



UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
INGENIERÍA CIVIL EN AUTOMATIZACIÓN



“Banco de contrastación de Flujómetros”

Autores

*Karla Margot Adams Cortez
Víctor Hugo Ramírez Alvial*

*TRABAJO DE TÍTULO PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL EN AUTOMATIZACIÓN*

Concepción – Chile

Año 2017



UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
INGENIERÍA CIVIL EN AUTOMATIZACIÓN



“Banco de contrastación de Flujómetros”

Autores

*Karla Margot Adams Cortez
Victor Hugo Ramírez Alvial*

Docentes Patrocinantes

*Guía: Sr. Juan Antipil Ibañez
Coguía: Sr. Ernesto Rubio Rodríguez*

Índice

| | | |
|--------|---|----|
| 1 | Resumen | 6 |
| 2 | Introducción..... | 9 |
| 3 | Alcances y Exclusiones | 10 |
| 4 | Planteamiento del Problema | 11 |
| 5 | Objetivos | 12 |
| 6 | Descripción del sistema | 13 |
| 7 | Definiciones..... | 14 |
| 8 | Medición de Flujo | 18 |
| 8.1 | Medidores Volumétricos..... | 18 |
| 8.1.1 | Medición por Sistema de Presión Diferencial | 19 |
| 8.1.2 | Medición por Sistema de Área Variable..... | 23 |
| 8.1.3 | Medición por Sistema de Velocidad..... | 24 |
| 8.1.4 | Medición por Sistema de Fuerza | 26 |
| 8.1.5 | Medición por Sistema de Tensión Inducida | 27 |
| 8.1.6 | Medición por Sistema de Desplazamiento Positivo | 28 |
| 8.1.7 | Medición por Sistema Vortex..... | 32 |
| 8.2 | Medidores de Flujo Másico | 33 |
| 8.2.1 | Medición por Sistema Térmico | 33 |
| 8.2.2 | Efecto Coriolis..... | 34 |
| 9 | Principio de Medición por efecto Coriolis | 35 |
| 9.1 | Teoría..... | 37 |
| 10 | Método de Contrastación..... | 41 |
| 10.1 | Calibración..... | 42 |
| 10.1.1 | Calibración de Caudalímetros | 42 |

| | | |
|--------|---|----|
| 10.1.2 | Error..... | 43 |
| 10.2 | Patrón..... | 43 |
| 10.2.1 | Equipo Patrón..... | 44 |
| 10.3 | Trazabilidad..... | 44 |
| 11 | Normativa Asociada..... | 45 |
| 12 | Cálculos Hidráulicos..... | 48 |
| 12.1 | Principio de Continuidad..... | 48 |
| 12.2 | Número de Reynolds..... | 48 |
| 12.3 | Ecuación de Bernoulli..... | 50 |
| 12.4 | Pérdidas de Carga..... | 51 |
| 13 | Equipamiento..... | 52 |
| 13.1 | Transmisor de Presión Novus NP620 (Proyectado)..... | 52 |
| 13.2 | Bomba Pedrollo F65/160A..... | 53 |
| 13.3 | Transmisor de Flujo Másico MicroMotion F200S (Patrón)..... | 54 |
| 13.4 | Variador de Frecuencia ABB-ACS550..... | 55 |
| 13.5 | DataLogger Novus V1.6x D..... | 56 |
| 13.6 | Transmisor de Temperatura y Humedad Novus RHT (Proyectado)..... | 57 |
| 14 | Adquisición de Datos y Control..... | 58 |
| 14.1 | Adquisición de Datos..... | 58 |
| 14.1.1 | Características Técnicas..... | 58 |
| 14.1.2 | Software..... | 59 |
| 14.1.3 | Conexión al sistema..... | 60 |
| 14.2 | Control..... | 61 |
| 14.2.1 | Conexión al sistema..... | 62 |
| 15 | Checklist de Procedimientos..... | 64 |

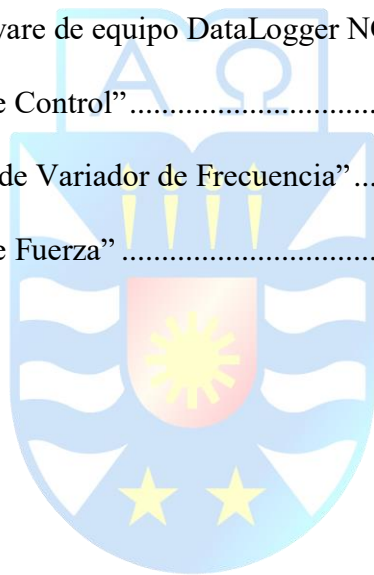
| | | |
|------|--|----|
| 15.1 | Instalación mecánica componentes del banco de prueba de Flujómetros..... | 64 |
| 15.2 | Pruebas..... | 65 |
| 16 | Informes de Calibración..... | 67 |
| 17 | Propuestas de Mejora | 68 |
| 17.1 | Mirilla | 68 |
| 17.2 | Boroscopio | 68 |
| 17.3 | Medidor de temperatura y humedad ambiental | 69 |
| 17.4 | Transmisores de presión en instrumento a calibrar..... | 69 |
| 17.5 | Válvula de corte | 69 |
| 17.6 | Toma de agua por parte inferior del estanque con válvula de corte. | 70 |
| 17.7 | Tablero de Fuerza | 70 |
| 17.8 | Tablero de Control y Registro de Datos | 71 |
| 18 | Conclusiones..... | 72 |
| 19 | Bibliografía..... | 73 |



Índice de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura N° 1: “Laboratorio móvil de contrastación, Empresa ELECTROMÁTICA LTDA” | 13 |
| Figura N° 2: “Principio de Bernoulli” | 19 |
| Figura N° 3: “Medidor de flujo tipo Placa Orificio” | 20 |
| Figura N° 4: “Medidor de flujo tipo Tobera” | 21 |
| Figura N° 5: “Medidor de flujo tipo Tubo Venturi” | 21 |
| Figura N° 6: “Medidor de flujo tipo Tubo Annubar” | 22 |
| Figura N° 7: “Medidor de flujo tipo Rotámetro” | 23 |
| Figura N° 8: “Fotografía de un sistema de medición de flujo basado en un Vertedero” | 24 |
| Figura N° 9: “Medidor de flujo tipo turbina” | 25 |
| Figura N° 10: “Medidor de flujo tipo ultrasónico” | 26 |
| Figura N° 11: “Medidor de flujo tipo Placa Impacto” | 26 |
| Figura N° 12: “Medidor magnético de flujo” | 27 |
| Figura N° 13: “Medidor de flujo tipo Disco Giratorio” | 29 |
| Figura N° 14: “Esquema de un medidor de flujo tipo Pistón Oscilante” | 29 |
| Figura N° 15: “Medidor de flujo tipo Pistón Alternativo” | 30 |
| Figura N° 16: “Medidor de flujo Rotativo, tipo Cicloidal” | 31 |
| Figura N° 17: “Medidor de flujo tipo Vortex” | 32 |
| Figura N° 18: “Medidor de flujo basado en sistema térmico” | 33 |
| Figura N° 19: “Medidor de flujo tipo Coriolis y algunas de sus formas de presentación” | 34 |
| Figura N° 20: “Efecto Coriolis en un tubo recto” | 35 |
| Figura N° 21: “Cambio en la frecuencia de oscilación por la fuerza Coriolis en un tubo recto” .. | 35 |
| Figura N° 22: “Flujo Laminar” | 49 |

| | |
|---|----|
| Figura N° 23: “Flujo Turbulento” | 50 |
| Figura N° 24: “Transmisor de Presión Novus NP620” | 52 |
| Figura N° 25: “Bomba Pedrollo F65/160A” | 53 |
| Figura N° 26: “Transmisor de Flujo Másico MicroMotion F200S” | 54 |
| Figura N° 27: “Variador de Frecuencia ABB-ACS550” | 55 |
| Figura N° 28: “ DataLogger Novus V1.6x D” | 56 |
| Figura N° 29: “Transmisor de Temperatura y Humedad Novus RHT” | 57 |
| Figura N° 30: “FieldLogger NOVUS” | 58 |
| Figura N° 31: “Capturas de Software de equipo DataLogger NOVUS” | 59 |
| Figura N° 32: “Layout Tablero de Control” | 60 |
| Figura N° 33: “Panel Removible de Variador de Frecuencia” | 61 |
| Figura N° 34: “Layout Tablero de Fuerza” | 63 |

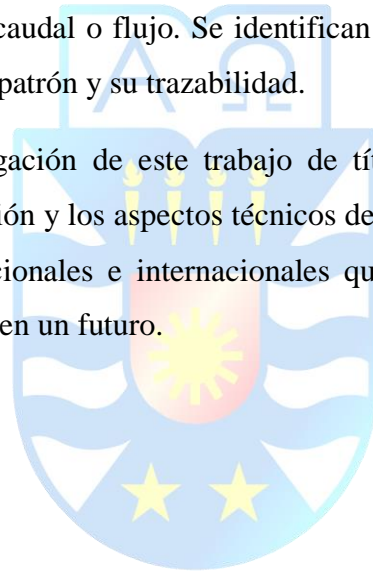


1 Resumen

El presente trabajo de título apunta a la investigación en una de las áreas más importantes de la automatización, como lo es la instrumentación industrial. Se profundiza en la investigación de equipos dedicados a la medición de flujo, por lo que se estudian distintos tipos de tecnologías de medición, en donde se indica el principio de funcionamiento, ventajas y desventajas de las técnicas de medición. Se enfatiza el estudio del instrumento de medición por efecto Coriolis, por ser este el equipo patrón del laboratorio móvil contrastador de flujómetros de la empresa ELECTROMÁTICA LTDA.

Se abarcan conceptos elementales relacionados al procedimiento del banco contrastador, en donde se examina el método de contrastación con el objetivo de estudiar la calibración de instrumentos medidores de caudal o flujo. Se identifican aspectos claves que influyen en la determinación de un equipo patrón y su trazabilidad.

Los resultados e investigación de este trabajo de título se enfocan en documentar el procedimiento de contrastación y los aspectos técnicos del equipamiento con el fin de que se cumpla con normativas nacionales e internacionales que permitan la certificación de los resultados y procedimientos en un futuro.



2 Introducción

Hoy en día, los caudalímetros son instrumentos determinantes en la industria nacional e internacional, debido a que éstos permiten el óptimo funcionamiento de los canales de tránsito de fluidos, controlando y midiendo la cantidad de los mismos, para desarrollar de la mejor forma cada proceso. Uno de los problemas que existen en la actualidad, es que estos instrumentos por el tiempo de uso, falta de mantenciones y otros factores, se descalibran constantemente, lo que produce pérdidas.

Por lo anterior es que la empresa ELECTROMÁTICA LTDA decide enfrentarlo como una oportunidad de investigar soluciones al problema en cuestión, dando como resultado el desarrollo de un sistema que permite realizar la contrastación de caudalímetros másicos y magnéticos principalmente. Este sistema consiste en un laboratorio móvil, que utiliza como patrón un instrumento de alta precisión y opera mediante la medición másica de efecto Coriolis.

En este proyecto de título se investigarán distintos tipos de medidores de caudal, haciendo alusión a descripciones generales, funcionamiento, ventajas y desventajas. Se realizará un estudio de las magnitudes que afectan a los procesos del contrastador de caudalímetros, de manera que exista un profundo conocimiento de todas las variables que se relacionen directamente con el proceso del laboratorio desarrollado por la empresa ELECTROMÁTICA LTDA.

Además, se estudiarán las normas nacionales e internacionales que debe cumplir el sistema contrastador, teniendo como fin la certificación de los procesos de calibración y resultados del laboratorio según el Instituto Nacional de Normalización INN.

3 Alcances y Exclusiones

El equipo de trabajo formado por dos estudiantes, un profesor guía y un profesor co-guía, todos pertenecientes a la Universidad Del Bío Bío, involucrados en este trabajo de título para optar al título profesional de Ingeniero Civil en Automatización se compromete a lo siguiente:

- Entregar documentación técnica y en ningún instante la implementación de lo que se investigue.
- Crear documentación de operación del laboratorio contrastador de flujómetros de la empresa ELECTROMÁTICA LTDA. Esto incluye información de características de los equipos y procedimientos de operación de la maqueta.
- Toda información técnica será reservada y privada, sólo para la empresa ELECTROMÁTICA LTDA.



4 Planteamiento del Problema

En la actualidad la empresa ELECTROMÁTICA LTDA, dedicada a la comercialización y desarrollo de proyectos de automatización industrial, necesita generar los procedimientos para la correcta operación de su banco de calibración de medidores de flujo. De esta manera, garantizará a sus clientes la correcta operación de la instrumentación de campo, otorgándoles la trazabilidad de los certificados de contrastación de los equipos. Para así acreditarse en INN como Laboratorio de contrastación en la magnitud Flujo según la NCh 17.025. Con el presente trabajo se documentarán fichas técnicas de los instrumentos del banco de contrastación, procedimientos para la obtención de históricos incorporando Data Logger, manual de operaciones y planos pertinentes.

Al mismo tiempo, con este seminario se pretende abordar el estudio y proponer una solución para recalibrar en planta medidores de flujo con patrones certificados, permitiendo así reducir los costos y tiempos de parada y aumentar la disponibilidad de proceso.

El banco de calibración debe permitir:

- Calibración de medidores de flujo de distintos fabricantes.
- Determinación del error relativo al Span. (según procedimiento de calibración).
- Variar el rango de caudal a calibrar según las necesidades de calibración.
- Medir el flujo másico por el principio de Coriolis como patrón de calibración y dejar constancia de la trazabilidad.

5 Objetivos

- Realizar estudio de Ingeniería Básica y de Detalle del Banco de Contrastación.
- Documentar procedimiento de calibración y funcionamiento del Banco de Contrastación.
- Crear Sistema de Adquisición de Datos y Control.
- Crear Formato Check List de procedimientos asociados al Banco de Contrastación.



6 Descripción del sistema

El banco de contrastación de flujómetros que se observa en la Figura N° 1, es un sistema que simula una línea de proceso de tubería de 3 pulgadas de diámetro. El fluido de prueba es agua potable, la que es impulsada por una bomba periférica en un sistema retroalimentado, con un estanque de almacenamiento de 2400 litros, el cual entrega la cuota necesaria para el correcto funcionamiento del sistema de prueba.

- **Principio de Funcionamiento:**

Contrastación de flujómetros con equipo patrón de efecto Coriolis.

- **Aplicación:**

El banco de prueba consta de un equipo patrón correspondiente a un medidor de flujo másico tipo Coriolis Micromotion F200 conectado a un transmisor Rosemount 2700 R, el cual entregará la medida de referencia en valores de L/min, dichos datos son rescatados por un sistema de adquisición de datos. Este equipo cumple con la normativa actual según ISO/IEC 17025.

El montaje de los equipos a contrastar se realiza mediante toberas de reducción normalizadas y enflanchadas. Se instalan las unidades electrónicas de los equipos conectándolas a alimentación eléctrica y sistema de rescate de datos.

Se realiza cambios en flujo del sistema mediante control de variador de frecuencia sobre la bomba de impulsión para obtener datos que involucren cambios de rango de presentación del equipo. Se visualizan y registran las tendencias del equipo patrón y equipo de sensado para determinar su desviación y diferencias de medición.



Figura N° 1: “Laboratorio móvil de contrastación, Empresa ELECTROMÁTICA LTDA”

7 Definiciones

- **Automatización:** La automatización es la ejecución automática y coordinada de las tareas necesarias para operar el proceso en forma óptima, ajustando su desempeño a los lineamientos establecidos por los organismos de dirección.
- **Alcance o Span:** Diferencia algebraica entre los valores superior e inferior del campo de medida del instrumento.
- **Campo de medida o Rango:** Corresponde al espectro o conjunto de valores de la variable medida que están comprendidos dentro de los límites superior e inferior de la capacidad de medida, de recepción o de transmisión del instrumento. Viene expresado estableciendo los dos valores extremos.
- **Calibración:** Conjunto de operaciones que establecen, en condiciones especificadas, la relación entre los valores de una magnitud indicados por un instrumento de medida o un sistema de medida, o los valores representados por una medida materializada o por un material de referencia, y los valores correspondientes de esa magnitud realizados por patrones.
- **Caudal o Flujo:** Cociente entre la cantidad de fluido que circula a través de la sección transversal de un conducto y el tiempo en pasar a través de dicha sección.
- **Caudalímetro:** Instrumento de medición apto para la medida de caudal de un fluido.
- **Contrastación:** Método comparativo que a partir de dos o más fenómenos, uno al lado del otro, establece similitudes o diferencias y de ello se obtienen conclusiones.
- **Control:** Mecanismo preventivo y correctivo que permite la oportuna detección y corrección de desviaciones, ineficiencias o incongruencias.
- **Control automático:** Corresponde a la conservación de un valor deseado dentro de un intervalo. Se basa en medir el valor deseado y compararlo con el intervalo de valores aceptables utilizando la diferencia para proceder a reducirla. El control automático exige un lazo cerrado de acción y reacción que funcione sin intervención humana.
- **Control manual:** Corresponde a la conservación de un valor deseado mediante la inspección y el accionamiento de una persona a través de sus propios sentidos, actuando con sus manos u otras partes del cuerpo para llevar al sistema al valor deseado.
- **Densidad:** Es la cantidad de masa por unidad de volumen de una sustancia.

- **Efecto Coriolis:** Fenómeno que produce que el movimiento de los fluidos tienda a acelerar hacia un sentido u otro dependiendo de su ubicación geográfica. Se determina por la masa y velocidad de rotación del objeto.
- **Elevación de cero:** Cantidad con que el valor inferior del campo supera el valor cero de la variable. Puede expresarse en unidades de la variable medida o en % del alcance.
- **Energía Cinética:** Energía asociada a los cuerpos o sistemas que se encuentran en movimiento, depende de la masa y de la velocidad del cuerpo o sistema.
- **Energía Potencial:** Capacidad de energía para realizar un trabajo como consecuencia de la posición de un cuerpo.
- **Error:** El error de la medida es la desviación que presentan las medidas prácticas de una variable de proceso con relación a las medidas teóricas o ideales, como resultado de las imperfecciones de los aparatos y de las variables parásitas que afectan al proceso.
- **Exactitud:** Cualidad de un instrumento de medida por la que tiende a dar lecturas próximas al valor verdadero de la magnitud medida, es decir, corresponde al grado de conformidad de un valor indicado a un valor estándar aceptado o valor ideal, considerando este valor ideal como si fuera el verdadero.
- **Fiabilidad:** Medida de la probabilidad de que un instrumento continúe comportándose dentro de límites especificados de error a lo largo de un tiempo determinado y bajo unas condiciones especificadas.
- **Flujo Laminar:** Descripción de un fluido que se mueve por capas o láminas paralelas entre sí, en una misma dirección y sentido.
- **Flujo Másico:** Cantidad de masa que fluye por una sección transversal por unidad de tiempo.
- **Flujo Transitorio:** Descripción de un flujo que es una mezcla entre flujo laminar y turbulento.
- **Flujo Turbulento:** Descripción de un fluido en el que las partículas no se mueven en capas paralelas, sino que se desplazan en diferentes direcciones creando turbulencias al tiempo que la masa total se mueve en una dirección.
- **Flujo Volumétrico:** Volumen de un fluido que fluye por una sección transversal por unidad de tiempo.
- **Incertidumbre de la medida:** Dispersión de los valores que pueden ser atribuidos razonablemente al verdadero valor de la magnitud medida. En el cálculo de la incertidumbre

intervienen la distribución estadística de los resultados de series de mediciones, las características de los equipos, etc.

- **Instrumento de medida:** Dispositivo destinado a utilizarse para hacer mediciones, solo o asociado a uno o varios dispositivos anexos.
- **Laboratorio:** Sistema provisto de dispositivos o aparatos aptos para la realización de experimentos, análisis, pruebas, etc.
- **Masa:** Es la propiedad que tiene un cuerpo de fluido, es la medida de la inercia o resistencia a cambiar el movimiento de este. También es la medida de la cantidad de fluido.
- **Norma:** Conjunto de reglas y principios que se imponen o se adoptan para dirigir la correcta realización de una acción o realizar de manera efectiva el desarrollo de una actividad.
- **Patrón de medida:** Realización de la definición de una magnitud dada, con un valor determinado y una incertidumbre de medida asociada, tomada como referencia.
- **Peso:** Es la fuerza con la que el fluido o cuerpo es atraído hacia la tierra por la acción de la gravedad.
- **Peso específico:** Es la cantidad de peso por unidad de volumen de una sustancia.
- **Presión:** Fuerza normal que ejerce un fluido por unidad de área.
- **Proceso:** Conjunto de actividades mutuamente relacionadas o que interactúan, las cuales transforman elementos de entrada en resultados.
- **Precisión:** Cualidad de un instrumento por la que tiende a dar lecturas muy próximas unas a otras, es decir, es el grado de dispersión de las mismas. Un instrumento puede tener una pobre exactitud, pero una gran precisión. Los instrumentos de medida estarán diseñados por los fabricantes para que sean precisos, y como periódicamente se descalibran, deben reajustarse para que sean exactos. A señalar que el término precisión es sinónimo de repetibilidad.
- **Repetibilidad:** Capacidad de reproducción de las posiciones de la pluma o del índice de la señal de salida del instrumento, al medir repetidamente valores idénticos de la variable en las mismas condiciones de servicio y en el mismo sentido de la variación, recorriendo todo el campo. La repetibilidad es sinónimo de precisión. A mayor repetibilidad, los valores de la indicación o señal de salida estarán más concentrados por lo que habrá menos dispersión y una mayor precisión.

- **Resolución:** Corresponde a la menor diferencia de valor que el instrumento puede distinguir. En los instrumentos analógicos interviene el operador según donde observe la posición de la aguja, su error de paralaje en la lectura efectuada y la distancia entre los valores marcados en la escala. En los instrumentos digitales, es el cambio de valor de la variable que ocasiona que el dígito menos significativo se modifique.
- **Ruido:** Cualquier perturbación eléctrica o señal accidental no deseada que modifica la transmisión, indicación o registro de los datos deseados.
- **Sensibilidad:** Razón entre el incremento de la señal de salida o de la lectura y el incremento de la variable que lo ocasiona, después de haberse alcanzado el estado de reposo.
- **Sólidos en suspensión:** Partículas de tamaño variable que se mantienen en suspensión en el agua. La presencia de estas incrementa la turbidez del agua y puede acarrear problemas por crear condiciones anaeróbicas.
- **Supresión de cero:** Cantidad con que el valor inferior del campo supera el valor cero de la variable. Puede expresarse en unidades de la variable medida o en % del alcance.
- **Temperatura:** Magnitud física escalar que refleja la cantidad de calor de un objeto, un cuerpo o del ambiente. Se relaciona con la energía interna de un sistema termodinámico.
- **Trazabilidad:** Propiedad del resultado de las mediciones efectuadas con un instrumento o con un patrón, tal que puede relacionarse con patrones nacionales o internacionales, mediante una cadena ininterrumpida de comparaciones y con todas las incertidumbres determinadas.
- **Zona muerta:** Campo de valores de la variable que no hace variar la indicación o la señal de salida del instrumento, es decir, que no produce su respuesta. Viene dada en tanto por ciento del alcance de la medida.

8 Medición de Flujo

En este capítulo se ve en detalle las tecnologías utilizadas para la medición de flujo en las industrias. Se agrupan los distintos medidores en volumétricos y másicos, otorgando información sobre sus principios de funcionamiento, ventajas, desventajas y aplicaciones más comunes a nivel industrial.

Dentro del control, uno de los procesos industriales más importante es la adquisición de datos, ya que los datos son los portadores de la información que más tarde será la responsable de la activación de un actuador, como abrir una válvula, accionar un contactor o simplemente encender una luz, entre otros ejemplos. La forma de poder adquirir información sobre un proceso es a través de los sensores o transductores, los cuales la mayoría de las veces están directamente en contacto con el proceso en sí.

Todas las industrias tienen procesos que involucran fluidos ya sean líquidos o gaseosos, éstos fluidos al estar dentro de un proceso industrial, requieren en la gran mayoría de los casos ser medidos. Es por esto, que hoy en día existe un sin número de métodos para realizar la medición de los fluidos que participan directa o indirectamente en éstos procesos.

Para realizar la medición de flujo, existen distintos tipos de metodologías, los cuales se diferencian entre sí, ya sea por su exactitud o el tipo de aplicación para el que fueron diseñados.

Existen varias tecnologías para medir el caudal o flujo, estas dependen de si se desea medir el flujo de forma volumétrica o másica.

Entre los métodos más utilizados están:

8.1 Medidores Volumétricos

Los medidores volumétricos determinan el caudal en volumen del fluido, ya sea de forma directa o indirectamente (presión diferencial, área variable, velocidad, fuerza, tensión inducida, vortex).

Es importante señalar que la medida del flujo volumétrico en la industria se efectúa principalmente con elementos producen una presión diferencial al paso del fluido. Entre éstos elementos los más conocidos son la placa-orificio, la tobera y el tubo Venturi.

8.1.1 Medición por Sistema de Presión Diferencial

Este tipo de sistemas de medición, se basan en la aplicación del teorema de Bernoulli, el cual establece que un fluido contiene energía cinética (relacionada con su masa y velocidad), energía potencial gravitatoria y energía debido a la presión del flujo o energía hidrostática. La suma de éstas energías en cualquier punto del sistema es constante, por lo que cuando el diámetro de un tubo se modifica, la velocidad también se modifica y por ende, la energía cinética debe ser compensada con un aumento o disminución de la presión.

Lo anterior se ilustra en la Figura N° 2, a continuación:

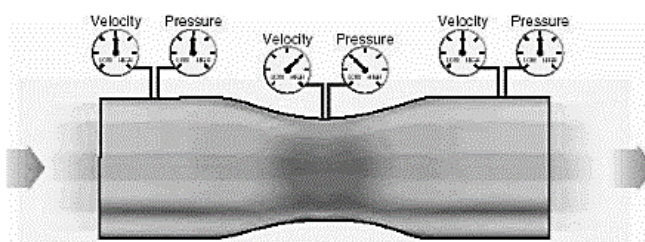


Figura N° 2: “Principio de Bernoulli”

- **Aplicaciones:** Los medidores de presión diferencial generalmente se encuentran en aplicaciones industriales, como en la medición de la salida de combustibles, en la manufactura que involucre sustancias químicas, en simples mediciones de agua y en granjas acuícolas. También se usan en laboratorios para medir y controlar el flujo de gases cuando estos se mezclan o separan.

Es importante recalcar que este tipo de método de medición de flujo, sólo se puede aplicar para la medición de líquidos, gases y vapor, pero no puede realizar mediciones en líquido con material particulado.

A continuación, se presentan los elementos que permiten realizar medición de flujo volumétrico a través de la presión diferencial que éstos producen.

8.1.1.1 Placa Orificio

- **Descripción:** Consiste en una placa perforada instalada en la tubería, tal como se muestra en la Figura N° 3. Dos tomas conectadas en la parte anterior y posterior de la placa, captan esta presión diferencial la cual es proporcional al cuadrado del caudal.

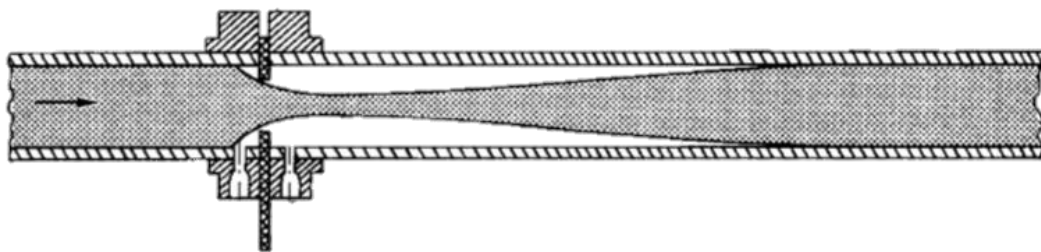


Figura N° 3: “Medidor de flujo tipo Placa Orificio”

Cuando el fluido pasa a través de la placa de orificio, disminuye su presión hasta que alcanza su mínimo en un área denominada “vena contracta”. En este punto se obtiene el valor mínimo de presión y máximo de velocidad. Luego la presión vuelve a incrementar, pero ya no recupera su valor anterior debido a pérdidas causadas por turbulencias y fricciones del sistema (pérdida de carga). La diferencia de presión que ocasiona la placa orificio permite calcular el caudal.

Tabla N° 1: “Ventajas y desventajas del medidor de flujo tipo Placa Orificio”

| Ventajas | Desventajas |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Sistema extremadamente simple. • Al no tener partes móviles, no requiere de mucho mantenimiento. • Económico. • En el mercado existen en una amplia variedad de tamaños y materiales de construcción. | <ul style="list-style-type: none"> • Produce grandes pérdidas de carga. • Es factible para sistemas que involucran fluidos limpios y con poca viscosidad. • Es un método de medición muy inexacto. • No es factible para realizar mediciones en trayectos pequeños. |

8.1.1.2 Tobera

- **Descripción:** Consiste en un dispositivo, que tiene su entrada con forma canónica y restringida, mientras que su salida es una expansión abrupta (ver Figura N° 4). En este dispositivo la toma de alta presión se ubica en la tubería a un diámetro de la entrada aguas arriba y la toma de baja presión se ubica en la tubería al final de la expansión.

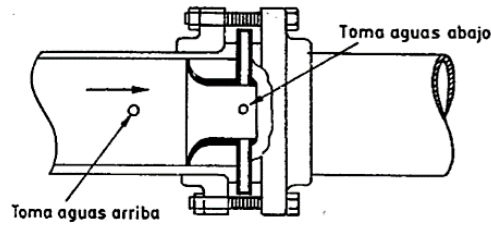


Figura N° 4: “Medidor de flujo tipo Tobera”

Este método de medición de flujo, permite flujos de hasta 60% superiores a los de la placa orificio.

Tabla N° 2: “Ventajas y desventajas del medidor de flujo tipo Tobera”

| Ventajas | Desventajas |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • Sistema extremadamente simple y con mejor precisión que la placa orificio. • Provoca una pérdida de carga inferior a la placa orificio. | <ul style="list-style-type: none"> • Produce perdidas de caga. • Alto costo comercial. |

8.1.1.3 Tubo Venturi

- **Descripción:** El tubo Venturi, que se observa en la Figura N° 5, es similar a la placa orificio, pero está diseñado para eliminar la separación de capas próximas a los bordes y por lo tanto producir arrastre. El cambio en la sección transversal produce un cambio de presión entre la sección convergente y la garganta, permitiendo conocer el caudal a partir de esta caída de presión. Aunque es un método más caro que la placa orificio, el tubo Venturi produce una pérdida de carga mucho menor.

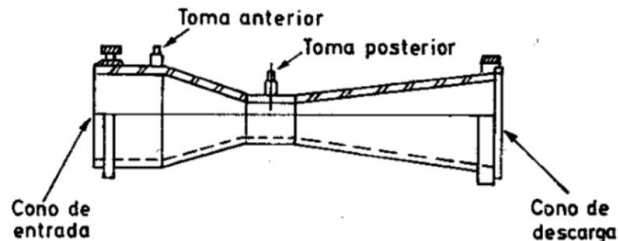


Figura N° 5: “Medidor de flujo tipo Tubo Venturi”

Tabla N° 3: “Ventajas y desventajas del medidor de flujo tipo Tubo Venturi”

| Ventajas | Desventajas |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • Pérdidas de carga inferior al de la placa orificio. • Resistente al desgaste interno. | <ul style="list-style-type: none"> • Tiene un alto costo comercial. • Es un sistema de mayor longitud en general. • El costo de instalación y mantención es superior al de la placa orificio. |

8.1.1.4 Tubo Annubar

- **Descripción:** Consta de dos tubos, uno de presión total y otro de presión estática, tal como se muestra en la Figura N° 6. El tubo que mide la presión total está situado a lo largo de un diámetro transversal de la tubería.

El tubo que mide la presión estática se encuentra detrás del de presión total, con su orificio en el centro de la tubería y aguas abajo de la misma.

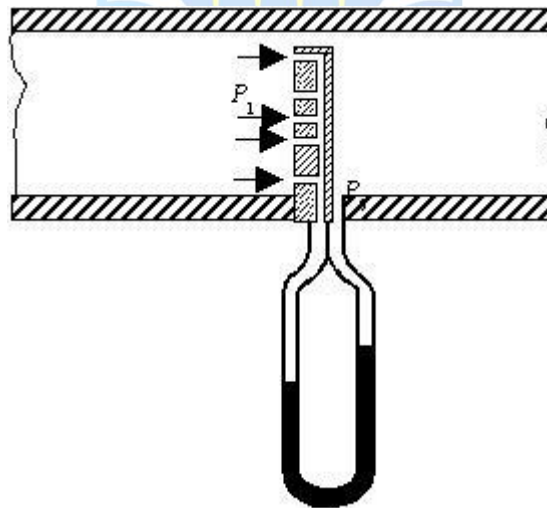


Figura N° 6: “Medidor de flujo tipo Tubo Annubar”

Tabla N° 4: “Ventajas y desventajas del medidor de flujo tipo Tubo Annubar”

| Ventajas | Desventajas |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Sistema relativamente económico. • Pérdidas de carga inferior al de la placa orificio. • Sistema fácil de instalar. | <ul style="list-style-type: none"> • Su exactitud es inferior al de la placa orificio. |

8.1.2 Medición por Sistema de Área Variable

Los elementos de área variable se caracterizan por el cambio de área que se produce entre el elemento primario en movimiento y el cuerpo del medidor. Pueden asimilarse a una placa-orificio cuyo diámetro interior fuera variable dependiendo del caudal y de la fuerza de arrastre producida por el fluido.

- **Aplicaciones:** Los flujómetros de área variable pueden utilizarse en laboratorios y aplicaciones industriales, y en comparación a otros métodos de medición de flujo, es la forma más económica para indicar la medición de caudal considerando su funcionalidad y exactitud. Éstos medidores se usan en el mundo académico, en laboratorios científicos para experimentación y educación. Pueden encontrarse en manufactura básica, como bebidas y química, así como en purificación de agua, granjas acuícolas, y aplicaciones de petróleo y gas.

8.1.2.1 Rotámetro

- **Descripción:** Consiste en un flotador que cambia su posición dentro de un tubo, proporcionalmente al flujo del fluido (ver Figura N° 7). El flotador está en equilibrio entre su peso, la fuerza de arrastre del fluido y la fuerza de empuje del fluido sobre el flotador. El caudal depende del peso específico del líquido, de su viscosidad y de los valores de la sección interior del tubo, ya que la misma cambia según sea el punto de equilibrio del flotador.

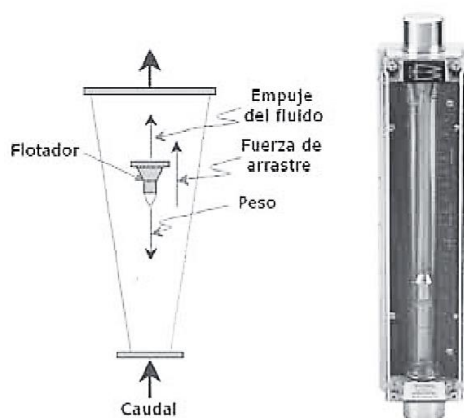


Figura N° 7: “Medidor de flujo tipo Rotámetro”

Tabla N° 5: “Ventajas y desventajas del medidor de flujo tipo Rotámetro”

| Ventajas | Desventajas |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Bajo costo inicial. • Sistema de fácil instalación. • Requiere poco mantenimiento. • No requiere de fuentes de alimentación ya que es autosustentable. • Baja pérdida de carga. • Indica directamente la cantidad de flujo. • Permite detectar y medir bajos caudales. | <ul style="list-style-type: none"> • No es viable su implementación en sistemas con flujos corrosivos. • Ofrece poca precisión. |

8.1.3 Medición por Sistema de Velocidad

Los medidores de flujo por variación de velocidad se basan en medir la velocidad que lleva el fluido cuando pasa por un área constante.

8.1.3.1 Vertedero

- **Descripción:** Es un método de medición diseñado para canales abiertos, como se observa en la Figura N° 8, en donde se utilizan vertederos de formas variadas con el fin de provocar una diferencia de altura del líquido en el canal entre la zona anterior del vertedero y el punto más bajo. El vertedero debe formar un ángulo recto con la dirección del caudal y el canal aguas arriba debe ser recto como mínimo en una distancia de 10 veces la anchura. La diferencia de altura debe medirse en un punto aguas arriba lo suficientemente alejado como para no ser influido por la curva de bajada de la superficie del agua.



Figura N° 8: “Fotografía de un sistema de medición de flujo basado en un Vertedero”

Tabla N° 6: “Ventajas y desventajas del medidor de flujo basado en un Vertedero”

| Ventajas | Desventajas |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • Sistema Simple. • Permite medir flujos corrosivos. | <ul style="list-style-type: none"> • Sistema de alto costo comercial. • Requiere de la construcción de una obra civil. |

8.1.3.2 Turbina

- **Descripción:** Consiste en un rotor con alabes, semejantes a una turbina, que se instalan en el centro de la tubería y gira con una velocidad angular que es directamente proporcional al flujo.

Este sistema de medida es sencillo comparado con otros métodos para obtener el caudal, pero es inexacto para caudales bajos, sólo puede medir caudales en un solo sentido y es incapaz de medir variaciones rápidas en el caudal. Ver Figura N° 9.

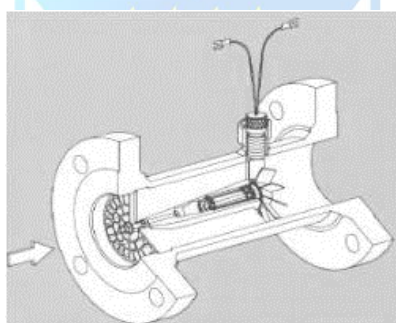


Figura N° 9: “Medidor de flujo tipo turbina”

Tabla N° 7: “Ventajas y desventajas del medidor de flujo tipo Turbina”

| Ventajas | Desventajas |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • Su principal ventaja es que permite variaciones de presión. | <ul style="list-style-type: none"> • Baja precisión en comparación a otro tipo de instrumentos. • Tiene un alto costo. • Sólo permite medir caudales bajos. |

8.1.3.3 Sondas Ultrasónicas

- **Descripción:** Este tipo de dispositivos, que se muestra en la Figura N° 10, mide el cambio de frecuencia de una señal ultrasónica que se envía a través del fluido. Existen dos tipos de medidores ultrasónicos, el Doppler y el de tiempo de tránsito. La tecnología Doppler utiliza

partículas en el fluido como mecanismo reflector para medir la velocidad del fluido. La tecnología de tiempo de tránsito se basa en una diferencia de frecuencia en las señales directas e inversas enviadas mediante un líquido limpio para medir la velocidad del fluido. El fluido no debe tener sólidos ni aireación, ya que distorsionan los puntos sónicos.

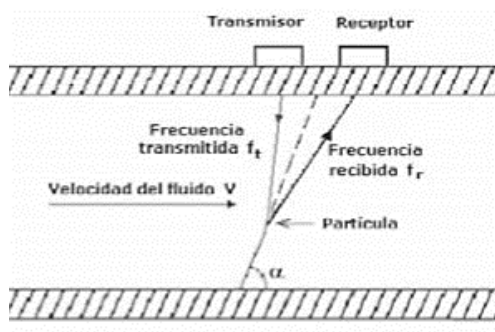


Figura N° 10: “Medidor de flujo tipo ultrasónico”

Tabla N° 8: “Ventajas y desventajas del medidor de flujo tipo Ultrasónico”

| Ventajas | Desventajas |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • Alta precisión. • No produce pérdidas de carga. • Bajo costo de mantenimiento. | <ul style="list-style-type: none"> • Tiene un alto costo comercial. • No es factible su implementación en la medición de caudales bajos. |

8.1.4 Medición por Sistema de Fuerza

8.1.4.1 Placa de Impacto

- **Descripción:** El medidor de placa de impacto (ver Figura N° 11), consiste básicamente en una placa instalada directamente en el centro de la tubería, la que es sometida al empuje o fuerza de impacto del fluido, la que es directamente proporcional a la energía cinética de dicho fluido.

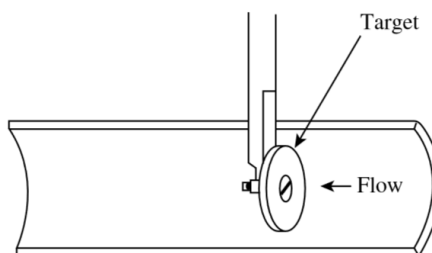


Figura N° 11: “Medidor de flujo tipo Placa Impacto”

Este tipo de instrumentos permite medir fluidos sucios o corrosivos y fluidos con pequeñas cantidades de sólidos en suspensión y se puede utilizar para medir cualquier tipo de líquido, gas y vapor.

Tabla N° 9: “Ventajas y desventajas del medidor de flujo tipo Placa impacto”

| Ventajas | Desventajas |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Alta fiabilidad. • Larga vida útil. • Gran rangeabilidad. | <ul style="list-style-type: none"> • Requiere mucho mantenimiento. • Produce una gran pérdida de carga. |

8.1.5 Medición por Sistema de Tensión Inducida

8.1.5.1 Medidor Magnético

- **Descripción:** El medidor magnético se basa en la ley de Faraday, la cual establece que la tensión inducida a través de cualquier conductor que se mueve perpendicularmente a través de un campo magnético, es proporcional a la velocidad del conductor. En el caso de este tipo de medidor (ver Figura N° 12), el voltaje se produce cuando un fluido conductor pasa por el campo magnético producido por las bobinas del medidor.

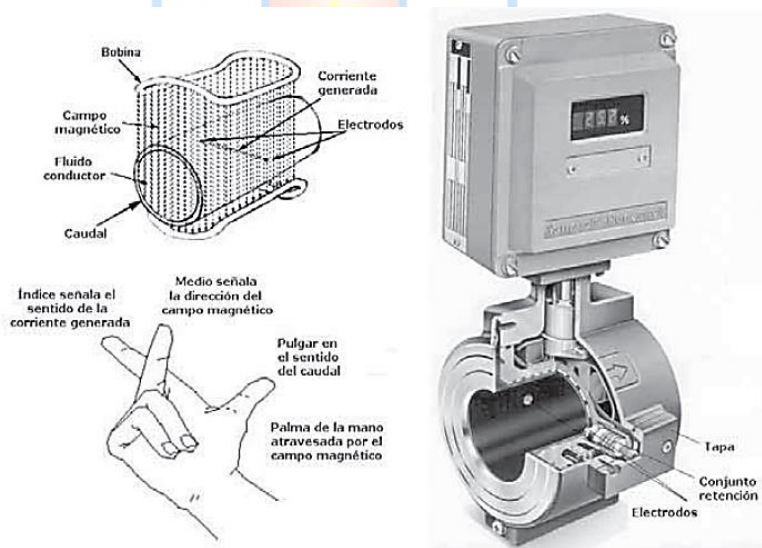


Figura N° 12: “Medidor magnético de flujo”

La tecnología magnética no tiene partes móviles por lo que requieren de poco mantenimiento en comparación a otros tipos de medidores de flujo. Es un medidor muy utilizado en la industria de alimentos y bebidas, debido a que no tiene contacto con el líquido medido, también es utilizado en los procesos de purificación o potabilización del

agua, manufactura de pulpa y papel, la minería, manufactura química e industrias petroquímicas. Es muy importante recalcar que al ser un método de medición que depende de la conductividad del flujo, no se debe usar en líquidos con baja conductividad y menos para la medición de gases (los cuales no son conductores).

Tabla N° 10: “Ventajas y desventajas del medidor de flujo Magnético”

| Ventajas | Desventajas |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • No provoca pérdidas de carga. • No tiene contacto directo con el fluido medido. • No tiene partes móviles por lo que requiere poco mantenimiento. | <ul style="list-style-type: none"> • Requiere una fuente de alimentación para que las bobinas del medidor funcionen. • Es sensible a las perturbaciones electromagnéticas. |

8.1.6 Medición por Sistema de Desplazamiento Positivo

Los medidores de desplazamiento positivo miden el caudal en volumen, contando o integrando volúmenes separados del líquido involucrado. Los medidores que se basan en este sistema, están integrados por partes mecánicas que se mueven aprovechando la energía del fluido provocando una pérdida de carga. La exactitud en la medición depende de la holgura entre cada una de las partes móviles y las fijas, además de la calidad de la mecanización y el tamaño del instrumento.

8.1.6.1 Disco Giratorio

- **Descripción:** Básicamente consiste en un disco plano móvil dentro de una cámara circular. Este disco gira cuando pasa el fluido y su movimiento es parecido al de un trompo caído, de modo que cada punto de su circunferencia exterior sube y baja alternadamente. El movimiento de bamboleo se transmite mediante una bola y el eje del disco a un tren de engranajes. Ver Figura N° 13.

Este tipo de medidores de flujo fue diseñado para aplicaciones domésticas con agua, sin embargo, se utiliza industrialmente en la medición de caudales de agua fría, agua caliente, aceite y algunos líquidos alimenticios.

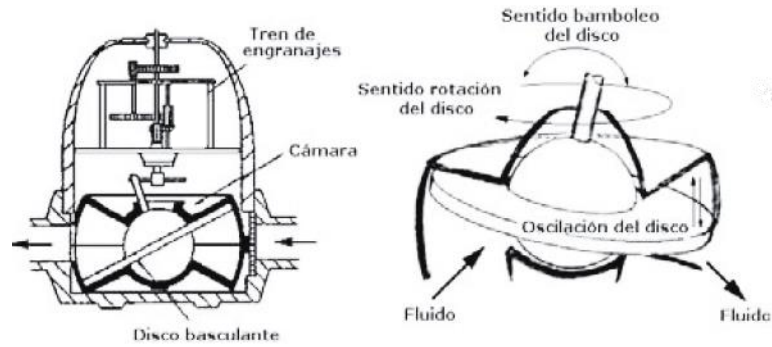


Figura N° 13: “Medidor de flujo tipo Disco Giratorio”

Tabla N° 11: “Ventajas y desventajas del medidor de flujo tipo Disco Giratorio”

| Ventajas | Desventajas |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • No requiere de una fuente de alimentación para funcionar. • Permite medir fluidos muy viscosos. | <ul style="list-style-type: none"> • Requiere constantemente de mantenimiento y calibración. • Las partes móviles sufren desgaste con el tiempo. • Poca exactitud en la medición. |

8.1.6.2 Pistón Oscilante

- **Descripción:** Este instrumento, como se observa en la Figura N° 14, se compone de una cámara de medida cilíndrica con una placa divisora que separa los orificios de entrada y de salida. La única parte móvil es un pistón cilíndrico que oscila suavemente con un movimiento circular entre las dos caras planas de la cámara. Estas están provistas de una ranura que se desliza en la placa divisora fija y que hace de guía del movimiento oscilante. El eje del pistón gira y transmite su movimiento a un tren de engranajes y a un contador.



Figura N° 14: “Esquema de un medidor de flujo tipo Pistón Oscilante”

Su principal aplicación industrial, es la medición de caudales de agua y de líquidos viscosos o corrosivos.

Tabla N° 12: “Ventajas y desventajas del medidor de flujo tipo Pistón Oscilante”

| Ventajas | Desventajas |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • No requiere de una fuente de alimentación para funcionar. • Permite medir fluidos muy viscosos. | <ul style="list-style-type: none"> • Requiere constantemente de mantenimiento y calibración. • Las partes móviles sufren desgaste con el tiempo. • Poca exactitud en la medición. |

8.1.6.3 Pistón Alternativo

- **Descripción:** El medidor de pistón alternativo es uno de los dispositivos más antiguos de los medidores de desplazamiento positivo. Éstos medidores los fabrican de muchas formas: de varios pistones, pistones de doble acción, válvula rotativa, válvulas deslizantes, horizontales. Ver Figura N° 15.

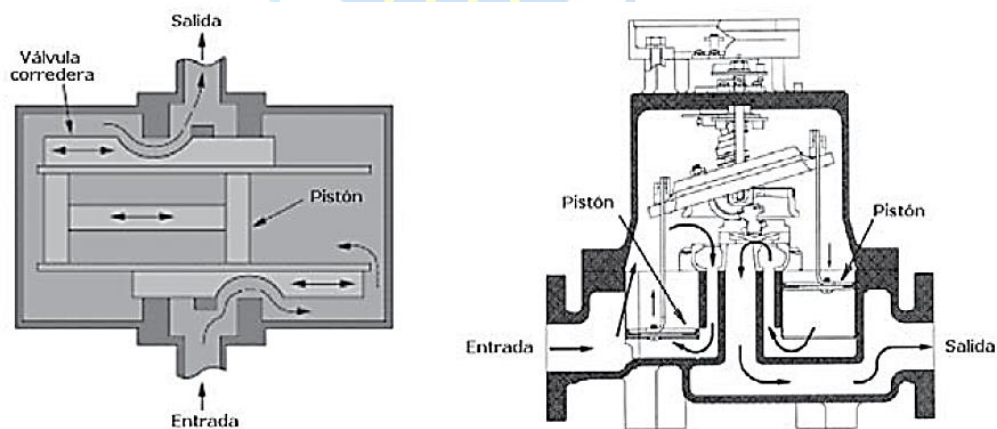


Figura N° 15: “Medidor de flujo tipo Pistón Alternativo”

Éstos instrumentos son principalmente ocupados en la industria petroquímica para líquidos de baja viscosidad y corrosividad.

Tabla N° 13: “Ventajas y desventajas del medidor de flujo tipo Pistón Alternativo”

| Ventajas | Desventajas |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • No requiere de una fuente de alimentación para funcionar. | <ul style="list-style-type: none"> • Requiere constantemente de mantenimiento y calibración. • Alto costo inicial. • Su capacidad es pequeña en comparación a otros medidores. • Poca exactitud en la medición. • Produce una gran pérdida de carga. • Son muy difíciles de reparar. |

8.1.6.4 Medidor Rotativo

- **Descripción:** Este tipo de instrumento tiene válvulas rotativas que giran excéntricamente, rozando con las paredes de una cámara circular y transportan el líquido, en forma incremental desde la entrada hasta la salida.

Hay varios tipos de medidores rotativos, siendo los cicloidales (ver Figura N° 16), los de dos rotores (birrotor) y los ovales los más empleados, aunque su funcionamiento es muy similar.

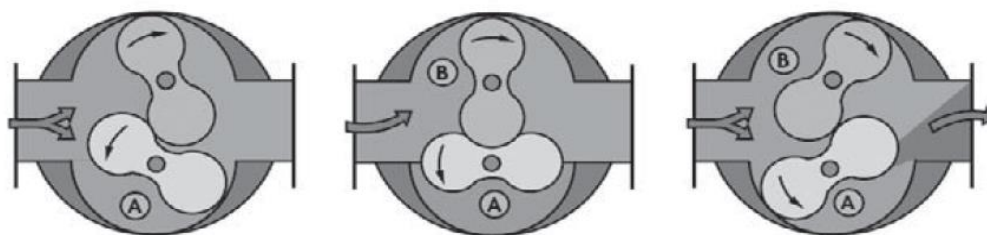


Figura N° 16: “Medidor de flujo Rotativo, tipo Cicloidal”

Este tipo de instrumentos se emplean mucho en la industria petroquímica para la medida de crudo, gasolina y otros líquidos de baja viscosidad.

Tabla N° 14: “Ventajas y desventajas del medidor de flujo tipo Cicloidal”

| Ventajas | Desventajas |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • No requiere de una fuente de alimentación para funcionar. • Son fáciles de calibrar. | <ul style="list-style-type: none"> • Requiere constantemente de mantenimiento y calibración. • Alto costo inicial. • Poca exactitud en la medición. • Producen una gran pérdida de carga. |

8.1.7 Medición por Sistema Vortex

- **Descripción:** Los sistemas de medición tipo vortex, están basados en el efecto Von Karman, donde un cuerpo de forma de cono genera alternativamente vórtices desfasados en 180° , cuya frecuencia es directamente proporcional a la velocidad y al caudal del flujo. Ver Figura N° 17.

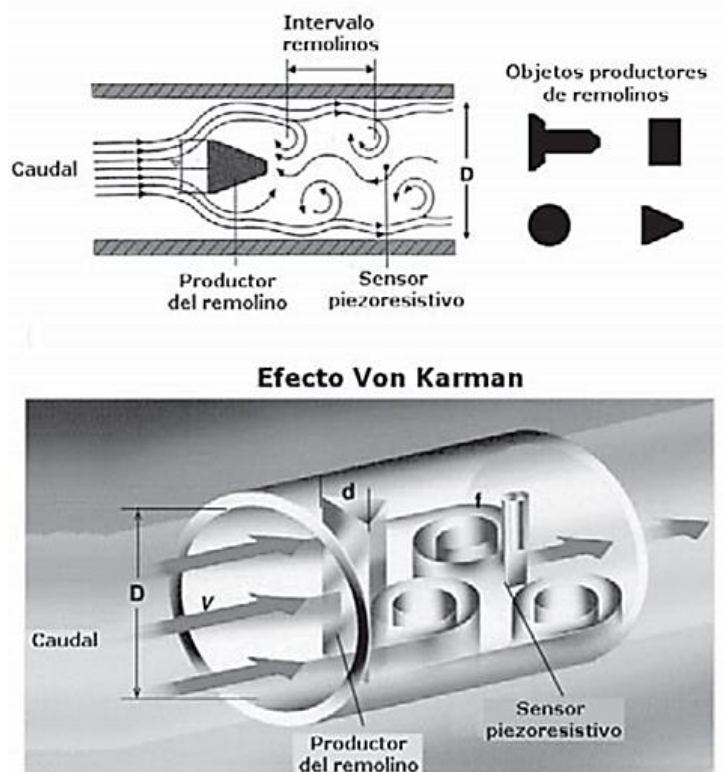


Figura N° 17: “Medidor de flujo tipo Vortex”

Estos medidores de flujo son principalmente utilizados en las industrias del petróleo y gas, el tratamiento de aguas, alimentos y bebidas, manufactura química y purificación de agua.

Tabla N° 15: “Ventajas y desventajas del medidor de flujo tipo Vortex”

| Ventajas | Desventajas |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Bajo costo inicial. • Requiere poco mantenimiento. | <ul style="list-style-type: none"> • Provoca pérdidas de carga. • Es fácil que se acumulen residuos en el productor de remolinos. |

8.2 Medidores de Flujo Másico

8.2.1 Medición por Sistema Térmico

- **Descripción:** Este tipo de sistemas de medición miden el flujo másico directamente y se basan en la elevación de temperatura del fluido en su paso por un cuerpo caliente (ver Figura N° 18). Estos instrumentos también son conocidos como medidores de caudal Thomas, en honor a quien en 1911 diseñó el sistema para medir flujo másico de gas en una tobera.

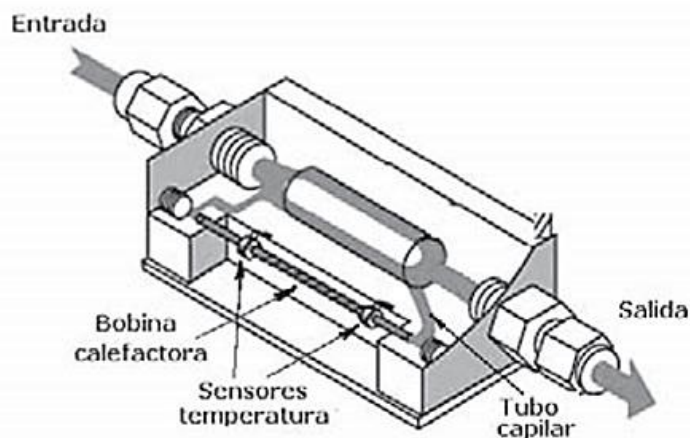


Figura N° 18: “Medidor de flujo basado en sistema térmico”

Los medidores de flujo másico por sistema térmico son muy utilizados para medir gases tales como aire, nitrógeno, hidrógeno, oxígeno, helio, amoníaco, argón, monóxido de carbono, anhídrido carbónico, ácido clorhídrico, etano, etileno, metano, fosfórico y otros. También son empleados en la medición de líquidos, pero con caudales muy bajos.

Tabla N° 16: “Ventajas y desventajas del medidor de flujo basado en sistema térmico”

| Ventajas | Desventajas |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Bajo costo inicial. • Fluidos de baja densidad. | <ul style="list-style-type: none"> • Poca exactitud en medición. • En la medición de gas, este debe ser seco y libre de partículas. • Respuesta lenta. • Debe ser calibrado para gas o una mezcla de gases determinada. |

8.2.2 Efecto Coriolis

- **Descripción:** Este tipo de sensores básicamente están formados por uno o dos tubos encapsulados en un compartimiento, los cuales vibran a su frecuencia natural. La vibración se consigue mediante bobinas electromagnéticas que generan el movimiento cuando el sensor es energizado. Cuando un fluido entra al sensor es dividido entre los dos tubos internos a través de un manifold y la mitad del flujo pasa por cada tubo (ver Figura N° 19).

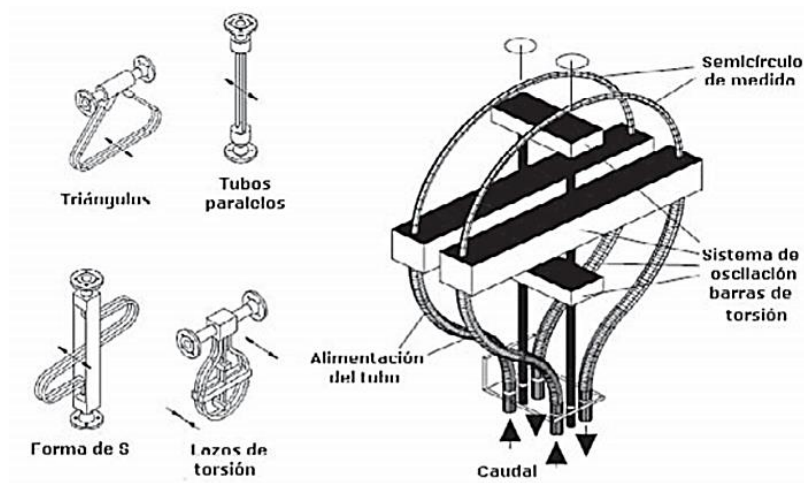


Figura N° 19: “Medidor de flujo tipo Coriolis y algunas de sus formas de presentación”

Su principal uso es en la medición de diferentes tipos de líquidos y gases. Su uso más común es en la industria alimenticia y bebidas, química y farmacéutica, y últimamente se ha incrementado su uso en industrias petroleras y de gas natural.

Tabla N° 17: “Ventajas y desventajas del medidor de flujo basado en el efecto Coriolis”

| Ventajas | Desventajas |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Permite medir presión, temperatura y densidad simultáneamente. • Es uno de los equipos de medición más exactos del mercado. • El proceso de calibración es fácil y no requiere la intervención del instrumento. • Existen variedades de diseños con el fin de suplir cualquier requerimiento. • Se construyen en una gran variedad de materiales dependiendo del uso y el ambiente en que se realizaran las mediciones. | <ul style="list-style-type: none"> • Al ser un medidor con una gran precisión tiene un alto valor comercial. |

9 Principio de Medición por efecto Coriolis

Este capítulo detalla la física que implica la medición mediante el efecto Coriolis. Se ve en detalle la matemática involucrada en el cálculo del flujo másico.

El principio de medición de los medidores de flujo másico Coriolis es la fuerza Coriolis, que aparece en la rotación y oscilación (vibración) de un sistema. A continuación, se muestra el comportamiento de éstas vibraciones en un sistema con tubo recto con el fin de explicar y ejemplificar la fuerza Coriolis.

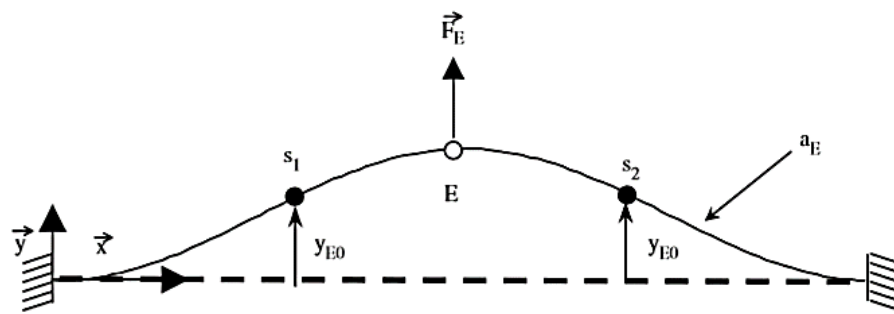


Figura N° 20: “Efecto Coriolis en un tubo recto”

En la Figura N° 20, se ve el movimiento de un tubo recto que transporta un fluido, el cual está oscilando a determinada frecuencia de oscilación. La oscilación del tubo, se mantiene con la fuerza de excitación \vec{F}_E en la posición E. La obtención de las señales de medición es a través de dos sensores, S_1 y S_2 , que cuando el fluido comienza a circular, la fuerza de Coriolis \vec{F}_C induce una oscilación que provoca un cambio en la frecuencia de oscilación natural del tubo, lo cual se muestra en la Figura N° 21.

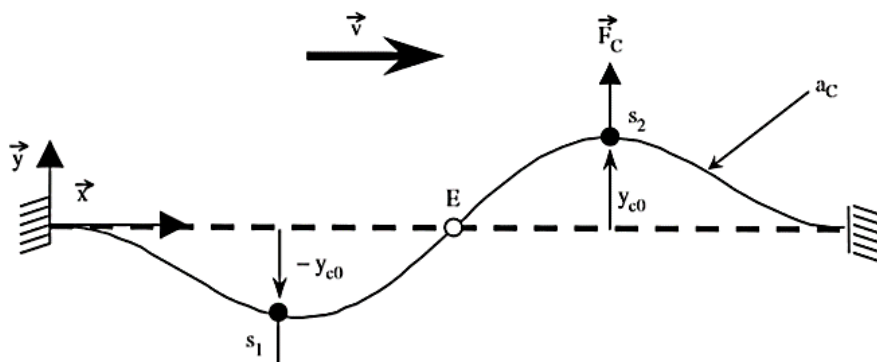


Figura N° 21: “Cambio en la frecuencia de oscilación por la fuerza Coriolis en un tubo recto”

En general, la expresión para la fuerza Coriolis es:

$$\vec{F}_C = 2 * m * \vec{v} \times \vec{\omega} \quad (9-1)$$

Donde:

m = Masa del fluido.

\vec{v} = Vector de velocidad.

$\vec{\omega}$ = Vector de rotación.

\vec{q} = Flujo másico.

Sabiendo que $\vec{q} = m * \vec{v}$, la ecuación (9-1) se puede escribir como:

$$\vec{F}_C = 2 * \vec{q} \times \vec{\omega} \quad (9-2)$$

Cuando el fluido no está fluyendo por un tubo en oscilación (vibración), la fuerza Coriolis es cero ($\vec{F}_C = 0$) y a medida que comienza a circular el flujo, ésta fuerza es distinta de cero ($\vec{F}_C \neq 0$), lo cual queda gráficamente explicado en la Figura N° 20 y Figura N° 21.

El efecto de la fuerza Coriolis a lo largo de una tubería es variado, en la sección de entrada tiende a desacelerar el movimiento de oscilación del tubo, mientras que en la sección de salida acelera el movimiento. En la parte central o media del tubo, la fuerza Coriolis es siempre cero, lo cual matemáticamente se debe a que el vector de rotación $\vec{\omega}$ es cero, y por ende la ecuación (9-1) también lo es (para el caso de tubos rectos). Para el caso de los tubos curvos, en la parte central la fuerza Coriolis igual es cero, debido a que \vec{q} y $\vec{\omega}$ están en paralelo y por ende el producto cruz entre ambos vectores es nulo y la ecuación (9-2) igual a cero.

A medida que el fluido comienza a pasar por la tubería, la fuerza Coriolis induce un desfase en la oscilación o vibración de la propia tubería. Este desfase es directamente proporcional al flujo másico que circula por la tubería. El flujo másico es determinado por el desfase que hay entre los dos sensores de posición, S_1 y S_2 . El desfase medido, depende de la densidad propia del fluido, y puede cambiar dependiendo del proceso que hay aguas arriba del sistema. Otro tipo medición que se puede hacer directamente con este tipo de sensores, aparte del flujo másico y densidad, es la temperatura del fluido o gas de interés.

9.1 Teoría

En general, analizar este método de medición de flujo es muy complejo y una solución analítica sólo puede ser obtenida de un sistema con un “tubo ideal”, por el cual pasa un fluido no viscoso e incompresible. La solución para este tipo de sistemas se puede obtener a través de aproximaciones o usando el método de elementos finitos para ecuaciones diferenciales.

Si se analiza el sistema con un “tubo ideal” recto por el que circula un fluido como el que se muestra en la Figura N° 20, al estar fijo en ambos extremos, el vector de velocidad \vec{v} del fluido es cero. Por lo que el movimiento de los sensores S_1 y S_2 es descrito por la siguiente ecuación diferencial.

$$M_E \cdot \ddot{y}_E + K_E \cdot y_E = F_E \quad (9-3)$$

Donde

y_E = Desplazamiento de excitación lateral en el sensor.

F_E = Fuerza de excitación.

M_E = Masa efectiva.

K_E = Rigidez del tubo en modo de excitación.

Por simplicidad, es ideal encontrar una solución de la forma $y_E(t) = \hat{y}_E \sin(\omega t)$ y $F_E(t) = \hat{F}_E \sin(\omega t)$ por lo que la frecuencia natural del sistema se determina ajustando la fuerza de excitación del sistema $F_E(t)$ a cero. Luego se da una función de prueba $y_E(t)$ en la ecuación (9-3), obteniendo así el primer modo propio o frecuencia de resonancia del sistema.

$$\omega_E = \omega_E(\rho_{Fluido}) = \sqrt{\frac{K_E}{M_E}} \quad (9-4)$$

En la ecuación (9-3) hay parámetros que son propios de la tubería por donde pasa el fluido, sin embargo, en la ecuación (9-4) ω_E depende de la densidad del fluido. Por lo tanto, usando la ecuación (9-4), se puede determinar directamente la densidad del fluido con el sólo hecho de medir la frecuencia de resonancia. Ahora, es posible con la fuerza de excitación F_E determinar el desplazamiento lateral de los sensores. Resolviendo la ecuación (9-3) con la función de prueba $y_E(t)$ y $F_E(t)$ y la ecuación (9-4) se obtiene:

$$\hat{y}_E = \frac{\hat{F}_E}{K_E \cdot \left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_E^2}\right)} \quad (9-5)$$

Con fines constructivos y comerciales, la amplitud de \hat{y}_E varía entre 10 μ m y 1mm, y la frecuencia $f_E = \omega_E/2\pi$, oscila generalmente entre los 80 Hz y los 1100 Hz. En un sistema real, el amortiguamiento impedirá que el movimiento lateral sea infinito, incluso si la velocidad angular de excitación ω_E es igual a la velocidad angular de oscilación natural del sistema ω . Cuando el fluido comienza a fluir, se induce un desfase como el que es descrito en la Figura N° 20, este desfase se produce por la fuerza Coriolis actuando sobre el sistema en oscilación. La ecuación diferencial que describe el comportamiento del sistema en modo Coriolis, producido por ésta fuerza es:

$$M_C \cdot \ddot{y}_C + K_C \cdot y_C = F_C \quad (9-6)$$

Donde

y_C = Desplazamiento lateral de Coriolis del tubo en S_1 y S_2 .

F_C = Fuerza Coriolis.

M_C = Masa efectiva.

K_C = Rigidez del tubo en modo Coriolis.

La función de prueba para el desplazamiento lateral del modo Coriolis es $y_C(t) = \hat{y}_C \cdot \cos(\omega t)$, y la función para la fuerza Coriolis $F_C(t) = \hat{F}_C \cdot \cos(\omega t)$. Utilizando el mismo procedimiento que el anterior, obtenemos la frecuencia del modo Coriolis $\omega_C = \sqrt{K_C/M_C}$, que es generalmente 2.7 veces mayor que ω_E .

El desplazamiento lateral de los sensores queda definido como:

$$\hat{y}_C = \frac{\hat{F}_C}{K_C \cdot \left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_C^2}\right)} \quad (9-7)$$

La fuerza Coriolis F_C se calcula por la integral a lo largo del tubo del medidor:

$$F_C = \int_0^{L/2} \dot{m} \cdot \dot{y}_E \cdot a'_E(x) \cdot a_c(x) \cdot dx \quad (9-8)$$

$$F_C = \dot{m} \cdot C_{EC} \cdot \dot{y}_E$$

Donde:

C_{EC} = Factor de acoplamiento entre la excitación del sistema y el modo Coriolis.

\dot{m} = Flujo másico.

L = Largo del tubo.

a'_E = Derivada del modo de excitación normalizado.

$\dot{y}_E \cdot a'$ = Velocidad de rotación local.

a'_E = Derivada del modo de excitación normalizado.

a_C = Modo Coriolis Normalizado (ver Figura N° 21).

Si se define $v_e = \dot{y}_E$ y con $\hat{v}_e = \hat{y}_e \cdot \omega$, se tiene $\dot{y}_E = \hat{y}_e \cdot \omega \cdot \cos(\omega t) = \hat{v}_e \cdot \cos(\omega t)$. Así la ecuación (9-8) queda como $\hat{F}_C = \dot{m} \cdot C_{EC} \cdot \hat{v}_e$, y el desplazamiento lateral de los sensores queda definida por la siguiente ecuación:

$$\hat{y}_C = \frac{\dot{m} \cdot C_{EC} \cdot \hat{v}_e}{K_C \cdot \left(1 - \frac{\omega_E^2}{\omega_C^2}\right)} \quad (9-9)$$

Como se describió anteriormente, el desplazamiento lateral final de S_1 y S_2 es la superposición entre el modo de excitación y el modo Coriolis. Como se observa en la Figura N° 19, el desplazamiento lateral total de S_1 es $y_{S1} = y_E - y_C$, y en el caso del sensor S_2 queda como $y_{S2} = y_E + y_C$. La diferencia de tiempo $\Delta\tau$ entre ambos sensores queda como define en la siguiente ecuación:

$$\Delta\tau = \frac{\Delta\varphi}{\omega_E} \approx \frac{2 \cdot \hat{y}_C}{\omega_E \cdot \hat{y}_E} = \frac{2 \cdot \hat{y}_C}{\hat{v}_E} = \frac{2}{\omega_E} \cdot \frac{(y_{S2} - y_{S1})}{(y_{S2} + y_{S1})} \quad (9-10)$$

Donde:

$\Delta\tau$ = Tiempo de retardo.

$\Delta\varphi$ = Cambio de fase entre ambos sensores.

A continuación, se determina el flujo de masa por la inserción de la ecuación (9-9) dentro de la (9-10), produciendo $\dot{m} = \frac{K_C \cdot (1 - \omega_E^2 / \omega_C^2)}{2 \cdot C_{EC}} \cdot \Delta\tau$, donde la expresión $\frac{K_C \cdot (1 - \omega_E^2 / \omega_C^2)}{2 \cdot C_{EC}}$ es el valor de la

constante C. De ésta forma, al conocer $\Delta\tau$, el flujo másico del instrumento puede ser determinado a través de la siguiente ecuación simplificada:

$$\dot{m} = C \cdot \Delta\tau \quad (9-11)$$

De la ecuación anterior, se puede observar que la constante C no depende de las propiedades del fluido. Para fines comerciales, esta constante se define por cada instrumento de manera individual a través del proceso de calibración. A pesar de que se ha derivado la fórmula para determinar el flujo másico del sistema, el modelo no se verá afectado por la presión axial, temperatura, pulsaciones, compresibilidad, etc. Como se mencionó anteriormente los cálculos analíticos que incluyen los efectos ya mencionados son engorrosos y sólo pueden obtenerse como aproximaciones.



10 Método de Contrastación

Este capítulo se centra el método de contrastación, en donde se ve con detalle lo que implica la calibración de tecnologías de medición y los errores más comunes que presentan los instrumentos en su medición. Además, se especifica lo que es un elemento patrón, sus principales características y trazabilidad.

El método de contrastación consiste en comparar, por lo que es necesario tener una base útil para la comparación, lo que significa una referencia. A la referencia se le denomina como “Patrón”, él cual es conocido y perfectamente calibrado, más adelante se verá con detalle en qué consiste la calibración de instrumentos y las características de los elementos patrones.

La contrastación es fundamental al realizar análisis ya que a partir de esto se busca establecer similitudes y/o diferencias con el fin de obtener conclusiones que sean útiles para definir un problema y posterior a eso, si es posible, constituir un procedimiento de mejora.

Existen dos posibles formas de realizar contrastación de instrumentación industrial, las cuales se dan según lo siguiente:

Contraste Directo: Corresponde al caso en que se realiza la comparación de un instrumento con un patrón, el cual es un instrumento del mismo tipo, calibrado de manera excelente.

Contraste Indirecto: Se refiere al caso en que la comparación de un instrumento se realiza con un instrumento diferente como elemento patrón.

Para el caso del laboratorio contrastador de caudalímetros de la empresa ELECTROMÁTICA LTDA, la forma de contrastación corresponderá a la forma de contraste directo por lo que se contrastarán sólo caudalímetros, teniendo de base uno certificado que destaca por ser exacto.

Las normativas ISO 9001 y 17025 exigen que la instrumentación industrial de medida sea contrastada periódicamente, en donde el procedimiento debe tener antecedentes como: datos del instrumento, número de serie del elemento patrón, clase, fabricante, etc. Además, la norma exige que se registren de manera escrita los resultados obtenidos en cada contrastación que se realice al mismo instrumento, por lo que debe existir trazabilidad, concepto que se aclarará más adelante.

10.1 Calibración

La calibración de los instrumentos permite conocer el nivel de error de los dispositivos, debido a que es fundamental el correcto funcionamiento de los instrumentos de medición en las industrias, ya que éstos son determinantes en sus áreas de operación, por lo que se espera que operen de manera ideal, es decir, que no presenten errores fuera de lo esperado

Se sabe que un instrumento de medición trabaja de manera correcta cuando existe una relación lineal entre el valor real de la variable y el valor de lectura que otorga el instrumento en su salida. Sin embargo, éstos pueden indicar valores inexactos al realizar mediciones debido a su propia exactitud, parámetro intrínseco que no puede ser modificado. Por lo mencionado, un instrumento necesita ser calibrado cuando al compararlo con un patrón dentro del span, se obtienen resultados diferentes.

10.1.1 Calibración de Caudalímetros

El proceso de calibración dependerá del tipo de caudalímetro o flujómetro a calibrar, ya que en algunos de ellos la calibración se puede realizar directamente en el equipo de medición y en otros casos en su dispositivo transmisor. Para efectos de no descalibrar el instrumento, se debe considerar además que el dispositivo debe ser apropiado para el flujo y la aplicación a la que se expone, debe estar instalado de manera óptima y operar de forma correcta.

Por ejemplo, para el caso de los rotámetros no hay posibilidad de calibración en el equipo de medición directamente, en este sólo se puede comprobar su correcto funcionamiento, exceptuando en el caso que el instrumento incorpore un transmisor. Los medidores de turbinas se descalibran por erosión, flujo violento o averías en el filtro del instrumento. Este tipo de flujómetros solo se calibra mediante el cambio del rotor y la contrastación se hace con un caudalímetro del mismo tipo como elemento patrón. Los instrumentos tipo remolino y vórtex se calibran de fábrica y sólo es posible modificar las condiciones de servicio ajustando parámetros. En general, los instrumentos de tipo volumétricos pueden ser contrastados en serie con otro bien calibrado como patrón. En el caso de los instrumentos medidores de flujo másico, se calibran con flujo constante y conocido, en donde se mide la masa del flujo y el tiempo. La contrastación se realiza en serie con un instrumento patrón.

10.1.2 Error

Se considera como error en la medida a la diferencia entre la medida práctica con su medida esperada teóricamente. Un instrumento de medición puede presentar errores por desperfectos del mismo y/o por variables perturbadoras que intervengan en el sistema. El error absoluto corresponde a la diferencia entre el valor que lee el instrumento y el valor verdadero, mientras que el error relativo se relaciona con la calidad de la medida y se considera como la división entre el error absoluto y el error verdadero. Si el sistema se encuentra operando en estado estacionario y en caso contrario se denomina error dinámico.

Los instrumentos presentan generalmente tres tipos de error, los que son:

Error de cero: En este caso, todas las medidas que otorga el instrumento se encuentran desplazadas en una magnitud constante en relación a los valores ideales. En algunos dispositivos de medición se puede solucionar este error mediante un tornillo de cero, sin embargo, en otros se soluciona mediante electrónica, aunque hay casos en los que no es posible intervenir para solucionar.

Error de multiplicación: Se observa error de multiplicación cuando todas las mediciones obtenidas por el mismo instrumento se encuentran en aumento (o disminución) de manera progresiva con respecto a su valor ideal. Si el equipo lo permite, se puede corregir este error por medio del tornillo de multiplicación o span en inglés. En caso contrario se puede corregir ajustando la electrónica del dispositivo, siempre que ésta lo permita.

Error de angularidad: Este tipo de error se observa en equipos de medición en los que la transmisión se realiza por medio de palancas. No existe en instrumentos digitales y si llegare a existir significa que el instrumento es defectuoso. El error de angularidad se distingue cuando el valor medido y el ideal coinciden solo en 0% y 100%, existiendo diferencia en todo el resto de los valores medidos. Se anula cuando las palancas quedan a escuadra con el 50% de su valor.

10.2 Patrón

Se puede definir como patrón a: un instrumento de medida, una medida materializada, un elemento de referencia, etc. Los instrumentos patrones se utilizan normalmente como elementos de referencia para contrastar otros instrumentos o sistemas de medida al realizar calibraciones, por lo que un patrón debe cumplir que su grado de incertidumbre en la exactitud sea, como mínimo, cuatro veces superior a la de los elementos de medición que se quieran calibrar. Un instrumento

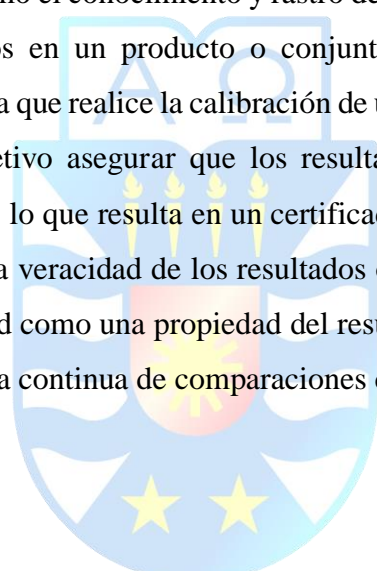
patrón debe cumplir con las condiciones metrológicas necesarias al momento de ser utilizado, por lo que debe pasar por mantenciones frecuentemente y ser almacenado en ambientes apropiados.

10.2.1 Equipo Patrón

Todo proceso de contrastación precisa un elemento patrón, en el caso de los instrumentos medidores de caudal el más utilizado es el medidor por efecto Coriolis. Debido a su gran precisión y repetitividad en las mediciones, provoca una baja pérdida de carga y fácil calibración. Si bien es un equipo extremadamente caro, se justifica su instalación en procesos industriales que involucren sustancias altamente inflamables, reacciones químicas y general en procesos críticos.

10.3 Trazabilidad

Trazabilidad se concibe como el conocimiento y rastro de la ubicación, trayectoria e historial de los procedimientos realizados en un producto o conjunto de productos. Se otorga por el laboratorio u organización externa que realice la calibración de un determinado instrumento patrón. La trazabilidad tiene como objetivo asegurar que los resultados de calibración obtenidos son comparables a otros laboratorios, lo que resulta en un certificado que acredita el cumplimiento de la normativa en cada proceso y la veracidad de los resultados obtenidos. Por lo anterior es que la normativa ISO define trazabilidad como una propiedad del resultado de una medida relacionada a referencias a través de una cadena continua de comparaciones con incertidumbres especificadas.



11 Normativa Asociada

En este capítulo se identifica la entidad chilena encargada de la normalización y acreditación de distintos tipos de organismos. Junto con esto, se detallan las normas que afectan al banco de contrastación de flujómetros.

El laboratorio de contrastación de caudalímetro o flujómetros de la empresa ELECTROMÁTICA LTDA se encuentra en vías de acreditación por lo que se busca el cumplimiento de normas nacionales e internaciones en aspectos como procedimientos, informes y otros. Para esto se registrá según el instituto nacional de normalización.

Instituto Nacional de Normalización (INN)

Fundado por CORFO en el año 1973, constituido como una fundación de derecho privado sin fines de lucro. Su misión es contribuir al fortalecimiento de los componentes de la calidad para mejorar la competitividad de los diversos sectores productivos y la calidad de vida de la sociedad, con énfasis en aquellos sectores priorizados por las políticas públicas.

Actividades y servicios que brinda INN:

- Elaboración de Normas Técnicas a través de diversos esquemas de financiamiento.
- Impartición de cursos y diplomados otorgando conocimientos y herramientas en base a las Normas Técnicas.
- Proporciona servicio en línea para acceder a documentos técnicos y normas nacionales e internacionales.
- INN ofrece acreditación a los siguientes tipos de organismos:
 - Certificados de sistemas, productos y personas.
 - Laboratorios de ensayo, calibración y clínicos.
 - Organismos de inspección.
 - Entidades de verificación.

Normas ISO

La Organización Internacional para la Estandarización (ISO), tiene la finalidad de lograr y mantener niveles elevados de calidad en productos y servicios por lo que ayuda a satisfacer las necesidades de los clientes que son cada vez más exigentes. Desde el punto de vista de las empresas, las normas ISO presentan notables beneficios ya que componen una vía eficaz para lograr ventaja competitiva, ayudan a implementar procesos de mejora continua y permite conseguir acceso a mercados más grandes e internacionales, por lo que éstas normas permiten controlar el comercio con otros países y aseguran que los productos y servicios cumplen los requisitos obligatorios relacionados a calidad, seguridad, medio ambiente, etc. Las normas de calidad presentan modificaciones con los años con el fin de asegurar la calidad y optimizar los recursos de las empresas o estamentos certificados o acreditados.

Actualmente se pueden encontrar distintas normas ISO, las cuales se actualizan periódicamente y se agrupan en familias. Las principales normas que afectan al laboratorio contrastador de flujómetros de la empresa ELECTROMÁTICA LTDA son las siguientes:

Norma ISO 9001 – “Gestión de Calidad”

La empresa ELECTROMÁTICA LTDA proporciona soluciones innovadoras de alta tecnología para optimizar procesos productivos mediante un servicio confiable y de calidad que satisfaga efectivamente las expectativas y necesidades de nuestros clientes. Para lograr esto la empresa ha implementado un Sistema de Gestión de la Calidad, basado en la norma ISO 9001:2008, en donde existe compromiso con el cumplimiento de sus requisitos y la mejora continua de su eficacia.

Norma ISO 4185 – “Medida de flujo líquido en conductos cerrados – Pesada de método”

Esta norma específica un método de medición de caudal en conductos cerrados, teniendo un estanque que alimenta la circulación de flujo por los conductos en un tiempo conocido. La norma abarca aspectos como: aparatos de medición, procedimientos, métodos de cálculo e incertidumbres relacionadas a la medición. La empresa se compromete a cumplir con lo especificado en la norma ISO 4185:1980 en los aspectos necesarios para la acreditación del laboratorio.

NCh ISO 17025 – “Gestión de laboratorios de ensayos y calibración”

Esta norma tiene como base la serie de normas ISO 9000 más aspectos técnicos propios de laboratorios. La finalidad de esta norma es acreditar que los resultados que se obtienen en los laboratorios son adecuados y ciertos. La norma incluye aspectos de gestión bien definidos y también se encuentran en la norma requisitos técnicos que abarcan aspectos como: instalaciones, condiciones ambientales, metodologías, equipos, trazabilidad, entre otros. Esta es la principal norma que permitirá la acreditación del laboratorio que plantea la empresa ELECTROMÁTICA LTDA.



12 Cálculos Hidráulicos

Este capítulo expone la matemática presente en la mecánica de fluidos con el fin de analizar el flujo en el sistema. Se especifica el procedimiento matemático para obtener valores iniciales y finales, características del flujo y las pérdidas de carga del sistema.

Se analizará con fundamento matemático el sistema de tuberías del laboratorio contrastador, aplicando principios de mecánica de fluidos. Se analizará el comportamiento del fluido que pasa por cada sector de tuberías y en razón de esto se calcularán las pérdidas que existan.

12.1 Principio de Continuidad

Al ser un sistema de conductos cerrados, el cálculo de la velocidad depende del principio de continuidad, por lo que el flujo que circula es constante en toda la extensión del trayecto. En términos másicos se expresa como $M_1 = M_2$, en donde M_1 y M_2 corresponden al Flujo másico de salida y de entrada respectivamente. Si se sabe que $M = \rho Av$.

Entonces se tiene:

$$\rho_1 A_1 v_1 = \rho_2 A_2 v_2 \quad (12-1)$$

Donde:

$$\rho = \text{Densidad del fluido} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$$

$$A = \text{Área de la tubería} \left[\text{m}^2 \right]$$

$$v = \text{velocidad del flujo} \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$

12.2 Número de Reynolds

El comportamiento del fluido, desde el punto de vista de las pérdidas de carga, puede ser laminar o turbulento. El número de Reynolds permite identificar el comportamiento y las características del flujo y éstas dependerán de las propiedades del líquido y las dimensiones del flujo. Los experimentos realizados por Reynolds concluyeron que las fuerzas del momento son función de la densidad, el diámetro de la tubería y la velocidad. Asimismo, la fricción depende de la viscosidad del líquido como se observa en la ecuación (12-2)

$$N_R = \frac{\rho D v}{\eta} \quad (12-2)$$

Donde:

N_R = Número de Reynolds.

ρ = Densidad del fluido.

D = Diámetro interno de la tubería.

v = Velocidad del flujo.

η = Viscosidad del fluido.

- $N_R < 2000$

En este caso el flujo es laminar. Lo que significa que el fluido se desplaza en capas o láminas paralelas bien definidas, moviéndose suavemente unas sobre otras. Cualquier tendencia hacia la inestabilidad o turbulencia es degradada por la fuerza viscosa cortante. Se considera un movimiento del fluido ordenado, en donde prácticamente no se transfiere energía ni partículas entre una capa y otra, tal como se observa en la Figura N° 22.

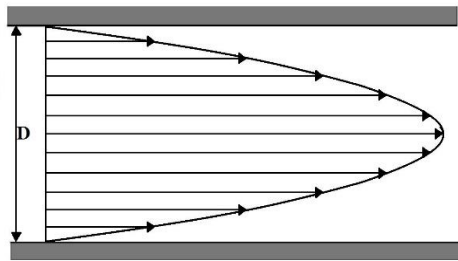


Figura N° 22: “Flujo Laminar”

- $2000 < N_R < 4000$

Al encontrarse el número de Reynolds entre estos valores, se considera que el flujo está en una región crítica. Por lo que no existe información de cómo se comportará.

- $N_R > 4000$

En este caso, el flujo es turbulento. Las fuerzas de inercia predominan sobre las viscosas, las partículas no se mueven en trayectorias definidas, lo que incluso provoca que choquen entre sí. En su mayoría se trata de flujos de mayor velocidad. En la Figura N° 23, se observa que el flujo es hacia la derecha, sin embargo, se observan partículas que se desplazan hacia distintas direcciones, produciendo torbellinos y vórtices.

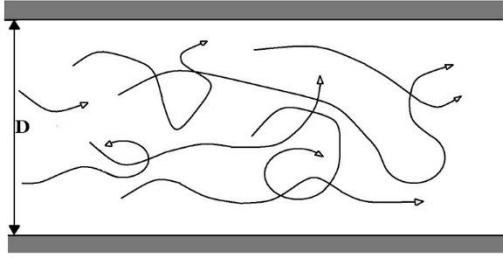


Figura N° 23: “Flujo Turbulento”

12.3 Ecuación de Bernoulli

La ecuación de Bernoulli relaciona la energía total del fluido. La energía total consta de tres formas, las cuales son: Energía potencial, energía cinética y energía de flujo.

- Energía potencial: $EP = wz$
- Energía cinética: $EC = \frac{wv^2}{2g}$
- Energía de flujo: $EC = \frac{wp}{\gamma}$

Donde:

- w = Peso del elemento.
- z = Distancia con el punto de referencia.
- v = Velocidad del flujo.
- g = Fuerza de gravedad.
- p = Presión del flujo.
- γ = Peso específico.

Por lo tanto, la suma de todas las energías corresponde a lo siguiente:

$$E = EF + EP + EC$$

$$E = wz + \frac{wv^2}{2g} + \frac{wp}{\gamma}$$

$$E = z + \frac{v^2}{2g} + \frac{p}{\gamma}$$

Considerando que no existe pérdida de carga:

$$E_1 = E_2$$

$$z_1 + \frac{v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\gamma} = z_2 + \frac{v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\gamma} \quad (12-3)$$

12.4 Pérdidas de Carga

El fluido pierde energía durante su trayectoria, esto es ocasionado por cada válvula, codo, reducción y tubería recta. La fricción que presenta un fluido en movimiento se traduce como pérdidas de energía, ya que ésta se convierte en energía térmica que es disipada a través de las paredes de las tuberías por las que se desplaza el fluido.

La nomenclatura de las pérdidas y ganancias de energía es la siguiente:

h_A Energía que se agrega al fluido con un dispositivo mecánico, como una bomba.

h_R Energía que se remueve del fluido por medio de un dispositivo mecánico.

h_L Pérdidas de energía del sistema por la fricción en las tuberías o pérdidas menores por válvula y otros accesorios.

$$z_1 + \frac{v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\gamma} + h_A - h_L = z_2 + \frac{v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\gamma}$$

Si $\gamma = \rho g$, entonces:

$$z_1 + \frac{v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho g} + h_A - h_L = z_2 + \frac{v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho g}$$

$$z_1 \rho g + \frac{\rho v_1^2}{2} + p_1 + (h_A - h_L) \rho g = z_2 \rho g + \frac{\rho v_2^2}{2} + p_2$$

$$h_L = K \left(\frac{v^2}{2g} \right) \quad (12-4)$$

Donde:

K= Coeficiente de resistencia.

De la ecuación (12-4) se observa que las pérdidas de energías producidas por fricción del fluido y componentes de tuberías, son proporcionales a la carga de velocidad del mismo.

13 Equipamiento

Este capítulo se centra en dar información técnica del equipamiento que comprende el banco contrastador de flujómetros. Se indica la información detallada de cada equipo, la cual es extraída de los manuales respectivamente.

13.1 Transmisor de Presión Novus NP620 (Proyectado)



Figura N° 24: “Transmisor de Presión Novus NP620”

Tabla N° 18: “Información Técnica de Transmisor de Presión Novus NP620”

| | |
|--------------------------------|---------------|
| Fabricante | NOVUS |
| Modelo N°. | NP620 |
| Alimentación | 11-33 Vcc |
| Temperatura de Funcionamiento | -20 a 70 °C |
| Factor de Rango de Transmisión | 3:1 |
| Rango de Presión | 0 - 10 Bar |
| Precisión | 0,25% |
| Respuesta Dinámica | < 30 ms |
| Sobrepresión | 2 veces |
| Señal de Salida | 4 - 20 mA |
| Conexión a Proceso | 1/2" NPT |
| Señal de Salida | 4 - 20 mA |
| Conexión a Proceso | 1/2" NPT |
| Dimensiones | Ø27 x 93,2 mm |
| Conexión | DIN43650 |
| Material de Sellos | FKM |
| Material del Sensor | 316L SST |
| Material de Conexión a Proceso | 316 SST |

13.2 Bomba Pedrollo F65/160A



Figura N° 25: “Bomba Pedrollo F65/160A”

Tabla N° 19: “Información Técnica Bomba Pedrollo F65/160A”

| | |
|-----------------------------------|---|
| Fabricante | Pedrollo |
| Modelo N°. | F65/160A |
| Motor Eléctrico | Trifásico 230/400 V |
| Potencia | 15 kW/20 HP |
| Temperatura del Líquido | -10°C - 90°C |
| Temperatura Ambiente | -10°C - 40°C |
| Presión máxima en cuerpo de bomba | 10 bar (PN 10) |
| Caudal | 600 - 2400 l/min |
| Configuración Triángulo | 380-415 V / 27.5 A |
| Configuración Estrella | 660-730 V / 16 A |
| Material | Hierro fundido con bocas de aspiración e impulsión con bridas |
| Conexión | En acero con bocas roscadas ISO 228/1 |
| Tapa | Hierro fundido |
| Soporte | Hierro fundido |
| Rodete | Latón |
| Eje Motor | Acero Inox. EN 10088-3 -1.4104 |
| Sello Mecánico | FN-24 |
| Aislamiento | Clase F |
| Protección | IPX5 |
| Altura Manométrica Total | 28 - 41 m |

13.3 Transmisor de Flujo Másico MicroMotion F200S (Patrón)



Figura N° 26: “Transmisor de Flujo Másico MicroMotion F200S”

Tabla N° 20: “Información técnica de Transmisor de Flujo Másico MicroMotion F200S”

| | |
|---------------------------------------|--|
| Fabricante | Micro Motion |
| Modelo N°. | F200S 382CQFZEZZZZ |
| Temperatura ambiental | -40°C - 350°C |
| Diámetros de Línea | 2" |
| Presión Máxima | 100 barg |
| Certificado de Calibración | D-K-15043-01-00 |
| Tipo de conexión a proceso / Material | Bridas DIN 2635 PN40 /F316L |
| Conexión Proceso | 2" |
| Material Cuerpo | 316L |
| Entradas para Cables | Prensaestopas de latón-niquel |
| Encapsulado | NEMA 4X (IP66) |
| Caudal Nominal | 52.160 l/h |
| Caudal Máximo | 87.100 l/h |
| Temperatura Nominal del Proceso | 25 °C |
| Presión Nominal del Proceso | 100 barg |
| Fabricante | Micro Motion |
| Modelo N°. | 2700R12BBASZZZ |
| Alimentación Eléctrica | 85 a 265 VCA, 50/60 Hz |
| Conexión Eléctrica | 1/2" NPT |
| Precisión | ±0,50% del caudal medible |
| Montaje | Remoto a 4 hilos |
| Señal de Salida | 4-20 Ma x2 |
| Ajuste de Cero | Desde indicador |
| Rango Calibrado | Ajustable |
| Indicador local | Doble línea, luz de fondo y puesta a cero de totalizador |
| Encapsulado/Protección | NEMA 4X / IP66 |
| Protocolo de Comunicación | HART |

13.4 Variador de Frecuencia ABB-ACS550



Figura N° 27: “Variador de Frecuencia ABB-ACS550”

Tabla N° 21: “Información Técnica de Variador de Frecuencia ABB-ACS550”

| | |
|--------------------------|------------------------------------|
| Fabricante | ABB |
| Modelo N°. | ACS550-01-072A-4 |
| Potencia | 0,75 - 160 kW |
| Alimentación | 380 - 480 V |
| Sobrecarga | Normal: 10% Trabajo Pesado: 50% |
| Rango de Frecuencias | 0 - 500 Hz |
| Factor de Potencia | 0,98 |
| Fusible | 72 A |
| Resolución de Frecuencia | 0,01 Hz |
| Chopper de Frenado | No |
| Rendimiento | 98% |
| Refrigeración | Ventilador Interno |
| Grado de Protección | IP54 |
| Altitud | 0 - 2.000 m |
| Temperatura Ambiente | -40 - 70 °C |
| Humedad Relativa | 5 - 95 % |
| Entradas Analógicas | 6 |
| Salidas Analógicas | 3 |
| Entradas Digitales | 6 |
| Salidas de relé | 3 Programables |

13.5 DataLogger Novus V1.6x D



Figura N° 28: “ DataLogger Novus V1.6x D”

Tabla N° 22: “Información Técnica de DataLogger Novus V1.6x D”

| | |
|------------------------------|--|
| Fabricante | Novus |
| Modelo N°. | FieldLogger V1.6x D |
| Alimentación | 100 - 240 VAC 50/60 Hz |
| Consumo máximo | 20 VA |
| Temperatura de Operación | 0°C - 90°C |
| Altitud de Operación | < 2000 m |
| Alojamiento | ABS + PC |
| Protección | IP20 |
| Entradas Analógicas | 8 |
| Canales Digitales | 8 (Configurables como Entrada o Salida) |
| Salidas a Relé | 2 |
| Memoria Interna | 2 MB |
| Interface Tarjeta SD | Hasta 16 GB |
| Interface RS485 | Modbus RTU maestro y esclavo |
| Servicios Ethernet | DHCP, HTTP, FTP, SMTP, SNMP, Modbus TCP |
| USB | Host, Device |
| Registros por Segundo | Hasta 1000 registros |
| Batería de Reloj | Litio Panasonic de 3 V |
| Señales Analógicas Aceptadas | Termopar: J, K, T, E, N, R, S, B. Pt100, Pt1000. 0-20 mA, 4-20mA, 0-20 mV, 0-50 mV, 0-60 mV, 0-5 V, 0-10 V |

13.6 Transmisor de Temperatura y Humedad Novus RHT (Proyectado)



Figura N° 29: “Transmisor de Temperatura y Humedad Novus RHT”

Tabla N° 23: “Información Técnica de Transmisor de Temperatura y Humedad Novus RHT”

| | |
|----------------------------|---|
| Fabricante | NOVUS |
| Modelo N°. | RHT-WM-485-LCD |
| Alimentación | 12 - 30 VCC < 16 mA |
| Temperatura de trabajo | -40°C a 70°C |
| Intervalo de muestreo | 3 segundos |
| Rango de Medida del Sensor | Temperatura: -40°C - 100°C Humedad Relativa: 0,0 a 100,0 % |
| Resolución de las medidas | Temperatura: 0,1°C 14 bits (16383 niveles) Humedad Relativa: 0,1% 12 bits (4095) |
| Tiempo de Respuesta | Temperatura: Hasta 30 s. Humedad: Hasta 8 s. |
| Repetibilidad | 0,10% |
| Caja | Policarbonato |
| Tipo Montaje | En pared |
| Aislamiento en Salidas | 4-20 mA: SI 0-10 V: NO |
| Entrada de Cables | Prensa cables PG7 |
| Salida | Corriente: 4-20 mA o 20-4 mA Voltaje: 0-20Vdc (Opcional) |

14 Adquisición de Datos y Control

Este capítulo se enfoca en dar características técnicas y de conexionado del instrumento encargado de la adquisición de datos del banco contrastador de flujómetros. Conjuntamente se propone el tipo de control del sistema, proveyendo características del elemento que se utilizarán para controlar el sistema.

14.1 Adquisición de Datos

La adquisición y el registro de datos del banco de contrastación de flujómetros se realizará a través del equipo FieldLogger de la marca NOVUS, el cual es un dispositivo de lectura y registro de variables analógicas y digitales con elevado nivel de resolución y velocidad.



Figura N° 30: “FieldLogger NOVUS”

14.1.1 Características Técnicas

El equipo de la marca NOVUS que se observa en la Figura N° 30, cuenta con las siguientes características:

- Entradas/Salidas:

Posee 8 entradas analógicas configurables por software para señales de voltaje, corriente, termopar, Pt100 y Pt1000. Además, 8 entradas digitales configurables como entrada o salida. Tiene salida 24 Vcc para alimentación de hasta 8 transmisores 4-20 mA.

- Comunicación:

Cuenta con una interface Modbus RTU RS485, la que se puede configurar como maestro o esclavo. Esto permite la adquisición y registro de hasta 64 canales externos. También cuenta con un puerto Ethernet y un puerto USB.

- Memorias:

El equipo tiene una memoria interna de 2MB, la que puede ser expandida mediante tarjeta SD. Los registros pueden ser guardados también en una memoria USB directamente desde el puerto USB integrado en el equipo.

- Pantalla HMI:

El dispositivo tiene la opción de una pantalla HMI con display a color. La cual se puede integrar al equipo o ser instalada de manera remota en un gabinete. Esta pantalla cumple funciones de indicación de variables y modificación de parámetros.

- Funciones Lógicas:

Cuenta con capacidad de resolver funciones matemáticas básicas, tales como: suma, resta, multiplicación, división, lógica (Y, O y O exclusivo), raíz cuadrada y potenciación.

Para más información técnica, ver Tabla N° 22.

14.1.2 Software

El software del dispositivo es gratuito, amigable, muy sencillo y completo. Sus principales funciones son:

- Descarga, visualización y exportación de datos
- Configuración
- Diagnóstico del equipamiento
- El formato utilizado es Wizard (paso a paso)

En la Figura N° 31 se muestran capturas del software, en donde se puede apreciar la facilidad de acceso al menú deseado, además se observa un gráfico de registros y un panel de configuración para la comunicación vía Ethernet.



Figura N° 31: “Capturas de Software de equipo DataLogger NOVUS”

14.1.3 Conexión al sistema

El sistema de adquisición de datos utilizado para recoger la información entregada, tanto por el equipo patrón como por el contrastado, está montado en un tablero de fibra de policarbonato con grado de protección IP67, con el fin de garantizar el correcto funcionamiento del equipo de adquisición de datos y en un futuro algún equipo de control.

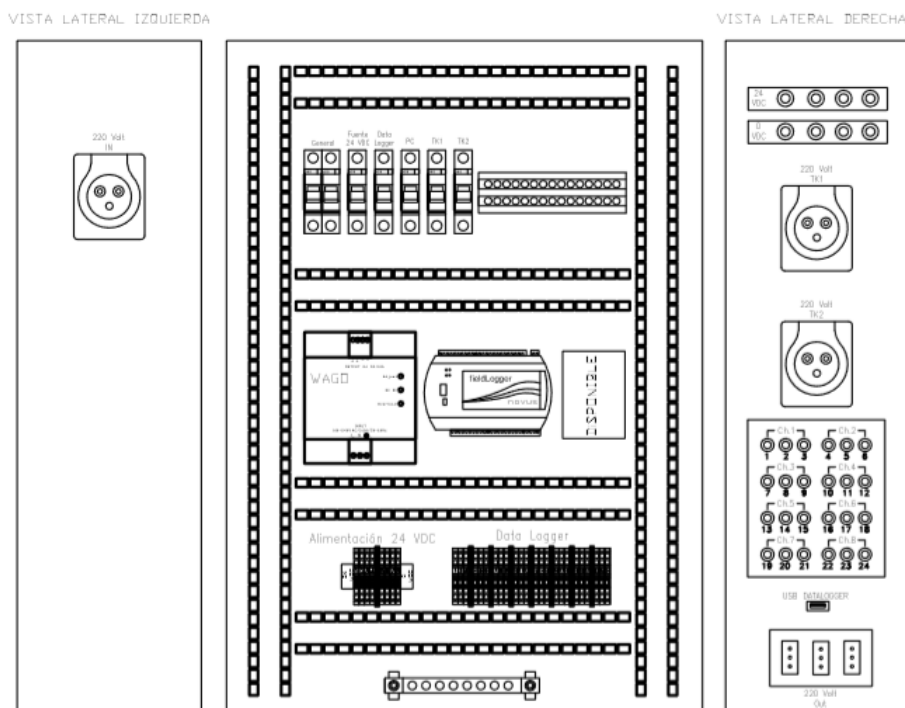


Figura N° 32: “Layout Tablero de Control”

Durante el funcionamiento o montaje en planta del banco contrastador, el tablero debe mantenerse siempre cerrado con fines de seguridad tanto para el operario como para la instrumentación y el equipamiento. Es por lo anterior que el diseño del tablero contempla que todas las conexiones sean a través de conectores ubicados en la periferia del tablero. En este caso, las conexiones se encuentran en las caras laterales, en donde se dispone de: conectores de alimentación de 24 Vdc, 220 Vac, conectores del tipo europeo, un puerto USB y se disponen los 8 conectores correspondientes a los canales analógicos configurables del equipo de adquisición de datos.

La gran ventaja del tablero de control diseñado y propuesto en este trabajo de título, es que brinda una gran flexibilidad y simplicidad en cuanto al conexionado que se debe realizar en planta, reduciendo así algún tipo de accidente o problema de conexión que termine dañando algún equipo.

14.2 Control

De acuerdo a las necesidades o requerimientos de control para el banco de contrastación de flujómetros, es que es necesario la utilización de un control manual. Esto se debe principalmente a que el rango de flujo en el cual puede trabajar el banco, depende directamente del flujómetro a contrastar, y en palabras más técnicas, depende del span en el cual el flujómetro a contrastar trabaja habitualmente en planta. Es por lo anteriormente mencionado, que la mejor forma de realizar la contrastación de cualquiera de los diferentes flujómetros existentes en el mercado, es por un control manual del flujo o caudal entregado por la bomba, lo cual se logra mediante la manipulación o utilización de un variador de frecuencia.

El variador de frecuencia a utilizar es de la marca ABB, modelo ACS550. Este variador, posee un panel removible, el cual irá ubicado en la puerta del tablero de fuerza, accesible al operador para que este pueda modificar los parámetros de operación y de la misma forma variar y ajustar el flujo o caudal de acuerdo al span del flujómetro contrastado.

A continuación, se resumen las funciones de las teclas y las pantallas del panel asistente del variador de frecuencia.

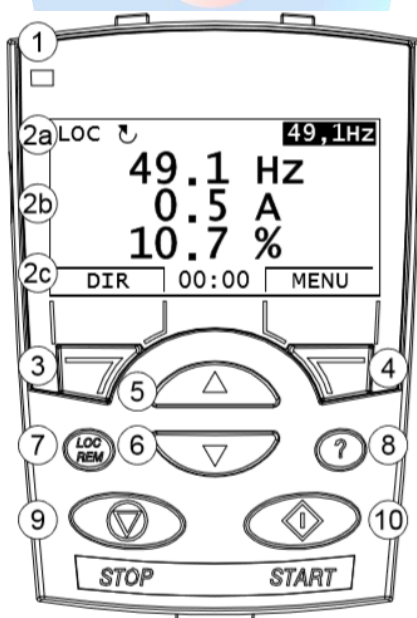


Figura N° 33: “Panel Removible de Variador de Frecuencia”

Tabla N° 24: “Resumen de teclas y pantalla de Variador de Frecuencia”

| N° | Uso |
|----|---|
| 1 | LED de estado- Verde para el funcionamiento normal. Si el LED parpadea, o está en rojo, consultar apartado de diagnóstico en manual de usuario. |
| 2 | Pantalla LCD-Se divide en tres áreas principales: <ol style="list-style-type: none"> Línea de estado- variable según el modo de funcionamiento. Centro-variable, en general muestra valores de parámetros, menús o listas. También muestra fallos y alarmas. Línea inferior-muestra la función actual de las dos teclas multifunción y la indicación horaria, si se ha activado. |
| 3 | Tecla multifunción 1- La función depende del contexto. El texto en la esquina inferior izquierda de la pantalla LCD indica la función. |
| 4 | Tecla multifunción 2- La función depende del contexto. El texto en la esquina inferior derecha de la pantalla LCD indica la función. |
| 5 | Arriba <ul style="list-style-type: none"> Permite el desplazamiento ascendente por un menú o lista visualizada en la parte central de la pantalla LCD. Incrementa un valor si se ha seleccionado un parámetro. Incrementa el valor de referencia si está resaltada la esquina superior derecha. Mantener la tecla pulsada hace que el valor cambie con mayor rapidez. |
| 6 | Abajo <ul style="list-style-type: none"> Permite el desplazamiento descendente por un menú o lista visualizada en la parte central de la pantalla LCD. Reduce un valor si se ha seleccionado un parámetro. Reduce el valor de referencia si está resaltada la esquina superior derecha. Mantener la tecla pulsada hace que el valor cambie con mayor rapidez. |
| 7 | LOC/REM- Cambia entre control local y remoto del variador. |
| 8 | Ayuda- Muestra información sensible al contexto al pulsar la tecla. La información visualizada describe el elemento actualmente resaltado en el área central de la pantalla. |
| 9 | STOP- Detiene el variador en control local. |
| 10 | STAR-Arranca el convertidor en control local. |

14.2.1 Conexión al sistema

El sistema de control del banco contrastador de flujómetros posee un control manual mediante un variador de frecuencia ubicado en el tablero de fuerza del sistema, el cual es accesible al operador gracias a que el panel de asistencia del variador se ubica en la puerta del tablero. Lo anterior tiene como finalidad garantizar la seguridad del operador al momento de manipular el variador y así impedir o no hacer necesario que el banco contrastador funcione con el tablero de fuerza expuesto al ambiente, y en nuestro caso expuesto a alguna fuga o salpicadura de agua.

Si bien el variador de frecuencia es un equipo de control y no de fuerza, este se ubica directamente en este tablero, con el fin de evitar algún tipo de señales parásitas que pudieran llegar a perturbar el equipo de adquisición de datos, afectando la medición. Es por lo anteriormente mencionado que ambos equipos se montan en tableros diferentes.

Con el fin de facilitar el montaje en planta, se proyecta que la conexión entre el variador y la bomba, se mediante un conector ubicado en la periferia del tablero, garantizando un conexionado seguro y correcto en relación al tipo de alimentación que requiere la bomba.

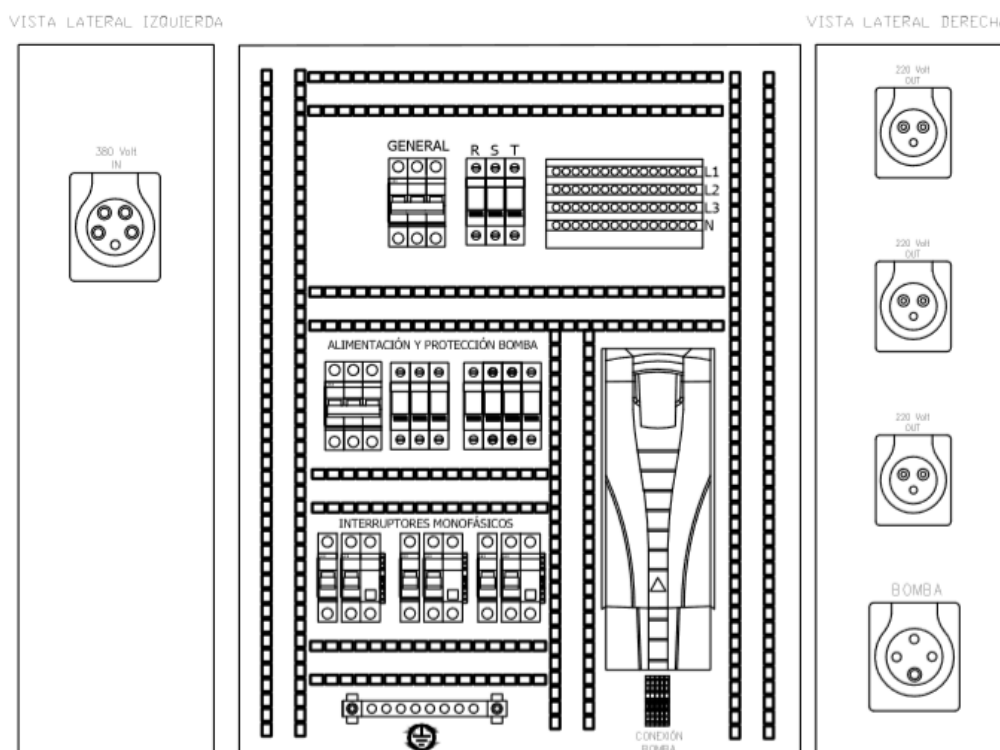


Figura N° 34: “Layout Tablero de Fuerza”

15 Checklist de Procedimientos

En este capítulo se crea una compilación de todos los procedimientos a realizar en el montaje y prueba del banco de contrastación. Se abarcan aspectos mecánicos de montaje y electrónicos de control.

A continuación, se desarrolla un checklist de procedimientos de instalación mecánica de los componentes y además de pruebas del banco de contrastación de flujómetros. El objetivo principal de este documento es garantizar la correcta secuencia de proceder en planta.

15.1 Instalación mecánica componentes del banco de prueba de Flujómetros.

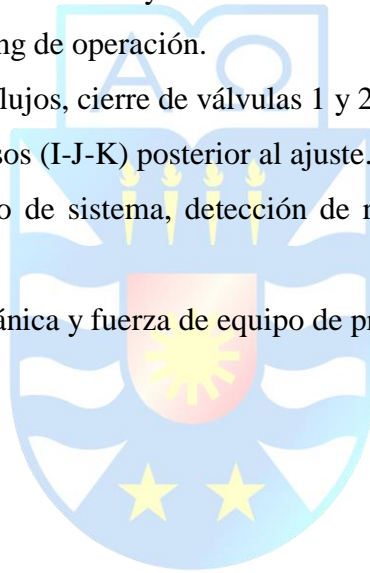
1. Estabilización y nivelación de carro de arrastre (soporte del sistema)
 - A. Aseguramiento de soportes laterales de carro de arrastre.
 - B. Asegurar bloqueo de ruedas del carro utilizando cuñas acondicionadas para ello.
 - C. Nivelación de plataforma mediante soporte frontal y nivel manual.
2. Montaje bomba impulsora
 - A. Montaje soporte metálico de bomba (nivelación y bloqueo).
 - B. Montaje de bomba y nivelación con pernos de anclaje.
 - C. Conexión enflanchadas de línea de succión de bomba.
3. Montaje circuito hidráulico Piping
 - A. Montaje sobre cubierta de dos soportes de tubería, asegurando la verticalidad del componente.
 - B. Montaje mecánico de tuberías del sistema de contrastación, utilizando uniones americanas.
 - C. Aseguramiento de tuberías a soportes mediante abrazaderas tipo “U”.
 - D. Montaje de soportes volantes de tuberías mediante abrazaderas tipo “U”.
4. Montaje de medidor patrón de flujo Coriolis mediante toberas enflanchadas
 - A. Montaje de toberas enflanchadas en tuberías de proceso.
 - B. Montaje mecánico de medidor Coriolis asegurando verticalidad.
 - C. Instalación de empaquetaduras de teflón para evitar fugas.
5. Montaje de línea de retorno
 - A. Conexión de línea de retorno utilizando tobera de conexión.
 - B. Montaje manguera flexible de retorno a estanque.

- C. Aseguramiento de líneas de succión y retorno a estanque acumulador.
- 6. Montaje Eléctrico Fuerza
 - A. Montaje de tablero de fuerza y VDF a soporte ándate.
 - B. Conexión de línea de fuerza de bomba a tablero VDF.
 - C. Conexión de línea de fuerza VDF a tablero de fuerza General.
- 7. Montaje transmisor medidor Coriolis
 - A. Montaje mecánico de transmisor a soporte de plataforma.
 - B. Conexión eléctrica línea de fuerza transmisor.
 - C. Conexión señal core-procesor a unidad eléctrica.
 - D. Conexión de señal a Fieldlogger.
- 8. Conexión del medidor de flujo a contrastar
 - A. Conexión de toberas enflanchadas según medidor de flujo.
 - B. Montaje eléctrico y alimentación eléctrica de unidad.
 - C. Conexión de señal a Fieldlogger.

15.2 Pruebas

- 1. Prueba Hidráulica
 - A. Cerrar bomba mediante tapón de línea superior.
 - B. Cerrar válvulas 1 y 2 (manuales).
 - C. Abrir válvula de retorno 3.
 - D. Activar VDF.
 - E. Establecer frecuencia de trabajo a 25 Hz.
 - F. Visualizar flujo en línea de retorno directo.
 - G. Abrir válvulas manuales 1 y 2 de recirculación de sistema.
 - H. Cerrar válvula de retorno 3.
 - I. Visualizar flujo en línea de retorno.
 - J. (Proyección) Visualizar flujo en mirilla de sistema.
 - K. Detección de sistema y cierre de válvulas 1 y 2.
- 2. Contrastación
 - A. Inicio de verificación de flujo en sistema (válvulas 1 y 2 abiertas y VDF al 50%).
 - B. Visualización de flujo en mirilla asegurando línea llena.

- C. Tiempo de estabilización de flujo 10 min. aproximado.
- D. Visualización de flujo en electrónica patrón y equipo en prueba.
- E. Conexión de computador a sistema Fieldlogger indicando Tag del equipo, parametrización del Span, tiempo del registro, intervalo del registro, alarmas y parámetros adicionales.
- F. Carga de configuración de parámetros en Fieldlogger.
- G. Visualización de diagnóstico y tendencia de equipo patrón y prueba.
- H. Inicio de flujo de prueba.
- I. Prueba de rampa de trabajo de flujo según valor de operación de equipo de prueba.
- J. Estabilización de rampa e flujo bajo, medio y alta por 10 min. Cada uno.
- K. Variaciones de cero a 100% y viceversa en rampa acelerada para verificación de respuesta y damping de operación.
- L. Detención a cero flujos, cierre de válvulas 1 y 2, ajuste de cero del equipo.
- M. Realización de pasos (I-J-K) posterior al ajuste.
- N. Detención de flujo de sistema, detección de registros y bloqueo de energías de fuerzas.
- O. Desconexión mecánica y fuerza de equipo de prueba.



16 Informes de Calibración

Este capítulo corresponde a una recopilación de los aspectos relacionados a los informes de calibración que otorga la Norma Chilena ISO 17.025.

El paso final en la calibración de instrumentos es elaborar un certificado de los resultados según la norma chilena ISO17025 (Apartado 5.10). El certificado de calibración recoge los datos obtenidos y debe contener la siguiente información:

- Identificación del laboratorio de calibración y ubicación dónde se realiza el procedimiento.
- Información del cliente
- Identificación y descripción del equipo calibrado.
- Identificación del método de calibración, los patrones utilizados y la garantía de su trazabilidad.
- Referencia a procedimiento de calibración utilizado.
- Condiciones ambientales durante el proceso de calibración.
- Resultados de la calibración.
- Fecha de calibración.
- Nombre, cargo, firma y/o equivalente del responsable de la calibración.

Como última instancia, por parte de la entidad certificadora, se pueden realizar observaciones de los resultados. De aquí se pueden dar tres opciones de análisis, que son las siguientes:

1. El instrumento se encuentra apto para ser utilizado y se agenda una próxima calibración.
2. El instrumento puede ser utilizado con restricciones. Lo que significa que se deben hacer correcciones y/o solo se podrá utilizar una parte del rango.
3. El instrumento no se encuentra apto para ser utilizado. En este caso se propondrá una reparación y/o si es posible o ajustar el instrumento.

17 Propuestas de Mejora

En este capítulo se proponen mejoras y recomendaciones que apuntan al perfeccionamiento y eficiencia de los procesos y resultados del banco de contrastación de flujómetros.

17.1 Mirilla

Las mirillas son un componente vital en cualquier sistema de circulación de fluidos. Por medio de ellas se puede monitorear de forma analógica o en terreno si el flujo cumple con las características deseadas para el sistema o no. Para el caso del banco de contrastación de flujómetros, la mirilla cumplirá la función de dar información en dos importantes aspectos, los cuales son:

- Información si el sistema se encuentra en tubería llena o no.
- Información si el flujo contiene burbujas o no.

Por lo anterior, se propone implementar una mirilla en donde comienza la línea horizontal más alta del sistema, de modo que este punto antecede al flujómetro patrón y sucede a la línea de retorno del sistema.

17.2 Boroscopio

El equipo denominado boroscopio se dedica a inspeccionar visualmente áreas en las cuales no se dispone de un espacio físico por el que se pueda observar fácilmente. La visualización específica de estos espacios físicos lo logra el instrumento gracias a su reducido tamaño que le permite acceder por medio de huecos pequeños a áreas complejas de observar.

Los boroscopios se dividen en dos clases:

- Rígidos: Utilizan sistema óptico de lentes para transmitir una imagen desde el área de inspección hasta el ojo del usuario y un haz de fibras no coherente para iluminar el objeto. El extremo del boroscopio puede tener espejos angulares de forma que la visión sea angular a 0° , 45° , 90° o superior a 90° . Algunos boroscopios tienen el juego de lentes intercambiable.

El tamaño del vástago debe tener un diámetro acorde con la zona a inspeccionar (de 5 a 10 milímetros).

- Flexibles: Tienen un conducto flexible por el que se dispone la fibra óptica. En el extremo del conducto se dispone de: lente para inspección (se puede colocar a diferentes grados), un mecanismo para desplazar la lente en diferentes ejes pudiendo ser capaz de volver la punta hacia

atrás, iluminación suministrada por un haz de fibras ópticas conectadas a una fuente de luz, y una mini cámara de vídeo en sustitución de la lente de forma que puedan tomarse fotos o películas de la zona a inspeccionar.

Para el banco contrastador de flujómetros se recomienda tener un boroscopio flexible que cumpla la función de inspeccionar los flujómetros que lleguen a ser contrastados, para de esta forma ver en detalle los equipos y asegurar que no existen fallas mecánicas, por corrosión o algún otro motivo desconocido, que afecten a la medición.

17.3 Medidor de temperatura y humedad ambiental

La norma que rige al laboratorio de contrastación exige que exista la medición de temperatura y humedad ambiental en los casos que se requiera. Es por esto que se propone integrar en los registros la medición de las variables ya mencionadas, por medio de un transmisor RHT-WM-485-LCD, el que puede ser montado en pared.

Este dispositivo incorpora sensores de alta precisión y estabilidad para medir la humedad relativa y la temperatura. Por ser equipos microprocesados, permiten total configuración a través de una interfaz RS485, utilizando comando Modbus RTU. El software DigiConfig permite la configuración de todos los recursos del transmisor, así como, su diagnóstico.

17.4 Transmisores de presión en instrumento a calibrar

Se propone integrar dos transmisores de presión al sistema. Estos deberán ser instalados antes y después del flujómetro a contrastar, para que de esta forma se obtenga el valor exacto de la caída de presión del instrumento que se desea contrastar.

Se proyectan transmisores Novus RHT-WM-485-LCD dado a su rango de medición, el cual comprende con holgura los valores admitidos por el sistema. Además, el dispositivo es capaz de entregar la información al DataLogger por lo que habrá registro de la medición en el software, la cual podrá ser entregada al cliente como dato anexo.

17.5 Válvula de corte

Se plantea implementar una válvula de corte en la última tubería de fierro de la línea para que no caiga líquido cuando se saca el tubo que une que une al sistema con la manguera de descarga. Para esto se propone una válvula de 3", del tipo guillotina, ya que la empresa ELECTROMATICA LTDA posee de este tipo.

17.6 Toma de agua por parte inferior del estanque con válvula de corte.

Se propone realizar cambio en la toma de agua de la bomba. Por lo que se plantea que esta sea desde la parte inferior del estanque, ya que esto soluciona el tener que cebar la bomba y haría que el cebado fuera de forma natural por gravedad. Para esto, además se debería disponer de una válvula de guillotina que abra y cierre el paso del agua que proviene del estanque para el armado y desarmado del banco contrastador.

17.7 Tablero de Fuerza

Con el objetivo de crear un sistema de adquisición de datos y control, es que se propone un tablero de fuerza en el que se incluye un variador de frecuencia, el cual ejecutará la acción de control sobre la bomba, sin embargo, cabe recordar que, de acuerdo a las características del sistema y a la gran variedad de flujómetros que se pueden contrastar, es que el control será netamente manual.

El tablero de fuerza propuesto contempla una alimentación trifásica de 380 Vac, con lo cual se lograría alimentar el variador de frecuencia ABB ACS550, además de entregar como salida tres líneas de alimentación monofásica, de las cuales una debería alimentar el tablero de adquisición de datos. El tablero contempla fusibles de seguridad tanto para las luces piloto de las fases de alimentación, como de las luces de información del variador de frecuencia. También de acuerdo al catálogo y especificaciones técnicas del fabricante del variador de frecuencia, es que se dispone de fusibles para la alimentación de dicho variador, con el fin de resguardar la integridad tanto el propio variador de frecuencia como del motor de la bomba.

Dentro del diseño, se contempla la seguridad e integridad del operador del banco de contrastación, por lo que el tablero está diseñado para que durante el funcionamiento del banco el operador no tenga una interacción directa con los equipos que tienen una alta tensión de alimentación. Esto se logra ubicando el panel del variador de frecuencia en la puerta del variador, además de una parada de emergencia para detener la bomba frente a cualquier tipo de eventualidad. Cabe destacar que es muy riesgoso para el operario trabajar con el tablero expuesto, ya que la sustancia de trabajo en nuestro caso es agua, por lo que si hubiera una fuga de agua que entrara en contacto con el tablero pondría en riesgo la vida del operador del banco contrastador.

Como el laboratorio de contrastación es móvil, con el fin de facilitar el trabajo y conexionado en planta de los equipos, es que la conexión hacia cualquier periférico (como es el caso de la bomba)

es mediante conectores, los cuales garantizan la correcta alimentación de los equipos y facilita tanto el montaje como desmontaje de los equipos.

17.8 Tablero de Control y Registro de Datos

Así como se propone un sistema de control manual, también se hace con la adquisición y registro de datos. Si bien el control se haría directamente con el variador de frecuencia, se decide separar los equipos de control y adquisición de datos, principalmente por el ruido electromagnético y la contaminación armónica que produce el variador de frecuencia y que podría afectar el DataLogger, equipo encargado de adquirir y registrar los datos entregados tanto por el equipo patrón como por el contrastado.

El tablero propuesto, consta principalmente del equipo de adquisición de datos, una fuente de voltaje de 24 Vdc y espacio disponible para en un futuro instalar un PLC y una pantalla HMI.

Al igual que con el tablero de fuerza, el tablero dispone de conectores en su periferia con el fin de evitar lo más posible su contacto directo con el exterior, por lo que idealmente debería estar siempre con su puerta cerrada. Por lo anterior, es que se dispone en el exterior del tablero de conectores de 24 Vdc, los cuales se encuentran disponibles para alimentar algún sensor en planta que lo requiera, dos conectores hembra de 220 Vac para alimentar los transmisores de flujo tanto del equipo patrón como del equipo a contrastar, además están a disposición los ocho canales del DataLogger mediante conectores industriales tipo banana, por lo que no es necesario abrir el tablero y conectar los cables con las señales de 4-20mA o de 0 a 10 Volt al equipo de adquisición de datos. Para una mayor comodidad y flexibilidad del operador, es que en el exterior del tablero se encuentra un puerto USB, el que permitiría la comunicación serial entre el computador y el DataLogger, además de tres enchufes tipo europeo para alimentar el computador en el cual se está descargando la información.

18 Conclusiones

Este trabajo contribuye al conocimiento teórico de las distintas áreas que afectan al laboratorio contrastador de caudalímetros de la empresa ELECTROMÁTICA LTDA.

De la investigación desarrollada, se concluye:

- Existe una gran variedad de métodos de medición de flujo, lo que se traduce en un sin fin de instrumentos de medición, sin embargo, de lo estudiado se destacó el medidor de flujo por efecto Coriolis, dado a su gran precisión y exactitud en las mediciones, lo cual lo lleva a ser un instrumento altamente utilizado como patrón de calibración.
- Las normativas relacionadas con la certificación de bancos contrastadores son específicas, claras y concisas en lo que respecta al levantamiento de los equipos patrones e instrumentos a contrastar, procedimientos de calibración, y certificados de trazabilidad, etc.
- Se logró estudiar la ingeniería básica y de detalle del banco contrastador de flujómetros, en donde se crearon y diseñaron documentos y planos, se plasmaron los principios de funcionamiento, especificaciones técnicas y cálculos asociados a la hidráulica y dinámica del sistema.
- Se diseñó un sistema de adquisición y control, el que contempla estándares de seguridad que garantizan su correcto funcionamiento en planta y a la vez brinda seguridad al operario por su fácil y seguro método de conexión.
- En colaboración con ingenieros de la empresa ELECTROMÁTICA LTDA se confeccionó un algoritmo de procedimientos, el cual incluye protocolos a seguir para el montaje de los equipos y pruebas pertinentes que se deben realizar con los equipos previo a la contrastación.

19 Bibliografía

- [1] Creus, “*Instrumentación Industrial*”, Editorial: Alfaomega, Año 2010.
- [2] Cengel, “*Termodinámica*”, Editorial: Mc Graw Hill, Año 2012.
- [3] JCGM, “*International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms*”, INACAL, Año 2012.
- [4] Lipták, “*Instrument Engineer’s Handbook - Process Measurement and Analysis*”, Editorial: CRC Press LLC, Año 2003.
- [5] American National Standard Institute, “*ANSI/ISA–5.1–1984 Instrumentation Symbols and Identification*”, Año 1992.
- [6] Mott, “*Mecánica de Fluidos*”, Editorial: Pearson, Año 2006.
- [7] Laroze, “*Conceptos y Magnitudes en Física*”, Editorial: Sello USM, Año 2013.
- [8] Emerson, “*Medidores de Caudal y Densidad, serie F de Micro Motion*”, Año 2016.
- [9] Emerson, “*Transmisores Micro Motion, series 1000 y 2000 con tecnología MVD*”, Año 2007.
- [10] ABB, “*Manual de usuario, convertidores de frecuencia ACS550-01*”, Año 2009.
- [11] Pedrollo, “*Electrobombas centrífugas normalizadas “EN 733”*”, Año 2012.
- [12] NOVUS, “*Transmisores de Presión – NP620*”, Año 2015.
- [13] NOVUS, “*Transmisores RHT-WM-485-LCD*” Año 2015.
- [14] NOVUS, “*FieldLogger, Manual de Instrucciones v1.6x D*”, Año 2015.