
**AUTOMATIZACIÓN DEL SEGUNDO ANILLO DE CALIBRACIÓN DEL MÓDULO
DE FLUJO DEL LABORATORIO DE INSTRUMENTACIÓN BASADO EN UN
PRUVER Y MEDIDOR DE FLUJO TIPO CORIOLIS**

**ANDREA MARCELA QUINTERO CARRILLO
JUAN SEBASTIÁN ANAYA RODRÍGUEZ**



**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA
ESCUELA DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRICA Y ELECTRÓNICA
BUCARAMANGA, COLOMBIA**

2019

**AUTOMATIZACIÓN DEL SEGUNDO ANILLO DE CALIBRACIÓN DEL MÓDULO
DE FLUJO DEL LABORATORIO DE INSTRUMENTACIÓN BASADO EN UN
PRUVER Y MEDIDOR DE FLUJO TIPO CORIOLIS**

ANDREA MARCELA QUINTERO CARRILLO

JUAN SEBASTIÁN ANAYA RODRÍGUEZ

PROYECTO DE GRADO

DIRECTOR

MG. JUAN CARLOS MANTILLA SAAVEDRA.



UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA

ESCUELA DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

BUCARAMANGA, COLOMBIA

2019

Nota de aceptación

Firma del presidente del Jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Bucaramanga, septiembre de 2019

In Memorian

“La muerte no existe, la gente solo muere cuando la olvidan, Si puedes recordarme siempre estaré contigo”

Isabel Allende

A Rosa Elvia Carrillo Hernández, el ángel que me dio la vida, de quien aprendí el valor del amor y de los sueños, a ti querida madre te dedico cada paso de mi vida, cada sueño y victoria cumplida, porque es por ti, por los valores que sembraste en mí que podré cumplirlos, tus consejos, enseñanzas son huellas imborrables en mi mente y corazón que me han hecho una mujer fuerte, con pleno conocimiento de que a pesar del largo y duro camino darse por vencido no es una posibilidad.

Mi guerrera de vida, me siento muy orgullosa y agradecida con Dios por darme la bendición de llamarte Mama.

Andrea Marcela Quintero Carrillo

A mi Padre Gerardo Anaya Díaz, quien me brindó su apoyo y cuidado en los primeros 12 años de mi vida antes de partir de este mundo.

Juan Sebastián Anaya Rodríguez

Dedicatoria

A Dios por iluminar mi vida y por todas las bendiciones y oportunidades que me ha brindado en mi proceso de formación como ser humano y profesional.

A mi padre Alirio Quintero y a mi hermana Mónica L. Quintero C. de quienes aprendí el valor de la disciplina y la perseverancia, su ejemplo de superación, humildad y sacrificio me han acompañado a lo largo de mi vida y mi carrera, junto con su apoyo y amor incondicional me han permitido cumplir una de las metas más importantes en mi vida.

A mis sobrinos Liam Santiago y Allison Rojas Quintero, quienes desde el primer día que mis ojos contemplaron la belleza de su existencia, se convirtieron en la fuerza que me impulsa a superarme a no dejarme vencer y a soñar en grande, mis chiquitos que la gracia y el favor de Dios los acompañen a donde quiera que vayan, los amo.

A mi novio Jonathan Mauricio Nova Becerra, por creer siempre en mí, su compañía, comprensión, cariño y amor en los momentos difíciles me dieron la fuerza para superar las adversidades y hoy realizarme como profesional.

A mis mejores amigos y hermanos de corazón Lisette Joanne Hernández, Andrés Felipe Rey y Jennifer Viviana Gil por brindarme su amistad y ayudarme cada día a cruzar con firmeza el camino de la superación.

Andrea Marcela Quintero Carrillo

El presente trabajo de grado se lo dedico a Dios que está presente en todos los momentos de mi vida, a mi madre por todo el apoyo para mi realización como profesional.

Juan Sebastián Anaya Rodríguez

Agradecimientos

A nuestro director, Mg. Juan Carlos Mantilla, por confiar en nuestras habilidades y motivarnos a explorar al máximo nuestro potencial como ingenieros.

A los ingenieros Leidy Olarte, Héctor Quintero, Jonathan Nova y Sebastián Melo por su asesoría para la resolución de dudas e inquietudes acerca de la realización de este proyecto.

A la Universidad Pontificia Bolivariana por abrirnos sus puertas para formarnos profesionalmente, a nuestros amigos y compañeros que nos acompañaron en este proceso y a nuestros profesores mil gracias, su orientación y compañía fueron piezas fundamentales para hacer de este sueño una realidad.

Andrea y Sebastián

Contenido

	Pág.
INTRODUCCIÓN	22
1. CARACTERÍSTICAS GENERALES.....	23
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	23
1.1.1 Justificación del Proyecto	24
2. OBJETIVOS	25
2.1 OBJETIVO GENERAL.....	25
2.2 Objetivos Específicos.....	25
3. MARCO TEÓRICO.....	26
3.1 ANTECEDENTE HISTÓRICO	26
3.2 DEFINICIÓN PROBADORES DE TUBERÍA DE DESPLAZAMIENTO MECÁNICO	26
3.2.1 Principio de Funcionamiento	30
3.3 EFECTO CORIOLIS	35
3.3.1 Efecto Coriolis en el Sensor de Flujo	35
3.3.2 Caudalímetros máscos Coriolis	36
3.4 SOFTWARE DE DESARROLLO DE SISTEMAS NI LABVIEW	39
3.4.1 Descripción	39
3.4.2 Áreas de Aplicación.....	39
4. ESTADO DEL ARTE.....	41

4.1 ASEGURAMIENTO METROLÓGICO Y TRAZABILIDAD DE LA INDUSTRIA DE GLP	41
4.2 CALIBRACIÓN DINÁMICA DE UN PROBADOR BIDIRECCIONAL	41
4.3 PRUEBA DE TURBINAS USANDO UN PROBADOR BIDIRECCIONAL.	42
4.4 REDISEÑO DEL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO Y TRANSPORTE DE CRUDOS DE LOS CAMPOS CULEBRA-YULEBRA-ANACONDA HACIA EL CPF.	43
4.5 VALIDACIÓN DEL USO DE LOS MEDIDORES DE FLUJO MÁSSICO TIPO CORIOLIS COMO PATRONES DE REFERENCIA EN APLICACIONES DE TRASFERENCIA DE CUSTODIA.	43
4.6 ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE MEDIDORES DE DESPLAZAMIENTO POSITIVO DE LA ESTACIÓN DE BOMBEO N°2 LUMBAQUI, Y MEDIDORES DE TIPO CORIOLIS DE LA ESTACIÓN SANSAHUARI EN SISTEMAS DE MEDICIÓN DE HIDROCARBUROS.....	44
5. ANTECEDENTES SEGUNDO ANILLO DE CALIBRACIÓN DEL MÓDULO DE FLUJO.....	46
5.1 FASE 1. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE PROBADOR BIDIRECCIONAL PARA MEDIDORES DE FLUJO DEL LABORATORIO DE INSTRUMENTACIÓN DE LA UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA CON BASE EN LAS NORMAS API	46
5.1.1 Criterios de diseño Para Probadores de Flujo	46
5.1.2 Parámetros de diseño del probador de flujo.....	46
5.2 FASE 2. COMPARACIÓN DOS TÉCNICAS DE MEDICIÓN DE FLUJO USANDO UN PROBADOR BIDIRECCIONAL Y UN SENSOR TIPO CORIOLIS.	47
5.3 ANTECEDENTES DEL ENTORNO INDUSTRIAL.....	47

5.3.1 Visita técnica AMB.....	47
6. REVISIÓN DE LAS CONDICIONES DE FUNCIONAMIENTO E INSTALACIÓN DEL SEGUNDO ANILLO DE CALIBRACIÓN DEL MÓDULO DE FLUJO	49
6.1 DESCRIPCIÓN DEL SEGUNDO ANILLO DE CALIBRACIÓN DEL MÓDULO DE FLUJO DEL LABORATORIO DE INSTRUMENTACIÓN DE LA UPB.....	49
6.1.1 Gabinete Eléctrico.....	49
6.1.2 Bomba centrífuga.....	51
6.1.3 Probador Bidireccional	53
6.1.4 Especificaciones técnicas Sensor Coriolis FCB430	64
6.1.5 P&ID Segundo Anillo de Calibración del Módulo de Flujo.....	65
6.1.6 Descripción Banco de Ensayo	66
6.2 REVISIÓN SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS INSTALADO EN EL SEGUNDO ANILLO DE CALIBRACIÓN DEL MÓDULO DE FLUJO	67
6.2.1 Descripción	67
6.2.2 Partes de un sistema DAQ	67
6.2.3 Módulos Instalados para la Adquisición de Datos del Módulo de Flujo.....	69
6.3 INSTALACIÓN SEGUNDO ANILLO DE CALIBRACIÓN DEL MÓDULO DE FLUJO.....	72
6.3.1 Relé de Estado Sólido SSR.....	72
6.3.2 Interruptores detectores.....	75
7. DISEÑO Y DESCRIPCIÓN DEL DIAGRAMA DE PROGRAMACIÓN DE LA HMI (INTERFAZ HUMANO MÁQUINA) EN LABVIEW	77
7.1 PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN.....	77

7.2 PROTOCOLO MODBBUS.....	77
7.2.1 Modbus RTU	78
7.3 PARÁMETROS DE COMUNICACIÓN MODBUS PARA EL VARIADOR DE VELOCIDAD	79
7.4 PRUEBAS PRELIMINARES DEL DISEÑO DE LA HMI.....	80
7.4.1 Electroválvulas.....	81
7.4.2 Sensores Magnéticos.....	81
7.4.3 Sensor Coriolis.....	82
7.4.4 Lectura y escritura de datos	83
7.4.5 Motobomba	83
7.5 DESCRIPCIÓN DEL DIAGRAMA DE PROGRAMACIÓN DE LA HMI (INTERFAZ HUMANO MAQUINA) EN LABVIEW	85
7.5.1 Válvulas Solenoides.....	85
7.5.2 Encendido, Apagado y Variación de las velocidades de la Motobomba.....	87
7.5.3 Selector de puerto	88
7.5.4 Cronometro	88
7.5.5 Animación de la HMI	90
7.5.6 Gráficas y Tabla de Datos con Fecha/Hora	91
7.5.7 Monitoreo.....	93
7.5.8 Información.....	94
7.5.9 Tabla de Convenciones	95
8. ANÁLISIS DE RESULTADOS	96
8.1 FLUJO VOLUMÉTRICO DEL SENSOR CORIOLIS	96

8.2 TIEMPOS DE RECORRIDO EN EL PROBADOR BIDIRECCIONAL TIPO ESFERA...	97
8.3 CARACTERIZACIÓN DEL SENSOR CORIOLIS	98
8.4 CARACTERIZACIÓN DEL PROBADOR BIDIRECCIONAL TIPO ESFERA	99
8.5 GRAFICAS SENSOR CORIOLIS Y PROBADOR BIDIRECCIONAL DE ESFERA RESPECTO A LA FRECUENCIA DE TRABAJO DE LA MOTOBOMBA.....	101
8.6 PRUEBAS DE VERIFICACIÓN REALIZADAS	103
8.6.1 Sensor Coriolis.....	103
8.6.2 Probador bidireccional de tipo esfera	104
8.6.3 Comparación de los métodos de medición	104
9. CONCLUSIONES	107
10. RECOMENDACIONES.....	107
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	109
APÉNDICES.....	114

Lista de figuras

	Pág.
<i>Figura 1.</i> Probador con Múltiples Detectores.....	28
<i>Figura 2.</i> Partes del PBTE.....	30
<i>Figura 3.</i> Probadores de sección de recta y sección doblada en forma de “U”	30
<i>Figura 4.</i> Probador Unidireccional en forma de “U”	32
<i>Figura 5.</i> Probador Bidireccional en forma de “U”	33
<i>Figura 6.</i> Probador Bidireccional de Pistón.	34
<i>Figura 7.</i> Medidor Coriolis Promass F200 de Endress +Hauser.....	35
<i>Figura 8.</i> Efecto coriolis en el Sensor de Flujo.	36
<i>Figura 9.</i> Caudalímetros Másicos.....	37
<i>Figura 10.</i> Demostración Efecto Coriolis.....	38
<i>Figura 11.</i> Visita técnica AMB	48
<i>Figura 12.</i> Variadores de Velocidad.....	49
<i>Figura 13.</i> Sistema de adquisición de Datos.	50
<i>Figura 14.</i> Diagrama Eléctrico del Tablero de Control.....	51
<i>Figura 15.</i> Motobomba Pedrollo	52
<i>Figura 16.</i> Modelo 3D Probador Bidireccional UPB	53
<i>Figura 17.</i> Probador Bidireccional UPB ya instalado	53
<i>Figura 18.</i> Probador Bidireccional Tipo Esfera.	54
<i>Figura 19.</i> Válvula de entrada y Válvula de salida	55

<i>Figura 20. Válvula de 4 vías.....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 21. Comparación de pulsos de ida y vuelta.</i>	<i>56</i>
<i>Figura 22. Distribuidor probador bidireccional.....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 23. Válvula solenoide Burkert.</i>	<i>59</i>
<i>Figura 24. Datos Técnicos Válvula Solenoide</i>	<i>60</i>
<i>Figura 25. Dimensiones válvula solenoide</i>	<i>60</i>
<i>Figura 26. Cámara de lanzamiento y pre carrera probado bidireccional</i>	<i>61</i>
<i>Figura 27. Sección Volumen calibrado</i>	<i>62</i>
<i>Figura 28. Especificaciones Técnicas CS1-U.</i>	<i>63</i>
<i>Figura 29. Sensor CS1-U.</i>	<i>63</i>
<i>Figura 30. Coriolis Master FCB430.....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 31. Modelo 3D. Estructura Sensor Coriolis.....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 32. P&ID del Segundo Anillo De Calibración del Módulo de Flujo.....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 33. Partes de un sistema DAQ</i>	<i>68</i>
<i>Figura 34. Sistema de Adquisición de Datos Usado en el Módulo de flujo</i>	<i>68</i>
<i>Figura 35. Chasis USB CompactDAQ.....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 36. Modulo análogo de corriente NI9203</i>	<i>70</i>
<i>Figura 37. Modulo NI-9421</i>	<i>70</i>
<i>Figura 38. Módulo NI-9472</i>	<i>71</i>
<i>Figura 39. Relé estado sólido</i>	<i>72</i>
<i>Figura 40. SSR (SO942460).....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 41. Especificaciones del SSR.....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 42. SSR instalado.....</i>	<i>74</i>

<i>Figura 43. Circuito Equivalente del CS1-U</i>	<i>75</i>
<i>Figura 44. Especificaciones Técnicas del Sensor CS1-U.</i>	<i>76</i>
<i>Figura 45. Una Relación de Red Maestro-Esclavo</i>	<i>77</i>
<i>Figura 46. Interfaz de prueba para las Válvulas.....</i>	<i>81</i>
<i>Figura 47. Interfaz de prueba para los sensores Magnéticos.....</i>	<i>82</i>
<i>Figura 48. Interfaz para manejo del Sensor de Tipo Coriolis</i>	<i>83</i>
<i>Figura 49. Lectura y Escritura de Datos.....</i>	<i>83</i>
<i>Figura 50. Botones para las diferentes frecuencias de la Motobomba.....</i>	<i>84</i>
<i>Figura 51 Diagrama de Programación Válvulas solenoides</i>	<i>85</i>
<i>Figura 52. Diagrama de Programación para el Cronometro</i>	<i>86</i>
<i>Figura 53. Botón de inicio y leds para verificar el estado de las válvulas y los sensores magnéticos</i>	<i>86</i>
<i>Figura 54. Frecuencias de trabajo, botones de encendido y apagado.</i>	<i>87</i>
<i>Figura 55. Diagrama de programación para el manejo de la motobomba</i>	<i>88</i>
<i>Figura 56. Selector de Puerto</i>	<i>88</i>
<i>Figura 57. Diagrama de Programación para el Cronometro,</i>	<i>89</i>
<i>Figura 58. Indicador del cronometro.....</i>	<i>90</i>
<i>Figura 59. Programación para la animación del proceso de la HMI.....</i>	<i>90</i>
<i>Figura 60. Animación en la HMI.</i>	<i>91</i>
<i>Figura 61. Diagrama de programación para la Tabla de Control.....</i>	<i>91</i>
<i>Figura 62. Diagrama de Programación para las Gráficas de los Datos.....</i>	<i>92</i>
<i>Figura 63. Gráficas y Tabla de Control en la HMI.</i>	<i>93</i>
<i>Figura 64. Monitoreo del Hardware en la HMI.</i>	<i>94</i>

<i>Figura 65.</i> Información sobre el manejo del segundo anillo del módulo de flujo en la HMI.	94
<i>Figura 66.</i> Tabla de convecciones HMI.	95
<i>Figura 67.</i> Caracterización del Sensor Tipo Coriolis.	99
<i>Figura 68.</i> Promedio de los tiempos de recorrido respecto a las Frecuencias de trabajo.	100
<i>Figura 69.</i> Comportamiento del Probador Bidireccional Tipo Esfera.	101
<i>Figura 70.</i> Gráfica comparativa entre el PBTE y el Sensor Coriolis.	102
<i>Figura 71.</i> Comparación Grafica del PBTE y el Sensor Tipo Coriolis.	106

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Descripción del banco de ensayo</i>	66
Tabla 2. <i>Tubería Banco de Ensayo</i>	66
Tabla 3. <i>Estructura de mensaje Modbus RTU</i>	79
Tabla 4. <i>Parámetros grupo 8 comunicación variador de frecuencia</i>	79
Tabla 5. <i>Flujo volumétrico (1) sensor coriolis</i>	96
Tabla 6. <i>Tiempos del Recorrido en el PBTE (1)</i>	97
Tabla 7. <i>Flujo volumétrico (1) PBTE.</i>	98
Tabla 8. <i>Caracterización del sensor Coriolis.</i>	98
Tabla 9. <i>Tabla de caracterización PBTE.</i>	100
Tabla 10. <i>Comparativa entre el PBTE y el Sensor Coriolis.</i>	102
Tabla 11. <i>Prueba de Recolección 20Hz Sensor Coriolis.</i>	103
Tabla 12. <i>Prueba de Recolección 20 Hz PBTE.</i>	104
Tabla 13. <i>Comparación de la Pruebas Sensor Coriolis</i>	104
Tabla 14. <i>Comparación de la Pruebas PBTE.</i>	105

Lista de apéndices

Pág.

Apéndice A. Tablas de datos flujo volumétrico Sensor Coriolis	114
Apéndice B. Tablas de datos flujo volumétrico Probador Bidireccional Tipo Esfera	117
Apéndice C. Reporte de las pruebas de verificación realizadas	123

Glosario

El gas natural (GN): es un combustible fósil extraído de yacimientos ubicados en el interior de la tierra y que es utilizado como fuente de energía para diferentes usos de tipo doméstico, industrial, comercial, incluida en estas aplicaciones la generación de energía eléctrica (OSINERGMIN, 2012).

Es decir, suministran información operativa al proceso y permiten controlar y optimizar los objetivos de productos y del proceso en sí. Si tuviéramos que mencionar palabras clave que definan el sistema HMI es: operar y observar. (Autycom, 2018).

Flujo Másico (Qm): Es la cantidad en masa de un fluido que fluye a través de cierta sección en un cierto intervalo de tiempo.

Qm: flujo másico en: [kg/s], [kg/h], [t/h], [lb/h]. (Academia Online, Medición de Flujo Volumétrico, 2018, (3)).

FLUJO Volumétrico (Qv): Es el volumen de un medio que se mueve a través de una sección transversal dentro de un período de tiempo dado.

Qv: flujo volumétrico en [m³/s], [l/min], [m³/h]. (Academia Online, Medición de Flujo Volumétrico, 2018, (3)).

Gas licuado del Petróleo (GLP): Es un hidrocarburo que se obtiene del proceso de refinación del petróleo o en el proceso de separación de los gases y las gasolinas contenidas en los líquidos de gas natural. El GLP se obtiene en estado gaseoso y se convierte en líquido mediante compresión y enfriamiento para facilitar su manejo y comercialización eléctrica. (OSINERGMIN, 2012).

HMI (Interfaz Humano-Máquina, la abreviación se debe por su nombre en inglés: Human-Machine Interface.): La función principal de los HMI es mostrar información en tiempo real,

proporcionar gráficos visuales y digeribles que aporten significado y contexto sobre el estado del motor, la válvula, niveles y demás parámetros de un determinado proceso.

Labview:(Acrónimo de Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench): Es una plataforma y entorno de desarrollo para diseñar sistemas, con un lenguaje de programación visual gráfico pensado para sistemas hardware y software de pruebas, control y diseño, simulado o real y embebido. (Wikipedia, 2017)

PBTE: Abreviatura de Probador Bidireccional Tipo Esfera.

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: AUTOMATIZACIÓN DEL SEGUNDO ANILLO DE CALIBRACIÓN DEL MÓDULO DE FLUJO DEL LABORATORIO DE INSTRUMENTACIÓN BASADO EN UN PRUVER Y MEDIDOR DE FLUJO TIPO CORIOLIS

AUTOR(ES): ANDREA MARCELA QUINTERO CARRILLO
JUAN SEBASTIÁN ANAYA RODRÍGUEZ

PROGRAMA: Facultad de Ingeniería Electrónica

DIRECTOR(A): JUAN CARLOS MANTILLA SAAVEDRA

RESUMEN

La automatización del proceso del segundo anillo de calibración del Módulo de Flujo basado en un probador bidireccional tipo esfera y un medidor de flujo tipo Coriolis que se encuentra en el laboratorio de instrumentación y control de la Universidad Pontificia Bolivariana (UPB), forma parte de un conjunto de políticas, estrategias y procesos que adelanta la universidad, para cumplir con los criterios de calidad que le permitan dar respuesta oportuna a los rápidos cambios que plantea el entorno académico de los distintos programas académicos que ofrece. Este documento presenta el concepto y el principio de funcionamiento de los dispositivos que componen el hardware del módulo mencionado anteriormente y de la manera como estos son empleados para la verificación de la medición de flujo volumétrico. Además, presenta el diseño, configuración e implementación de la interfaz humano-maquina (HMI), desde la cual se controlaran los procesos de medición del sensor Coriolis y del probador bidireccional de esfera.

PALABRAS CLAVE:

Probador Coriolis, flujo volumétrico. Bidireccional, Interfaz humano Maquina(HMI), Sensor

Vº Bº DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

15/10/2019

www.upbbga.edu.co/biblioteca/formatoi.php

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: AUTOMATION OF THE SECOND CALIBRATION RING INSTRUMENTATION OF THE LABORATORY FLOW MODULE BASED ON A PRUVER AND CORIOLIS TYPE FLOW METER.

AUTHOR(S): ANDREA MARCELA QUINTERO CARRILLO
JUAN SEBASTIÁN ANAYA RODRÍGUEZ

FACULTY: Facultad de Ingeniería Electrónica

DIRECTOR: JUAN CARLOS MANTILLA SAAVEDRA

ABSTRACT

The automation process of the second ring of calibration part of the flow module based on a bidirectional sphere type prover and a Coriolis flowmeter located in the laboratory of instrumentation and control in the Pontifical Bolivarian University (UPB) , is part of a group of politics, strategies and process in which university is bringing forward to achieve with all quality criteria required to allow an opportune response to the diverse changes in academic environment of the different academic programs offered. This document presents the concept and operating principle of all devices conforming the hardware installed in the module and how these are utilized to verify volumetric flow measurement. Furthermore, presents the design, configuration and implementation of the human-machine Interface (HMI), through which all process of the measurement of Coriolis flowmeter and bidirectional sphere type prover can be controlled.

KEYWORDS:

Bidirectional sphere type prover, HMI , Coriolis sensor, volumetric flow.

V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK

Introducción

Los adelantos tecnológicos e industriales en diversos campos han permitido el avance de la automatización de procesos. Una parte importante de esta rama de la electrónica es la instrumentalización y metrología, ya que, toda industria sin importar el tipo o magnitud de los procesos que maneje debe contar con un sistema de medición robusta y confiable que le permita garantizar la calidad, confiabilidad y precisión de todos los productos o servicios que ofrece.

La medición de diversas magnitudes de acuerdo a los requerimientos de cada proceso, es un mecanismo que permite tener una visión clara, simple y precisa, con el propósito de detectar las áreas críticas o áreas problema, además que, un control exhaustivo de las condiciones de operación normal permitirá que las organizaciones estén actualizando sus procesos, de manera que las empresas puedan aumentar su productividad.

Este proyecto surge por la necesidad de implementar la automatización del proceso del segundo anillo de calibración del Módulo de Flujo, basado en un probador bidireccional tipo esfera y un medidor de flujo tipo Coriolis, ubicado en el laboratorio de instrumentación y control de la UPB. Esto permitirá la realización de prácticas de instrumentación industrial que sirvan como guía para el aprendizaje y entrenamiento de los estudiantes de pregrado.

Para el desarrollo de este proyecto fue necesario realizar el estudio del concepto y principio de funcionamiento de los dispositivos que componen el hardware instalado en dicho Modulo, además presenta el proceso de diseño, configuración e implementación del interfaz humano –maquina (HMI) desde la cual se controlaran los procesos de medición de flujo másico tipo Coriolis y el probador bidireccional de esfera. Finalmente, se organizaron y evaluaron dichos resultados con el propósito de mostrar el desempeño del hardware de medición.

1. Características generales

1.1 Planteamiento del problema

La Universidad Pontificia Bolivariana cuenta con diversos laboratorios para la práctica y realización de montajes experimentales que permitan llevar la parte teórica y práctica de la mano. Sin embargo, los laboratorios se encuentran en proceso de actualización permanente de su infraestructura con la finalidad de estar al día con los requerimientos exigidos por el Ministerio de Educación para la formación de profesionales, el hecho de no cumplir con los mínimos exigidos podría tener un efecto negativo en el funcionamiento operativo de la institución, que de no ser debidamente controlado o actualizado puede llegar a bajar el rendimiento y la calidad de la Universidad.

En el caso específico del programa de Ingeniería Electrónica el laboratorio de Instrumentación siendo un laboratorio tan nuevo aún no cuenta con la infraestructura de la maquinaria apropiada que permita mediciones fiables que lleven a procesos de aprendizaje exitosos, refiriéndonos a sí mismo como es el caso del Módulo de Medición de flujo, en donde las dos fases ya implementadas se encuentran funcionando por separado y su fase dos de forma manual, lo que está generando retrasos en los procesos, altos costos y mediciones imprecisas que representan fallos en los procesos de aprendizaje.

Conscientes y conocedores de esta situación, se busca con la ejecución del presente proyecto automatizar los procesos de la fase 2 del Módulo de Flujo que se encuentra en el laboratorio de Instrumentación de la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga y capacitar a los

actores correspondientes en su funcionamiento para que este se convierta en una herramienta apropiada para procesos de aprendizaje en esta área de la Ingeniería.

1.1.1 Justificación del Proyecto

La puesta en marcha del proyecto permitirá modernizar la infraestructura del Módulo de flujo del laboratorio de electrónica industrial de la Universidad Pontificia Bolivariana, lo que se reflejará en el aumento del nivel de productividad con menos errores de medición y una notable disminución en los tiempos y costos del proceso.

El desarrollo de este proyecto será de gran impacto para la Facultad de Ingeniería Electrónica de la Universidad Pontificia Bolivariana ya que aportará una herramienta académica para llegar a procesos de aprendizaje exitosos.

2. Objetivos

2.1 Objetivo General

Automatizar la operación del probador bidireccional tipo esfera en el segundo anillo de calibración del módulo de flujo del laboratorio de instrumentación de la Universidad Pontificia Bolivariana.

2.2 Objetivos Específicos

- Implementar el acondicionamiento de señales entre el BCPS, la instrumentación del probador y el transmisor de flujo tipo Coriolis.
- Desarrollar la estrategia de Control y la HMI del probador bidireccional y el transmisor de flujo en el BCPS del módulo.
- Realizar la puesta en operación del segundo anillo de calibración del módulo de flujo.
- Desarrollar la guía de laboratorio de la operación del segundo anillo de calibración.

3. Marco teórico

3.1 Antecedente Histórico

La primera aproximación al probador para tuberías se originó en México en lo que hoy se conoce como “la corrida de diablos”. Hacia el año de 1958, en la compañía Shell se propuso la determinación del volumen de un tramo de tubería de alrededor de una milla de longitud, y luego seguir el movimiento del pistón a lo largo de este tramo, observando las lecturas del medidor al entrar y salir al tramo de tubería de “volumen conocido”. Fue en esa época cuando se inició la carrera por lograr diseños funcionales y de la exactitud adecuada para satisfacer los requerimientos de las transferencias de custodia entre particulares, de la metrología legal y de las mediciones con carácter fiscal.

En 1960 el American Petroleum Institute (API) publica una norma que detalla el uso, procedimientos y calibración de los medidores de desplazamiento positivo, en esta publicación se incluye al diseño desarrollado por la compañía Shell como un método alternativo para la calibración de medidores de desplazamiento positivo. (A.T.J, 2012)

3.2 Definición Probadores de tubería de desplazamiento mecánico

Es un tramo de tubería industrial, la cual puede ser totalmente recta o tener la forma de “U”. Los materiales utilizados en un probador deben cumplir con códigos aplicables a la clasificación de áreas, rangos de presión, temperatura y resistencia a la corrosión; las tuberías y accesorios deben garantizar la redondez y la lisura interna adecuadas para el probador. De acuerdo al material usado

en el probador se recomienda tener en cuenta una serie de recomendaciones de instalación dentro de la tubería de materiales que ayuden a reducir la corrosión y fricción que permitan prolongar la vida útil de la tubería y el desplazador(esfera).

Una de las ventajas de este tipo de probadores es que no es necesario interrumpir el flujo durante la determinación del MF (flujo másico).

Las partes principales que conforman un probador convencional de desplazamiento mecánico son:

Cámara de Lanzamiento: Esta cámara debe tener por lo menos dos (2) veces el diámetro comercial de la sección calibrada y deben estar ubicados en cada extremo del probador. Cada vez que el desplazador llega a un extremo del probador, la cámara disminuye la velocidad de este hasta que para, lo aloja y permite que el líquido siga fluyendo sin restricción alguna.

Cuando se invierte el sentido de flujo, éste empuja el desplazador fuera de la cámara, lanzándolo hacia la sección de volumen calibrado.

Sección de Carrera previa: Es la sección de tubería instalada entre la cámara de lanzamiento y la sección de Volumen Calibrado. Los mecanismos que retornan o invierten el sentido de flujo del desplazador tardan un tiempo en operar, tiempo durante el cual el flujo se encuentra dividido entre la entrada y salida del probador, causando que la totalidad del flujo que pasa por el medidor no sea igual a la totalidad del flujo que empuja al desplazador.

Sección de volumen calibrado: Esta sección está delimitada por dos interruptores detectores uno a cada extremo de la tubería calibrada. La cantidad de fluido (producto) que es desplazado entre los dos (2) detectores es el volumen de la sección calibrada del probador. Se pueden instalar varios interruptores detectores para tener más de un volumen calibrado.

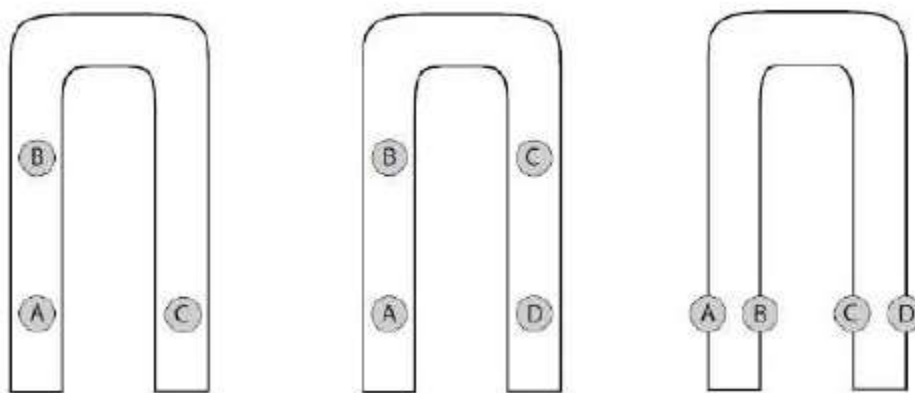


Figura 1. Probador con Múltiples Detectores

Fuente: Manual de medición de hidrocarburos y biocombustibles capítulo 4 sistemas probadores Ecopetrol 2013

Interruptores Detectores: Un interruptor detector es un dispositivo montado externamente al probador, el cual tiene un mecanismo que le permite detectar con la mayor precisión posible la entrada o salida del desplazador al comienzo y al final de la sección calibrada del probador.

Desplazador: El desplazador se inserta dentro de la tubería y su función es hacer un perfecto sello mecánico móvil con las paredes internas del probador y activar los detectores que demarcan la entrada y salida de la sección de volumen calibrado.

Existen dos tipos:

- De Esfera: Estos desplazadores son esferas inflables, fabricadas con diferentes materiales los más usados son: Neopreno, Nitrilo y Poliuretano. La ventaja de los desplazadores de esfera es que pueden ser usados en probadores rectos como en probadores doblados en “U”.
- De Pistón: Los desplazadores de pistón deben ser lo más livianos posible. Los materiales con que están hechos y sus sellos, deben ser compatibles con las características de los productos y químicos de la temperatura y presión que manejen. Son fabricados con Teflón, Viton, Poliuretano, Nitrilo, Buna o Neopreno.

Válvulas: Para que las pruebas sean válidas, el 100% del flujo que pasa por el medidor bajo prueba debe ser igual al 100% del flujo que pasa por el probador. Por tanto, todas las válvulas del sistema de medición (alineación brazos de medición, bypass del probador, cuatro vías y de drenajes del probador) que puedan causar que alguna porción del flujo que pasa por el medidor bajo prueba no pase por el probador, deben ser de doble aislamiento y purga con mecanismo que permita verificar la integridad total del sello.

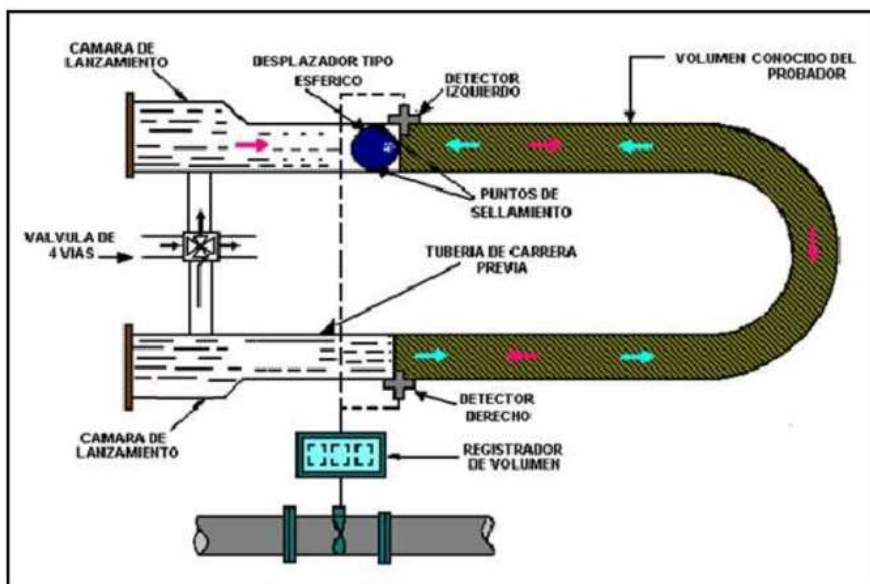


Figura 2. Partes del PBTE.

Fuente: Manual de medición de hidrocarburos y biocombustibles capítulo 4 sistemas probadores Ecopetrol 2013

3.2.1 Principio de Funcionamiento

En la siguiente figura se muestran los dos tipos de probadores bidireccionales, pistón de tubo recto y de esfera doblado en forma de “U”.

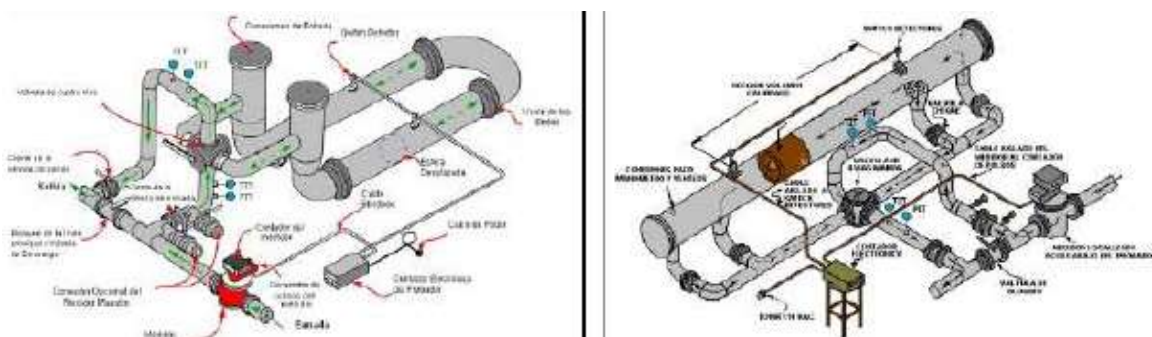


Figura 3. Probadores de sección de recta y sección doblada en forma de “U”

Fuente: Manual de medición de hidrocarburos y biocombustibles capítulo 4 sistemas probadores Ecopetrol 2013

A través del medidor y del probador se hace fluir un líquido, éste empuja el desplazador sin que el líquido pase a través de él, generando una caída de presión y desplazando el fluido contenido en el tubo probador aguas abajo del desplazador.

Cuando el desplazador llega al inicio de la sección de volumen calibrado, activa el detector de entrada que habilita a un dispositivo para contar los pulsos generados por el medidor. El conteo de pulsos continúa hasta que el desplazador activa el detector de salida al salir de la sección de volumen calibrado.

Cuando el desplazador llega al extremo del probador, debe haber algún mecanismo o cámara de mayor diámetro que permita disminuir su velocidad y alojarlo permitiendo que el líquido salga fluyendo sin restricción alguna.

Una vez que el desplazador está dentro de la cámara, hay dos formas de retornar el desplazador: por medio de algún mecanismo nuevamente a la posición inicial aguas arriba de la sección de volumen calibrado (probador unidireccional), o invertir el sentido del flujo por medio de una válvula de cuatro vías (probador bidireccional).

3.2.1.1 Probador Unidireccional de Esfera

Son probadores en forma de “U” donde la esfera viaja en una única dirección. Posee un sistema de tuberías y un sistema que le permite regresar a la esfera a su posición original.

El volumen base de un probador unidireccional es el volumen de la sección calibrada entre los detectores corregido a las condiciones estándar de temperatura y presión.

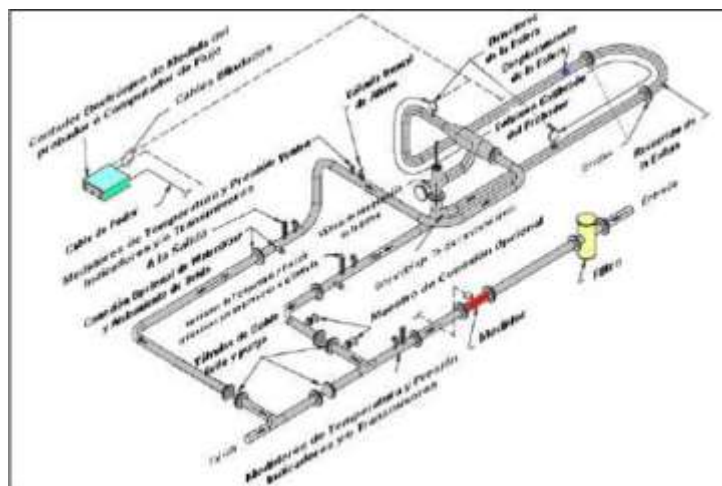


Figura 4. Probador Unidireccional en forma de “U”

Fuente: Tomado de API MPMS 4.

3.2.1.2 Probadores Bidireccionales de Esfera

Son probadores de tubería doblados en forma de “U”, donde el desplazador de esfera viaja a través de la sección calibrada primero en un sentido y luego de regreso en el sentido contrario.

El volumen base de un probador bidireccional es la suma del volumen de la sección calibrada primero en un sentido y luego en el otro, corregido a las condiciones estándar de temperatura y presión. Estos probadores requieren de dos cámaras de lanzamiento, una en cada extremo del probador, para frenar la velocidad del desplazador y alojarlo cuando este llega o para lanzarlo cuando se invierte el sentido del flujo.

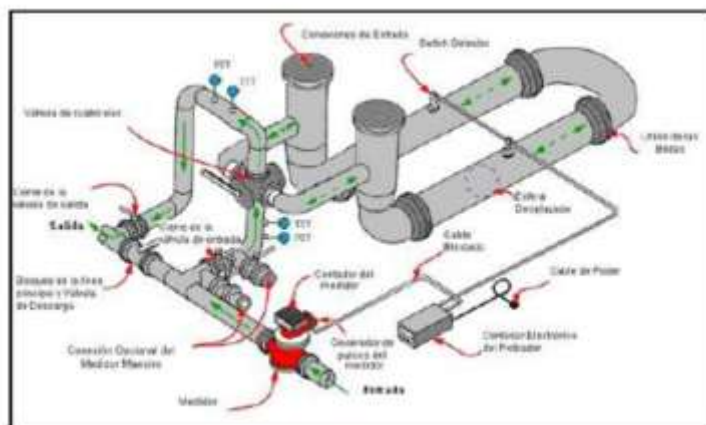


Figura 5. Probador Bidireccional en forma de “U”

Fuente: Manual de medición de hidrocarburos y biocombustibles capítulo 4 sistemas probadores Ecopetrol 2013

En el diseño vertical y oblicuo, el desplazador frena y arranca por efecto de la fuerza de gravedad; en las de diseño horizontal se debe un sistema amortiguador o una rampa inclinada. El sentido del flujo a través del probador se controla con una válvula de cuatro vías. El diámetro de la válvula está determinado por la velocidad del fluido que puede pasar por ella sin dañar los empaques de los sellos.

3.2.1.3 Probadores Bidireccionales de Pistón

Es una sección de tubería recta, el desplazador es un pistón y no posee cámaras de lanzamiento.

Los probadores de pistón son ideales para lo siguiente:

- Cuando se desean bajas velocidades.
- Temperaturas extremas.
- Incompatibilidad del líquido manejado con el material de la esfera.

El tubo probador termina en cada extremo con una brida ciega, antes de las cuales hay conexiones separadas de entrada y salida en un diámetro menor. Las tuberías de entrada deben estar cerca de la brida ciega en cada extremo. Las tuberías de salida deben estar alejadas de las tuberías de entrada por lo menos una distancia mayor a la longitud del desplazador.

En las tuberías de salida se instala una válvula cheque para permitir que el flujo salga sin interrupción cuando el pistón viaja la brida ciega del probador. Cuando el flujo se reversa, la válvula cheque se cierra impidiendo el paso del flujo por la tubería de salida y causando que el flujo fluya por la tubería de entrada empujando el desplazador hacia la sección de volumen calibrado. El sentido de giro de la válvula de cuatro vías determina la dirección del flujo. (Institute American Petroleum)

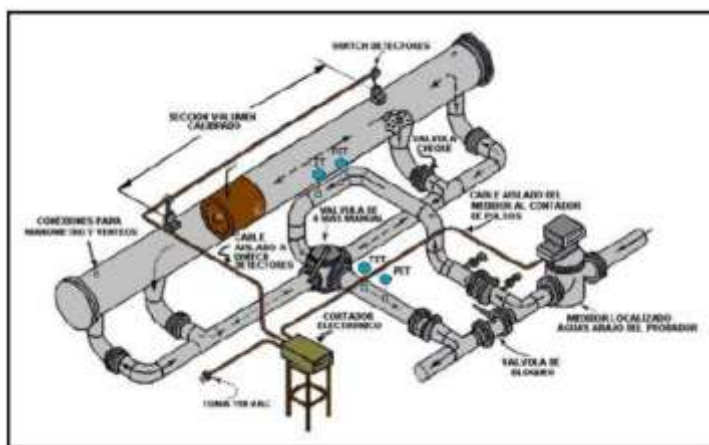


Figura 6. Probador Bidireccional de Pistón.

Fuente: API MPMS 4.2.

3.3 Efecto Coriolis

Se trata de la fuerza producida por la rotación de la Tierra en el espacio, que tiende a desviar la trayectoria de los objetos que se desplazan sobre la superficie terrestre; a la derecha en el hemisferio norte y a la izquierda, en el sur. Esta fuerza no sólo aparece durante la rotación de la Tierra sino, en general, para cualquier objeto con masa que se desplaza a una determinada velocidad sobre otro objeto en rotación. Rotación. (Ecopetrol, 2013)

Esta teoría dice que un objeto se mueve en un sistema de coordenadas que, rota con una velocidad angular, este experimenta una fuerza Coriolis proporcional a la masa y velocidad del objeto, así como la velocidad angular del sistema. (Aitunexpo, 2007)



Figura 7. Medidor Coriolis Promass F200 de Endress +Hauser.

Fuente: Aitunexpo. (sf). Funcionamiento. Disponible en: <http://aitunexpo.blogspot.com.co/2007/05/principio-de-funcionamiento.html>

3.3.1 Efecto Coriolis en el Sensor de Flujo

Los Fluidos que pasan a través del sensor son forzados a adquirir el movimiento vertical del tubo que vibra. Cuando el tubo se está moviendo hacia arriba durante la mitad del ciclo de vibración (Figura 8.1), el fluido que está pasando a través del tubo ejerce una fuerza opuesta al movimiento hacia arriba y tiende a empujar el tubo hacia abajo. Una vez que el fluido atraviesa la curva y

comienza a salir del sensor el fluido empuja el tubo hacia arriba (Figura 8.2). Estos dos movimientos hacen que los tubos se retuerzan (Figura 8.3). Cuando el tubo se está moviendo hacia abajo en la segunda mitad del ciclo de vibración este se retuerce o deforma en dirección opuesta al movimiento. Esta característica es llamada efecto Coriolis. (Aitunexpo, 2007)

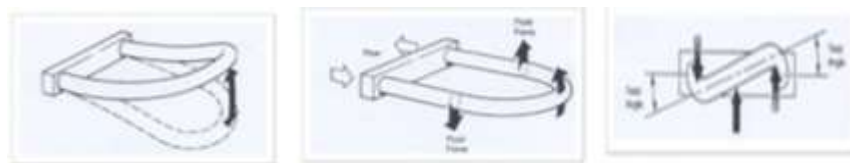


Figura 8. Efecto coriolis en el Sensor de Flujo.

Fuente: Manual de medición de hidrocarburos y biocombustibles capítulo 4 sistemas probadores Ecopetrol 2013

3.3.2 Caudalímetros másicos Coriolis

En muchos ámbitos de la industria es más interesante medir caudales másicos que caudales volumétricos. En algunos procesos de la industria alimentaria, por ejemplo, productos como las pastas, las pulpas o el yogur se suelen envasar por peso, y no por volumen. Por este motivo, en las etiquetas de los envases de estos productos se informa al consumidor del peso del producto en lugar de su volumen. El motivo de ello es que el volumen de la mayoría de líquidos puede variar notablemente por influencia de las condiciones físicas de presión, temperatura y densidad. (Villajulca, 2010).

El modo habitual de determinar la masa de un cuerpo es pesarlo. Pero desde el punto de vista de la ingeniería surgen grandes dificultades cuando se intenta pesar directamente una masa que fluye de manera continua por un sistema de tuberías. Sin embargo, en las últimas décadas ha aparecido un principio de medición que posibilita medir de forma directa y continúa caudales másicos en tuberías, a saber: la medición de caudales másicos por principio Coriolis. En algunas aplicaciones

es más razonable aplicar este principio que determinar la masa por métodos indirectos a partir de la medición del caudal volumétrico y la densidad (volumen x densidad = masa).



Figura 9. Caudalímetros Másicos

Fuente: Instrumentación y Control. Principios de medición. Disponible en:
<http://www.instrumentacionycontrol.net/cursos-libres/instrumentacion/medicion-flujos-pract/item/326-caudalimetros-m%C3%A1sicos-coriolis-principio-de-medicion.html>

3.3.2.1 Principio de medición

La primera descripción de este principio se atribuye comúnmente al físico y matemático francés por cuyo nombre se conoce: Gaspar Gustave de Coriolis (1792-1843). El efecto ocurre solamente en sistemas en rotación, por ejemplo, en tirovivos o en la superficie en rotación de nuestro propio planeta; pero no debe confundirse con la fuerza centrífuga. Aunque el uso del término "fuerza de Coriolis" está muy difundido, la descripción de dicha fuerza suele ser complicada, y mucho su explicación. Esta fuerza aparece cuando en un sistema se superponen movimientos en línea recta y movimientos rotativos. Siguiendo la segunda ley de Newton la cual establece que en un sistema donde la fuerza que interviene sobre un cuerpo de masa (m) y es trasladado con una aceleración (a), está gobernada por la ecuación.

$$F = m * a$$

Pero esta ley cambia por el intercambio de velocidades que sufre el fluido al entrar en un bucle el fluido tendrá una velocidad angular (w), proporcionando la siguiente aceleración llamada Coriolis. (J. ACEVEDO SÁNCHEZ, Instrumentación ,2006, edición Díaz de Santos (10)).

$$a_c = 2 * v * w$$

En términos matemáticos, el valor de la fuerza de Coriolis (F_c) es directamente proporcional a la masa en movimiento (m), a la velocidad angular de rotación (w) y a la velocidad radial (V_r) en el sistema en rotación (Endress+Hauser, 2018):

$$F_c = 2 * m * w * V_r$$

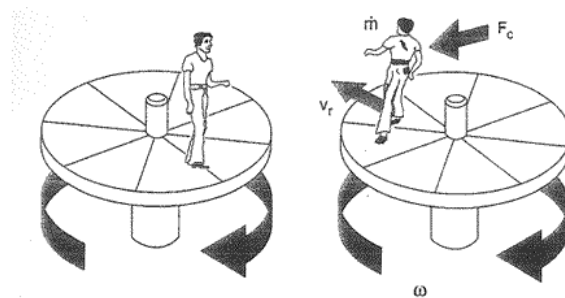


Figura 10. Demostración Efecto Coriolis

Fuente: Endress+Hauser. (2018). Caudalímetros másicos por efecto Coriolis. Disponible en: <https://www.es.endress.com/es/instrumentacion-campo/medicion-caudal/caudalimetros-masicos-coriolis>

Cada caudalímetro por efecto Coriolis dispone de uno o más tubos de medición que oscilan artificialmente a causa de un excitador. Cuando un fluido pasa por el tubo de medición, se superpone una torsión a dichas oscilaciones a causa de la inercia del fluido. Dos sensores detectan

este cambio en la oscilación del tubo en tiempo y espacio como "desfase". Este desfase es una medida directa del caudal másico.

Además, la densidad de fluido también puede determinarse a partir de la frecuencia de oscilación de los tubos de medición. La temperatura del tubo de medición se registra del mismo modo para compensar las influencias térmicas. La temperatura de proceso que de aquí se deriva está disponible en una señal de salida adicional.

3.4 Software de Desarrollo de Sistemas NI Labview

3.4.1 Descripción

LabVIEW es un entorno de desarrollo integrado y diseñado específicamente para ingenieros y científicos. Nativo de LabVIEW es un lenguaje de programación gráfica (G) que utiliza un modelo de flujo de datos en lugar de líneas secuenciales de código de texto, lo que le permite escribir código funcional utilizando un diseño visual que se asemeja a su proceso de pensamiento. Esto significa que se emplea menos tiempo preocupándose por el por punto y coma y la sintaxis y más tiempo resolviendo los problemas que importan. (LabView, 2017)

3.4.2 Áreas de Aplicación

- Automatizar medidas y Procesar datos de señal (Mida cualquier sensor en cualquier bus.)
- Control de instrumentos (Automatica fácilmente cualquier instrumento autónomo.)
- Automatizar Sistemas de Pruebas y validación. (Reduzca el tiempo de desarrollo del sistema de pruebas y analice los resultados de las pruebas.)

- Diseñar Sistemas de Monitoreo y Control Embebidos. (Genere prototipos con tecnología FPGA.)
- Enseñanza Académica. (Enseñe a estudiantes en el aula o el laboratorio con sistemas del mundo real, usando LabVIEW para incrementar su grado de descubrimiento, desarrollar soluciones más rápido y mejorar su éxito.)

4. Estado del Arte

4.1 Aseguramiento Metrológico y Trazabilidad de la industria de GLP

El gas licuado de petróleo (GLP) ha sido de vital importancia para la industria en Colombia ya que desde la llegada de este servicio al país se ha dado la oportunidad de crear más circuitos de distribución para llegar a las zonas más apartadas del sector rural.

Debido a este desarrollo se hace necesario cumplir con las normas metrológicas requeridas para cada dispositivo instalado en cada nuevo circuito para transportar este gas.

El objetivo principal de este proyecto es evaluar el estado del arte de la metrología del GLP con el propósito de plantear alternativas que permiten una mayor exactitud y confianza para las mediciones.

En este aspecto se hace necesario revisar el probador bidireccional tipo esfera quien se encarga del control de flujo de gas, el cual se debe transportar para llevar a los hogares y cumplir con este servicio, además que le permite calibrarlo para mantener un caudal constante.

Este proceso se realizó junto con las entidades de ECOPETROL y el Centro de Desarrollo Técnico de Gas

4.2 Calibración Dinámica de un probador bidireccional

Los probadores bidireccionales datan de la década de los cincuenta donde se empezaron a desarrollar y a emitir las primeras normas para estas herramientas de medición y calibración de flujo o caudal, y su aplicación para transporte de líquido y gases.

En este artículo se detalla la metodología para comparar el funcionamiento de un probador del tipo bidireccional contra el patrón nacional de flujo de líquidos, mantenido en la División de Flujo y Volumen del CENAM. Como patrones de transferencia se emplean medidores tipo turbina y de desplazamiento positivo logrando cubrir un alcance de medición desde 500 L/min hasta 6 000 L/min. Se presenta una comparación contra los resultados obtenidos mediante la técnica de calibración tradicional conocida como de desplazamiento de agua.

El propósito de este proyecto es conocer la influencia que ejercen las altas velocidades sobre la esfera o pistón y en el volumen calibrado del probador.

4.3 Prueba de Turbinas usando un Probador Bidireccional.

La adecuada medición de la cantidad de combustible que pasa por el oleoducto de la Refinadora Costarricense de Petróleo, permite un estricto control sobre el transporte de los diferentes productos que se manejan evitando de esta manera pérdidas significativas por robos o fallas.

Las mediciones de la cantidad de combustible que maneja la refinería se realizan a través de unas turbinas medidoras de flujo, conectadas a un PLC.

En el proyecto se propone el uso de un probador bidireccional para los procesos de medición y calibración del volumen medido por la turbina y el desarrollo de un sistema que permitiera la calibración de las turbinas desde una PC, bajo las normas del API; que se ejecutara sobre una plataforma de monitoreo de proceso industriales llamada RSView32, y que usara la red de área local industrial DH+ para conectar la PC con el PLC de la turbina. Además, el sistema debía crear una base de datos con los resultados de cada calibración, para hacer análisis en tiempo real de las turbinas.

4.4 Rediseño del Sistema de Almacenamiento y Transporte de Crudos de los Campos Culebra-Yulebra-Anaconda hacia el CPF.

En este proyecto se pretende realizar el rediseño de los sistemas de transporte y almacenamiento y transporte del crudo de los campos de crudo de Culebra, Yulebra y Anaconda, ya que son lugares de vital importancia para la empresa petrolera.

Para ello se revisaron los instrumentos, tuberías e instrumentos de perforación para constatar el estado en que se encuentra y si era necesario sustituir algunos de ellos, por lo cual se hizo un chequeo de elemento por elemento que componen cada sistema de la refinería y de los posos de captación.

Uno de los implementos a evaluar fue el probador bidireccional de esfera con desplazamiento positivo, constatando que se cumplieran las normas de uso, pero se recomendó realizar un proceso de automatización más avanzado para ser aún más preciso en la toma de medición de flujo y la calibración de caudal.

4.5 Validación del uso de los medidores de Flujo Másico Tipo Coriolis como patrones de referencia en Aplicaciones de Trasferencia de Custodia.

Los múltiples procesos de transferencia de custodia en la industria del petróleo, demandan el uso de sistemas de medición de caudal con características metrológicas especiales para cumplir con los requisitos establecidos en las normas de referencia y las necesidades de los usuarios.

Los medidores de flujo másico tipo Coriolis son empleados por la industria del petróleo en aplicaciones de transferencia de custodia, crudo y productos terminados tanto en masa como en volumen, y como patrones de referencia para la calibración de medidores de flujo.

Los medidores utilizados en el estudio fueron evaluados inicialmente con el Patrón Nacional para Flujo de Líquidos, establecido en México, por el método gravimétrico con agua como fluido de trabajo. Se efectuó la validación de su comportamiento metrológico en sitio empleando un probador bidireccional y productos derivados del petróleo como fluido de trabajo. Las características determinadas fueron: el error, el factor del medidor (MF) y el K-factor a diferentes flujos másicos.

4.6 Estudio comparativo entre medidores de desplazamiento positivo de la estación de bombeo N°2 LUMBAQUI, y medidores de Tipo Coriolis de la Estación SANSAHUARI en sistemas de Medición de Hidrocarburos.

Las mediciones de volumen de fluidos hidrocarburos toman gran importancia en actividades de transferencia de custodia, siendo este un proceso en donde se requiere una correcta medición, ya que cada volumen de fluido representa un valor económico, es de vital importancia seleccionar un sistema de medición confiable, que genere una mayor exactitud en los procesos, de manera que no existan pérdidas económicas y brinden la menor incertidumbre posible en las mediciones.

Por tanto, en el estudio planteado se realizó un estudio comparativo entre los medidores de desplazamiento positivo y medidores de tipo Coriolis, una vez analizada y evaluada la información se concluyó que los medidores de tipo Coriolis son la mejor alternativa para la medición fiscalizada

de hidrocarburos, ya que presentan mejores características técnicas, operativas y económicas, lo que permitirá realizar procesos de transferencia de crudo, de una manera más confiable y segura.

5. Antecedentes Segundo Anillo de calibración del módulo de flujo

5.1 Fase 1. Diseño y construcción de Probador Bidireccional para medidores de Flujo del laboratorio de instrumentación de la Universidad Pontificia Bolivariana con base en las normas API

Se realizó el diseño, construcción e instalación de un probador bidireccional a escala en el laboratorio de instrumentación y control de la UPB bajo la Norma API(MPMS) Capitulo 4 sección 2 en el que se tomaron en cuenta los siguientes:

5.1.1 Criterios de diseño Para Probadores de Flujo

- Volumen del Probador
- Velocidad del desplazador
- Longitud de la precarrera
- Tamaño de la Válvula direccional
- Factor de repetitividad de los detectores

5.1.2 Parámetros de diseño del probador de flujo

- Sistema direccional de 4 vías (Distribuidor).
- Cámara de lanzamiento y longitud de precarrera.
- Volumen calibrado.

5.2 Fase 2. Comparación dos técnicas de medición de flujo usando un probador bidireccional y un sensor tipo Coriolis.

Inicialmente se realizó la recolección de información de los requerimientos de funcionamiento del Segundo Anillo de Calibración del Módulo de Flujo para la selección del sensor de flujo másico que se instalaría. Posteriormente se realizó la instalación del sensor de flujo másico Coriolis FCB430 y se realizó el rediseño a la estructura donde sería instalado dicho sensor, adicionalmente se realizó una adecuación a la estructura donde está instalado el probador bidireccional para mejorar las condiciones de funcionamiento del mismo.

Finalmente se realizó la comparación entre dos técnicas de medición correspondientes a un probador bidireccional y un sensor de flujo tipo Coriolis mediante la realización de 5 pruebas en las cuales se tomaron los datos del tiempo que tardó en desplazarse la esfera imantada de un sensor piezoeléctrico al otro con el fin de tabular esos datos junto a los obtenidos simultáneamente por el sensor de flujo tipo Coriolis.

5.3 Antecedentes del Entorno Industrial

5.3.1 Visita técnica AMB

La visita realizada al laboratorio de calibración del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (AMB) permite tener una referencia de la forma en que se realiza el proceso de calibración de los medidores, este laboratorio se encuentra acreditado por la ONAC bajo los requisitos de la norma internacional ISO 17025 para la calibración de medidores de agua potable fría con diámetros 1/2", 3/4" y 1".

Durante la visita se nos explicó cómo se realizan los ensayos de calibración de medidores de agua potable utilizando el método de recolección, siguiendo los parámetros establecidos bajo la norma NTC-4064, comparando el volumen que registra el medidor contra el volumen medido en un recipiente volumétrico calibrado controlando los principales factores que afectan a la medición de los errores de indicación durante los ensayos (Presión de suministro de agua, caudal, temperatura del agua). Es importante recalcar que durante la prueba se realiza un mínimo de tres repeticiones para el cálculo del error e incertidumbre y estos resultados son registrados, una vez finalizado el proceso se verifica el correcto funcionamiento de los equipos de medida bajo criterios de confianza y parcialidad.



Figura 11. Visita técnica AMB

Fuente: Autor

6. Revisión de las condiciones de funcionamiento e Instalación del Segundo Anillo de Calibración del módulo de Flujo

6.1 Descripción del Segundo Anillo de Calibración del Módulo de Flujo del Laboratorio de Instrumentación de la UPB.

6.1.1 Gabinete Eléctrico

El gabinete eléctrico posee unas medidas de 120x90x30 cm, espacio que se encuentra distribuido de acuerdo a la Norma RETIE, NTC2050 de la siguiente forma:

En la parte superior se encuentran todos los equipos concernientes a potencia:

- Variador de velocidad DANFOSS VLT HVAC Drive FC 102
- Variador de velocidad DANFOSS VLT Micro Drive FC 51
- Totalizador trifásico SCHNEIDER
- Breakers trifásicos, bifásicos y monofásicos SCHNEIDER
- Fuente regulada de 24 V[dc] a 4.2 A EBCHQ
- Borneras para cada línea, neutro y tierra.



Figura 12. Variadores de Velocidad.

Fuente: Autor

En la parte inferior izquierda se encuentra:

- Sistema de adquisición de datos CompactDAQ
- Conexión USB para comunicación PC CompactDAQ
- Transmisor de Temperatura 4 a 20 mA RTD PT100 (2)
- Conexión ADAM- 4561 RS485

En la parte inferior derecha se encuentran:

- Borneras señales de Control

En la parte central izquierda se encuentran:

- Borneras de alimentación sensor de flujo E&H
- Borneras de alimentación sistema de adquisición de datos
- Relés de estado sólido o SSR ALLAN BRADLEY

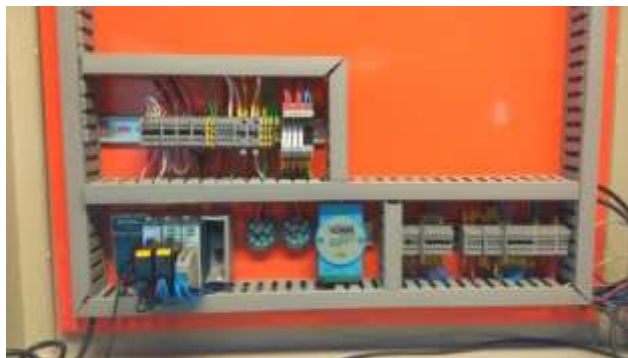


Figura 13. Sistema de adquisición de Datos.

Fuente: Autor

6.1.1.1 Diagrama Eléctrico del tablero de Control

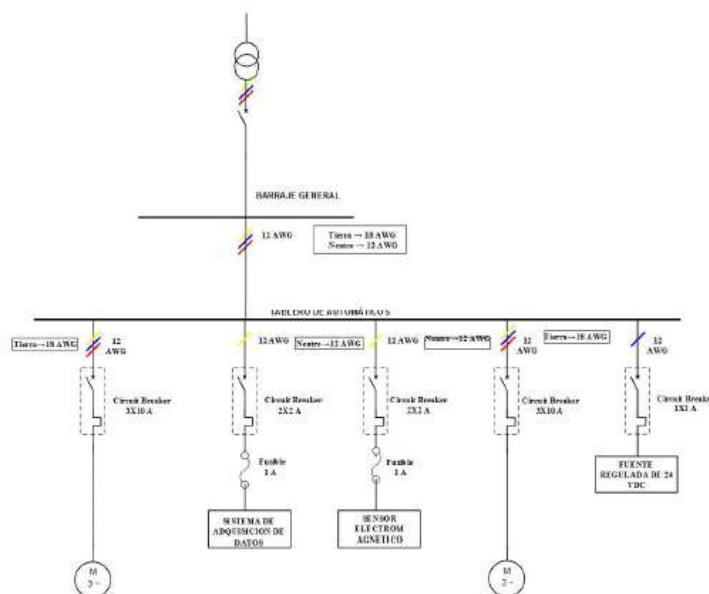


Figura 14. Diagrama Eléctrico del Tablero de Control

Fuente: Gómez Álvarez, Á. D. (sf). Implementación del primer anillo de calibración del banco de medición de flujo de agua basado en la norma técnica colombiana NTC 1063 para el laboratorio de instrumentación.

6.1.2 Bomba centrífuga

Se hará uso de la bomba que se maneja en el laboratorio de instrumentación y control de la Universidad Pontificia Bolivariana.

Descripción de Funcionamiento

Tipo: agua limpia

Aplicaciones: doméstico, civil

Usos: abastecimiento de agua, sistemas de presión, irrigación, transferencia de agua

Tipología: superficie

Familia: centrífugas

Campo de prestaciones:

- Caudal hasta 160 l/min (9,6 m³/h)
- Altura manométrica hasta 57 m

Límites de empleo:

- Temperatura del líquido de -10 °C hasta +90 °C
- Temperatura ambiente hasta +40 °C
- Altura de aspiración manométrica hasta 7 m
- Presión máx. en el cuerpo de la bomba:

6 bar para CP 100-130-132-150-158

10 bar para CP 170-190-200

- Funcionamiento continuo S1.



Figura 15. Motobomba Pedrollo

Fuente: Autor

6.1.3 Probador Bidireccional

6.1.3.1 Descripción del funcionamiento del Probador Bidireccional

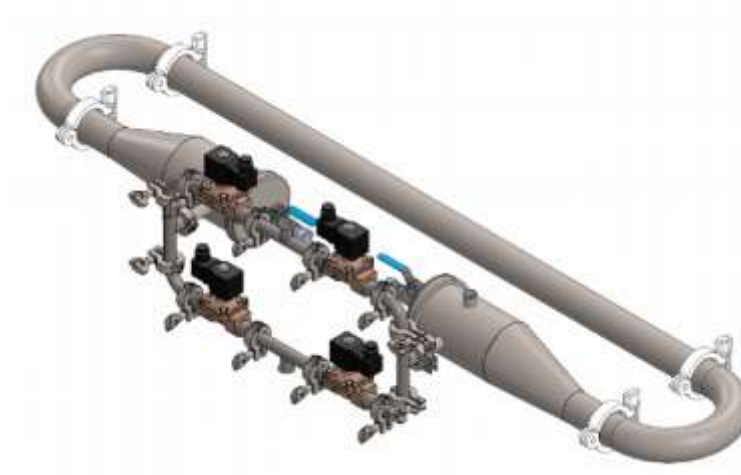


Figura 16. Modelo 3D Probador Bidireccional UPB

Fuente: Camacho, C., Aguilar N. (sf). Diseño y construcción de probador bidireccional para medidores de flujo del laboratorio de instrumentación de la Universidad Pontificia Bolivariana



Figura 17. Probador Bidireccional UPB ya instalado

Fuente: Autor

Uno de los probadores más utilizados para la calibración es el de desplazamiento tipo esfera bidireccional, ya que al ser bidireccional posee la ventaja de poder realizar pruebas en ambas direcciones y permite hacer un gran número de carreras de prueba por largos periodos de tiempo. Los probadores de desplazamiento operan con el principio de volumen calibrado entre dos sensores de proximidad, esto permite verificar la trazabilidad de las pruebas con un estándar de metrología, en la figura 1 se observa un medidor de desplazamiento (dispositivo de color rojo) aguas arriba de un probador de desplazamiento tipo esfera bidireccional.

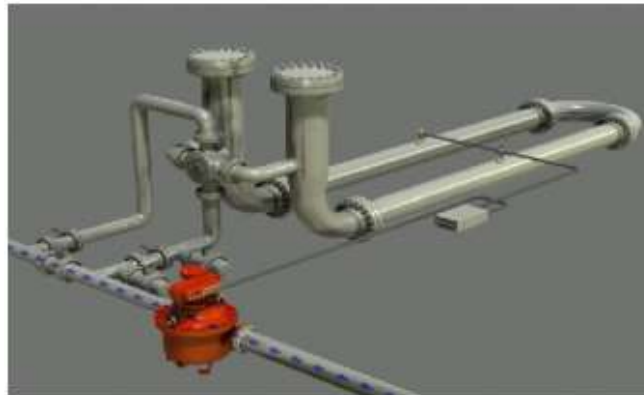


Figura 18. Probador Bidireccional Tipo Esfera.

Fuente: Bernal, J. H., Ramírez, F. El Probador Bidireccional de Esfera, Concepto y Principio de Funcionamiento

En condiciones normales de operación el flujo del fluido, representado por las flechas azules, solo fluye a través del medidor. Para probar el medidor el flujo debe ser dirigido a través del probador bidireccional activando las válvulas de entrada y salida (Ver figuras 2 y3). Estas válvulas suelen ser válvulas de bloqueo y de purga, lo que proporciona un medio para verificar que no haya fugas a través de la válvula y que todo el flujo haya sido dirigido hacia el probador.

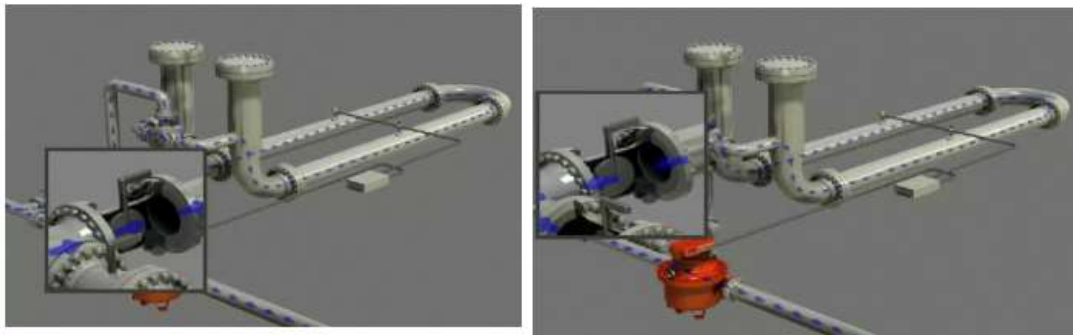


Figura 19. Válvula de entrada y Válvula de salida

Fuente: Bernal, J. H., Ramírez, F. El Probador Bidireccional de Esfera, Concepto y Principio de Funcionamiento

Una vez que el flujo es desviado completamente hacia el dispositivo de prueba, se activa la válvula de cuatro vías que invierte el flujo a través en el probador bidireccional (Figura 3), esto lanza una esfera en dirección hacia adelante. La esfera realiza un sellado hermético al interior de las paredes del probador.

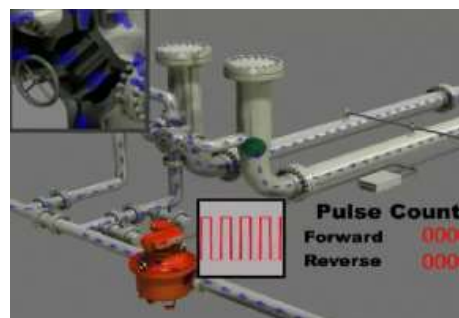


Figura 20. Válvula de 4 vías.

Fuente: Bernal, J. H., Ramírez, F. El Probador Bidireccional de Esfera, Concepto y Principio de Funcionamiento

Para el caso del probador bidireccional Instalado en el laboratorio de Instrumentación de la UPB las válvulas solenoides se energizan en par y en diagonal es decir V_1 con V_3 y V_2 con V_4 , mientras una de las válvulas permite la entrada del fluido desde la otra la redirige hacia el tanque de descarga

una vez se des energizan se realiza el mismo procedimiento con las otras dos válvulas para que el probador funcione en sentido opuesto.

Una vez que la esfera pasa cerca del primer sensor de proximidad, este se activa y produce una serie de pulsos eléctricos que son enviados al contador de pulsos, que a su vez comienza a contar dichos pulsos. Cada pulso representa un pequeño valor de fluido que ha pasado a través del medidor.

Cuando la esfera entra en contacto con el segundo sensor de proximidad, el contador de pulsos se detiene.

Dado que se trata de un probador bidireccional, una vez que se completa el paso de la esfera por el probador, la válvula de cuatro vías se invierte y la esfera se mueve en la dirección inversa, el contador de pulsos se activa una vez más con el primer sensor de proximidad y se detiene con el segundo. La cantidad de pulsos de ida y vuelta es almacenada para su verificación (Figura 21).

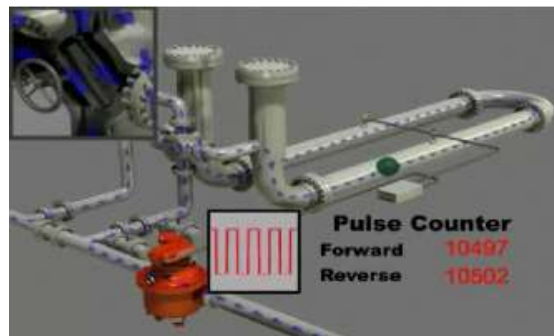


Figura 21. Comparación de pulsos de ida y vuelta.

Fuente: Bernal, J. H., Ramírez, F. El Probador Bidireccional de Esfera, Concepto y Principio de Funcionamiento

Este ciclo se repite un número determinado de veces, estos resultados se utilizan para verificar la repetibilidad del medidor. Los pulsos totalizados en el contador representan el volumen exacto de fluido que ha pasado por el medidor durante cada una de las pruebas.

El volumen medido es comparado contra el volumen del probador entre los sensores de proximidad. Una vez la sesión está completa, las válvulas de bloqueo se invierten, de manera que el flujo ya no es desviado a través del probador permitiendo que se reanude la operación normal del medidor.

6.1.3.2 Especificaciones técnicas Probador Bidireccional

6.1.3.2.1 Desplazador de esfera

Son esferas inflables, fabricadas con diferentes tipos de elastómeros según la aplicación y producto que van a manejar. Los materiales más usados son: Neopreno, Nitrilo y Poliuretano.

La esfera elastómera que se encuentra en el Probador Bidireccional fue elaborada en nitrilo su diámetro es de 44,66 mm, el volumen del núcleo imantado la esfera elastómera(neodimio) es de 706,86 mm³

Lo que permite que sea detectada por los sensores magnéticos que se encuentran instalados en la sección de volumen calibrado.

La velocidad del desplazador es de aproximadamente 2.5ft/s valor que está en el rango de 0.5 ft/s y 5ft/s establecido por la norma API(MPMS). Los componentes y accesorios con los que fue construido el probador bidireccional están hechos en acero inoxidable de grado alimenticio, esto con el fin de garantizar una larga vida útil del sistema en condiciones de operación normal y un fácil mantenimiento del mismo.

6.1.3.2.2 Distribuidor del Probador Bidireccional

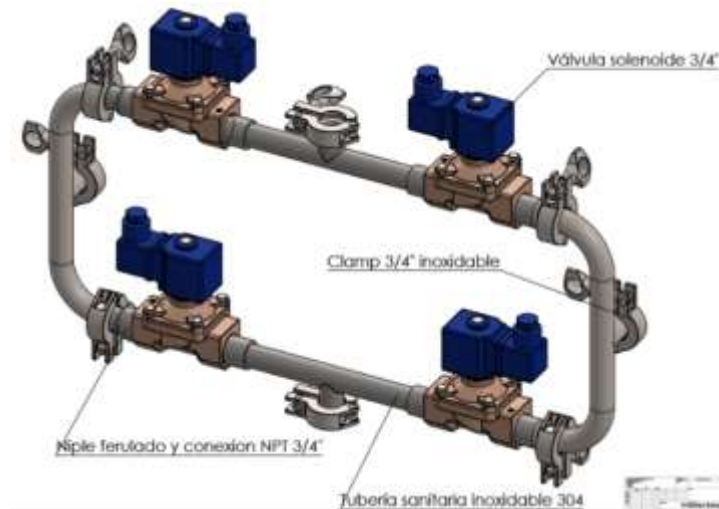


Figura 22. Distribuidor probador bidireccional.

Fuente: Camacho, C., Aguilar, N. Diseño y construcción de probador bidireccional para medidores de flujo del laboratorio de instrumentación de la Universidad Pontificia Bolivariana

- La tubería utilizada en el distribuidor es de $\frac{3}{4}$ " en acero inoxidable 304.
- La instalación de las válvulas solenoides (con conexión $\frac{3}{4}$ " NPT) en el distribuidor se hizo por medio de niples roscados en acero inoxidable del mismo tamaño nominal.
- Los niples fueron adaptados en uno de sus extremos con férulas de $\frac{3}{4}$ " y sellos O-ring para permitir su unión a los demás accesorios tipo Clamp del distribuidor y con ello garantizar el completo hermetismo en el ensamble del distribuidor.
- Las válvulas solenoides instaladas en el distribuidor del Probador Bidireccional son de tipo normalmente cerradas (una vez energizadas dejarán pasar el fluido) dichas válvulas tienen en su cuerpo unas flechas de señalización que indican la dirección en que se mueve el fluido que pasa por ellas.

- Datos Técnicos Válvula Solenoide (Modelo 6213V)

Requerimientos técnicos tomados en cuenta para la selección del tipo de válvula solenoide que se instaló en el distribuidor durante la Primera fase del módulo de flujo:

- Presión máxima de trabajo 60 psi.
- Fluido: agua limpia
- Temperatura del fluido: temperatura ambiente, aprox. 27° C
- Conexión: 3/4" NPT
- Material cuerpo de la válvula: acero inoxidable
- Material de sellos y junta tórica: FKM
- Alimentación: 110Vac

Teniendo en cuenta esos requerimientos se instalaron válvulas servo pilotadas burkert ON-OFF las cuales permiten controlar el tiempo de cierre y apertura y direccionar el flujo según sea requerido.

El valor de tiempo de cierre de la válvula solenoide seleccionada para el distribuidor es de 500ms.



Figura 23. Válvula solenoide Burkert.

Fuente: Burkert. (sf). Fluid Control Systems. Disponible en: www.burkert.com

- Datos técnicos Válvula Solenoide (Modelo 6213V)

Technical data	
Orifice	DN 10 – 40 mm
Body material	Brass, stainless steel 1.4404 (316L)
Inner part of valve	
Brass body	Brass, stainless steel and PPS
Stainless steel body	Stainless steel and PPS
Seal material	NBR, FKM, EPDM
Media	
NBR	Neutral fluids, water, hydraulic oil, oil without additives
FKM	Per-solutions, hot oils with additives
EPDM	Oil and fat-free fluids
Ambient temperature	Max. 131°F (+55°C)
Media temperature	
NBR	14°F to 176°F (-10°C to +80°C)
FKM	32°F to 194°F (0°C to +90°C)
EPDM	-22°F to 248°F (-30°C to +120°C)
Voltage tolerance	±10%
Duty cycle	100% continuous rating
Electrical connection	Tag connector acc. to DIN 43650 Form A for cable plug Type 2508 (see Accessories)
Protection class	IP 65 with cable plug
Installation	As required, preferably with actuator upright

Figura 24. Datos Técnicos Válvula Solenoide

Fuente: Wjf. (sf). 2/2–way Solenoid Valve for fluids. Disponible en: <http://www.wjf.ca/5190.pdf>

Dimensions [mm]											
G Thread			AC coil			DC coil			DC and AC coil		
DN	G	F	B	H	K	B	H	K	C	L (Brass/SS)	M
10	NPT 1/4	12	82.0	32	45	82.5	40	51	37.5	50/55	3.5
	NPT 3/8	12									
	NPT 1/2	14									
13	NPT 1/2	14	95.5	32	45	96.0	40	51	45.0	58/65	3.5
	NPT 3/4	16									
20	NPT 3/4	16	115.5	32	45	116.0	40	51	66.0	80/100	3.5
	NPT 1	18									
25	NPT 1	18	158.5	49	53	158.5	49	53	104.5	95/-	7.0
	NPT 1 1/4	20	163.0			163.0					
40	NPT 1 1/2	22	179.5	49	53	179.5	49	53	104.5	132/-	7.0
	NPT 2	24	184.5			184.5					

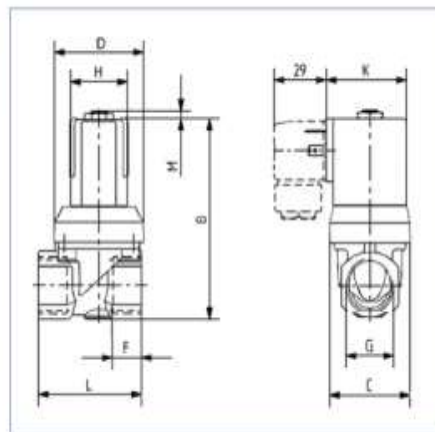


Figura 25. Dimensiones válvula solenoide

Fuente: Wjf. (sf). 2/2–way Solenoid Valve for fluids. Disponible en: <http://www.wjf.ca/5190.pdf>

6.1.3.2.3 Cámara de Lanzamiento y Precarrera del Probador Bidireccional

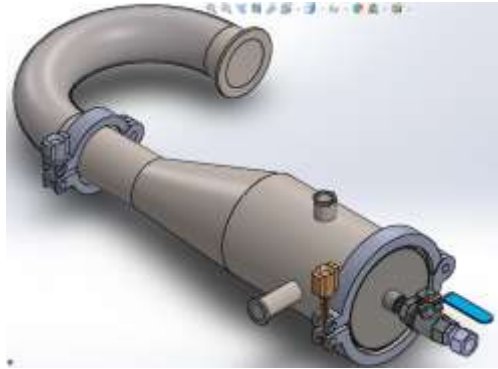


Figura 26. Cámara de lanzamiento y pre carrera probado bidireccional

Fuente: Camacho, C., Aguilar, N. (sf). Diseño y construcción de probador bidireccional para medidores de flujo del laboratorio de instrumentación de la Universidad Pontificia Bolivariana

El diseño de la cámara de lanzamiento incluye una válvula de bola de $\frac{3}{8}$ " para purga del sistema (antes de realizar pruebas), cuando inicia el llenando del probador.

La unión de la tubería del probador se realiza mediante férulas cuya empaquetadura de material siliconado (entre sus juntas) garantiza un ajuste apropiado evitando así posibles fugas.

El diámetro de la cámara de lanzamiento es de 4" y el diámetro de la tubería de sección de prueba es de 2".

Longitud de la sección de precarrera P=1,38

6.1.3.3 Volumen calibrado y accesorios del probador bidireccional



Figura 27. Sección Volumen calibrado

Fuente: Camacho, C., Aguilar, N. (sf). Diseño y construcción de probador bidireccional para medidores de flujo del laboratorio de instrumentación de la Universidad Pontificia Bolivariana

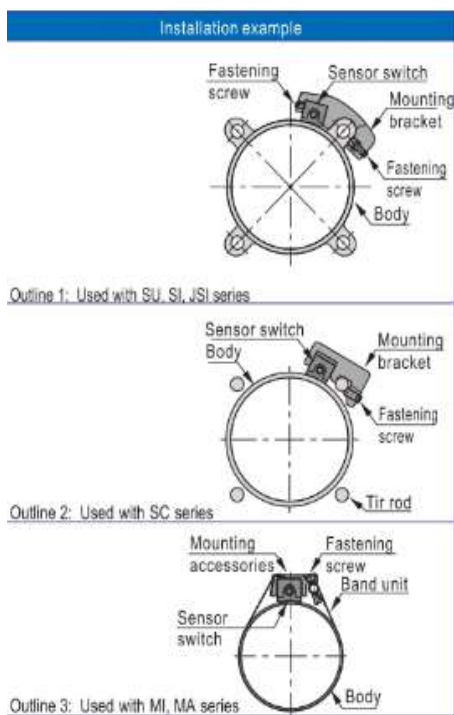
Tubería de acero inoxidable de 2" de diámetro con una longitud de 43",2 codos de 180° en acero inoxidable.

6.1.3.3.1 Interruptores detectores

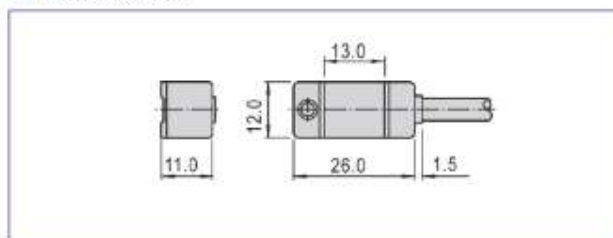
Los sensores generan un campo magnético que al verse perturbado por un elemento de metálico reaccionan como un switch abriéndose y enviando un pulso a la tarjeta de adquisición, además cuenta con un LED para informar el paso del elemento magnético.

El sensor de detección de paso por contacto directo con el desplazador tiene una resolución aproximada de (50µm)

Distancia entre interruptores detectores: $1m = 3.28ft$



■ Dimensions



Item/Type	CS1-U	CS1-UX
Switch logic	STSP Normally opened type	
Switch type	Reed switch with contact	
Operating voltage(V)	5~240V AC/DC	
Max. Switching current(mA)	100	
Switching rating(W)	Max. 10	
Current consumption	No	
Voltage drop	2.5V Max. @100mA DC	
Cable	Φ4.0,2C Gray oil resistant PVC (Flame retarded)	
Indicator	Red LED	No
Leakage current	No	
Sensitivity(Gauss)	60~75	
Max. Frequency(Hz)	200	
Shock(m/s ²)	300	
Vibration(m/s ²)	90	
Temperature range(°C) : 1)	-10~70	
Enclosure classification	IP67(NEMA6)	
Protection circuit	No	

1) Note: Please contact us for high temperature resistant(125°C), low temperature resistant(-40~-25°C) and explosion-proof sensor switch.

Figura 28. Especificaciones Técnicas CS1-U.

Fuente: Airtac. Sensor switch. (sf). Disponible en: <http://as-en.airtac.com/upload/201404290321518436.PDF>



Figura 29. Sensor CS1-U.

Fuente: Airtac. Sensor switch. (sf). Disponible en: <http://as-en.airtac.com/upload/201404290321518436.PDF>.
Modificado por el Autor

6.1.4 Especificaciones técnicas Sensor Coriolis FCB430



Figura 30. Coriolis Master FCB430

Fuente: Directindustry. (sf). Caudalímetro Másico de efecto Coriolis para líquido Digital. Disponible en:
<http://www.directindustry.es/prod/abb-measurement-analytics/product-56271-1829170.html>

Descripción

Rango de medición: 0.5844 ... 150 ... 584.3 l / min

Tamaño del medidor / Tamaño de conexión: DN 25 (1 in.) / 25 (1 in.)

Proceso Tipo de conexión: Bridas ANSI / ASME B16.5 Clase 150

Salida: Salida analógica pasiva (4-20 mA)

Material de las piezas humedecidas: Acero inoxidable

Calibración de flujo: Flujo hacia delante +/- 0.40% del caudal

Calibración de densidad: Densidad 10 g / l

Diseño de conexión /Material de la caja de conexión / Prensaestopas: Integral, definida por caja de transmisor.

Diseño de conexión/ Tipo de carcasa del transmisor /Material de la carcasa del transmisor/Prensaestopas: Integral/Compartimento doble / Aluminio / 3 x NPT 1/2 in.

Salidas: Salida de corriente 1 (activa o pasiva), salida digital 1 y 2 (pasiva) HART.

Fuente de alimentación: 100...230 V AC

Pantalla digital integrada (LCD): con botones y pantalla (TTG) y cubierta de vidrio.

Idioma de visualización del dispositivo: español

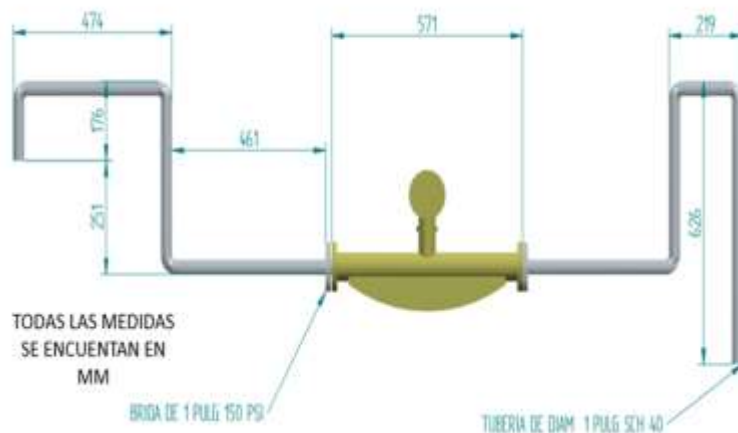


Figura 31. Modelo 3D. Estructura Sensor Coriolis.

Fuente: Bernal, M. Comparación de Dos técnicas de medición de flujo correspondientes a un probador bidireccional y un sensor tipo Coriolis.

6.1.5 P&ID Segundo Anillo de Calibración del Módulo de Flujo.

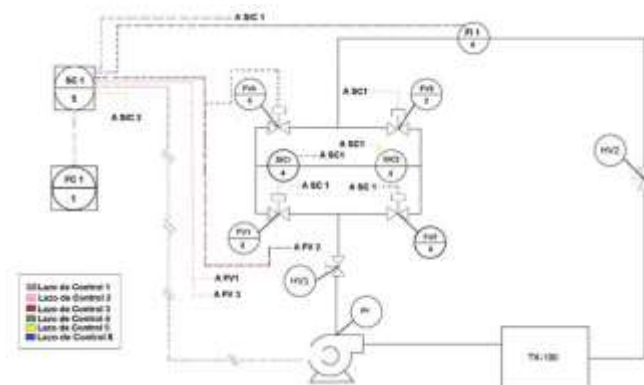


Figura 32. P&ID del Segundo Anillo De Calibración del Módulo de Flujo

Fuente: Autor

6.1.6 Descripción Banco de Ensayo

La tabla 1 y tabla 2 presentan las listas de chequeo basada en la Norma NTC1063-3 sección 5.3 y 5.4 respectivamente que se utilizó para realizar la revisión de las condiciones de funcionamiento del Módulo de flujo donde se encuentra instalado el segundo anillo de calibración.

Tabla 1. Descripción del banco de ensayo

Condición	Cumple	Cumple Parcialmente	No Cumple
Suministro de Agua	✓	*	*
Tubería	✓	*	*
Dispositivo de referencia calibrado	✓	*	*
Instrumento para medir el tiempo del ensayo	✓	*	*
Dispositivo para automatizar el ensayo	✓	*	*
Dispositivo para medir la temperatura del agua de ensayo	*	*	✓
Dispositivo para medir la presión del agua	*	*	✓
Dispositivo para determinar la densidad*	*	*	✓
Dispositivo para determinar la conductividad*	*	*	✓

Fuente: Autor

Tabla 2. Tubería

Condición	Cumple	Cumple Parcialmente	No Cumple
Una sección de ensayo en la que está(n) colocado(s) el (los)medidor (es)	✓	*	*
Instrumentos para establecer el caudal deseado	✓	*	*
Uno o dos dispositivos de separación	*	✓	*
Instrumentos para determinar el Caudal	✓	*	*
Una o más purgas de aire*	*	*	✓
Un dispositivo de no retorno	*	*	✓
Un separador de aire*	*	*	✓
Un filtro	*	*	✓
Medios para verificar que la tubería se llena a un nivel de referencia antes y después del ensayo*	✓	*	*

Fuente: Autor

6.2 Revisión Sistema de Adquisición de Datos Instalado en el Segundo Anillo de Calibración del Módulo de Flujo

6.2.1 Descripción

La adquisición de datos (DAQ) es el proceso de medir un fenómeno eléctrico (voltaje corriente) o físico como temperatura, presión o sonido por medio de un computador.

Un Sistema DAQ está compuesto por sensores encargados de tomar las señales del exterior, hardware de medidas DAQ que se encarga del acondicionamiento de las señales tomadas y por último por una computadora con software programable con el fin de aprovechar el procesamiento, productividad, visualización y las habilidades cognitivas de los computadores.

6.2.2 Partes de un sistema DAQ

El hardware DAQ actúa como interfaz entre las señales del mundo exterior y una PC, ya que se encarga de digitalizar las señales analógicas tomada por los sensores para que la computadora las pueda interpretar.

En la figura 33 se podrá observar los tres componentes de un dispositivo DAQ los cuales son el circuito de acondicionamiento de señales, convertidor analógico-digital (ADC) y un bus de PC.

Acondicionamiento de Señales

Ya que las señales de los sensores pueden requerir amplificación, atenuación, filtrado o aislamiento, se requiere de circuitos de acondicionamiento de señal, estos se encargan de manipular la señal para que sea apropiada para la entrada del ADC.



Figura 33. Partes de un sistema DAQ

Fuente: Hayward A.T.J; Pipe provers - a user's manual; Cambridge University Press.

Convertidor Analógico Digital ADC

Este se encarga de convertir las señales análogas, tomada por los sensores a una representación digital.

Bus de la PC

Funciona como la interfaz de comunicación entre el dispositivo DAQ y la PC para pasar instrucciones y datos medidos, algunos de ellos pueden ser USB, PCI, PCI Express y Ethernet.



Figura 34. Sistema de Adquisición de Datos Usado en el Módulo de flujo

Fuente: Autor

6.2.3 Módulos Instalados para la Adquisición de Datos del Módulo de Flujo

6.2.3.1 CDAQ-9174 Chasis CompactDAQ

El cDAQ-9174 es un chasis USB CompactDAQ energizado por bus, diseñado para sistemas pequeños y portátiles de medidas de sensor. El chasis brinda la sencillez de conexión rápida (plug-and-play) del USB a sus medidas eléctricas y de sensores. Posee un circuito acondicionador de señal lo cual permite conectar directamente los dispositivos industriales como actuadores, relés, interruptores industriales, transductores y dispositivos (National instruments, Manual NI 9174, Diciembre 2015(27)).



Figura 35. Chasis USB CompactDAQ

Fuente: National Instruments. (sf). Disponible en: <http://www.ni.com/datasheet/pdf/en/ds-178>

6.2.3.2 Módulo analógico de Corriente (NI-9203)

El NI-9203 está diseñado para aplicaciones de control y monitoreo de alto rendimiento. Tiene rangos de entrada programable y varias opciones de conectividad.

Tiene 8 entradas de corriente analógica, con rango programable de $\pm 20\text{mA}$, posee una resolución ADC de 16 bits, una tasa de muestreo de 200 Ks/s máx., para protegerse de los transitorios de la señal incluye un canal a tierra con doble barrera de aislamiento de 250 V[rms] para seguridad e inmunidad al ruido. (Instrumet, National Instrument, 2015)



Figura 36. Módulo análogo de corriente NI9203

Fuente: National Instruments. (sf). NI 9203 Datasheet - 8-Channel, ± 20 mA, 16-Bit Analog Input Module
 Disponible en: http://www.ni.com/pdf/manuals/374070a_02.pdf

6.2.3.3 Módulo de entradas digitales. (NI-9421)

Tiene 8 canales de entrada digital que soportan 24 V[dc], con una frecuencia de muestra de 100 μ s, tiene protección de sobre voltaje de 2,300 V[rms] entre los canales de entrada y de tierra física, posee circuito acondicionador de señal que facilita el montaje debido a que el dispositivo se conecta directamente al módulo (National instruments, Manual NI 9421, Diciembre 2015(30)).



Figura 37. Módulo NI-9421

Fuente: National Instruments. (sf). NI 9421 - 8-Channel Sinking Digital Input Module. Disponible en:
http://www.ni.com/pdf/manuals/373504a_02.pdf

6.2.3.4 Módulo de salidas digitales. (NI-9472)

Tiene 8 canales de salida digital con un rango de voltaje de 6 a 30 V[dc], periodo de salida digital de 100 μ s, protección de 2,300 V[rms] contra sobretensiones transitorias entre los canales de salida y el plano trasero, así como los módulos anteriores también posee un circuito de acondicionamiento de señal que facilita su montaje (Instrumet, National Instrumet, 2015)



Figura 38. Módulo NI-9472

Fuente: National Instruments. NI 9472 - DO, 6 V to 30 V, Sourcing, 100 μ s. Disponible en_
http://www.ni.com/pdf/manuals/373509b_02.pdf

6.3 Instalación Segundo Anillo de Calibración del Módulo de Flujo.

6.3.1 Relé de Estado Solido SSR

Un **(SSR en inglés) relé de estado sólido** es un switch electrónico que conmuta entre estados abierto-cerrado, interrumpiendo el paso del flujo eléctrico mediante la aplicación de una pequeña corriente en sus terminales de control.

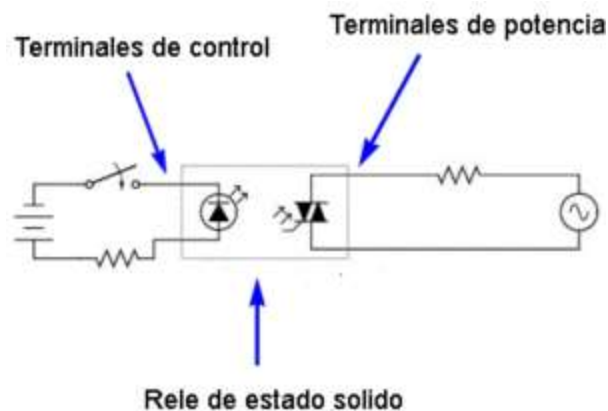


Figura 39. Relé estado sólido

Fuente: Infootec. (sf). Relé de estado sólido. Disponible en: <https://www.infootec.net/rele-estado-solido/>

La ventaja principal del relevador es que permite aislar la etapa de control de la etapa de potencia, además otra ventaja importante de los relés de estado sólido respecto a los relés electromecánicos es el deterioro de las partes internas del relé puesto que en estos relés no existe deterioro al no tener partes mecánicas como en los relés electromecánicos.

Para nuestro caso por los terminales de control se está trabajando con una tensión de 24[V] en corriente continua, mientras que los terminales de potencia están trabajando con una tensión de

230[V] en corriente alterna. Cuando en la imagen de arriba cerramos el interruptor y hacemos pasar una corriente por el circuito de control actuará el led interno del relé emitiendo fotones y haciendo actuar el tiristor en la parte de potencia del relé, la función del tiristor será dejar pasar la corriente de potencia al recibir los fotones del led.

- SSR (SO942460)



Figura 40. SSR (SO942460)

Fuente: Celduc-relais. (sf). Guides 2014. Disponible en: <https://www.celduc-relais.com/wpcontent/uploads/GUIDES2014.pdf>

Se instalaron dos SSR de referencia S0942460 de la Marca Celduc, estos se encargarán de realizar la activación de las electroválvulas, que cumplen con los requisitos de instalación: Entrada 5-24V /Salida 24-240V.

Gama SO9 con corriente de entrada regulada – corriente de control <13mA						
Referencia producto	Calibre tiristor	Tensión conmutable	Tensión de Pico	Tensión de control	I _t	Dimensiones mm
SO941460	12A	12-280VAC	600V	3-32VDC	128A ² s	45 x 58,5 x 30
SO942460	25A	12-280VAC	600V	3-32VDC	600A ² s	
SO943460	40A	12-280VAC	600V	3-32VDC	1 250A ² s	
SO945460	50A	12-280VAC	600V	3-32VDC	2 800A ² s	
SO963460	40A	24-600VAC	1200V	3,5-32VDC	1 250A ² s	
SO965460	60A	24-600VAC	1200V	3,5-32VDC	2 800A ² s	
SO967460	90A	24-600VAC	1200V	3,5-32VDC	7 200A ² s	
SO96846T	95A	24-600VAC	1200V	3,5-32VDC	11 250A ² s	

Figura 41. Especificaciones del SSR

Fuente: Celduc-relais. (sf). Guides 2014. Disponible en: <https://www.celduc-relais.com/wpcontent/uploads/GUIDES2014.pdf>



Figura 42. SSR instalado

Fuente: Autor

6.3.2 Interruptores detectores

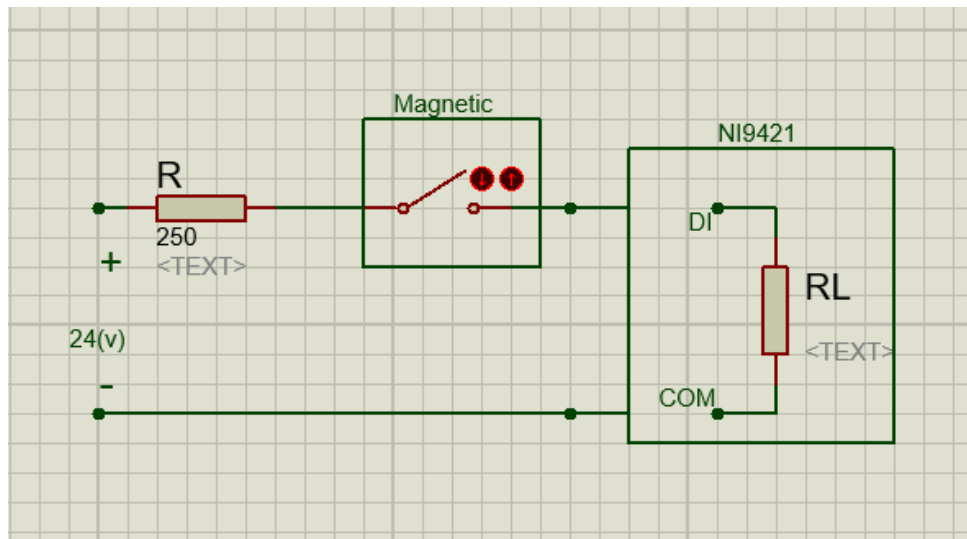


Figura 43. Circuito Equivalente del CS1-U,

Fuente: Autor

El sensor magnético referencia CS1-U funciona como un interruptor del paso de flujo eléctrico, este va conectado en serie entre la fuente de alimentación y el chasis CompactDAQ como se puede observar en la figura40 en el momento que el sensor genera el pulso de circuito cerrado este es leído por el módulo NI9421 para entregar la respuesta a la interfaz del programa de automatización.

Especificaciones Técnicas

Specification

Item\Type	CS1-U	CS1-UX
Switch logic	STSP Normally opened type	
Switch type	Reed switch with contact	
Operating voltage(V)	5~240V AC/DC	
Max. Switching current(mA)	100	
Switching rating(W)	Max. 10	
Current consumption	No	
Voltage drop	2.5V Max. @100mA DC	
Cable	Φ4.0,2C Gray oil resistant PVC (Flame retarded)	
Indicator	Red LED	No
Leakage current	No	
Sensitivity(Gauss)	60~75	
Max. Frequency(Hz)	200	
Shock(m/s ²)	300	
Vibration(m/s ²)	90	
Temperature range(°C) ①	-10~70	
Enclosure classification	IP67(NEMA6)	
Protection circuit	No	

①Note: Please contact us for high temperature resistant(125°C),low temperature resistant(−40~−25°C) and explosion-proof sensor switch.

Figura 44. Especificaciones Técnicas del Sensor CS1-U.

Fuente: Airtac. Sensor switch. CS1-Disponible en: <http://as-en.airtac.com/upload/201404290321518436.PDF>

7. Diseño y Descripción del diagrama de programación de la HMI (Interfaz Humano Maquina) en Labview

.

7.1 Protocolo de comunicación

El protocolo de comunicación es el sistema de normas y comportamientos que dos entidades deben respetar para intercambiar información, se trata de una convención precisa asociada a los datos intercambiados entre las partes.

7.2 Protocolo Modbbus

Es un protocolo de comunicación industrial publico basado en la arquitectura de tipo maestro-esclavo, diseñada en el año de 1979 por la empresa Modicon para su línea de controladores lógicos programables PLC's. En una relación maestro-esclavo, la comunicación siempre se produce en pares, un dispositivo debe iniciar una solicitud y luego esperar una respuesta y el dispositivo de inicio (el maestro) es responsable de iniciar cada interacción.

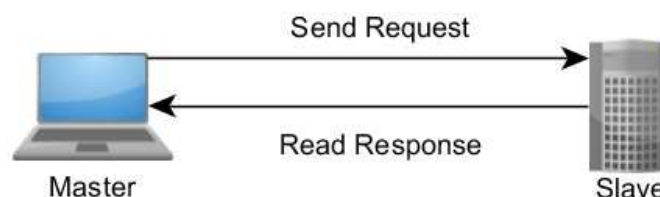


Figura 45. Una Relación de Red Maestro-Esclavo

Fuente: Wikipedia. (29 de julio de 2019). LabVIEW. Disponible en: <https://es.wikipedia.org/wiki/LabVIEW>

Los dispositivos (esclavos) poseen la misma dirección y se encuentran conectados a un único bus de datos por el cual envían información al PLC (Maestro).

Modbus es un protocolo de aplicación, lo que significa que puede implementarse sobre diferentes capas físicas, por lo que podemos encontrar versiones TCP/IP, RTU y ASCII. La aplicación de Modbus se puede realizar en entornos ethernet, internet o localmente mediante el uso de puertos seriales.

Los variadores de velocidad implementados en una fase anterior del módulo, funcionan bajo este protocolo de comunicación Modbus RTU teniendo un PC como dispositivo Maestro y la comunicación se da en forma serial asíncrona bajo el estándar RS485 en enlace semidúplex.

7.2.1 Modbus RTU

Modbus RTU (Unidad de terminal remota) es uno de los dos modos de transmisión definidos en la especificación original de Modbus. Una característica distintiva de Modbus RTU es su uso de codificación binaria y la comprobación de errores CRC fuerte.

El mensaje enviado en todos sus campos debe estar en formato hexadecimal 00 a FF, los campos son: campo de arranque/parada, campo de dirección, campo de función, campo de función, campo de datos y campo de CRC.

En Modbus RTU no hay un carácter específico que indique el inicio o fin de la trama de un mensaje. La recepción de un mensaje comienza después de haber transcurrido 3.5 intervalos de caracteres, el intervalo es determinado por la rata de baudios seleccionada. Se debe respetar este tiempo, por ejemplo, un caso en que se envié otra orden dentro de ese intervalo será tomada como continuación del mensaje y genera un error en el mensaje. Para finalizar el mensaje el mensaje

debe transcurrir 3.5 intervalos después del último carácter recibido. Otro caso posible es que la trama presente un retardo y su envío demore más de 3.5 intervalos en este escenario se descarta el mensaje y se queda a la espera de uno nuevo.

Tabla 3. Estructura de mensaje Modbus RTU

Arranque	Dirección	Función	Datos	Comprobación CRC	Final
T1-T2-T3-T4	8 bits	8 bits	N x 8 bits	16 bits	T1-T2-T3-T4

Fuente: Manual variador de frecuencia fc51

7.3 Parámetros de comunicación Modbus para el variador de velocidad

Para realizar la comunicación entre los dos variadores de velocidad y el computador se modificaron los parámetros de comunicación en el sub menú 8-3 y 8-4 del variador y de esta forma se hacen compatibles con el protocolo RS485, en la siguiente tabla se describen los parámetros y su debida configuración.

Tabla 4. Parámetros grupo 8 comunicación variador de frecuencia

8_30	Protocolo	[2] MODBUS
8_31	Dirección	(2 para FC102) (1 para FC51)
8_32	Velocidad en baudios	[2] (9600 baudios)
8_33	Paridad / Bits de parada	[2] (sin paridad, 1 bit de parada)
8_34	Estimated cycle time	100ms
8_35	Retardo respuesta mín.	500ms
8_36	Retardo respuesta máx.	5000ms
8_37	Retardo máx. Intercarac.	1,72ms
8_40	Selección de telegrama	[1]
8_42	PCD write configuration	[0] [1680]
8_43	PCD read configuration	[0] [1603]

Fuente: Autor

- El protocolo Modbus permite al dispositivo maestro (computador) controlar las siguientes funciones del convertidor de frecuencia:
- Arranque
- Detener el convertidor de frecuencia de diversas formas
- Paro por inercia
- Parada Rápida
- Parada por freno de CC
- Parada normal (rampa)
- Reinicio tras desconexión por avería
- Funcionamiento a velocidades predeterminadas
- Funcionamiento en sentido inverso
- Cambiar el ajuste activo
- Controlar el relé integrado del convertidor de frecuencia.

7.4 Pruebas preliminares del Diseño de la HMI

Para el desarrollo de la HMI se diseñan y prueban individualmente los componentes básicos de funcionamiento del segundo anillo de calibración del módulo de flujo que permiten evaluar el avance progresivo de funcionalidad como lo son las electroválvulas, los sensores magnéticos, el sensor Coriolis, la motobomba y la comunicación, descartando de esta manera fallas en los equipos y problemas futuros en el comportamiento esperado por el módulo.

7.4.1 Electroválvulas

Para iniciar el proceso de automatización de las electroválvulas, se revisó la hoja de datos para conocer sus partes y la forma correcta de instalación. Para realizar el control de las válvulas estas se alimentaron con un voltaje de línea de 220Vrms, y a una señal de control de 0-24V a través de dos relés de estado sólido.

Para revisar el proceso de control se diseñó un programa de prueba donde se realizaba la apertura y cierre de las válvulas.

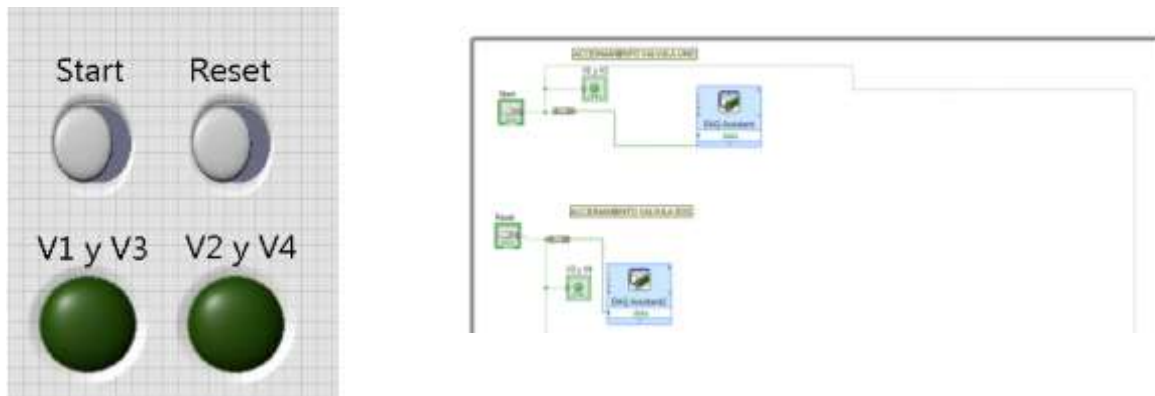


Figura 46. Interfaz de prueba para las Válvulas

Fuente: Autor

La interfaz se compone de dos botones start y reset, el botón start acciona las válvulas 1 y 3, y el botón reset las válvulas 2 y 4.

7.4.2 Sensores Magnéticos

Los sensores magnéticos se comportan como un interruptor al detectar el paso de cualquier objeto con centro de hierro este cierra el circuito dando una señal en estado activo, para observar su

funcionamiento se desarrolló una pequeña interfaz con dos indicadores los cuales se activan al paso de la esfera con núcleo de hierro a través del probador bidireccional por la sección lineal.

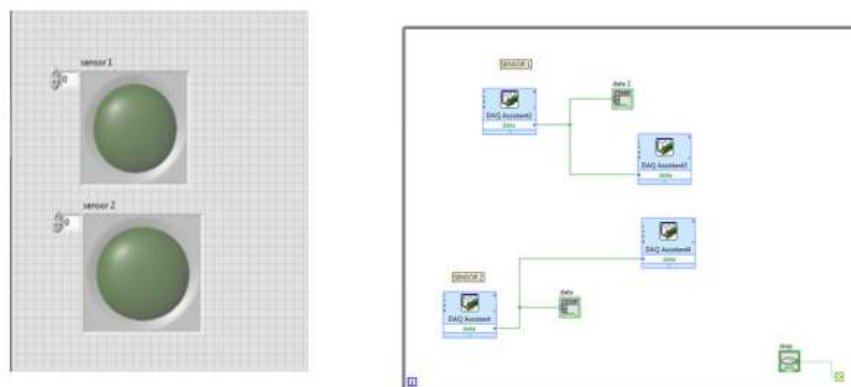


Figura 47. Interfaz de prueba para los sensores Magnéticos

Fuente: Autor

Cada led indicador se enciende cuando el sensor envía la información a la tarjeta de adquisición de datos, esto se logra a través de los DAQ assistant quienes reciben la información proveniente de los sensores.

7.4.3 Sensor Coriolis

El sensor Coriolis envía la información por medio de una señal analógica con protocolo de 4 a 20 mA, este es conectado a la tarjeta de adquisición de datos analógica, en la programación es necesario hacer un ajuste de escala para poder visualizar una lectura exacta de la información, para probar su control se diseña un programa donde un led indicador nos muestra si el sensor está activo y además de eso un indicador numérico con la magnitud de la señal analógica de 4 a 20 mA corroborando la lectura tanto en el sensor como en la HMI.

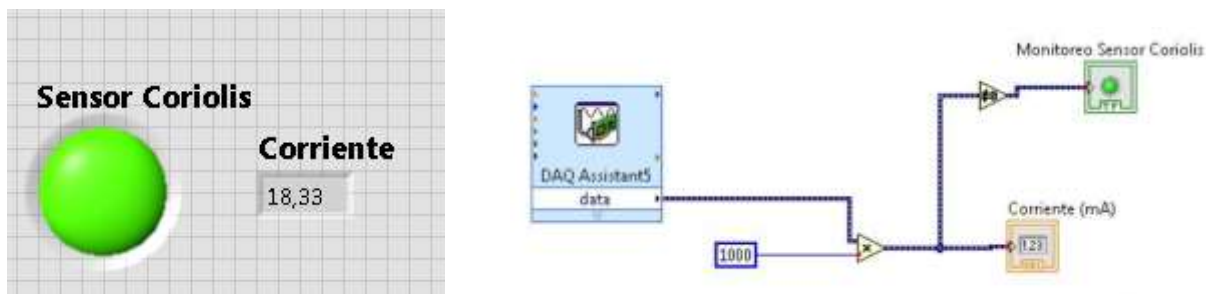


Figura 48. Interfaz para manejo del Sensor de Tipo Coriolis

Fuente: Autor

7.4.4 Lectura y escritura de datos

La lectura y escritura de datos se realiza mediante el ejemplo de comunicación básica serial proporcionado por el *help* de LabVIEW, en donde se configuran los parámetros necesarios para el protocolo de comunicación como lo son velocidad de baudios, paridad / bits de parada, Estimated cycle time, retardo respuesta mín., retardo respuesta máx.

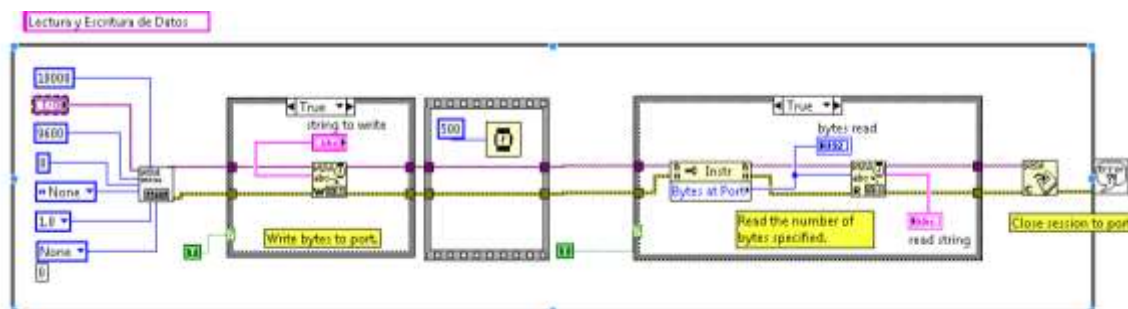


Figura 49. Lectura y Escritura de Datos

Fuente: Autor

7.4.5 Motobomba

Se implementó la motobomba Pedrollo de 1 HP que se encontraba instalada en el laboratorio de instrumentación industrial. Para probar su funcionamiento se crea un programa con una estructura

case en donde cada caso tiene su respectivo mensaje en el protocolo de comunicación modbus para 9 frecuencias determinadas, encendido y apagado. Se hace una matriz grafica de 9 frecuencias diferentes con intervalos de 5 Hz iniciando en 20 Hz hasta 60 Hz, teniendo de esta manera 9 diferentes velocidades con un botón de encendido, un botón de apagado, un indicador de frecuencia seleccionada y un selector de puerto de comunicación.



Figura 50. Botones para las diferentes frecuencias de la Motobomba

Fuente: Autor

7.5 Descripción del diagrama de programación de la HMI (Interfaz Humano Maquina) en Labview

El diagrama de programación en LabVIEW es la base de todo el proceso de automatización, ya que en él se encuentran las estructuras de control y de adquisición de datos diseñadas para el manejo del probador bidireccional de esfera y el sensor Coriolis. A continuación, se explicarán los segmentos internos del programa correspondientes a las funciones más relevantes de la HMI.

7.5.1 Válvulas Solenoides

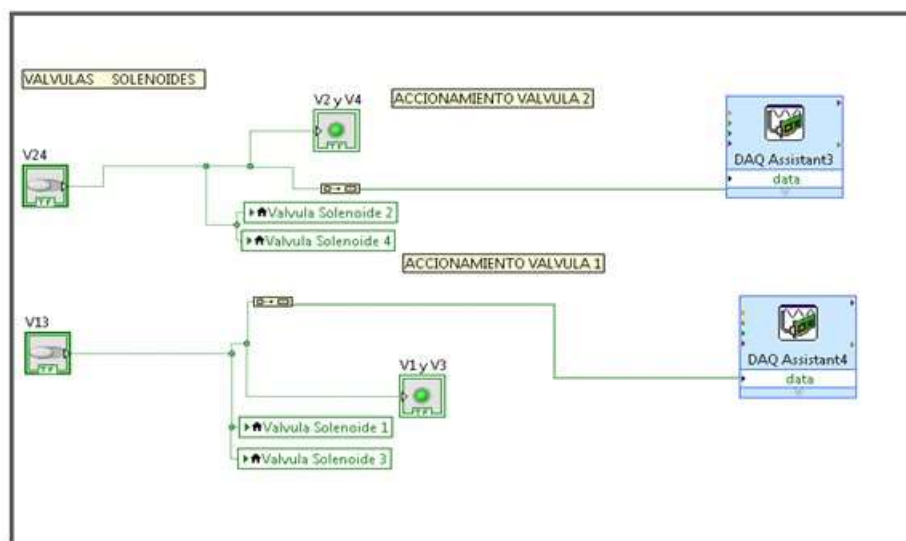


Figura 51 Diagrama de Programación Válvulas solenoides

Fuente: Autor

En este segmento programamos el manejo de las válvulas solenoides, en donde se realiza la comunicación digital a través de asistentes DAQ para cambiar el estado de las cuatro válvulas, además de activar los leds de monitoreo y encendido /apagado para indicar en qué estado se

encuentra las válvulas. Además de esto este segmento comparte las variables de accionamiento de las válvulas con un segmento de control secuencial en donde el botón de inicio da la señal para inicial la secuencia de accionamientos anulando de esta manera la participación del operario en la toma de datos evitando el error humano en la toma de mediciones.

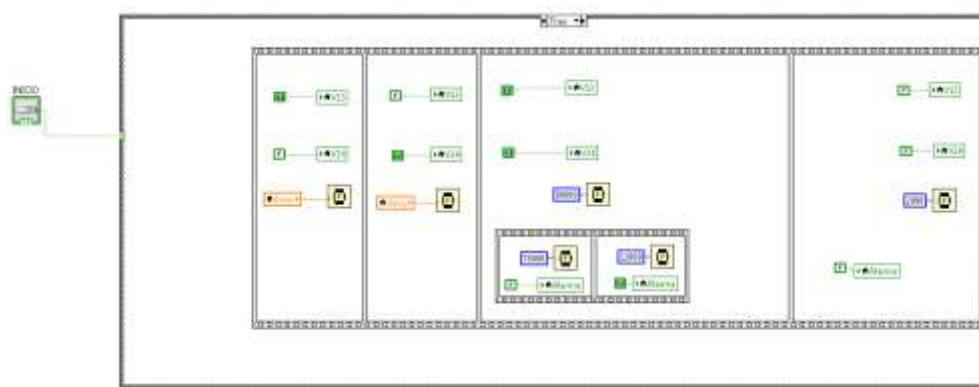


Figura 52. Diagrama de Programación para el Cronometro

Fuente: Autor

En la siguiente imagen se observa el botón de inicio y los leds indicadores de accionamiento de las válvulas además también se observan los leds indicadores de los sensores magnéticos.



Figura 53. Botón de inicio y leds para verificar el estado de las válvulas y los sensores magnéticos

Fuente: Autor.

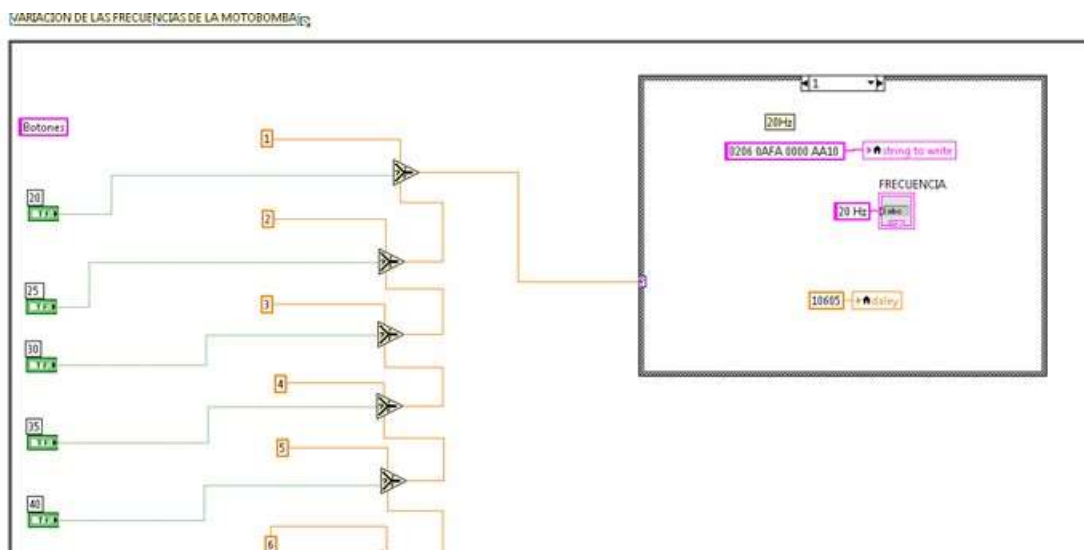
7.5.2 Encendido, Apagado y Variación de las velocidades de la Motobomba

Este segmento de la programación permite el cambio de las frecuencias de trabajo de la motobomba de 20Hz hasta 60Hz con intervalos de 5Hz, en la estructura case interna se encuentra configurado el mensaje enviado a través de la comunicación modbus al variador de velocidad para cada una de las selecciones además de indicar la frecuencia seleccionada.



Figura 54. Frecuencias de trabajo, botones de encendido y apagado.

Fuente: Autor.



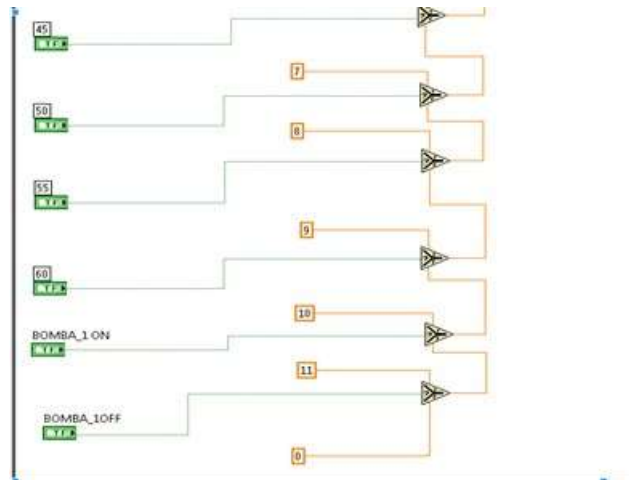


Figura 55. Diagrama de programación para el manejo de la motobomba

Fuente: Autor

7.5.3 Selector de puerto

Este selector permite al usuario elegir el puerto con el cual trabajarán las tarjetas de adquisición de datos, y se comunicará con el computador.



Figura 56. Selector de Puerto

Fuente: Autor

7.5.4 Cronometro

En este segmento se programan dos cronómetros independientes seleccionados por medio de una lógica binaria que depende de la activación de las válvulas solenoides identificando la orientación del flujo, las válvulas V1 y V3 permiten el flujo de izquierda a derecha esto indica que el primer

sensor magnético en activarse es S1 el cual activa el inicio del cronometro 1 utilizando el bloque elapsed time1 y parando al activar el segundo sensor magnético S2, en caso contrario las válvulas V2 y V4 permiten el flujo de derecha a izquierda, activan el cronometro 2 del elapsed time 2 con el sensor magnético S2 y termina con la activación del sensor magnético S1.

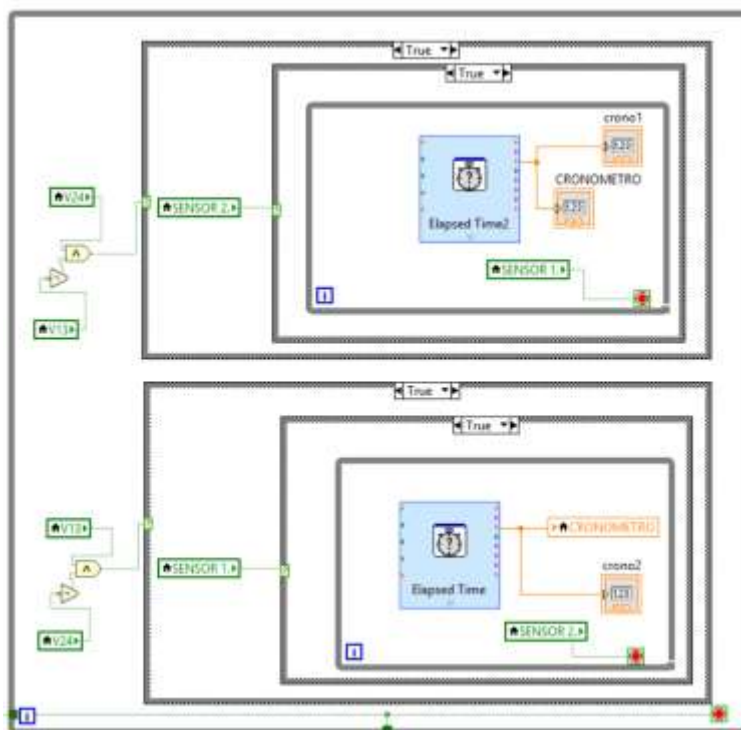


Figura 57. Diagrama de Programación para el Cronometro,

Fuente: Autor

Al terminar el proceso de cada elapsed time el valor del tiempo se registra en un indicador numérico con exactitud de hasta 5 cifras decimales.

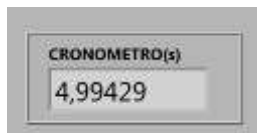


Figura 58. Indicador del cronometro.

Fuente: Autor

7.5.5 Animación de la HMI

La animación se realiza a través de una compuerta OR la cual selecciona el sentido de las flechas animadas por medio de las variables de las válvulas solenoides V1/V3 y V2/V4 de tal manera que se indique el cambio de sentido y orientación de la esfera al usuario.

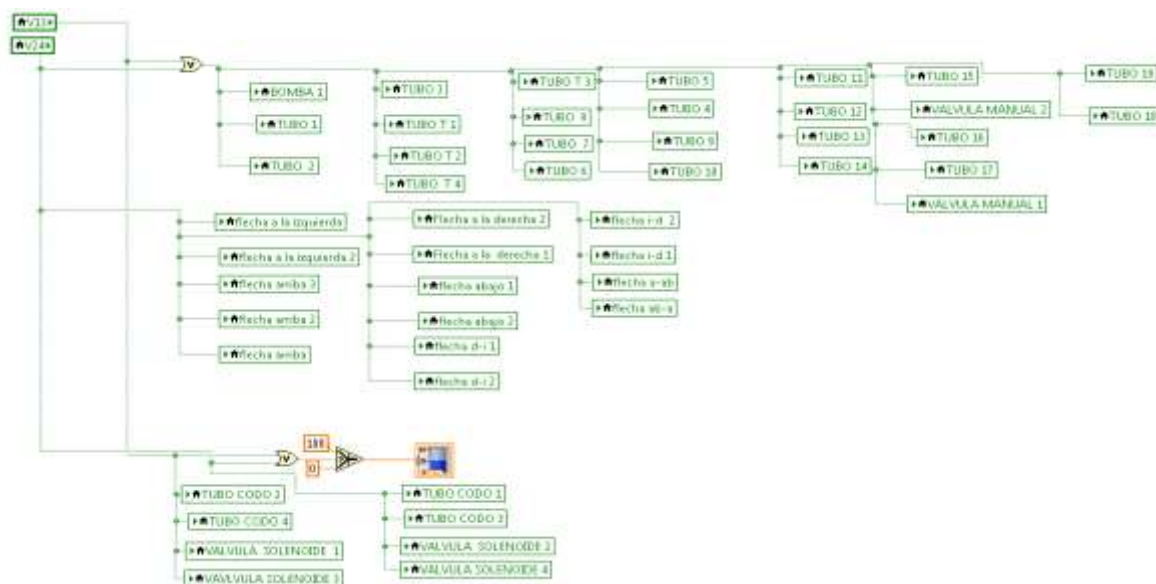


Figura 59. Programación para la animación del proceso de la HMI.

Fuente: Autor

En esta se muestra el proceso real que se está realizando en el segundo anillo del módulo de calibración de flujo; el cambio de sentido del flujo, la activación de los sensores y el accionamiento de las válvulas solenoides.

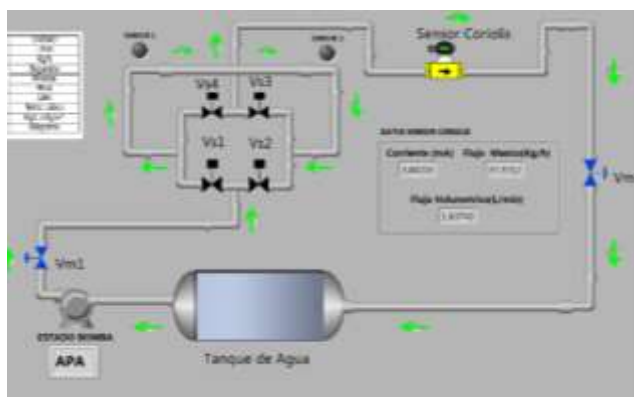


Figura 60. Animación en la HMI.

Fuente: Autor

7.5.6 Gráficas y Tabla de Datos con Fecha/Hora

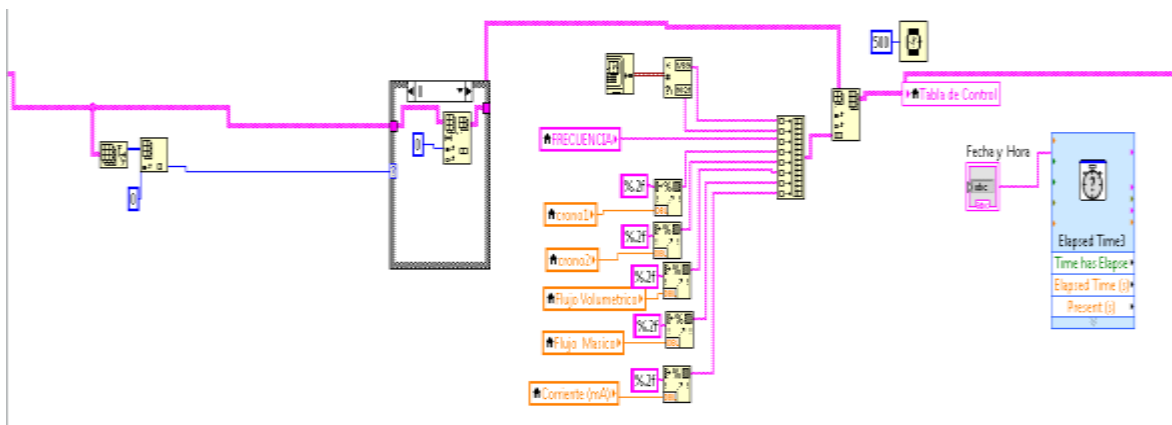


Figura 61. Diagrama de programación para la Tabla de Control.

Fuente: Autor

En una nueva pestaña de trabajo se realiza por medio de un shift register ubicado en el ciclo while principal el proceso de llenado de la tabla de datos, recibiendo los datos de los tiempos de recorrido, la frecuencia, flujo volumétrico y másico y la corriente.

El elapsed time se usa para obtener el dato de la fecha y hora a la que se esté realizando la prueba del segundo anillo de calibración del módulo de flujo.

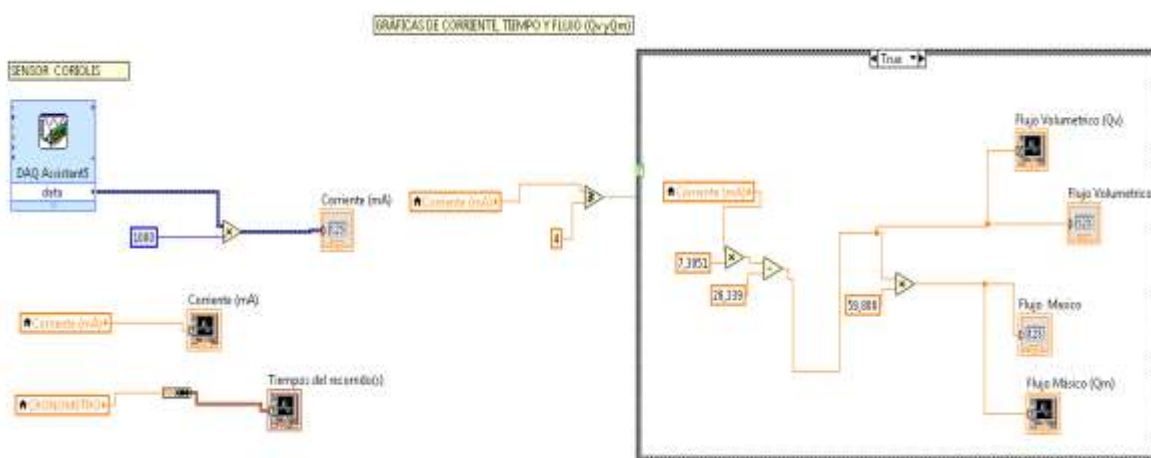


Figura 62. Diagrama de Programación para las Gráficas de los Datos.

Fuente: Autor

Por medio de un DAQ assistant obtenemos el valor de la corriente proveniente del sensor Coriolis con el cual realizamos el proceso de caracterización encontrando la función característica que relacione las variables dependientes flujo volumétrico y flujo másico. Para las cuatro graficas usamos la herramienta de graficador para poder observar el comportamiento de cada variable.

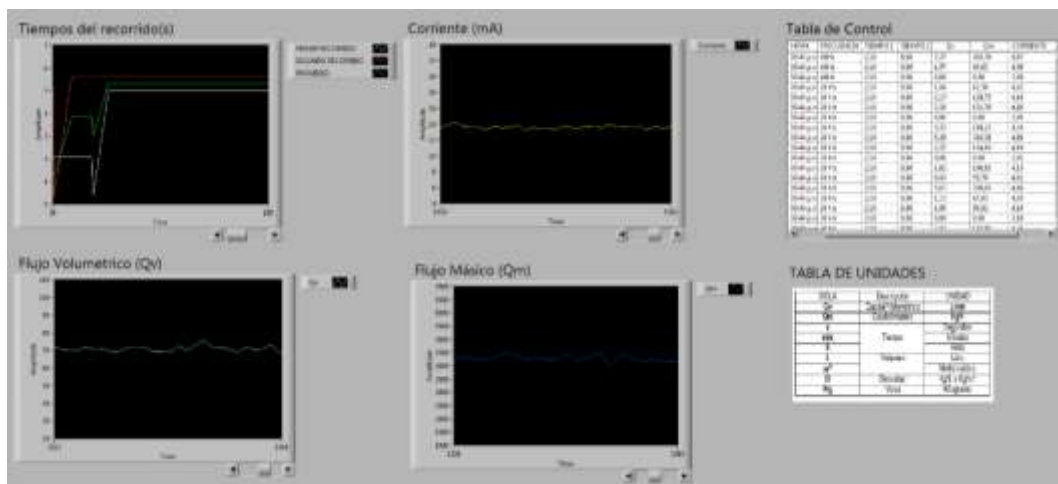


Figura 63. Gráficas y Tabla de Control en la HMI.

Fuente: Autor

En este segmento observamos las gráficas de las respectivas variables a estudiar tiempo (t), corriente (I), Flujo volumétrico (Qv), Flujo másico (Qm) permitiendo observar el cambio entre la toma de datos del proceso y la tabla de datos del programa donde se almacena la información de las variables mencionadas anteriormente.

7.5.7 Monitoreo

En esta pestaña encontramos el estado de los componentes del segundo anillo del módulo de calibración de flujo, como lo son las cuatro válvulas solenoides las cuales permiten el cambio de sentido de flujo y los sensores magnéticos que dan el inicio y el fin de la toma de tiempos del cronometro en los dos recorridos.



Figura 64. Monitoreo del Hardware en la HMI.

Fuente: Autor

7.5.8 Información

En la siguiente pestaña de la HMI encontramos la información sobre el hardware y el procedimiento para el uso correcto de la aplicación y el probador bidireccional y el sensor Coriolis.



Figura 65. Información sobre el manejo del segundo anillo del módulo de flujo en la HMI.

Fuente: Autor

7.5.9 Tabla de Convenciones

La última pestaña de la interfaz encontramos la tabla de unidades para el segundo anillo del módulo de flujo, esta son las cantidades a usar para la toma de datos y cálculos correspondientes de la práctica de laboratorio.

TABLA DE UNIDADES PARA EL SEGUNDO ANILLO DEL MÓDULO DE CALIBRACIÓN DE FLUJO DEL LABORATORIO DE INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA		
SIGLA	Descripción	UNIDAD
Qv	Caudal Volumétrico	L/min
Qm	Caudal másico	Kg/h
s	Tiempo	Segundos
min		Minutos
h		Hora
L	Volumen	Litro
m³		Metro cubico
D	Densidad	Kg/L o Kg/m ³
Kg	Masa	Kilogramo

Figura 66. Tabla de convecciones HMI.

Fuente: Autor.

8. Análisis de resultados

Para hacer el estudio y análisis de resultados se toman 60 muestras de flujo volumétrico, en el Sensor Coriolis y 60 muestras del tiempo promedio en el recorrido del probador Bidireccional tipo esfera para cada una de las frecuencias del variador de velocidad en el motor. Esto se hizo en un periodo de dos semanas obteniendo 10800 datos respectivamente.

8.1 Flujo volumétrico del sensor coriolis

Los datos obtenidos por medio del sensor Coriolis se presentan en las tablas (se presenta la primera tabla de datos de cada prueba de flujo volumétrico del sensor coriolis las demás se encuentran como anexos al presente documento).

Tabla 5. Flujo volumétrico (1) sensor coriolis

Flujo volumétrico (L/min) del Sensor Coriolis										
Frecuencia(Hz)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
20	30,21	30,26	30,28	30,34	30,3	30,33	30,32	30,36	30,41	30,33
25	41,1	41,04	41,14	41,1	41,12	41,1	41,06	41,05	41,13	41,16
30	51,49	51,46	51,53	51,54	51,63	51,58	51,59	51,52	51,61	51,63
35	61,22	61,29	61,32	61,34	61,3	61,31	61,35	61,32	61,28	61,28
40	70,77	70,74	70,7	70,75	70,65	70,71	70,69	70,73	70,64	70,74
45	79,83	79,88	79,8	79,87	79,86	79,76	79,77	79,83	79,82	79,72
50	88,8	88,75	88,76	88,76	88,74	88,67	88,69	88,72	88,69	88,69
55	97,63	97,54	97,65	97,54	97,51	97,54	97,49	97,55	97,53	97,47
60	104,75	104,64	104,51	104,51	104,63	104,52	104,34	104,38	104,28	104,34

Fuente: Autor

8.2 Tiempos de recorrido en el Probador Bidireccional Tipo Esfera

Los tiempos obtenidos por medio del cronometro en la HMI del probador bidireccional tipo esfera se presentan en las siguientes tablas (se presenta la primera tabla de datos de tiempo de recorrido en el PBTE de cada prueba las demás se encuentran como anexos al presente documento).

Tabla 6. Tiempos del Recorrido en el PBTE (1)

Frecuencia Hz)	Tiempos (s)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
20	5,587	5,258	5,304	5,245	5,293	5,16	5,49	5,169	5,675	5,203
25	3,667	3,711	3,525	3,504	3,458	3,57	3,579	3,683	3,731	3,649
30	2,85	2,849	2,776	2,958	2,855	2,744	2,827	2,825	2,974	2,783
35	2,497	2,392	2,515	2,401	2,376	2,393	2,409	2,385	2,43	2,412
40	2,109	2,111	2,141	2,09	2,071	2,176	2,087	2,1	2,081	2,184
45	1,887	1,873	1,87	1,836	1,935	1,9	1,888	1,813	1,859	1,923
50	1,728	1,604	1,722	1,698	1,677	1,725	1,716	1,703	1,668	1,753
55	1,524	1,563	1,527	1,505	1,473	1,547	1,512	1,494	1,537	1,508
60	1,407	1,417	1,421	1,461	1,514	1,46	1,516	1,258	1,427	1,418

Fuente: Autor

Una vez obtenidos los tiempos calculamos el flujo volumétrico en el Probador Bidireccional Tipo Esfera dividiendo el volumen de la sección volumen calibrado del PBTE en el tiempo obtenido anteriormente dando como resultado las siguientes tablas.

Tabla 7. Flujo volumétrico (1) PBTE.

Flujo volumétrico (L/min) PBTE										
Frecuencia (Hz)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
20	21,767	23,129	22,928	23,186	22,976	23,568	22,151	23,527	21,429	23,373
25	33,163	32,770	34,499	34,706	35,168	34,064	33,979	33,019	32,594	33,327
30	42,670	42,685	43,808	41,112	42,595	44,318	43,017	43,048	40,891	43,697
35	48,702	50,840	48,354	50,650	51,183	50,819	50,481	50,989	50,045	50,419
40	57,662	57,608	56,800	58,187	58,720	55,887	58,270	57,909	58,438	55,682
45	64,446	64,928	65,032	66,236	62,847	64,005	64,412	67,077	65,417	63,240
50	70,376	75,817	70,621	71,619	72,516	70,498	70,868	71,409	72,908	69,372
55	79,796	77,805	79,640	80,804	82,559	78,610	80,430	81,399	79,122	80,643
60	86,432	85,822	85,580	83,237	80,324	83,294	80,218	96,669	85,221	85,761

Fuente: Autor

8.3 Caracterización del Sensor Coriolis

Para realizar la gráfica de flujo volumétrico del sensor Coriolis se necesitó hallar la ecuación característica que describe el comportamiento del sensor Coriolis en el sistema esto se hizo calculando el promedio de las 60 muestras de flujo volumétricos y de corriente para cada una de las frecuencias del variador de velocidad en el motor

Tabla 8. Caracterización del sensor Coriolis.

Caracterización del Sensor Coriolis		
Frecuencia (Hz)	Flujo Volumétrico (L/min)	Corriente(mA)
20	30,44816667	8,14683333
25	41,18983333	9,51183333
30	51,61433333	10,8491667
35	61,30783333	12,2271667
40	70,62416667	13,5395000
45	79,68683333	14,7360000
50	88,55600000	16,0826667
55	97,36350000	17,2773333
60	104,5426667	18,1448333

Fuente: Autor

Se grafican los datos promedio mediante el software de Microsoft Excel aplicando el método regresión lineal se obtiene la ecuación que describe el comportamiento del sensor Coriolis.

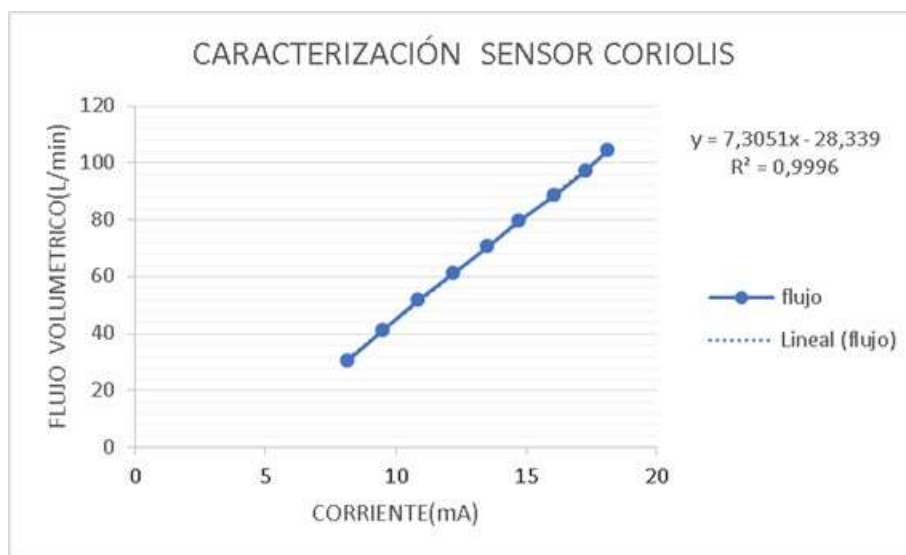


Figura 67. Caracterización del Sensor Tipo Coriolis.

Fuente: Autor

De la gráfica 63 se deduce que el comportamiento del sensor Coriolis es lineal.

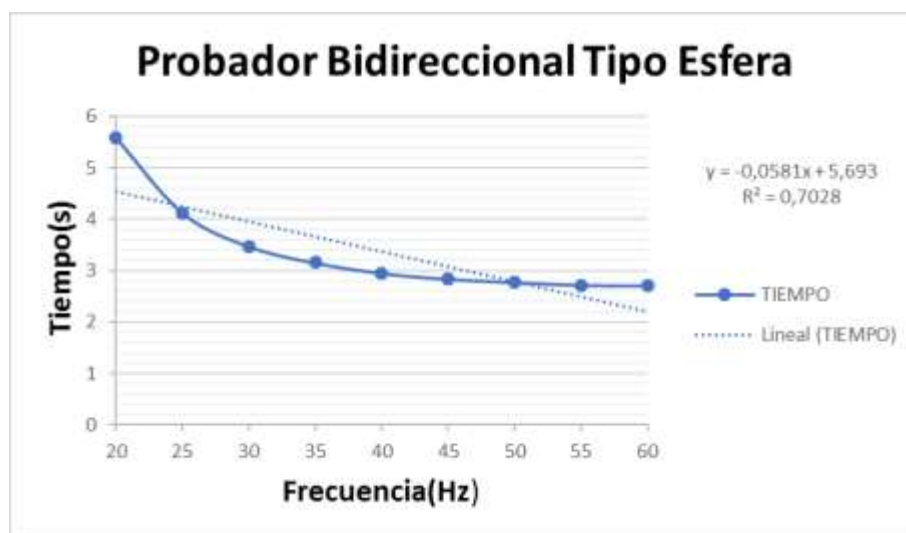
8.4 Caracterización del Probador Bidireccional Tipo Esfera

Al igual que en el sensor Coriolis en el probador bidireccional tipo esfera también se promedian los datos obtenidos, tanto los tiempos como flujos volumétricos respecto a cada frecuencia de funcionamiento para obtener sus respectivas gráficas.

Tabla 9. Tabla de caracterización PBTE.

Probador bidireccional tipo esfera		
Frecuencia	Tiempo	Flujo Volumétrico
20	5,30115	22,9402667
25	3,668825	33,1467963
30	2,880175	42,2230576
35	2,44481667	49,7418873
40	2,126625	57,1844096
45	1,90740833	63,7565606
50	1,740275	69,8796426
55	1,57086667	77,4157333
60	1,4651	83,0044331

Fuente: Autor

**Figura 68. Promedio de los tiempos de recorrido respecto a las Frecuencias de trabajo.**

Fuente: Autor

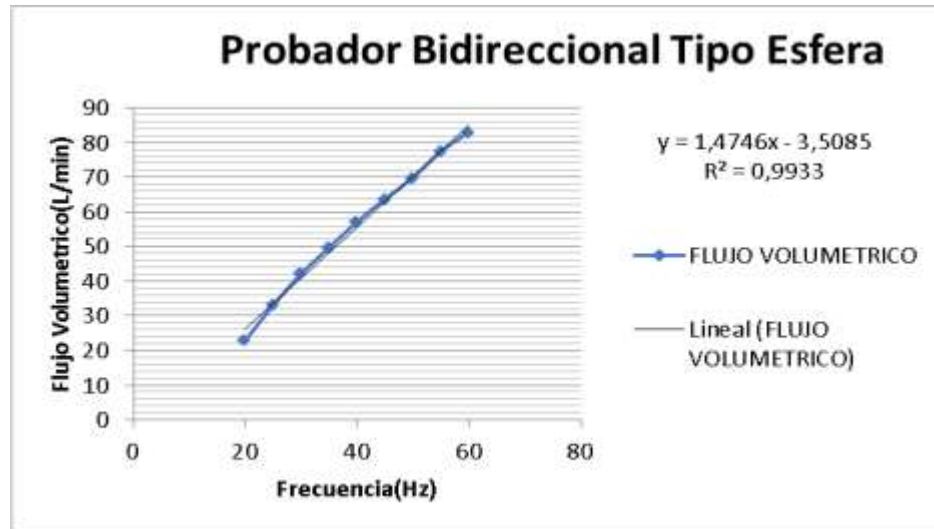


Figura 69. Comportamiento del Probador Bidireccional Tipo Esfera.

Fuente: Autor

En la figura 65 se puede observar que en las frecuencias bajas de 20 y 25 Hz los tiempos tienden a tener valores atípicos que hacen que la tendencia lineal sea un poco más baja marcando desde antemano una posible deficiencia en el probador bidireccional tipo esfera, aunque al hacer la conversión a flujo volumétrico esta no es tan notable.

8.5 Graficas sensor coriolis y probador bidireccional de esfera respecto a la frecuencia de trabajo de la motobomba

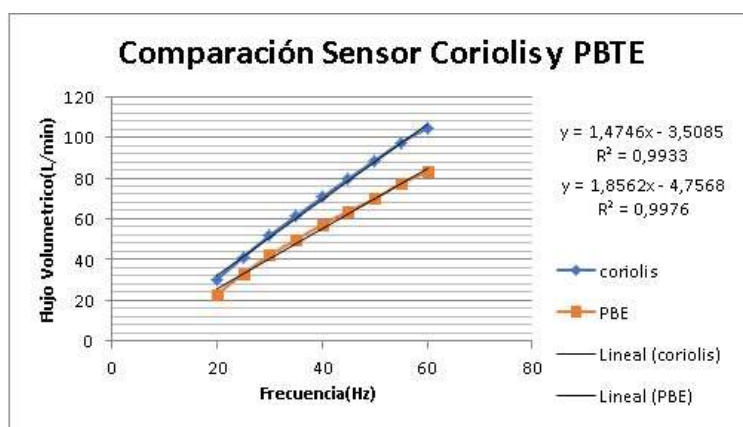
En la siguiente tabla se muestran la comparación del flujo volumétrico para cada una de las frecuencias en ambos instrumentos de medida, y el error estimado para el probador bidireccional de esfera teniendo como referencia los datos obtenidos del sensor Coriolis sabiendo por las referencias bibliográficas que este tiene una mayor precisión y exactitud.

Tabla 10. Comparativa entre el PBTE y el Sensor Coriolis.

Frecuencia (Hz)	Flujo Volumétrico Sensor Coriolis(L/min)	Flujo Volumétrico PBTE (L/min)	Error del PBTE respecto al Sensor Coriolis
20	30,44481667	22,9402667	5,306518171
25	41,18983333	33,1467963	5,687286025
30	51,8491667	42,2230576	6,806687021
35	61,15783333	49,7418873	8,072292851
40	70,62416667	57,1844096	11,2640503
45	79,6863333	63,7565606	11,2640503
50	88,556	69,8796426	13,20617897
55	97,3635	77,4157333	14,1052011
60	104,5426667	83,0044331	15,22983103

Fuente: Autor

En las gráficas de esta comparación al igual que en la tabla podemos observar que las tendencias de ambos instrumentos de medida son lineales, que el error a medida que aumenta las frecuencias también se hace significativo y que la medida del prover siempre está por debajo de la medida del sensor Coriolis,

**Figura 70. Gráfica comparativa entre el PBTE y el Sensor Coriolis.**

Fuente: Autor

8.6 Pruebas de Verificación Realizadas

Para la verificación de las mediciones realizadas por el sensor Coriolis y el probador bidireccional tipo esfera se hizo uso del método de recolección que sugiere la norma NTC 1063-3 el cual permite calcular el error de medida del instrumento. Para realizar la prueba de recolección se empleó un tanque patrón con una capacidad de 25 litros, tomando para cada prueba un tiempo de llenado fijo y con se midió el volumen para ese tiempo. Se realizó para cada una de las frecuencias de trabajo de la HMI (20Hz a 60Hz), en pasos de 5Hz obteniendo las siguientes tablas de datos:

8.6.1 Sensor Coriolis

Tabla 11. Prueba de Recolección 20Hz Sensor Coriolis.

Frecuencia (Hz)	Prueba de Recolección			Sensor Coriolis	
	Tiempo de Prueba(s)	Volumen del Tanque(L)	Caudal Teórico(L/min)	Caudal (L/min)	%Error
20	10	5,019	30,1197054	30,21	0,06384792
20	10	4,557	27,345522	30,26	2,06084716
20	10	4,623	27,7418339	30,28	1,79475446
20	10	4,293	25,7602744	30,34	3,23835503
20	10	4,293	25,7602744	30,3	3,21007076
20	10	4,491	26,9492101	30,33	2,39057946
20	10	4,227	25,3639624	30,32	3,50444779
20	10	4,491	26,9492101	30,36	2,41179267
20	10	4,425	26,5528982	30,41	2,72738284
20	10	4,689	28,1381458	30,33	1,54987497

Fuente: Autor

8.6.2 Probador bidireccional de tipo esfera

Tabla 12. Prueba de Recolección 20 Hz PBTE.

Frecuencia (Hz)	Tiempo de Prueba(s)	Volumen del Tanque(L)	Caudal Teórico(L/min)	Caudal (L/min)	%Error
20	20	6,274	18,82481588	21,767	2,08043834
20	20	6,274	18,8248159	23,129	3,04351776
20	20	6,473	19,4192837	22,928	2,48103709
20	20	6,274	18,8248159	23,186	3,08382285
20	20	6,274	19,0229718	22,976	2,79521305
20	20	6,407	19,2211278	23,568	3,07370281
20	20	6,473	19,4192837	22,151	1,93161512
20	20	6,274	18,8248159	23,527	3,32494626
20	20	6,473	19,4192837	21,429	1,42108402
20	20	6,539	19,6174397	23,373	2,65558216

Fuente: Autor

8.6.3 Comparación de los métodos de medición

Tabla 13. Comparación de la Pruebas Sensor Coriolis

Sensor Coriolis			
Frecuencia	Flujo Volumétrico HMI (L/min) promedio	Flujo Volumétrico Recolección(L/min) promedio	Error
20	30,4448167	27,0681037	2,38769668 %
25	41,1898333	38,7989363	1,69061948 %
30	51,8491667	45,1795581	4,71612546 %
35	61,1578333	58,0200641	2,21873788 %
40	70,6241667	65,6292528	3,53193747 %
45	79,6863333	78,2319717	1,02838897 %
50	88,556	84,3748063	2,95655045 %
55	97,3635	106,568273	6,50875774 %
60	104,542667	111,561804	4,96327907 %
		Promedio	3,33356596 %

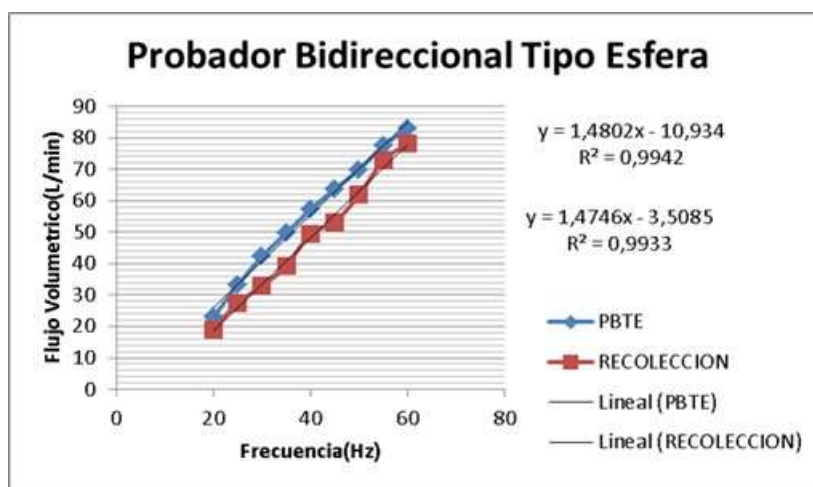
Fuente: Autor

Tabla 14. Comparación de la Pruebas PBTE.

Probador Bidireccional Tipo Esfera			
Frecuencia	Flujo Volumétrico HMI (L/min) promedio	Flujo Volumétrico Recolección(L/min) promedio	Error
20	22,9402667	19,1418654	2,68587531 %
25	33,1467963	27,5189085	3,97951764 %
30	42,2230576	32,8655808	6,61673532 %
35	49,7418873	39,3339574	7,35951782 %
40	57,1844096	49,4200956	5,49019909 %
45	63,7565606	53,2999083	7,39396973 %
50	69,8796426	61,878701	5,65752006 %
55	77,4157333	72,8343967	3,23949415 %
60	83,0044331	78,1725249	3,41667506 %
		Promedio	5,09327824 %

Fuente: Autor

Gráfica comparación de los métodos de medición del Probador Bidireccional y Sensor Coriolis.



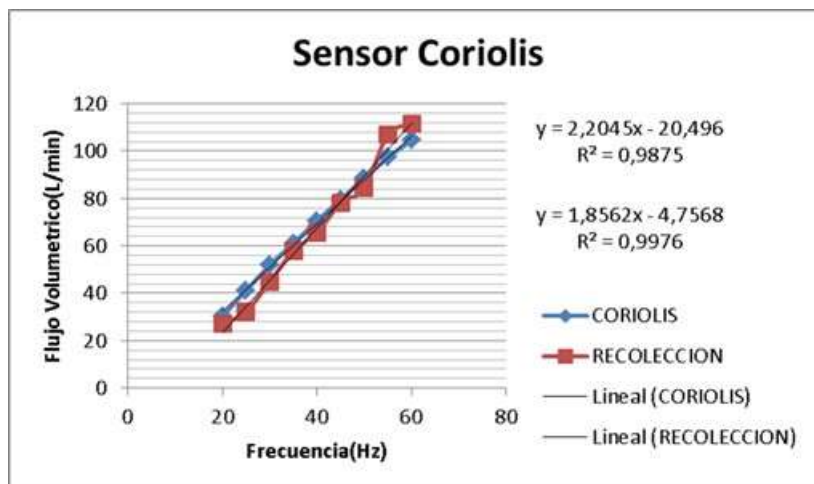


Figura 71. Comparación Grafica del PBTE y el Sensor Tipo Coriolis

Fuente: Autor

9. Conclusiones

- Se implemento la automatización del probador bidireccional tipo esfera del segundo anillo de calibración del módulo de flujo del laboratorio de instrumentación de la Universidad pontificia bolivariana teniendo en cuenta el acondicionamiento de señales entre la instrumentación el controlador y el BCPS para un correcto funcionamiento y posterior estudio de la variable física a medir.
- El acondicionamiento de señales entre el BCPS, la instrumentación del probador y el transmisor de flujo tipo Coriolis se implementó mediante la realización de nuevas conexiones a las tarjetas de adquisición de datos, usando relés de estado sólido para el aislamiento de las señales eléctrica y las de control, y ubicando los dos elementos de medicion en serie en el segundo anillo de calibración del módulo de flujo del laboratorio de instrumentación.
- Se desarrollo un algoritmo de control con HMI mediante el software Labview que permite medir el tiempo mediante un cronometro calculando de esta manera el promedio del flujo en el probador bidireccional y además controlar automáticamente el accionamiento de las válvulas para el cambio de sentido del probador bidireccional y la medición con el sensor Coriolis
- Se determinó que el sensor coriolis es elemento de mayor exactitud para la medicion de flujo volumétrico ya que al realizar las pruebas de recolección y las pruebas del interfaz humano maquina y comparar los resultados obtenidos fueron los datos que tuvieron una menor desviación respecto al probador bidireccional de tipo esfera.
- La guía se diseñó con la respectiva teoría de los fenómenos físicos presentes en los instrumentos de medicion empleados en el módulo, además de una explicación paso a paso para el manejo de la HMI y las actividades a realizar en la práctica del laboratorio.

10. Recomendaciones

Durante el desarrollo de la automatización del segundo anillo del módulo de flujo se detectaron fallas que no se encontraban dentro del alcance de este proyecto de grado o por factores de presupuesto, por esta razón se presentan las siguientes recomendaciones para futuras fases de desarrollo del módulo de flujo:

- Corregir la posición de instalación del sensor Coriolis ya que se encuentra inclinado respecto a la normal del flujo, y causa errores a la hora de la medición de las variables de flujo volumétrico y másico del proceso.
- Cambiar la posición del sensor Coriolis, el cual debería encontrarse primero respecto al probador bidireccional de tipo esfera, para tener datos más exactos.
- Crear una apertura en el tanque de agua para evitar el aire en el sistema a si evitando daños generados por cavitación dentro de la estructura del segundo anillo del módulo de flujo en especial para las dos herramientas de medición
- Instalar una válvula a modo de bypass en el distribuidor del probador bidireccional para separar los dos medidores de flujo y poder trabajarlos por separado.
- Se recomienda la limpieza continua del tanque para evita partículas que afecten la operación de sensor Coriolis y el probador bidireccional.
- Realizar la instalación de una mirilla en el recorrido del proceso para observar el comportamiento del flujo en la prueba.
- Se recomiendo cambiar los sensores magnéticos del probador bidireccional para tener una mayor exactitud en la toma de datos de tiempo del recorrido

Referencias bibliográficas

A.T.J, H. (2012). *Pipe Provers*. En H. A.T.J, *Pipe Provers a user manual*.ABB. (Diciembre de 2015). ABB. Recuperado el 2019, de Comunicación vía Bus. Obtenido de: https://library.e.abb.com/public/b7f148ca3e552dddc1257aca003530c4/CT13-Comunicacion%20via%20bus%20con%20los%20interruptores%20ABB_ES-OK.pdf

Academiatesto. (2019). *Academiatesto*. Recuperado el 2019, de Flujo Volumétrico. Obtenido de: http://academiatesto.com.ar/cms/medicion-del-flujo_volumetrico

Acondicionado, A. (2018). *Aire Acondicionado*. Recuperado el 2019, de La Valvula Solenoide. Obtenido de: <https://tuaireacondicionado.net/valvula-solenoide-funcionamiento>

Aitunexpo. (2007). *Aitunexpo*. Recuperado el 2019, de Efecto Coriolis. Obtenido de: <http://aitunexpo.blogspot.com.co/2007/05/principio-de-funcionamiento.html>

Álvarez, A. D. (2012). *Implementación del primer anillo de calibración del banco de medición de flujo de agua basado en la norma técnica colombiana NTC 1063 para el laboratorio de instrumentación de la UPB*. Bucaramanga, Colombia.

Arias R. (2000). *Calibración Dinámica de un Probador Bidireccional*. Fallas, Costa Rica.

Autycom. (2018). *Autycon. Obtenido de Que es un sistema HMI*. Obtenido de: <https://www.autycom.com/que-es-un-sistema-hmi/>

Bernal, M. (2018). *Comparación de dos técnicas de medición de flujo correspondientes a un probador bidireccional y un sensor tipo Coriolis*. Bucaramanga, Colombia.

Caballero, U. J. (2006). *Aseguramiento Metrológico y Trazabilidad de instrumentación de la Industria de Gas Licuado de Petróleo*. Colombia.

Carlos Camacho, N. A. (2012). *Diseño y construcción de probador bidireccional para medidores de flujo del laboratorio de instrumentación de la Universidad Pontifica Bolivariana*. Bucaramanga, Colombia.

Ecopetrol. (2013). *Capítulo 4, Sistemas Probadores*. En Ecopetrol, Manual de Medición de Hidrocarburos y Biocombustibles.

Endress+Hauser. (2018). *Caudalímetros másicos por efecto Coriolis*. Obtenido de: <https://www.es.endress.com/es/instrumentacion-campo/medicion-caudal/caudalimetros-masicos-coriolis>

Gas, C. d. (2010). *Medidores de flujo másico tipo Coriolis*. Recuperado el 2019, de *Medidores de Flujo Másico*. Obtenido de: http://www.cdtdegas.com/imagenes/Descargas/Nuestra_revista/METFlu8/4_Validacion_Medidores_de_Flujo_Masico_tipo_coriolis.pdf

ICSA. (2018). *Requisitos Generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración*. Obtenido de: <https://www.icsa.es/laboratorios-analiticos/consultoria-de-laboratorios/norma-iso-17025>

Institute, A. P. (s.f.). *API 1101, American Standar Method for Measurament of Petroleum Liquid Hydrocarbons by positive displacement meters*. New York.

Instrument, N. (2019). *¿Qué es LabVIEW?* Recuperado el 2019, de *¿Qué es LabVIEW?*. Obtenido de: <http://www.ni.com/es-co/shop/labview.html>

Instrumet, N. (Diciembre de 2015). *National Instrumet*. Recuperado el 2019, de *Adquisición de Datos*. Obtenido de: <http://ni.com/data-acquisition/what-is/esa/>.

Instrumet, N. (Diciembre de 2015). *National Instrumet*. Recuperado el 2019, de *NI 9472*. Obtenido de: <http://www.ni.com/datasheet/pdf/en/ds-178>

Instrumet, N. (Diciembre de 2015). *NI 9203 Datasheet - 8-Channel, ± 20 mA, 16-Bit Analog Input Module*. Recuperado el 2019, de NI 9203. Obtenido de: http://www.ni.com/pdf/manuals/374070a_02.pdf

Instrumet, N. (Diciembre de 2015). *NI 9421 - 8-Channel Sinking Digital Input Module*. Recuperado el 2019, de NI 9421. Obtenido de: http://www.ni.com/pdf/manuals/373504a_02.pdf

LabView. (2017). *LabView*. Recuperado el junio de 2019, de Wikipedia. Obtenido de: Obtenido de: <http://es.wikipedia.org./wikLabVIEW>

López, E. (2018). *Estudio comparativo entre dos medidores de desplazamiento positivo de la estación No 2 "LUMBAQUI" y medidores de tipo coriolis de la estación "SANSAHUARI", en sistemas de Medición de Hidrocarburos*. Quito, Ecuador.

Osinerghmin. (2012). *Biblioteca Olade*. Recuperado el 2019, de El Gas Natural y sus Diferencias con el GLP. Obtenido de: <http://biblioteca.olade.org/opac-tmpl/Documentos/hm00061.pdf>

Quintero Carrilo., Andrea Marcela J. S. (2018). *Automatización de la Operación del Probador Bidireccional Tipo esfera en el Segundo anillo de calibración del Módulo de flujo del Laboratorio de instrumentación de la UPB*. Bucaramanga, Colombia.

Sanches, J. (2006). *Instrumentación*. Díaz Santos.

Sánchez, D. (2000). *Prueba de Turbinas usando Probador Bidireccional*. Fallas, Costa Rica.

Solorzano, C. P. (2010). *Rediseño del Sistema de Almacenamiento y Transporte de Crudos de los campos Culebra-Yulebra-Anaconda Hacia el CPF*. Ecuador.

Villajulca, J. C. (2010). *Instrumentación y Control*. Recuperado el 2019, de Caudalímetros Másicos Coriolis: Principio de Medición. Obtenido de: <https://instrumentacionycontrol.net/caudalimetros-masicos-coriolis-principio-de-medicion/>

Wikipedia. (2017). *LabVIEW*. Recuperado el 2019. Obtenido de: <https://es.wikipedia.org/wiki/LabVIEW>.

Apéndices

Apéndice A. Tablas de datos flujo volumétrico sensor coriolis

Flujo volumétrico del sensor coriolis. Los datos obtenidos por medio del sensor Coriolis se presentan en las siguientes tablas.

Tabla 15. Flujo volumétrico (L/min) del Sensor Coriolis(1)

Flujo volumétrico (L/min) del Sensor Coriolis										
Frecuencia (Hz)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
20	30,21	30,26	30,28	30,34	30,3	30,33	30,32	30,36	30,41	30,33
25	41,1	41,04	41,14	41,1	41,12	41,1	41,06	41,05	41,13	41,16
30	51,49	51,46	51,53	51,54	51,63	51,58	51,59	51,52	51,61	51,63
35	61,22	61,29	61,32	61,34	61,3	61,31	61,35	61,32	61,28	61,28
40	70,77	70,74	70,7	70,75	70,65	70,71	70,69	70,73	70,64	70,74
45	79,83	79,88	79,8	79,87	79,86	79,76	79,77	79,83	79,82	79,72
50	88,8	88,75	88,76	88,76	88,74	88,67	88,69	88,72	88,69	88,69
55	97,63	97,54	97,65	97,54	97,51	97,54	97,49	97,55	97,53	97,47
60	104,75	104,64	104,51	104,51	104,63	104,52	104,34	104,38	104,28	104,34

Fuente: Autor

Tabla 16 Flujo volumétrico (L/min) del Sensor Coriolis(2)

Flujo Volumétrico (L/min) del Sensor Coriolis										
Frecuencia (Hz)	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
20	30,28	30,36	30,33	30,32	30,33	30,28	30,31	30,28	30,39	30,31
25	41,05	41,06	41,07	41,13	41,14	41,14	41,1	41,19	41,1	41,14
30	51,52	51,56	51,58	51,63	51,57	51,57	51,57	51,61	51,64	51,54
35	61,3	61,34	61,35	61,35	61,25	61,32	61,25	61,29	61,31	61,34
40	70,68	70,66	70,57	70,61	70,61	70,66	70,65	70,63	70,63	70,59
45	79,79	79,73	79,71	79,75	79,66	79,7	79,68	79,65	79,73	79,68
50	88,63	88,59	88,55	88,58	88,59	88,58	88,57	88,6	88,57	88,62
55	97,31	97,28	97,25	97,29	97,19	97,13	97,15	97,27	97,15	97,14
60	104,24	104,26	104,22	104,19	104,12	104,16	104,12	104,24	104,26	104,19

Fuente: Autor

Tabla 17. Flujo volumétrico (L/min) del Sensor Coriolis (3)

Flujo Volumétrico (L/min) del Sensor Coriolis										
Frecuencia (Hz)	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
20	30,38	30,47	30,42	30,37	30,44	30,47	30,43	30,4	30,47	30,57
25	41,12	41,21	41,14	41,12	41,22	41,23	41,21	41,23	41,22	41,18
30	51,52	51,6	51,5	51,66	51,56	51,73	51,63	51,64	51,64	51,64
35	61,25	61,25	61,19	61,15	61,18	61,25	61,15	61,11	61,19	61,17
40	70,53	70,52	70,5	70,47	70,53	70,54	70,53	70,48	70,5	70,58
45	79,59	79,54	79,55	79,54	79,57	79,46	79,44	79,53	79,49	79,51
50	88,48	88,4	88,33	88,38	88,39	88,33	88,3	88,4	88,29	88,23
55	97,31	97,3	97,19	97,17	97,24	97,22	97,17	97,12	97,09	97,04
60	104,58	104,53	104,36	104,29	104,38	104,4	104,27	104,23	104,06	104,08

Fuente: Autor

Tabla 18. Flujo volumétrico (L/min) del Sensor Coriolis (4)

Flujo Volumétrico (L/min) del Sensor Coriolis										
Frecuencia (Hz)	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
20	30,39	30,32	30,33	30,42	30,47	30,4	30,46	30,39	30,47	30,45
25	41,07	41,1	41,17	41,13	41,19	41,18	41,18	41,09	41,22	41,19
30	51,63	51,63	51,61	50,65	51,66	51,64	51,66	51,6	51,62	51,65
35	61,37	61,29	61,9	61,27	61,35	61,35	61,33	61,29	61,33	61,32
40	70,7	70,62	70,51	70,62	70,72	70,67	70,67	70,66	70,61	70,58
45	79,76	79,78	79,77	79,75	79,69	79,64	79,8	79,66	79,7	79,66
50	88,67	88,72	88,65	88,62	88,64	88,54	88,64	88,48	88,6	88,26
55	97,47	97,52	97,51	97,49	97,3	97,43	97,35	97,39	97,42	97,31
60	104,71	104,61	104,43	104,32	104,37	104,31	104,27	104,29	104,19	104,1

Fuente: Autor

Tabla 19. Flujo volumétrico (L/min) del Sensor Coriolis (5)

Flujo Volumétrico (L/min) del Sensor Coriolis										
Frecuencia Hz	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
20	30,29	30,34	30,38	30,47	30,55	30,6	30,52	30,47	30,47	30,43
25	41,17	41,25	41,26	41,25	41,22	41,22	41,27	41,17	41,3	41,22
30	51,59	51,64	51,6	51,59	51,67	51,63	51,62	51,64	51,58	51,68
35	61,27	61,31	61,34	61,32	61,31	61,32	61,31	61,23	61,31	61,3
40	70,53	70,56	70,62	70,61	70,58	70,51	70,63	70,66	70,53	70,64
45	79,67	79,57	79,59	79,57	79,55	79,63	79,56	79,59	79,52	79,58
50	88,44	88,39	88,47	88,48	88,43	88,43	88,44	88,49	88,38	88,35
55	97,38	97,35	97,25	97,41	97,24	97,18	97,17	97,22	97,14	97,18
60	104,93	104,64	104,66	104,59	104,47	104,4	104,45	104,31	104,2	104,25

Fuente: Autor

Tabla 20. Flujo volumétrico (L/min) del Sensor Coriolis (6)

Flujo Volumétrico (L/min) del Sensor Coriolis										
Frecuencia Hz	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
20	30,78	30,78	30,76	30,78	30,72	30,73	30,85	30,69	30,69	30,74
25	41,4	41,4	41,42	41,39	41,28	41,31	41,31	41,38	41,28	41,37
30	51,73	51,71	51,71	51,72	51,78	51,83	51,86	51,79	51,87	51,78
35	61,42	61,38	61,38	61,27	61,4	61,27	61,33	61,38	61,43	61,39
40	70,61	70,59	70,56	70,66	70,73	70,79	70,6	70,71	70,71	70,67
45	79,76	79,72	79,75	79,68	79,75	79,86	79,83	79,81	79,81	79,76
50	88,59	88,65	88,58	88,62	88,76	88,72	88,68	88,56	88,67	88,73
55	97,56	97,59	97,59	97,71	97,66	97,76	97,61	97,63	97,63	96,9
60	106,01	105,74	105,55	105,45	105,32	105,27	105,12	105,68	104,87	104,97

Fuente: Autor

Apéndice B. Tablas de datos flujo volumétrico *Probador Bidireccional Tipo Esfera (1)*

Tiempos de recorrido en el probador bidireccional tipo esfera. Los tiempos obtenidos por medio del cronometro en la HMI del probador bidireccional tipo esfera se presentan en las siguientes tablas.

Tabla 21. Tiempos Probador Bidireccional Tipo Esfera (1)

Tiempos (s)										
Frecuencia Hz)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
20	5,587	5,258	5,304	5,245	5,293	5,16	5,49	5,169	5,675	5,203
25	3,667	3,711	3,525	3,504	3,458	3,57	3,579	3,683	3,731	3,649
30	2,85	2,849	2,776	2,958	2,855	2,744	2,827	2,825	2,974	2,783
35	2,497	2,392	2,515	2,401	2,376	2,393	2,409	2,385	2,43	2,412
40	2,109	2,111	2,141	2,09	2,071	2,176	2,087	2,1	2,081	2,184
45	1,887	1,873	1,87	1,836	1,935	1,9	1,888	1,813	1,859	1,923
50	1,728	1,604	1,722	1,698	1,677	1,725	1,716	1,703	1,668	1,753
55	1,524	1,563	1,527	1,505	1,473	1,547	1,512	1,494	1,537	1,508
60	1,407	1,417	1,421	1,461	1,514	1,46	1,516	1,258	1,427	1,418

Fuente: Autor

Tabla 22. Tiempos Probador Bidireccional Tipo Esfera (2)

Tiempos (s)										
Frecuencia(Hz)	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
20	4,978	4,998	5,119	5,055	4,898	5,007	4,84	4,972	4,999	5,081
25	3,679	3,597	3,801	3,665	3,579	3,507	3,819	3,476	3,584	3,543
30	3,032	2,727	2,911	2,9	2,994	2,857	2,896	2,822	2,882	2,918
35	2,529	2,426	2,424	2,435	2,441	2,402	2,327	2,431	2,366	2,369
40	2,073	2,085	2,138	2,138	2,232	2,09	2,178	2,151	2,155	2,117
45	1,865	1,878	1,897	1,846	1,874	1,953	1,869	1,952	1,966	1,998
50	1,752	1,755	1,738	1,836	1,785	1,765	1,86	1,757	1,797	1,821
55	1,695	1,696	1,634	1,657	1,654	1,59	1,662	1,646	1,657	1,632
60	1,405	1,588	1,457	1,567	1,473	1,526	1,588	1,546	1,485	1,551

Fuente: Autor

Tabla 23. Tiempos Probador Bidireccional Tipo Esfera (3)

Frecuencia(Hz)	Tiempos (s)									
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
20	6,219	5,975	6,163	5,767	5,436	5,473	6,013	6,048	5,7	5,734
25	3,918	3,444	3,907	3,769	3,722	3,739	3,691	3,591	3,56	3,733
30	2,973	2,908	2,809	2,901	2,926	2,83	2,902	2,902	2,872	2,954
35	2,522	2,428	2,462	2,516	2,45	2,386	2,5	2,527	2,309	2,389
40	2,031	2,062	2,057	2,189	2,101	2,062	2,172	2,166	2,201	2,116
45	1,863	1,881	1,854	1,877	1,902	1,93	1,977	1,841	1,861	1,968
50	1,703	1,761	1,71	1,648	1,722	1,689	1,706	1,664	1,683	1,708
55	1,514	1,496	1,571	1,592	1,541	1,543	1,517	1,527	1,475	1,503
60	1,412	1,411	1,445	1,407	1,444	1,426	1,407	1,439	1,349	1,457

Fuente: Autor

Tabla 24. Tiempos Probador Bidireccional Tipo Esfera (4)

Frecuencia(Hz)	Tiempos (s)									
	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
20	5,463	5,609	5,481	5,101	5,097	5,021	5,124	5,185	4,995	5,361
25	3,743	3,648	3,596	3,639	3,701	3,567	3,636	3,621	3,491	3,662
30	2,860	2,924	2,909	2,738	2,853	3,021	2,816	2,88	2,963	2,85
35	2,605	2,359	2,47	2,364	2,49	2,469	2,551	2,485	2,406	2,446
40	2,169	2,101	2,196	2,223	2,07	2,259	2,12	2,154	2,111	2,179
45	1,878	2,051	1,974	1,925	1,945	1,912	2,006	1,892	1,967	1,912
50	1,808	1,755	1,694	1,815	1,676	1,694	1,797	1,797	1,671	1,844
55	1,659	1,686	1,675	1,57	1,591	1,596	1,574	1,615	1,59	1,7
60	1,424	1,553	1,541	1,509	1,529	1,525	1,575	1,522	1,495	1,55

Fuente: Autor

Tabla 25. Tiempos Probador Bidireccional Tipo Esfera (5)

Frecuencia(Hz)	Tiempos (s)									
	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
20	5,2	5,505	5,31	5,196	5,506	5,659	5,625	5,736	5,975	5,766
25	3,644	3,745	3,743	3,817	3,678	3,738	3,608	3,791	3,763	3,835
30	2,931	3,066	3,043	2,937	2,864	3,013	2,929	2,886	3,095	3,005
35	2,508	2,371	2,474	2,438	2,462	2,474	2,438	2,488	2,459	2,422
40	2,126	2,088	2,093	2,094	2,065	2,095	2,127	2,158	2,109	2,157
45	1,894	1,846	1,878	1,853	1,877	1,845	1,874	1,884	1,84	1,903
50	1,664	1,758	1,662	1,831	1,811	1,733	1,723	1,752	1,726	1,738
55	1,499	1,5	1,519	1,559	1,442	1,574	1,526	1,545	1,514	1,534
60	1,453	1,418	1,39	1,422	1,402	1,469	1,375	1,411	1,433	1,42

Fuente: Autor

Tabla 26. Tiempos Probador Bidireccional Tipo Esfera (6)

Frecuencia(Hz)	Tiempos (s)									
	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
20	5,108	4,995	4,913	5,12	4,972	5,113	4,961	4,899	5,425	5,157
25	3,618	3,609	3,65	3,636	3,662	3,719	3,527	3,561	3,603	3,565
30	2,865	2,815	2,843	2,758	2,842	2,876	2,793	2,943	2,729	2,931
35	2,331	2,454	2,457	2,486	2,450	2,442	2,408	2,472	2,367	2,497
40	2,208	2,129	2,12	2,14	2,152	2,145	2,227	2,247	2,11	2,094
45	1,988	1,988	2,022	1,978	1,910	1,956	1,988	1,943	1,976	1,947
50	1,767	1,705	1,858	1,864	1,863	1,781	1,851	1,847	1,763	1,79
55	1,537	1,533	1,581	1,573	1,532	1,658	1,62	1,648	1,592	1,577
60	1,398	1,465	1,476	1,48	1,451	1,535	1,532	1,502	1,51	1,519

Fuente: Autor

Una vez obtenidos los tiempos calculamos el flujo volumétrico en el Probador Bidireccional Tipo Esfera dividiendo el volumen de la sección volumen calibrado del PBTE en el tiempo obtenido anteriormente dando como resultado las siguientes tablas.

Tabla 27. Flujo volumétrico (L/min) PBTE (1)

Flujo volumétrico (L/min) PBTE										
Frecuencia. (Hz)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
20	21,767	23,129	22,928	23,186	22,976	23,568	22,151	23,527	21,429	23,373
25	33,163	32,770	34,499	34,706	35,168	34,064	33,979	33,019	32,594	33,327
30	42,670	42,685	43,808	41,112	42,595	44,318	43,017	43,048	40,891	43,697
35	48,702	50,840	48,354	50,650	51,183	50,819	50,481	50,989	50,045	50,419
40	57,662	57,608	56,800	58,187	58,720	55,887	58,270	57,909	58,438	55,682
45	64,446	64,928	65,032	66,236	62,847	64,005	64,412	67,077	65,417	63,240
50	70,376	75,817	70,621	71,619	72,516	70,498	70,868	71,409	72,908	69,372
55	79,796	77,805	79,640	80,804	82,559	78,610	80,430	81,399	79,122	80,643
60	86,432	85,822	85,580	83,237	80,324	83,294	80,218	96,669	85,221	85,761

Fuente: Autor

Tabla 28. Flujo volumétrico (L/min) PBTE (2)

Flujo Volumétrico (L/min) PBTE										
Frecuencia\ (Hz)	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
20	24,429	24,332	23,757	24,057	24,828	24,288	25,126	24,459	24,327	23,934
25	33,055	33,809	31,994	33,181	33,979	34,676	31,843	34,986	33,931	34,324
30	40,109	44,595	41,776	41,934	40,618	42,566	41,992	43,093	42,196	41,676
35	48,086	50,128	50,169	49,942	49,820	50,629	52,260	50,025	51,399	51,334
40	58,664	58,326	56,880	56,880	54,485	58,187	55,836	56,536	56,431	57,444
45	65,206	64,755	64,106	65,877	64,893	62,268	65,067	62,300	61,856	60,866
50	69,412	69,293	69,971	66,236	68,129	68,901	65,382	69,214	67,674	66,782
55	71,746	71,704	74,425	73,392	73,525	76,484	73,171	73,882	73,392	74,516
60	86,555	76,580	83,466	77,607	82,559	79,692	76,580	78,661	81,892	78,407

Fuente: Autor

Tabla 29. Flujo volumétrico (L/min) PBTE (3)

Flujo Volumétrico (L/min) PBTE										
Frecuencia. (Hz)	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
20	19,555	20,353	19,732	21,087	22,371	22,220	20,224	20,107	21,335	21,209
25	31,039	35,311	31,126	32,266	32,673	32,525	32,948	33,865	34,160	32,577
30	40,905	41,819	43,293	41,920	41,562	42,972	41,906	41,906	42,343	41,168
35	48,220	50,086	49,395	48,335	49,637	50,968	48,644	48,124	52,668	50,904
40	59,877	58,977	59,120	55,555	57,882	58,977	55,990	56,145	55,252	57,472
45	65,276	64,652	65,593	64,789	63,938	63,010	61,512	66,056	65,346	61,794
50	71,409	69,057	71,117	73,792	70,621	72,001	71,284	73,083	72,258	71,200
55	80,324	81,290	77,409	76,388	78,916	78,814	80,165	79,640	82,447	80,911
60	86,126	86,187	84,159	86,432	84,217	85,280	86,432	84,510	90,148	83,466

Fuente: Autor

Tabla 30. Flujo volumétrico (L/min) PBTE (4)

Flujo Volumétrico (L/min) PBTE										
Frecuencia. (Hz)	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
20	22,261	21,681	22,188	23,840	23,859	24,220	23,733	23,454	24,346	22,684
25	32,490	33,336	33,818	33,418	32,859	34,093	33,446	33,585	34,835	33,209
30	42,521	41,590	41,805	44,416	42,625	40,255	43,185	42,226	41,043	42,670
35	46,683	51,551	49,235	51,442	48,839	49,255	47,671	48,938	50,544	49,718
40	56,067	57,882	55,378	54,705	58,749	53,833	57,363	56,458	57,608	55,810
45	64,755	59,293	61,606	63,174	62,524	63,603	60,623	64,276	61,825	63,603
50	67,262	69,293	71,789	67,003	72,560	71,789	67,674	67,674	72,777	65,949
55	73,303	72,129	72,603	77,458	76,436	76,197	77,262	75,300	76,484	71,535
60	85,400	78,306	78,916	80,590	79,536	79,744	77,213	79,901	81,344	78,458

Fuente: Autor

Tabla 31. Flujo volumétrico (L/min) PBTE (5)

Flujo Volumétrico (L/min) PBTE										
Frecuencia (Hz)	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
20	23,386	22,091	22,902	23,405	22,087	21,490	21,620	21,201	20,353	21,091
25	33,373	32,473	32,490	31,860	33,064	32,533	33,706	32,079	32,317	31,711
30	41,491	39,664	39,964	41,406	42,462	40,362	41,519	42,138	39,292	40,469
35	48,489	51,291	49,155	49,881	49,395	49,155	49,881	48,879	49,455	50,210
40	57,201	58,242	58,103	58,075	58,891	58,048	57,174	56,353	57,662	56,379
45	64,208	65,877	64,755	65,629	64,789	65,913	64,893	64,549	66,092	63,904
50	73,083	69,175	73,171	66,417	67,151	70,173	70,580	69,412	70,458	69,971
55	81,127	81,073	80,059	78,005	84,334	77,262	79,692	78,712	80,324	79,276
60	83,696	85,761	87,489	85,520	86,740	82,784	88,443	86,187	84,864	85,641

Fuente: Autor

Tabla 32. Flujo volumétrico (L/min) PBTE (6)

Flujo Volumétrico (L/min) PBTE										
Frecuencia (Hz)	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
20	23,808	24,346	24,753	23,752	24,459	23,784	24,513	24,823	22,417	23,581
25	33,612	33,696	33,318	33,446	33,209	32,700	34,480	34,150	33,752	34,112
30	42,447	43,201	42,775	44,093	42,790	42,284	43,541	41,322	44,562	41,491
35	52,171	49,556	49,495	48,918	49,637	49,799	50,502	49,195	51,377	48,702
40	55,077	57,121	57,363	56,827	56,510	56,695	54,607	54,121	57,635	58,075
45	61,172	61,172	60,143	61,481	63,670	62,173	61,172	62,589	61,543	62,460
50	68,823	71,325	65,452	65,241	65,276	68,282	65,700	65,842	68,979	67,938
55	79,122	79,328	76,920	77,311	79,380	73,347	75,068	73,792	76,388	77,115
60	86,988	83,010	82,391	82,169	83,811	79,225	79,380	80,965	80,536	80,059

Fuente: Autor

Apéndice C. Reporte de las pruebas de verificación realizadas

Sensor Coriolis

Tabla 33. Prueba Recolección Sensor Coriolis Frecuencia de 20 Hz

Frecuencia (Hz)	Prueba de Recolección			Sensor Coriolis	
	Tiempo de Prueba(s)	Volumen del Tanque(L)	Caudal Teórico(L/min)	Caudal (L/min)	%Error
20	10	5,019	30,1197054	30,21	0,06384792
20	10	4,557	27,345522	30,26	2,06084716
20	10	4,623	27,7418339	30,28	1,79475446
20	10	4,293	25,7602744	30,34	3,23835503
20	10	4,293	25,7602744	30,3	3,21007076
20	10	4,491	26,9492101	30,33	2,39057946
20	10	4,227	25,3639624	30,32	3,50444779
20	10	4,491	26,9492101	30,36	2,41179267
20	10	4,425	26,5528982	30,41	2,72738284
20	10	4,689	28,1381458	30,33	1,54987497

Fuente: Autor

Tabla 34. Prueba Recolección Sensor Coriolis Frecuencia de 25 Hz

Frecuencia (Hz)	Prueba de Recolección			Sensor Coriolis	
	Tiempo de Prueba(s)	Volumen del Tanque(L)	Caudal Teórico(L/min)	Caudal (L/min)	%Error
25	10	6,274	37,6496318	41,1	2,43977875
25	10	6,605	39,6311913	41,04	0,99617819
25	10	6,605	39,6311913	41,14	1,06688886
25	10	6,605	39,6311913	41,1	1,03860459
25	10	6,671	40,0275032	41,12	0,7725119
25	10	6,473	38,8385675	41,1	1,59907426
25	10	6,340	38,0459437	41,06	2,13125965
25	10	6,605	39,6311913	41,05	1,00324925
25	10	6,208	37,2533198	41,13	2,74122686
25	10	6,274	37,6496318	41,16	2,48220516

Fuente: Autor

Tabla 35. Prueba Recolección Sensor Coriolis Frecuencia de 30 Hz

Frecuencia (Hz)	Prueba de Recolección			Sensor Coriolis	
	Tiempo de Prueba(s)	Volumen del Tanque(L)	Caudal Teórico(L/min)	Caudal (L/min)	%Error
30	10	7,595	45,57587	51,49	4,18192143
30	10	7,595	45,57587	51,46	4,16070822
30	10	7,794	46,7648058	51,53	3,36950113
30	10	7,728	46,3684939	51,54	3,65680703
30	10	7,595	45,57587	51,63	4,28091638
30	10	7,529	45,1795581	51,58	4,52579587
30	10	7,463	44,7832462	51,59	4,81310177
30	10	7,397	44,3869343	51,52	5,04383913
30	10	7,265	43,5943105	51,61	5,6679484
30	10	7,331	43,9906224	51,63	5,40185571

Fuente: Autor

Tabla 36. Prueba Recolección Sensor Coriolis Frecuencia de 35 Hz

Frecuencia (Hz)	Prueba de Recolección			Sensor Coriolis	
	Tiempo de Prueba(s)	Volumen del Tanque(L)	Caudal Teórico(L/min)	Caudal (L/min)	%Error
35	10	9,709	58,2578512	61,22	2,0945555
35	10	9,445	56,6726036	61,29	3,26499231
35	10	9,775	58,6541632	61,32	1,88503128
35	10	9,709	58,2578512	61,34	2,17940832
35	10	9,709	58,2578512	61,3	2,15112405
35	10	9,557	57,4652274	61,31	2,71866478
35	10	9,643	57,8615393	61,35	2,46671422
35	10	9,841	59,0504751	61,32	1,60479645
35	10	9,709	58,2578512	61,28	2,13698191
35	10	9,577	57,4652274	61,28	2,69745157

Fuente: Autor

Tabla 37. Prueba Recolección Sensor Coriolis Frecuencia de 40 Hz

Frecuencia (Hz)	Prueba de Recolección			Sensor Coriolis	
	Tiempo de Prueba(s)	Volumen del Tanque(L)	Caudal Teórico(L/min)	Caudal (L/min)	%Error
40	10	10,898	65,3914657	70,77	3,80319808
40	10	10,898	65,3914657	70,74	3,78198487
40	10	11,096	66,5804014	70,7	2,91299611
40	10	10,766	64,5988419	70,75	4,3495256
40	10	10,832	64,9951538	70,65	3,99858009
40	10	10,964	65,7877776	70,71	3,48053684
40	10	11,096	66,5804014	70,69	2,90592504
40	10	10,832	64,9951538	70,73	4,05514864
40	10	11,096	66,5804014	70,64	2,8705697
40	10	10,892	65,3914657	70,74	3,78198487

Fuente: Autor

Tabla 38. Prueba Recolección Sensor Coriolis Frecuencia de 45 Hz

Frecuencia (Hz)	Prueba de Recolección			Sensor Coriolis	
	Tiempo de Prueba(s)	Volumen del Tanque(L)	Caudal Teórico(L/min)	Caudal (L/min)	%Error
45	10	13,078	78,4697588	79,83	0,96183578
45	10	13,012	78,0734469	79,88	1,27742595
45	10	13,078	78,4697588	79,8	0,94062257
45	10	12,880	77,2808231	79,87	1,83082454
45	10	13,210	79,2623827	79,86	0,42257925
45	10	12,880	77,2808231	79,76	1,7530428
45	10	13,078	78,4697588	79,77	0,91940937
45	10	12,946	77,677135	79,83	1,52230544
45	10	13,210	79,2623827	79,82	0,39429497
45	10	13,012	78,0734469	79,72	1,16428886

Fuente: Autor

Tabla 39. Prueba Recolección Sensor Coriolis Frecuencia de 50 Hz

Frecuencia (Hz)	Prueba de Recolección			Sensor Coriolis	
	Tiempo de Prueba(s)	Volumen del Tanque(L)	Caudal Teórico(L/min)	Caudal (L/min)	%Error
50	10	14,201	85,2070613	88,8	2,54059132
50	10	14,333	85,9996852	88,75	1,94476625
50	10	13,870	83,2255018	88,76	3,91348121
50	10	13,870	83,2255018	88,76	3,91348121
50	10	13,738	82,432878	88,74	4,45980874
50	10	14,069	84,4144375	88,67	3,0091371
50	10	14,003	84,0181256	88,69	3,30351407
50	10	14,135	84,8107494	88,72	2,76425761
50	10	14,201	85,2070613	88,69	2,46280957
50	10	14,201	85,2070613	88,69	2,46280957

Fuente: Autor

Tabla 40. Prueba Recolección Sensor Coriolis Frecuencia de 55 Hz

Frecuencia (Hz)	Prueba de Recolección			Sensor Coriolis	
	Tiempo de Prueba(s)	Volumen del Tanque(L)	Caudal Teórico(L/min)	Caudal (L/min)	%Error
55	10	17,966	107,79684	97,54	7,25268112
55	10	18,164	108,985776	97,49	8,12874116
55	10	17,437	104,626345	97,55	5,00373154
55	10	17,437	104,626345	97,53	5,01787367
55	10	17,437	107,004217	97,47	6,74170949
55	10	17,701	106,211593	97,31	6,29437677
55	10	17,635	105,815281	97,28	6,03535507
55	10	17,701	106,211593	97,25	6,33680318
55	10	17,834	107,004217	97,29	6,86898871
55	10	17,900	107,400528	97,19	7,21993359

Fuente: Autor

Tabla 41. Prueba Recolección Sensor Coriolis Frecuencia de 60 Hz

Frecuencia (Hz)	Prueba de Recolección			Sensor Coriolis	
	Tiempo de Prueba(s)	Volumen del Tanque(L)	Caudal Teórico(L/min)	Caudal (L/min)	%Error
60	10	19,018	114,534143	104,75	6,91843386
60	10	18,890	113,345207	104,64	6,1555109
60	10	18,824	112,948895	104,51	5,96719988
60	10	18,494	110,967336	104,51	4,56602607
60	10	18,362	110,174712	104,63	3,92070345
60	10	18,230	109,382088	104,52	3,4380154
60	10	18,428	110,571024	104,34	4,40599932
60	10	18,890	113,345207	104,38	6,33935866
60	10	18,230	109,382088	104,28	3,60772102
60	10	18,494	110,967336	104,34	4,68623423

Fuente: Autor

Tabla 42. Comparación Métodos de Medición para la frecuencia de 20 Hz

Frecuencia (Hz)	Prueba de Recolección			Probador Bidireccional	
	Tiempo de Prueba(s)	Volumen del Tanque(L)	Caudal Teórico(L/min)	Caudal (L/min)	%Error
20	20	6,274	18,82481588	21,767	2,08043834
20	20	6,274	18,8248159	23,129	3,04351776
20	20	6,473	19,4192837	22,928	2,48103709
20	20	6,274	18,8248159	23,186	3,08382285
20	20	6,274	19,0229718	22,976	2,79521305
20	20	6,407	19,2211278	23,568	3,07370281
20	20	6,473	19,4192837	22,151	1,93161512
20	20	6,274	18,8248159	23,527	3,32494626
20	20	6,473	19,4192837	21,429	1,42108402
20	20	6,539	19,6174397	23,373	2,65558216

Fuente: Autor

Probador bidireccional de tipo esfera

Tabla 43. Comparación Métodos de Medición para la frecuencia de 25 Hz

Frecuencia (Hz)	Prueba de Recolección			Probador Bidireccional	
	Tiempo de Prueba(s)	Volumen del Tanque(L)	Caudal Teórico(L/min)	Caudal (L/min)	%Error
25	16	7,001	26,25566425	33,163	4,88422395
25	16	7,595	28,4849188	32,770	3,03000997
25	16	7,662	28,7326137	34,499	4,07745086
25	16	7,199	26,9987491	34,706	5,44984938
25	16	7,397	27,7418339	35,168	5,25109241
25	16	7,331	27,494139	34,064	4,64559326
25	16	7,133	26,7510541	33,979	5,11092956
25	16	7,265	27,246444	33,019	4,08181349
25	16	7,199	26,9987491	32,594	3,95643985
25	16	7,595	28,4849188	33,327	3,42386845

Fuente: Autor

Tabla 44. Comparación Métodos de Medición para la frecuencia de 30 Hz

Frecuencia (Hz)	Prueba de Recolección			Probador Bidireccional	
	Tiempo de Prueba(s)	Volumen del Tanque(L)	Caudal Teórico(L/min)	Caudal (L/min)	%Error
30	14	7,265	31,13879318	42,670	8,15379454
30	14	7,728	33,1203528	42,685	6,76322689
30	14	7,728	33,1203528	43,808	7,55730781
30	14	7,728	33,1203528	41,112	5,65094793
30	14	7,662	32,8372728	42,595	6,89975507
30	14	7,728	33,1203528	44,318	7,91793227
30	14	7,662	32,8372728	43,017	7,19815413
30	14	7,728	33,1203528	43,048	7,01990666
30	14	7,794	33,4034327	40,891	5,29450961
30	14	7,662	32,8372728	43,697	7,67898674

Fuente: Autor

Tabla 45. Comparación Métodos de Medición para la frecuencia de 35 Hz

Frecuencia (Hz)	Prueba de Recolección			Probador Bidireccional	
	Tiempo de Prueba(s)	Volumen del Tanque(L)	Caudal Teórico(L/min)	Caudal (L/min)	%Error
35	12	7,794	38,97067147	48,702	6,88108839
35	12	7,926	39,6311913	50,840	7,92582464
35	12	7,860	39,3009314	48,354	6,4014862
35	12	7,926	39,6311913	50,650	7,79147435
35	12	7,992	39,9614513	51,183	7,93483318
35	12	7,860	39,3009314	50,819	8,14450441
35	12	7,794	38,9706715	50,481	8,13903134
35	12	7,926	39,6311913	50,989	8,03118355
35	12	7,794	38,9706715	50,045	7,83073278
35	12	7,794	38,9706715	50,419	8,09519072

Fuente: Autor

Tabla 46. Comparación Métodos de Medición para la frecuencia de 40 Hz

Frecuencia (Hz)	Prueba de Recolección			Probador Bidireccional	
	Tiempo de Prueba(s)	Volumen del Tanque(L)	Caudal Teórico(L/min)	Caudal (L/min)	%Error
40	10	8,058	48,35005342	57,662	6,58454057
40	10	8,256	49,5389892	57,608	5,70565225
40	10	8,454	50,7279249	56,800	4,29360548
40	10	8,190	49,1426772	58,187	6,39530198
40	10	8,256	49,5389892	58,720	6,49195499
40	10	8,388	50,331613	57,662	5,18336636
40	10	8,454	50,7279249	57,608	4,86494776
40	10	8,058	48,3500534	56,800	5,97501454
40	10	8,256	49,5389892	58,187	6,11506708
40	10	7,992	47,9537415	58,720	7,61289439

Fuente: Autor

Tabla 47. Comparación Métodos de Medición para la frecuencia de 45 Hz

Frecuencia (Hz)	Prueba de Recolección			Probador Bidireccional	
	Tiempo de Prueba(s)	Volumen del Tanque(L)	Caudal Teórico(L/min)	Caudal (L/min)	%Error
45	9,8	8,850	54,1895881	64,446	7,25237838
45	9,8	8,586	52,5719885	64,928	8,73701952
45	9,8	8,586	52,5719885	65,032	8,81055863
45	9,8	8,917	54,5939885	66,236	8,23214563
45	9,8	8,850	54,1895881	62,847	6,12171466
45	9,8	8,586	52,5719885	64,005	8,08435996
45	9,8	8,917	54,5939884	64,412	6,94238286
45	9,8	8,586	52,5719885	67,077	10,256592
45	9,8	8,983	54,9983883	65,417	7,3670712
45	9,8	8,917	50,1455892	63,240	9,25914681

Fuente: Autor

Tabla 48. Comparación Métodos de Medición para la frecuencia de 50 Hz

Frecuencia (Hz)	Prueba de Recolección			Probador Bidireccional	
	Tiempo de Prueba(s)	Volumen del Tanque(L)	Caudal Teórico(L/min)	Caudal (L/min)	%Error
50	8,8	8,917	60,79785033	70,376	6,77277458
50	8,8	9,049	61,6985592	75,817	9,98324523
50	8,8	9,247	63,0496226	70,621	5,3537723
50	8,8	8,983	61,2482048	71,619	7,33325961
50	8,8	9,049	61,6985592	72,516	7,64908574
50	8,8	9,247	63,0496226	70,498	5,26679817
50	8,8	9,049	61,6985592	70,868	6,48377377
50	8,8	9,049	61,6985592	71,409	6,86631854
50	8,8	9,247	63,0496226	72,908	6,97092551
50	8,8	8,917	60,7978503	69,372	6,0628394

Fuente: Autor

Tabla 49. Comparación Métodos de Medición para la frecuencia de 55 Hz

Frecuencia (Hz)	Prueba de Recolección			Probador Bidireccional	
	Tiempo de Prueba(s)	Volumen del Tanque(L)	Caudal Teórico(L/min)	Caudal (L/min)	%Error
55	8,2	10,238	74,91261775	79,796	3,4530727
55	8,2	9,907	72,4960817	77,805	3,75397213
55	8,2	9,709	71,0461601	79,640	6,07676247
55	8,2	10,238	74,9126177	80,804	4,16583637
55	8,2	9,907	72,4960817	82,559	7,11555777
55	8,2	9,775	71,5294673	78,610	5,00669269
55	8,2	9,907	72,4960817	80,430	5,61012743
55	8,2	9,709	71,0461601	81,399	7,3205633
55	8,2	9,907	72,4960817	79,122	4,68523176
55	8,2	10,238	74,9126177	80,643	4,05199218

Fuente: Autor

Tabla 50. Comparación Métodos de Medición para la frecuencia de 60 Hz

Frecuencia (Hz)	Prueba de Recolección			Probador Bidireccional	
	Tiempo de Prueba(s)	Volumen del Tanque(L)	Caudal Teórico(L/min)	Caudal (L/min)	%Error
60	8	10,436	78,27160287	86,432	5,77027215
60	8	10,502	78,7669928	85,822	4,98864343
60	8	10,304	77,2808231	85,580	5,86840426
60	8	10,436	78,2716029	83,237	3,51106596
60	8	10,502	78,7669928	80,324	1,10097035
60	8	10,370	77,776213	83,294	3,9016646
60	8	10,502	78,7669928	80,218	1,02601703
60	8	10,436	78,2716029	96,669	13,0089242
60	8	10,436	78,2716029	85,221	4,91396581
60	8	10,304	77,2808231	85,761	5,99639059

Fuente: Autor