

**UNIVERSIDAD RICARDO PALMA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
VICE RECTORADO DE INVESTIGACIÓN  
CENTRO DE INVESTIGACIÓN**



**Optimización de la medición de flujo bajo el principio de la presión  
diferencial y su importancia en la Ingeniería de Control y  
Automatización industrial**

Responsable:

**Humberto Chong <sup>1</sup>**

Colaboradores:

Carlos Maguiña <sup>2</sup>

<sup>1</sup>Docente Universidad Ricardo Palma, Facultad de Ingeniería, Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica.

Email: Humberto.ChongR@urp.pe

<sup>2</sup>Docente Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas – Facultad de Ingeniería Electrónica. Docente de TECSUP – Carrera de Electrónica.

Email: carlos.maguina@speedy.com.pe

## INDICE GENERAL DE CONTENIDOS

<b>RESUMEN Y PALABRAS CLAVE</b> .....	<b>5</b>
<b>ABSTRACT Y KEYWORDS</b> .....	<b>6</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>7</b>
<b>I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b> .....	<b>8</b>
1.1 Descripción del problema .....	8
1.2 Marco histórico del problema de investigación .....	8
1.3 Formulación del problema .....	8
1.3.1 Problema general.....	8
1.3.2 Problemas específicos.....	8
1.4 Justificación del problema .....	9
1.5 Delimitación del problema.....	9
1.5.1 Delimitación espacial: .....	9
1.5.2 Delimitación temporal: .....	9
<b>II. FUNDAMENTO TEÓRICO</b> .....	<b>10</b>
2.1 Importancia del proyecto de investigación.....	10
2.2 Antecedentes teóricos.....	10
2.3 Marco teórico .....	10
2.4 Marco conceptual.....	11
2.5 Principales definiciones .....	12
2.5.1 Campo de medida ( range ) .....	12
2.5.2 Rangeabilidad ( Rangeability or Turndown ) .....	12
2.5.3 Alcance ( span ).....	12
2.5.4 Error .....	12
2.5.5 Incertidumbre de la medida .....	13
2.5.6 Exactitud ( accuracy ) .....	13
2.5.7 Precisión ( precision ) .....	13
2.5.8 Zona Muerta ( Dead band ) .....	13
2.5.9 Histéresis ( hysteresis ) .....	13
2.5.10 Sensibilidad ( Sensitibity ).....	14
2.5.11 Repetibilidad ( Repeatibiliy ) .....	14
2.5.12 Linealidad ( Linearity ) .....	14
2.6 Normas Internacionales para la medición de líquidos y gases.....	14
2.7 Concepto de Medición de flujo .....	16
2.7.1 Medición volumétrica.....	16
2.7.2 Medición Másica ( Caudal – Masa ).....	17
2.8 Medición volumétrica bajo el principio de la presión diferencial.....	17
2.8.1 Sensores de presión diferencial aplicados al proyecto de investigación. ....	18

2.8.2	Teorema de Bernoulli, sobre conservación de la energía, aplicado al fluido que pasa por una tubería.....	19
2.8.3	Placa de orificio .....	19
2.8.3.1	Características.....	19
2.8.3.2	Tipos de placas de orificio .....	20
2.8.3.3	Vena Contracta.....	20
2.8.3.4	Geometría de una placa de orificio .....	21
2.8.3.5	Beta de una placa de orificio.....	21
2.8.3.6	Tipos de diseños de placas de orificio .....	22
2.8.3.7	Consideraciones para instalar una placa de orificio .....	23
2.8.3.8	Tomas de Presión.....	23
2.8.3.9	Tomas de Bidas ( Flange Taps ).....	24
2.8.3.10	Bidas porta placas de orificio .....	24
2.8.4	Sensor para medir flujo tipo Cono ( V-Cone ) <sup>4</sup> .....	25
2.8.4.1	Principales características técnicas .....	29
2.8.4.2	Principales ventajas de utilizar un sensor tipo cono .....	29
2.8.4.3	Principales aplicaciones del sensor tipo cono en la industria .....	30
2.8.4.4	Nuevo cono inteligente para medición de flujos por el principio de presión diferencial .....	30
2.8.4.5	Ecuaciones básicas .....	31
2.8.4.6	Calibración y determinación del coeficiente de descarga [C.d.] .....	32
2.8.5	Sistemas Electrónicos de Medición (EMS-Electronic Measurement System) denominado Computadores de Flujo.....	34
2.8.5.1	Opciones del sensor .....	35
2.8.5.2	Control.....	35
2.8.5.3	Autonomía de alimentación .....	35
2.8.5.4	Software de configuración .....	35
2.8.5.5	Comunicaciones .....	35
2.8.5.6	Software de Integración SCADA.....	36
<b>III.</b>	<b>OBJETIVOS.....</b>	<b>38</b>
3.1	Objetivos de la investigación .....	38
3.1.1	Objetivo general .....	38
3.1.2	Objetivos Específicos .....	39
<b>IV.</b>	<b>HIPÓTESIS .....</b>	<b>39</b>
4.1	Hipótesis central .....	39
4.2	Hipótesis específicas .....	39
<b>V.</b>	<b>VARIABLES DE ESTUDIO .....</b>	<b>40</b>
5.1	Determinación de variables .....	40
5.2	Proceso de operacionalización de variables.....	41
<b>VI.</b>	<b>METODOLOGÍA .....</b>	<b>43</b>

6.1	Tipo de investigación .....	43
6.2	Método de investigación .....	43
6.3	Diseño de investigación .....	43
6.4	UNIVERSO, POBLACIÓN Y MUESTRA .....	44
<b>VII.</b>	<b>PROPUESTA ACADÉMICA.....</b>	<b>49</b>
7.1	Justificación.....	49
7.2	Importancia de la enseñanza de la medición de flujos en las carreras de Ingeniería afines a la industria.....	49
7.3	Propósitos y objetivos del proyecto de investigación en la formación profesional del estudiante de ingeniería .....	50
7.4	Metodología para la enseñanza de la medición de flujos bajo el principio de la presión diferencial .....	51
7.5	Módulos de laboratorio, implementación y justificación de la inversión .....	51
7.6	Nuevo plan curricular para las carreras de ingeniería .....	52
<b>VIII.</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>55</b>
8.1	Resultados estadísticos descriptivos.....	55
<b>IX.</b>	<b>DISCUSIÓN.....</b>	<b>58</b>
<b>X.</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>59</b>
	<b>Referencias bibliográficas.....</b>	<b>60</b>
	<b>ANEXOS.....</b>	<b>61</b>

## **RESUMEN**

El objetivo de esta investigación es analizar y evaluar las técnicas de medición de la variable industrial flujo bajo el principio de la presión diferencial y proponer mejoras tecnológicas en el ámbito industrial y en la formación de los alumnos de pregrado de las especialidades de ingeniería. La aplicación de los sistemas electrónicos de medición denominados computadores de flujo reviste significativa importancia en esta investigación.

La aplicación realizada en este proyecto corresponde al tipo de “Investigación Aplicada” porque se presentan innovaciones tecnológicas para mejorar y optimizar la medición de flujos basados en el principio de la presión diferencial.

Este tipo de investigación tiene propósitos prácticos debido a que se investiga para actuar y producir cambios en un determinado objetivo. El lugar de la investigación se concentra en los campos petroleros de la zona Noroeste de Piura y Talara.

Los resultados de esta investigación basan su objetivo en la optimización de la medición de la variable flujo y difunde a través de los cursos de las especialidades de ingeniería su conocimiento y mejora en la formación profesional del alumno de pregrado.

## **PALABRAS CLAVES**

Presión diferencial, placa de orificio, cono, computador de flujo, beta.

## **ABSTRACT**

The object of this research is to analyze and evaluate the techniques of measurement of the flow under the principle of differential pressure and propose technological improvements in the industrial field and in the training of undergraduate students of engineering specialties. The application of electronic measurement systems called flow computers is of significant importance in this research.

The application made in this project corresponds to the type of "Applied Research" because technological innovations are presented to improve and optimize the measurement of flows based on the differential pressure principle.

This type of research has practical purposes because it is investigated to act and produce changes in a particular objective. The research site is concentrated in the oil fields of the Northwest area of Piura and Talara.

The results of this research base their objective on the optimization of the measurement of the variable flow and it diffuses through the courses of the engineering specialties its knowledge and improvement in the professional formation of the undergraduate student.

## **KEYWORDS**

Differential pressure, orifice plate, cone, flow computer, beta.

## **INTRODUCCIÓN**

En toda industria es necesario medir, monitorear, controlar y mantener constante las principales variables físicas como la presión, nivel, flujo, temperatura, pH, conductividad, composición, velocidad, humedad y punto de rocío entre las más importantes.

Los instrumentos de medición permiten la medición y control de estas variables en las condiciones más idóneas que las que el propio operador podría realizar.

En la industria existen dos categorías de procesos: procesos continuos y procesos discontinuos. En ambos tipos de procesos las variables deben mantenerse en un valor fijo o en un valor variable con el tiempo.

En la actualidad la tendencia a automatizar estos procesos mediante la implementación de sistemas de lazo de control cerrado es creciente. Para lograr un óptimo funcionamiento de un lazo de control es de suma importancia que los elementos de medición sean lo más exactos posibles, de tal forma que permitan reducir al mínimo las desviaciones en el sistema de control. Un sistema de control compara el valor de la variable o condición a controlar, con un valor deseado y toma acción de corrección de acuerdo con desviación existente sin que el operador intervenga.

Para que un sistema de control alcance su mejor performance es indispensable que la medición de la variable industrial sea lo más exacta. La medición de flujos de líquidos y gases reviste una gran importancia y su análisis y estudio.

## **I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

### **1.1 Descripción del problema**

Una de las variables industriales de mayor importancia en el sector industrial es el flujo o caudal. Existen dos técnicas para medir el flujo, las cuales se conocen como flujo volumétrico y flujo másico. La medición de flujo volumétrico determina el caudal en volumen del fluido y es la técnica más utilizada para la medida general del flujo; la medición de flujo másico determina el caudal masa y su uso es para aplicaciones en las que la exactitud de la medida es importante. El problema que se presenta en la actualidad en los programas de las carreras de ingeniería afines con el sector industrial es el vacío que existe en el conocimiento y análisis del principio básico de medición de flujos por el método clásico de la presión diferencial y como la aplicación de nuevas técnicas de desarrollo como la electrónica digital y los sistemas de comunicaciones han mejorado significativamente los resultados de estas mediciones.

Adicionalmente la falta de una adecuada infraestructura en los laboratorios de Ingeniería es otro de los problemas que impiden que los estudiantes logren una mejor formación profesional y especialización en este campo de la instrumentación industrial.

### **1.2 Marco histórico del problema de investigación**

El problema de la falta de exactitud de la medición de flujos por el principio de presión diferencial se remonta hacia los años 60 donde la medición se realizaba mediante sistemas mecánicos y neumáticos. En los años 80 el desarrollo de la electrónica analógica permitió una mejora en la medición, obteniéndose una mejor calidad en la exactitud y precisión de la variable medida. En los últimos 10 años el desarrollo de la electrónica digital y los sistemas de comunicaciones han permitido que la medición de flujos mejore su calidad de medición mediante la aplicación de la tecnología electrónica digital denominada computadores de flujo.

### **1.3 Formulación del problema**

#### **1.3.1 Problema general**

¿Como la utilización de la tecnología electrónica digital de los computadores de flujo mejora la precisión y exactitud de la medición de flujos bajo el principio de la presión diferencial?

#### **1.3.2 Problemas específicos**

- a) ¿Como la configuración de un computador de flujo influye en la optimización y mejora de la medición de flujo?
- b) ¿En que medida el cálculo correcto del diferencial de presión del sensor incide en un mejor cálculo del flujo en el computador?

- c) ¿De que manera las enseñanzas de esta tecnología electrónica digital denominada computador de flujo incide en el desarrollo profesional del alumno de pregrado de Ingeniería ?

#### **1.4 Justificación del problema**

La industria actual requiere de personal profesional altamente capacitado en estas nuevas técnicas de medición de flujos para integrarlos en el manejo de sus procesos productivos. Carreras profesionales afines al sector industrial como Ingeniería Industrial, Electrónica, Mecatrónica, Mecánica-Eléctrica, Química y Petroquímica entre las mas importantes no cuentan dentro de sus programas curriculares con una estructura adecuada que permita que materias como la medición de flujos utilizando los últimos desarrollos en tecnología electrónica estén al alcance de los estudiantes de pregrado.

#### **1.5 Delimitación del problema**

##### **1.5.1 Delimitación espacial:**

Facultad de Ingeniería de la Universidad Ricardo Palma, distrito de Surco en Lima, Perú.

##### **1.5.2 Delimitación temporal:**

Para realizar la presente investigación se toma como referencia el año 2016.

## **II. FUNDAMENTO TEÓRICO**

### **2.1 Importancia del proyecto de investigación**

Una de las variables industriales de mayor importancia en el sector industrial es el flujo o caudal.

La medición de flujo es importante en los procesos industriales por las siguientes razones:

- Permite determinar las proporciones en masa o volumen de los fluidos del proceso.
- Permite determinar la cantidad de fluido consumido por el proceso, el cálculo de este consumo está en función directa con los costos.

### **2.2 Antecedentes teóricos**

Durante varias décadas la industria utiliza para la medición de flujos líquidos y gaseosos el sensor tipo placa de orificio. Este sensor basado en el principio del Teorema de Bernouilli es de mayor aplicación en la medición de procesos industriales de producción continua y en los sistemas de transferencia de custodia.

En el Perú la Dirección General de Hidrocarburos del Ministerio de Energía y Minas estandarizó al registrador mecánico de presión diferencial como el medidor oficial para la medición de hidrocarburos. Con el desarrollo tecnológico de la electrónica, la informática y las telecomunicaciones, estos sistemas de medición mecánicos han quedado obsoletos y progresivamente se vienen reemplazando con sistemas de medición avanzados como los computadores de flujo que cumplen la misma función que los antiguos registradores, pero con la gran ventaja de una mejora en la medición de flujo instantáneo y el cálculo de los flujos volumétricos, energéticos y másicos mediante software basados en normas internacionales.

Algunas universidades e institutos tecnológicos de nivel superior en Lima y provincias vienen proyectando la implementación de modernos módulos de investigación para analizar y estudiar sistemas de medición de flujos haciendo uso de computadores de flujo. El objetivo es incluir dentro de sus planes curriculares la enseñanza de estas nuevas tecnologías de medición de flujo.

La demanda industrial por el uso de estos sistemas de medición industrial va en aumento, razón principal para que este proyecto de investigación aporte un desarrollo a las carreras profesionales de ingeniería afines a la industria así como a las carreras técnicas de los principales institutos tecnológicos del país.

### **2.3 Marco teórico**

El flujo de fluidos en tuberías cerradas se define como la cantidad de fluido que pasa por una sección transversal de la tubería por unidad de tiempo. Esta cantidad de fluido se puede medir en volumen o en masa. De acuerdo a esto se tiene flujo volumétrico o flujo másico.

Los medidores volumétricos determinan el caudal en volumen del fluido, bien sea directamente ( desplazamiento ) o indirectamente ( presión diferencial, área variable, velocidad, fuerza, tensión inducida, torbellino, ultrasónico ).

La medida del flujo volumétrico en la industria se lleva a cabo principalmente con elementos que dan lugar a una presión diferencial al paso del fluido. Entre estos elementos se encuentra la placa de orificio y el cono, elementos que se han seleccionado para el desarrollo del presente proyecto de investigación. El primer elemento ( placa de orificio ) es uno de los mas utilizados en el sector industrial por su principio de funcionamiento y facilidad con el usuario. El segundo elemento ( cono ) es una aplicación relativamente nueva en la industria, este elemento que trabaja bajo el mismo principio de presión diferencial viene alcanzando en la actualidad significativos avances en aplicaciones industriales, por su sencillez en cuanto a normas de instalación y la mayor rangeabilidad que ofrece con respecto a la placa de orificio.

#### **2.4 Marco conceptual**

En el presente proyecto de investigación se analiza y estudia como mejorar y optimizar la medición de flujo mediante el principio de la presión diferencial y presentar una propuesta de modernización y mejora en el plan curricular de las carreras de ingeniería afines al sector industrial.

En esta investigación se evalúa como ha evolucionado el uso del sensor del tipo placa de orificio dentro de un sistema de medición con tecnología electrónica. Este sensor de placa de orificio es considerado en la industria como uno de los de mayor aplicación motivo por el cual su estudio y conocimiento reviste significativa importancia en la formación de los estudiantes de las carreras de ingeniería vinculadas con los procesos industriales.

Se introduce en la investigación al sensor tipo cono el cual viene incrementando su aplicación en los últimos años por sus características propias de mayor exactitud y rangeabilidad en comparación con la placa de orificio.

Las señales de presión diferencial generadas por estos dos tipos de sensores son recibidas y tratadas en una celda multivariable ( MVT ) que viene integrada a un computador de flujo.

El estudio de estos sistemas computarizados de medición de flujo revisten una gran importancia en las carreras profesionales de ingeniería, por tratarse de técnicas avanzadas de última generación que vienen incrementado su uso en las plantas industriales donde se requiere optimizar la medición de flujos líquidos y gaseosos.

La variable flujo reviste significativa importancia en los procesos productivos, la medición correcta de esta variable influye directamente en la medición diaria de un proceso industrial.

La mejora de la medición mediante el uso de sensores de presión diferencial permite un mayor grado de confiabilidad de la información requerida de acuerdo a las normas API 21.1 y API 21.2

El sensado de la presión diferencial mediante placas de orificio y conos propuestos en este proyecto, reduce significativamente la incertidumbre en el sistema de medición, debido a que la presión diferencial medida es aplicada directamente a una celda multivariable (MVT), elemento sensor integrado al computador de flujo que se utilizará en el desarrollo del proyecto.

## **2.5 Principales definiciones**

En las últimas décadas la terminología utilizada en los sistemas de medición y control automático se ha unificado a nivel mundial, con el objetivo que todos los fabricantes de éstos sistemas utilicen el mismo lenguaje. Las recomendaciones y sugerencias realizadas por la Sociedad Internacional de Automatización (ISA) revisten una significativa importancia en el campo de la instrumentación industrial, control automático y automatización de procesos industriales.

Su difusión y comprensión a nivel de los cursos de pregrado en las carreras de ingeniería afines al sector industrial, permitirá a los egresados ser más competitivos cubriendo la actual carencia de profesionales en este campo.

Los principales términos son definidos a continuación <sup>1</sup>:

### *2.5.1 Campo de medida ( range )*

Es el rango de la variable a medir, esta compuesto por los valores mínimos y máximos que medirá el sensor y el transmisor.

### *2.5.2 Rangeabilidad ( Rangeability or Turndown )*

Es la relación entre el valor superior del rango y el menor valor de la medición que puede realizarse manteniendo la precisión de referencia del instrumento.

### *2.5.3 Alcance ( span )*

Viene definido como la diferencia entre el valor superior e inferior del campo de medida del instrumento. Es la región dentro de la cual una cantidad es medida, recibida o transmitida.

### *2.5.4 Error*

Es la diferencia entre la medición y el valor ideal de la variable medida. El error es originado por las imperfecciones de los instrumentos y de las variables no deseadas

---

<sup>1</sup> Creus,A (2011) Instrumentación Industrial. Editorial Marcombo, Barcelona, México D.F., 8ª. Edición. 776 p. que afectan un proceso industrial. Existe el error estático y el error dinámico. El primero se origina cuando el proceso se encuentra en condiciones de regimen permanente, el segundo viene dado por la diferencia entre el valor instantáneo y el indicado en el

instrumento, este valor de error depende del tipo de fluido en el proceso, su velocidad, del tipo de sensor, etc.

Resumiendo tenemos:

Error verdadero = Valor leído del instrumento – Valor ideal de la variable medida

Error absoluto = Valor leído – Valor verdadero

Error relativo = Error absoluto / Error verdadero

#### 2.5.5 Incertidumbre de la medida

Es la dispersión de los valores que pueden ser atribuidos razonablemente al verdadero valor de la magnitud medida. Para calcular la incertidumbre es importante considerar la estadística de las diferentes mediciones realizadas y las características de los instrumentos. Hay que tomar en cuenta que el instrumento patron de medición sea de mayor precisión que el instrumento que se va a calibrar. En el cálculo de la incertidumbre se usa el término mensurando que significa: magnitud particular objeto de una medición. La medición puede ser en forma directa o indirecta. El mensurado esta en function de una serie de magnitudes de entrada y la expression de está function puede ser experimental o un algoritmo de cálculo o bien una combinación.

#### 2.5.6 Exactitud ( accuracy )

Es el grado de conformidad entre un valor indicado y un estándar reconocido o un valor ideal, considerando este valor ideal como si fuera verdadero. Se entiende por conformidad a la máxima diferencia que se podría encontrar.

La exactitud se puede expresar en los siguientes terminos:

- En términos de la variable medida ( $\pm 1$  °C,  $\pm 0.1$  Bar)
- Como porcentaje de la Amplitud ( $\pm 0.6$  % of span)
- Como porcentaje del valor superior del alcance ( $\pm 2$  % FS)
- Como porcentaje de la lectura presente ( $\pm 1$  % of actual reading o  $\pm 0.5$  % rate)

#### 2.5.7 Precisión ( precision )

También conocido como repetibilidad ( repeatability ), es la máxima discrepancia de la salida para un número consecutivo de mediciones para un mismo valor de la entrada, en las mismas condiciones operativas, aproximándose en una misma dirección, para evoluciones en la escala completa. Se expresa corrientemente como un porcentaje del Span.

#### 2.5.8 Zona Muerta ( Dead band )

Es el rango en el que la entrada varía sin que se inicie una respuesta observable. Se expresa como un porcentaje del Span.

#### 2.5.9 Histéresis ( hysteresis )

Es aquella propiedad de un elemento evidenciada por la dependencia del valor de salida con los cambios anteriores de la entrada. Se expresa como un porcentaje del Span y se

refiere al máximo apartamiento cuando se evoluciona en el 100 % del alcance en los dos sentidos. Es importante indicar que el término Zona Muerta está incluido dentro de la histéresis.

### 2.5.10 Sensibilidad ( Sensitivity )

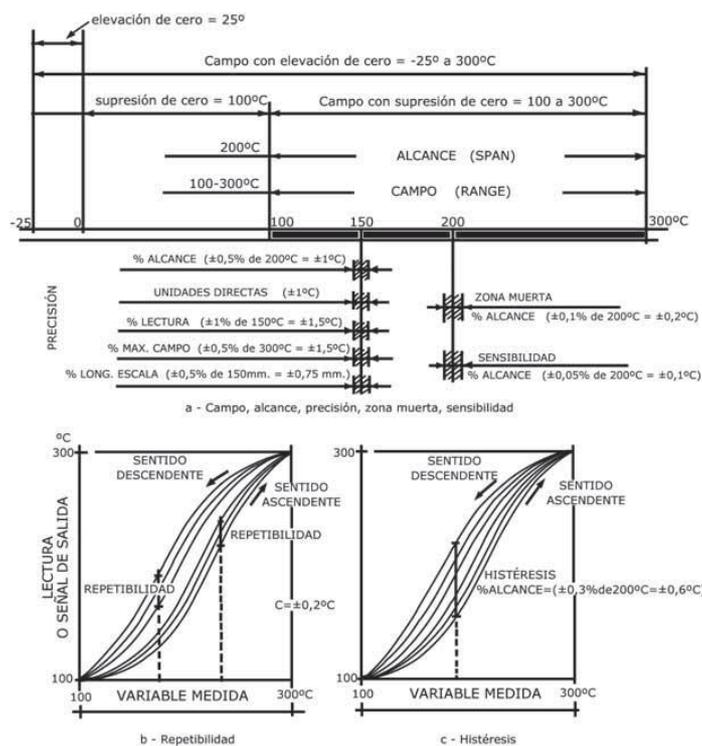
Es la relación entre el cambio de la magnitud de salida y el cambio en la variable o señal de entrada que la origina. Se parte del estado estacionario y se arriva a un nuevo valor de estado estacionario. Concepto relacionado con Banda muerta.

### 2.5.11 Repetibilidad ( Repeatability )

Es la máxima discrepancia de la salida para un número consecutivo de mediciones para un mismo valor de la entrada, en las mismas condiciones operativas, aproximándose en una misma dirección, para evoluciones en la escala completa. Se expresa corrientemente como un porcentaje del Span.

### 2.5.12 Linealidad ( Linearity )

Es la proximidad con la que una curva se ajusta a una línea recta. Se expresa usualmente como un porcentaje de la maxima desviación respecto del Span de salida.



**Figura 2.1** Definiciones de los instrumentos

Fuente: Instrumentación Industrial Antonio Creus Solé. Octava edición: Alfaomega Grupo Editor, México, septiembre 2010

## 2.6 Normas Internacionales para la medición de líquidos y gases

Los algoritmos para los cálculos de flujos se realizan basados en procedimientos y normas internacionales que permitan garantizar la confiabilidad de la medición del

sistema.

Las principales normas internacionales utilizadas en el campo de la medición de flujo de líquidos y gases son las siguientes <sup>2</sup>:

### Gas

AGA 3 / API 14.4: Cálculo de flujo compensado usando placa de orificio

( AGA Report # 3 – Orifice Metering of Natural Gas )

Parte 1 (1990 ): proporciona las ecuaciones básicas y los estados de incertidumbre para el cálculo del flujo mediante el uso de placas de orificio.

Parte 2 ( 2000 ): proporciona las especificaciones para la construcción e instalación de las placas de orificio, acondicionadores de flujo y todo equipo asociado al sistema de medición.

Parte 3 ( 1992 ): provee guías prácticas para la medición del gas natural. Los métodos para la medición del flujo másico y el flujo volumetrico son presentados en concordancia con la industria de los Estados Unidos de Norteamérica.

Parte 4 ( 1992 ): provee instrucciones para la implementación de sistemas de medición con placas de orificio, incluyendo subrutinas de documentación.

AGA 5: Cálculo del poder calorífico

( AGA Report # 5 – Fuel Gas Energy Metering )

Este reporte es un suplemento a los procedimientos de medición publicados. Proporciona la conversión de unidades de volumen de gas o masa – energía equivalentes a través del uso de datos asociados con las prácticas de la medición volumétrica.

AGA 7: Cálculo de flujo compensado usando turbina.

( AGA Report # 7 – Measurement of Natural Gas by Turbine Meter )

Este reporte proporciona las ecuaciones para la medición del gas natural a través de medidores tipo turbina.

AGA 8 / API 14.2: Cálculo del factor de compresibilidad (Z)

( AGA Report # 8 – Compressibility Factor of Natural Gas and Related Hydrocarbon Gases ).

Este reporte presenta información necesaria ( incluyendo FORTRAN 77 ) para calcular la densidad de los gases en sus diferentes fases, factores de compresibilidad y

---

<sup>2</sup> Smar (2006). AuditFlow Sistema de Medición de Flujo. Web: <http://www.smar.com/espanol/faleconosco.asp>

supercompresibilidad para gas natural y otros gases de hidrocarburos.

AGA 9: Cálculo de flujo compensado usando ultrasónico

( AGA Report # 9 – Measurement of Gas by Multi-Path Ultrasonic Meters )

Este reporte es para analizar el tiempo de transito de los sensores (multi-path) de los

medidores de flujo por ultrasonido, típicamente para medidores desde 6" usados en la medición de gas natural.

AGA 11: Cálculo del flujo usando Coriolis

( AGA Report # 11 – Measurement of Natural Gas by Coriolis Meter )

Este reporte provee especificaciones basadas en la performance y métodos de prueba para los medidores Coriolis utilizados en la medición de flujo de gas natural. El reporte contiene apendices como la teoría, operación, exactitud, investigación y datos de pruebas.

API 21.1: Auditoria, reportes, calibración, verificación y seguridad de los datos

### Líquidos

API 5.3. Medición de hidrocarburos líquidos por turbina

API 5.6: Medición de hidrocarburos líquidos por medidores Coriolis

API 11.1: Factor de corrección para temperatura

API 11.2.1: Factor de corrección para presión

API 12.2.1. : Factores de corrección para medición volumétrica

API 12.2.2: Medición para ticket

API 20.1 Medición de apropiación

API 21.2: Auditoria, reportes, calibración, verificación y seguridad de datos

ISO 4267-2: Cálculo de cantidades para petróleo

ISO 6551 / API 5.5. : Fidelidad y seguridad en la transmisión de pulso

GPA TP15: Cálculo de presión de equilibrio

GPA TP25: Factor de corrección para temperatura de hidrocarburos liviano

## **2.7 Concepto de Medición de flujo**

En la mayor parte de las operaciones realizadas en los procesos industriales y en las efectuadas en laboratorio y en plantas piloto es muy importante la medición de flujos de líquidos y gases.

Existen dos tipos de medición de flujos, la medición volumétrica que determina el caudal en volumen de un fluido y la medición másica que determina el caudal masa compensado con la medición de la presión y temperatura<sup>3</sup>.

---

<sup>3</sup>Creus,A (2011) Instrumentación Industrial. Editorial Marcombo, Barcelona, México D.F., 8ª. Edición. 776 p.

### *2.7.1 Medición volumétrica*

Los medidores volumétricos determinan el caudal en volumen del fluido en forma directa ( desplazamiento ) o en forma indirecta ( presión diferencial, velocidad, tensión inducida y área variable entre los mas importantes ).

A continuación se detalla los principales sistemas de medición de flujo utilizados en la industria con sus respectivos elementos:

Sistema 1: Presión Diferencial

Elementos: Placa de Orificio

Cono

Tubo Pitot

Tubo Venturi

Tobera

Tubo Annubar

Sistema 2: Velocidad

Elementos: Turbina

Ultrasonido

Sistema 3: Tensión Inducida

Elementos: Medidor Magnético

Sistema 4: Área variable

Elemento: Rotámetro

Sistema 5: Desplazamiento positivo

Elemento: Medidor rotativo

### *2.7.2 Medición Másica ( Caudal – Masa )*

En la industria se utilizan normalmente medidores volumétricos de flujo, en ocasiones interesa medir el caudal – masa, sea inferencialmente por compensación de la presión, la temperatura o la densidad, o bien aprovechando características medibles de la masa con sistemas básicos de medida directa, los instrumentos térmicos, los de momento angular y los de Coriolis.

Sistema 1: Térmico

Elemento: Diferencia de temperatura en dos sondas de resistencia

Sistema 2: Momento angular

Elementos: Medidor axial

Medidor axial de doble turbina

Sistema 3: Coriolis

Elemento: Tubo de vibración

## **2.8 Medición volumétrica bajo el principio de la presión diferencial**

La medición de flujo por el principio de presión diferencial es el método de mayor difusión y aplicación en la industria desde hace varias décadas, debido a la simplicidad en su implementación y un costo bastante bajo en comparación con otros métodos existentes. Sin embargo uno de los principales problemas que presenta este método es la poca exactitud en comparación con otras tecnologías existentes como la medición por

campos magnéticos ( Ley de Faraday ) o medición por el principio de ultrasonido entre los mas importantes y conocidos en la industria actual.

Existen una gran variedad de sensores de flujo que se utilizan en la industria. Para el proyecto de investigación propuesto se analizará los sensores de presión diferencial tipo Placa de Orificio y Cono.

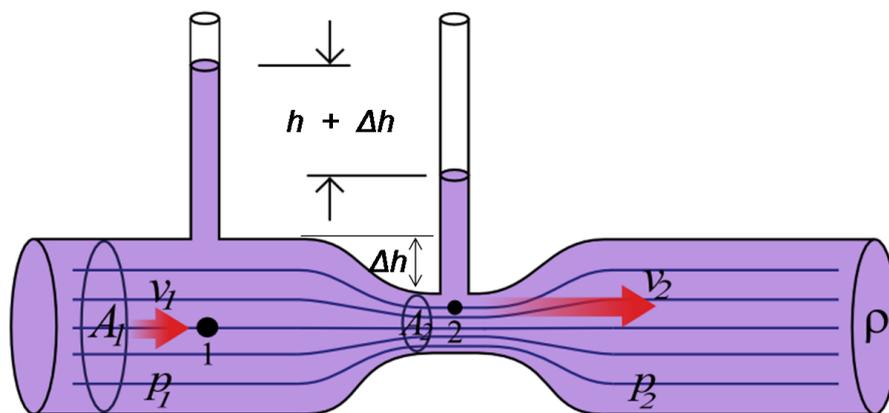
### 2.8.1 Sensores de presión diferencial aplicados al proyecto de investigación.

Los sensores de presión diferencial son considerados los de mayor aplicación en el sector industrial por su bajo costo y su principio básico de medición basado en el Teorema de Bernouilli.

*Características de los sensores de presión diferencial:*

- Bajo costo de adquisición
- Tecnología simple y aceptada
- Aplicaciones en grandes diámetros de tubería
- Se utilizan con sistemas de tecnología mecánica y electrónica digital

Principio: **Teorema de Bernouilli a una tubería horizontal**



**Figura 2.2** Principio de Bernouilli

Fuente: [es.wikipedia.org/wiki/Principio\\_de\\_Bernouilli](http://es.wikipedia.org/wiki/Principio_de_Bernouilli). Ultima revisión 25 Diciembre 2016

Teorema de Bernouilli

$$P_1 + A_1 + V_1 = P_2 + A_2 + V_2$$

$P_{1,2}$ : Presión Absoluta

$V_{1,2}$ : Velocidades

$A_{1,2}$ : Secciones

### 2.8.2 Teorema de Bernoulli, sobre conservación de la energía, aplicado al fluido que pasa por una tubería

El teorema establece que la diferencia entre la presión en la tubería y la presión en un estrechamiento en la tubería es proporcional a la diferencia entre el cuadrado de la velocidad del fluido en la tubería y el cuadrado de la velocidad del fluido en el estrechamiento.

En términos más sencillos, el flujo es igual a una constante multiplicada por la raíz cuadrada de la presión diferencial a través del estrechamiento.

Flujo Volumétrico:

$$Q_v = C_d A_t E \varepsilon \sqrt{\frac{2 \Delta P}{\rho}}$$

Donde:

$Q_v$  = Flujo volumétrico

$C_d$  = Coeficiente de descarga

$E$  = Velocidad de Approach

$A_t$  = Meter Throat ( Minimum Cross Section Area A )

$\varepsilon$  = Coeficiente de expansión ( solamente par fluidos gaseosos )

$\rho$  = Densidad del fluido

$\Delta P$  = Diferencial de presiones (  $P_1 - P_2$  )

### 2.8.3 Placa de orificio

#### 2.8.3.1 Características

La placa de orificio es el elemento primario para la medición de flujo más sencillo que existe en la industria. La placa de orificio es una placa metálica delgada plana circular con un orificio concéntrico, excéntrico ó segmentado y se fabrica de acero inoxidable. La placa de orificio se instala en la tubería entre dos bridas. En las bridas se hacen dos tomas de presión, una aguas arriba y otra aguas abajo. La presión diferencial que se mide por estas dos tomas es proporcional al flujo.

La placa de orificio tiene una dimensión exterior igual al espacio interno que existe entre los tornillos de las bridas del montaje, el espesor del disco depende del tamaño de la

tubería y la temperatura de operación, en la cara de la placa de orificio que se conecta por la toma de alta presión, se coloca perpendicular a la tubería y el borde del orificio, se tornea a escuadra con un ángulo de  $90^{\circ}$  grados, al espesor de la placa se le hace un biselado con un chaflán de un ángulo de  $45^{\circ}$  grados por el lado de baja presión, el biselado afilado del orificio es muy importante, es prácticamente la única línea de contacto efectivo entre la placa y el flujo, cualquier rebaba, ó distorsión del orificio ocasiona un error del 2 al 10% en la medición, además, se le suelda a la placa de orificio una oreja, para marcar en ella su identificación, el lado de entrada, el número de serie, la capacidad, y la distancia a las tomas de presión alta y baja.

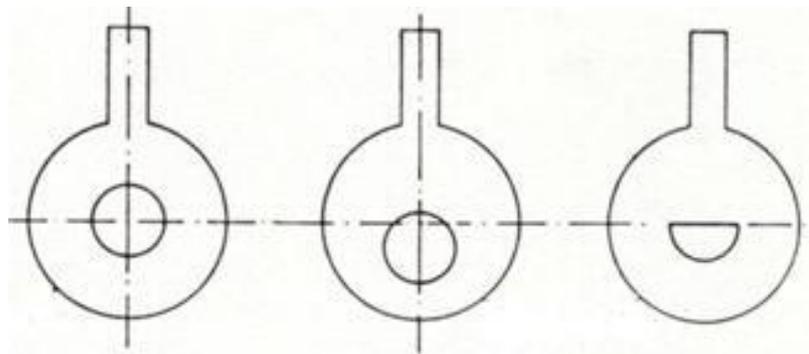
En ocasiones a la placa de orificio se le perfora un orificio adicional en la parte baja de la placa para permitir el paso de condensados al medir gases, y en la parte alta de la placa para permitir el paso de gases cuando se miden líquidos.

#### 2.8.3.2 Tipos de placas de orificio

Existen 3 tipos de placas de orificio:

- Concéntrica
- Excéntrica
- Segmentada

Los orificios excéntricos y segmental permiten medir el flujo de fluidos que tengan pequeñas cantidades de sólidos y gases. El pequeño agujero que aparece en la placa se usa para evitar que se acumulen líquidos o gases en la tubería.



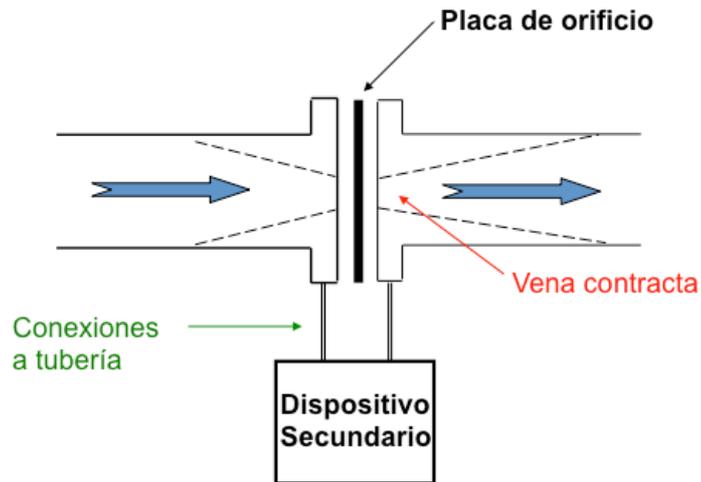
**Figura 2.3** Placa de orificio, concéntrica, excéntrica y segmentada

Fuente: Instrumentación Industrial Antonio Creus Solé. Octava edición: Alfaomega Grupo Editor, México, septiembre 2010

#### 2.8.3.3 Vena Contracta

Es el punto de máxima velocidad y mínima presión. Esta relacionado con el diámetro del orificio y el tamaño de la tubería.

En el punto de la vena contracta se obtiene el menor valor de presión que se traduce en un aumento de velocidad, en ese punto se obtiene la mayor velocidad.



**Figura 2.4** Vista de corte de la instalación de una placa de orificio en una tubería y punto de vena contracta. Fuente propia

#### 2.8.3.4 Geometría de una placa de orificio

1: Aguas arriba

2: Aguas abajo

a: Dirección del flujo

&: Ángulo del chaflán que permite disminuir las pérdidas por fricción entre el fluido y la pared de la placa. Su valor debe ser de aproximadamente 45 grados.

e: espesor de la cara de la placa en contacto con el fluido. Su valor debe estar comprendido entre 0.005D y 0.02D

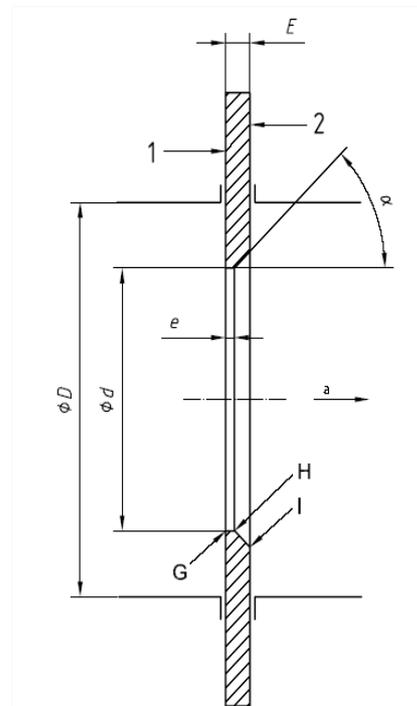
E: espesor de la placa, su valor debe estar entre e y 0.05D.

D: diámetro de la tubería

d: diámetro del orificio de la placa, su valor debe ser superior a 12.5 mm.

G: Chaflán de contacto con un radio inferior a 0.004D.

H e I: Chaflans de soldadura no requieren



#### 2.8.3.5 Beta de una placa de orificio

El Beta de una placa de orificio está definido por la relación de diámetros interno y externo de la placa. El

cálculo correcto del Beta en este proyecto tiene una gran importancia para la medición exacta del flujo.

Relación de diámetros ( BETA ) de una placa de orificio:

$$\beta = d / D$$

La relación de diámetros debe estar comprendida entre:

$$0.1 < \beta < 0.75$$

Ecuaciones Básicas

$$A_t = \pi / 4 ( D^2 - d^2 )$$

$$E = \frac{1}{1 - \beta^4} \sqrt{\quad}$$

$$\beta = \sqrt{\frac{D^2 - d^2}{D}}$$

Donde:

$A_t$  : Área efectiva

$E$  : Velocidad de Approach

$\beta$  : Relación de diámetros en una placa de orificio

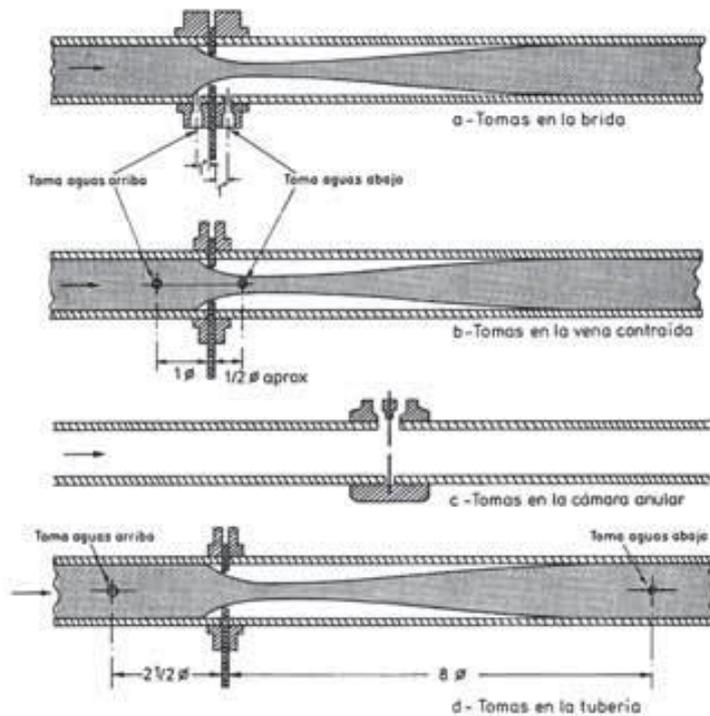
#### 2.8.3.6 Tipos de diseños de placas de orificio



**Figura 2.6**  
Placa de orificio tipo universal  
Fuente: Catálogo de Cameron  
Measurement Systems



**Figura 2.7**  
Placa de orificio tipo paleta  
Fuente: Catálogo de Cameron  
Measurement Systems



**Figura 2.8** Instalación de una placa de orificio. Disposición de las tomas de presión diferencial

Fuente: Instrumentación Industrial Antonio Creus Solé. Octava edición: Alfaomega Grupo Editor, México, septiembre 2010

### 2.8.3.7 Consideraciones para instalar una placa de orificio

Para instalar una placa de orificio se debe tener en cuenta algunas precauciones:

- La parte biselada del orificio debe coincidir con el lado de baja presión, de lo contrario originará un error en la lectura.
- La placa debe centrarse de tal modo que el orificio quede concéntrico a la tubería.
- Se obtienen mejores resultados en las mediciones de flujo cuando el orificio es precedido de un tramo largo de tubería recta, y seguido de otro tramo recto equivalente a por lo menos 5 diámetros de tubería.
- Si el fluido que llega a la placa no fluye paralelamente y con una mínima turbulencia, es necesario instalar un acondicionador de flujo, que esta constituido por tubos pequeños ensamblados dentro de un tubo más grande.

### 2.8.3.8 Tomas de Presión

Las tomas de presión se hacen antes ( aguas arriba ) y después de la placa ( aguas abajo ). A través de éstas se puede medir la presión diferencial que permite obtener el flujo. Los lugares donde se realizan las tomas de presiones son muy importantes pues de

estos depende en gran parte el coeficiente de descarga C. Esto debido principalmente a la distribución de presiones dentro de la tubería.

#### 2.8.3.9. Tomas de Bidas ( Flange Taps )

Es el tipo de toma mas utilizado actualmente en la industria, las tomas de presión de alta y baja se conectan directamente en las bridas y no es necesario perforar la tubería. Las tomas de alta presión ( P1 ) y baja presión ( P2 ) se colocan a una distancia de 1 pulgada a ambos lados de la placa de orificio.

#### 2.8.3.10 Bidas porta placas de orificio

Las placas de orificio es uno de los mas populares sensores para la medición de gases y líquidos con baja viscosidad. La brida – unión porta placas ayuda a asegurar una posición correcta de la placa cuando se instala en la tubería.

Las bridas porta placas se fabrican de acuerdo a las normas ANSI y las tomas de presión diferencial son maquinas en estas bridas.

Se fabrican desde 1” hasta tamaños mayores en función de los rangos de presión y calidad de materiales.



**Figura 2.9** Bida – unión porta placa de orificio

Fuente: Cameron Measurement Systems



**Figura 2.10** Unión de brida de orificio de presión diferencial Daniel

Fuente: Emerson Process

**Cuadro 2.1** Especificaciones de las presiones / materiales

Pressure Ranges	ANSI 300 150 2500	
Flange Material	ASME A105 Carbon Steel ASME A350 F2 Carbon Steel ASME A182 F316 Stainless Steel	-20° to 800° F (-29° to 426° C) -50° to 800° F (-46° to 426° C) -425° to 1500° F (-254° to 816° C)
Studs/Nuts Material	ASME A193 B7/A194 2H (40° F) ASME A193 B7M/A194 2HM (NACE) ASME A320 7M (NACE)	Standard -50° F (-46° C) minimum -100° F (-73° C) minimum
Gasket Material	Flexitallic™ 316 Stainless Steel spiral wound	All pressures; temperatures up to 900° F (482° C)
	Flexicarb™ 316 Stainless Steel spiral wound	Same applications as Flexitallic; contains an added graphite filler to assist in flange sealing
	NA-60™ General purpose nitrile rubber/aramid fiber	Pressures up to 1000 psi; temperatures up to 500° F (260° C)

Fuente: Cameron Measurement Systems

#### 2.8.4 Sensor para medir flujo tipo Cono ( V-Cone )<sup>4</sup>

El medidor de flujo de presión diferencial V-Cone es una tecnología de medición de flujos con alta precisión, aplicable a gran variedad de fluidos, todo tipo de condiciones y un amplio intervalo de números de Reynolds. Utiliza el mismo principio físico que otros medidores de flujo de presión diferencial: el teorema de conservación de la energía del flujo de fluidos a través de una tubería. No obstante, las características de desempeño del V-Cone, muy notables, son el resultado de su exclusivo diseño, que incluye un cono central en el interior del tubo.

El cono interactúa con el flujo del fluido, modificando su perfil de velocidad para crear una región de presión más baja inmediatamente aguas abajo del cono. La diferencia entre la presión estática de la línea y la presión más baja creada aguas abajo del cono se mide a través de dos tomas piezosensibles. Una de las tomas se coloca inmediatamente aguas arriba del cono y la otra se coloca en la cara orientada aguas abajo.

<sup>4</sup> McCrometer ( 2007 ) Lit. #24508-94 Rev.2.9/02-08. Tecnología avanzada de medidores de flujo de presión diferencial

Después, la diferencia de presión se puede incluir en una derivada de la ecuación de Bernoulli para determinar el régimen de flujo. La posición central del cono en la línea optimiza el perfil de velocidad del flujo en el punto donde se hace la medición, asegurando mediciones de flujo altamente precisas y confiables, sin importar la condición del flujo aguas arriba del medidor.

El sensor tipo cono es un medidor que genera presión diferencial. Es el elemento primario en un sistema de medición de flujo. El sensor tipo cono crea una señal de presión diferencial que se utiliza para determinar el flujo del proceso. Este sensor es elemento fundamental de la mejora propuesta en este proyecto de investigación.

En base a las teorías de Newton, Venturi y Bernoulli se construyó el primer medidor comercial de flujo Venturi a fines del siglo XIX. A principios del siglo XX se construyó la placa de orificio, sensor que revolucionó la industria. Estudios posteriores de estos medidores llevaron a la creación de una norma internacional de elementos de flujo de presión diferencial y las investigaciones en materia de funcionamiento de medidores continúan hasta el día de hoy.

A principios de los años 80 utilizando las teorías y observaciones comunes a todos los dispositivos de medición de flujo de presión diferencial, Mc Crometer creo el cono, un dispositivo que permitiría el uso efectivo de la medición de flujo bajo el principio de la presión diferencial en aplicaciones no tradicionales. El cono utiliza los principios básicos comunes a todos los medidores de flujo de presión diferencial, cuyo núcleo común es el teorema de Bernoulli, sobre conservación de la energía, aplicado al fluido que pasa por una tubería.

El cono crea esta presión diferencial con un estrechamiento cónico colocado en el centro de la tubería de medición. Este arreglo permite al medidor desarrollar una región de presión baja de velocidad alta, sumamente turbulenta, directamente en la corriente descendente del cono.

La diferencia de presión a través del cono se mide entre dos tomas. Una mide la presión de la corriente ascendente del cono en la pared del tubo del medidor, mientras que la otra mide la presión de la corriente descendente del cono por su centro.

Esta diferencia de presión se incorpora en una derivación de la ecuación de Bernoulli para determinar el régimen de flujo que pasa por el medidor.

La forma del cono especialmente diseñada y construida, es la clave del éxito del medidor. Debido a que esta centrada en la línea, puede interactuar con el flujo del núcleo de alta velocidad. Otro aspecto único del cono es como actúa sobre el perfil de la velocidad del fluido. En una tubería no obstruida, la fricción hace que el flujo más cercano a la pared de la tubería viaje más lentamente que el flujo en el núcleo. Esto obliga al perfil de velocidad del fluido a tomar una forma convexa. La configuración de la tubería de la corriente

ascendente también influye en este perfil y distorsiona su figura. El contorno del cono sin embargo, dispersa el flujo mas uniformemente a través de la sección transversal total de la tubería, aplanando eficazmente el perfil de velocidad del fluido. El cono actúa, básicamente, como su propio acondicionador de flujo. El contorno del cono también asegura que ningún fluido impacte sobre el borde del cono abruptamente. Esto reduce al mínimo el desgaste y permite calibrar el medidor con menos frecuencia.

El contorno de la corriente descendente del cono mejora la estabilidad de la señal del medidor. En otros dispositivos de presión diferencial el elemento primario típicamente genera grandes vórtices en la corriente descendente. En el cono, en cambio, la corriente descendente del vértice del cono crea vórtices mas pequeños altamente turbulentos. Estos pequeños y turbulentos vórtices crean una fluctuación de baja amplitud constante, de alta frecuencia, en la presión diferencial. Esta baja amplitud de fluctuación en la presión diferencial se correlaciona con poco ruido en la señal del medidor.

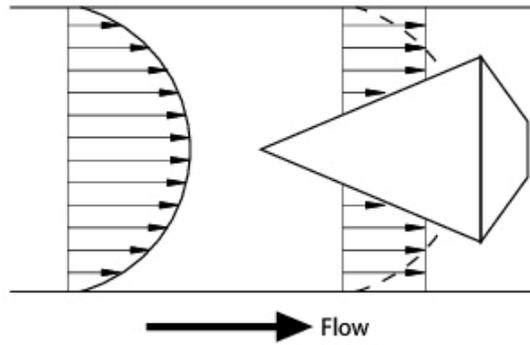
Poco ruido de la señal trae como consecuencia desgaste mínimo del cono. El acondicionamiento del flujo e interacción eficiente del flujo en el núcleo, es el resultado directo de la forma única del cono. Debido al contorno del cono así como su ubicación dentro de la tubería permite a este sensor medir el flujo de una manera única.

Los ensayos de posibilidades de variación revelan que los flujos que llegan a un número Reynolds de 8,000 son típicamente lineales a la raíz cuadrada de la presión diferencial generada por el medidor, dependiendo, en cierta forma, del tamaño del medidor y del cono. Además, los flujos que entran en las regiones de transición y laminar del número Reynolds se pueden medir aplicando una curva simple para que encajen con la presión diferencial medida. En pruebas posteriores, el cono exhibe una capacidad de repetición superior a una décima de por ciento de régimen de flujo.

Esta repetibilidad rinde una indicación de flujo instantanea muy precisa . Las pruebas de precisión demuestran que se puede lograr un elemento primario de precisión superior a la mitad de uno por ciento en la lectura en la mayoría de las aplicaciones. Según sea la instrumentación secundaria, la gama de aplicación y el tipo del fluido puede lograr una precisión en el sistema entre uno y dos por ciento en la lectura. Para el proyecto la aplicación del computador de flujo mejora el grado de exactitud y precisión en menos de 1% en el rango total de medición.

Las pruebas de los efectos de la tubería de corriente ascendente y descendente, indican que el cono requiere periodos mínimos de marcha del medidor. Por lo general, no se requiere mas de cero a tres diámetros aguas arriba y de cero a cinco diámetros aguas abajo de tubería continua.

El cono es ideal para diversas aplicaciones de medición de flujo, debido a esta característica de instalación referida.

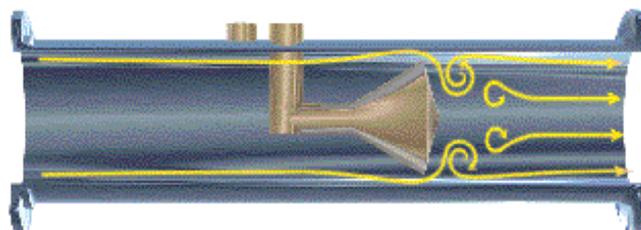


**Figura 2.11** Geometría de un sensor tipo cono  
Fuente: Cameron Measurement Systems



*NUFLO DP Cone Meter shown with the Scanner® 2000 microEFM*

**Figura 2.12** Sensor tipo cono ensamblado con computador de flujo  
Fuente: Cameron Measurement Systems



**Figura 2.13** Sensor tipo Cono, vista interior dentro de la tubería formado vórtices  
Fuente: Mc Crometer

El sensor tipo cono forma vórtices cortos cuando el flujo pasa a través de él. Estos vórtices cortos crean una baja amplitud y una señal de frecuencia alta lo cual permite una

excelente estabilidad en la medición.



**Figura 2.14** Sensor tipo Cono, vista interior dentro de la tubería

Fuente: Mc Crometer

#### 2.8.4.1 Principales características técnicas

Exactitud: Hasta + 0.5% del flujo actual ( ciertos fluidos en función del número de Reynolds pueden requerir calibraciones especiales ).

Repetibilidad: + 0.1 % o mejor

Rangeabilidad: 10:1 y mayores rangos

Beta estándar: 0.45 a 0.85

Pérdida de carga: Varía en función del valor del Beta y el valor de presión diferencial.

Requerimientos de instalación en la tubería:

- De 0 a 3 diámetros aguas arriba (upstream).
- De 0 a 1 diámetro aguas abajo (downstream).

Materiales de construcción:

- Duplex 2205
- Acero inoxidable 304 y 316
- Hastelloy C-276
- 254 SMO
- Acero al carbono
- Otros materiales bajo requerimientos especiales.

Tamaños de fabricación: Desde 0.5" hasta 120"

Tipos de conexión: Roscado, bridado o soldado. Otros tipos bajo requerimiento.

Configuración: Fijo dentro de tubería roscado y bridado, tipo wafer, tipo inserción y tipo para soldar.

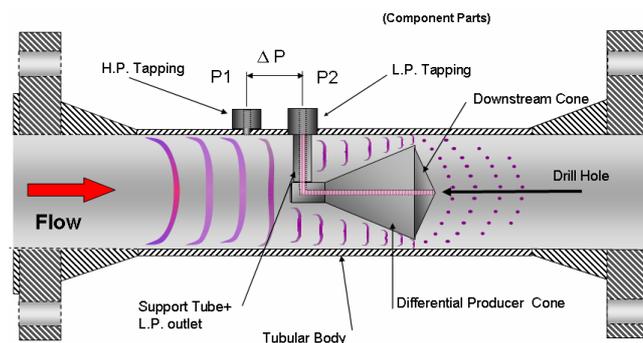
#### 2.8.4.2 Principales ventajas de utilizar un sensor tipo cono

- Alta exactitud.
- Alta repetibilidad.
- Mínimos requerimientos de tubería rectas aguas arriba y aguas abajo en su instalación.

- Gran rangeabilidad en comparación con la placa de orificio.
- Bajas pérdidas de carga.
- Mide fluidos líquidos limpios y sucios.
- Mide gases húmedos y lodos.
- Baja señal de ruido.
- Es autolimpiante, no requiere mantenimiento.

#### 2.8.4.3 Principales aplicaciones del sensor tipo cono en la industria

- Sistemas de producción de petróleo y gas
- Plantas de manufactura de procesos industriales
- Refinerías
- Plantas de agua
- Plantas químicas
- Industria farmacéutica
- Industria de alimentos y bebidas
- Plantas de generación de energía
- Minería.



**Figura 2.15** Partes de un sensor tipo cono  
Fuente: Cameron Measurement Systems

#### 2.8.4.4. Nuevo cono inteligente para medición de flujos por el principio de presión diferencial <sup>5</sup>

##### Principales aplicaciones

- Medición de flujos de líquidos y gases
- Medición de flujos de vapores y sistemas de inyección de vapores

<sup>5</sup> Dynamics ( 2015 ) SmartCone Specifications

- Medición de gas húmedo
- Patines de compresión de gas natural

- Sistemas de transferencia de custodia
- Medición de flujo en los cabezales de pozo
- Separadores de prueba en plantas de petróleo y gas natural

#### Confiabilidad del diseño presentado

El diseño mostrado incluye una toma directa para la variable temperatura ( RTD Sensor ).  
Opcionalmente incluye una toma adicional para la medición de la presión estática.  
Construido con acero de alta resistencia.

#### Flexibilidad del diseño

Este sensor se puede construir hasta ANSI 2500  
Se fabrica con conexiones roscadas NPT, bridas ANSI y Wafer  
Rangeabilidad del diseño de 10:1  
Exactitud hasta +/- 0.5%  
Repeteabilidad: +/- 0.1% de la escala total

#### 2.8.4.5 Ecuaciones básicas

Cociente de área efectiva ( $A_t$ ), Cociente Beta ( $\beta$ ) y velocidad de aproximación ( $E$ ),  
expresado como:

$$A_t = \pi / 4 ( D^2 - d^2 )$$

$$\beta = \sqrt{\frac{D^2 - d^2}{D^2}}$$

$$E = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^4}}$$

Flujo volumétrico expresado en:

$$Q_v = C_d A_t E \epsilon \sqrt{\frac{2 \Delta P}{\rho}}$$

Flujo másico, expresado como:

$$Q_m = C_d A_t E \epsilon \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho}}$$

Donde:

$Q_v$  = Flujo volumétrico

$Q_m$  = Flujo másico

$C_d$  = Coeficiente de descarga

$E$  = Velocidad de aproximación

$A_t$  = Área de medición (Sección transversal mínima del área  $A$ )

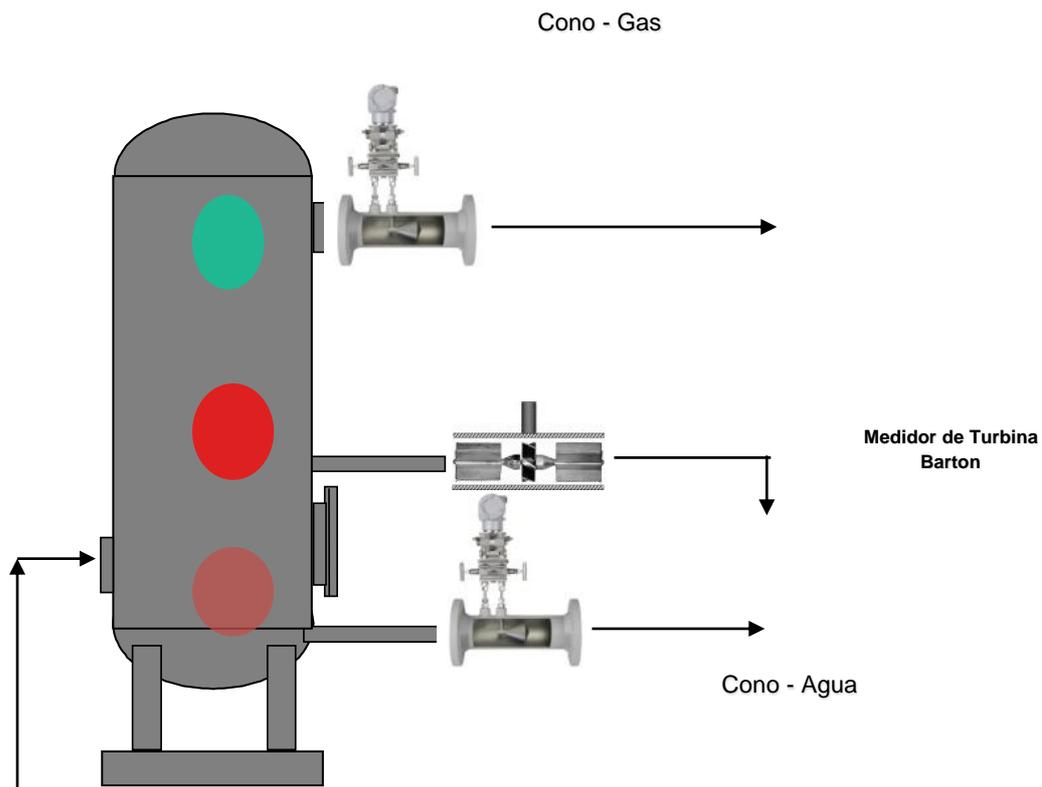
$\epsilon$  = (Factor  $Y$ ) Coeficiente de expansión (fluidos gaseosos únicamente)

$\rho$  = Densidad del fluido

$\Delta P$  = Presión diferencial (  $P_1 - P_2$  )

#### 2.8.4.6 Calibración y determinación del coeficiente de descarga [C.d.]

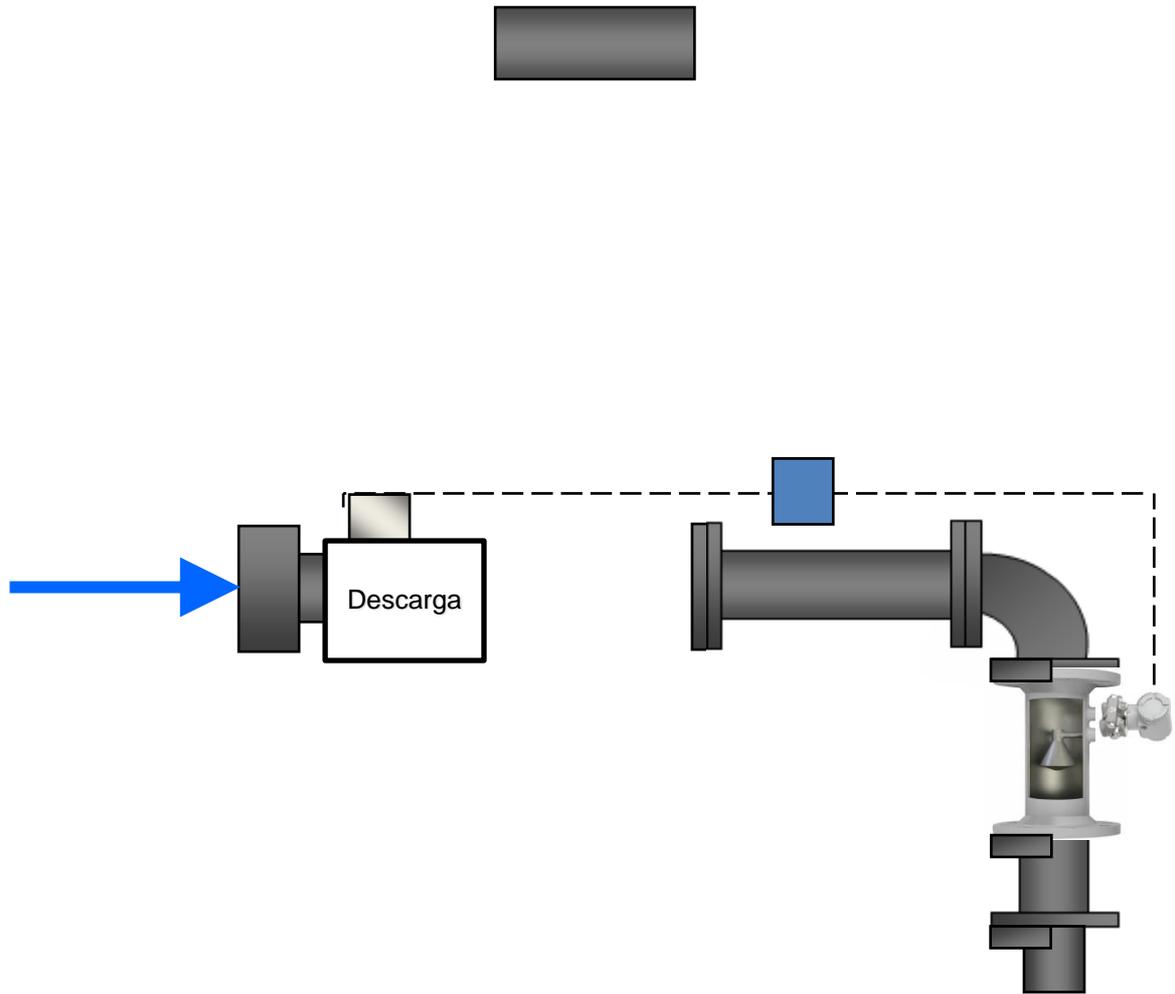
Cada Medidor Tipo cono está previamente calibrado para determinar su coeficiente de descarga (C.d.), lo cual permite un rendimiento óptimo. También se puede obtener otras determinaciones de C.d. óptimo por medio de diversos laboratorios en EE.UU. y Europa. Esto permite determinar números de Reynolds más altos. (los tamaños de medidores más grandes pueden verse limitados por las velocidades de flujo e incertidumbres del laboratorio de prueba).



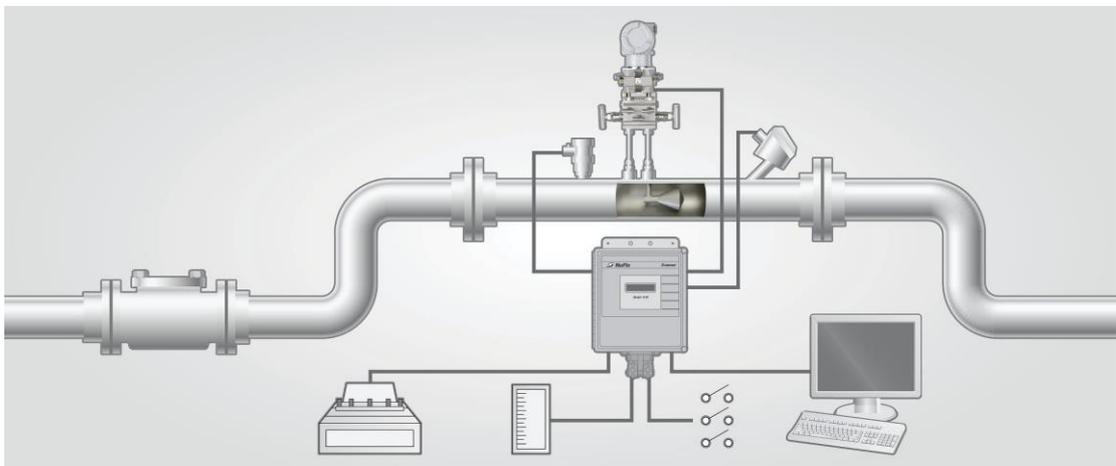
**Fig. 2.16** Separador de 3 fases en una bacteria de producción de petróleo.

Aplicación del sensor tipo cono en la fase de agua y gas

Cortesía: Cameron Measurement Systems



**Fig. 2.17** Sistema de Inyección de agua  
Cortesía: Cameron Measurement Systems



**Fig. 2.18** Sistema de medición de flujo Computador de Flujo + Sensor tipo Cono

### *2.8.5 Sistemas Electrónicos de Medición (EMS-Electronic Measurement System) denominado Computadores de Flujo<sup>6</sup>*

Los computadores de flujo son los dispositivos mas versátiles que actualmente se utilizan para la medición de flujo a nivel mundial. Cada computador puede operar de manera autónoma e independiente, una unidad terminal remota conocida como RTU o un controlador de procesos, o bien como un nodo en una red SCADA completa.

---

<sup>6</sup> Cameron / Scanner ( 2015 ) Computadores de flujo serie Scanner 2000 CAMERON

Estos dispositivos tienen la gran ventaja de alimentarse con baterías de litio o paneles solares lo cual le permiten una excelente autonomía, adicionalmente trabajan con un software de interfaz con funciones completas y de fácil uso para su configuración y mantenimiento. También es posible alimentarlos con VDC externa. Cuando se aplica este tipo de alimentación, la batería de litio queda en espera para garantizar una medición sin interrupciones, disminuyendo los costos de un sistema de alimentación en reserva.

Los computadores de flujo miden volumen estándar, masa y flujos de energía de vapor saturado y muchos tipos de gases y líquidos. Utilizan un sensor integrado para las mediciones de presión diferencial, presión absoluta y temperatura. Adicionalmente estos equipos pueden recibir señales de otros medidores de flujo como las turbinas o los ultrasonidos, potenciando su funcionamiento en una planta industrial.

Los computadores de flujo pueden monitorear múltiples valores en forma simultánea, incluso los que se usan solo para automatizar procesos. Opcionalmente pueden configurarse con una salida de 4 a 20 mA y un control PID para regular de manera efectiva variables de proceso como presión estática, presión diferencial, temperatura y flujo. La salida se configura para regular una válvula de control o una unidad de velocidad ajustable y los parámetros de control se ajustan con el software del equipo.

Los computadores de flujo pueden utilizar protocolo Fieldbus Foundation, su protocolo estándar es Modbus. A través de la implementación de múltiples computadores de flujo y un administrador de red accesible desde la web, se puede implementar un sistema de automatización inmune a la pérdida de datos, demoras y riesgos. En el caso que se interrumpan las comunicaciones, los computadores de flujo y el administrador de la red se sincronizan automáticamente para restaurar los registros de datos faltantes. Dependiendo del tipo de configuración de computadores de flujo se pueden monitorear una gran cantidad de puntos de medición de flujo, optimizando las lecturas de campo en una planta industrial.

#### 2.8.5.1 Opciones del sensor

Los computadores de flujo se pueden instalar en medidores tipo turbina, sensores tipo placa de orificio y sensores tipo cono para la medición de líquidos y gases. También se pueden conectar a medidores de flujo tipo ultrasónicos y otros sensores primarios de flujo. Para la aplicación de este proyecto de investigación donde se requiere la medición por el principio de la presión diferencial, se adiciona al computador de flujo un transmisor multivariable integral.

#### 2.8.5.2 Control

Los computadores de flujo tienen la opción electrónica de control automático, para este propósito se les adiciona una tarjeta con salida de 4-20 mA y el algoritmo PID. Con esta opción pueden controlar las variables de proceso como la presión estática, presión diferencial, temperatura y flujo. La salida de 4-20 mA puede regular una válvula de control o un accionador de velocidad ajustable mediante el control de un solo parámetro, como el flujo o cualquier otro parámetro.

#### 2.8.5.3 Autonomía de alimentación

Los computadores de flujo están diseñados para trabajar en forma autónoma con una batería de litio o un sistema de alimentación mediante paneles solares.

#### 2.8.5.4 Software de configuración

Todos los computadores de flujo son diseñados para trabajar con un software de configuración y creación de informes. Estos software son instalados en las PCs y realizan las siguientes funciones:

- Permite que el usuario exporte, descargue e imprima registro de flujo, eventos, alarmas y datos de configuración para compartir con otros usuarios en un formato compatible con Windows. Los usuarios pueden visualizar las mediciones de flujo en forma tabular o con gráfico de tendencias, lo cual permite emitir informes profesionales personalizados.
- Realiza los ajustes del PID para los computadores que vienen con la opción de control.

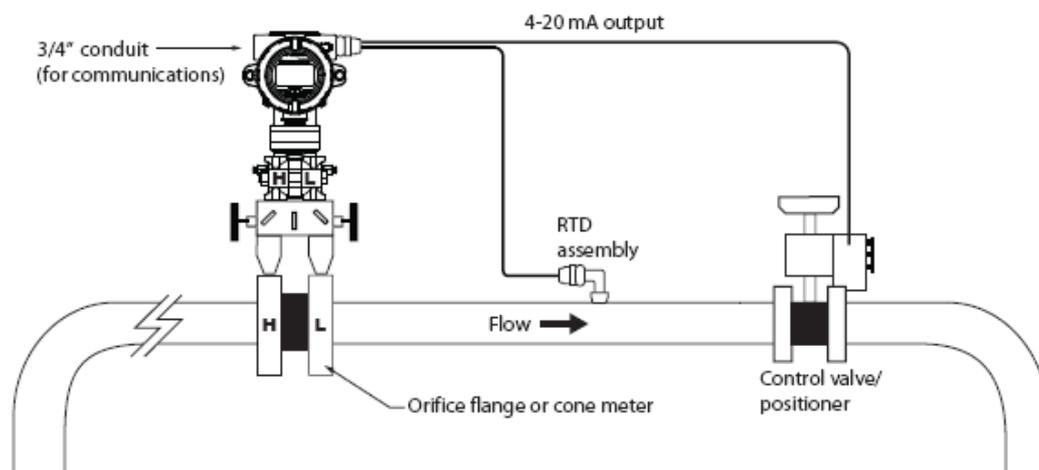
#### 2.8.5.5 Comunicaciones

Los computadores de flujo utilizan estructuras Modbus universales para el intercambio de datos entre computadores, SCADAs y otros dispositivos de automatización en campo. Utilizan comunicación serial, inalámbrica y Ethernet; brindan soluciones de red distribuida lo cual reduce el riesgo y la ineficiencia que se asocian con la automatización convencional al almacenar los datos de manera segura en el punto de medición.

Los computadores de flujo procesan y almacenan de manera independiente valores de medición y después comunican estos datos a centros operativos distantes, proporcionando una gran exactitud e integridad a las mediciones realizadas.

#### 2.8.5.6 Software de Integración SCADA

Mediante el empleo del software SCADA todos los archivos de datos de un computador de flujo pueden ser descargados. Los registros de flujo / eventos / alarmas y datos pueden ser compartidos con otros usuarios o para satisfacer requisitos de auditoría. El software permite ver datos de flujo en gráficos de tendencia o tabulares y crear informes profesionales. El software crea mapas de registro Modbus personalizados que simplifican la integración del computador de flujo con un host SCADA.

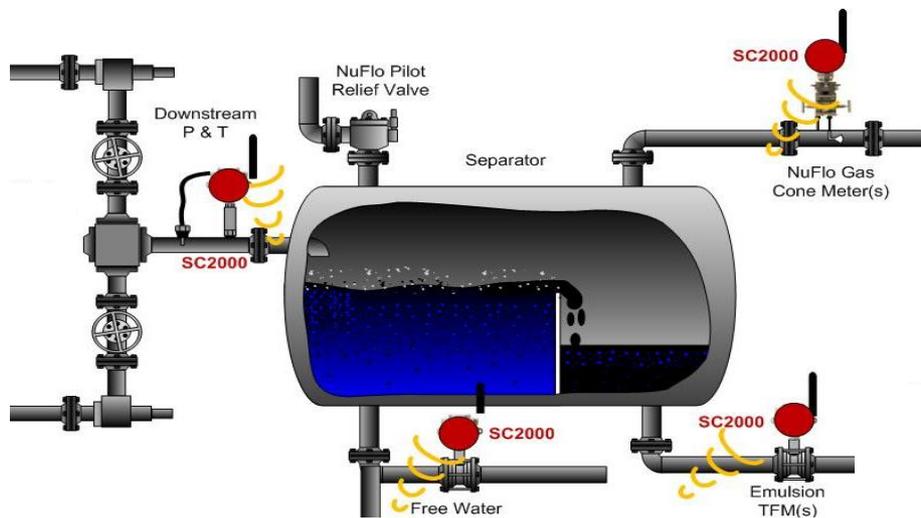


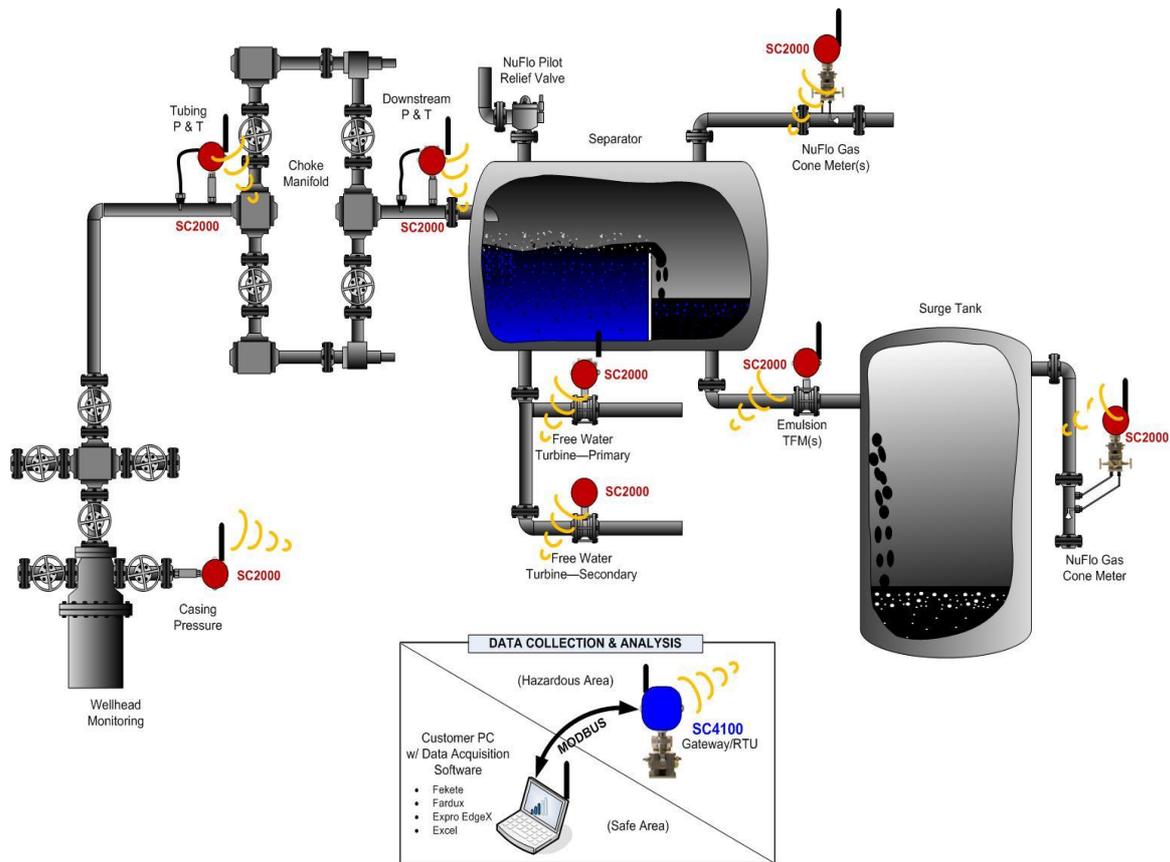
**Fig. 2.19** Sistema de medición de flujo en lazo cerrado, utilizando un computador de flujo

Cortesía: Cameron Measurement Systems



**Fig. 2.20** Gráfica de salida de la señal de control en un computador de flujo  
 Cortesía: Cameron Measurement Systems





**Fig. 2.21** Aplicaciones de los computador de flujo en sistemas de separación trifásicos  
 Agua - Petróleo - Gas  
 Cortesía: Cameron Measurement Systems

### III. OBJETIVOS

#### 3.1 Objetivos de la investigación

##### 3.1.1 Objetivo general

El objetivo general de este proyecto de investigación es proponer innovaciones y mejoras tecnológicas en los sistemas de medición de flujos basados en el principio de presión diferencial, utilizando el clásico sensor de presión diferencial denominado placa de orificio y adicionar como una mejora la utilización del sensor tipo cono que basa su funcionamiento en el mismo principio de presión diferencial. El determinar el valor correcto del Beta en estos sensores reviste especial importancia en este proyecto. Ambos sensores se complementarán con la aplicación de la nueva tecnología de los sistemas electrónicos de medición (EMS-Electronic Measurement System) denominados computadores de flujo; materia que debe incluirse dentro del proceso de formación de las nuevas generaciones de ingenieros afines con la especialidad.

### 3.1.2 Objetivos Específicos

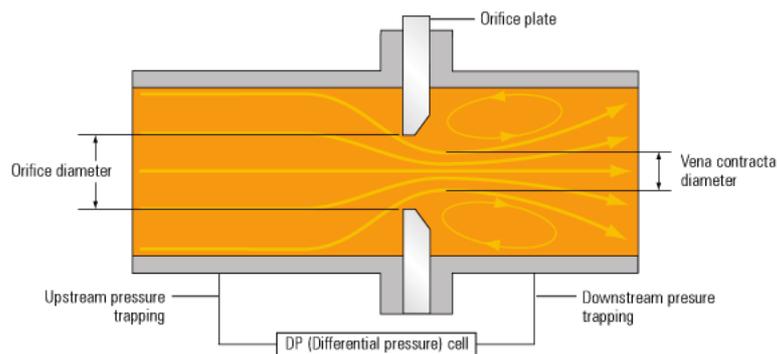
Mejorar la exactitud de la medición de flujo de líquidos y gases con el objetivo de optimizar la fiscalización y la medición de producción en una planta industrial.

Reducir significativamente los costos operativos al automatizar la medición de flujos logrando una mejora significativa en la medición de fluidos líquidos y gaseosos.

Lograr que los alumnos de ingeniería de las especialidades de instrumentación, control automático y automatización industrial profundicen sus conocimientos en el diseño de sensores de flujo bajo el principio de la presión diferencial y determinen el valor correcto del Beta en una aplicación industrial.

Difundir en la industria y en los centros de enseñanza de nivel superior las nuevas aplicaciones de los sistemas electrónicos de medición existentes como son los computadores de flujo y como lograr ventajas competitivas.

**Figura 3.1** Típico sensor de presión diferencial denominado placa de orificio



Fuente: [www. http://pointing.spiraxsarco.com](http://pointing.spiraxsarco.com)

## IV. HIPÓTESIS

### 4.1 Hipótesis central

Los sensores de flujo por el principio de presión diferencial integrados con sistemas electrónicos de medición de última generación denominados computadores de flujo determinan mejoras significativas en la medición de flujo de los procesos industriales; el estudio de estas nuevas técnicas de medición influyen en la calidad de la formación profesional de los alumnos de las especialidades de ingeniería.

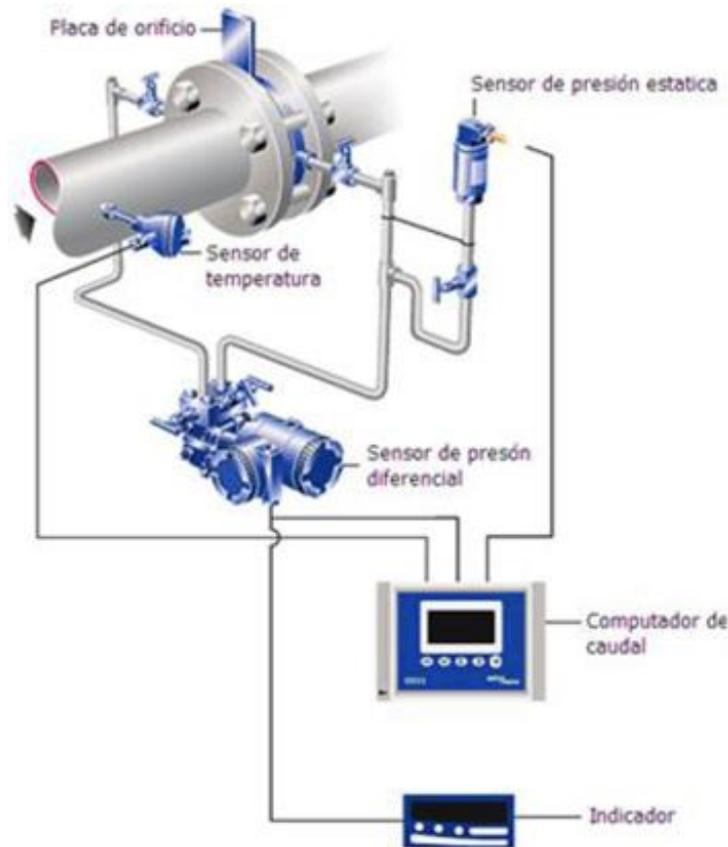
### 4.2 Hipótesis específicas

H1: Diseñar correctamente un sensor de presión diferencial optimiza la calidad de la medición de flujo en un proceso industrial.

H2: La medición de flujo en un proceso industrial utilizando sensores de presión diferencial diseñados correctamente e integrados a un computador de flujo reduce los márgenes de error mejorando la producción del proceso industrial.

H3: Conocer el principio de funcionamiento de un computador de flujo utilizando sensores de presión diferencial mejora el aprendizaje y la formación profesional del alumno de ingeniería.

**Figura 4.1** Sensor de flujo tipo placa de orificio conectado a un computador de flujo



Fuente: Manual de medición de hidrocarburos – Capítulo 5 Medición Dinámica  
Ecopetrol ( 2008 )

## V. VARIABLES DE ESTUDIO

### 5.1 Determinación de variables

a)  $V_i = V_1$  Variable independiente: Los sensores de flujo por el principio de presión diferencial integrados a los computadores de flujo.

b)  $V_d = V_2$  Variable dependiente: Mejoras significativas en la medición de flujo de los procesos industriales.

$V_d = V_3$  Variable dependiente: Calidad de la formación profesional de los alumnos de las especialidades de ingeniería.

## 5.2 Proceso de operacionalización de variables

Cuadro 5.1

CUADRO DE OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

VARIABLES	INDICADORES	ÍNDICES
$V_i = V_1$ LOS SENSORES DE FLUJO POR EL PRINCIPIO DE PRESIÓN DIFERENCIAL INTEGRADOS A LOS COMPUTADORES DE FLUJO	1.1 Evaluación del proceso industrial a medir	1.1.1 Conocimiento del proceso industrial 1.1.2 Analisis de la variable de flujo a medir 1.1.3 Técnicas y normas aprobadas para el proceso
	1.2 Diseño y selección del sensor de presión diferencial	1.2.1 Condiciones para la instalación del sensor 1.2.2 Determinación del Beta de diseño 1.2.3 Cálculo del Diferencial de Presión correcto
	1.3 Aplicación del computador de flujo en el proceso industrial	1.3.1 Selección correcta del computador de flujo 1.3.2 Configuración del software del computador de flujo 1.3.3 Protocolo de pruebas y funcionamiento del sistema de medición de flujo

Fuente: elaboración propia

Cuadro 5.2

VARIABLES	INDICADORES	ÍNDICES
<p>Vd = V2 MEJORAS SIGNIFICATIVAS EN LA MEDICIÓN DE FLUJO DE LOS PROCESOS INDUSTRIALES</p>	2.1 Proceso industrial	2.1.1 Medición diaria del flujo en el proceso 2.1.2 Comparación de los valores medidos versus los valores de diseño
	2.2 Evaluación del diseño del sensor propuesto	2.2.1 Nivel de exactitud del sensor de presión diferencial utilizado en el proceso industrial 2.2.2 Evaluación del Beta de diseño en el proceso
	2.3 El computador de flujo y su incidencia en la mejora de la medición de flujo	2.3.1 Aplicación del computador de flujo en un proceso industrial y sus ventajas competitivas 2.3.2 Análisis y evaluación de los resultados de la medición de flujo haciendo uso del computador de flujo

Cuadro 5,3

VARIABLES	INDICADORES	ÍNDICES
<p>Vd = V3 CALIDAD DE LA FORMACIÓN PROFESIONAL DE LOS ALUMNOS DE LAS ESPECIALIDADES DE INGENIERÍA</p>	2.1 Actualización del plan curricular	2.1.1 Actualizar el curso de Instrumentación y Control de Procesos 2.1.2 Establecer el curso referido como pre-requisito para los cursos de Automatización Industrial
	2.2 Conocimientos previos	2.2.1 Reestructurar los contenidos de los cursos de Física y Química orientados a los procesos industriales 2.2.2 Evaluar los conocimientos teóricos y prácticos de los cursos pre-requisitos
	2.3 Desarrollo de proyectos utilizando los sistemas de medición de flujo propuestos	2.3.1 Preparar un programa de experimentos de laboratorio de acuerdo a la estructura del curso 2.3.2 Diseñar proyectos de medición de flujos para los nuevos proyectos de inversión que se vienen implementando en el Perú

Fuente: elaboración propia

## **VI. METODOLOGÍA**

### **6.1 Tipo de investigación**

El diseño del proyecto será del tipo Investigación Aplicada por tener propósitos prácticos inmediatos bien definidos, es decir, se investiga para actuar, transformar, modificar o producir cambios en un determinado sector (Carrasco, 2015).

La aplicación del método convencional de la medición de flujos bajo el principio de la presión diferencial utilizando la placa de orificio y el cono proponen una mejora tecnológica complementada con la aplicación de los sistemas de medición con tecnología electrónica de última generación denominados computadores de flujo.

De acuerdo al enfoque de la investigación se contrastará la hipótesis con el método experimental, porque debemos comprobar las mejoras que se obtengan en la medición final de flujos con las innovaciones propuestas .

### **6.2 Método de investigación**

Como afirma Carrasco ( 2015 ) el método científico puede definirse como los modos, las formas, las vías o caminos más adecuados para lograr objetivos previamente definidos. El método científico se emplea para realizar investigaciones científicas y constituye un sistema de procedimientos, técnicas, instrumentos, acciones estratégicas y tácticas para resolver un problema de investigación, así como probar la hipótesis científica.

### **6.3 Diseño de investigación**

El diseño experimental de investigación se define como realizar una acción y luego observar sus efectos ( Carrasco, 2015 ).

En el plano del trabajo científico el experimento se define como “Un estudio de investigación en el que se manipulan deliberadamente una o más variables independientes ( posibles causas ), para analizar las consecuencias que la manipulación tiene sobre una o más variables dependientes ( supuestos efectos ), dentro de una situación de control para el investigador” ( Hernández, 1999 ).

El diseño experimental del proyecto de investigación es de carácter innovador en el campo de la ingeniería de control y automatización, debido a que el resultado final propuesto mejorará los actuales métodos de medición de flujos basados en el tradicional principio de la presión diferencial. El estudio y la aplicación de nueva tecnología de medición como el sensor tipo cono complementado con la aplicación de los sistemas electrónicos de medición como los computadores de flujo constituirán temas de avanzada en este campo, y su difusión en los cursos de especialidad de las ramas de la ingeniería permitirá una importante actualización de conocimientos a los alumnos de pre-grado y mejorar su competitividad en el sector industrial del país.

## 6.4 UNIVERSO, POBLACIÓN Y MUESTRA

### UNIVERSO

Todos los sistemas de medición de flujo que trabajan bajo el principio de presión diferencial.

### POBLACIÓN

16 computadores de flujo que utilizan sensores tipo placa de orificio y cono instalados en los campos de petróleo y gas de Talara y Piura en el 2016.

### MUESTRA

- Computador de flujo + sensor tipo placa de orificio Lote X CNPC
- Computador de flujo + sensor tipo cono Lote VI - SAPET
- Computador de flujo + sensor tipo placa de orificio OLYMPIC
- Computador de flujo + sensor tipo cono OLYMPIC

### Submuestra por tipo de sensor

- Computador de flujo + sensor tipo placa de orificio : 2 sistemas
- Computador de flujo + sensor tipo cono: 2 sistemas

Cuadro 6.1

Submuestra: Computador de flujo + placa de orificio				
No.	Lote	Ubicación	SN	SN/N
1	LOTE X CNPC PERU	Talara	6	0.6
2	OLYMPIC	Piura	4	0.4
N			10	1.0000

Submuestra: Computador de flujo + cono				
No.	Lote	Ubicación	SN	SN/N
1	LOTE VI SAPET	Talara	4	0.66666667
2	OLYMPIC	Piura	2	0.33333333
N			6	1.0000

Fuente: Propia

SN Subpoblación  
N Población total 16

A continuación se presenta el cálculo del diseño de un sensor tipo placa de orificio para la submuestra No. 2 de la compañía Olympic. El diseño esta basado en la norma AGA 3, el software utilizado es propiedad del fabricante Cameron Measurement Systems de los Estados Unidos.

**RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN DE PUNTOS CRÍTICOS DE MEDICIÓN EN COMPAÑÍAS DE PRODUCCIÓN**

**SENSOR PLACA DE ORIFICIO**

**NORMA: A.G.A.B**

Cliente: OLYMPIC SUCURSAL PERU  
 Lugar: Piura

**CONDICIONES DE OPERACIÓN**

Tipo de fluido: Gas Natural  
 Máximo flujo volumétrico: 7.0 m<sup>3</sup>/day  
 Temperatura de entrada: 80 °F  
 Presión de entrada: 558 PSIG (372.1 PSIA)

**ESPECIFICACIONES DEL FLUIDO**

Densidad relativa del gas: 0.56543

**RESULTADOS DEL CÁLCULO**

Sensor tipo placa de orificio de borde filado por A.G.A. Reporte No.

Diametro de la tubería: 6" (150 mm)  
 Acero: Carbono  
 Cédula: 80 (Sch 80)  
 Diametro interno de la tubería: 5.761"  
 Diametro del hueco del plato: 2.1"  
 Valor Beta: 0.365  
 Presión diferencial en escala total: 100" W.C.  
 Material de la placa de orificio: Acero inoxidable 316  
 Material del tubo de medición: Acero Carbono  
 Promedio del nivel de la presión del sonido: 16.4 dBA @ 1 metro  
 Promedio del nivel de sonido en las paredes de la tubería: 27.5 dBA

Placa de orificio y espesor del borde de Plate and Edge thickness

Espesor de la placa de orificio para condiciones normales de operación @ 100" W.C. por A.G.A.B, Parte 2 (2000):  
 Mínimo espesor: 0.115"  
 Máximo espesor: 0.163"  
 Espesor recomendado: 0.125"  
 Espesor mínimo del borde: 0.021"  
 Espesor máximo del borde: 0.1152"  
 Profundidad del bisel de salida: E  
 Profundidad del bisel de salida recomendado: 0"  
 Mínimo espesor requerido para asegurar el ancho de flección de la placa de orificio @ 100" W.C.: 0.053152"  
 Obtenido del diseño:  
 Espesor estándar: 1/16"



## PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

### RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN DE PUNTOS CRÍTICOS DE MEDICIÓN EN COMPAÑÍAS DE PRODUCCIÓN

#### SENSOR TIPO CONO

Cliente: OLYMPIC SUCURSAL PERU  
Lugar: Piura

#### CONDICIONES DE OPERACIÓN

Tipo de fluido: Gas Natural  
Máximo flujo volumétrico: 20.0 m<sup>3</sup>/day  
Flujo volumétrico promedio: 16.0 m<sup>3</sup>/day  
Temperatura de entrada: 100 °F  
Presión de entrada: 850 PSIG (5863.6 PSIA)

#### ESPECIFICACIONES DEL FLUIDO

Densidad relativa del gas: 0.0474 lbm/ft<sup>3</sup>  
Densidad del fluido: 2.8757 lbm/ft<sup>3</sup>

#### RESULTADOS DEL CÁLCULO

	<u>Sensor Tipo Cono</u>
Diametro de la tubería	6" (150 mm) Acero al Carbono Cédula 40 (Sch 40)
Diametro interno de la tubería	6.065"
Diametro del cono (OD)	5.416"
Valor Beta	0.45
Presión diferencial a escala total	150" W.C.
Coefficiente de descarga:	0.8527 (estimado)
Material de construcción del cono	Acero inoxidable 16, Tap 1/2" NPT k
Material del tubo de medición	Acero al Carbono
Pruebas hidrostáticas	Full rayos X y discos penetrantes

#### Condiciones Referenciales

Presión base: 14.73 PSI  
Temperatura base: 60 °F  
Máximo flujo volumétrico a condiciones estándares: 20.0 m<sup>3</sup>/día  
Máximo flujo másico: 658.912197 lbm/min  
Flujo másico promedio: 527.13 lbm/min

Viscosidad absoluta: 0.014 cp  
Compresibilidad: 0.9  
Masa molar del gas: 18  
Calibración: A condiciones estándares (agua)

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN DE PUNTOS CRÍTICOS DE MEDICIÓN EN COMPAÑÍAS DE PRODUCCIÓN

SENSOR TIPO CONO (CONEMETER)

Cliente:

OLYMPIC SUCURSAL PERU

Lugar:

Piura

Tabla de Flujos

#	Número de Reynolds	Flujo volumétrico en m <sup>3</sup> /día	Velocidad del flujo dentro de la tubería en Pie/seg	Factor de expansión	Caída de presión en pulgadas columna de agua	Presión permanente en pulgadas de columna de agua
1	3590183.84	24.4238	23.2313	0.996733	150.0	110.5930
2	3233177.97	21.9952	20.9212	0.997353	121.5	89.5803
3	2875536.57	19.5621	18.6069	0.997909	96.0	70.7795
4	2517330.25	17.1253	16.2891	0.998399	73.5	54.1906
5	2158629.63	14.6851	13.9680	0.998824	54.0	39.8135
6	1799505.32	12.2419	11.6442	0.999183	37.5	27.6483
7	1440027.95	9.7964	9.3181	0.999477	24.0	17.6949
8	1080268.11	7.349	6.9902	0.999706	13.5	9.9534
9	720296.43	4.9001	4.6609	0.999869	6.0	4.4237
10	360183.52	2.4503	2.3307	0.999967	1.5	1.1059

Software:

Cameron Measurement Systems

El software predice las características promedio incluyendo el coeficiente de descarga de medidores fabricados en el pasado. Debido a las tolerancias de fabricación, el performance individual de los medidores pueden variar.

Coficiente de descarga:

El computador de flujo usará el coeficiente de descarga mostrado en el reporte de calibración.

## **VII. PROPUESTA ACADÉMICA**

### **7.1 Justificación**

Durante los últimos años el desarrollo de la ingeniería electrónica en el ámbito industrial ha experimentado un vertiginoso desarrollo de nuevos conocimientos, esto hace que las universidades con facultades de ingeniería tengan que adaptarse a estos nuevos tiempos de cambios, calidad, competitividad y demandas de especialistas en sistemas de medición y control industrial.

Para que esta adaptación se realice la Universidad como cualquier otra institución debe contar con una adecuada infraestructura técnica y los recursos humanos necesarios que le permita desarrollar las competencias precisas para el correcto desarrollo de estas nuevas actividades.

Estas nuevas acciones formativas implican un cambio y actualización del contenido curricular de las especialidades de ingeniería vinculadas con el ámbito industrial.

Uno de los objetivos mas importantes de este proyecto de investigación es la gestación de la mejora de la formación del alumno de ingeniería en los sistemas de medición de flujos utilizados en la industria de procesos. Esta transformación de nuevos conocimientos es determinante para elevar la calidad de la formación universitaria de los estudiantes de pregrado.

La situación actual de los planes curriculares vigentes en las especialidades de ingeniería vinculadas a la industria justifica implementar la enseñanza de la medición de variables industriales, en especial de la variable flujo, material del presente proyecto de investigación.

El proyecto esta orientado a mejorar la formación profesional y las capacidades personales del estudiante a través de estos nuevos conocimientos propuestos.

El diseño de un nuevo programa de estudios de formación en medición de flujos, debe responder a las necesidades que requiere la industria de procesos industriales. La participación de los estudiantes en este nuevo programa es indispensable para la mejora en su proceso formativo. Esta propuesta debe estar precidida de las necesidades formativas requeridas en el sector industrial. El programa debe ser pertinente y responder a las necesidades existentes en la industria.

### **7.2 Importancia de la enseñanza de la medición de flujos en las carreras de Ingeniería afines a la industria**

Durante las últimas 3 décadas el desarrollo de la Ingeniería Electrónica en el ámbito industrial ha venido creciendo en forma muy rápida. Esto ha originado que los sistemas de medición y control que actualmente se utilizan en el campo de la automatización minimicen los errores en la medición de las variables de proceso.

La variable flujo es una de las más importantes y su medición reviste especial interés en los resultados de un proceso productivo, motivo por el cual su conocimiento y dominio es prioritario dentro de la formación de los alumnos de las diferentes especialidades de la ingeniería vinculadas al sector industrial del país.

### **7.3 Propósitos y objetivos del proyecto de investigación en la formación profesional del estudiante de ingeniería**

Detectar las carencias en la formación académica de los estudiantes de pregrado de las especialidades de ingeniería afines a la industria de procesos.

Facilitar un programa académico acorde a la actualidad y desarrollo técnico que contribuya a la mejora de la calidad en la formación del estudiante de ingeniería.

Fomentar la interdependencia entre las diferentes disciplinas tecnológicas de amplia aplicación en los sistemas de medición de flujos.

Modificar la estructura de los planes de estudio en la medida necesaria para que se vayan desarrollando gradualmente las capacidades de aprendizaje y trabajo interdisciplinario en los estudiantes de las carreras de ingeniería.

Las principales ventajas del aprendizaje interdisciplinario se detallan a continuación:

- Permite que el estudiante escoja las herramientas de análisis, síntesis y solución de problemas en una asignatura de la especialidad de medición.
- El estudiante adquiere conocimientos de electricidad, neumática e hidráulica que conjuntamente con los conocimientos de electrónica adquiridos complementan su formación académica en la especialidad de medición de flujos en procesos industriales.
- En el desarrollo de los trabajos de investigación en equipo, cada estudiante tiene la oportunidad de ejercitarse en las áreas de especialización donde tenga la mayor vocación profesional, logrando que a través de este intercambio de ideas y experiencias entre los integrantes del equipo se lleguen a alcanzar los objetivos deseados.
- El aprender nuevos conocimientos permite un mejor análisis e investigación en el campo de la medición de flujos, el estudiante se encuentra con problemas nuevos, los plantea adecuadamente, los analiza en forma sistemática y obtiene soluciones acorde al ámbito académico y a futuro en la parte laboral.
- El estudiante desarrolla una visión integradora de un proceso industrial al obtener mejores conocimientos de las diferentes disciplinas técnicas involucradas en los sistemas de medición de flujo para plantas industriales.

El rol principal y fundamental de la universidad es la formación humana e integral del estudiante. Por esta razón la mejora propuesta en esta investigación si bien es cierto

permite una mejora en la competitividad del egresado en el mercado laboral, no debe descuidar los aspectos fundamentales como la realización profesional y humana del estudiante. El concepto de educación como una función global en la formación y realización de una persona es fundamental. La formación humana es un elemento de gran importancia en la educación en ingeniería en este milenio, por lo que la implementación de esta propuesta académica cubre las necesidades del sector industrial del país.

En palabras de Ortiz Rosales (1998 p.389), *la persona antes de desarrollar calidad profesional debe contar con calidad humana*. La percepción de esta calidad profesional generalmente se intuye a partir de las actitudes y conductas que ponen de manifiesto su calidad; esto es lo que realmente se aprecia y tiene un alto impacto social.

#### **7.4 Metodología para la enseñanza de la medición de flujos bajo el principio de la presión diferencial**

Para el presente proyecto se ha considerado una metodología que considere las siguientes etapas:

Descripción del problema actual de la medición de flujos en los procesos industriales.

Análisis de la problemática e identificación de los factores que afectan la medición de flujos en un proceso industrial.

Diseño y selección del sensor mas adecuado a aplicar en el proceso industrial a estudiar.

Determinación del Beta correcto para optimizar la medición de flujo.

Aplicación del computador de flujo en el diseño materia de estudio.

Casos reales en la industria, evaluación del diseño propuesto. Ventajas con respecto a los sistemas tradicionales de medición aplicados actualmente.

#### **7.5 Módulos de laboratorio, implementación y justificación de la inversión**

Uno de los factores de mayor importancia para que el presente proyecto logre los objetivos propuestos es la implementación de los módulos de medición y control dentro de los ambientes del Laboratorio de Control de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Ricardo Palma.

Los módulos a implementar propuestos se detallan a continuación:

Módulo 1

Medición básica de flujos bajo el principio de la presión diferencial. Diseño del sensor mediante software.

Módulo 2

Comparación experimental del grado de exactitud de una medición de flujo utilizando un sensor tipo placa de orificio versus un sensor tipo cono.

Módulo 3

Configuración y puesta en operación de un computador de flujo utilizando como sensor una placa de orificio.

#### Módulo 4

Configuración y puesta en operación de un computador de flujo utilizando como sensor un cono.

#### Módulo 5

Proyecto de Automatización utilizando lazos de medición y control de flujo para líquidos y gases. Diseño e implementación.

### **7.6 Nuevo plan curricular para las carreras de ingeniería**

A continuación se presenta la propuesta académica para implementar la enseñanza de la medición de flujos bajo el principio de la presión diferencial en las especialidades de ingeniería afines a la industria.

Propuesta académica: Curso de Medición de Flujos

Objetivos: Motivar a los estudiantes de pregrado de las especialidades de ingeniería a analizar, evaluar, optimizar y comprender los principios básicos de los sistemas de medición de flujo utilizados en la industria de procesos, detectar las fallas en la medición de flujos y diagnosticar soluciones que lleven a la medición de la variable flujo a un punto de control óptimo.

Seleccionar y dimensionar los sistemas de medición de flujos de acuerdo al grado de exactitud requerido en la industria, estableciendo una relación costo beneficio.

Capacitar a los estudiantes de pregrado de las especialidades de ingeniería afines a la industria acerca de la importancia de la medición de flujo y su control metrológico en las pérdidas o ganancias de transporte de líquidos y gases.

Requisitos

Conocimientos básicos de matemáticas para ingeniería, física, electrónica industrial, mecánica de fluidos y termodinámica.

Sílabo

Información General

1.1 Asignatura : Medición de flujo

1.2 Carácter : Obligatorio

1.3 Carreras Profesional : Ingeniería Electrónica, Ingeniería Mecatrónica

1.4 Código : Por definir

1.5 Semestre Académico : 2018-01

1.6 Ciclo Académico : VIII Ciclo

1.7 Horas de clase : 2 Teoría y 2 Práctica

1.8 Crédito : 03

1.9 Pre-Requisito : Control I y Máquinas eléctricas

Contenido del curso

Capítulo I

Introducción a la medición dinámica de flujos

- Flujo volumétrico
- Flujo másico

## Capítulo II

### Conceptos básicos en medición de flujos

- Masa
- Densidad
- Volumen
- Presión
- Temperatura
- Viscosidad
- Número de Reynolds
- Normas A.G.A. e ISA

## Capítulo III

### Clasificación de los medidores de flujo

Medidores de flujo por presión diferencial, desplazamiento positivo, turbina, electromagnéticos, efecto Coriolis y ultrasonido.

Principio de funcionamiento, tipos de medidores, factores que afectan su exactitud, fortalezas y debilidades.

## Capítulo IV

### Medidores de flujo tipo presión diferencial

#### Teorema de Bernoulli

#### Cálculo del Beta del sensor

#### Tipos de medidores

#### Placa de Orificio

- Diseño
- Operación
- Mantenimiento

#### Cono ( V Cone )

- Diseño
- Operación
- Mantenimiento

## Capítulo V

### Medición electrónica de la variable flujo

#### Computadores de flujo

- Introducción
- Características
- Arquitectura
- Aplicaciones
- Configuración de sistemas de medición de flujos

- Análisis de los computadores de flujo bajo la óptica del estándar de ingeniería de medición dinámica de cantidad y calidad en fluidos líquidos y gaseosos.

## Capítulo VI

### Aplicaciones Industriales

- Sistemas de medición de flujos con el sensor tipo placa de orificio
- Sistemas de medición de flujos con el sensor tipo Cono

## VIII. RESULTADOS

### 8.1 Resultados estadísticos descriptivos

**Cuadro de submuestras 8.1**

Submuestra: Computador de flujo + placa de orificio				
No.	Lote	Ubicación	SN	SN/N
1	LOTE X CNPC PERU	Talara	6	0.6
2	OLYMPIC	Piura	4	0.4
			N=	10
				1.0000

Submuestra: Computador de flujo + cono				
No.	Lote	Ubicación	SN	SN/N
1	LOTE X VISA PET	Talara	4	0.666666667
2	OLYMPIC	Piura	2	0.333333333
			N=	6
				1.0000

Fuente: Propia

SN Subpoblación  
N Población total 16

Población

Conjunto Universo 16 Sistemas de medición

Muestra

Subconjunto de la población 4 Sistemas de medición

Variable Cuantitativa Número de Sistemas de medición de flujo

Mediciones realizadas	0.30	0.55	0.50	0.55
	0.35	0.55	0.50	0.60
	0.45	0.50	0.50	0.50
	0.45	0.45	0.70	0.55

N= 16

Alcance (A) A= 10.25; 10.75

Rango (R) R= 10.75 - 10.25 = 0.50

Intervalo de clase (I) Clasificación de mediciones en sub-grupos

Número de intervalos de mediciones (K)

$K = \frac{R}{I} = \frac{0.50}{0.30} \approx 1.67$

Marca de mediciones (xi)  $x_i = \frac{(\text{límite superior}) + (\text{límite inferior})}{2}$

Frecuencia absoluta (fi) Cantidad de veces que aparece un determinado  
 $f_1 + f_2 + \dots + f_K = N$

Frecuencia absoluta acumulada (Fi)  $F_i = f_1 + f_2 + \dots + f_i$

Frecuencia relativa (hi)  $h_i = \frac{f_i}{N}$

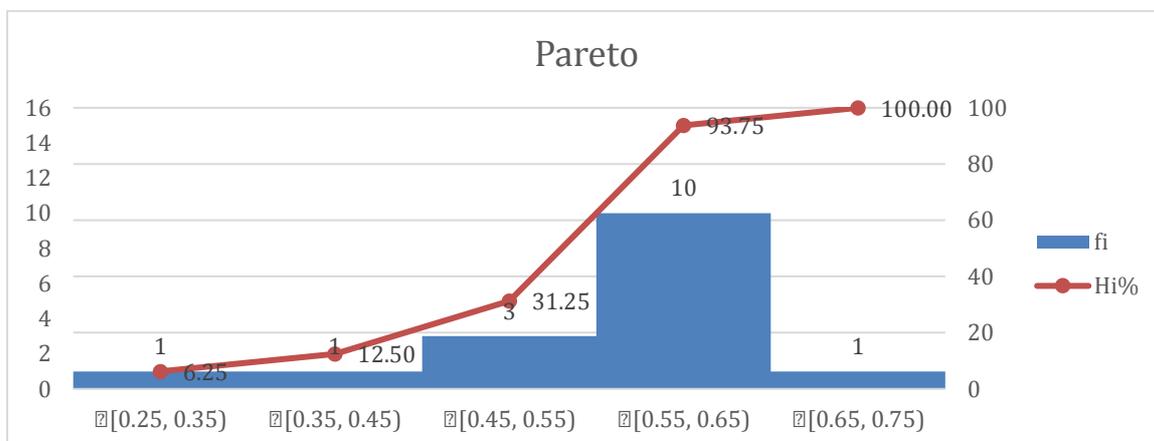
Frecuencia relativa acumulada (Hi)  $H_i = \frac{F_i}{N}$

**Cuadro Estadístico 8.2**

i	I	xi	fi	Fi	hi%	Hi%
1	[0.25,0.35)	0.3	1	1	6.25	6.25
2	[0.35,0.45)	0.4	1	2	6.25	12.50
3	[0.45,0.55)	0.5	3	5	18.75	31.25
4	[0.55,0.65)	0.6	10	15	62.50	93.75
5	[0.65,0.75)	0.7	1	16	6.25	100.00
			16		100.00	

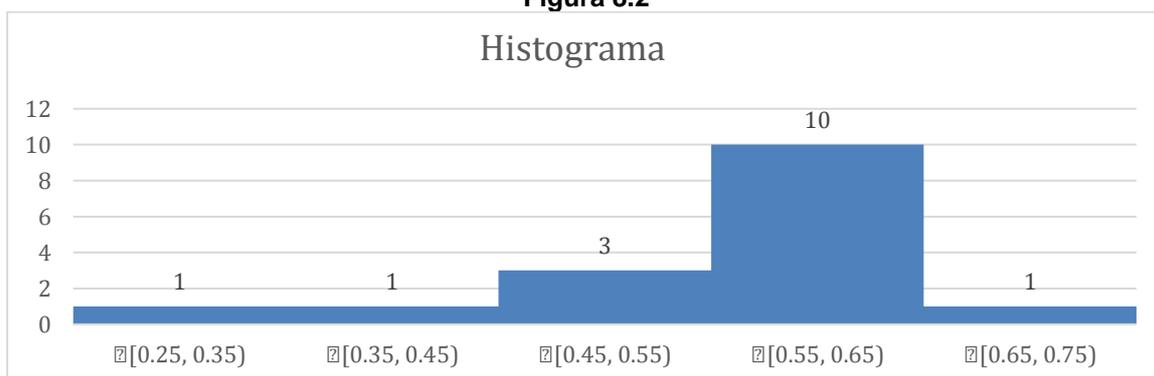
Rangos de diseño de los Betas para diferentes campos petroleros.

**Figura 8.1**



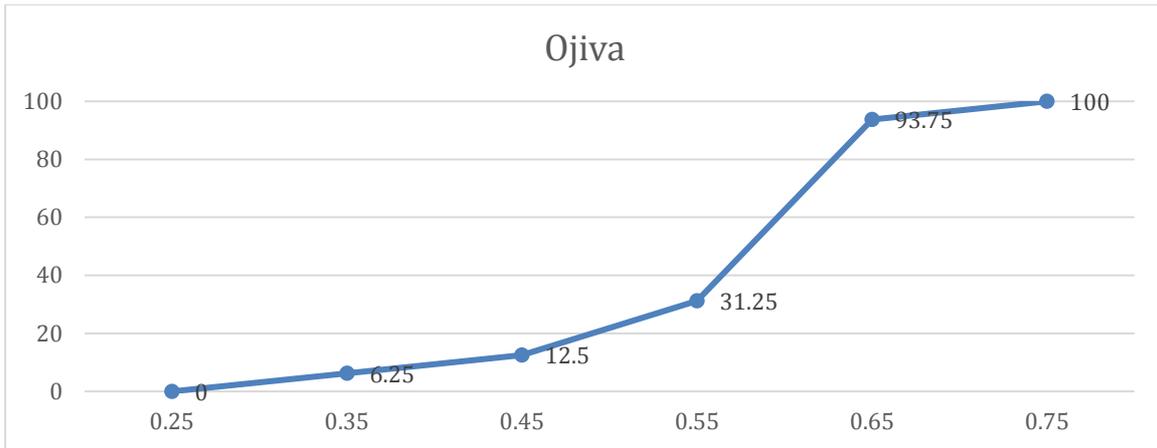
El 93.75% de los diseños de los sensores de flujo tienen como Beta promedio desde 0.55 hasta 0.65.

**Figura 8.2**

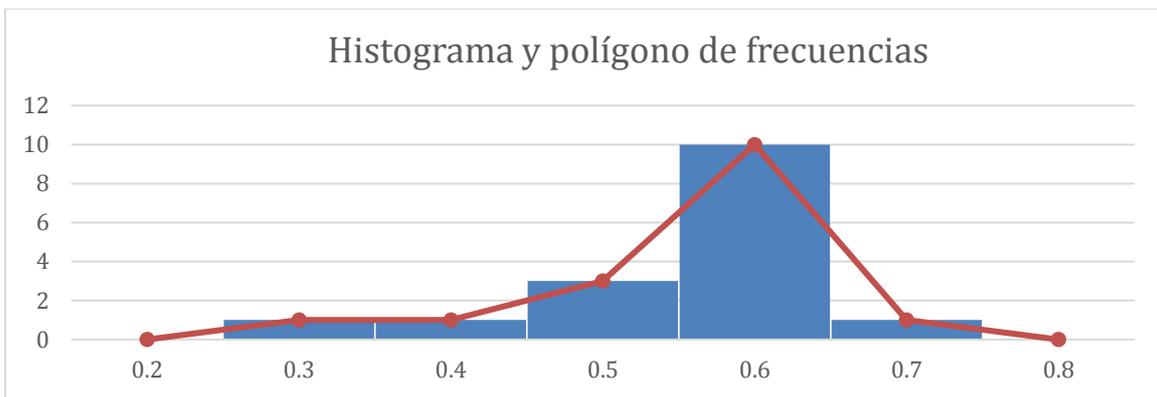


La tendencia en los diseños de sensores de flujo por el principio de presión diferencial se concentra en Betas de 0.55 a 0.65

**Figura 8.3**



**Figura 8.4**



La frecuencia de encontrar un sensor de flujo por el principio de presión diferencial con un Beta de 0.60 es mayor en comparación con los otros valores de los extremos del rango de diseño del Beta.

## IX. DISCUSIÓN

Durante varias décadas se ha utilizado el sensor de placa de orificio como elemento primario para la medición de flujos. Los registradores mecánicos que reciben la señal de presión diferencial a través de una DPU ( differential pressure unit ) presentaban un grado de exactitud de +/- 1%. Con el cambio propuesto utilizando computadores de flujo esta misma señal de presión diferencial es recibida a través de una MVT ( Multivariable transmitter ) elemento que presenta una exactitud de +/- 0.05% ( La MVT es el equivalente a la DPU en un computador de flujo ).

El sensor tipo cono por diseño presenta una exactitud hasta de +/- 0.5% ( como se indica en la página 31 ), aplicando la señal de presión diferencial del cono a la misma MVT del computador de flujo con exactitud de +/- 0.05% llegamos a determinar que la mejora de la exactitud de la medición de flujo utilizando un sistema electrónico en comparación con un sistema mecánico es bastante significativa. Este análisis justifica el cambio de tecnología y la necesidad de implementar cursos de esta especialidad en los programas de ingeniería electrónica, mecatrónica e industrial de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Ricardo Palma y otras universidades afines a la especialidad.

El sensor de placa de orificio normalmente es diseñado para un Beta entre 0.55 a 0.65 siendo su valor ideal de diseño 0.50. El rango de diseño del Beta para una placa de orificio es de 0.25 a 0.75 ( por teoría el rango especificado en la página 22 es de  $0.1 < \beta < 0.75$  ), si lo comparamos con el sensor tipo cono, éste sensor presenta un mayor valor en el rango máximo ( por teoría el rango especificado en la página 29 es de 0.45 a 0.85 ). Esta diferencia permite que los conos puedan medir en condiciones extremas por encima de los valores de diseño permitidos para una placa de orificio.

En aplicaciones de medición de flujos en condiciones normales ( Beta = 0.50 y rangeabilidad del proceso 3:1 ) el uso de la placa de orificio es suficiente para los fines requeridos, pero si las condiciones del proceso nos llevan a un Beta mayor con una rangeabilidad del proceso 10:1, tenemos que optar por utilizar un sensor tipo cono.

Conocer los principios de diseño y aplicación de los sensors de presión diferencial estudiados complementados con los computadores de flujo permitirán al alumno de pregrado de ingeniería mayor competitividad en el ámbito laboral dentro del sector industrial.

## **X. CONCLUSIONES**

- A. Este proyecto conlleva a que el uso de los sensores de flujo bajo el principio de la presión diferencial complementados con la aplicación de los computadores de flujo modernizan y optimizan la medición de flujo en los procesos industriales.
- B. Determinar correctamente el Beta de un sensor de flujo mejora la exactitud de la medición.
- C. La placa de orificio continúa siendo el sensor de mayor aplicación en la industria de procesos continuos, la mejora en su precisión y exactitud se logra haciendo uso de los computadores de flujo.
- D. El sensor tipo cono se presenta como una nueva opción técnica en la medición de flujos, debido a que presenta una mejor rangeabilidad que la placa de orificio. Su integración con el computador de flujo lo convierte en el sensor de mayor aplicación a futuro.
- E. La propuesta de renovar el actual plan curricular de las carreras de ingeniería afines al sector industrial permitirá que los nuevos egresados puedan ser mas competitivos en el mercado laboral industrial.
- F. El estudio del dimensionamiento correcto de un sensor de presión diferencial optimizará el diseño de un sistema de medición de flujo.
- G. El computador de flujo tiene gran aplicación en plantas industriales, su conocimiento es muy importante para proyectos nuevos de modernización de plantas, los egresados que conozcan estos sistemas tendrán ventajas competitivas con respecto a los egresados de programas de ingeniería con estructuras tradicionales.
- H. Se recomienda a la facultad de ingeniería de la Universidad Ricardo Palma que reestructure su plan curricular y modernice los contenidos de las especialidades de Ingeniería Electrónica, Mecatrónica e Industrial acorde a los cambios tecnológicos actuales analizados en el presente proyecto de investigación.

## Referencias bibliográficas

### Libros

- Bernal, C. ( 2006 ). *Metodología de la Investigación*. Bogotá: Prentice Hall - 3ra. Edición.
- Bisquerra, R. ( 2012 ). *Metodología de la Investigación Educativa*. Madrid: La Muralla S.A.
- Carrasco, S. ( 2007 ) . *Metodología de la Investigación Científica*. Lima: San Marcos E.I.R.L.
- Cevallos, J. ( 2012 ). *Introducción a la Investigación y el método de investigación en Ingeniería*. Lima: Instituto de Investigación UNMSM – Facultad de Ingeniería Industrial.
- Chirif, L. ( 2010 ). *Preparación de Tesis*. Lima: Universitaria.
- Ortiz, J. ( 1998 ). *La educación en ingeniería hacia el tercer milenio. VI Congreso Universitario de Innovación Educativa en las Enseñanzas Técnicas*. Las Palmas de Gran Canaria.
- Considine, D. ( 1985 ). *Process Instruments and Control Handbook*. California: Mc Graw Hill.
- Creus, A. ( 2010 ). *Instrumentación Industrial*. México: Marcombo - 8ª Edición Alfaomega.
- Gómez, M., Pierre, J., y Alzate, M. ( 2010 ). *Cómo hacer tesis de maestría y doctorado*. Bogotá: ECOE Ediciones
- GPA-2145-08 ( 2005 ). "Table of Physical Properties for Hydrocarbons and Other Compounds of Interest to the Natural Gas Industry". Tulsa: Gas Processors Association
- Hernández, R., Fernandez, C., Baptista, P. ( 2003 ). *Metodología de la investigación*. México D.F.: McGraw-Hill Interamericana – 3ra. Edición.
- Naci, J. ( 1978 ). *Ingeniería de Control Automático ( Instrumentación Industrial )*. México: Instituto Politécnico Nacional – 1ra. Edición Tomo I.
- Polling, B., Prausnitz, J., O'Connel, J. ( 2001 ). *Properties of Gases and Liquids*. Oklahoma: McGraw – 15 Edición.
- Smith, C., y Corripio, A. ( 2008 ). *Control Automático de Procesos*. México D.F.: LIMUSA, S.A. de C.V.
- Spink, L.K. ( 1967 ). *Principles and Practice of FLOW METER ENGINEERING*. Massachusetts – 9ª Edición Foxboro Company.
- Kunz, O., Klimek, R., Wagner, W., Jaeschke, M. ( 2004 ). *The Gerg-2004 Wide-Range Equation of State for Natural Gases and other Mixtures*. Groupe European of Recherches.
- A.G.A. Report No. 3 ( 2012 ). Orifice metering of natural gas and other related hydrocarbon fluids; Part 1 – General equations and unce tainty guidelines. American Gas Association.
- Miller, R. ( 1983 ). *Flow Measurement Engineering Handbook – Third Edition*. McGraw-Hill.

## **Web o Internet**

<http://www.c-a-m.com> [ Consulta: 1 de diciembre 2015 ]

<http://www.emersonprocess.com> [ Consulta: 2 de diciembre 2016 ]

[http:// www.dynamicflowcomputers.com](http://www.dynamicflowcomputers.com) [ Consulta: 5 de enero 2017 ]

<http://www.instrumentacionycontrol.net> [ Consulta: 6 de enero 2017 ]

<http://www.herrera.unt.edu.ar/iidpr/Archivos/Tema-Introduccion> [ Consulta: 4 de julio 2016 ]

<http://www.mccrometer.com> [ Consulta: 2 de abril 2016 ]

<http://www.monografias.com/trabajos31/medidores-flujo/medidores-flujo> [ Consulta: 10 de enero 2017 ]

<http://www.smar.com/espanol> [ Consulta: 2 de Junio 2016 ]

<http://www.webdelprofesor.ula.ve/ingenieria> [ Consulta: 20 de enero 2017 ]

<https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/> [ Consulta: 15 de febrero 2017 ]

## **ANEXOS**

ANEXO No. 1: Teoría y práctica sobre medidores de flujo

ANEXO No. 2: Sensor de flujo tipo Cono – Fabricante Cameron Measurement Systems

ANEXO No. 3: Computador de flujo – Fabricante Cameron Measurement Systems

ANEXO No. 4: Computador de flujo – Fabricante: Dynamics Flow Computer