



FUNDACIÓN UNIVERSITARIA AGRARIA DE COLOMBIA
Facultad de Ingeniería mecatrónica

Procedimiento general para la adecuada selección de instrumentos de medición de flujo en la empresa TECHNIP ENERGIES

Opción de titulación
Monografía

Presenta:
JUAN SEBASTIAN PARRA PERDOMO

Dirigido por:
JOHN HENRY BAUTISTA SEGURA

Firma

Firma

Nombre y Firma
Director de la tesis

Nombre
Decano de la Facultad de Ingeniería
Mecatrónica

Bogotá D.C.

Fecha (será el mes y año de aprobación del Consejo Técnico, Académico y Curricular)

RESUMEN

Se abordaron diversos tipos de medidores de flujo, entre los que se incluyen los medidores de desplazamiento positivo, los medidores de flujo ultrasónicos y los medidores de turbina. Se profundizó en los principios de funcionamiento de cada uno de estos dispositivos, así como en sus ventajas y limitaciones específicas en términos de precisión y aplicabilidad. Además, se exploraron conceptos fundamentales como la compensación de densidad y la influencia de la viscosidad del fluido en la exactitud de la medición. Se enfatizó la importancia de considerar las características de los fluidos al seleccionar el medidor de flujo adecuado, especialmente en lo que respecta a la compatibilidad con las partes húmedas del dispositivo. Se destacó la relevancia de comprender estas características fluidas para realizar una selección adecuada del medidor de flujo, y se proporcionaron recomendaciones y pasos a seguir para garantizar una selección satisfactoria del equipo más apropiado para las necesidades específicas de la aplicación. En resumen, se ofreció una visión integral de la medición de flujo, desde los principios básicos hasta la implementación práctica en diversas industrias, con el objetivo final de facilitar una selección informada y efectiva del medidor de flujo adecuado.

Palabras clave: Medidor de flujo; especificación; instrumento y proceso.

ABSTRACT

In this document is adressed various types of flow meters were discussed, including positive displacement meters, ultrasonic flow meters, and turbine meters. The operating principles of each of these devices were explored, as well as their specific advantages and limitations in terms of accuracy and applicability. Furthermore, fundamental concepts such as density compensation and the influence of fluid viscosity on measurement accuracy were examined. The importance of considering fluid characteristics when selecting the appropriate flow meter was emphasized, especially regarding compatibility with the wetted parts of the device. The relevance of understanding these fluid characteristics for making an appropriate flow meter selection was highlighted, and recommendations and steps were provided to ensure a satisfactory selection of the most suitable equipment for specific application needs. In summary, a comprehensive overview of flow measurement was offered, from basic principles to practical implementation in various industries, with the goal of facilitating an informed and effective selection of the right flow meter.

Key words: flow meter; specification; instrument and process.

AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos a mi familia por el apoyo dado para poder llegar a este punto y poder completar mi carrera.

Tabla de Contenido

1. CAPITULO I	8
1.1 INTRODUCCIÓN	8
1.2 JUSTIFICACIÓN	11
1.3 OBJETIVOS	14
1.3.1 <i>Objetivo General</i>	14
1.3.2 <i>Objetivos específicos</i>	14
2. CAPITULO II	15
2.1 MARCO DE REFERENCIA	15
2.2 TIPOS DE FLUIDOS.....	15
2.2.1 <i>Características y conceptos sobre los fluidos</i>	16
2.2.2 <i>Certificaciones y estándares importantes</i>	20
2.2.3 <i>Tipos de medidores de flujo, funcionamiento y fundamentos</i>	22
2.2.4 <i>Especificaciones</i>	41
3. CAPITULO III	43
3.1 METODOLOGÍA.....	43
4. CAPITULO IV	44
4.1 PROCEDIMIENTO.....	44
5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	47
6. ANEXOS	49

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 <i>Tabla de instrumentos recomendados para servicios.</i>	10
Figura 2 <i>Fuerza de arrastre.</i>	18
Figura 3 <i>Perfil del fluido.</i>	20
Figura 4 <i>Medidores volumétricos 1.</i>	22
Figura 5 <i>Medidores volumétricos 2.</i>	23
Figura 6 <i>Medidores de caudal de masa.</i>	23
Figura 7 <i>Montaje tradicional para medidores de diferencial de flujo.</i>	25
Figura 8 <i>Fluido en una línea de tubería.</i>	26
Figura 9 <i>Área y conservación de masa.</i>	27
Figura 10 <i>Tubo de Pitot.</i>	29
Figura 11 <i>Instrumento de Coriolis.</i>	33
Figura 12 <i>Medidor ultrasónico.</i>	35
Figura 13 <i>Rotámetro.</i>	36
Figura 14 <i>Medidores electromagnéticos.</i>	37
Figura 15 <i>Tabla fluidos y tuberías con recubrimiento plástico.</i>	38
Figura 16 <i>Tabla fluidos y tuberías metálicas.</i>	¡Error! Marcador no definido.
Figura 17 <i>Ejemplo mecanismo de desplazamiento positivo.</i>	40
Figura 18 <i>Esquema medidor de masa térmica.</i>	41
Figura 19 <i>Información general.</i>	42

Figura 20 <i>Datos de operación.</i>	42
Figura 21 <i>Información específica del instrumento.</i>	42
Figura 22 <i>Sello y diafragma.</i>	43
Figura 23 <i>Extracción de 079254C-000-JSD-1540-001 45.</i>	43
Figura 24 <i>Recorte de estándar y especificación de voltajes.</i>	45
Figura 25 <i>Revisión.</i>	47

1. CAPITULO I

1.1 INTRODUCCIÓN

La estandarización en el proceso de diseño de las plantas industriales juega un papel fundamental en la garantía de la eficiencia, la seguridad y la comunicación efectiva entre ingenieros y profesionales involucrados en el proyecto. Este enfoque se convierte en un lenguaje común que facilita la comprensión mutua y la colaboración más efectiva en el complejo ámbito de la ingeniería industrial. Más que una formalidad, constituye una herramienta esencial que proporciona una base sólida para la toma de decisiones y la selección apropiada de instrumentos en el contexto de un proceso industrial específico.

Al seguir ciertos estándares y normativas reconocidas, se simplifica el proceso de diseño, evitando malentendidos, errores y retrasos en la ejecución de proyectos. Además, establece una base de conocimiento que puede ser compartida entre diferentes equipos de trabajo, lo que facilita la colaboración y el aprendizaje continuo en la industria. Por lo tanto, se convierte en un punto de partida y una guía que permite abordar de manera coherente y sistemática la selección de instrumentos como de equipos.

Cuando todos los ingenieros y profesionales involucrados en el proyecto siguen un conjunto de estándares, se promueve la uniformidad y la consistencia en todo el proceso de diseño.

Esta uniformidad es esencial para garantizar la compatibilidad y la armoniosa operación de los componentes seleccionados en el sistema global de la planta industrial. Por otra parte, abarca diversos aspectos, desde la selección de

materiales y componentes, hasta la disposición de equipos, los procedimientos de seguridad y las pautas de documentación.

Al seguir estas directrices, se minimizan los riesgos y los costos asociados con la implementación de soluciones no probadas. Además, el uso de instrumentos y tecnologías estandarizadas facilita la adquisición, el mantenimiento y la sustitución de componentes, lo que resulta en un ahorro significativo a lo largo del ciclo de vida de la planta.

Como se indicó, la estandarización en el diseño de plantas industriales es un elemento clave que optimiza la comunicación, la toma de decisiones y la eficiencia en el sector de la ingeniería. Actúa como un lenguaje común que hace posible un trabajo más efectivo y proporciona una base sólida para la selección adecuada de instrumentos y componentes. Al seguir estándares reconocidos, no sólo se simplifica el proceso de diseño, sino que también se contribuye a la seguridad y el rendimiento óptimo de las plantas industriales, aspectos esenciales en un entorno cada vez más competitivo y regulado. Del mismo modo también es importante aclarar y mencionar que parte del proceso de estandarización viene de la mano con la necesidad de proteger a los equipos y al personal, siendo la razón por la cual tanto los usuarios como los vendedores de equipos recurren a estandarizar, siendo esta la forma en que habrá una comunicación más adecuada frente a la temática puntual en la que se esté trabajando (Webster, 2003).

Es importante establecer que muchos fabricantes y vendedores proporcionan inicialmente tablas como la presentada en la figura 1, donde establecen una información básica para hacer una elección adecuada de instrumentos de flujo, no obstante, es necesario profundizar en la explicación del proceso de selección y brindar pasos recomendados para lograr una selección adecuada del instrumento de medición de flujo, sumado a esto, es importante mencionar que en el contexto

industrial, una constante comunicación entre el diseñador y los vendedores es fundamental para abordar preguntas y considerar desviaciones de diseño.

Figura 1

Tabla de instrumentos recomendados para servicios. (YOKOGAWA, n.d.)

LIQUIDS

	Clean Liquid	Dirty Liquid	Abrasive / Slurry	Corrosive	High Pressure	Density, Concentration	Cryogenic	High Temp	Mass Flow	Low Flow Rates <0.1m ³ /hr (0.4gpm)	Low Conductivity
Coriolis Flow Meter	■	■	○	○	■	■	■	■	■	■	■
Magnetic Flow Meter (4-wire)	■	■	■	■	○			○	○	○	
Magnetic Flow Meter (2-wire)	■	○	■	○	○			○	○		
Capacitance Magnetic Flow Meter	■	■	■	■	○			○	○		■
Vortex Flow Meter	■	○		○	■		■	■	■		
Variable Area Flow Meter	■	○		■	○		■	■	○	■	■
Differential Pressure (DP) Flow Meter	■	○	○	○	■		○	○	■	■	■

■ Designed for this service ○ Applicable for this service under certain conditions - consult manufacturer

GAS & STEAM

	Clean Gas	Dirty Gas	Corrosive	Low Pressure	Saturated Steam	Superheated Steam	Cryogenic	High Temp	Mass Flow	Low Flow Rates
Coriolis Flow Meter	■	■	○	○		■	■	■	■	■
Vortex Flow Meter	■	○	○	■	■	■	■	■	■	
Variable Area Flow Meter	■	○	○	■	■	■	■	■	○	■
Differential Pressure (DP) Flow Meter	■	○	○	■	■	■	○	○	○	■

■ Designed for this service ○ Applicable for this service under certain conditions - consult manufacturer

1.2 Justificación

La necesidad de desarrollar un procedimiento para la selección de instrumentos de medición de flujo en el sector industrial encuentra respaldo en diversos estudios que destacan la importancia de la estandarización como la selección adecuada de estos dispositivos para garantizar la eficiencia operativa, la seguridad y la integridad de los procesos industriales.

La selección adecuada del medidor de flujo se convierte en un tema de gran importancia, crucial para el diseño de procesos industriales, es esencial elegir el tipo de instrumento que mejor se adapte a las particularidades del proceso y a sus requisitos específicos. Aspectos cruciales a considerar incluyen la naturaleza del fluido, el diámetro de la tubería y las condiciones ambientales en las que se desarrolla el proceso.

Por otra parte, es necesario clasificar el tipo de medidores que existen y establecer en qué situaciones es apropiado su uso basado en las necesidades del proyecto bajo diseño. La importancia en tener una idónea selección de instrumentos de medición de flujo en sistemas de control de procesos reviste una importancia sumamente crítica debido a que estos son parte fundamental de procesos de control y seguridad dentro de la planta industrial donde se esté trabajando.

Dentro de la pasantía hay dos conceptos a los cuales es necesario dar una definición que son: instrumentación y automatización. Siendo el instrumento un dispositivo que permite convertir una variable física en una señal deseada (Webster, 2003) La automatización es un concepto que plantea y enfatiza en la eficiencia de productividad, calidad y confiabilidad, enfocada a sistemas que operan de forma autónoma en ambientes estructurados a lo largo de periodos de tiempo extensos.(Goldberg, 2012b)

Los procedimientos establecidos al interior de la industria son herramientas que buscan establecer pautas y pasos estandarizados con los que se esperan

principalmente alcanzar la uniformidad de procesos con el fin de aumentar la eficiencia operativa, en la industria es establecer estándares para facilitar el proceso de revisión y diseño. Del mismo modo también se establecen formas de nombrar estos instrumentos para facilitar la lectura de planos, informes y otros documentos relacionados, siendo para el caso la instrumentación de lazos de control. Por otra parte, es importante tener claro y establecer para qué tipo de industria objetivo se va a trabajar. Existen distintos tipos de estándares, puesto que los procesos llevados a cabo no son los mismos y las necesidades varían según la aplicación. Siendo un ejemplo la norma Instrument Society of America (ISA), donde se definen formas estándar de representar y dibujar un proceso y sus instrumentos. Otro aspecto importante es tener claro la función del instrumento y las características de la línea, el tipo de fluido que tendrá contacto con el instrumento. (IPLACEX, n.d.)

La capacidad de diseñar, seguir normas, requerimientos y lineamientos solicitados para un proyecto, la pasantía es una experiencia enriquecedora, siendo importante para el desarrollo profesional. Esto debido a que hay requerimientos de un cliente y estándares normativos dentro de la misma industria que se deben cumplir. Por otra parte, es indispensable tener manejo de herramientas básicas para el procesamiento de datos como el Excel, que es de gran uso en la industria para el desarrollo de reportes e informes, esto debido a que hay mucha información referente a los instrumentos que pueden ser tabuladas y evaluadas, también porque se usan muchos medidores en diferentes puntos del proceso. Otro software es el AutoCAD, AVEVA y similares que son de importancia en la planeación, relacionada a la instalación de los instrumentos como conexiones eléctricas, conexiones neumáticas y ubicación espacial en la planta.

Es importante en la industria establecer y diferenciar los tipos de medidores de flujo adecuados para el contexto de proceso, como tipo de flujo, tipo de tubería y etc. Un procedimiento general para la selección de instrumentos de medición de flujo se presenta como una buena alternativa de estandarización que garantiza la

eficiencia operativa, la consistencia en proyectos, cumplimiento normativo y transferencia de conocimiento técnicos.

En síntesis, el problema se enmarca en el conocimiento que se requiere para los diferentes tipos de fluido que se desea instrumentar según los requerimientos del proceso este conocimiento difícil de adquirir dentro de la formación universitaria, ya que allí se forma en conceptos y teorías, pero no se alcanza a tener claro el tema de que instrumentación está en el mercado y las tecnologías más recientes. Lo anterior lleva a que dentro de la industria se afiancen más los conocimientos y se aborde el tema de toma de decisiones ya que una equivocación implica tiempo, demoras en el proyecto haciendo más costoso el proyecto.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Desarrollar un procedimiento para la selección de instrumentos de medición de flujo, usando como referencia literatura académica y ofertas del mercado.

1.3.2 Objetivos específicos

- Identificar las características de los fluidos en los procesos donde los instrumentos serán instalados para elaborar un documento guía de selección.
- Caracterizar los tipos de medidores que son actualmente usados en la industria con sus especificaciones, funcionamiento y fundamentos físicos.
- Establecer el instructivo de selección de los instrumentos de medición de flujo teniendo en cuenta los tipos de medidores en el mercado y al uso que se le van a dar basado en la experiencia para la empresa **TECHNIP ENERGIES.**

2. CAPITULO II

2.1 Marco de referencia

En primer lugar, para (Mott, 2015) es importante establecer que tipos de fluidos hay siendo principalmente los gases y líquidos, pero existen también fluidos de tipo sólido los cuales podrían considerarse como fluidos con partículas sólidas grandes como si fueran granos. Así mismo es importante establecer las propiedades físicas de estos, las cuales son tenidas en cuenta por el proceso para seleccionar la instrumentación, así como para la selección de medidores, siendo las propiedades físicas, densidad, viscosidad, presión, temperatura y velocidad del fluido entre otras las más importantes. Sumado a esto es importante establecer el tipo de unidades usadas para la medición de estas variables siendo las más usuales como la temperatura en °C, la presión que es en Bar y para el flujo m^3/h , siendo esta parte del sistema internacional de unidades.

Es importante representar y aclarar que hacer la clasificación del flujo de fluidos teniendo en cuenta lo planteado por (Cimbala & Cengel, 2001), como con regiones de flujo viscosas con respecto a las no viscosas, también como el flujo interno frente al flujo externo, del mismo modo flujo compresible al flujo incompresible, flujo laminar frente al turbulento, flujo normal comparado con el flujo forzado y el flujo estacionario frente al no estacionario. Es importante definir qué es un fluido siendo este generalmente una sustancia en fase líquida o gaseosa. El aspecto diferenciador entre un fluido y un sólido es que se tiene en cuenta la capacidad de la sustancia de oponer resistencia a un esfuerzo cortante aplicado. Siendo que el sólido opone resistencia a un esfuerzo cortante aplicado por medio de la deformación de este, siendo así el fluido se deforma de forma continua bajo la incidencia del esfuerzo cortante, sin importar la magnitud de este. Siendo finalmente que cuando se aplica un esfuerzo cortante constante, llega un punto en que un sólido a un ángulo fijo deja de deformarse, mientras que el fluido nunca deja de deformarse.

2.2 Tipos de fluidos

Líquidos:

Fluidos Newtonianos: Siguen la ley de viscosidad de Newton definida en la mecánica de fluidos de (Mott, 2015), donde la viscosidad (resistencia al flujo) es constante a una temperatura y presión dadas. El agua es un ejemplo típico de un fluido newtoniano.

Fluidos no Newtonianos: La viscosidad de estos fluidos puede cambiar en función de la velocidad de deformación o la tensión aplicada. Ejemplos incluyen la sangre, y la pasta dental. (Macosko, 1993)

Fluidos compresibles e incompresibles: Para esta clasificación (Streeter, 2000) plantea que, los líquidos son generalmente considerados incompresibles, lo que significa que su densidad no cambia significativamente bajo presiones normales. Por otro lado, algunos líquidos, como ciertos aceites hidráulicos, son compresibles, pero en menor medida que los gases.

Gases:

Gases ideales: Siguen la ley de los gases ideales explicada por (Cengel, 2009), que relaciona la presión, el volumen y la temperatura. Este modelo es una aproximación válida en condiciones específicas.

Gases reales: Se desvían del comportamiento ideal a altas presiones o bajas temperaturas. Los gases reales están sujetos a correcciones y modelos más complejos, como la ecuación de Van der Waals. Como se describe (Cengel, 2009).

Gases: Los gases se caracterizan por su capacidad para cambiar de volumen significativamente bajo cambios de presión y temperatura. Definidos por (Cengel, 2009).

2.2.1 Características y conceptos sobre los fluidos

Los fluidos, sustancias que poseen la capacidad única de adaptarse a la forma de su contenedor y fluir libremente, son elementos fundamentales en la comprensión de fenómenos físicos y aplicaciones prácticas en diversos campos. Una propiedad clave de los fluidos es la viscosidad, que representa la resistencia interna al flujo y varía según la estructura molecular del fluido. Asimismo, la densidad, que refleja la cantidad de masa contenida en un volumen determinado, es esencial para entender la capacidad de los fluidos para soportar objetos o flotar. La presión, ejercida por un fluido en una superficie, es otra propiedad crucial, determinada por la altura del fluido y su densidad.

En la clasificación de los fluidos, se distinguen principalmente los líquidos y los gases. Los líquidos, con una estructura molecular más ordenada y menor compresibilidad, mantienen un volumen constante, pero pueden fluir libremente. Por otro lado, los gases, con moléculas más dispersas y mayor compresibilidad, se expanden para llenar completamente su contenedor y se adaptan a la presión ambiental. Estas diferencias fundamentales en la compresibilidad y cohesión molecular definen las propiedades específicas de cada tipo de fluido. La importancia de los fluidos trasciende disciplinas, desempeñando un papel vital en la ingeniería. En este orden de ideas serán tratadas y explicadas más a fondo muchas de las características necesarias para poder tener un criterio claro y definido de que tipo de medidor es necesario para seleccionar el instrumento adecuado.

- Presión:

La presión es definida por (Cimbala & Cengel, 2001) como una fuerza normal ejercida por un fluido por unidad de área. La presión cuando se trata de un líquido o un gas; para el caso de los sólidos se denomina esfuerzo normal. Esto debido a que la presión es fuerza por unidad de área, tiene la unidad de newtons por metro cuadrado (N/m^2) y se denomina pascal. Debido a que la unidad de pascal es pequeña para las presiones que se encuentran y trabajan en la industria es más común encontrar el uso de múltiplos como equivalencias en otras unidades como el caso de los bares para el caso del sistema internacional, también están las atm que se denomina atmosfera estándar.

$$1bar = 10^5 P_a = 0.11MPa = 100kPa$$
$$1atm = 101.325P_a = 101.323kPa = 1.01325bar$$

Del mismo modo se pueden encontrar medidores en el estándar británico de medición utilizando como unidad la *psi*. Siendo la equivalencia de $1 atm = 14.696 psi$.

- Volumen

Según la RAE, es la magnitud física que expresa la extensión de un cuerpo en tres dimensiones: largo, ancho y alto.

- Temperatura

La temperatura en (Tippens., 2007) es definida como la medida de la energía cinética media por molécula, es propiedad fundamental que determina si estarán en equilibrio térmico con otros objetos. Una vez que se establece un medio para medir la temperatura, tenemos una condición necesaria y suficiente para el equilibrio térmico. La transferencia de energía térmica que se debe tan sólo a una diferencia de temperatura se define como calor.

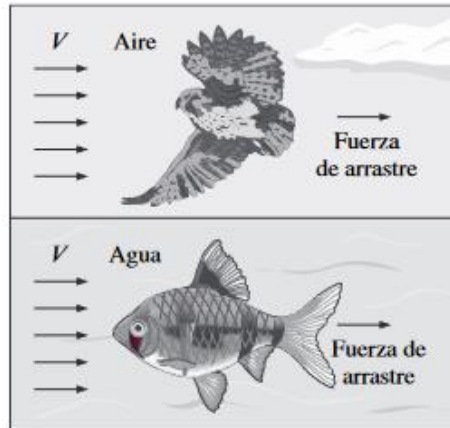
- Viscosidad

Es para (Cimbala & Cengel, 2001) cuando un fluido se mueve con respecto a un sólido o cuando dos fluidos se mueven uno con relación a otro. Es posible moverse con relativa facilidad en el aire, pero no en el agua. Moverse en aceite sería inclusive más difícil, como se puede observar por el movimiento muy lento hacia abajo de una bola de vidrio que se deja caer en un tubo lleno con aceite. Existe una propiedad que representa la resistencia interna de un fluido al movimiento o la "fluidez", y esa propiedad es la viscosidad. La fuerza que un fluido fluyente ejerce sobre un cuerpo en la dirección del flujo

se llama fuerza de arrastre, y la magnitud de ésta depende, en parte, de la viscosidad.

Figura 2

Fuerza de arrastre (Cimbala & Cengel, 2001)



- Resistencia eléctrica

Es definida por (Tippens, 2007) como la oposición a que fluya la carga eléctrica. Es fija para gran número de materiales específicos, de tamaño, forma y temperatura conocidos. Es independiente de la fem aplicada y de la corriente que pasa a través de ellos.

- Compresibilidad

La compresibilidad (Cimbala & Cengel, 2001) la definen como el volumen o la densidad de un fluido cambia respecto a una variación en su temperatura o su presión. Los fluidos suelen expandirse cuando se calientan o se despresurizan, y se contraen cuando se enfrían o les aplica presión. Pero la cantidad del cambio de volumen es diferente para fluidos diferentes.

- Flujo turbulento y laminar

La turbulencia y laminaridad de un fluido es precisada por (Cimbala & Cengel, 2001) como el movimiento intensamente ordenado de un fluido, caracterizado por capas no alteradas de éste se menciona como laminar. La palabra laminar proviene del movimiento de partículas juntas adyacentes del fluido, en "láminas". El flujo de los fluidos intensamente viscosos, como los aceites a bajas velocidades, por lo general es laminar. El movimiento intensamente desordenado de un fluido, que es común se presente a velocidades

altas y se caracteriza por fluctuaciones en la velocidad se llama turbulento. El flujo de fluidos de baja viscosidad, como el aire a velocidades altas es por lo común turbulento. El régimen de flujo influye significativamente en la potencia requerida para el bombeo. Un flujo que se alterna entre laminar y turbulento se conoce como de transición.

- Tóxico:

Este término se define por (ATSDR, n.d.) y se relaciona con los efectos venenosos o mortales causados en el cuerpo por la inhalación (respirar), la ingestión (comer) o la absorción o el contacto directo con una sustancia química.

- Corrosión:

Es un término que se utiliza para describir el proceso de deterioro de materiales metálicos (incluyendo tanto metales puros, como aleaciones de estos), mediante reacciones químicas y electroquímicas. Para el caso del deterioro relacionado con otros tipos de materiales, como los polímeros y cerámicos, se utiliza el término degradación. La mayoría de los procesos de corrosión involucran reacciones de reducción-oxidación (reacciones electroquímicas), donde para que se desarrollen estos procesos, es necesaria la existencia de tres constituyentes: (1) unos electrodos (un ánodo y un cátodo), (2) un electrolito, como medio conductor, que en la mayoría de los casos corresponde de una solución acuosa, y (3) una conexión eléctrica entre los electrodos como es descrito por (Salazar, 2015).

- Número de Reynolds

El número adimensional de Reynolds, (Re) cuantifica la relación de las fuerzas de inercia con las fuerzas viscosas:

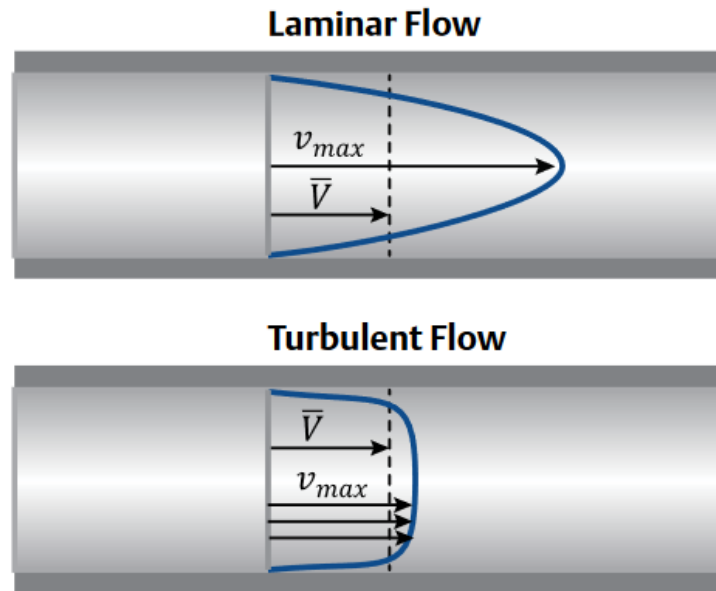
$$R_e = \frac{\text{Internal Force}}{\text{Viscous Force}} \quad (1)$$

Dado que el número de Reynolds describe las características de un flujo, es fundamental para el diseño y funcionamiento de los medidores de flujo de diferencia de presión (DP). Las características del flujo de un fluido en una tubería, según Reynolds se encuentran en tres rangos diferentes, los cuales son (Emerson, 2020):

1. Flujo laminar — $0 < Re < 2300$
2. Flujo de transición — $2300 \leq Re < 4000$
3. Flujo turbulento — $Re \geq 4000$

Estos rangos son valores aproximados, ya que la transición de laminar a turbulento depende del estado de la pared de la tubería. El punto de cambio se denomina número de Reynolds crítico, y será diferente para los distintos tipos de tuberías.

Figura 3
Perfil del flujo (Emerson, 2020)



2.2.2 Certificaciones y estándares importantes

Para las certificaciones es necesario en algunos casos por parte del procesista, o el experto en materiales, si es necesario solicitar en la hoja de datasheet que se le entrega al vendedor (vendedor) para que este tenga noción y en cuenta que es necesario cumplir con este requisito para que sus instrumentos sean tenidos en cuenta en el proceso de tabulación, selección y compras.

- SIL: Safety Integrity Level Certification descrito en (LL-C, n.d.) y está basado en los estándares EN IEC 61511, EN IEC 62061 y EN IEC 6105. Siendo así representado la garantía de calidad y seguridad por los fabricantes de los instrumentos. E una salvaguardia instrumental que se compone de instrumentos/componentes con una calidad "industrial" puede cumplir con el SIL 1. SIL 2 requiere redundancia, por ejemplo, 2 válvulas en serie, 2 sensores en una configuración 1oo2. Para SIL 3, se puede pensar en redundancia 1oo3.

El estudio de certificación SIL se centra en los siguientes componentes:

El sistema de gestión del proveedor explicado por (Consiltant, n.d.) del instrumento/componente en cuestión. ¿Cómo se garantiza que el instrumento/componente que sale de fábrica cumple las especificaciones? Puede ser necesario elaborar un "Sistema de gestión de la seguridad funcional". Es necesario que la empresa tenga conocimientos y experiencia en materia de SIL. Habrá que llevar a cabo una auditoría para garantizar que el trabajo se realiza de acuerdo con el sistema de gestión. Por último, deberá determinarse la denominada "capacidad sistemática". Con una certificación SIL 2, la capacidad sistemática tendrá que ser SC 2 o SC 3. Para una certificación SIL 1, SC 1 es suficiente. Habrá que analizar en detalle el diseño del instrumento/componente: ¿qué puede fallar y cuáles son las consecuencias para el funcionamiento? Una buena herramienta para ello es realizar un Análisis Modal de Fallos y Efectos (AMFE). Lo más valioso es saber qué "fallos peligrosos" existen. A continuación, es un reto determinar las tasas de fallos de todos los fallos peligrosos identificados y calcular la tasa de fallos del instrumento/componente. Otro enfoque consiste en analizar la retroalimentación de todos los instrumentos/componentes vendidos. ¿Cuántas horas de funcionamiento tienen y cuántos y qué errores se conocen? A partir de ahí también se puede calcular la tasa de fallos. Si los análisis se realizan correctamente, los índices de fallo (del AMFE y obtenidos a partir de la retroalimentación) coincidirán.

Los resultados obtenidos son la base del informe de certificación SIL y del Manual de seguridad.

Para el SIL se debe tener en cuenta un documento donde se haya hecho una evaluación de riesgos en ese sector específico de la planta,

- ATEX: Son las siglas de atmósferas explosivas, este estándar es explicado por (Nilfisk, 2017). Es una directiva de la Unión Europea del Comité Europeo de Normalización que cubre "los aparatos y sistemas de protección destinados a utilizarse en atmósferas potencialmente explosivas". Una atmósfera puede ser explosiva por varias razones, como gases inflamables, nieblas o vapores, o polvo combustible. Todos los equipos y sistemas de protección destinados a este tipo de uso en la UE deben cumplir los requisitos ATEX de salud y seguridad. En este sentido, la directiva es similar a una norma OSHA o NEC en Estados Unidos. Los fabricantes de equipos cuyos productos vayan a utilizarse en Europa son responsables de garantizar que sus equipos cumplen las normas ATEX. Este proceso implica procedimientos de evaluación de la conformidad y la certificación por un tercero llamado "Organismo Notificado". Los equipos certificados se marcan con el símbolo que se muestra a continuación.

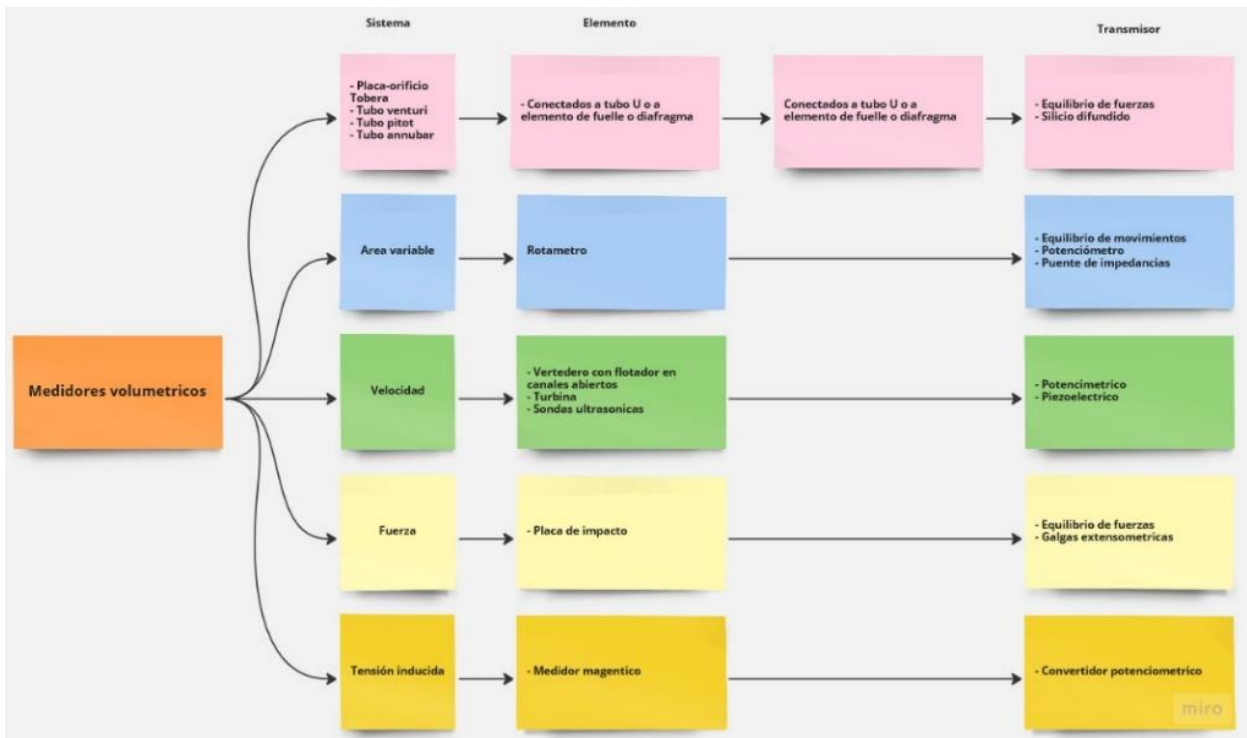
- NACE: National Association of Corrosion Engineers, estos entregan certificaciones de material para servicios que traen fluidos corrosivos en este caso PIPING y procesos definen si es necesario solicitar la certificación para el instrumento. Esto es descrito más a profundidad en el Piping Handbook de (Nayyar, n.d.).

2.2.3 Tipos de medidores de flujo, funcionamiento y fundamentos

Para presentar un panorama de lo amplio del tema, como de las implicaciones debido a la diversidad de los instrumentos de flujo se presenta a continuación en las figuras como se pueden clasificar.

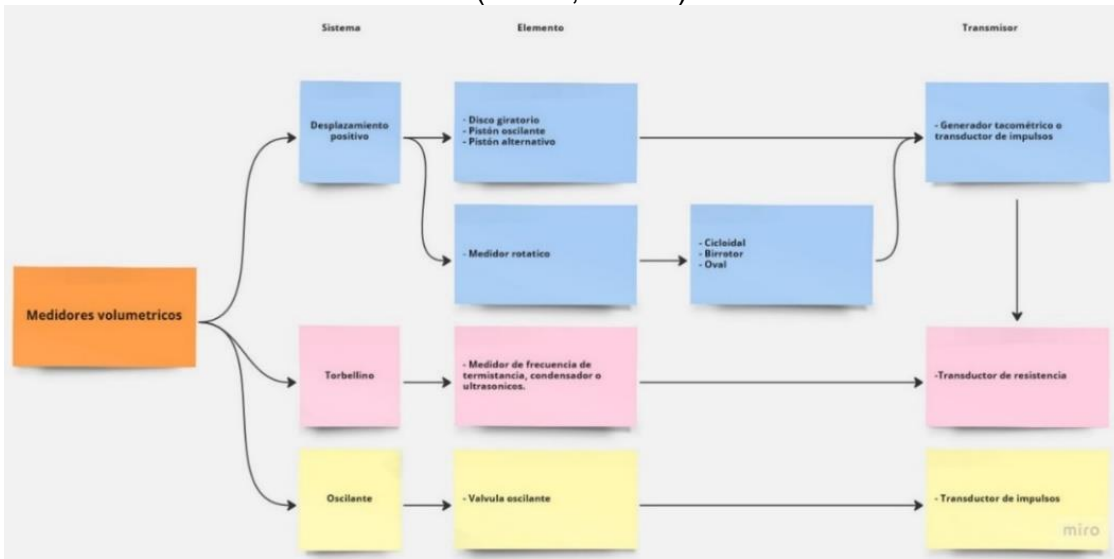
La figura 4 presenta los instrumentos para la medición de flujo volumétrico, basados en principios electromecánicos.

Figura 4
Medidores volumétricos 1 (Creus, 2010)



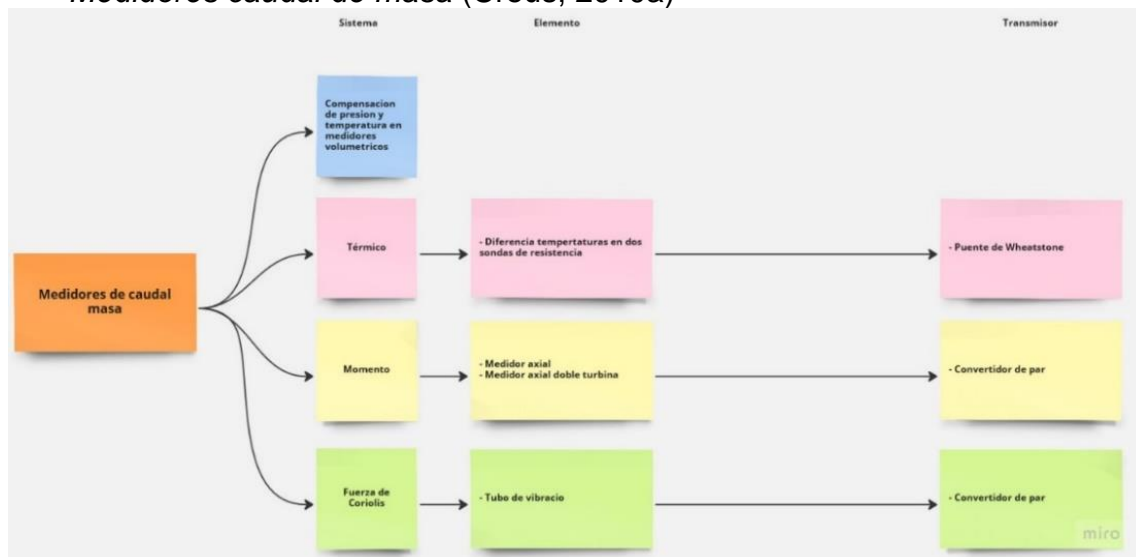
La figura 4 se presenta los medidores de flujo basados en mediciones según el comportamiento del fluido

Figura 5
Medidores volumétricos 2 (Creus, 2010a).



Dentro de la primera clasificación planteada por (Creus, 2010) de medidores volumétricos pueden encontrar dos tipos de medidores volumétricos en el primer caso son aquellos que determinan el caudal en volumen del fluido, siendo el otro tipo de medidores los medidores de masa que determinan el caudal másico. Los medidores volumétricos son implementados para la medida general de caudales. En la figura 6 se presentan la medición volumétrica basada en compensación de presión, por cambios de temperatura, momento del fluido y fuerzas de Coriolis que son de gran exactitud

Figura 6
Medidores caudal de masa (Creus, 2010a)



Por otra parte, estos medidores de caudal másico presentados en la figura 6 son usados en aplicaciones en las que la exactitud de la medida es imprescindible.

2.2.3.1 Diferenciales de presión

La medición de caudal por presión diferencial (DP) es una de las tecnologías más comunes para medir el caudal en una tubería cerrada. Los caudalímetros DP determinan el caudal a partir de la presión diferencial entre el lado aguas arriba (alto) y aguas abajo (baja) del elemento primario del caudalímetro DP elemento primario. Según (Emerson, 2020) los instrumentos de flujo constan de dos partes, el elemento primario y secundario.

En el medidor hay ciertos componentes importantes para tener en cuenta al momento de elegir, siendo compuesto por dos partes siendo el primero el FE (FLOW ELEMENT) elemento que permite la medición del fluido y el FT (FLOW TRANSMITTER) que son los transmisores que son acoplados a estos elementos de medición de flujo.

Existen varios tipos de elementos primarios de DP lo cuales serán explicados usando como soporte lo planteado en el documento (Emerson, 2020):

Los tipos de elementos primarios de medición de flujo incluyen placas de orificio, tubos de Pitot promedio, tubos Venturi, medidores de cuña, medidores de cono y boquillas de flujo. Cada uno de estos elementos opera bajo el principio de que crear un cambio en la presión es proporcional a la tasa de flujo. La ventaja de tener una variedad de tipos para elegir es que hay un elemento primario adecuado para casi todas las aplicaciones. Sin embargo, seleccionar el elemento primario correcto requiere comprender las características de la aplicación.

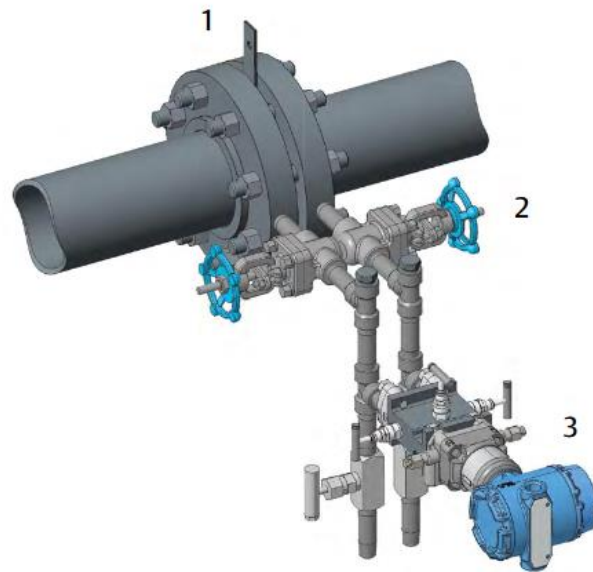
El elemento secundario, por su parte, lee la presión diferencial generada por el elemento primario de medición de flujo DP. Mientras que existen indicadores de medidores de DP simples que leen mecánicamente la señal en una escala, el transmisor de DP es el más común y preferido en la industria para la medición de flujo. Los transmisores de DP convierten la señal de presión mecánica en una señal analógica o digital, que luego se transmite al sistema de control o panel. Estos transmisores están diseñados y fabricados para proporcionar mediciones precisas en una amplia gama de condiciones operativas.

Para aquellos casos donde se desea una salida proporcional al flujo, el transmisor puede calcular la raíz cuadrada de la presión diferencial medida. Sin embargo, si este cálculo no se realiza en el transmisor, puede hacerse en otro lugar, como en el sistema de control. Es importante evitar calcular la raíz cuadrada en ambos lugares para evitar errores significativos. Un tipo especial de transmisor de DP es el transmisor multivariable, que es capaz de medir variables adicionales del proceso, como la presión estática y la temperatura. Estas mediciones son especialmente útiles cuando se utiliza el transmisor para medir el flujo de masa, ya

que ayudan a compensar los cambios en la densidad, las condiciones del fluido y otros parámetros de flujo.

La instalación clásica de un medidor de flujo de DP requiere al menos tres componentes distintos. En la Figura 7 se ilustra un sistema típico de placa de orificio que incluye el elemento primario, la tubería de impulso y el transmisor de DP.

Figura 7
Placa de Orificio (Elemento Primario)



- 1- Hardware de Conexión (Líneas de Impulso, Tubos, Accesorios, Válvulas, etc.)
- 2- Transmisor de DP (Elemento Secundario)

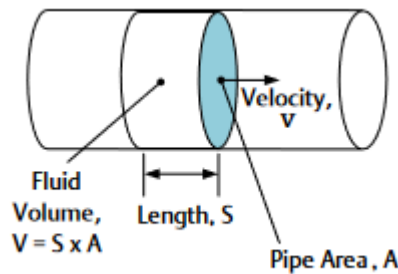
El enfoque de instalación tradicional implica una ingeniería minuciosa de cada componente para satisfacer los requisitos específicos de la instalación. Las piezas se adquieren por separado y se ensamblan en el lugar correspondiente. Cuando se lleva a cabo el diseño e instalación de manera adecuada, esta disposición proporciona un rendimiento satisfactorio y puede cumplir con los estándares de transferencia de custodia. A lo largo del tiempo, han surgido diversas prácticas y estándares aceptados en la medición de flujo de DP debido a su prolongada historia.

Sin embargo, algunas de estas prácticas han resultado en métodos de ingeniería desactualizados o incorrectos, lo que conlleva tecnología subóptima y desafíos inherentes. Estos problemas pueden incluir la presencia de múltiples puntos potenciales de fuga en las conexiones, el uso de válvulas y manifolds separados, así como posibles problemas de precisión debido a la longitud de las

líneas de impulso. Además, la instalación puede ser laboriosa debido a la gran cantidad de componentes involucrados, y se requiere una configuración minuciosa para asegurar un funcionamiento adecuado.

En esencia, la tasa de flujo volumétrico se define como la cantidad de fluido que atraviesa una sección transversal específica de un tubo en un intervalo de tiempo determinado. Es importante señalar que la descripción matemática y física se basará en el documento proporcionado por el fabricante Emerson sobre los instrumentos de flujo que operan mediante la medición de la diferencia de presión. Ver figura 7

Figura 8.
Fluido en una línea de tubería (Emerson, 2020)



Gracias a que muchas ecuaciones de operación de medidores de flujo utilizan la velocidad del fluido para determinar la tasa de flujo, es importante revisar las relaciones entre estos parámetros, siendo estos:

$$Q_v = \frac{V}{t} \quad (2)$$

Donde:

Q_v razón de flujo volumétrico

V unidad de volumen

t tiempo

El volumen del fluido que se está considerando es el área transversal del tubo multiplicada por la longitud de la sección del fluido que pasó sobre el punto durante el período de tiempo específico, siendo la siguiente la representación matemática:

$$V = A \times s \quad (3)$$

Donde:

V unidad de volumen

A área

S longitud

Como la velocidad, v , es la distancia recorrida dividida por el tiempo, la velocidad a la que una sección transversal del fluido viaja durante una unidad específica de tiempo se calcula:

$$v = \frac{S}{t} \quad (4)$$

Esto produce la ecuación más simple para la tasa de flujo, que es:

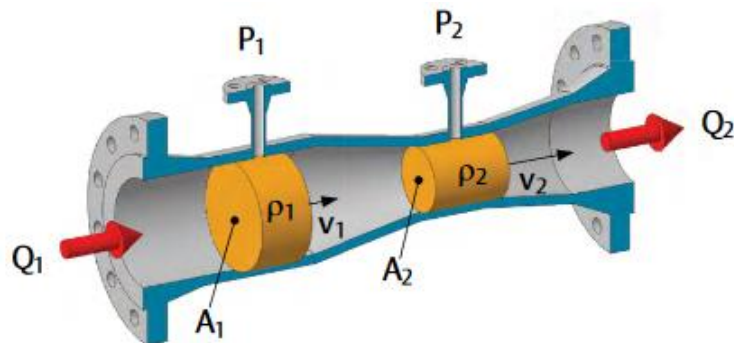
$$Q_v = A \times v \quad (5)$$

De este modo, la tasa de flujo volumétrico es igual a la velocidad del fluido multiplicada por el área transversal del tubo. Para la tasa de flujo de masa, el flujo volumétrico se convierte en flujo de masa multiplicándolo por la densidad del fluido:

$$Q_m = Q_v \times \rho = A \times v \times \rho \quad (6)$$

Para el caso del medidor de flujo DP (diferencial de presión) mide la velocidad del fluido. El área utilizada para calcular la tasa de flujo en un medidor de DP es el área de la constricción mostrada en la siguiente figura como el área transversal etiquetada como A_2 . Ver figura 8.

Figura 9
Área y conservación de masa. (Emerson, 2020)



Un elemento primario que utiliza una constricción en el tubo para producir una diferencia de presión se llama medidor de flujo de área. La figura 9 muestra un medidor de flujo de área con tomas de presión en las secciones de entrada y garganta. Usando la ecuación de energía de Bernoulli:

$$\frac{P_1}{\rho_1} + \frac{v_1^2}{2g_c} = \frac{P_2}{\rho_2} + \frac{v_2^2}{2g_c} \quad (7)$$

Este principio afirma que la energía total en la entrada del medidor 1 debe ser igual a la energía total en la garganta del medidor 2. Además, se requiere otro principio de la mecánica de fluidos conocido como la ecuación de continuidad. Esta ecuación sostiene que la cantidad de fluido que ingresa a un tubo debe ser igual a la que sale, manteniendo la tasa de flujo constante en todas las secciones del tubo. En otras palabras, esto implica que el flujo de masa se conserva:

$$Q_{m1} = Q_{m2} \quad (8)$$

Teniendo en cuenta la diferencia de áreas en el medidor diferencial de presión y utilizando la ecuación de continuidad, se puede encontrar la siguiente relación:

$$A_1 \times v_1 \times \rho_1 = A_2 \times v_2 \times \rho_2 \quad (9)$$

La disminución en el área causa un aumento correspondiente en la velocidad. Esta ecuación se utiliza para completar la ecuación del medidor de flujo de DP de área, que combina la ecuación de Bernoulli y la ecuación de continuidad para resolver la tasa de flujo.

2.2.3.2 Tubos de Pitot

Una manera directa de determinar la velocidad del fluido es utilizando un tubo de Pitot. Este dispositivo mide la presión generada por el fluido al detenerse en un punto fijo dentro de la corriente, similar a la experiencia de colocar la mano plana fuera de la ventana del automóvil mientras se viaja por la carretera. Esta presión, conocida como presión de estancamiento, guarda una relación con la velocidad del fluido. Documento de soporte para este desarrollo la guía de DF de (Emerson, 2020):

$$P_o = \frac{\rho v^2}{2g_c} \quad (10)$$

Donde:

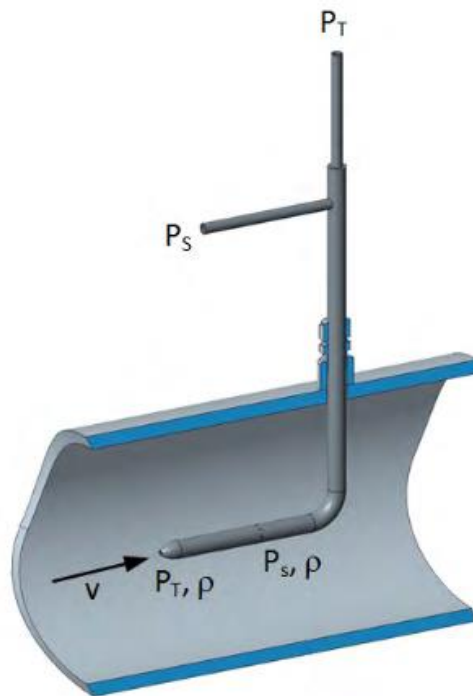
P_o La presión de estancamiento, que es la presión diferencial a través del tubo de Pitot.

P_T Presión total.

P_s Presión estática.

Se presenta un tubo de Pitot estándar de estilo de investigación instalado en una tubería. La velocidad del fluido frente a la punta del Pitot, denotada como V , se calcula midiendo la presión diferencial y conociendo la densidad del fluido. Dado que la velocidad no es visible directamente, se utiliza la medición de la presión diferencial, que sí es observable, para determinarla. La presión total se detecta en la punta del Pitot, mientras que la presión estática proviene de orificios perforados en la superficie del cilindro del Pitot, dispuestos perpendicularmente al flujo. Este método fue uno de los primeros utilizados para calcular la velocidad del fluido en un conducto cerrado. Sin embargo, el tubo de Pitot no resulta un medidor de flujo industrial adecuado, ya que sólo proporciona información sobre un punto específico a menos que se mueva a lo largo del diámetro de la tubería para muestrear la velocidad. Además, su resistencia estructural no es suficiente para aplicaciones con líquidos en tuberías de mayor tamaño, ver figura 9.

Figura 10
Tubo de Pitot. (Emerson, 2020)



2.2.3.3 Vortex

Los medidores de flujo tipo vórtice emplean un cuerpo o cilindro sólido montado en una sección de tubería, lo cual genera vórtices alternantes detrás del cilindro como se explica en (Emerson, 2020). La frecuencia de estos vórtices está directamente relacionada con la velocidad del fluido. Estos medidores carecen de piezas móviles que necesiten mantenimiento o reparación, y la señal se lee electrónicamente y se convierte de manera sencilla en una tasa de flujo. Además, estos medidores son eficaces con la mayoría de los fluidos limpios y tienen rangos de aplicación similares a los medidores de flujo de diferencial de presión (DP).

Los medidores de flujo de vórtice son dispositivos que detectan la frecuencia de los vórtices creados por un cuerpo insertado en un flujo. Esta frecuencia indica la velocidad del flujo y se usa para medir tanto líquidos como gases. Son útiles en condiciones turbulentas y pueden manejar materiales mixtos o líquidos con sólidos en suspensión. Aunque tienen bajos costos iniciales y necesitan poco mantenimiento, pueden causar una caída de presión en el flujo. Funcionan colocando un obstáculo en el flujo, lo que genera vórtices debido a cambios en la presión y la velocidad alrededor del obstáculo como se plantea en (GlobalSpec, n.d.). La frecuencia de este proceso alterno está en relación directa con la velocidad del flujo que pasa por el punto de contacto. La sucesión o patrón originado por los remolinos de vórtice se denomina "calle de vórtices de von Karman". La tasa de flujo volumétrico (suponiendo un flujo constante aguas arriba):

$$Q = \frac{f_v \pi D^3}{4S} \left(\frac{w}{D} \right) \left(1 - \frac{4}{\pi} k \frac{w}{D} \right) \quad (11)$$

Donde:

f_v La frecuencia de desprendimiento de vórtices es la tasa a la que se generan los vórtices en el flujo.

D El diámetro del tubo es la medida del diámetro de la tubería a través de la cual fluye el fluido.

w La relación entre la anchura del cuerpo contundente y el diámetro de la tubería es un factor que afecta la generación de vórtices.

K El factor k es una constante introducida para compensar el perfil no uniforme del flujo en la tubería.

S El número de Strouhal es un valor determinado experimentalmente que describe la relación entre la frecuencia de los vórtices y la velocidad del flujo.

2.2.3.4 Coriolis

El medidor de flujo Coriolis se basa en los principios de la mecánica del movimiento como se explica en el documento de DP de (Emerson, 2020). La fuerza de Coriolis se produce cuando una masa se desplaza en un marco inercial rotativo. Para crear esta rotación, se hacen vibrar dos tubos opuestos dentro del medidor de flujo. Cuando un fluido atraviesa estos tubos vibrantes, estos se torsionan debido a la fuerza de Coriolis. Esta torsión, que se alterna con la vibración, genera dos formas de onda sinusoidales desfasadas en las bobinas montadas en los tubos. La magnitud del desfase está directamente relacionada con la tasa de flujo de masa del fluido. Además, la frecuencia de vibración de los tubos es proporcional a la densidad del fluido. La capacidad de medir con precisión tanto el desplazamiento de la señal como la frecuencia de vibración hace que el medidor de flujo Coriolis sea uno de los tipos más precisos de medidores de flujo disponibles.

La generación de la fuerza de Coriolis puede ocurrir de dos maneras principales siendo esta explicación tomada de (Creus, 2010):

Mediante la inversión de las velocidades lineales del fluido mediante la desviación de un bucle en forma de omega (Ω) en un estado de vibración controlada. Esta vibración del tubo es perpendicular al sentido de desplazamiento del fluido y tiene una amplitud de aproximadamente 2 mm, con una frecuencia de alrededor de 80 ciclos por minuto, cercana a la frecuencia natural del tubo.

Durante la mitad de un ciclo, cuando el tubo se mueve hacia arriba, el líquido entrante es obligado a subir, lo que, debido a su inercia, ejerce una fuerza hacia abajo sobre el tubo (fuerza de Coriolis) por cada unidad de masa, dependiendo del radio de giro. A medida que el fluido avanza hacia el tubo de salida, su velocidad vertical disminuye gradualmente debido a la reducción del radio de giro dentro de la tubería, lo que crea una fuerza hacia arriba debido a su inercia. De esta manera, se genera un par de fuerzas cuyo sentido varía según la vibración y el ángulo de torsión del tubo, y es directamente proporcional a la masa instantánea del fluido que circula.

$$\bar{F} = 2m\bar{\omega} \times \bar{V} \quad (12)$$

Siendo:

\bar{F} Fuerza de Coriolis

m masa del fluido contenida en el tubo

$\bar{\omega}$ velocidad angular alrededor del eje

\bar{V} velocidad del fluido

El par creado respecto al eje R-R del tubo es:

$$M = 2 \times F \times r = 4 \times w \times r \times V = 4 \times w \times r \times Q \quad (13)$$

La fuerza de torsión del tubo, que equivale al par creado respecto al eje del tubo, se puede expresar utilizando la ley de Hooke para sistemas torsionales. Según esta ley, la fuerza de torsión (τ) es directamente proporcional al ángulo de torsión (ϕ) y a la constante de elasticidad del tubo (K_s). Por lo tanto, la relación entre la fuerza de torsión y el ángulo de torsión se puede expresar como:

$$T = K_s \times \theta \quad (14)$$

Donde:

τ es la fuerza de torsión del tubo.

K_s es la constante de elasticidad del tubo.

ϕ es el ángulo de torsión del tubo.

Esta ecuación muestra que la fuerza de torsión es directamente proporcional al ángulo de torsión y a la constante de elasticidad del tubo. La constante de elasticidad del tubo (K_s) se puede determinar a partir del ángulo de torsión (ϕ) medido por dos sensores ubicados arriba y abajo en la línea del eje del tubo. La relación entre K_s y ϕ depende de la configuración específica del medidor de Coriolis y puede ser establecida mediante análisis y calibraciones específicas del dispositivo. La expresión para la constante de elasticidad del tubo (K_s) puede estar relacionada con la relación entre el ángulo de torsión y la fuerza de torsión aplicada al tubo, y puede ser determinada experimentalmente o mediante modelos teóricos específicos del medidor de Coriolis utilizado. Sin embargo, la expresión exacta para K_s dependerá de las características específicas del medidor de Coriolis, como su diseño, materiales utilizados y método de medición de torsión, entre otros factores.

$$K_s = S_k(20^0C) \times (1 + S_{k_t} \times (t - 200C)) \quad (15)$$

Siendo:

S_{k_t} Coeficiente de corrección de temperatura

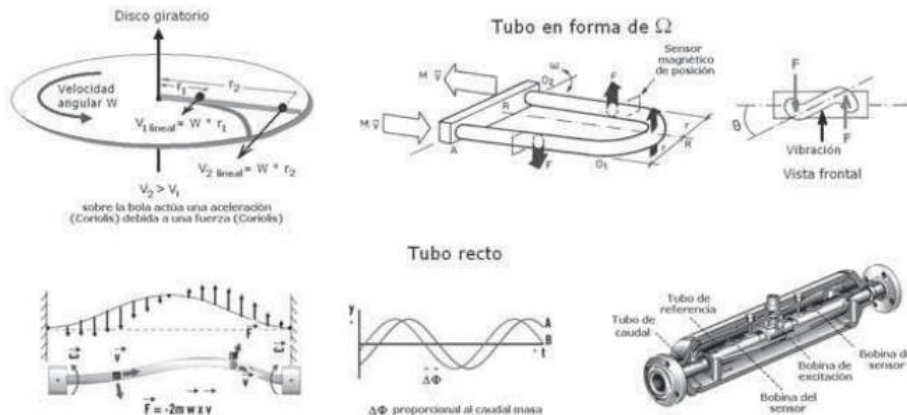
S_k Constante del sensor

t Temperatuda

Los sensores magnéticos de posición se encuentran ubicados en el centro del tubo y operan combinando dos intervalos de tiempo: uno correspondiente al movimiento descendente del tubo y otro al movimiento ascendente. Esta diferencia en los intervalos de tiempo se convierte en impulsos que son utilizados para

alimentar un integrador lineal. Cuando hay un flujo de fluido, el integrador carga un circuito electrónico, ya sea analógico o digital, ver figura 10.

Figura 11
Instrumento de Coriolis.(Creus, 2010b)



La diferencia en tiempo (t) entre las señales de los sensores de posición está relacionada con el ángulo de torsión (ϕ) y la velocidad (V_i) del tubo en su punto medio, de acuerdo con la siguiente relación:

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{V_t}{2r} \times \Delta t \quad (16)$$

y como ϕ es pequeño resulta:

$$\theta = \frac{L\omega}{2r} \times \Delta t \quad (17)$$

y combinando las expresiones de Q y ϕ resulta:

$$Q = \frac{K_s \times L}{8r^2} \Delta L \quad (18)$$

Esto significa que el caudal está relacionado únicamente con la diferencia en tiempo entre las señales de los sensores y las características estructurales del tubo, como su constante de elasticidad. La frecuencia de vibración del tubo no tiene un impacto directo en la medición del caudal.

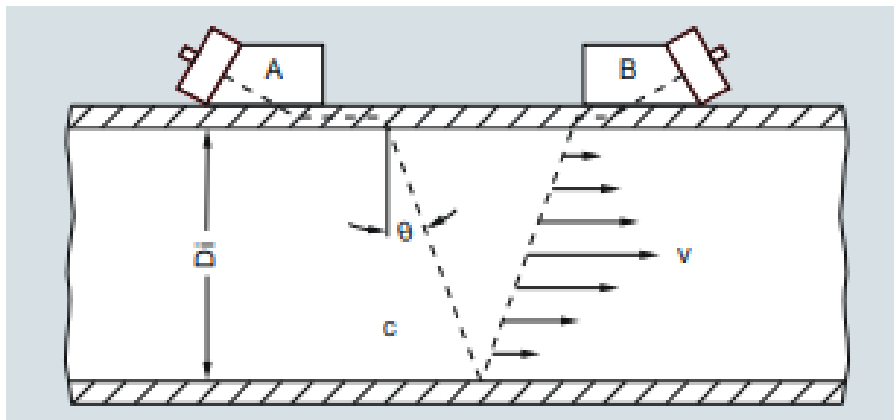
2.2.3.5 Ultrasónico

Los medidores de flujo ultrasónicos determinan la tasa de flujo midiendo la velocidad del sonido a través del fluido con transductores en la pared de la tubería. Hay dos tipos como son planteados en (Emerson, 2020): Doppler y Tiempo de Vuelo. El primero requiere partículas en el fluido para reflejar las ondas de sonido,

mientras que el segundo necesita un fluido limpio y utiliza transductores opuestos para medir el tiempo de recorrido del sonido. Algunos modelos tienen múltiples transductores para mayor precisión.

Los sensores ultrasónicos los cuales son explicados en (Siemens, 2021) , transmiten y reciben señales acústicas directamente a través de la pared existente de la tubería, donde el ángulo de refracción del fluido está regido por la ley de refracción de Snell. El ángulo de refracción del haz se determina mediante la fórmula $\sin\theta=c/V\phi$, donde c es la velocidad del sonido en el fluido y $V\phi$ es la velocidad de fase, una constante en la pared de la tubería. El medidor de flujo se ajusta automáticamente para compensar cualquier cambio en la velocidad del sonido del fluido o en el ángulo del haz, según las variaciones en el tiempo de tránsito promedio entre los sensores A y B. Restando los tiempos fijos calculados (dentro de los sensores y la pared de la tubería) del tiempo de tránsito promedio medido, se puede inferir el tiempo de tránsito requerido en el fluido (TFluido). El tiempo de llegada de las ondas sonoras que viajan en la dirección del flujo (TA,B) es anterior al de las ondas que viajan en sentido contrario (TB,A). La diferencia de tiempo (Δt) se utiliza para calcular la velocidad de flujo integrada en línea (v) como $v=(V\phi/2)\cdot(\Delta t/T_{Fluido})$. Una vez obtenida la velocidad de flujo inicial, se determina el número de Reynolds del fluido (Re) para corregir adecuadamente el perfil de flujo desarrollado completamente. Esto implica la entrada de la viscosidad cinemática del fluido (ν) en las ecuaciones $Re = \frac{D_i \cdot v}{\nu_{isc}}$ y $Q = \kappa(Re) \cdot \left(\frac{\pi}{4} D_1^2\right) \cdot v$ donde D_i es el diámetro interno de la tubería, ver figura 11.

Figura 12.
Medidor ultrasónico.(Siemens, 2021)



2.2.3.6 Rotámetros

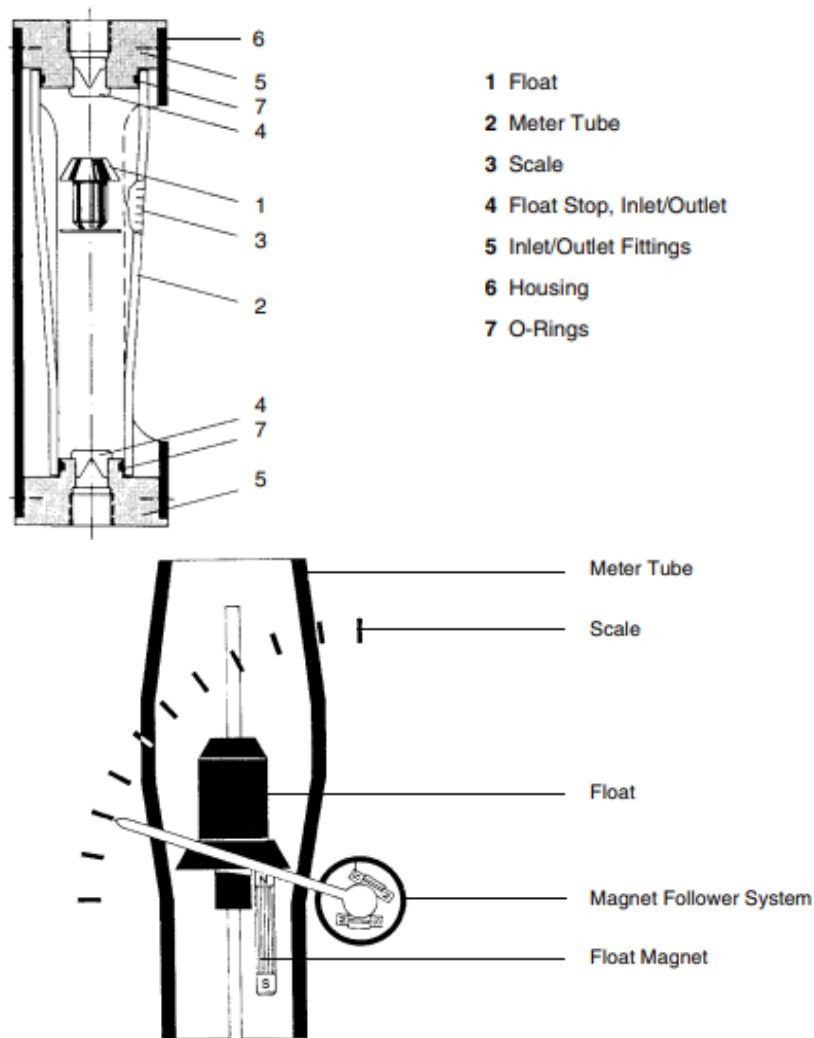
En su construcción más simple, un medidor de flujo de área variable consta de los elementos de medición Figura 13. Flotador (1), tubo de medición (2), escala de caudal (3), accesorios (5), bridas o roscados, para montaje en la tubería y anillos

en O (7) para proporcionar los sellos. El movimiento del flotador está restringido por los topes del flotador (4) y una carcasa protectora (6) rodea el tubo de medición. (ABB, n.d.-b).

La escala de caudal para los medidores de flujo con tubos de vidrio se aplica preferiblemente directamente en el tubo de medición. Los medidores de flujo de área variable generalmente tienen un rango de medición de 1:12.5, que corresponde al 8 al 100 %. Si las propiedades de resistencia mecánica, térmica o química del tubo de vidrio no son adecuadas para ciertas aplicaciones, se pueden utilizar tubos de metal. La posición del flotador, que es una medida del caudal instantáneo, se indica externamente al tubo de metal mediante un sistema de transmisión Figura 13. Se pueden incorporar convertidores para convertir los valores de caudal en una señal de salida de corriente (0/4-20 mA) para aplicaciones de control de flujo, indicación de flujo remoto o grabación.

También se pueden indicar y señalar valores de alarma como plantea el documento de instrumentos de medición de flujo (ABB, n.d.-b). Las hojas de especificaciones para los diseños individuales de medidores de flujo de área variable incluyen las tablas de rango de flujo además de las características de diseño, especificaciones, disponibilidad de materiales e información dimensional. Las tablas de rango de flujo enumeran el caudal máximo para los tamaños de tubo de medición individuales y para las combinaciones de tubo de medición - flotador disponibles.

Figura 13
Rotámetro.(ABB, n.d.-b)



2.2.3.7 Electromagnéticos

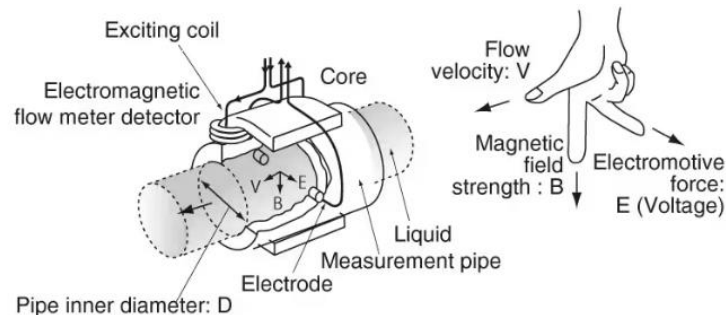
Los medidores de flujo magnéticos funcionan según la Ley de Inducción Electromagnética de Faraday. Se instalan electrodos en lados opuestos del cuerpo del medidor para medir el voltaje generado por el flujo de un líquido conductor en un campo magnético. Este voltaje es proporcional al caudal. Además, estos medidores utilizan un tramo completo de tubería revestido con diversos materiales plásticos inertes, lo que los hace ideales para su aplicación en fluidos sucios, aguas residuales o lodos (Emerson, 2020).

Siendo así es importante tener en cuenta los medidores de flujo varían en términos explicados en (Siemens, n.d.), los cuales son materiales utilizados, su

tamaño, su resistencia a la corrosión, y su rendimiento bajo diferentes niveles de presión y temperatura. La elección adecuada depende de la aplicación específica. Algunos revestimientos están especialmente formulados para aplicaciones de agua potable, como el EPDM, mientras que otros, como el PFA o la cerámica, están diseñados para su uso en industrias de alimentos y bebidas.

En estos dispositivos, una bobina electromagnética genera un campo magnético dentro del tubo de flujo, mientras que electrodos capturan el voltaje inducido por este campo magnético. Aunque el interior del tubo parece vacío, el flujo puede ser detectado gracias a este principio. Según la Ley de inducción de Faraday, los líquidos conductores en movimiento dentro del campo magnético generan una fuerza electromotriz en la que el diámetro interno del tubo, la intensidad del campo magnético y la velocidad del flujo son proporcionales. En resumen, la velocidad del flujo de líquido en movimiento en un campo magnético se convierte en electricidad, con la fuerza electromotriz (E) siendo proporcional al producto de la velocidad del flujo (V), la intensidad del campo magnético (B) y el diámetro interno del tubo (D), Ver figura 13.

Figura 14
Medidores electromagnéticos (Keyence, n.d.)



Los revestimientos de instrumentos de flujo están destinados a medidores de flujo que abarcan diversas aplicaciones, que incluyen:

- Suministro de agua potable
- Tratamiento de aguas residuales
- Líquidos abrasivos
- Sustancias químicas
- Industrias alimentarias y farmacéuticas
- Fabricación de papel y pulpa

Para este caso Siemens entrega una tabla donde para ciertos servicios que tipo de materiales son utilizados, ver figura 14 y 15.

Figura 15

Tabla fluidos y tuberías con recubrimiento plástico. (Siemens, n.d.)

	PFA	PTFE	Neoprene	EPDM	NBR	Linatex	Ebonite	Ceramic	Novolak
Drinking Water	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Wastewater	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Abrasive Liquids	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Chemicals	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Food & Beverage	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Pulp & Paper	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Figura 16

Tabla fluidos y tuberías metálicas. (Siemens, n.d.)

	Stainless Steel	Hastelloy®	Titanium	Tantalum	Platinum
Drinking Water	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Wastewater	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Abrasive Liquids	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Chemicals	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Food & Beverage	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Pulp & Paper	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Para estos casos la misma empresa solicita tener en cuenta esta información para el diseño de la especificación de los instrumentos electromagnéticos. Así mismo es aplicable para otros proveedores de tecnología como Rosemont y otros. Hay que aclarar que para más información y explicación lo más adecuado es dirigirse directamente a las guías de selección de instrumentos.

2.2.3.8 Turbina

El medidor de turbina recibe el gas a través de un dispositivo de enderezamiento de flujo diseñado específicamente para distribuir uniformemente el flujo antes de impactar en la rueda de la turbina. La contracción del flujo en la ranura anular aumenta la velocidad del gas, lo que a su vez incrementa el torque en la rueda de la turbina. Las palas del rotor están posicionadas en un ángulo de entre 30 y 45 grados. La velocidad de la rueda de la turbina es proporcional a la velocidad del gas, y el volumen total de gas que pasa por el medidor por unidad de tiempo se determina multiplicando la velocidad del gas por el área de la ranura anular. Cada revolución de la rueda de la turbina corresponde a un volumen fijo que pasa a través del medidor. La rueda de la turbina impulsa un contador que indica el volumen total de gas medido en las unidades apropiadas (m^3 o ft^3). Los sensores de proximidad, ubicados en las palas de la rueda de la turbina o en un disco especial, generan una señal de frecuencia proporcional al caudal de gas. El medidor de turbina es esencial para determinar la cantidad de gas. Esta cantidad puede expresarse en diferentes tipos de volumen o en masa. Para convertir el volumen medido a condiciones estándar o base, se utiliza comúnmente el método PTZ, que implica medir la presión y la temperatura del gas en el medidor y luego ajustar los valores al estándar mediante correlaciones que consideran la composición del gas. La compresibilidad del gas, que varía con la temperatura y la presión, también se tiene en cuenta en estos cálculos sienta este desarrollo tomado de (ABB, n.d.-a)(Instromet, 2000).

$$V_b = \frac{V_m \times P_m \times V_b \times T_b}{B_b \times Z_m \times T_m} \quad (19)$$

En esta ecuación, el subíndice "m" representa los valores medidos en las condiciones de funcionamiento, o en el caso de Z_m , la compresibilidad en esas condiciones obtenida a partir de la composición y las temperaturas y presiones operativas. Por otro lado, el subíndice "b" se emplea para los valores en condiciones base. Cuando las presiones son bajas, la relación Z_b/Z_m es casi igual a 1 y en esas circunstancias, el gas suele considerarse incompresible ($Z_b = Z_m = Z$). Se puede emplear un método alternativo que utiliza la densidad en condiciones de operación, medida por un densitómetro, y la densidad en condiciones base, que puede determinarse directamente o a partir de la composición. La ecuación en este caso sería:

$$V_b = \frac{V_m \times \rho_m}{\rho_b} \quad (20)$$

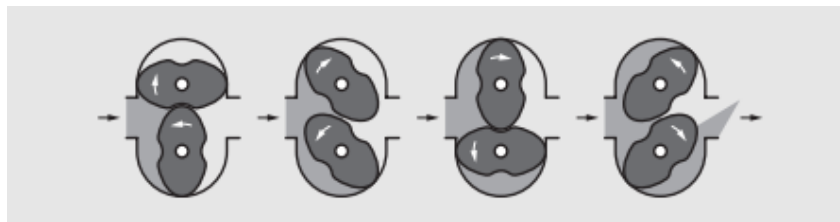
En esta ecuación, ρ_m y ρ_b son las densidades en las condiciones de presión y temperatura de operación, y en las condiciones base, respectivamente.

2.2.3.9 Desplazamiento positivo

Los medidores de desplazamiento positivo funcionan como se explica en (OMEGA, n.d.) contando volúmenes conocidos de fluido para determinar el flujo. Utilizan diferentes métodos para aislar y contar estos volúmenes, generando una frecuencia de pulsos que indica la velocidad de flujo y el número total de pulsos que indica el tamaño del lote. Están disponibles en varios tamaños y pueden operar con reducciones de hasta 100:1, siendo más precisos con fluidos viscosos. Sin embargo, requieren un fluido limpio y no son adecuados para fluidos abrasivos. La caída de presión aumenta con la viscosidad, limitando la capacidad de flujo. La operación de los medidores de flujo de desplazamiento positivo implica dividir los líquidos en incrementos precisamente medidos y desplazarlos. Cada sección se registra mediante un contador conectado. Debido a que cada incremento representa un volumen definido, estos medidores son populares para aplicaciones de dosificación automática y contabilidad. Son adecuados para medir flujos de líquidos viscosos o donde se requiere un sistema de medición mecánica sencillo.

Figura 17

Ejemplo mecanismo de desplazamiento positivo. (ABB, n.d.-a)

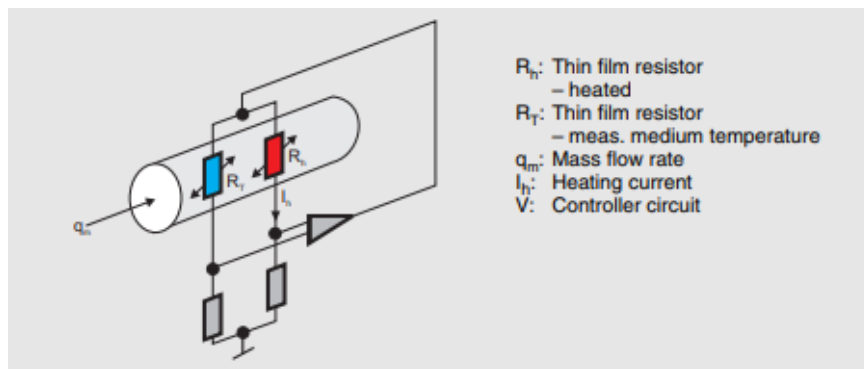


2.2.3.10 Masa térmica

Los medidores de flujo más utilizados según (ABB, n.d.-a) para gases miden el flujo volumétrico operativo, lo que implica la necesidad de tomar medidas adicionales de presión y temperatura para calcular el caudal másico. Estas correcciones aumentan el costo y la complejidad de las mediciones, al tiempo que reducen la precisión del sistema de medición. Por otro lado, la medición térmica del flujo másico de gases proporciona directamente el caudal másico en kg/h sin necesidad de mediciones adicionales o cálculos. Usando la densidad normal del gas, es posible calcular el flujo volumétrico normal, como por ejemplo en Nm³/h. En la industria se emplean dos métodos para medir el flujo másico térmico de gas: anemómetros de película caliente y medidores calorimétricos o capilares. Este enfoque se basa en la transferencia de calor, la cual varía según el flujo del medio de medición, desde un cuerpo calentado al medio que se está midiendo. En los campos relevantes para la ingeniería de procesos, este enfriamiento, que depende

del flujo, no está determinado por la presión o la temperatura, sino por el tipo y la cantidad de partículas que entran en contacto con la superficie caliente. Por lo tanto, este método permite calcular directamente el caudal másico del medio de medición. La unidad del sensor está compuesta por dos resistores de medición que forman parte de un circuito eléctrico en puente. Uno de estos resistores se ajusta a la temperatura del gas en movimiento, mientras que el otro resistor se calienta eléctricamente y, simultáneamente, se enfría por el flujo masivo de gas. Un circuito de control regula el calor aplicado al resistor para mantener una diferencia de temperatura constante entre ambos resistores. Así, la potencia P sirve como indicador del caudal masivo de gas. Esta relación se puede expresar mediante la ecuación de King, que incluye constantes específicas del instrumento y del gas identificadas como $K_1...3$. Ver figura 17.

Figura 18
Esquemático medidor de masa térmica.(ABB, n.d.-a)



$$P = \Delta T \times K_1 + K_2(q_m)^{k_3} \quad (21)$$

Esto ofrece la medición directa en unidades como kg/h o m^3/h estándar, evitando la necesidad de ajuste de densidad del valor medido. El diseño compacto de la unidad del sensor garantiza una mínima caída de presión, generalmente en torno a 1 mbar. Los sensores de película delgada tienen un tiempo de respuesta típicamente en el rango de milisegundos. Los medidores de flujo másico térmico suelen ser resistentes a las vibraciones y ofrecen un amplio rango de operación, con precisión de hasta el 1% del caudal siendo común.

2.2.4 Especificaciones

Dentro del proceso de selección de instrumentos en la empresa, se crean unos documentos conocidos como SP, abreviatura a especificación, este documento es individual a cada instrumento que se encuentra en la planta, por lo tanto es necesario crear una hoja de especificación personalizada basándose en las necesidades del servicio en el que el instrumento se encuentra.

Como ejemplo se usará una hoja de especificación de un instrumento diferencial de presión para explicar los campos y que se le pide al vendedor. Ver figura 19.

General Data	1	Tag Number	Case	XT-FT -TAG	
	2	Service	COOLING WATER		
	3	PID No.	Nace Applicable	NUMBER	Yes/No
	4	PED	SIL Required	Group: II, Phase: Liquid	Yes/No
	5	Line No	Piping Class	Size-Name of the line	AA3D
	6	Line Material	Line Schedule	PLAIN CARBON STEEL	20

Figura 19. Información general

En la información general se encuentran datos básicos como el tag o nombre del instrumento, el servicio que es agua de enfriamiento lo cual al ser agua indica que no se requiere Nace y no va a requerir un nivel SIL al no ser una sustancia peligrosa, el caso del PED esta información es dada por proceso, el PID es el diagrama plano de proceso donde se encuentra el instrumento, la línea es el nombre de la tubería donde va a estar instalado el instrumento, la piping class es una relación de material y rating que tiene dicha tubería, el schedule es un estándar de tubería. Ver figura 19

Figura 20
Datos de operación

Operating Conditions	7	Fluid	Special Conditions	Cooling Water			
	8	Phase	State	Single phase	Liquid		
	9	Design Press. :	Min	Max.	Units	VALUE	bar-g
	10	Design Temp. :	Min	Max.	Units	VALUE	°C
	11	Operating Pressure	Operat. Temperature	VALUE	bar-g	VALUE	°C

En este caso los datos de operación son dados por proceso, pero son fundamentales para a cotización y selección del instrumento. Ver figura 20

Figura 21
Información específica del instrumento

Differential Pressure Transmitter	19	Instrum. Range :	Min	Max.	Units	0	VALUE	mbar
	20	Calibrat. Range :	Min	Max.	Units			
	21	System Range :	Min	Max.	Units	0	VALUE	m ³ /h @Standard
	22	Accuracy	Power Supply	+/- 0.04% of span		24VDC Loop powered		
	23	Output Signal	4 ÷ 20 mA Hart					
	24	Element Type	Material	Diaphragm		AISI 316L		
	25	Wetted Part Material	AISI 316L					
	26	O-Rings Material	Fill Fluid	PTFE		Silicone		
	27	Bolts Material	Housing Material	By Vendor		Epoxy Coated Aluminium		
	28	Vent	Drain	-		-		
	29	Process Connection	Electrical Connection	Oval Flanged		2x M20		
	30	Cable Gland	No					
	31	Mounting Bracket	2" Pipe Mounting with Stainless Steel Bolts					
	32	Area Classification	Req. Safety Certification	Safe Area		ATEX / IEC Ex		
	33	Elec Protection Class	Enclosure Protection	Ex ia		IP 66		
34	Surge Protection Device	No						
35	Pressure Loss @ Max Flow	200 mbar						

Para este caso hay que tener en cuenta varios elementos y es que ya mucha de esta información esta predefinida y establecida por otros documentos como la JSD de instrumentación y la BES que para el caso del proyecto de donde viene esta especificación define varios elementos como la conexión a proceso que es bridada, el tipo de montaje, alimentación y señal el encapsulamiento (Housing). Para el área de clasificación, esta es evaluada previamente teniendo en cuenta qué tan peligrosa es la zona donde está ubicado el instrumento, así mismo el requerimiento de seguridad, en este caso es eléctrico y para todos los transmisores es un estándar pedir el Ex ia (Estándar de protección eléctrica) que quiere decir que es intrínsecamente seguro. Es decir, funciona limitando la energía que alimenta al instrumento para controlar la temperatura superficial y también evitar chispas como se habla en (NORMATIVA ATEX - NOMENCLATURA Y CODIFICACIÓN, n.d.), ver figura 21.

Figura 22
Sello y diafragma

Diaphragm Seal	36	Quantity	Size	Rating	Face	N/A	N/A	N/A	N/A	
	37	Seal Type				N/A				
	38	Diaphragm Material				N/A				
	39	Flange Material				N/A				
	40	Fill Fluid	Flushing			N/A		N/A		
	41	Capillary Material				N/A				
	42	Capillary Type	Capillary Length			N/A		N/A		
Manifold	43	Type	Size	Rating	With 5- Way Manifold		Note 5	6000#		
	44	Body Material			AISI 316L					
	45	Trim Material	Packing Material			AISI 316L		PTFE		
Accessories	46	mA Meter	mA Meter Scale			Integral (LCD)		Direct Reading		
	47	Flushing Connection Ring				N/A				
	48									
Purchase	49	Required PFD Avg				N/A				
	50	Manufacturer	Model No.			By Vendor		By Vendor		
	51	Client Reference	Requisition No.					204927C-000-MR-1553-0001		
	52	Material Code				155302 - Electronic Differential Pressure Transmitter (Flow)				

En esta parte se sabe si el instrumento trae sello o no, siendo el caso de no traer, llevara como accesorio un manifold.

3. CAPITULO III

3.1 METODOLOGÍA

El enfoque metodológico elegido para diseñar un procedimiento de cómo seleccionar medidores de flujo se basa en una estrategia cuantitativa. Este enfoque se basa en datos numéricos y estadísticos para analizar y evaluar los diferentes tipos de medidores de flujo y sus aplicaciones en contextos industriales.

Se realizó una revisión bibliográfica detallada para recopilar información sobre los tipos de medidores de flujo disponibles en el mercado y sus características. Se buscó en fuentes académicas y técnicas para establecer una base teórica sólida. Se realizó un análisis de los diferentes tipos de medidores de flujo volumétricos y

de masa, considerando sus especificaciones técnicas, aplicaciones y ventajas. Este análisis ayudó a identificar los criterios clave para la selección adecuada de medidores de flujo en distintos contextos industriales. Se diseñó un procedimiento estructurado y sistemático que incluya pasos detallados para la selección adecuada de medidores de flujo. Este procedimiento considerará los criterios identificados y proporcionará una guía clara para la toma de decisiones que permita formar personal en esta área.

Siendo la siguiente secuencia planteada a trabajar en el desarrollo del procedimiento: Identificar los diferentes procesos industriales en los que se requiere medir el flujo. Analizar los tipos de fluidos involucrados en estos procesos (por ejemplo, líquidos, gases, vapores) y sus propiedades (viscosidad, densidad, temperatura, etc.). Luego identificar y estudiar los distintos tipos de medidores de flujo utilizados en la industria (medidores electromagnéticos, ultrasónicos, de turbina, etc.), detallar las especificaciones técnicas de cada tipo de medidor, incluyendo rango de medición, precisión, respuesta dinámica y explicar el principio de funcionamiento de cada medidor, sus ventajas y limitaciones. Con el fin elaborar un documento que describa cada tipo de medidor, sus especificaciones, funcionamiento y aplicaciones típicas. Para posteriormente integrar la información sobre características de fluidos y tipos de medidores en un instructivo que guíe la selección de instrumentos de medición de flujo. Con el fin de establecer criterios de selección basados en la compatibilidad de los tipos de medidores con los fluidos y aplicaciones específicas.

4. CAPITULO IV

4.1 PROCEDIMIENTO

1. En primera instancia es hacer la revisión de los diagramas PID y hacer la actualización de la base de datos, creando los instrumentos en SPI de ser necesario o implementar los cambios indicados en el P&ID. Teniendo en cuenta que los P&ID son actualizados y comentados constantemente.
2. Después de haber creado los instrumentos, se diligencian los datos de proceso por parte del procesista encargado de emitir la PDS (process data sheet).
3. Al instrumento es importante completar los campos de línea, servicio, PID, IO type, instrument type, tipo de comunicación, tipo de alimentación, si este posee alarmas o no. Siendo para la primera iteración un Flow meter, luego este será modificado a un tipo de instrumento más específico.
 - 3.1. Completar la información de la línea donde el instrumento estará instalado, utilizando como base la información que provee piping en su JSD de piping clases. En acá se encuentra el material de la tubería y la cédula de esta, imprescindible para poder definir el tipo de conexión que

tendrá a la tubería y el material de fabricación del cuerpo o la parte en contacto con el fluido.

- Basándose en las condiciones de proceso entregadas por el procesista se procede a definir el tipo de instrumento teniendo en cuenta el servicio, fluido, Reynolds, viscosidad, temperatura y presión a la que se encontrará el instrumento funcionando. Para eso se puede utilizar como referencia la siguiente tabla, extraída de la JSD (079254C-000-JSD-1540-001) revisión 3.

Figura 23

Extracción de 079254C-000-JSD-1540-001

Meters or Primary elements type	APPLICATION			Max. Pressure (Kg/cm2g)	Max. Temp. (°C)	Reynolds Nr. (ReD)	Rangeability (See note 1)	Accuracy (%) (See note 2)	Typical Pressure Loss (Kg/cm2g)
	Liquid	Gases	Vapours						
Diff. Press. Primary elements	X	X	X	509.85	500	>2,500	4-5:1	1.0-2.0	Medium/High (0,20-0,51)
Pitot or Annubar tubes	X	X	X	509.85	500	No effects	4-5:1	1.0-2.0	Very low (0,01-0,022)
Variable Area Meters	X	X	X	40.78 (101.97)	200 (400)	>10,000	10:1	2.0-3.0	Low (0,05-0,10)
Magnetic Meters	X (note 3)	--	--	203.94	200	No effects	20:1	0.5 (note 4)	Null
Vortex Meters	X	X	X	101.97	200 (400)	>10,000	15:1	0.75 (note 4) 1.50 (note 5)	Low/Medium (0,10-0,20)
Turbine Meters	X	X	--	407.88	150	>10,000	15:1	0.25 (note 4) 0.50 (note 5)	Low (0,05-0,10)
Positive Displacement Meters	X	X	--	203.94	100	No effects	10:1	0.25 (note 4) 0.50 (note 5)	High (0,51-1,02)
Ultrasonic Flow Meters	X	X	--	203.94	200	No effects	10:1	2-3	Null
Mass Flow Meters (Coriolis)	X	(X)	--	101.97	200	No effects	20:1	0.25 (note 4) 0.50 (note 5)	Medium/High (0,20-0,51)
Thermal Flow Meters	(X)	X	--	101.97	100	No effects	10:1	0.5 (note 4) 1.0 (note 5)	Very low (0,01-0,022)

Table 8.3-1: Summary on the limits of application for industrial flow meters

Acá se contemplan que tipo de instrumento es adecuado para diferentes tipos de fluidos y condiciones de proceso.

Las notas que aparecen en el documento son las siguientes

- Rango de operación en el cual el medidor mantiene la precisión especificada. Definición: Proporción entre el flujo máximo y mínimo medido con la precisión especificada.
- Precisión típica del medidor (completo con transmisor) expresada en % de la escala completa.
- Para líquidos con una conductividad > 5 mS/cm.
- Precisión típica, para líquidos, expresada en % del flujo medido.
- Precisión típica, para gases y vapores, expresada en % del flujo medido.

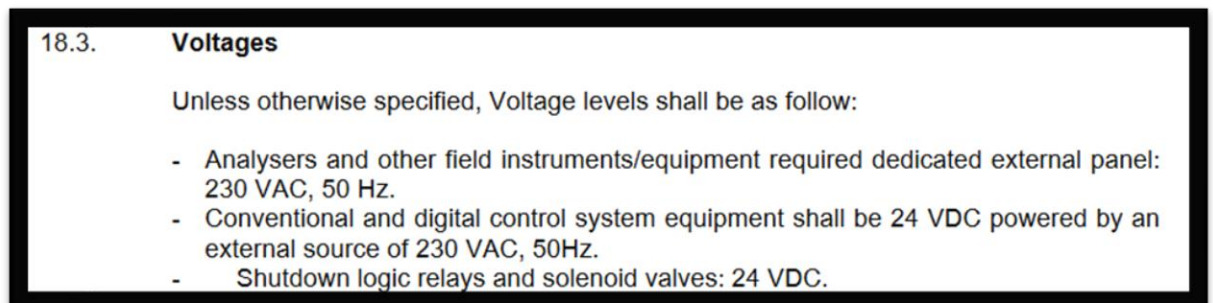
Nota General: Las aplicaciones, presiones y temperaturas mostradas entre paréntesis se refieren a un diseño no estándar.

Es importante tener en cuenta que el servicio normalmente va a especificar el fluido y algo más, es decir ACID WATER o WASTE WATER, siendo el primero aguas ácidas que requieren tratamiento para neutralizar y lo segundo es un agua residual. Lo que es información importante para entender las condiciones del líquido porque el hecho de tener algún material particulado o algo por el estilo puede generar dificultades en el funcionamiento del medidor.

5. Al haber definido esto el instrumentista procede a hacer el comentario en el P&ID sobre el tipo de instrumento seleccionado para que esto sea masterizado para la siguiente emisión de diagramas P&ID y también se hace la actualización en la base de datos colocando en el campo del instrument type el tipo específico de FLOW METER.
6. Luego de haber seleccionado se crea una hoja de especificación la cual será la base para las cotizaciones de los vendedores, esta hoja está ligada al instrument type puesto que hay distintos formatos, teniendo en cuenta el tipo de instrumento, para esto se reúne la información de las otras dependencias principalmente procesos y lo previamente diligenciado y luego se adjunta información especificada en la JSD como en el siguiente caso donde hay un estándar definido para la alimentación de diferentes tipos de instrumentos.

Figura 24

Recorte de estándar y especificación de voltajes.



Para el caso del cuerpo del instrumento y la parte “mojada” (Wetted part) se debe tener en cuenta la piping class ya definida en la línea.

7. El rating del instrumento debe ser revisado con respecto al estándar definido en la JSD, puesto que no siempre será el mismo para las dos cosas un ejemplo puede ser una piping class AA3 la cual es un carbon Steel y su rating es 150# pero por estándar el mínimo para los instrumentos es un Stainless Steel 316L pero se solicita como mínimo 300# debido a que este material aguanta menos presión que el carbón Steel. Importante aclarar que cada caso debe evaluarse, considerando que puede requerir recubrimiento u otro tipo de material.

8. Si esta no es la primera revisión de la emisión de especificaciones es necesario hacer la revisión e implementación de cambios de los comentarios en el markup y a los comentarios tanto del cliente como el vendedor.

Figura 25

Revisión

0.B	20/12/2023	IFQ1 - Issued for Quotation
0.A	12/07/2023	IFQ - Issued for Quotation

Para aclarar el markup es una copia del documento donde se va llevando un registro de los cambios que se van haciendo en el documento para luego ser implementados en la revisión final.

9. Una vez el vendedor regresa su oferta se tabula y se compara cuál es la mejor oferta para emitir un concepto técnico para compra. Normalmente, el coordinador y los ingenieros senior se encargan del proceso, siendo el punto final del ejercicio de selección de un instrumento.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABB. (n.d.-a). *Industrial flow measurement*. Retrieved February 23, 2024, from <https://technical.biz/apunts-tecnics/cas-normativa-atex-atmosferas-explosivas-apuntes-tecnicos-technical-manresa-igualada-ripoll-lleida.pdf>

ABB. (n.d.-b). *Variable Area Flowmeter Basic Fundamentals and Descriptions*.

Acedo, J. (2003). *Control Avanzado de Procesos* (1ed ed.). Díaz de Santos S A.

ATSDR. (n.d.). *Módulo I – Introducción a la toxicología*. Retrieved December 30, 2023, from https://www.atsdr.cdc.gov/es/training/toxicology_curriculum/modules/1/es_lecturenotes.html

Cimbala, J. M., & Cengel, Y. a. (2001a). *Mecánica de Fluidos: Fundamentos y Aplicaciones*. McGrawHill, *Primera Ed*, 10–11.

Consiltant. (n.d.). *SIL certification*. Retrieved December 30, 2023, from <https://www.consiltant.com/en/sil-certification/>

Creus, A. (2010a). *Instrumentación industrial* (8va ed., Issue 1). Alfa Omega.

Emerson. (2020). *The Engineer’s Guide to DP Flow Measurement 2020 EDITION*.

GlobalSpec. (n.d.). *Vortex Flow Meters Information*. Retrieved February 10, 2024, from

https://www.globalspec.com/learnmore/sensors_transducers_detectors/flow_sensing/vortex_flow_meters

Goldberg, K. (2012a). What is automation? *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 9(1), 1–2. <https://doi.org/10.1109/TASE.2011.2178910>

Gutiérrez & Iturralde. (2017). *Manual de Instrumentación*.

Instromet. (2000). *TURBINE GAS METER HANDBOOK*.

IPLACEX. (n.d.). *Instrumentación Industrial*. IPLACEX.

Keyence. (n.d.). *ELECTROMAGNETIC FLOW METER. FLOW METER TYPES & PRINCIPLES*. Retrieved February 10, 2024, from <https://www.keyence.com/ss/products/process/flowknowledge/types/electromagnetic.jsp>

LL-C. (n.d.). *Safety Integrity Level Certification*. Retrieved December 30, 2023, from <https://ll-c.org/product-certification/sil/>

Macosko, C. W. (1993). *Rheology: principles, measurements, and applications*. Wiley-VCH.

Mott, R. L. (2015a). Mecánica de fluidos. Impulsión de fluidos. *Mecánica De Fluidos*, 1–623.

Nayyar, M. (n.d.). *Piping Handbook*.

Nilfisk. (2017). *What is ATEX Certification? Is It Applicable in North America?* <https://news.nilfiskcfm.com/2017/03/atex-certification-applicable-north-america/#:~:text=%E2%80%9CATEX%20Certification%20is%20a%20certification%20of%20equipment%20intended,and%20certify%20this%20type%20of%20equipment.%E2%80%9D%20%5Bemphasis%20added%5D>

NORMATIVA ATEX - NOMENCLATURA Y CODIFICACIÓN. (n.d.). www.tecnical.cat

OMEGA. (n.d.). *Lessons about Positive Displacement Flow Meters*. Retrieved February 18, 2024, from <https://www.omega.com/en-us/resources/positive-displacement-flow-meter>

Salazar, J. (2015). *Variable Area Flowmeter*. <https://www.scielo.sa.cr/pdf/tem/v28n3/0379-3982-tem-28-03-00127.pdf>

Siemens. (n.d.). *Process Instrumentation Siemens Magmeter Selection Guide*.

Siemens. (2021). *Flow Measurement SITRANS FS (ultrasonic)*.

Tippens Paul E. (2007). *Física, conceptos y aplicaciones Séptima edición revisada* (7 Ed).

Victor L. Streeter. (2000). *Mecánica de los Fluidos* (9 Ed). Mc Graw Hill.

Webster, J. (2003a). Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook. In *Electrical Measurement, Signal Processing, and Displays*.
<https://doi.org/10.1201/9780203009406>

Wei, S. (2013). *Basics of Flow Measurement*.

YOKOGAWA. (n.d.). *Flowmeter Selection Guide Poster*.

Yunes A. Cengel. (2009). *Termodinámica* (7 Ed). Mc Graw Hill.

6. ANEXOS

Documento de procedimiento

Procedimiento general para la selección de instrumentos de medición de flujo

0.A	17/03/2024	IFR-Issued for revision	J.PARRA		
REV	DATE	STATUS	WRITTEN BY	CHECKED BY	APROVED BY
DOCUMENT REVISIONS					

1. Objetivo:

Desarrollar un procedimiento estándar con el fin de la adecuada selección de instrumentos para la medición de flujo en la aplicación en plantas industriales por le empresa TECHNIP ENERGIES

2. Alcance:

Este procedimiento es dirigido a los instrumentistas I y dibujantes en la empresa TECHNIP ENERGIES, que podrán usar este documento como guía para seleccionar instrumentos de medición de flujo.

3. Responsabilidades:

Para el desarrollo de este procedimiento es necesario tener comunicación con los procesistas, tuberos y el coordinador de proyecto en el área de instrumentación y automatización. En este orden de ideas por medio del trabajo interdisciplinario la finalidad es la selección y luego la compra de los instrumentos.



Figura 1. Responsabilidades de las distintas dependencias

4. Materiales/Equipos Requeridos:

- SPI (SMART PLANT INSTRUMENTATION), es la base de datos y donde se consolidan los instrumentos y consta de distintos módulos para asistir en este proceso.
- API (American Petroleum Institute) 551, es el estándar norteamericano más básico para tener en cuenta el proceso de selección de instrumentos principalmente usado para el sector de Oil & Gas.
- JSD de instrumentos, este es un estándar basado principalmente en la API pero es interno de la compañía además consolida muchos otros requerimientos, este es modificado dependiendo del proyecto y a las necesidades de este, lo cual es responsabilidad del coordinador de proyecto proveer.
- Estándar del cliente para instrumentación.

5. Preparativos:

1. En primera instancia es necesario que el instrumentista haya leído y tenga a la mano los estándares mencionados previamente para usar como referencia en el proceso de selección de instrumentos. Así mismo como haber leído debidamente el DQO

2. Tener los diagramas P&ID disponibles.

6. Procedimiento:

1. En primera instancia es hacer la revisión de los diagramas PID y hacer la actualización de la base de datos, creando los instrumentos en SPI de ser necesario o implementar los cambios indicados en el P&ID. Teniendo en cuenta que los P&ID son actualizados y comentados constantemente.
2. Después de haber creado los instrumentos, se diligencian los datos de proceso por parte del procesista encargado de emitir la PDS (process data sheet).
3. Al instrumento es importante llenarle los campos de línea, servicio, PID, IO type, instrument type, tipo de comunicación, tipo de alimentación, si este posee alarmas o no. siendo para la primera iteración un Flow meter, luego este será modificado a un tipo de instrumento más específico.
 - 3.1. Completar la información de la línea donde el instrumento estará instalado, utilizando como base la información que provee piping en su JSD de piping clases. En acá se encuentra el material de la tubería y la cedula de esta, imprescindible para poder definir el tipo de conexión que tendrá a la tubería y el material de fabricación del cuerpo o la parte en contacto con el fluido.
4. Basándose en las condiciones de proceso entregadas por el procesista se procede a definir el tipo de instrumento teniendo en cuenta el servicio, fluido, Reynolds, viscosidad, temperatura y presión a la que se encontrará el instrumento funcionando. Para eso se puede utilizar como referencia la siguiente tabla, extraída de la JSD (079254C-000-JSD-1540-001) revisión 3.

Meters or Primary elements type	APPLICATION			Max. Pressure (Kg/cm2g)	Max. Temp. (°C)	Reynolds Nr. (ReD)	Rangeability (See note1)	Accuracy (%) (See note 2)	Typical Pressure Loss (Kg/cm2g)
	Liquid	Gases	Vapours						
Diff. Press. Primary elements	X	X	X	509.85	500	>2,500	4-5:1	1.0-2.0	Medium/High (0.20-0.51)
Pitot or Annubar tubes	X	X	X	509.85	500	No effects	4-5:1	1.0-2.0	Very low (0.01-0.022)
Variable Area Meters	X	X	X	40.78 (101.97)	200 (400)	>10,000	10:1	2.0-3.0	Low (0.05-0.10)
Magnetic Meters	X (note 3)	--	--	203.94	200	No effects	20:1	0.5 (note 4)	Null
Vortex Meters	X	X	X	101.97	200 (400)	>10,000	15:1	0.75 (note 4) 1.50 (note 5)	Low/Medium (0.10-0.20)
Turbine Meters	X	X	--	407.88	150	>10,000	15:1	0.25 (note 4) 0.50 (note 5)	Low (0.05-0.10)
Positive Displacement Meters	X	X	--	203.94	100	No effects	10:1	0.25 (note 4) 0.50 (note 5)	High (0.51-1.02)
Ultrasonic Flow Meters	X	X	--	203.94	200	No effects	10:1	2-3	Null
Mass Flow Meters (Coriolis)	X	(X)	--	101.97	200	No effects	20:1	0.25 (note 4) 0.50 (note 5)	Medium/High (0.20-0.51)
Thermal Flow Meters	(X)	X	--	101.97	100	No effects	10:1	0.5 (note 4) 1.0 (note 5)	Very low (0.01-0.022)

Table 8.3-1: Summary on the limits of application for industrial flow meters

Figura 2. Extracción de 079254C-000-JSD-1540-001

Acá se contemplan que tipo de instrumento es adecuado para que tipo de fluidos y condiciones de proceso.

Las notas que aparecen en el documento son las siguientes

(1) Rango de operación en el cual el medidor mantiene la precisión especificada. Definición: Proporción entre el flujo máximo y mínimo medido con la precisión especificada.

(2) Precisión típica del medidor (completo con transmisor) expresada en % de la escala completa.

(3) Para líquidos con una conductividad > 5 mS/cm.

(4) Precisión típica, para líquidos, expresada en % del flujo medido.

(5) Precisión típica, para gases y vapores, expresada en % del flujo medido.

Nota General: Las aplicaciones, presiones y temperaturas mostradas entre paréntesis se refieren a un diseño no estándar.

Es importante tener en cuenta que el servicio normalmente va a especificar el fluido y algo más, es decir ACID WATER o WASTE WATER, siendo el primero aguas acidad que requieren tratamiento para neutralizar y lo segundo es un agua sucia. Lo que es información importante para entender las condiciones del líquido porque el hecho de tener algún material particulado o algo por el estilo puede generar dificultades en el funcionamiento del medidor.

5. Al haber definido esto el instrumentista procede a hacer el comentario en el P&ID sobre el tipo de instrumento seleccionado para que esto sea masterizado para la siguiente emisión de diagramas P&ID y también se hace la actualización en la base de datos colocando en el campo del instrument type el tipo específico de FLOW METER.

6. Luego de haber seleccionado se crea una hoja de especificación la cual será la base para las cotizaciones de los vendedor, esta hoja esta ligada al instrument type puesto que hay distintos formatos, teniendo en cuenta el tipo de instrumento, para esto se reúne la información de las otras dependencias principalmente procesos y lo previamente llenado y luego se adjunta información especificada en la JSD como en el siguiente caso donde hay un estándar definido para la alimentación de diferentes tipos de instrumentos.

18.3. Voltages

Unless otherwise specified, Voltage levels shall be as follow:

- Analysers and other field instruments/equipment required dedicated external panel: 230 VAC, 50 Hz.
- Conventional and digital control system equipment shall be 24 VDC powered by an external source of 230 VAC, 50Hz.
- Shutdown logic relays and solenoid valves: 24 VDC.

Figura 3. Recorte de estándar y especificación de voltajes.

Para el caso del cuerpo del instrumento y la parte “mojada” (Wetted part) se debe tener en cuenta la piping class ya definida en la línea.

7. El rating del instrumento debe ser revisado con respecto al estándar definido en la JSD, puesto que no siempre será el mismo para las dos cosas un ejemplo puede ser una piping class AA3 la cual es un carbon Steel y su rating es 150# pero por estándar el mínimo para los instrumentos es un Stainless Steel 316L pero se solicita como mínimo 300# debido a que este material aguanta menos presión que el carbón Steel. Importante aclarar que cada caso debe evaluarse, considerando que puede requerir recubrimiento u otro tipo de material.
8. Si esta no es la primera revisión de la emisión de especificaciones es necesario hacer la revisión e implementación de cambios de los comentarios en el markup y a los comentarios tanto del cliente como el vendedor.

0.B	20/12/2023	IFQ1 - Issued for Quotation
0.A	12/07/2023	IFQ - Issued for Quotation

Figura 4. Revision

Para aclarar el markup es una copia del documento donde se va llevando un registro de los cambios que se van haciendo en el documento para luego ser implementados en la revisión final.

9. Una vez el vendedor regresa su oferta se tabula y se compara cuál es la mejor oferta para emitir un concepto técnico para compra. Normalmente, el coordinador y los ingenieros senior se encargan del proceso, siendo el punto final del ejercicio de selección de un instrumento.

7. Manejo de Emergencias:

Cuando se presenta una desviación de diseño o es necesario plantearla esta es revisada y gestionada por el coordinador de proyecto, para luego ser discutido con el cliente del proyecto si cuenta con la aprobación de este o no para que la desviación sea tenida en cuenta.

8. Validación y Aprobación:

Dentro del formato del documento hay un cajetín donde se especifican las fechas, la persona que creo el documento y los dos encargados de la revisión de este. También se adjunta el tipo de revisión, objetivo de revisión, fecha de revisión y firma del ingeniero en cuestión. Los cambios de revisión a revisión son marcados en azul para su control de cambios y son colocadas en la tabla anterior, así mismo como el estado de la revisión.

9. Anexos:

Por cuestiones de confidencialidad de la empresa adjunto únicamente el formato de solicitud de la API 551, que es el estándar y documento más general que se usa como referencia en el proceso de selección de los instrumentos.

(https://www.api.org/~media/files/publications/whats%20new/551_e2%20pa.pdf)