figura 1**.
- Una fuente que genere el fluido de calibración (aire, gas natural o gases puros).
- Un sistema de control y adquisición de datos que permita mantener de forma estable las condiciones de caudal, presión y temperatura del fluido de calibración durante el tiempo de una prueba.

⁵ MM por sus siglas en inglés “Master Meter”.

⁶MUT por sus siglas en inglés “Meter Under Test”.

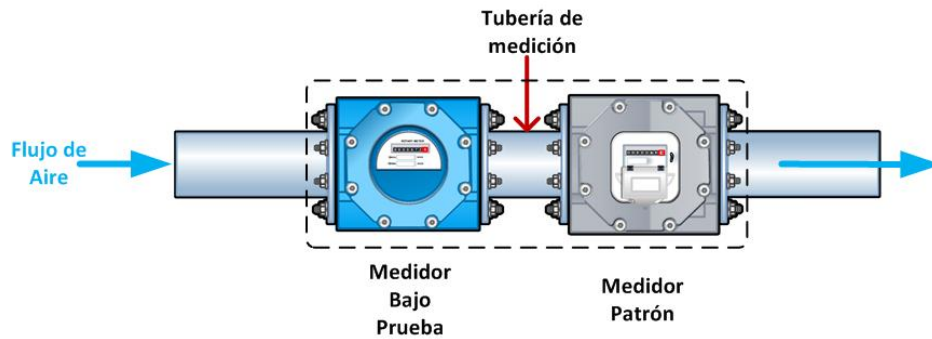


Figura 1. Sistema de medición.
Fuente: CDT de GAS.

La calibración de medidores usando un sistema como el descrito anteriormente se basa en el principio de conservación de la masa aplicado al volumen circunscrito por: 1) el patrón de referencia, 2) tuberías y accesorios asociados a la facilidad entre el patrón y el medidor bajo prueba y 3) el medidor bajo prueba. Para que el modelo funcione de forma confiable el sistema debe ser hermético entre el medidor bajo prueba y el patrón. Además se deben tener condiciones estables de humedad, temperatura y presión, a fin de evitar efectos derivados de la variación de la densidad con respecto al tiempo.

Finalmente como resultado de una calibración se obtiene el error de medición del MUT, el cual se determina en diferentes puntos o caudales dentro del intervalo de medición de este. En la **Figura 2** muestra el resultado de una calibración.

No	Caudal	Volumen	Error	Desv. Est.	U	k	DP
	m ³ /h	m ³	%	%	%	-	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 (Qmax ≥ *Qt)						0,78	
Máximo Error (Qmin ≤ *Qt)						-1000,00	
Máximo Error (Qmax ≥ *Qt)						0,86	
*Qt ≤ 0,2 · Qmax							

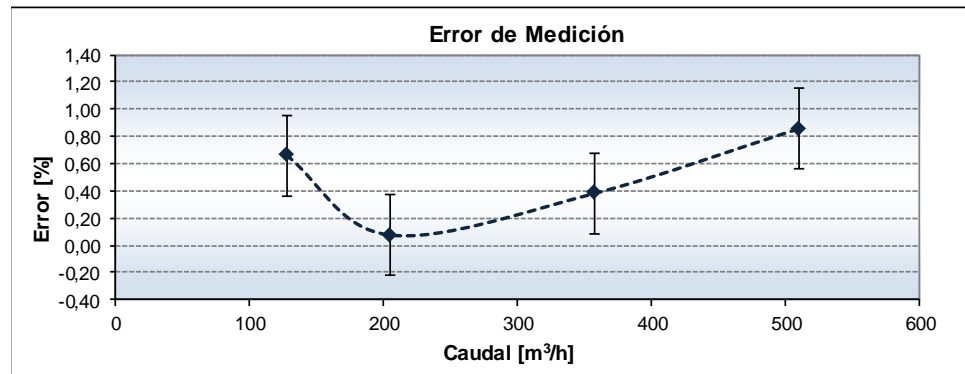


Figura 2. Resultado de Calibración.
Fuente: CDT de GAS.

1.3 Modelo matemático.

El resultado o relación obtenida del proceso de calibración es el error de medición del MUT y el modelo matemático es determinado siguiendo los lineamientos del reglamento de pruebas PTB tomo 4 [2]. Ésta expresión calcula el error llevando las mediciones de volumen del medidor patrón al estado termodinámico del medidor bajo prueba y tiene en cuenta varias consideraciones metrológicas. Para una mayor claridad se presenta una breve explicación del desarrollo del modelo matemático.

A fin de obtener resultados adecuados de una calibración, no basta con realizar una comparación de las indicaciones de los medidores bajo prueba y patrón,

además se deben tener en cuenta los errores asociados a las medidas de volumen tanto del patrón como del medidor bajo prueba [2].

El error del medidor patrón está definido por la siguiente ecuación:

$$E_p [\%] = \frac{V_p - V'}{V'} \times 100\%$$

Ecuación 1. Error del Medidor patrón.

Dónde:

- V_p [m³] el volumen indicado por el patrón
- V' [m³] el volumen real que ha pasado por el patrón.

De la Ecuación 1 se tiene que el volumen real que ha pasado por el patrón es:

$$V' = \frac{V_p}{1 + \frac{E_p [\%]}{100}}$$

Ecuación 2. Volumen totalizado por el patrón

Por otra parte el error del medidor bajo prueba está definido por:

$$E_m [\%] = \frac{V_m - V}{V} \times 100\%$$

Ecuación 3. Error del medidor bajo prueba

Siendo:

- V_m [m³] el volumen indicado por el medidor bajo prueba
- V [m³] el volumen real que ha circulado por el medidor bajo prueba.

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

$$V = V' \frac{P_p T_m}{P_m T_p}$$

Ecuación 4. Volúmen totalizado por el MM a condiciones del MUT.

Donde P_m [mbar] y T_m [°K], corresponde a la presión y temperatura del medidor bajo prueba. Las variables P_p [mbar] y T_p [°K] corresponden a la presión y temperatura del medidor patrón.

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

$$E_m [\%] = \left[\left(\frac{V_m}{V_p} \cdot \left(\frac{P_m \cdot T_p}{P_p \cdot T_m} \right) \cdot \left(1 + \frac{\%ep}{100} \right) \right) - 1 \right] \times 100$$

Ecuación 5. Error de medición del MUT

Donde E_m [%], V_m [m³], P_m [mbar] y T_m [°K], corresponden al porcentaje de error, volumen, presión y temperatura, del medidor bajo prueba. Las variables E [%]_p, V_p [m³], P_p [mbar] y T_p [K], corresponden a al porcentaje de error, volumen, presión y temperatura del patrón respectivamente.

La **Ecuación 5** es fundamental, ya que define el error relativo del medidor y muestra las variables que deben ser medidas durante el proceso de calibración.

1.4 Medidores de gas tipo diafragma.

Los medidores tipo diafragma se encuentran catalogados como medidores de desplazamiento positivo, su funcionamiento se basa en llenar de gas una serie de cámaras de volumen conocido y desplazarlas desde la entrada del medidor hasta su salida. Al totalizar el número de paquetes entregados a la salida se obtiene el volumen que ha circulado a través de este.

Dichos medidores están conformados por tres partes principales, las válvulas, los diafragmas y los mecanismos de conexión. Los diafragmas dividen los compartimientos de medición en cuatro cámaras, las cuales se llenan y vacían de gas en forma alternada gracias al movimiento sincronizado del mecanismo de conexión y un sistema de válvulas corredizas.

La lectura mecánica es obtenida por conexión de los diafragmas a un conjunto de engranajes adaptados, que relacionan cada ciclo de descarga del diafragma con una cantidad de gas conocida. La indicación se hace por medio de un odómetro que señala con cada una de sus vueltas el volumen de gas que ha pasado a través del medidor [3]. En la **Figura 3** se presenta un medidor tipo diafragma.

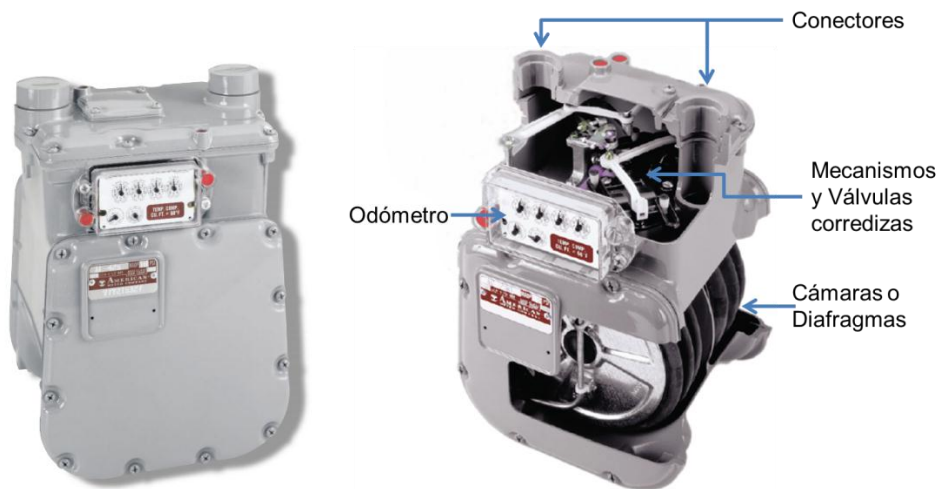


Figura 3. Medidor tipo diafragma.
Fuente: www.elster-americanmeter.com

1.5 Medidores de gas tipo rotativo

Este tipo de medidor posee dos rotores en forma de ocho (también llamados lóbulos) que giran de manera sincronizada, por cada giro completo de los rotores se transporta un volumen definido de gas entre la entrada y la salida del medidor. La tolerancia entre los rotores y las paredes internas del medidor son mínimas con el fin de evitar fugas [4]. En la **Figura 4** se muestra el principio de funcionamiento de los medidores rotativos.

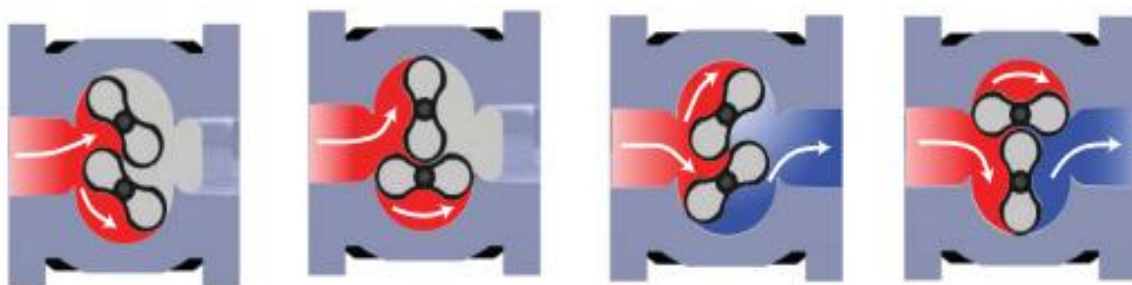


Figura 4. Principio de operación del medidor rotativo.
Fuente: Instromet

Los rotores se encuentran acoplados, por medio de engranajes, a un odómetro en donde se registra el volumen de gas que ha pasado a través del medidor. En algunos medidores, los ejes del rotor se encuentran equipados con sensores de proximidad que suministran señales eléctricas. En la **Figura 5** se muestra un medidor de tipo rotativo.



Figura 5. Medidor tipo rotativo.
Fuente: www.itron.com

1.6 Medidores de gas tipo turbina.

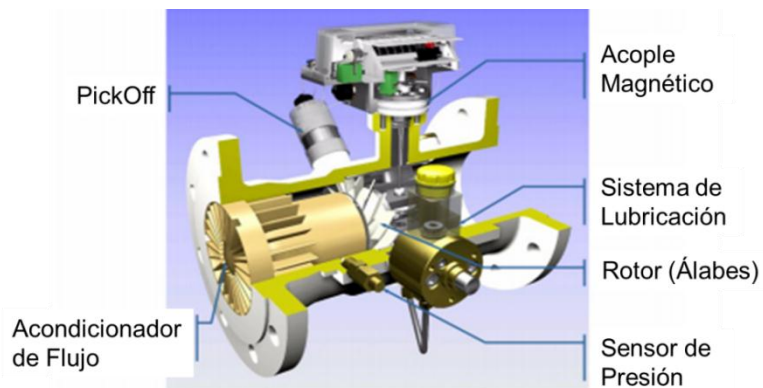


Figura 6. Componentes de un medidor tipo turbina.
Fuente: CDT de GAS.

La **Figura 6** muestra los componentes de un medidor tipo turbina. El gas entra a esta por un rectificador de flujo de diseño especial que provee un patrón de velocidades uniformemente distribuido, el cual choca con el rotor y lo hace girar [5]. En estos medidores la velocidad de rotación de los alabes es proporcional al caudal que está atravesando el cuerpo del medidor [6]. Las rotaciones del eje de la turbina se transfieren por un tren de engranajes a un odómetro que indica el volumen de fluido que pasa por el medidor, también es usual contar con sensores de proximidad que suministran salidas eléctricas.

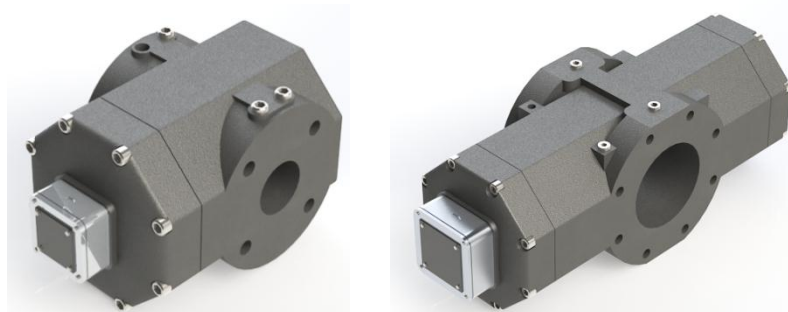


Figura 7. Medidor tipo turbina.
Fuente: www.itron.com

1.7 Descripción de banco.

El banco de calibración de medidores para gas tipo diafragma, rotativo y turbina es una estructura metrológica que posee un intervalo de medición que se extiende desde los 2 hasta los 650 m³/h, para ello cuenta con dos medidores tipo rotativos

usados como patrones, un medidor G40 de la marca Dresser que opera desde los 2 hasta 65 m³/h, y un medidor G400, de la misma marca que es usado para los caudales a partir de los 65 hasta los 650 m³/h. Los medidores patrones posee las siguientes características (ver **Tabla 1**):



Medidor	Patrón 1 (MM1)	Patrón 2 (MM2)
Fabricante	Dresser	Dresser
Modelo	G – 40	G - 400 twin
Qmin	0,65 m ³ /h	4 m ³ /h
Max	65 m ³ /h	650 m ³ /h
Kfactor	14509,08 Pulsos/m ³	2024,03 Pulsos/m ³
Salida de Pulsos	NAMUR ⁷	NAMUR
Diámetro de Tuberías	2 Pulgadas	4 pulgadas
Peso	10 Kg	45 Kg

Tabla 1. Características de los medidores patrones.
Fuente: CDT de GAS.

⁷ NAMUR, estándar internacional que aplica para sensores de proximidad, estos se conectan amplificadores de conmutación que debido a su bajo consumo de potencia pueden ser usados en aplicaciones intrínsecamente seguras.

El banco está diseñado para calibrar un solo medidor por rutina de calibración, pero posee dos vías para hacer la conexión de los medidores, una vertical usada para los medidores tipo diafragma, y una conexión horizontal para los medidores tipo rotativo, turbina y algunos medidores tipo diafragma que poseen brida. El funcionamiento del banco se describe mediante el diagrama de flujo de proceso que se muestra en la **Figura 8** y **Figura 9**.

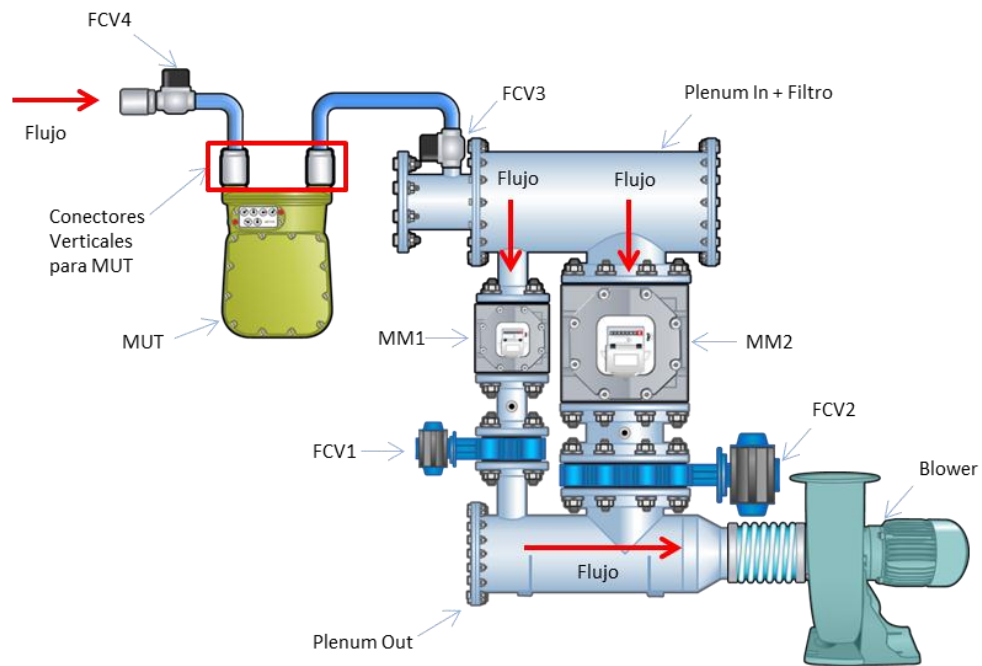


Figura 8. Diagrama de flujo del proceso, conexión vertical.
Fuente: CDT de GAS.

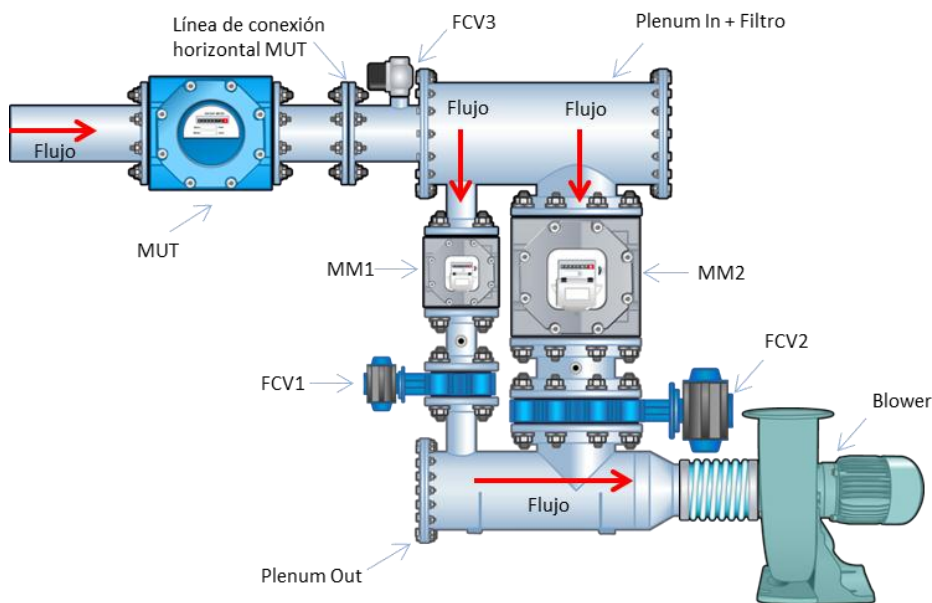


Figura 9. Diagrama de flujo del proceso, conexión horizontal.
Fuente: CDT de GAS.

El banco de calibración cuenta con 2 plenums (o cámaras), uno a la entrada y otro a la salida de los medidores patrones, estos se usan con el fin de amortiguar las pulsaciones de caudal inherentes al funcionamiento de los medidores de gas tipo diafragmas y rotativos. Además el plenum de entrada posee en su interior un filtro para eliminar cualquier suciedad que pudiera entrar a los patrones de medición afectando sus lóbulos, llegando a cambiar las características metrológicas de estos.

Este banco usa aire a condiciones atmosféricas como fluido de calibración. Para generar succión y hacer circular aire a través de los medidores el banco posee un sistema de generación de caudal compuesto por un ventilador radial de alta presión (blower) y un sistema de control. El blower está especificado para alcanzar caudales del intervalo de calibración y con capacidad vencer la caída de presión presupuestada para el sistema de medición a condiciones de operación definidas.

El sistema de control cumple la función de ajustar cada uno de los caudales de calibración.

Los caudales que deben ser ejecutados en calibraciones dependen directamente del medidor bajo prueba, esto es, del tipo de medidor, del caudal mínimo y máximo de este. Estos caudales de prueba están especificados en las normas de referencia ANSI B109.1 [7], ANSI B109.2 [8], para medidores de gas tipo diagramas, ANSI B109.3 [9] para los medidores tipo rotativos, y AGA 7 [10] para las turbinas.

Número	Caudal
Q1	Qmin.
Q2	0,25 Qmax.
Q3	0,4 Qmax.
Q4	0,7 Qmax.
Q5	Qmax.

Tabla 2. Caudales de calibracion medidores rotativos y turbinas
Fuente: ANSI B109.3 [9], AGA 7 [10].

Número	Caudal
Q1	Qmin.
Q2	3 Qmin.
Q3	0,1 Qmax.
Q4	0,2 Qmax.

Número	Caudal
Q5	0,4 Qmax.
Q6	0,7 Qmax.
Q7	Qmax.

Tabla 3. Caudales de calibración medidores de diafragma.
Fuente: ANSI B109.1 [7], ANSI B109.2 [8]

Adicionalmente la funcionalidad del banco de calibración exige del cierre del flujo por algunos tramos de este de acuerdo a cada uno de los escenarios de calibración previstos. Para calibrar medidores tipo diafragma de conexión vertical es necesario usar una brida ciega para cerrar la línea de flujo horizontal y se debe habilitar la válvula FCV3, dependiendo del caudal de calibración se acciona una de las válvulas de los patrones, puede ser FCV1 para caudales menores o iguales a $65 \text{ m}^3/\text{h}$ o FCV2 para caudales de calibración mayores a $65 \text{ m}^3/\text{h}$. La válvula FCV4 cumple la función de cerrar la línea de flujo de aire cuando se realiza prueba de fugas para este tipo de medidores. Cuando se realizan calibraciones a medidores de conexión bridada se utiliza la línea de flujo horizontal, en este caso, la válvula FCV3 permanece cerrada.

2. INSTRUMENTACIÓN DEL BANCO DE CALIBRACIÓN.

En este capítulo se describe el proceso que se sigue para la selección de la instrumentación del banco de calibración, para ello se presenta el modelo matemático a fin de identificar cada una de las magnitudes físicas que se deben medir, además se presentan los criterios que fueron tenidos en cuenta a la hora de seleccionar los diferentes instrumentos. Por último se identifican los actuadores necesarios que permitan el funcionamiento del banco de calibración de forma automatizada.

2.1 El modelo matemático aplicado en la calibración e identificación de variables.

En la sección 1.3 se presentó la ecuación 5 que define el error relativo del medidor bajo prueba. Una breve inspección a la ecuación permite hacer un inventario de las variables a medir.

$$E_m [\%] = \left[\left(\frac{V_m}{V_p} \cdot \left(\frac{P_m \cdot T_p}{P_p \cdot T_m} \right) \cdot \left(1 + \frac{\%ep}{100} \right) \right) - 1 \right] \times 100$$

Ecuación 5. Error de medición del MUT

Siendo:

- $V_m [m^3]$ Volumen del medidor bajo prueba.
- $V_p [m^3]$ Volumen del patrón.
- $P_m [mbar]$ Presión del medidor bajo prueba.
- $P_p [mbar]$ Presión del patrón.

- T_m [°C] Temperatura del medidor bajo prueba
- T_p [°C] Temperatura del patrón
- E_m [%] Error del medidor bajo prueba.
- % ep [%] Error del patrón.

De la anterior ecuación se observa que en el banco de calibración se deben medir volumen, presión y temperatura en el medidor bajo prueba y el patrón, además se deben tener en cuenta otras magnitudes físicas que no hacen parte del modelo, pero normas como NTC-ISO/IEC 17025 [11], NTC 2728 [12] y el Reglamento de prueba del PTB tomo 4 [2] recomiendan medir, estas son: Presión atmosférica, temperatura ambiente y presión diferencial en los medidores diafragmas y rotativos.

Para medir el volumen de los patrones de forma automática con el banco de calibración se hace necesario contar con módulos de conversión de señales de alta frecuencia tipo NAMUR a señales de pulsos en voltaje que sean compatibles con las entradas digitales de la plataforma de automatización. Para el caso del MUT se debe tener en cuenta los diferentes tipos de salida que se pueden presentar en medidores tipo diafragma, rotativo y turbina, estas salidas son:

Señal de salida del medidor	Forma de conexión
Activa	Módulo de conversión
Contacto seco	Módulo de conversión
Colector abierto	Directo al módulo de adquisición de pulsos
NAMUR	Módulo de conversión

Señal de salida del medidor	Forma de conexión
Odómetro	Sensor Óptico

Tabla 4. Posibles señales de salida del MUT.
Fuente: CDT de GAS.

Esta lista permite prever que el banco debe contar con dos tipos de dispositivos para la adquisición de pulsos del MUT, un módulo de conversión tipo NAMUR y un sensor óptico. Este último sirve para detectar el paso, ya sea de una aguja o de una cinta reflectante, que poseen los medidores en la cifra menos significativas de sus odómetros. De esta forma cada vez que el sensor detecta el objetivo se determina que por el medidor ha pasado un volumen conocido de gas. Adicionalmente este sensor posee un amplificador que se encarga de convertir el paso del objetivo reflectante en señales digitales tipo pulso.

De lo expuesto anteriormente se obtiene un primer listado de las variables a medir:

Variable	Ubicación
Presión	Presión atmosférica
Presión	entrada Patrón G40
Presión	entrada patrón G400
Presión	Entrada medidor bajo prueba
Presión	Diferencial del medidor bajo prueba

Variable	Ubicación
Temperatura	Ambiente
Temperatura	Salida patrón G40
Temperatura	Salida patrón G400
Temperatura	Salida medidor bajo prueba
Volumen	Patrón G40. Amplificador NAMUR
Volumen	Patrón G400. Amplificador NAMUR
Volumen	Medidor bajo prueba. Amplificador NAMUR
Volumen	Medidor bajo prueba. Sensor óptico

Tabla 5. Listado de variables a medir.
Fuente: CDT de GAS.

2.2 Selección de los instrumento del banco calibración.

Una vez reconocidas las variables a medir en el banco de calibración y teniendo en cuenta el modo de operación de este, se hicieron algunas consideraciones de diseño que posteriormente fueron tenidas en cuenta en la etapa selección de los instrumentos.

En primer lugar, dado que para un punto(o valor de caudal) de calibración solo va a circular aire a través de uno de los dos patrones, se decidió usar un único instrumento para medir presión absoluta en los dos patrones. A fin de mantener el proceso de calibración lo más automatizado posible, la conexión y desconexión

del instrumento de presión entre un patrón y otro se realiza a por medio de una válvula de tres vías dos posiciones.

Teniendo en cuenta que la presión atmosférica es un dato que se usa solo para reportar las condiciones ambientales y no se encuentra presente en el modelo matemático del error, se ha decidido tomar este valor al inicio de cada punto de calibración, para ello se usará el instrumento dedicado a medir presión en el medidor bajo prueba, la conmutación entre la atmosfera y el medidor bajo prueba se realiza, de la misma manera que el caso anterior, a través de una válvula de tres vías dos posiciones.

Otra consideración importante está relacionada con la longitud del instrumento usado para la medición de temperatura en los MUT. El banco de calibración permite conectar medidores con diámetros de tuberías desde 2 hasta 6 pulgadas, por ello se necesitan instrumentos para medir temperatura que sean de diferentes longitudes. Se ha decidido que se usaran dos RTD, una con una longitud de 3 pulgadas para ser usadas con tuberías entre 2 y 3 pulgadas de diámetros, y la otra con una longitud de 5 pulgadas para ser usadas con tuberías entre 4 y 6 pulgadas de diámetro. Además se determinó que la RTD que no se esté usando para medir la temperatura en el medidor bajo prueba será usada para medir la temperatura ambiente.

Luego de estas consideraciones se obtiene el siguiente listado de instrumentos:

Instrumento	Abreviatura	Variable a medir	Ubicación
Barómetro	PT1	Presión a la entrada de los patrones	Panel lateral
	PT2	Presión a la entrada de MUT y presión Atmosférica	Panel lateral

Instrumento	Abreviatura	Variable a medir	Ubicación
Transmisor de presión diferencial	DPT1	Caída de presión en los medidores bajo prueba	Panel latera
Transmisor de temperaturas	TT1	Temperatura en patrón G40	Tubería del patrón G40
	TT2	Temperatura en patrón G400	Tubería del patrón G400
	TT3	Temperatura en MUT o ambiente	tubería MUT o panel frontal
	TT4	Temperatura en MUT o ambiente	tubería MUT o panel frontal
Amplificador de Pulsos	ST1	Pulsos patrón G40	Panel instrumentación
	ST2	Pulsos patrón G400	Panel instrumentación
	ST3	Pulsos MUT	Panel frontal
Sensor óptico	OS1	Pulsos MUT	Panel lateral

Tabla 6. Listado de instrumentos.

Fuente: CDT de GAS.

Para la selección de la instrumentación existen diferentes criterios que se deben tener en cuenta, entre esto se hallan el tipo de señal que entrega el instrumento, la clase de exactitud, la deriva instrumental, que son características importantes en el banco de calibración porque están relacionadas con el desempeño metrológico y la estimación de incertidumbre. Además se encuentra un criterio no menos importante, el costo, ya que siempre se busca obtener un instrumento con el mejor

desempeño metrológico a un menor precio. A continuación se muestra un listado de los posibles instrumentos y la selección definitiva.

2.2.1 Presión absoluta y Temperatura.

Uno de los principales aspectos del proceso de calibración lo constituye la calidad de sus mediciones, la cual es determinada mediante la estimación de la incertidumbre de medida. Para el caso de la calibración de medidores realizados en el banco que se automatiza en este proyecto, el mesurando es el porcentaje de error en la indicación del medidor bajo prueba. La incertidumbre relativa a error proyectada para este banco es $U \leq 0,4 \%$ ($k=2$, intervalo de confianza del 95%) para caudales que van desde $2 \text{ m}^3/\text{h}$ hasta $6,5 \text{ m}^3/\text{h}$ y $U \leq 0,3 \%$ ($k=2$, intervalo de confianza del 95%) para caudales superiores a $6,5 \text{ m}^3/\text{h}$.

Como se mencionó anteriormente en la **Ecuación 5**, el modelo del error depende, además de las mediciones de volumen, de las magnitudes secundarias presión absoluta y temperatura. Esto implica que para garantizar que los resultados provistos por la solución tecnológica desarrollada cumplen con los requisitos asociados a la calidad de la medición, se debe ejecutar previamente un proceso iterativo consistente en estimar la incertidumbre de medición bajo diversos escenarios operativos, considerando equipos de medida de presión absoluta y temperatura de diversas cualidades metrológicas. Dicho proceso es denominado diseño metrológico y su utilidad radica en la posibilidad de evaluar cuál de las alternativas de instrumentos y condiciones operativas consideradas, como opciones de diseño, permite obtener la incertidumbre requerida.

Para este proceso se aplicó la metodología GUM (guía para la estimación de la incertidumbre) [13] que parte del modelo matemático del porcentaje error evaluado en el proceso de calibración mostrado en la **Ecuación 5**. Con base en

los modelos matemáticos y las variables involucradas, se definieron y cuantificaron las fuentes de incertidumbre como se muestra en la **Tabla 7**

Descripción	Fuente de incertidumbre	Simb	Tipo	Distribución	Fórmula
Error en la Indicación del Patrón $U_{\%e}$	Certificado de Calibración	UCer%e	B	Normal	$\frac{U_{Cer\%e}}{k}$
	Deriva Patrón (DMM)	UDerMM	B	Rectangular	$\frac{D_{MM}}{\sqrt{12}}$
Presión medidor Prueba del Bajo U_{Pmut}	Repetibilidad de las lecturas	URPMUT	A	Normal	$\frac{S_{Pmut}}{\sqrt{n}}$
	Clase confirmada a través del certificado de calibración (UPMUT, k)	UCerPMUT	B	Normal	$\frac{U_{CerPmut}}{k}$
	Resolución sensor de presión - medidor (RPMUT)	UResPMUT	B	Rectangular	$\frac{R_{Pmut}}{\sqrt{12}}$
	Deriva del sensor de presión (DPMUT)	UDerPMUT	B	Rectangular	$\frac{D_{Pmut}}{\sqrt{12}}$
Presión Medidor Patrón del U_{Pmm}	Repetibilidad de las lecturas	URPMM	A	Normal	$\frac{S_{Pmm}}{\sqrt{n}}$
	Clase confirmada a través del certificado de calibración (UPMM, k)	UCerPMM	B	Normal	$\frac{U_{CerPmm}}{k}$
	Resolución sensor de presión - medidor (RPMM)	UResPMM	B	Rectangular	$\frac{R_{Pmm}}{\sqrt{12}}$
	Deriva del sensor de presión (DPMM)	UDerPMM	B	Rectangular	$\frac{D_{Pmm}}{\sqrt{12}}$
Temperatura en el patrón U_{Tmm}	Repetibilidad de las lecturas	URTMM	A	Normal	$\frac{S_{Tmm}}{\sqrt{n}}$
	Clase de la Temperatura en el Patrón confirmada a través del Certificado de Calibración (UTMM, k)	UCerTMM	B	Normal	$\frac{U_{CerTmm}}{k}$
	Resolución sensor de temperatura - patrón (RTMM)	UResTMM	B	Rectangular	$\frac{R_{Tmm}}{\sqrt{12}}$
	Deriva del Sensor de Temperatura (DTMM)	UDerTMM	B	Rectangular	$\frac{D_{Tmm}}{\sqrt{12}}$

Descripción	Fuente de incertidumbre	Simb	Tipo	Distribución	Fórmula
Temperatura en el medidor U_{Tmut}	Repetibilidad de las lecturas	URTMUT	A	Normal	$\frac{S_{Tmut}}{\sqrt{n}}$
	Clase de la Temperatura en el patrón confirmada a través del certificado de calibración (UTMUT, k)	UCerTMUT	B	Normal	$\frac{U_{Tmut}}{k}$
	Resolución sensor de temperatura - medidor (RTM)	UResTMUT	B	Rectangular	$\frac{R_{Tmut}}{\sqrt{12}}$
	Deriva del Sensor de Temperatura (DTM)	UDerTMUT	B	Rectangular	$\frac{D_{Tmut}}{\sqrt{12}}$
Error de Calibración U_{Emut}	Repetibilidad en el error de calibración del MUT	UREMUT	A	Normal	$\frac{S_{EMUT}}{\sqrt{n}}$

Tabla 7. Fuentes de Incertidumbre.
Fuente: CDT de GAS.

Para evaluar la incertidumbre se tomaron las fuentes tipo B a partir de las características metrológicas de un grupo de instrumentos disponibles en el mercado, las curvas de error de los patrones (con sus valores de incertidumbre) reportadas por el fabricante y las fuentes de incertidumbre tipo A fueron asumidas en base a la experiencia y los resultados obtenidos en otros bancos de calibración desarrollados en el CDT de GAS.

Luego de estimar la incertidumbre revisando diferentes alternativas de instrumentos de presión y temperatura se llegó a un conjunto de tres instrumentos representativos por cada magnitud con los cuales se pueden lograr incertidumbres cercanas al 0,3% que se plantea como incertidumbre requerida para el proceso.

En primer lugar se evaluaron los instrumentos de Presión y seguido los instrumentos de temperatura. El banco de calibración requiere un instrumento para medir presión absoluta en un intervalo aproximado desde 800 hasta 1100 mbar. De esto instrumentos se tiene las siguientes opciones:




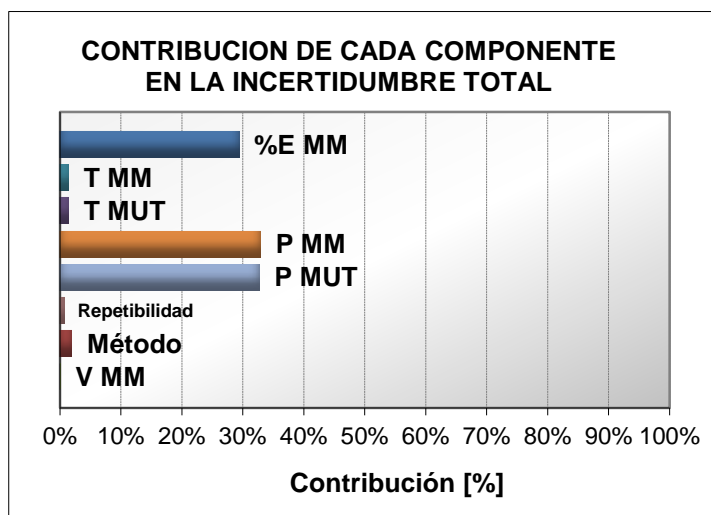
			
Modelo	HPB100	PTX610-30PSIA	DIGIQUARTZ 1650-001
Fabricante	Honeywell	GE Druck	Paroscientific
Alcance	500- 1200 mbar	0 – 2068,4 mbar	0 - 1034 mbar
Clase de Exactitud	0,06% F.S	0,08% F.S	0,01% F.S
Resolución	0,07 mbar	0,01 mbar	$0,01 \cdot 10^{-3}$ mbar
Deriva Instrumental	$\pm 0,25$ mbar/año	$\pm 1,6$ mbar/año	“Estabilidad de largo plazo”
Salida	RS232	4-20 mA	RS232
Precio	\$995 USD	\$882 USD	\$5200 USD

Tabla 8. Comparación de Barómetros.
Fuente: CDT de GAS.

Al evaluar la incertidumbre del proceso con las cualidades metrológicas de los instrumentos de presión de la

Tabla 8, manteniendo fijas las características metrológicas de los instrumentos de temperatura. Con el fin de mostrar de forma resumida el proceso iterativo de diseño se usa el transmisor de temperatura Pyromation R1T185L-384- 45,T-450 y se obtienen los siguientes resultados:

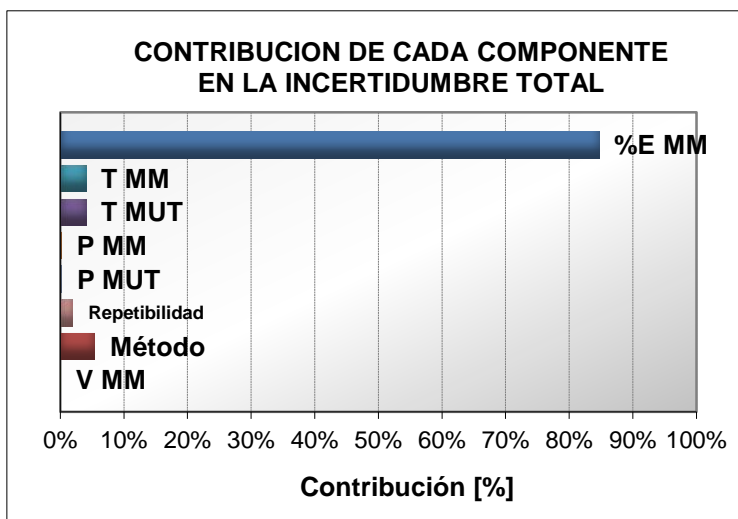
Contribución por Componente	
Parámetro	Contribución
X_i	U_i
--	%
%E MM	29,31%
T MM	1,37%
T MUT	1,38%
P MM	32,85%
P MUT	32,62%
Repetibilidad	0,61%
Método	1,85%
V MM	0,00%
Total	100%



Incertidumbre de Calibración
U%E
0,361%

Figura 10. Resultados Estimación de Incertidumbre con PTX610-30PSIA.
Fuente: CDT de GAS.

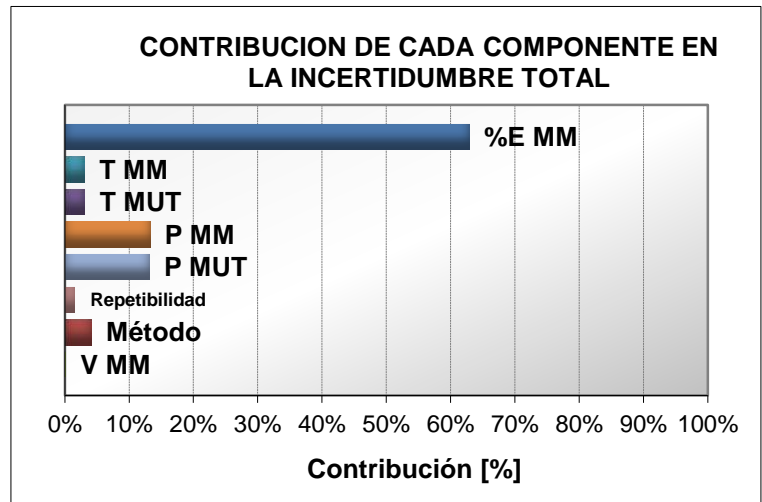
Contribución por Componente	
Parámetro	Contribución
X_i	U_i
--	%
%E MM	84,60%
T MM	3,97%
T MUT	3,98%
P MM	0,16%
P MUT	0,16%
Repetibilidad	1,77%
Método	5,34%
V MM	0,01%
Total	100%



Incertidumbre de Calibración
U%E
0,213%

Figura 11. Resultados Estimación de Incertidumbre con DIGIQUARTZ 1650-001.
Fuente: CDT de GAS.

Contribución por Componente	
Parámetro	Contribución
X_i	U_i
--	%
%E MM	62,74%
T MM	2,94%
T MUT	2,95%
P MM	13,08%
P MUT	12,99%
Repetibilidad	1,31%
Método	3,96%
V MM	0,01%
Total	100%



Incertidumbre de Calibración
U%E
0,247%

Figura 12. Resultados Estimación de Incertidumbre con HPB100
Fuente: CDT de GAS.

De acuerdo al desempeño metrológico la mejor opción es el transmisor DIGIQUARTZ de Paroscientific, los resultados de la estimación de incertidumbre lo evidencian ya que se obtiene una $U\%E = 0,213\%$ sin embargo su costo es elevado. Entre las tres opciones se escogió el barómetro marca Honeywell, debido a que sus costo es mucho menor y se logra obtener una $U\%E = 0,247\%$ que sigue siendo menor al $0,3\%$ requerido. Es importante reconocer que el instrumento GE se descarta porque su uso elevaría la incertidumbre del error a niveles superiores a los requeridos.

Una vez se seleccionó el transmisor de presión se continuó con la magnitud secundaria restante. Los instrumentos usados para medir temperatura en el banco

trabajaran a temperaturas cercanas al ambiente. De estos instrumentos se cuentan con las siguientes opciones:




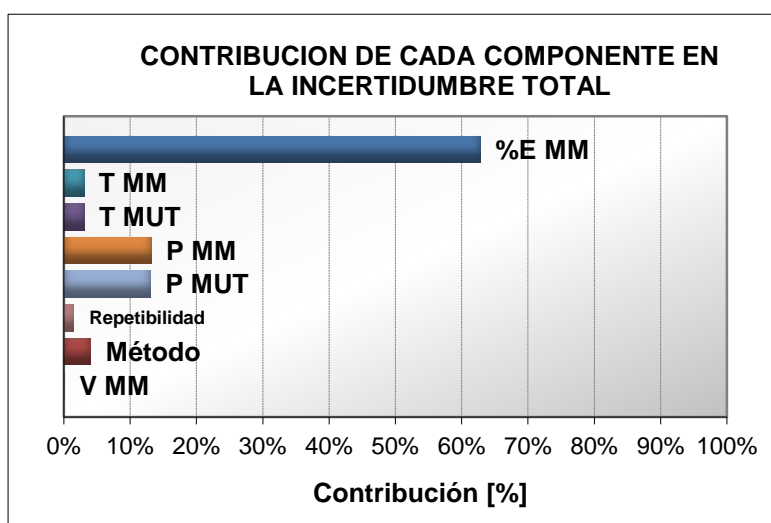
Modelo	 TTW	 MIST 22	 R1T185L-384- 45,T-450
Fabricante	Dwyer	Temperature & Process Instruments	Pyromation
Alcance	-40 a 150 ° C	-50 a 200 ° C	-51 a 160 ° C
Clase de Exactitud	0,3 ° C	0,25 ° C	0,1 ° C
Deriva Instrumental	No reportada	±0,25 ° C / Año	±0,1 ° C / Año
Salida	4-20 mA	4-20 mA	4-20 mA
Tipo de sensor	Pt100	Pt100	Pt100
Precio	\$ 200 USD	\$ 248 USD	\$ 198 USD

Tabla 9. Comparación de transmisores de temperatura.
Fuente: CDT de GAS.

De la misma forma que se hizo el proceso con los instrumentos de presión absoluta se estimó la incertidumbre del error medida variando la características metrológicas de las alternativas de instrumentos de temperatura. En este caso el ejercicio se realizó usando como instrumento de presión HPB100 de Honeywell anteriormente seleccionado.

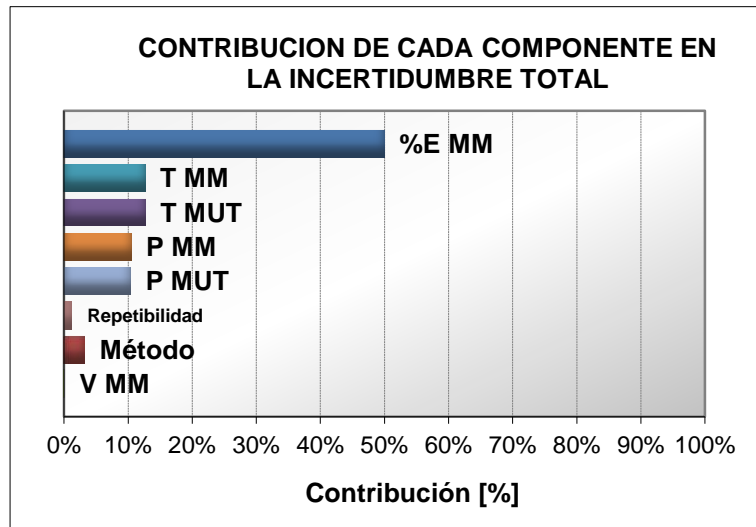
Contribución por Componente	
Parámetro	Contribución
X_i	U_i
--	%
%E MM	45,07%
T MM	16,20%
T MUT	16,21%
P MM	9,40%
P MUT	9,33%
Repetibilidad	0,94%
Método	2,84%
V MM	0,01%
Total	100%



Incertidumbre de Calibración
U%E
0,291%

Figura 13. Resultados Estimación de Incertidumbre con Dwyer TTW.
Fuente: CDT de GAS.

Contribución por Componente	
Parámetro	Contribución
Xi	Ui
--	%
%E MM	49,90%
T MM	12,57%
T MUT	12,59%
P MM	10,41%
P MUT	10,33%
Repetibilidad	1,05%
Método	3,15%
V MM	0,01%
Total	100%



Incertidumbre de Calibración
U%E
0,277%

Figura 14. Resultados Estimación de Incertidumbre con MIST 22.
Fuente: CDT de GAS.

Del proceso de diseño metrológico se concluye que si se usara el instrumento Dwyer los niveles de incertidumbre estarían muy cerca al 0,3% requerido. Con el instrumento MIST22 los niveles de incertidumbre mejorarían. Finalmente se seleccionó el transmisor de temperatura fabricado por Pyromation ya que poseen la mejor clase de exactitud de los tres instrumentos, su deriva instrumental es la más baja y de acuerdo a lo que muestra la estimación de incertidumbre de la **Figura 12** este instrumento en combinación del instrumento HPB100 de presión absoluta dan lugar a incertidumbres cercanas al 0,247%. Este resultado finalmente obtenido representa un valor óptimo de incertidumbre teniendo como criterio el balance entre desempeño metrológico, los costos y el hecho de que la clase de los

instrumentos permite que se pueda proveer trazabilidad con los patrones disponibles en Colombia.

2.2.2 Presión diferencial.

De acuerdo a la información recopilada sobre los medidores de gas tipo diafragma y rotativo que pueden ser calibrados en el banco se encontró que es necesario contar con un instrumento capaz de medir presiones diferenciales de hasta 10 mbar.

			
Modelo	607-7	PX665-5DI	XL5MB242ST5IW
Fabricante	Dwyer	Omega	Ashcroft
Alcance	0 – 12,45 milibar	0 – 12,45 milibar	0 – 12,45 milibar
Clase	0,5% F.S	0,5% F.S	0,5% F.S
Deriva	±0,5% F.S/año	±0,5% F.S/año	±0,5% F.S/año
Salida	4-20 mA	4-20 mA	4-20 mA
Precio	\$435 USD	\$590 USD	\$638,32 USD

Tabla 10. Comparación de Transmisores de presión diferencial.

Fuente: CDT de GAS.

Aunque que los tres transmisores de presión diferencial poseen características similares, se seleccionó el trasmisor de presión diferencial marca Dwyer ya que este tiene un menor costo.

2.2.3 Amplificador de Pulsos.

Para la selección del amplificador de pulsos tipo NAMUR se elaboró la siguiente lista con tres posibles opciones y sus características.




			
Modelo	Isolating switching amplifier MK15-12Ex0- PN/24vdc	Switch Amplifier HiC2841	MACX MCR-EX- SL-NAM-R-SP
Fabricante	Turck	Pepperl & Fuchs	Phoenix Contact
Alimentación	10 – 30 VDC	19 – 30 VDC	19.2 – 30 VDC
Salida	Colector abierto NPN –PNP	Colector abierto NPN	Relé
Frecuencia de entrada	0 – 5 Khz	0 – 5 Khz	0 – 5 Khz
Precio	\$ 180 USD	\$ 200 USD	\$ 192 USD




Tabla 11. Comparación amplificadores de pulsos.

Fuente: CDT de GAS.

Los tres amplificadores poseen características similares, se optó por el amplificador fabricado por Turck ya que el nivel de tensión que requiere para su alimentación se encuentra dentro del rango de valores aceptados por el módulo de adquisición de pulso de la plataforma de automatización.

2.2.4 Sensor de fibra Óptica

El sensor de fibra óptica es un elemento que se encuentra compuesto por un cable de fibra óptica y un sensor remoto o amplificador. El sensor emite, recibe y convierte el haz de luz en una señal eléctrica. La fibra óptica es el elemento mecánico que se encarga de transportar la luz desde el sensor hasta el punto de detección y de regreso al sensor. A continuación se muestran tres opciones:

			
Fabricante	Takex	Banner	Sunx
Modelo	F71R	D10	FX – 301
Alimentación	12 – 24 V DC	10 – 30 V DC	12 – 24 V DC
Salida	NPN Colector abierto	NPN-PNP Colector abierto	NPN Colector abierto

Fibra	FT105BC	D10AFP	FD – T80
Rango de detección	180 mm	15 mm	22 mm
Precio	\$270 USD	\$160 USD	\$ 145 USD

Tabla 12. Comparación sensores ópticos.
Fuente: CDT de GAS.

Se optó el sensor de fibra óptica fabricado por Sunx ya que su rango de detección es adecuado para nuestro propósito y resulta ser la mejor opción económica.

2.3 Actuadores.

Como se menciona en secciones anteriores la operación del banco de calibración depende directamente de dos tipos de actuadores. El conjunto blower variador, como fuente de succión, encargado de generar el caudal y las válvulas solenoides como elementos para habilitar y deshabilitar los patrones y las entradas de presión de los barómetros.

2.3.1 Ventilador Radial de Alta presión (Blower).

El blower es un elemento compuesto de un ventilador radial y un motor de inducción trifásico, cumple la función de generar el flujo de aire a través de todo el banco de calibración, este es alimentado desde un variador de frecuencia por medio del cual se controla la velocidad de rotación del motor y se genera el caudal necesario para efectuar la calibración. En los ventiladores radiales el aire es

aspirado en forma axial y se impulsa radialmente hacia la salida mediante el movimiento de giro del rotor de este.



Figura 15. Blower.
Fuente: www.quickdraft.com

Las pérdidas de presión o resistencias situadas a la entrada del blower, como son: tuberías, mangueras, filtro, medidores patrones y medidor bajo prueba, deben ser vencidas por la succión que el ventilador genera, estas resistencias no poseen un valor fijo, en cambio dependen de forma cuadrática del caudal de operación; esto quiere decir que si a un sistema se le aumenta el caudal de operación al doble, la presión diferencial que el blower debe generar se hace cuatro veces mayor. Al realizar una gráfica de presión diferencial contra caudal para un sistema se obtiene la curva característica del mismo.

Para el caso de los blowers, al aumentar el caudal se reduce la capacidad del ventilador de generar presión. Este comportamiento depende de las características de manufactura y es entregado por los fabricantes en forma de curvas de desempeño de presión contra caudal. Si se quiere determinar el punto

de operación de un blower se debe interceptar la curva de desempeño de este con la curva característica del sistema, tal como se muestra en la **Figura 16**.

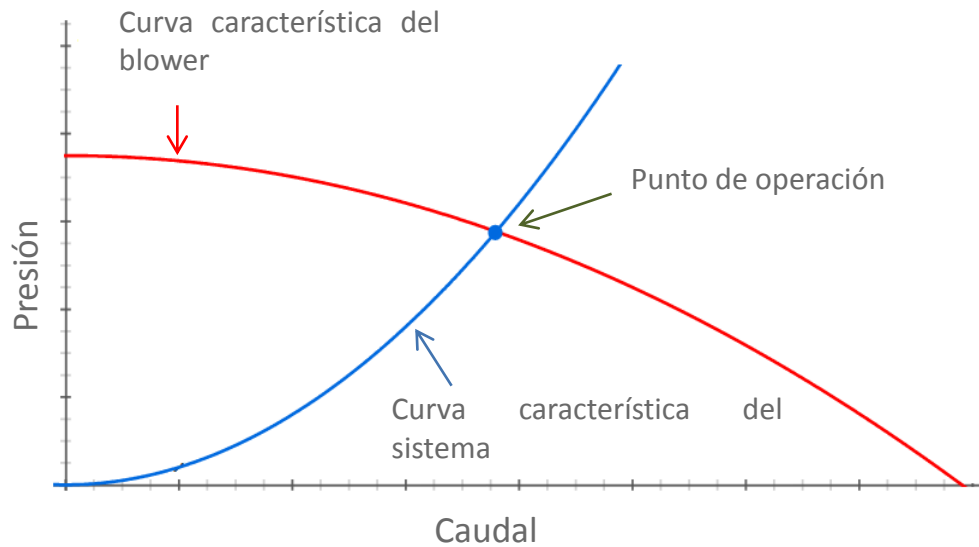


Figura 16. Punto de operación de un sistema.
Fuente: Elektror.

2.3.1.1 Requisitos de selección del blower.

El banco de calibración posee diferentes puntos de operación dependiendo del tipo de medidor bajo calibración, el diámetro de las tuberías utilizadas para la conexión de este con el banco, el patrón usado y el caudal de calibración. Teniendo en cuenta lo anterior, para la selección del blower se debe escoger el punto de operación de mayor exigencia o lo que viene a ser el peor de los casos, mediante el análisis de los posibles casos de operación se determinó este se

consigue cuando se conecta un medidor que llega al caudal máximo de calibración del banco ($650 \text{ m}^3/\text{h}$) y además posee una alta restricción. Dentro de los medidores que pueden ser calibrados en el banco aquel que cumple con estas características es una turbina G-400 de cuatro pulgadas de diámetro, ya que es el medidor que llega a caudal máximo y usa un diámetro de tubería relativamente pequeño para este caudal. La curva del sistema se determinó haciendo el montaje que se muestra en la

Figura 17. El cual consta de una turbina G-400 de cuatro pulgadas, con su sistema de medición, es decir tuberías aguas arriba y aguas abajo, conectadas en serie con un blower.

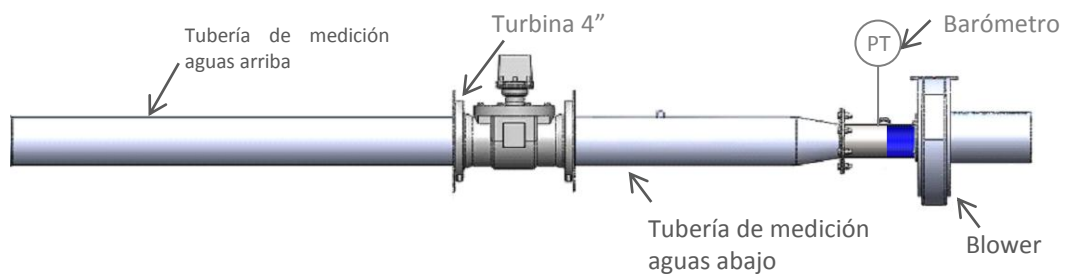


Figura 17. Sistema de medición y turbina G-400.

Fuente: CDT de GAS.

Los datos obtenidos se registraron en la **Tabla 13**:

Frecuencia del Variador	Medición de Diferencial de Presión		Medición de Caudal	
	P in Blower [mbar]	ΔP [mbar]	F pulsos [Hz]	Q [m ³ /h]
0	902,8	0	0	0
3,5	902,8	0	79,15	30,03
10	902,3	0,5	234,7	89,06
15	901,6	1,2	357,4	135,63
20	900,6	2,2	481,03	182,54
25	899,4	3,4	605,1	229,63
30	897,8	5	732,17	277,85
35	896	6,8	859,87	326,31
40	893,8	9	982,43	372,82
45	891,4	11,4	1106	419,71
50	888,8	14	1230,33	466,89
55	886	16,8	1350,33	512,43
60	883	19,8	1463,67	555,44

Tabla 13. Caracterización sistema de medición y turbina G-400.
Fuente: CDT de GAS.

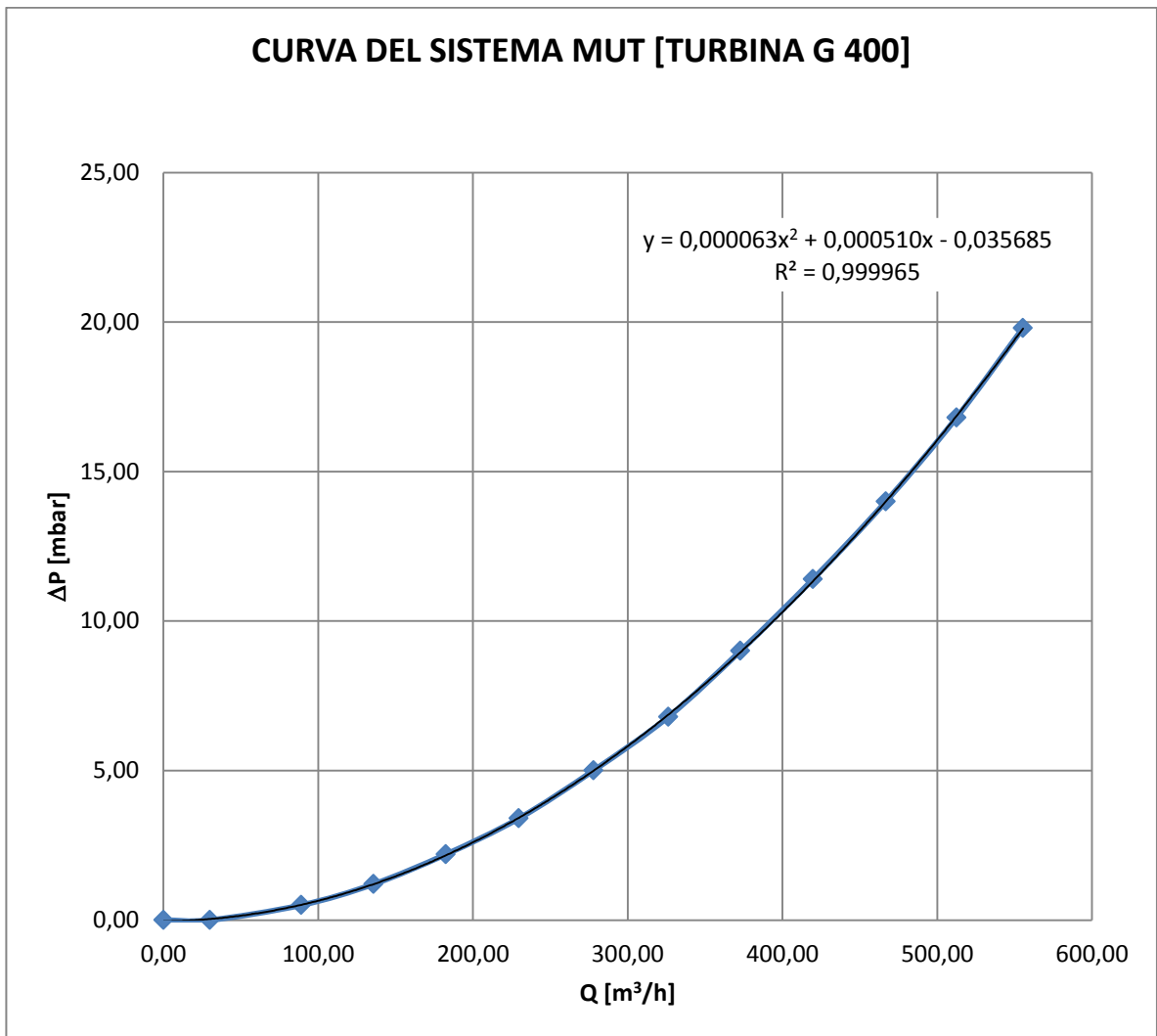


Figura 18. Curva del sistema MUT.
Fuente: CDT de GAS.

En este experimento solo se llegó a un caudal del 550 m³/h, pero usando la ecuación de las tendencias del experimento, se estima que a caudal máximo del banco la turbina de generar una caída de presión de aproximadamente 27 mbar.

Hasta ahora se ha considerado solo la caída que genera el MUT y las tuberías aguas arriba y aguas abajo del medidor bajo prueba, hace falta determinar las

caídas que generan el plenum de entrada, filtro, Patrón 2, plenum de salida, manguera de conexión hacia el blower y silenciador. A continuación se estima la caída de presión que causan los elementos antes mencionados.

Elemento	$\Delta P @ 650 \text{ m}^3/\text{h}$ [mbar]
Instalación (el plenum de entrada, filtro, plenum de salida, manguera.)	13,89
Master Meter 2	1,2
Silenciador.	10
Sistema con MUT Turbina G400 DE 4"	26,9
CAÍDA DE PRESIÓN GLOBAL DEL SISTEMA A 650 m^3/h	51,99
ΔP GLOBAL CON SOBRE ESTIMACIÓN DEL 20%	62,39

Tabla 14. Estimacion de caida de presion del sistema a 650 m^3/h .
Fuente: CDT de GAS.

De lo anterior se concluye que en el punto de operación crítico para el banco se requiere que el blower se capaz de generar una succión, ΔP de 62,34 mbar a una caudal de 650 m^3/h . En la **Tabla 15** se muestra tres blower que cumplen con los requisitos del banco.

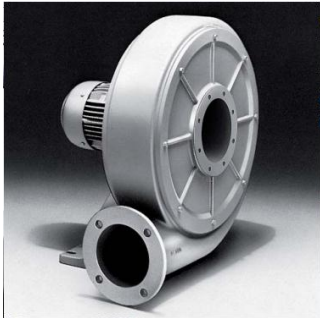

			
Modelo	HRD- 2T FU-95	ATB -900	Desing 53 Pressure Blower s size D2
Fabricante	Elecktror	Atlantic Blower	Chicago Blower
$\Delta P @ 650 \text{ m}^3/\text{h}$	85 mbar	68 mbar	77 mbar
Tamaño del caracol Largo x Alto	44,5 x 50,7 cm	80,0 x 87,8 cm	81,2 x 86,3 cm
Peso	29 Kg	62 Kg	69 Kg
Voltaje	220 V	220 V	220 V
Potencia	2.2 kW	3,7 Kw	220 V
Frecuencia máxima del motor	95 Hz	60 Hz	60 Hz
Otros	Incluye variador de velocidad Omron		
Precio	\$ 1 557,47 USD	\$ 1 200 USD	\$ 2 228 USD


Tabla 15. Opciones de blowers.
Fuente: CDT de GAS.

El blower fabricado por Elecktror resulta ser la mejor opción ya que usa el motor de más bajo consumo de potencia, es el más compacto, está diseñado para trabajar a frecuencias de hasta 95 Hz, además viene de fábrica con el variador de frecuencia.

2.3.2 Variador de frecuencia.

El variador es un sistema para el control de la velocidad rotacional de un motor de corriente alterna por medio del control de la frecuencia de alimentación suministrada al motor. Estos dispositivos entregan voltaje y frecuencia variable conforme a la necesidad del motor y la carga a él conectada. Para tal efecto, toma la alimentación eléctrica de la red, la cual tiene voltaje y frecuencia fija, la transforma en un voltaje continuo y luego lo transforma en voltaje alterno trifásico de magnitud y frecuencia variable por medio de un Inversor.

El variador seleccionado para el banco de calibración es de 2,2 Kw de potencia, posee entrada bifásica de 220 V a 60 Hz y su salida es de 220 V trifásica de frecuencia variable. Como entrada de control posee un lazo de corriente de 4-20 mA, además cuenta con funciones de protección en caso de fallas como son: protección por sobre tensión, protección por sobre corriente, protección de corto circuito.

	
Modelo	3GMX-2037
Fabricante	Omron
Potencia	2,2 kW
Voltaje de entrada	200 - 240 V, 60 Hz.

Voltaje de salida	Max. Voltaje de entrada, 3 fases.
Frecuencia de Salida	0,1 - 1000 Hz
Resolución de Frecuencia.	0,01
Entradas de Control	4-20 mA,0-10VDC, RS 485 Modbus
Funciones de Protección.	Sobre tensión, baja tensión, sobre corriente. Aumento de temperatura

Tabla 16. Características variador de frecuencia
Fuente: CDT de GAS.

2.3.3 Válvulas solenoides

La habilitación de cada patrón así como la línea de calibración para medidores de tipo diafragma se hace por medio de válvulas pilotadas neumáticamente de acuerdo a criterios del diseño mecánico del banco. Este tipo de válvula requiere del paso de una determinada presión para ser actuadas. Esta decisión implica tener un circuito neumático, con válvulas actuadas por solenoides que trabajan a 110 V. Las válvulas pilotadas neumáticamente no se describen en este libro.

Para activar el aire a presión que requieran las válvulas de la línea de calibración de medidores tipo diafragma cada vez que deban ser actuadas se elige usar válvulas AZ Pneumatic como las que se muestran en la **Tabla 17**.

	Fabricante: AZ Pneumatic
	Modelo: 322 ME
	Fluido: Aire
	Rosca: N (NPT)
	Alimentación: 110 V AC , 50/60 Hz
	Consumo de potencia: 10 VA
	Tipo de válvula: Solenoide. Normalmente

Tabla 17. Especificaciones válvula solenoide AZ Pneumatic.
Fuente: CDT de GAS.

Para habilitar los patrones de calibración se utilizan válvulas mariposa pilotadas neumáticamente, el paso de aire a presión que requieren estas válvulas para operar se controla por medio de válvulas solenoide fabricadas por BI-TORQ. La razón por la cual se utilizan válvulas solenoides diferentes a las usadas para la línea de diafragmas es que el fabricante de las válvulas mariposas provee todo el conjunto en una sola unidad.


	Fabricante: BI-TORQ
	Modelo: AL-SOL-4120
	Fluido: Aire
	Rosca: N (NPT)
	Alimentación: 110 V AC , 50/60
	Consumo de potencia: 5,5 VA
	Tipo de válvula: Solenoide.

Tabla 18. Especificaciones válvula solenoide BI-TORQ.
Fuente: CDT de GAS.

La conmutación de las entradas de los barómetros se realiza por medio de válvulas solenoides de 12 VDC. A continuación se muestran las características técnicas de estas válvulas.

	Fabricante: SMC
	Modelo: S070
	Fluido: Aire
	Conexión: Espigos 3 mm. de
	Alimentación: 12 VDC
	Consumo de potencia: 0,35 W
	Tipo de válvula: Solenoide.

Tabla 19. Especificaciones válvula SMC.
Fuente: CDT de GAS.

3. AUTOMATIZACIÓN DEL BANCO DE CALIBRACIÓN PARA MEDIDORES DE GAS TIPO DIAFRAGMA ROTATIVO Y TURBINA

3.1 Plataforma Snap Pac system de Opto 22™.

El objetivo principal de este proyecto de grado consiste en automatizar un banco de calibración para medidores de gas de tipo diafragma, rotativo y turbina. Para ello se requiere de un conjunto de instrumentos y actuadores tratados en el capítulo anterior, junto con una plataforma de control y adquisición de datos. La herramienta utilizada para desarrollar la automatización del banco es SNAP PAC SYSTEM de la empresa Opto 22™, el cual es un sistema integrado de hardware y software para el control industrial, monitorización remota y adquisición de datos. Consiste de 4 elementos básicos. Software, controladores, Cerebros (brains) y módulos de entrada/salida.

El software Pac Project de Opto 22™, se encuentra disponible en dos versiones: La versión paga, Pac Project Suite, y la versión gratis llamada Pac Project Basic. La diferencia fundamental entre Pac Project Suite y Pac Project Basic es que la primera permite hacer control y monitorización de forma redundante, además cuenta con dos aplicaciones de comunicación, Opto OpcServer™ y OptoDataLink™. Para desarrollar este proyecto se utilizó Pac Project Basic versión 9.01 el cual cuenta con los siguientes elementos:

PAC CONTROL BASIC™: es una aplicación intuitiva, basada en diagramas de flujo que además posee un lenguaje de programación similar a C o Pascal llamado OPTO SCRIPT™. PAC CONTROL BASIC™ sirve para desarrollar, depurar, adquirir datos y hacer monitorización remota.

PAC DISPLAY BASIC™: Es la aplicación utilizada para desarrollar la interfaz del operador que se comunica con los controladores SNAP PAC.

PAC MANAGER™: Es una herramienta de configuración y mantenimiento usada para asignar las IP de los diferentes dispositivos. Actualizar el firmware de los controladores y configurar los dispositivos de entrada/salida.

Los controladores SNAP PAC son los encargados de ejecutar las estrategias de control, proveen comunicación, procesamiento de las entradas/salidas analógicas, digitales y suministran datos a la HMI. Los cerebros son procesadores de entradas/salidas estos están diseñados para trabajar en sistemas distribuidos. Y por último los módulos de entrada/salida que permiten la conexión a sensores y equipos; para ello Opto 22™ ofrece una gran variedad de módulos esto pueden ser analógicos, digitales y de comunicación [14].

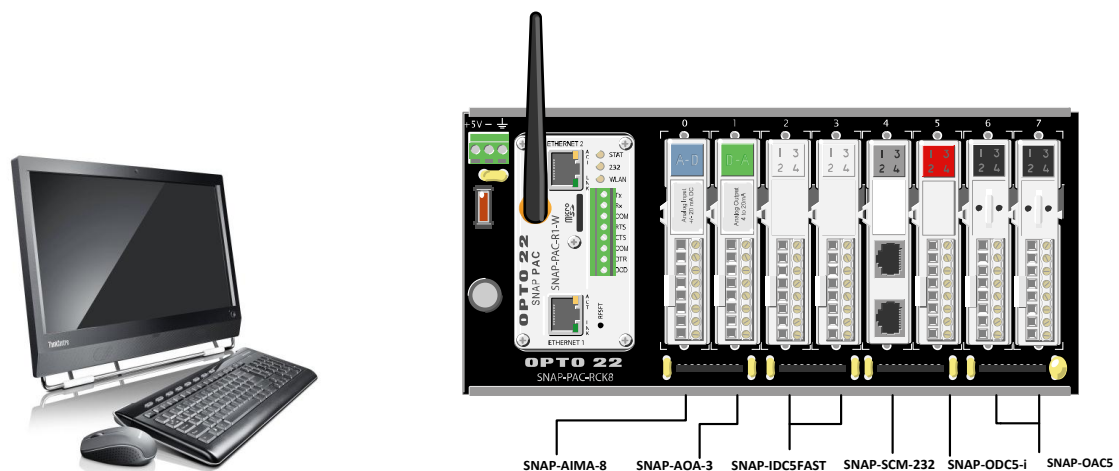


Figura 19. Arquitectura SNAP PAC System™ del banco de calibración.
Fuente: CDT de GAS.

3.2 Arquitectura SNAP PAC SYSTEM para el banco de calibración.

La automatización del banco de calibración para medidores de gas tipo diafragma, rotativo y turbina requiere de una arquitectura de SNAP PAC SYSTEM adecuada para ejecutar todas las tareas del proceso de calibración. Para ello se utiliza un controlador y una serie de módulos de entrada/Salida. Los módulos de entrada son usados para adquirir datos de los instrumentos y los de salida para la ejecución de los actuadores. Adicional se requiere una tarjeta de montaje o (rack) para realizar el acople e interconexión del controlador y los diversos módulos de entrada/salida. A continuación se describen cada uno de los elementos utilizados.

3.2.1 El controlador.

Para ejecutar la estrategia de control se seleccionó un controlador SNAP PAC R1-W. Este controlador se encuentra provisto de tres puerto Ethernet, dos cableados y uno wireless, un puerto de comunicación RS-232, slot para tarjeta de memoria microSD, posee capacidades digitales adicionales como son hacer conteo de pulsos de alta velocidad, conteo de pulsos en cuadratura y medición de frecuencias. De los controladores provistos por el fabricante este resulta ser el que posee mayor velocidad de procesamiento.

En el controlador se ejecutan cada una de las actividades involucradas en el proceso de calibración, la interpretación de la información suministrada por el usuario, conteo de pulsos relacionados con la medición de volumen, la adquisición de datos provenientes de la instrumentación secundaria y el control de los actuadores.


		Ítem	Especificación		
<p>Controlador SNAP PAC R1-W</p> 		Procesador	200 MHz 32-bit ColdFire® 5475 con unidad integrada de punto flotante (FPU)		
		Memoria	RAM total	32 MB (4 MB disponible para estrategia de PAC Control; 2 MB para almacenamiento de archivos)	
			RAM soportada por batería de respaldo	2 MB (1 MB disponible para estrategia de PAC Control)	
			Flash	8 MB (3,25 MB para estrategia de PAC Control. 384 KB disponible para almacenamiento de archivos)	
				Batería de Respaldo	Recargable
				Alimentación	5,0–5,2 VDC @ 1,5 A
				Temperatura operación de	0 °C a 60 °C
				Temperatura almacenamiento de	-40 °C a 85 °C
		Humedad	0% a 95% HR		

Tabla 20. Especificaciones técnicas controlador R1-W.

Fuente: CDT de GAS.

3.2.2 Módulos entrada salida.

Los módulos entrada/salida se seleccionan teniendo en cuenta el tipo de señal que entregan los instrumentos que posee el banco de calibración y el tipo de señal que se requiere para controlar los actuadores. Para elegir los módulos se realiza un listado con la instrumentación, actuadores, tipo de señal y cantidades que posee el banco. Este listado permite evaluar cuáles de los módulos OPTO 22 se ajustan a nuestras necesidades para llevar a cabo la automatización.

Instrumento/Actuador	Cantidad	Tipo de	Tipo de
Transmisor de temperatura	4	4-20 mA	Entrada
Transmisor de presión	1	4-20 mA	Entrada
Barómetro	2	RS-232	Comunicación
Amplificador de pulsos	3	0-12 VDC	Entrada
Amplificador óptico	1	0-12 VDC	Entrada
Señal de control para variador	1	4-20 mA	Salida
Señal de estado variador	1	0-12 VDC	Entrada
Válvulas solenoide DC	2	0-12 VDC	Salida
Válvulas solenoide AC	5	On/off 110	Salida

Tabla 21. Inventario de instrumentos, actuadores y sus respectivas señales.

Fuente: CDT de GAS.

Del anterior listado se elabora un listado consolidado teniendo en cuenta la cantidad, tipo de señal y tipo de módulo, además se selecciona el módulo que satisface los requisitos.

Tipo de módulo	E/S requeridas	Modulo seleccionado	Canales por módulo	Cantidad de módulos
Entrada 4-20 mA	5	SNAP PAC AIMA-8	8	1
Salida 4-20 mA	1	SNAP PAC AOA-3	1	1
Entrada 0-12 VDC	5	SNAP PAC IDC5-FAST	4	2
SALIDA 0-12 VDC	2	SNAP PAC ODC5	4	1
SALIDA On/off 110 VAC	5	SNAP PAC OAC5-i	4	2
Comunicación RS-232	2	SNAP PAC RS-232	2	1

Tabla 22. Lista de módulos y cantidades.
Fuente: CDT de GAS.

Para la adquisición de señales analógicas de los instrumentos que tienen por salida lazos de corriente de 4-20 mA se selecciona el módulo SNAP PAC AIMA-8. Este posee las siguientes características técnicas:


 <p>SNAP AIMA 8</p>	Ítem	Especificación
	Rango de entrada	-20 mA a +20 mA
	Resolución	0,8 uA
	Actualización de lectura	0,28 seg
	Rechazo en modo común	>-120 dB
	Rechazo en modo común	>-120 dB @ 60
	Máxima Entrada	36 mA o 9 VDC
	Clase	0,05% (10 uA)
	Resistencia de Entrada	200 ohms
	Temperatura de Operación	0 °C a 70 °C
	Canales por módulo	8

Tabla 23. Especificaciones del módulo SNAP PAC AIMA 8.
Fuente: CDT de GAS.

Se selecciona el módulo SNAP PAC- AOA 3 el cual tiene como señal de salida un lazo de corriente de 4-20 mA, la señal proveniente del módulo es usada como entrada por el variador de frecuencia, el cual se encarga de alimentar el blower con un voltaje AC de frecuencia proporcional a la corriente recibida del módulo.


 <p>SNAP AOA 3</p>	Ítem	Especificación
	Salida	4-20 mA
	Resolución	3,9 uA
	Actualización de lectura	0,28 seg
	Rechazo en modo común	>-120 dB
	Rechazo en modo común	>-120 dB @ 60
	Máximo voltaje de	250 VDC
	Clase	0,1% (16 uA)
	Max. resistencia de	1050 ohms
	Temperatura de Operación	0 °C a 70 °C
	Canales por módulo	1

Tabla 24. Especificaciones del módulo SNAP PAC AOA 3.
Fuente: CDT de GAS.

Las señales digitales que entregan los amplificadores de pulsos, el amplificador óptico y el relé de indicación de estado del variador son adquiridas para el controlador por módulos SNAP IDC5 FAST. La versión “fast” de este módulo de entrada digital brinda mayor rapidez en la adquisición de pulsos.


	Ítem	Especificación
 <p data-bbox="423 873 691 905">SNAP IDC 5 FAST</p>	Característica clave	Alta velocidad
	voltaje nominal de	5 VDC
	Aislamiento de canal a	300 VAC
	Rango de voltaje de	2,5–16 VDC
	Voltaje umbral de Alto	2,5 VDC
	Voltaje umbral de Bajo	1 VDC
	Resistencia de Entrada	440 ohms
	Voltaje de alimentación	5 VDC ± 0,25
	Corriente de	50 mA máximo
	Verdadero en Lógica	TTL 74 Series = 1
	Salida Digital	TTL 74LS Series
	Tiempo conmutación a	0,025 ms
	Tiempo de Conmutación	0,025 ms
	Aislamiento óptico	4000 volts
	Temperatura operación	0 °C a 70 °C
	Temperatura	-30 °C a 85 °C
	Número de canales por	4

Tabla 25. Especificaciones del módulo SNAP PAC IDC5-FAST.
Fuente: CDT de GAS.

Los módulos SNAP OAC5 funcionan como interruptor para accionar las válvulas solenoides de AC que posee el banco de calibración. Cumplen con los requerimientos debidos a que las válvulas solenoides para conmutar requieren de 0,1 A.


 <p>SNAP OAC5</p>	Ítem	Especificación
	Voltaje máximo de línea	250 VAC
	Voltaje de línea nominal	120/240 VAC
	Rango de Corriente	3A por módulo
	Frecuencia de Operación	25-65 Hz
	Voltaje de alimentación	5VDC +/- 5%, 50mA
	Temperatura de operación	0 °C a 70 °C
	Temperatura de	-30 °C a 85°C
	Número de canales por	4

Tabla 26. Especificaciones del módulo SNAP PAC OAC5.
Fuente: CDT de GAS.

Para accionar las válvulas de DC que permiten conmutar los barómetros se selecciona el módulo SNAP PAC ODC5-i, las características del módulo se especifican a continuación.



 <p>SNAP ODC5-I</p>	Ítem	Especificación
	Voltaje de línea	5 – 60 VDC
	Voltaje de línea nominal	5-48 VDC
	Rango de Corriente	3A por módulo
	Carga mínima	20 mA
	Voltaje de alimentación	5VDC +/- 5%, 50mA
	Temperatura de operación	0 °C a 70 °C
	Temperatura de	-30 °C a 85°C
	Número de canales por	4

Tabla 27. Especificaciones del módulo SNAP PAC ODC5-I.

Fuente: CDT de GAS.

Los barómetros usados en el banco a automatizar entregan los valores de sus mediciones en protocolo RS-232, Para adquirir mediciones de estos se usa un módulo SNAP-SCM 232.

 <p>SNAP-SCM-232 COMMUNICATION MODULE</p>	Ítem	Especificación
	Tasa de transmisión	300–115200 Bauds
	Aislamiento de canal a	750 VRMS
	Voltaje de alimentación	5,0 VDC
	Corriente de	250 mA DC
	Número de puntos por	2

SNAP SCM 232	Máxima longitud del	50 Pies
	Temperatura de	0 a 70 °C
	Temperatura de	-30 a 85 °C

Tabla 28. Especificaciones del módulo SNAP PAC SCM 232.
Fuente: CDT de GAS.

3.2.3 Tarjeta de Montaje.

La selección de la tarjeta de montaje se hace teniendo en cuenta el tipo de controlador y el número de módulos que se requieren interconectar. De acuerdo a lo expuesto en las secciones anteriores donde se definen las características del controlador y los módulos, así como sus respectivas cantidades, se determina que la automatización requiere un *rack* de ocho módulos.

La organización de los módulos en el *rack* se hace agrupando estos por el tipo de señal que manejan, primero se ubican los módulos que manejan lazos de corriente de 4-20 mA. El segundo grupo de módulos en ser ubicados son los de entradas digitales, seguidos por el módulo de comunicación, por último se ubican los módulos de salida de DC y de AC. Con esta información se realiza la configuración final de la plataforma SNAP PAC SYSTEM que se instala en el banco. Esta arquitectura se muestra en la **Figura 19**, en donde se esquematiza el *rack* usado junto a los módulos que se le instalan. Sobre cada módulo se enumera cada uno de los canales que se asignan a los instrumentos y actuadores del banco de calibración. Esta asignación de canales se describe en la **Tabla 29**.

Para finalizar se realizan los esquemas de conexiones eléctricas de toda la plataforma SNAP PAC SYSTEM, la instrumentación, los actuadores y todo lo

relacionado con el suministro de potencia al banco. Estos planos se presentan en el ANEXO A.

RACK 8	
ENTRADA 4 -20 mA	
[0] SNAP-AIMA-8	
[00]	TT1
[01]	TT2
[02]	TT3
[03]	TT4
[04]	DPT1
SALIDA 4-20 mA	
[1] SNAP-AOA-3	
[00]	SY1 (VARIADOR DE FRECUENCIA)
ENTRADAS DIGITALES	
[2] SNAP-IDC5 FAST	
[00]	ST1 (Amplificador de pulsos)
[01]	ST2 (Amplificador de pulsos)
[02]	ST3 (Amplificador de pulsos)
[03]	OS1 (Amplificador óptico)
[3] SNAP-IDC5 FAST	
[00]	SY1 (VARIADOR DE FRECUENCIA)
COMUNICACIÓN SERIAL	
[4] SNAP-SCM-232	
[00]	PT1
[01]	PT2
Salidas Digitales DC	
[5] SNAP-ODC5-i	
[00]	CV1
[01]	CV2
Salidas Digitales AC	
[6] SNAP-OAC5	
[00]	FCV1
[01]	FCV2
[02]	FCV3
[03]	FCV4
[7] SNAP-OAC5	
[00]	FCV5

Tabla 29. Asignación de instrumentación o Actuadores para cada módulo.
Fuente: CDT de GAS.

3.3 Aseguramiento Metrológico.

El aseguramiento metrológico es una función preventiva que integra en un orden lógico una serie de actividades encaminadas a garantizar que los instrumentos se encuentran midiendo de forma correcta.

Como parte de las labores de automatización del banco, se desarrolló una estrategia de control y su respectiva interfaz de usuario para ejecutar el aseguramiento metrológico de la instrumentación del banco de calibración. Esta estrategia permite verificar el estado de los instrumentos del banco, además se puede realizar la calibración de los instrumentos en lazo cerrado. En la **Figura 20** se muestra una ventana de la interfaz de usuario desarrollada para el mismo fin.



Figura 20. Interfaz Aseguramiento metrológico.
Fuente: CDT de GAS.

3.4 Procedimiento de calibración.

El procedimiento de calibración de medidores de gas con el banco está compuesto por tareas que se realizan con el fin de obtener unos datos que permitan determinar el porcentaje de error en la indicación de volumen de los medidores de gas respecto a los medidores patrones. Estas tareas o actividades son:

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

Hacen parte de las tareas preliminares la recepción de los medidores a calibrar, se debe verificar que funcionen correctamente, esto es que los lóbulos o rodamiento no se encuentren bloqueados en el caso de los medidores rotativos; se debe hacer “*spin time test*” para las turbinas, se debe observar el estado de los odómetros en el caso de los diafragmas. Si los medidores funcionan correctamente se les asigna una orden de servicio en donde se consignan los datos del cliente y del medidor bajo prueba. El análisis de datos y generación de resultados se realiza con una herramienta desarrollada por el área de sistemas de la corporación CDT de GAS.

Un servicio de calibración se inicia con el montaje del medidor de gas que se va a calibrar. Una vez instalado el medidor, el operario procede a introducir una serie de datos en la HMI (ver **Figura 21**), estos datos se encuentran agrupados en tres categorías:

Datos del servicio, la información a introducir en esta categoría es la siguiente:

Dato	Descripción
Solicitante	El nombre del cliente o compañía que solicita el servicio de calibración.
Dirección	La dirección del cliente.
Fecha de recepción	La fecha en que se recibe el medidor a calibrar.
ID del Servicio	Es el número o código del servicio que se le asigna a la calibración
Calibrado por	El nombre del operario que realiza la calibración

Tabla 30. Datos del servicio.
Fuente: CDT de GAS.

La segunda categoría corresponde a los datos del medidor:

Dato	Descripción
Fabricante	el fabricante del medidor bajo prueba
Modelo	El modelo del medidor bajo prueba
Número de serie	El número de serie del medidor
Tipo de medidor	Se puede seleccionar entre cuatro opciones: Diafragmas de conexión vertical, diafragmas de conexión horizontal, rotativos y turbinas.

Tabla 31. Datos del medidor.
Fuente: CDT de GAS.

La tercera categoría son las especificaciones del medidor:

Dato	Descripción
Estado	Se selecciona el estado del medidor entre: nuevo, usado y reparado
Kfactor	Dato particular de cada medidor en donde indica la relación entre pulsos y volumen.
Resolución	Este dato es opcional, en este se indica la cantidad más pequeña de volumen que el medidor es capaz de registrar
Qmin	Caudal mínimo al que puede opera el medidor bajo prueba
Qmax	Caudal máximo al que puede operar el medidor bajo prueba
Señal	Se selecciona el tipo de señal que posee el medidor, las opciones son: Activa, contacto seco, colector abierto, NAMUR y óptica.

Tabla 32. Especificaciones del medidor.
Fuente: CDT de GAS.

GMP650
Gas Meter Prover

Datos del Servicio

Datos del Servicio

Solicitante:

Dirección:

Fecha de recepción:

ID del servicio:

Calibrado por:

Datos del medidor

Fabricante:

Modelo:

Número de serie:

Tipo de medidor:
 Diafragma
 Rotativo
 Turbina

Especificaciones

Estado: Nuevo Usado Reparado

Kfactor:
 Pulsos/m³
 Pulsos/ft³
 m³/pulsos
 ft³/pulsos

Resolución: m³

Qmin: m³/h

Qmax: m³/h

Señal:
 Activa
 Contacto seco
 Colector abierto
 Namur
 Óptica

Siguiete

Figura 21. Datos del servicio.
Fuente: CDT de GAS.

Una vez introducidos los datos, el operario da acuse al botón “siguiente” y es llevado a la ventana de datos de calibración (ver **Figura 22**), en esta ventana se proponen los caudales de calibración, el número de repeticiones, el número de pulsos, volumen esperado y el tiempo de duración de cada repetición. El operario tiene la opción de agregar o quitar caudales de calibración, además puede modificar el número de pulsos esperados o el número de repeticiones, aunque siempre se recomienda que el número de pulsos a recibir en el MUT corresponda a un volumen mínimo de $0,5 \text{ m}^3$. Otra recomendación importante es realizar como mínimo tres repeticiones por punto de calibración, esto se hace con el fin de determinar la repetibilidad del medidor, o en otras palabras, observar la dispersión de los resultados de las mediciones hechas en condiciones similares.

El siguiente paso consiste en verificar que la instrumentación secundaria se encuentra conectada y esté funcionando de forma correcta, si se detecta que algún instrumento no se encuentra conectado o funciona de forma anormal se muestra una advertencia al operario indicando la situación, sin embargo se tiene la posibilidad de continuar con el proceso. En la **Figura 23** se muestra la ventana de verificación de instrumentación.

Después de verificar la instrumentación secundaria se realiza la prueba de fugas (ver **Figura 24**). Con esta prueba se busca garantizar la hermeticidad del montaje y de esta forma tener la certeza que el volumen de aire que fluye a través del MUT y el patrón es el mismo. Una vez terminada la prueba de fugas se procede a realizar la prueba de pulsos, esta prueba consiste en verificar que el variador de frecuencia se encuentra energizado, que se están recibiendo pulsos de él o de los patrones que serán usados en la calibración y del medidor bajo prueba. De esta forma se concluyen las actividades preliminares y se inicia el bucle principal de la calibración.

GMP650
Gas Meter Prover

Datos de Calibración

Caudales de Calibración					
	Caudal	Repeticiones	Pulsos	Volumen	Duración por rep.
<input checked="" type="checkbox"/> Qmin	6.5	3	2,025	1.0	9:14 min.
<input checked="" type="checkbox"/> 0.25 Qmax	162.5	3	16,450	8.1	3:00 min.
<input checked="" type="checkbox"/> 0.4 Qmax	260.0	3	26,319	13.0	3:00 min.
<input checked="" type="checkbox"/> 0.7 Qmax	455.0	3	46,058	22.8	3:00 min.
<input checked="" type="checkbox"/> Qmax	650.0	3	65,797	32.5	3:00 min.
<input type="checkbox"/> Q6					min.
<input type="checkbox"/> Q7					min.
<input type="checkbox"/> Q8					min.
<input type="checkbox"/> Q9					min.
<input type="checkbox"/> Q10					min.

Secuencia Ascendente Descendente



Figura 22. Datos de calibración.
Fuente: CDT de GAS.

GMP650
Gas Meter Prover

Verificación de Instrumentos

Estado de Instrumentos

- TT1
- TT2
- TT3
- TT4
- PT1
- DPT1
- PT2
- TT1
- TT2
- TT3
- TT4
- PT1
- DPT1
- PT2
- TT1
- TT2
- TT3
- TT4
- PT1
- DPT1
- PT2
- TT1
- TT2
- TT3
- TT4
- PT1
- DPT1
- PT2
- TT1
- TT2
- TT3
- TT4
- PT1
- DPT1
- PT2
- TT1
- TT2
- TT3
- TT4
- PT1
- DPT1
- PT2
- TT1
- TT2
- TT3
- TT4
- PT1
- DPT1
- PT2
- TT1
- TT2
- TT3
- TT4
- PT1
- DPT1
- PT2
- TT1
- TT2
- TT3
- TT4
- PT1
- DPT1
- PT2
- TT1
- TT2
- TT3
- TT4
- PT1
- DPT1
- PT2
- TT1
- TT2
- TT3
- TT4
- PT1
- DPT1
- PT2
- TT1
- TT2
- TT3
- TT4
- PT1
- DPT1
- PT2
- TT1
- TT2
- TT3
- TT4
- PT1
- DPT1
- PT2
- TT1
- TT2
- TT3
- TT4
- PT1
- DPT1
- PT2
- TT1
- TT2
- TT3
- TT4
- PT1
- DPT1
- PT2
- TT1
- TT2
- TT3
- TT4
- PT1
- DPT1
- PT2
- TT1
- TT2
- TT3
- TT4
- PT1
- DPT1
- PT2
- TT1
- TT2
- TT3
- TT4
- PT1
- DPT1
- PT2
- TT1
- TT2
- TT3
- TT4
- PT1
- DPT1
- PT2
- TT1
- TT2
- TT3
- TT4
- PT1
- DPT1
- PT2
- TT1
- TT2
- TT3
- TT4
- PT1
- DPT1
- PT2
- TT1
- TT2
- TT3
- TT4
- PT1
- DPT1
- PT2
- TT1
- TT2
- TT3
- TT4
- PT1
- DPT1
- PT2
- TT1
- TT2
- TT3
- TT4
- PT1
- DPT1
- PT2
- TT1
- TT2
- TT3
- TT4
- PT1
- DPT1
- PT2
- TT1
- TT2
- TT3
- TT4
- PT1
- DPT1
- PT2
- TT1
- TT2
- TT3
- TT4
- PT1
- DPT1
- PT2
- TT1
- TT2
- TT3
- TT4
- PT1
- DPT1
- PT2
- TT1
- TT2
- TT3
- TT4
- PT1
- DPT1
- PT2
- TT1
- TT2
- TT3
- TT4
- PT1
- DPT1
- PT2
- TT1
- TT2
- TT3
- TT4
- PT1
- DPT1
- PT2
- TT1
- TT2
- TT3
- TT4
- PT1
- DPT1
- PT2
- TT1
- TT2
- TT3
- TT4
- PT1
- DPT1
- PT2
- TT1
- TT2
- TT3
- TT4
- PT1
- DPT1
- PT2
- TT1
- TT2
- TT3
- TT4
- PT1
- DPT1
- PT2
- TT1
- TT2
- TT3
- TT4
- PT1
- DPT1
- PT2
- TT1
- TT2
- TT3
- TT4
- PT1
- DPT1
- PT2
- TT1
- TT2
- TT3
- TT4
- PT1
- DPT1
- PT2
- TT1
- TT2
- TT3
- TT4
- PT1
- DPT1
- PT2
- TT1
- TT2
- TT3
- TT4
- PT1
- DPT1
- PT2
- TT1
- TT2
- TT3
- TT4
- PT1
- DPT1
- PT2
- TT1
- TT2
- TT3
- TT4
- PT1
- DPT1
- PT2
- TT1
- TT2
- TT3
- TT4
- PT1
- DPT1
- PT2
- TT1
- TT2
- TT3
- TT4
- PT1
- DPT1
- PT2
- TT1
- TT2
- TT3
- TT4
- PT1
- DPT1
- PT2
- TT1
- TT2
- TT3
- TT4
- PT1
- DPT1
- PT2
- TT1
- TT2
- TT3
- TT4
- PT1
- DPT1
- PT2
- TT1
- TT2
- TT3
- TT4
- PT1
- DPT1
- PT2
- TT1
- TT2
- TT3
- TT4
- PT1
- DPT1
- PT2
- TT1
- TT2
- TT3
- TT4
- PT1
- DPT1
- PT2
- TT1
- TT2
- TT3
- TT4
- PT1
- DPT1
- PT2
- TT1
- TT2
- TT3
- TT4
- PT1
- DPT1
- PT2
- TT1
- TT2
- TT3
- TT4
- PT1
- DPT1
- PT2
- TT1
- TT2
- TT3
- TT4
- PT1
- DPT1
- PT2
- TT1
- TT2
- TT3
- TT4
- PT1
- DPT1
- PT2
- TT1
- TT2
- TT3
- TT4
- PT1
- DPT1
- PT2
- TT1
- TT2
- TT3
- TT4
- PT1
- DPT1
- PT2
- TT1
- TT2
- TT3
- TT4
- PT1
- DPT1
- PT2
- TT1
- TT2
- TT3
- TT4
- PT1
- DPT1
- PT2
- TT1
- TT2
- TT3
- TT4
- PT1
- DPT1
- PT2
- TT1
- TT2
- TT3
- TT4
- PT1
- DPT1
- PT2
- TT1
- TT2
- TT3
- TT4
- PT1
- DPT1
- PT2
- TT1
- TT2
- TT3
- TT4
- PT1
- DPT1
- PT2
- TT1
- TT2
- TT3
- TT4
- PT1
- DPT1
- PT2
- TT1
- TT2
- TT3
- TT4
- PT1
- DPT1
- PT2
- TT1
- TT2
- TT3
- TT4
- PT1
- DPT1
- PT2
- TT1
- TT2
- TT3
- TT4
- PT1
- DPT1
- PT2
- TT1
- TT2
- TT3
- TT4
- PT1
- DPT1
- PT2
- TT1
- TT2
- TT3
- TT4
- PT1
- DPT1
- PT2
- TT1
- TT2
- TT3
- TT4
- PT1
- DPT1
- PT2
- TT1
- TT2
- TT3
- TT4
- PT1
- DPT1
- PT2
- TT1
- TT2
- TT3
- TT4
- PT1
- DPT1
- PT2
- TT1
- TT2
- TT3
- TT4
- PT1
- DPT1
- PT2
- TT1
- TT2
- TT3
- TT4
- PT1
- DPT1
- PT2
- TT1
- TT2
- TT3
- TT4
- PT1
- DPT1
- PT2
- TT1
- TT2
- TT3
- TT4
- PT1
- DPT1
- PT2
- TT1
- TT2
- TT3
- TT4
- PT1
- DPT1
- PT2
- TT1
- TT2
- TT3
- TT4
- PT1
- DPT1
- PT2
- TT1
- TT2
- TT3
- TT4
- PT1
- DPT1
- PT2
- TT1
- TT2
- TT3
- TT4
- PT1
- DPT1
- PT2
- TT1
- TT2
- TT3
- TT4
- PT1
- DPT1
- PT2
- TT1
- TT2
- TT3
- TT4
- PT1
- DPT1
- PT2
- TT1
- TT2
- TT3
- TT4
- PT1
- DPT1
- PT2
- TT1
- TT2
- TT3
- TT4
- PT1
- DPT1
- PT2
- TT1
- TT2
- TT3
- TT4
- PT1
- DPT1
- PT2
- TT1
- TT2
- TT3
- TT4
- PT1
- DPT1
- PT2
- TT1
- TT2
- TT3
- TT4
- PT1
- DPT1
- PT2
- TT1
- TT2
- TT3
- TT4
- PT1
- DPT1
- PT2
- TT1
- TT2
- TT3
- TT4
- PT1
- DPT1
- PT2
- TT1
- TT2
- TT3
- TT4
- PT1
- DPT1
- PT2
- TT1
- TT2
- TT3
- TT4
- PT1
- DPT1
- PT2
- TT1
- TT2
- TT3
- TT4
- PT1
- DPT1
- PT2
- TT1
- TT2
- TT3
- TT4
- PT1
- DPT1
- PT2
- TT1
- TT2
- TT3
- TT4
- PT1
- DPT1
- PT2
- TT1
- TT2
- TT3
- TT4
- PT1
- DPT1
- PT2
- TT1
- TT2
- TT3
- TT4
- PT1
- DPT1
- PT2
- TT1
- TT2
- TT3
- TT4
- PT1
- DPT1
- PT2
- TT1
- TT2
- TT3
- TT4
- PT1
- DPT1
- PT2
- TT1
- TT2
- TT3
- TT4
- PT1
- DPT1
- PT2
- TT1
- TT2
- TT3
- TT4
- PT1
- DPT1
- PT2
- TT1
- TT2
- TT3
- TT4
- PT1
- DPT1
- PT2
- TT1
- TT2
- TT3
- TT4
- PT1
- DPT1
- PT2
- TT1
- TT2
- TT3
- TT4
- PT1
- DPT1
- PT2
- TT1
- TT2
- TT3
- TT4
- PT1
- DPT1
- PT2
- TT1
- TT2
-

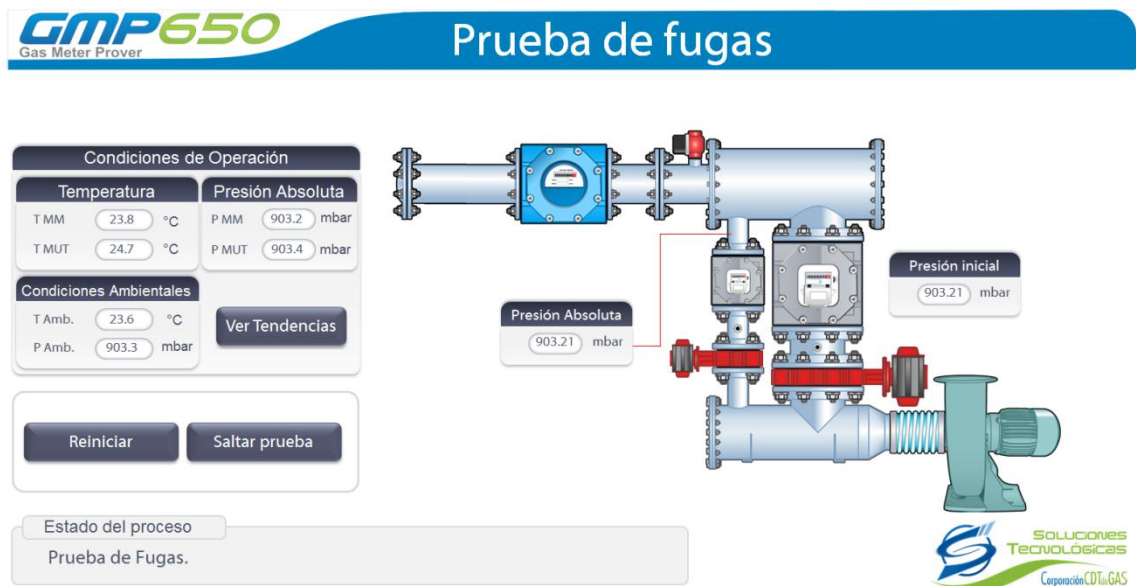


Figura 24. Prueba de fugas.
Fuente: CDT de GAS.

En el bucle de calibración se ejecutan cada uno de los puntos establecidos en la ventana de datos de calibración. En cada uno de los puntos se ejecuta un número determinado de veces (Repeticiones) y para cada repetición se hace pasar por el medidor patrón y el MUT un volumen determinado, el cual se encuentra cuantificado por número de pulsos esperados.

La ejecución de un punto de calibración se inicia con el ajuste de caudal, actividad encargada de abrir y cerrar las diferentes válvulas de control de flujo y de llevar al sistema a que trabaje en el caudal establecido (más detalles sobre esta actividad se presentan en el capítulo 4). Una vez se ha concluido la actividad de ajuste de caudal se inicia la historización (registro) de los valores de las variables físicas que requiere el modelo matemático. Además se realiza el conteo de pulsos tanto en el patrón usado para la calibración como en el MUT. Luego se procede a

realizar el conteo de pulsos para la repetición siguiente, este proceso se repite hasta que se alcanza el total de repeticiones establecidas para el punto. Una vez concluidas todas las repeticiones de un punto se reinicia el bucle y se procede a realizar ajuste de caudal para siguiente el punto de calibración. A continuación se muestra un diagrama de flujo del proceso de calibración.

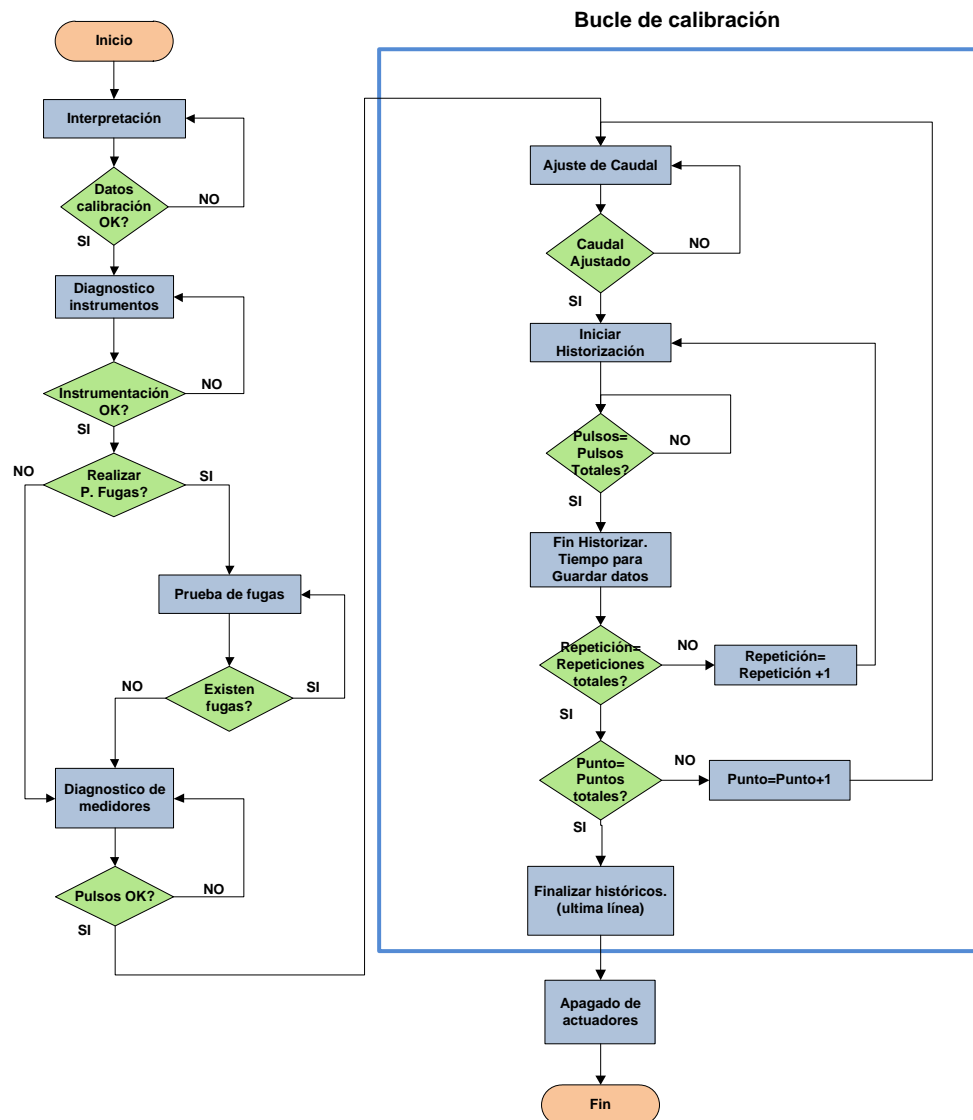


Figura 25. Diagrama de flujo del proceso de calibración.
Fuente: CDT de GAS.

De forma simultánea a la calibración la HMI va mostrando el estado del proceso junto con el número de puntos, repetición, pulsos del MUT y los valores de las magnitudes caudal, temperatura y presión. Tal como se muestra en la **Figura 26**.

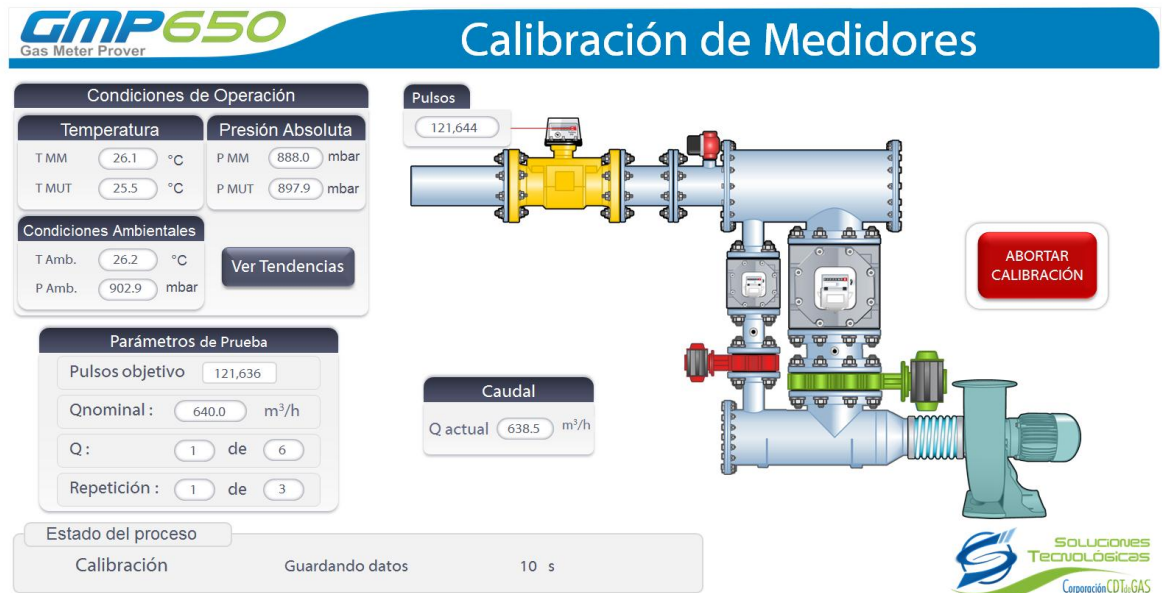


Figura 26. Calibración de medidores.
Fuente: CDT de GAS.

Luego de ejecutar todos los puntos de calibración se da fin al proceso de historización, se desactivan todos los actuadores y se reporta el fin del proceso en la HMI.

4. DISEÑO DEL CONTROLADOR.

Dentro de las características que debe poseer el banco se encuentra realizar ajuste automático de los diferentes caudales de calibración. Para lograr esto, el primer paso consiste en identificar en el lazo de control y los posibles escenarios de operación del banco, el siguiente paso consiste en diseñar un controlador que consiga que la respuesta del sistema cumpla ciertas características de desempeño, por último se procede a implementación del controlador, en este paso se debe verificar que el comportamiento del sistema sea el esperado, en caso de ser necesario se deben ajustar los parámetros del controlador.

4.1 Identificación del sistema.

El sistema, o planta se define como un conjunto de elemento o procesos relacionados entre sí caracterizado por producir una respuesta en función a una entrada. Tal como se muestra en la **Figura 27**.

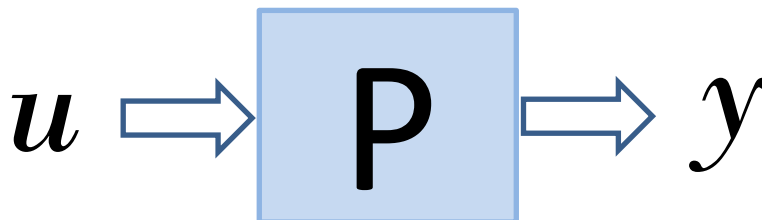


Figura 27. Planta.

Fuente: Ioannou P. and J. Sun. *Robust Adaptive Control*

La planta se encuentra conformada por el medidor bajo prueba, los medidores patrones, las válvulas de control de flujo, las secciones de tubería y mangueras, el plenum de entrada, el filtro, plenum de salida y el blower. Como transductor y etapa de potencia se tiene el variador de frecuencia, que transforma la corriente del lazo de 4-20 mA en determinada frecuencia para el blower y de esta forma se obtiene un caudal.

La variable a controlar en nuestro proceso de calibración es el caudal, este se obtiene a partir de la medición de dos magnitudes, volumen y tiempo. El volumen es medido por el conjunto medidor patrón 1 o medidor patrón 2 y el Snap Pac R1, mientras que el tiempo es medido por Snap Pac R1.

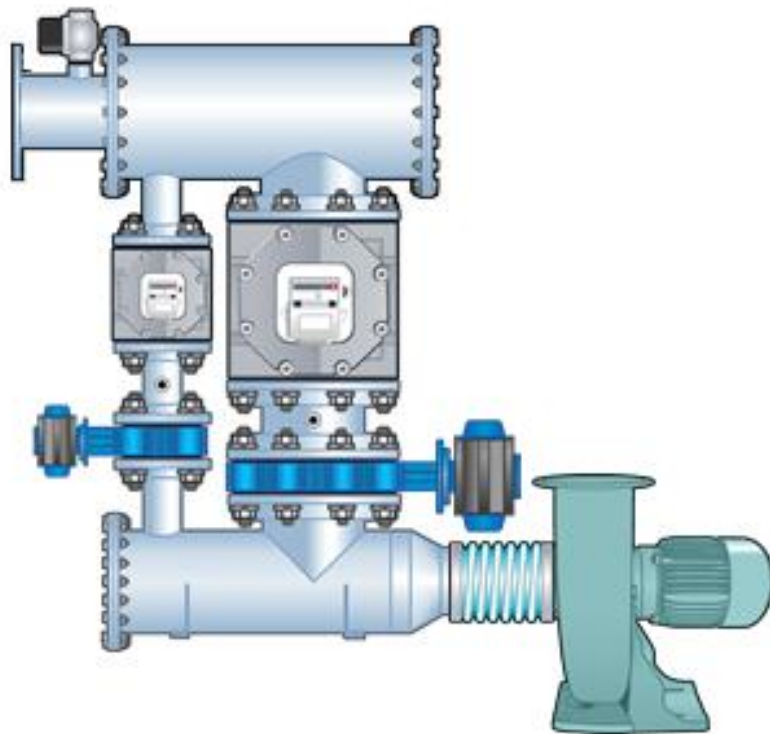


Figura 28. Planta a controlar.
Fuente: CDT de GAS.

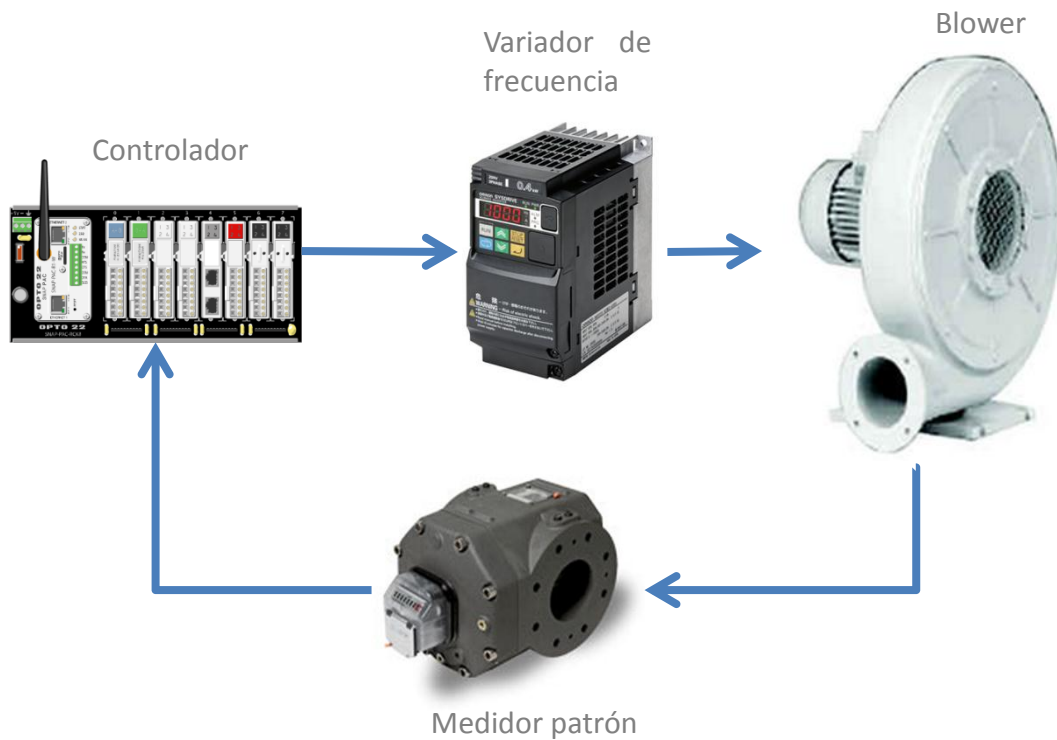


Figura 29. Lazo de Control.
Fuente: CDT de GAS.

4.2 Enfoque para el diseño del controlador.

El modelado consiste en entender a fondo el proceso o planta, hasta el punto de llegar a describirlo por medio de un modelo matemático; se debe tener en cuenta que la complejidad de muchos sistemas hace que la descripción de este por medio de un modelo matemático sea prácticamente imposible, aun existiendo un modelo, las no linealidades o las variaciones del sistema en el tiempo hacen que el modelo se aparte del proceso real, por esto, siempre debe existir un

compromiso en entre exactitud y sencillez requeridas en los modelos matemáticos [15].

Generalmente los modelos de las plantas se han desarrollado aplicando leyes físicas o procesando la información de entradas/salidas del sistema obtenidas en varios experimentos, estos modelos resultan ser complicados desde el punto de vista del diseño del controlador y son necesarias algunas simplificaciones, estas se abordan de dos formas [15]:

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

La primera forma de simplificar los modelos resulta en una buena descripción del proceso alrededor del punto de linealización. Pero deja de ser útil para otras regiones de operación. La segunda aproximación hace que los modelos omitan características particulares del sistema.

Teniendo en cuenta lo expuesto anteriormente y dada la versatilidad del banco que permite la calibración de medidores de conexión bridada, esto es, medidores de tipo rotativos, turbinas de diferentes diámetros e intervalos de medición, además de los medidores tipo diafragma que pueden ser de conexión vertical u horizontal. Y que el alcance del banco se extiende desde 2 hasta 650 m³/h, para lo cual cuenta con dos medidores patrones. Se hace evidente que se cuenta con un sistema variante en el tiempo, donde para cada medidor bajo prueba la planta física cambia y matemáticamente su función de transferencia también. Por esto se decide usar un enfoque diferente al tradicional para el diseño del controlador.

El enfoque a utilizar es el de control adaptativo, el cual es definido por Karl Amstron como un controlador con parámetros ajustables y un mecanismo para ajustar estos parámetro [16]. Este controlador tiene una estructura especial y se puede pensar que posee dos lazos de realimentación, un lazo es la realimentación

normal del controlador y el otro es el de ajuste de los parámetros del controlador, en la **Figura 30** se muestra la estructura de un sistema con control adaptativo. Dentro de los modelos de control adaptativo se decidió trabajar con el modelo de ganancia programada (“*Gain –scheduling*”).

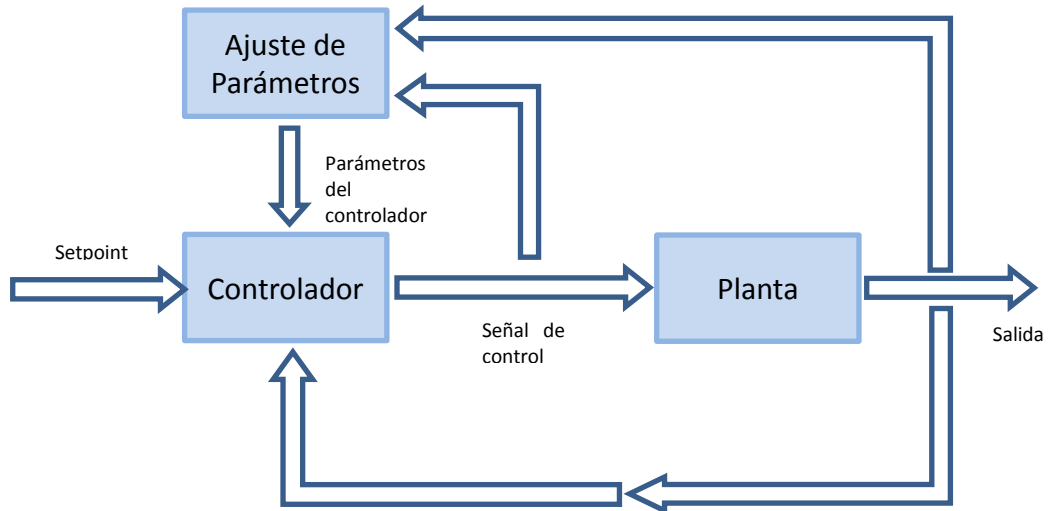


Figura 30. Estructura de sistema con control adaptativo.
Fuente: K. Astrom, B. Wittenmark. *Adaptive Control*

4.3 Ganancia programada.

$$\dot{x} = A_i x + B_i u$$

$$y = C_i x + D_i u$$

$$x(0) = x_0$$

Figura 31. Modelo matemático de un sistema.
Fuente: K. Astrom, B. Wittenmark. *Adaptive Control*

Considere el modelo de la **Figura 31** donde para cada punto de operación i , $i=1,2,\dots,N$, 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 θ_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 [17]. Una vez el punto de operación es detectado, las ganancias del controlador cambian a las establecidas para este punto. Los dos elementos esenciales para realizar este tipo de control son una tabla con una lógica adecuada en donde se almacenan los valores θ_i y una medida auxiliar de la planta que se encuentre relacionado con el punto de operación. Un esquema para este tipo de controladores se muestra en la **Figura 32**.

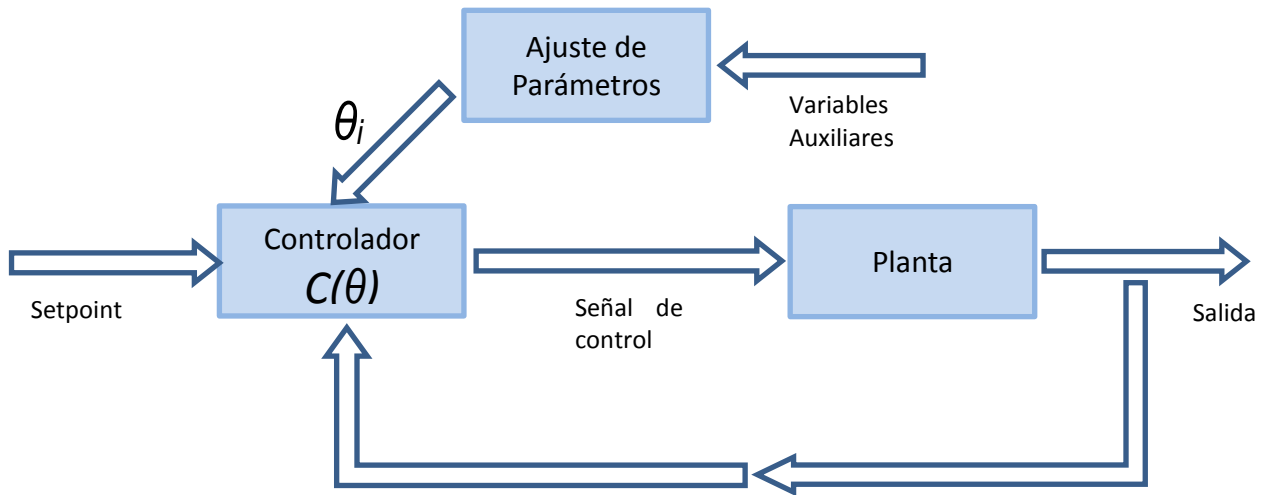


Figura 32. Estructura de un sistema con ganancia programada.
Fuente: Ioannou P. and J. Sun. *Robust Adaptive Control*

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

4.4 Identificación de escenarios.

Los escenarios de calibración se encuentran estrechamente relacionados con las variables auxiliares utilizadas para ajustar los parámetros del controlador, de esta forma se diferencian los escenarios teniendo en cuenta el patrón a utilizar durante la calibración, la secuencia y el tipo de medidor. Se toman como escenarios diferentes las calibraciones en ascenso y descenso ya que la dinámica del sistema cambia según sea el caso. Para calibraciones en ascenso se busca que la razón de cambio del caudal en el tiempo no sea tan alta y pueda dañar los rodamientos de los patrones. El descenso se debe controlar de forma tal que cuando el motor

este generando energía hacia el variador no cause sobretensiones en el bus de c.c y produzca su desconexión. A continuación se muestran los escenarios de calibración:

Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
MM1 calibración en ascenso. Medidores de conexión bridada.	MM1 calibración en descenso. Medidores de conexión bridada.	MM1 calibración en ascenso. Medidores de conexión vertical (diafragmas).
Escenario 4	Escenario 5	Escenario 6
MM1 calibración en descenso. Medidores de conexión vertical (diafragmas).	MM2 calibración en ascenso. Medidores de conexión Bridada.	MM2 calibración en descenso. Medidores de conexión Bridada.

Tabla 33. Identificación de escenarios.
Fuente: CDT de GAS.

Para la sintonización del controlador en los diferentes escenarios se utilizó la herramienta PID viewerTM del software Pac Control BasicTM de Opto 22. Esta permite manipular las constante Proporcional (Gain), Integral (Tune_I), Derivativa (Tune_D) y el periodo de muestreo, además realiza graficas en tiempo real de la entrada, setpoint y salida del controlador de esta forma se puede observar el

comportamiento del sistema ante el cambio de alguno de sus parámetros. PID viewer ofrece cuatro algoritmos para el controlador PID:

- Velocidad
- ISA
- Paralela
- Interactiva

El algoritmo PID utilizado es el de velocidad ya que este presenta mejores características de respuesta para el sistema ante cambios súbitos grandes en el punto de ajuste, además es útil en la supresión de correcciones excesivas en el sistema de control [18]. El cual posee las siguientes ecuaciones:

$$Salida = Ganacia * Span * (Term_P + Term_I + Term_D)$$

Ecuación 6. Salida del PID en su forma de velocidad.

Dónde:

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

Ecuación 7. Span.

$$Term_P = Error - Error_{-1}$$

Ecuación 8. Termino P.

$$Term_I = Tune_I * Tiempo_{muestreo} * Error$$

Ecuación 9. Termino I.

$$Term_D = \frac{Tune_D}{Tiempo_muestreo} * (Variable_{proceso} - 2 * Variable_{proceso-1} + Variable_{proceso-2})$$

Ecuación 10. Termino D.

Definiéndose el error como:

$$Error = Variable_{proceso} - Setpoint$$

Ecuación 11. Error.

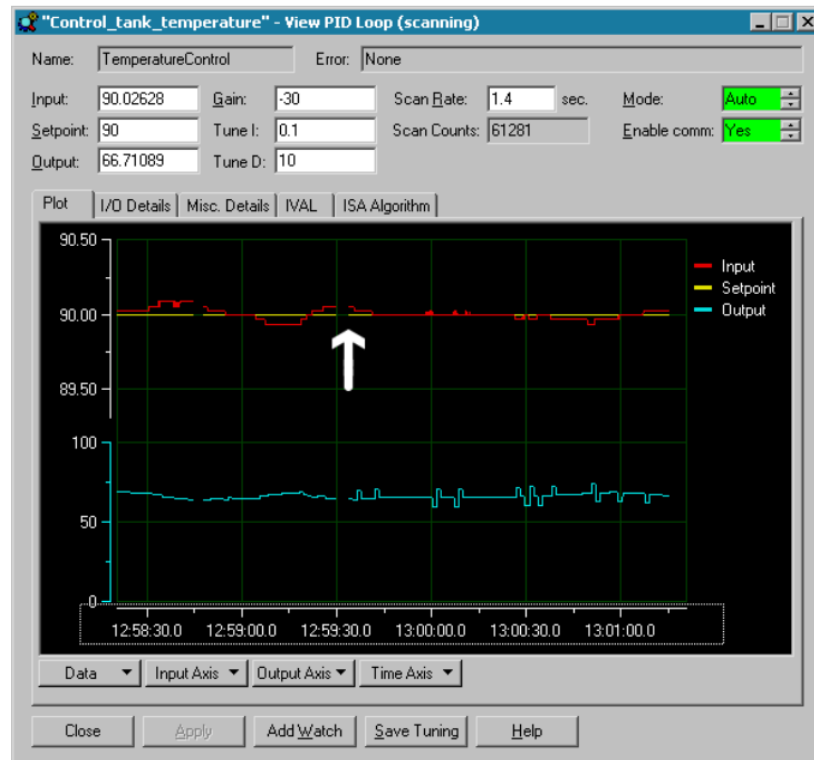


Figura 33. PID viewer.

Fuente: OptoTutorial, SNAP PAC PID.

Los criterios utilizados para la sintonización del controlador son que la respuesta del sistema no presentara sobre impulsos mayores al 10%, valor absoluto del error en estado estable menor al 5% y tiempo de asentamiento menor a 180 segundos. Para cada uno de los escenarios presentados en la **Tabla 33** se obtiene las siguientes constantes para el controlador:

Escenario 1		Escenario 2		Escenario 3	
Gain	-0,3	Gain	-0,25	Gain	-0,92
Tune I	0,24	Tune I	0,4	Tune I	0,3
Tune D	0,5	Tune D	0,5	Tune D	0,32

Escenario 4		Escenario 5		Escenario 6	
Gain	-0,7	Gain	-0,15	Gain	-0,1
Tune I	0,45	Tune I	0,3	Tune I	0,95
Tune D	0,32	Tune D	0,5	Tune D	0,5

Tabla 34. Constantes del controlador.
Fuente: CDT de GAS.

4.5 Bucle de control de caudal.

Cuando se va a realizar la calibración en un nuevo punto, se inicia la rutina de control de caudal, el primer paso que se realiza en esta rutina es identificar el

escenario en el cual se va trabajar de acuerdo a la **Tabla 33**. Una vez identificado el escenario se cargan las constantes al controlador PID y se inicia un temporizador, cuando este alcanza los 180 segundos se procede a evaluar que el caudal se encuentre dentro de los valores permisibles. Si se determina que el caudal ha sido ajustando dentro de los valores esperados entonces se apaga el PID y se continúan con el proceso de calibración. Si por el contrario, el caudal esta fuera de los valores aceptados se permite que el controlador actué durante 60 segundos más y nuevamente se evalúa si se alcanzó el setpoint. Si en este segundo intento se presenta el caso atípico de no lograr alcanzar el setpoint, se pasa el sistema de control a modo manual, en donde el operario debe dar acuse a botones para aumentar o disminuir el caudal.

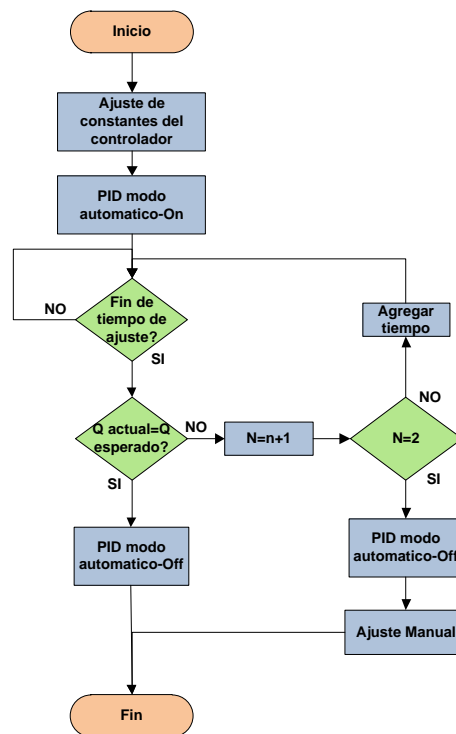


Figura 34. Diagrama de flujo del control de caudal.
Fuente: CDT de GAS.



Figura 35. Ajuste de caudal.
Fuente: CDT de GAS.

5. PRUEBAS DE OPERACIÓN.

Con el fin de garantizar el correcto funcionamiento del banco de calibración se realizaron pruebas de operación de las dos estrategias desarrolladas (Aseguramiento metrológico y Calibración de medidores). La descripción de las pruebas y resultados se presentan en los siguientes numerales.

5.1 Pruebas Estrategia de Aseguramiento Metrológico

Las pruebas ejecutadas sobre la estrategia de aseguramiento metrológico consistieron en realizar la calibración en lazo cerrado de la instrumentación secundaria asociada al banco, esto es la lectura de los instrumentos y los ajustes necesarios se realizan utilizando la estrategia e interfaz desarrolladas para este fin.

Para la calibración de los instrumentos de temperatura (ver **Figura 36**) se utilizó como patrón una RTD Pt-100 de cuatro hilos con indicador digital marca Presys, en la **Figura 37** se muestra el montaje utilizado.

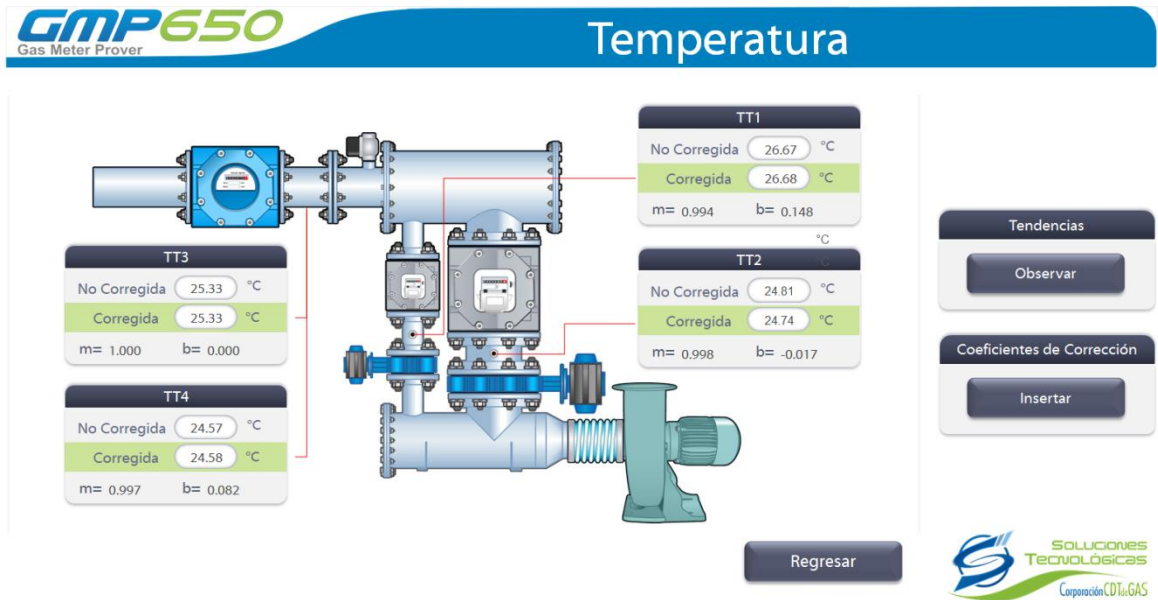


Figura 36. Ventana de calibración transmisores de temperatura.
Fuente: CDT de GAS.



Figura 37. Montaje utilizado para la calibración de las RTDs.
Fuente: CDT de GAS.

De igual forma para la calibración de los barómetros la lectura de esto se realizó utilizando la estrategia e interfaz desarrolladas para este fin (Ver **Figura 38**). Como patrón se utilizó un barómetro Honeywell de mejores características metrológicas que aquel con el que cuenta el banco de calibración.

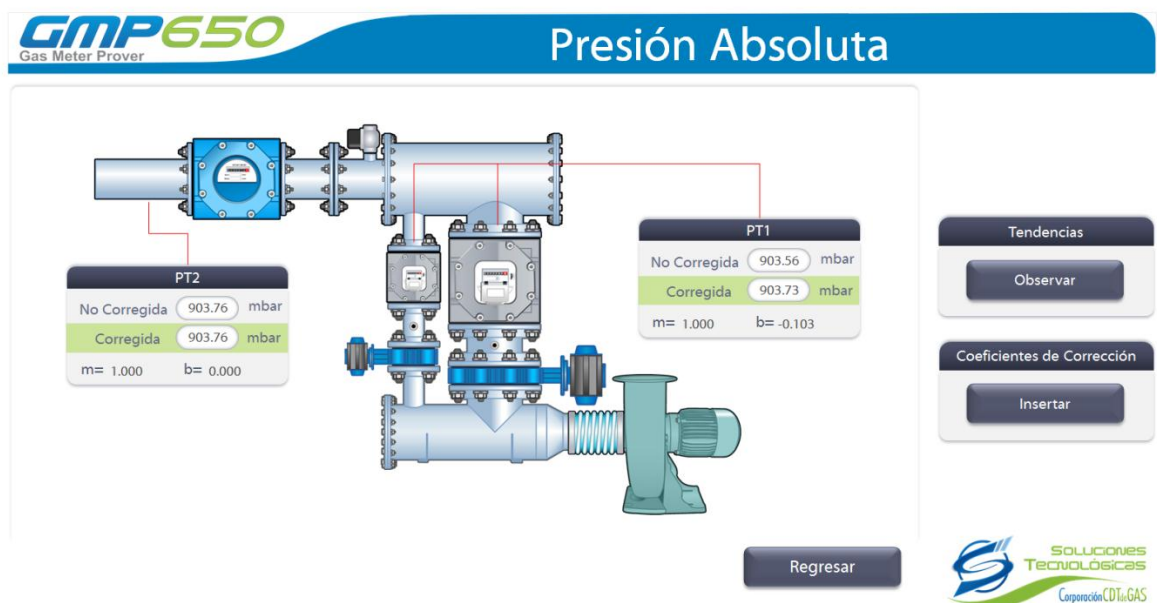


Figura 38. Ventana de calibración bárometros.
Fuente: CDT de GAS.



Figura 39. Montaje usado para calibración de barómetros.
Fuente: CDT de GAS.

Adicionalmente se ejecutaron pruebas de operación para las otras funciones de la estrategia de aseguramiento metrológico (pruebas de tiempo, calibración de transmisor de presión diferencial, prueba de válvulas, hermeticidad en sección donde se encuentra los patrones). La ejecución de estas pruebas permitió comprobar la completa funcionalidad de la estrategia de aseguramiento metrológico y la interfaz de usuario.

5.2 Pruebas Estrategia de Calibración de Medidores.

Para verificar el correcto funcionamiento de la estrategia de control y garantizar que los resultados de las calibraciones son correctos, se realizó un proceso de validación que consistió en comparar los resultados obtenidos, de un medidor tipo turbina y un medidor tipo rotativo, calibrados con el banco de Alto Caudal de la Corporación CDT de GAS (Con Acreditación ISO/IEC 17025 por ONAC⁸ 10-LAB-013 [19]) y los resultados obtenidos en banco de calibración desarrollado (GMP650).

Para evaluar el grado de equivalencia de los resultados se utiliza el error normalizado, el cual se calcula mediante la siguiente ecuación [20]:

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

Ecuación 12. Error normalizado.

En donde:

- x es el resultado de la medición.
- X es el valor asignado.
- u es la incertidumbre asociada al resultado de medición
- u_{ref} es la incertidumbre asociada al valor asignado.

Los errores normalizados obtenidos son evaluados utilizando los siguientes criterios:

⁸ Organismo Nacional de Acreditación.

Valor del Error Normalizado	Resultado
$ E_n < 1$	Desempeño satisfactorio
$ E_n > 1$	Desempeño insatisfactorio

Tabla 35. Criterios de evaluación.
Fuente: Norma Técnica Colombiana. NTC-ISO/IEC 17043

5.2.1 Resultados medidor de gas tipo turbina.

A continuación se muestran las características principales de la turbina usada para la validación de los resultados:

Ítem	Especificación
Fabricante:	ltron
Designación	G-250
Qmin:	20 m ³ /h
Qmax:	400 m ³ /h
Kfactor:	1 pulso/m ³
Tipo de señal:	NAMUR
Estado del medidor:	Nuevo

Tabla 36. Características del medidor de gas tipo turbina.
Fuente: CDT de GAS.

Como resultado de las calibraciones se tiene los siguientes datos:

Caudal Promedio [m3/h]	Volumen de Prueba [m3]	Error Promedio [%]	Desviación Estándar [%]	U [%]	k --
20,1	3,00	0,49	0,02	0,22	1,97
101,9	5,00	0,26	0,04	0,23	1,97
160,3	8,00	-0,01	0,05	0,19	1,98
281,6	14,00	0,13	0,02	0,19	1,97
400,1	20,00	0,25	0,00	0,19	1,97

Tabla 37. Resultados de calibración Banco de Alto Caudal, medidor tipo turbina.
Fuente: CDT de GAS.

Caudal Promedio [m3/h]	Volumen de Prueba [m3]	Error Promedio [%]	Desviación Estándar [%]	U [%]	k --	E _n
19,9	3,00	0,56	0,06	0,28	1,97	0,20684
100,3	5,00	0,43	0,01	0,27	1,97	0,47204
160,1	8,00	0,03	0,01	0,27	1,97	0,12288
279,8	14,00	0,10	0,01	0,25	1,97	0,10003
399,2	20,00	0,27	0,01	0,25	1,97	0,06363

Tabla 38. Resultados de calibración 1 GMP650, medidor tipo turbina.
Fuente: CDT de GAS.

Caudal Promedio [m3/h]	Volumen de Prueba [m3]	Error Promedio [%]	Desviación Estándar [%]	U [%]	k --	E _n
19,9	3,00	0,62	0,08	0,29	1,98	0,36095
99,6	5,00	0,44	0,02	0,27	1,97	0,50157
160,2	8,00	0,01	0,02	0,27	1,97	0,06979
280,6	14,00	0,09	0,02	0,25	1,97	0,11958
399,5	20,00	0,25	0,00	0,25	1,97	0,00393

Tabla 39. Resultados de calibración 2 GMP650, medidor tipo turbina.
Fuente: CDT de GAS.

Caudal Promedio [m ³ /h]	Volumen de Prueba [m ³]	Error Promedio [%]	Desviación Estándar [%]	U [%]	k --	E _n
19,8	3,00	0,58	0,17	0,37	2,11	0,21729
99,8	5,00	0,49	0,03	0,28	1,97	0,61569
159,4	8,00	0,05	0,01	0,30	1,99	0,17879
280,2	14,00	0,15	0,01	0,25	1,97	0,04399
400,0	20,00	0,29	0,01	0,25	1,97	0,11088

Tabla 40. Resultados de calibración 3 GMP650, medidor tipo turbina.
Fuente: CDT de GAS.

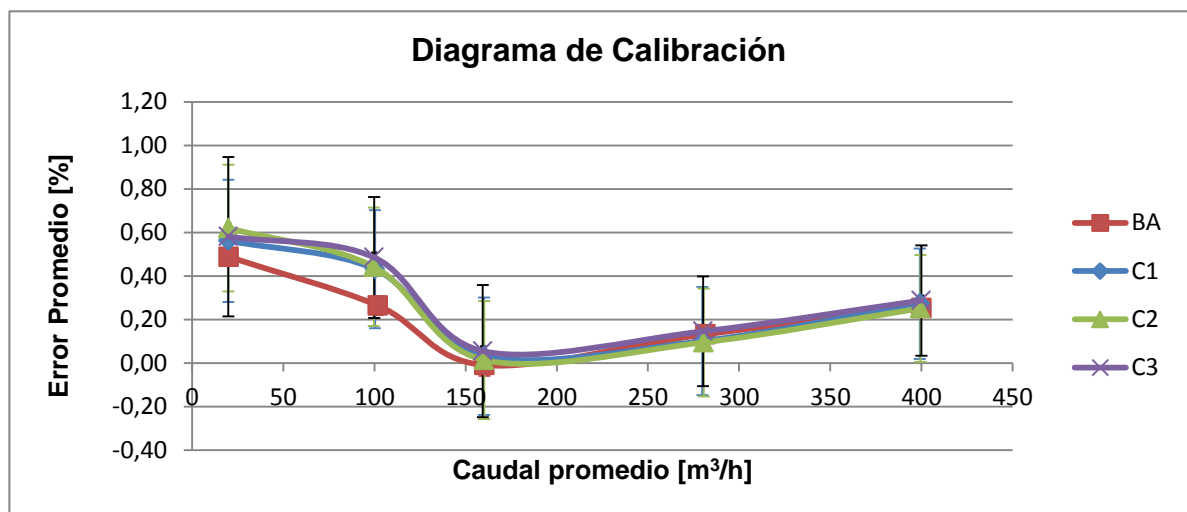


Figura 40. Diagrama de Calibración medidor tipo turbina.
Fuente: CDT de GAS.

De acuerdo a la gráfica anterior se observa una alta reproducibilidad, reflejada en la cercanía de los datos obtenidos en las calibraciones en el banco desarrollado, además, de acuerdo al criterio del error normalizado, se obtiene un desempeño satisfactorio en todos los puntos de calibración.

5.2.2 Resultados medidor de gas tipo rotativo.

Características del medidor:

Ítem	Especificación
Fabricante:	Dresser
Designación	2M
Qmin:	3 m ³ /h
Qmax:	65 m ³ /h
Kfactor:	52209,21 pulso/m ³
Tipo de señal:	Colector abierto
Estado del medidor:	Usado

Tabla 41. Características del medidor de gas tipo rotativo.
Fuente: CDT de GAS.

Como resultado de las calibraciones se tiene los siguientes datos:

Caudal Promedio [m ³ /h]	Volumen de Prueba [m ³]	Error Promedio [%]	Desviación Estándar [%]	U [%]	k --
3,0	0,17	1,31	0,08	0,25	2,00
16,0	0,80	1,38	0,01	0,22	1,97
26,0	1,30	1,37	0,01	0,22	1,97
45,1	2,28	1,31	0,00	0,22	1,97
65,7	3,25	1,53	0,01	0,22	1,97

Tabla 42. Resultados de calibración banco de alto caudal, medidor tipo rotativo.
Fuente: CDT de GAS.

Caudal Promedio [m ³ /h]	Volumen de Prueba [m ³]	Error Promedio [%]	Desviación Estándar [%]	U [%]	k --	E _n
3,2	0,50	1,58	0,02	0,27	1,97	0,74833
16,4	1,00	1,52	0,02	0,27	1,97	0,39259
26,2	1,30	1,55	0,01	0,27	1,97	0,50737
45,6	2,28	1,54	0,01	0,29	1,97	0,64592
64,7	3,25	1,68	0,00	0,29	1,97	0,40612

Tabla 43. Resultados de calibración 1 GMP650, medidor tipo rotativo.
Fuente: CDT de GAS.

Caudal Promedio [m ³ /h]	Volumen de Prueba [m ³]	Error Promedio [%]	Desviación Estándar [%]	U [%]	k --	E _n
3,2	0,50	1,58	0,01	0,27	1,97	0,74617
16,4	1,00	1,57	0,02	0,27	1,97	0,53302
26,2	1,30	1,56	0,01	0,27	1,97	0,53773
45,5	2,28	1,56	0,01	0,29	1,97	0,70249
64,6	3,25	1,66	0,01	0,29	1,97	0,36592

Tabla 44. Resultados de calibración 2 GMP650, medidor tipo rotativo.
Fuente: CDT de GAS.

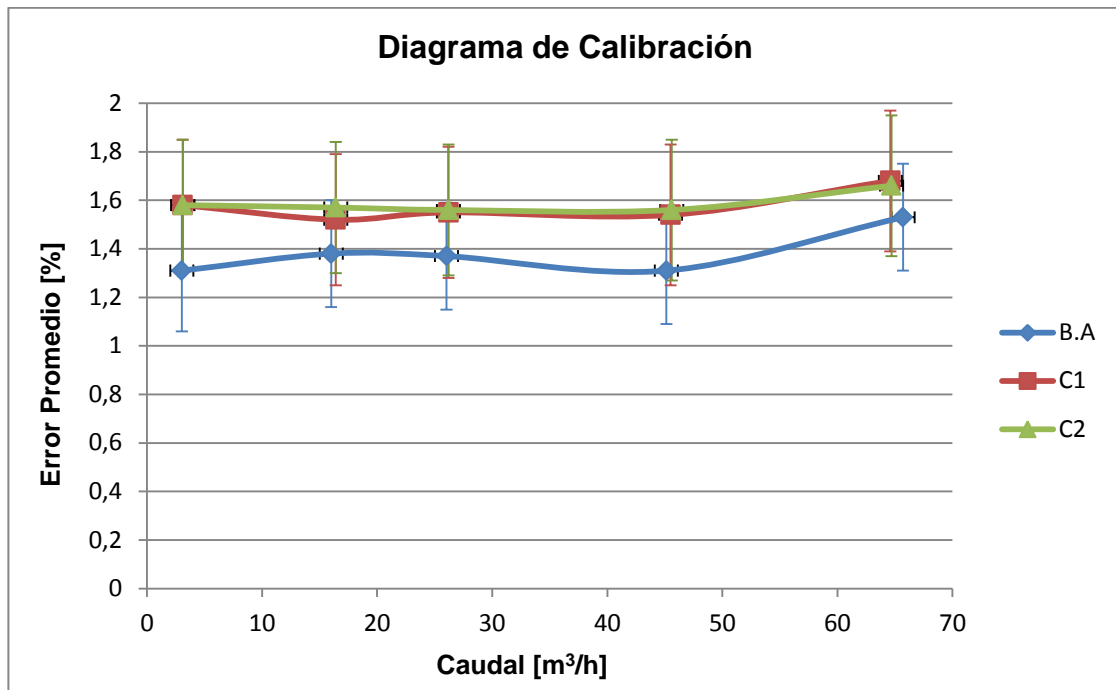


Figura 41. Diagrama de calibración medidor tipo rotativo.
Fuente: CDT de GAS.

Se observa que los resultados de las calibraciones entre el banco de alto caudal y las realizadas en el GMP650 difieren un poco pero de acuerdo al criterio del error normalizado los resultados se consideran satisfactorios.

Los resultados obtenidos indicaron desempeño satisfactorio, con un Error Normalizado inferior a Uno (1), sobre el intervalo de caudal de los medidores. De esta forma se pudo confirmar la reproducibilidad de la solución tecnológica desarrollada, garantizando resultados trazables al SI⁹.

⁹ Sistema Internacional de Unidades del Frances: Le Système International d'Unités.

5.3 Características Definitivas del Banco de Calibración.

Una vez finalizadas las actividades propuestas, se puede afirmar que el banco de calibración cuenta con las especificaciones y características que se resumen en la **Tabla 45**. En la **Figura 42** se puede apreciar el banco de calibración de medidores de gas tipo diafragma, rotativo y turbina.

Ítem	Especificaciones
Fluido de Calibración	Aire
Caudal mínimo	2 m ³ /h
Caudal Máximo	650 m ³ /h
Comunicación a PC	TCP/IP
Modo de Operación	Automatizado
Alimentación Eléctrica	Automatización: 110 VAC
	Etapa de Potencia: 220 VAC

Tabla 45. Características definitivas del Banco de Calibración.
Fuente: CDT de GAS.



Figura 42. Banco de calibración, GMP650.
Fuente: CDT de GAS.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

- La aplicación de la estimación de incertidumbre previa como herramienta de diseño (Diseño Metrológico), permitió especificar y seleccionar, los límites de control operativos para las magnitudes de influencia (presión y temperatura), y los instrumentos de medición necesarios para obtener con el Banco de Calibración resultados trazables, válidos y con incertidumbre acorde con los niveles requeridos.
- Se desarrolló una estrategia de control y adquisición de datos que requiere poca intervención del usuario, permite mantener la incertidumbre asociada al proceso de calibración en un rango aceptable, además se cuenta con una interfaz hombre-máquina desde la cual se puede hacer seguimiento al proceso y observar el valor de las distintas variables involucradas.
- Se documentó el proceso de automatización del banco de calibración de medidores de gas tipo diafragma, rotativo y turbina de forma organizada basado en las normas ISA propuestas para este fin.
- El desarrollo del Banco de Calibración (GMP650) representó para La corporación CDT de GAS una oportunidad de apropiar nuevos conocimientos en las tecnologías y métodos aplicados durante el proyecto y continuar contribuyendo al desarrollo tecnológico del sector del gas y la metrología de Fluidos en Colombia.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- [1] BIPM, JCGM 200:2008 *Vocabulario Internacional de Metrología Conceptos fundamentales y generales, y Términos asociados (VIM)*. Traducción al español del VIM 3^a.
- [2] Phisikalisch-Technische Bundesanstalt PTB, “*Contadores volumétricos de gas*”, Reglamento de Prueba Tomo 4, 1992.
- [3] *Instrumentation Reference Book*. 3rd ed. Elsevier science, Butterworth-heinneman Publications, 2003.
- [4] Roger C. Baker. *Flow Measurement Handbook*. United States of America: 2005.
- [5] Erik Tapias- Omar Naranjo, Corporación CDT de GAS. *Tecnologías de Medición de Fluidos. 5a Jornada técnica internacional de medición de fluidos*. Bogotá 2008.
- [6] D.W. Spitzer, Editor. *Flow Measurement, ISA-The Instrumentation, Systems, and Automation Society*. United States of America. 2001.
- [7] American National Standards Institute ANSI, “*B109.1 Diaphragm-Type Gas Displacement Meters (Under 500 Cubic Feet Per Hour Capacity)*”, 2000.
- [8] American National Standards Institute ANSI, “*B109.2 Diaphragm-Type Gas Displacement Meters (500 Cubic Feet Per Hour Capacity and Over)*”, 2000.
- [9] American National Standards Institute ANSI, “*B109.3 Rotary-Type Gas Displacement Meter*”, 2000.
- [10] AGA, Report NO. 7. *Measurement of Natural Gas by Turbine Meter*. 2006.
- [11] Norma Técnica Colombiana. NTC-ISO/IEC 17025. *Requisitos Generales para la Competencia de los Laboratorios de Ensayo y Calibración*. ICONTEC, 2005.
- [12] Norma Técnica Colombiana. NTC 2728. *Medidores de Gas Tipo Diafragma*. ICONTEC, 2005.

- [13] BIMP, JCGM 100:2008 *Evaluation of Measurement Data – Guide to the expression of Uncertainty in Measurement*.
- [14] Acerca De Opto 22. Documento Introductorio. Disponible: www.Opto22.Com
- [15] Ioannou P. and J. Sun. *Robust Adaptive Control*. Prentice Hall. 1996.
- [16] K. Astrom, B. Wittenmark. *Adaptative Control*. 2nd Edition. Addison-Wesley. 1994.
- [17] Ioannou P. and Fidan B. *Adaptive Control Tutorial*. The Society for Industrial and Applied Mathematics. 2006.
- [18] K. Ogata. *Sistemas de Control en Tiempo Discreto*. Segunda Edición. Pearson Educación.1998.
- [19] ONAC. “Alcance de Acreditación Corporación CDT de GAS”, Código de Acreditación: 10-LAB-013, 2010.
Disponible:<http://www.onac.org.co/directorios/anexos/archivos/obj01/ALCAN CESLABCALIBRA/archivocertificado-818-184.pdf>
- [20] Norma Técnica Colombiana. NTC-ISO/IEC 17043. *Evaluacion de la Conformidad. Requisitos Generales para los Ensayos de Aptitud*. ICONTEC.

Anexo A. Documentación del sistema automatizado.

En todo proyecto la documentación es una etapa indispensable que permite consignar información relevante del mismo. Se busca que la información que se registra pueda ser fácilmente entendida por personal que no estuvo en la elaboración del proyecto.

Este proyecto por su naturaleza se documenta bajo las recomendaciones normas ISA (Instrumentation, Systems, and Automation Society) destinadas para este:

- ISA 5.1. Instrumentation Symbols and Identification
- ISA 20. Specification Forms for Process Measurement and Control Instruments, Primary Elements, and Control Valves.

Bajo la aplicación de estas normas se desarrolla un grupo de documentos que está compuesto por:

- Diagrama de flujo de proceso (PFD).
- Diagrama de tubería e instrumentación (P&ID)
- Listado de Instrumentos
- Hojas de datos de los instrumentos
- Planos de conexiones eléctricas

Diagrama de Flujo de Proceso (PFD).

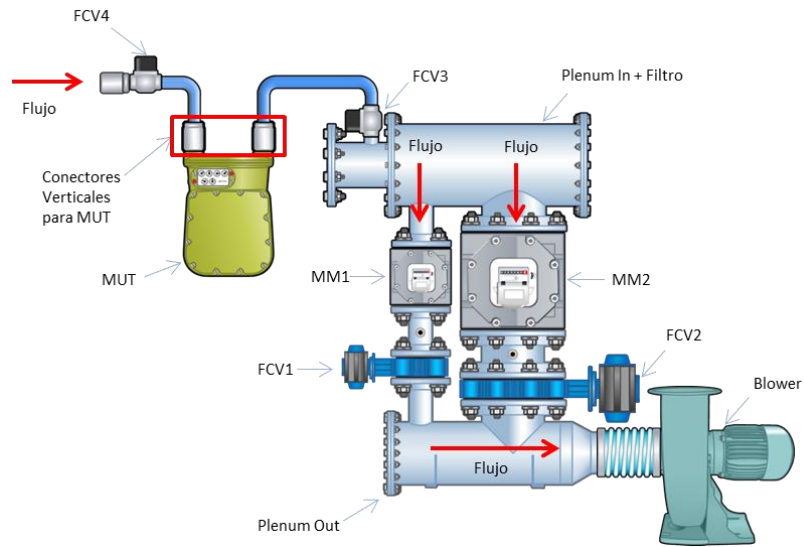


Diagrama de flujo del proceso, conexión vertical.
Fuente: CDT de GAS.

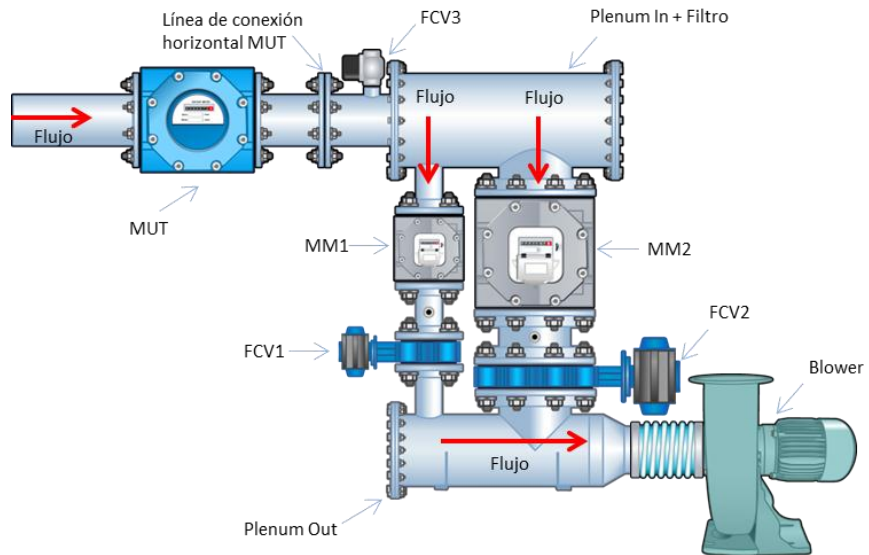
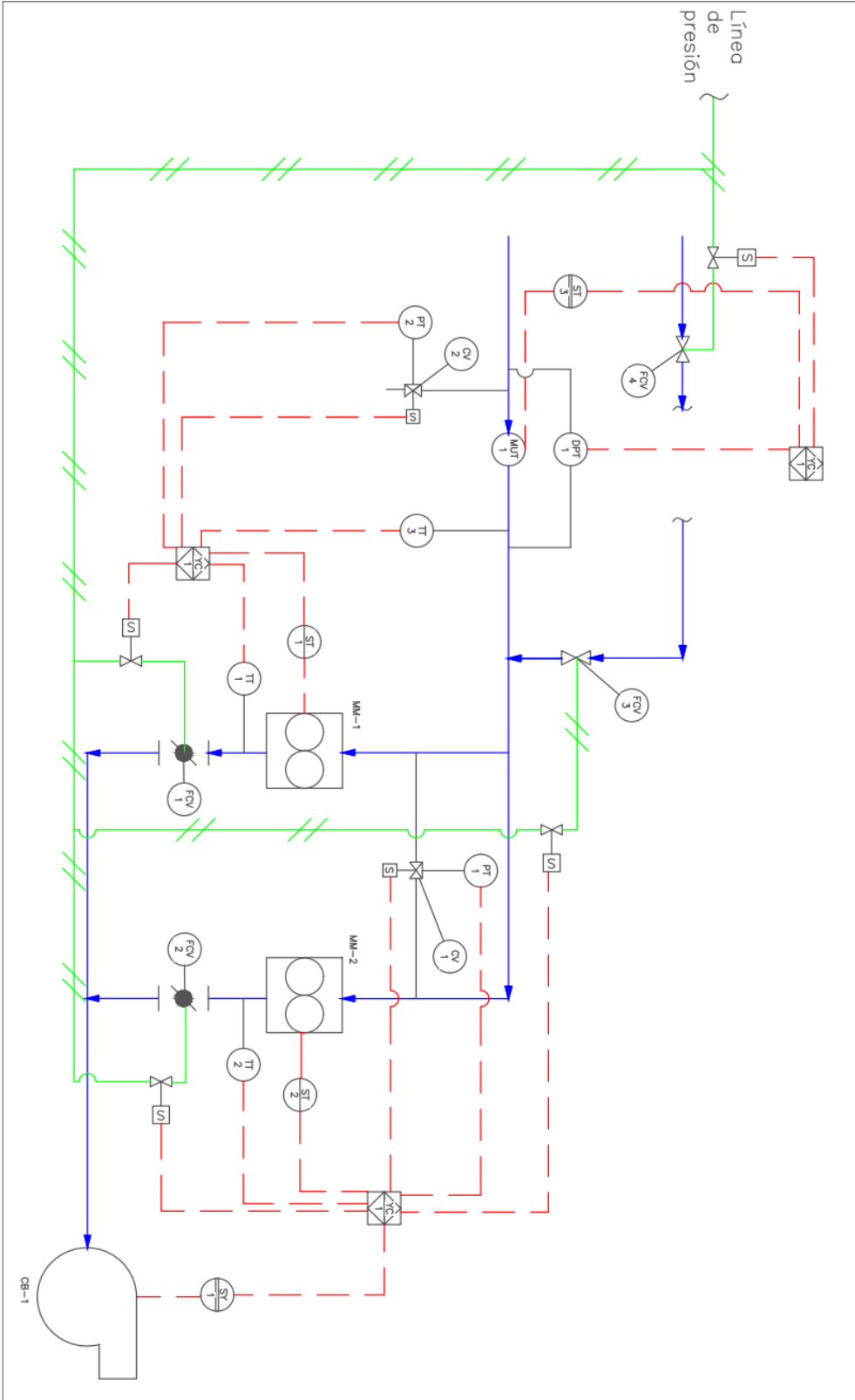


Diagrama de flujo del proceso, conexión horizontal.
Fuente: CDT de GAS.

Diagrama de Instrumentación y tuberías (P&ID).



Listado de Instrumentos y Actuadores.

ACCESORIO	TAG	UBICACIÓN/APLICACIÓN	SEÑAL	FABRICANTE	MODELO	ALCANCE ORIGINAL	ALCANCE DE MEDICIÓN	CLASE	DERIVA	ALIMENTACIÓN	#
BARÓMETRO	PT1	Presión Master Meters	RS-232	Honeywell	HPB100W2DA-AF	500-1200 mbar	800-1100 mbar	0,08 mbar	0,25 mbar /Año	12 VDC	1
	PT2	Presión Master Meters	RS-232	Honeywell	HPB100W2DA-AF	500-1200 mbar	800-1100 mbar	0,08 mbar	0,25 mbar /Año	13 VDC	2
TRANSMISOR DE PRESION DIFERENCIAL	DPT1	Presión Diferencial MUT (Meter under test)	4-20 mA	Dwyer	607-71	0-5 W.C	0-12,5 mbar	0,5 % F.S	± 0,5 % F.S	24 VDC	3
	TT1	Temperatura MM1	4-20 mA	Pyromation	R1T185L-384-03-00-45,T-450	-51 - 160°C	18-25°C	0,1°C	± 0,1°C	24 VDC	4
TRANSMISOR DE TEMPERATURA	TT2	Temperatura MM2	4-20 mA	Pyromation	R1T185L-384-05-00-45,T-450	-51 - 160°C	18-25°C	0,1°C	± 0,1°C	24 VDC	5
	TT3	Temperatura MUT	4-20 mA	Pyromation	R1T185L-384-03-00-45,T-450	-51 - 160°C	18-25°C	0,1°C	± 0,1°C	24 VDC	6
	TT4	Temperatura MUT	4-20 mA	Pyromation	R1T185L-384-05-00-45,T-450	-51 - 160°C	18-25°C	0,1°C	± 0,1°C	24 VDC	7
	ST1	Pulsos MM1	DIG. 12 V	Turck	MK15-12EX-PN/24vdc					12 VDC	8
AMPLIFICADOR DE PULSOS	ST2	Pulsos MM2	DIG. 12 V	Turck	MK15-12EX-PN/24vdc					12 VDC	9
	ST3	Pulsos MUT	DIG. 12 V	Turck	MK15-12EX-PN/24vdc					12 VDC	10
	OS1	Pulsos MUT	DIG. 12 V	Sunx	Fx-301					12 VDC	11
VÁLVULAS PILOTADAS NEUMÁTICAMENTE Y ACTUADAS ELÉCTRICAMENTE	FCV1	Válvula de MM1	110 VAC	BI-TORQ	AL-SOL-4120					110 VAC	12
	FCV2	Válvula de MM2	110 VAC	BI-TORQ	AL-SOL-4120					110 VAC	13
	FCV3	Válvula línea de diafragmas	110 VAC	AZ Pneumatic	322 ME					110 VAC	14
	FCV4	Válvula línea de diafragmas	110 VAC	AZ Pneumatic	322 ME					110 VAC	15
VÁLVULAS SOLENOIDES	FCV5	Válvula Prueba de fugas	110 VAC	AZ Pneumatic	322 ME					110 VAC	16
	CV1	Commuta barómetro entre MM1 y MM2	12 VDC	SMC	S070					12 VDC	17
	CV2	Commuta barómetro entre MUT y presión atmosférica	12 VDC	SMC	S070					12 VDC	18
VARIADOR DE FRECUENCIA	SY1	Alimentación del Blower	220 VAC	Omron	3GXM-2037					220 VAC	19
BLOWER CENTRIFUGO	CB1	Agua abajo Plenum de salida	220 VAC	Elektor	HRD-2T FU-95					220 VAC	20
Controlador	YC1	Control del sistema	Dig	Opto 22	Snap PAC R1-w					5 VDC	21

Hoja de Dato de los Instrumentos.

BARÓMETRO			
IDENTIFICACIÓN INSTRUMENTO			
Tipo:	Barómetro	Fabricante:	Honeywell
Modelo:	HPB100WDA-AF	TAG:	PT1
Serial:	63529	Fecha:	2010
CONFIGURACIÓN Y CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS			
Alcance:	500 mbar -1200 mbar	Div. Esc:	0,07 mbar
Clase:	0,06% F.S		
Ubicación:	Panel lateral	Estabilidad/Año:	0,02% F.S
CONDICIONES DE PROCESO			
Fluido Interior:	Aire	Presión de Operación:	Presión atmosférica 905 mbar.
Estado del fluido:	Gaseoso	Densidad de Operación:	1,2 Kg/m ³
Temperatura de Operación:	Temperatura Ambiente		
TRANSMISOR			
Aplicación:	Medición de presión en Master Meters	Indicador:	
Señal de Salida:	RS-232	Calibración:	
Alimentación Eléctrica:	12 VDC – 9 mA.	Margen Ajustable:	
Conexión Eléctrica:	Conxall P/N 6282-6sg-3xx	Clase:	0,06% F.S
Modo de Protección Ext.		Tiempo de Respuesta:	8,33 ms.
		Protocolo Digital:	RS-232
DATOS DE COMPRA			
Fabricante	Honeywell	Suministrador	
Modelo	HPB100WDA-AF	Requisición	
No. De Serie	63529		
OBSERVACIONES			

TRANSMISOR DE PRESIÓN DIFERENCIAL			
IDENTIFICACIÓN INSTRUMENTO			
Tipo:	Diferencial	Fabricante:	Dwyer
Modelo:	607-71	TAG:	DPT1
Serial:	842532	Fecha:	2010
CONFIGURACIÓN Y CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS			
Alcance:	0 mbar -12,5 mbar	Div. Esc:	
Clase:	0,25% F.S		
Ubicación:	Panel lateral	Estabilidad/Año:	1% F.S
CONDICIONES DE PROCESO			
Fluido Interior:	Aire	Presión de Operación:	Presión atmosférica 905 mbar..
Estado del fluido:	Gaseoso	Densidad de Operación:	1,2 Kg/m ³
Temperatura de Operación:	Temperatura Ambiente		
TRANSMISOR			
Aplicación:	Medición de presión diferencial en MUT	Indicador:	
Señal de Salida:	4-20 mA	Calibración:	
Alimentación Eléctrica:	24 VDC, 39 mA.	Margen Ajustable:	
Conexión Eléctrica:	Borna con tornillo	Clase:	0,25% F.S
Modo de Protección Ext.		Tiempo de Respuesta:	
		Protocolo Digital:	
DATOS DE COMPRA			
Fabricante	Dwyer	Suministrador	Dwyer Instrument Inc.
Modelo	607-71	Requisición	
No. De Serie	842532		
OBSERVACIONES			

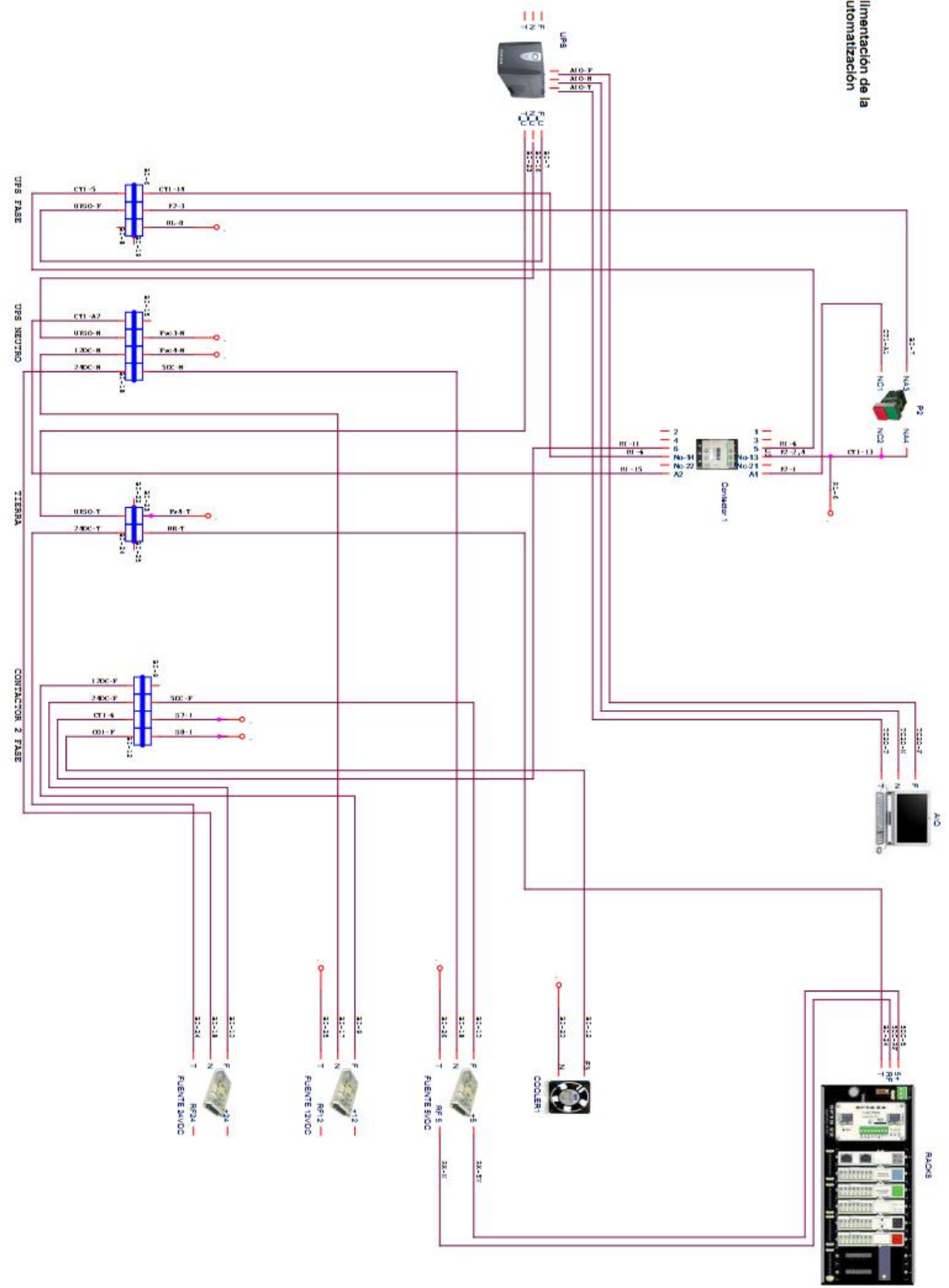
TRANSMISOR DE TEMPERATURA			
IDENTIFICACIÓN INSTRUMENTO			
Tipo:	Fabricante: Pyromation	Modelo: R1T185L348-03T450	TAG: DPT1
Serial: 7322548-3	Fecha: 2010		
CONFIGURACIÓN Y CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS			
Alcance: -50°C a 160°C	Div. Esc:	Clase: 0,1°C	
Ubicación: Salida Master Meter 1	Estabilidad/Año:	0,1°C	
CONDICIONES DE PROCESO			
Fluido Interior: Aire	Presión de Operación:	Presión atmosférica 905 mbar..	
Estado del fluido: Gaseoso	Densidad de Operación:	1,2 Kg/m ³	
Temperatura de Operación: Temperatura Ambiente			
TRANSMISOR			
Aplicación: Medición de temperatura MM1	Indicador:		
Señal de Salida: 4-20 mA	Calibración:		
Alimentación Eléctrica: 24 VDC	Margen Ajustable:	160 °C	
Conexión Eléctrica: 2 hilos	Clase:	0,1°C	
Modo de Protección Ext.	Tiempo de Respuesta:	1 s.	
	Protocolo Digital:		
DATOS DE COMPRA			
Fabricante: Pyromation	Suministrador:	Pyromation.	
Modelo: R1T185L348-03T450	Requisición:		
No. De Serie: 7322548-3			
OBSERVACIONES			

SENSOR DE FIBRA ÓPTICA			
IDENTIFICACIÓN INSTRUMENTO			
Tipo:	Fabricante: Sunx	Modelo: FX-301	TAG: OS1
Serial: 470009772	Fecha: 2010		
CONFIGURACIÓN Y CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS			
Fibra Óptica	FD-T80	Rango de Detección	22 mm.
Longitud	2m	Mínimo objeto detectado	0,3 mm.
CONDICIONES DE PROCESO			
Fluido Interior:	Aire	Presión de Operación:	Presión atmosférica 905 mbar..
Estado del fluido:	Gaseoso	Densidad de Operación:	1,2 Kg/m ³
Temperatura de Operación:	Temperatura Ambiente		
TRANSMISOR			
Aplicación:	Medición de pulsos MUT	Indicador:	Led, Rojo=Detección.
Señal de Salida:	Digital NPN, colector abierto	Calibración:	
Alimentación Eléctrica:	12 VDC, 45 mA	Margen Ajustable:	Sensibilidad
Conexión Eléctrica:	3 hilos	Clase:	
Modo de Protección Ext.		Tiempo de Respuesta:	260 µs
		Protocolo Digital:	Binario
DATOS DE COMPRA			
Fabricante	Sunx	Suministrador	
Modelo	FX-301	Requisición	
No. De Serie	470009772		
OBSERVACIONES			

AMPLIFICADOR DE PULSOS			
IDENTIFICACIÓN INSTRUMENTO			
Tipo:	Fabricante: Turck	Modelo: Mk15-12Ex0-PN/24V	TAG: SY1
Serial: 21455-716	Fecha: 2011		
CONFIGURACIÓN Y CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS			
No. De salidas	2, NPN-PNP	Ancho de Banda:	5 KHz
Señal detectada	NAMUR, Contacto seco		
CONDICIONES DE PROCESO			
Fluido Interior:	Aire	Presión de Operación:	Presión atmosférica 905 mbar..
Estado del fluido:	Gaseoso	Densidad de Operación:	1,2 Kg/m ³
Temperatura de Operación:	Temperatura Ambiente		
TRANSMISOR			
Aplicación:	Medición de pulsos MM1	Indicador:	Led, Naranja=DetECCIÓN.
Señal de Salida:	Digital NPN, colector abierto	Calibración:	
Alimentación Eléctrica:	12 VDC,	Margen Ajustable:	
Conexión Eléctrica:	3 hilos	Clase:	
Modo de Protección Ext.		Tiempo de Respuesta:	10 µs
		Protocolo Digital:	Binario
DATOS DE COMPRA			
Fabricante	Turck	Suministrador	
Modelo	Mk15-12Ex0-PN/24V	Requisición	
No. De Serie	21455-716		
OBSERVACIONES			

Diagrama de conexiones eléctricas.

Alimentación de la Automatización



Instrumentación Analógica

