



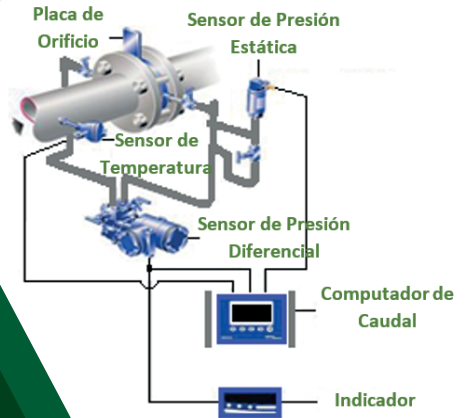
**UNIVERSIDAD RICARDO PALMA**  
**VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN**

# INVESTIGACIONES TECNOLÓGICAS

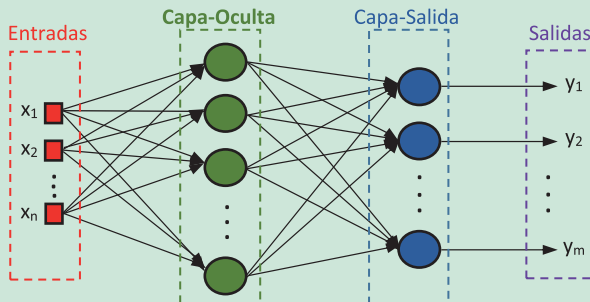
## Inteligencia Artificial e Instrumentación Industrial



### Laboratorio de Control



### RED NEURONAL ARTIFICIAL



Facultad de  
**Ingeniería**

PEDRO F. HUAMANÍ NAVARRETE  
HUMBERTO CHONG RODRÍGUEZ



**SERIE: CUADERNO DE INVESTIGACIÓN**  
*Publicación del Vicerrectorado de Investigación*

**2017**



**INVESTIGACIONES TECNOLÓGICAS  
INTELIGENCIA ARTIFICIAL E  
INSTRUMENTACIÓN INDUSTRIAL**

**UNIVERSIDAD RICARDO PALMA  
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN**



INVESTIGACIONES TECNOLÓGICAS  
INTELIGENCIA ARTIFICIAL E INSTRUMENTACIÓN INDUSTRIAL

---

Lima

Perú

**UNIVERSIDAD RICARDO PALMA**  
**VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN**

RECTOR : Dr. Iván Rodríguez Chávez  
VICERRECTOR ACADÉMICO : Dr. José Martínez Llaque  
VICERRECTOR DE INVESTIGACIÓN : Dr. Héctor Hugo Sánchez Carlessi  
DECANO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA : Dr. Jorge Arroyo Prado  
SECRETARIO GENERAL : Lic. Andrés Maldonado Herrera

EDITORES:

Vicerrectorado de Investigación.  
H. Hugo Sánchez Carlessi  
Pedro Freddy Huamani Navarrete

Responsables: Dr. Ing. Pedro F. Huamani Navarrete  
Ing. Humberto Chong Rodríguez

INVESTIGACIONES TECNOLÓGICAS  
INTELIGENCIA ARTIFICIAL E INSTRUMENTACIÓN INDUSTRIAL

Autores:

Pedro Freddy Huamaní Navarrete  
Humberto Chong Rodríguez

Derechos Reservados

Primera Edición, Noviembre 2017  
500 Ejemplares

Publicado: Enero 2018

Editado por:

©Universidad Ricardo Palma  
Vicerrectorado de Investigación  
Av. Benavides 5440, Santiago de Surco  
Telf.: 708 0000 Anexo: 0012  
vice.investigacion@urp.edu.pe

ISBN N° 978-612-47351-3-4

Hecho el depósito legal en la Biblioteca Nacional del Perú N° 2017-16893

Impreso en Enero del 2018 en:  
Bussiness Support Aneth S.R.L.  
Av. Marginal 259 Ate, Lima-Perú  
Telf.: (01) 434-5101  
Email: business.aneth@yahoo.com

Lima, Perú

## CONTENIDO

PRESENTACIÓN .....	9
<b>RED NEURONAL ART EMBEBIDA EN HARDWARE PARA EL RECONOCIMIENTO DE PATRONES DE VOZ EN TIEMPO REAL</b>	
RESUMEN .....	11
ABSTRACT .....	11
INTRODUCCIÓN	
• Planteamiento del Problema .....	13
• Importancia .....	13
• Antecedentes .....	14
• Marco Conceptual .....	16
OBJETIVOS	
• Objetivo General .....	19
• Objetivos Específicos .....	19
VARIABLES DE ESTUDIO	
• Variable Independiente .....	20
• Variable Dependiente .....	20
METODOLOGÍA	
• Tipo de investigación .....	20
• Método de investigación .....	20
• Diseño de investigación .....	20
• Instrumento de recolección de datos: Captura y digitalización de mandos de voz .....	20
• Creación de Base de Datos .....	21
• Técnicas de procesamiento de datos .....	23
RESULTADOS .....	35
DISCUSIÓN .....	38
CONCLUSIONES .....	38
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	40

# OPTIMIZACIÓN DE LA MEDICIÓN DE FLUJO BAJO EL PRINCIPIO DE LA PRESIÓN DIFERENCIAL Y SU IMPORTANCIA EN LA INGENIERÍA DE CONTROL Y AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL

RESUMEN .....	43
ABSTRACT .....	43
INTRODUCCIÓN	
• Planteamiento del Problema .....	44
• Importancia del proyecto de investigación .....	46
• Antecedentes teóricos .....	46
• Marco teórico .....	47
• Marco conceptual .....	47
OBJETIVOS	
• Objetivo General .....	75
• Objetivos Específicos .....	75
VARIABLES DE ESTUDIO	
• Variable Independiente .....	77
• Variables Dependientes.....	77
METODOLOGÍA	
• Tipo de investigación .....	77
• Método de investigación .....	77
• Diseño de investigación .....	77
• Universo, población y muestra .....	78
• Técnicas de procesamiento de datos .....	84
RESULTADOS	
• Resultados estadísticos descriptivos .....	88
DISCUSIÓN .....	91
CONCLUSIONES.....	92
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	93



## **PRESENTACIÓN**

Uno de los grandes retos de la investigación en nuestro País, cuya responsabilidad recae parcialmente en las Universidades, es la realización de investigación tecnológica ya sea orientado a la elaboración y validación de un producto netamente creativo u original propio del autor, o ya sea producto del esfuerzo de los trabajos de innovación tecnológica con las adecuaciones, adaptaciones y validaciones correspondientes a nuestra realidad para su mejor uso en las empresas industriales del país.

Nuestra Universidad promueve y desarrolla investigación científica, tecnológica y humanística para lo cual cuenta con los presupuestos respectivos que se prevén en el Plan Anual de Investigación o en el presupuesto del Fondo de Investigación destinado exclusivamente a estas inversiones.

Nada se logra de manera satisfactoria si como consecuencia del trabajo de investigación tecnológica no se difunde o se comunican los resultados, es por ello que en este tercer número de la Serie Cuadernos de Investigación hemos querido dedicarlo a dos trabajos de investigación tecnológica ejecutados por los profesores de la Facultad de Ingeniería, como parte de los proyectos de investigación realizados en esta universidad en el año 2016. Estos profesores son los ingenieros Pedro Freddy Huamaní Navarrete y Humberto Chong Rodríguez, a los cuales desde ya felicitamos por este importante aporte.

De este modo esperamos que los estudios reportados y los productos logrados contribuyan al incremento de producción tecnológica en nuestro País.

Santiago de Surco, setiembre del 2017

Héctor Hugo Sánchez Carlessi  
**Vicerrector de Investigación**



# **RED NEURONAL ART EMBEBIDA EN HARDWARE PARA EL RECONOCIMIENTO DE PATRONES DE VOZ EN TIEMPO REAL**

Ing. Pedro F. Huamaní Navarrete  
Universidad Ricardo Palma

## **RESUMEN**

En este trabajo de investigación se presenta, en primer lugar, la simulación de una técnica matemática de tratamiento digital de señales de audio para reconocer 10 mandos de voz; y, en segundo lugar, la implementación de tales técnicas en el hardware embebido NI myRIO 1900. Para lograr el reconocimiento de los mandos de voz se analizó dicha señal por segmentos, con la finalidad de recortar el silencio tanto al inicio como al final de la grabación. Luego, se utilizó un filtro de pre-énfasis seguido de un filtro pasa banda, y posteriormente se obtuvieron los coeficientes de predicción lineal (LPC) que fueron utilizados para entrenar una red neuronal artificial adaptativa ART. El reconocimiento de los mandos de voz se simuló a través de una combinación del encendido/apagado de los 4 leds del propio hardware embebido, logrando una efectividad del 88% en una base de datos de 600 grabaciones de voz digital.

Palabras Claves: Red neuronal ART, NI myRIO, Labview, patrones de voz.

## **ABSTRACT**

In this research, we first present the simulation of a mathematical technique of digital processing of audio signals to recognize 10 voice commands, and secondly the implementation of such techniques in the embedded hardware NI myRIO 1900. Recognition of the voice commands analyzed by segment, with the purpose of cutting the silence both at the beginning and at the end of the recording. Then, a pre-emphasis filter followed by a bandpass is used, and later the linear prediction coefficients (LPC) to train an adaptive artificial neural network ART. Recognition of the voice commands was simulated through a combination of on/off the 4 leds of the embedded hardware itself, achieving 88% effectiveness in a database of 600 digital voice recordings.

Keyword: ART neural network, NI myRIO, Labview, voice patterns.

## INTRODUCCIÓN

En los últimos años la tecnología digital viene gobernando todo el mundo, desde los electrodomésticos en nuestras casas, pasando por las grandes industrias hasta el sector militar y científico. Por tal razón, las nuevas técnicas matemáticas implementadas algorítmicamente en un lenguaje de computación de alto nivel, resuelven diversos problemas que en la antigüedad resultaba muy difíciles de ser resueltos. Particularmente, el área de procesamiento digital de señales ha resultado ser una rama muy importante en cuanto a investigaciones se trata; pues, es muy aplicado para el sector de bioingeniería y asimismo para la biometría, apoyándose las investigaciones en los software de computación científica como el Matlab y el Labview, dos herramientas de programación con enormes ventajas y facilidades para la implementación algorítmica con acceso al mundo real, a través de dispositivos de hardware externos. Tal es el caso del hardware embebido de National Instruments myRIO 1900<sup>1</sup>, con tecnología FPGA<sup>2</sup>.

De esta manera, la utilización de un hardware embebido es capaz de almacenar algoritmos de programación con el propósito de realizar una tarea particular, el reconocimiento de patrones de voz en tiempo real. Para ello, fue necesario complementar la investigación con la teoría de redes neuronales artificiales, con el fin de entrenar un grupo de patrones previamente procesados para luego asociarlos a una salida particular. Sin embargo, como es de conocimiento, las voces pueden cambiar en tono o duración, por lo que se hizo necesario contar con un grupo elevado de grabaciones por cada uno de los participantes en el proceso de entrenamiento de la red neuronal. Específicamente, se empleó la red denominada ART (Teoría de la Resonancia Adaptiva). Esta a su vez se encargó de formar nuevos conjuntos de patrones de entrada en base a las propias características de las señales de voz de un participante en particular.

Para el desarrollo de este proyecto de investigación no fue suficiente realizar la programación del hardware embebido con ayuda del software Labview, sino también fue necesario realizar las pruebas y simulaciones en el software de computación científica Matlab, por la facilidad de manejo de variables a través de vectores y matrices, así como por la ventaja de contar con una librería de procesamiento digital de señales y de redes neuronales artificiales. De esta forma, lograda la simulación, se procedió a embeber o incluir el algoritmo desarrollado en Matlab, en el hardware myRIO de National Instruments, para finalmente recibir los mandos de voz a través del micrófono conectado directamente a este dispositivo, y así lograr identificar dichos mandos para la realización de una tarea en particular. Para esta última parte, solamente se definieron 10 tareas particulares correspondientes a los 10 mandos de voz, lo cual correspondió al

---

<sup>1</sup> Dispositivo de diseño embebido.

<sup>2</sup> Dispositivo lógico constituido por un arreglo de compuertas programables.

encendido de las combinaciones de los 4 leds presentes en el hardware myRIO 1900. Pues, esto resultaba más accesible para trabajos futuros, porque facilitaría a personas con carencia de extremidades superiores, a permitir realizar tareas domésticas simples como encender o apagar artefactos electrodomésticos, girar botones de encendido, entre otros casos existentes, sólo con el mando de voz correspondiente.

Además, es importante aclarar que para la programación del hardware embebido myRIO 1900 se utilizó una versión demostrativa del software Labview en la versión 2016. Dicha versión fue obtenida de un enlace web de la página de National Instruments.

## **Planteamiento del Problema**

Con el aumento de la población peruana, también incrementa la probabilidad de la existencia de un mayor número de personas con alguna discapacidad en sus extremidades, sea por una situación congénita o por algún accidente del que haya sido partícipe. Por lo tanto, para este grupo de personas se hace complicado encender o apagar algún artefacto electrodoméstico, cambiar las opciones de un control remoto, girar la pantalla de un televisor de un lado a otro, entre otras innumerables acciones propias del quehacer diario. Por tal razón, se propone a través de este proyecto de investigación, el desarrollo algorítmico de una técnica de procesamiento digital de señales complementada con una red neuronal artificial adaptativa, para embeberlo en un dispositivo de hardware de National Instruments denominado myRIO, para contar con una interacción en tiempo real, debido a que este dispositivo utiliza un procesador ARM® Cortex™-A9 dual-core en tiempo real así como Entradas/Salidas personalizadas propias de la tecnología FPGA Xilinx.

## **Importancia**

Este estudio resulta importante porque su implementación permitirá dar facilidades a las personas que carecen de extremidades superiores, a realizar diferentes acciones propias del día a día, y haciendo uso de un grupo de patrones de voz previamente procesadas en tiempo real a través del dispositivo de hardware myRIO de National Instruments. Esto permitiría, en un futuro, que el proyecto propuesto se transforme en un producto portátil, aislándose completamente de la computadora y facilitando la interacción hasta con 06 señales analógicas de salida al mismo tiempo. Por lo tanto, esta investigación se justifica por la factibilidad de utilizar técnicas matemáticas de procesamiento digital de señales de voz, por la variada bibliografía referente a redes neuronales adaptativas, así como por la facilidad de adquirir y procesar señales de voz en tiempo real a través del dispositivo de hardware myRIO, que posee un procesador ARM® Cortex™-A9 dual-core, que cuenta con componentes internos, un acceso a software y una amplia biblioteca con recursos y tutoriales, tal como lo indica la página principal de National Instruments [2].

## **Antecedentes**

- a) Giovanni Simón [13], en la tesis titulada Filtro adaptativo LMS y su aplicación en el reconocimiento de palabras aisladas para el control de un equipo de sonido por medio de la voz, de la Pontificia Universidad Católica del Perú, señala que el intentar controlar un equipo de sonido por medio de órdenes verbales es un gran desafío, debido a que los algoritmos de reconocimiento de voz son muy frágiles y tienen una buena eficiencia sólo en un ambiente sin ruido. Por lo cual, basta la presencia de un ligero sonido para que la voz no pueda ser reconocida fácilmente. De esta manera, la investigación desarrollada por Giovanni intenta mejorar el porcentaje de aciertos de un sistema de reconocimiento ante la presencia de ruido, y por tal motivo utilizó un equipo de sonido marca Panasonic y modelo SC-AK45 con control remoto modelo EUR644853, del cual se tomaron algunas de las funciones para el control mediante la voz. Por lo tanto, empleó un filtro adaptivo LMS que es la interfase de entrada al sistema y que utiliza a la vez dos señales (la voz con ruido y la referencia) capturadas por dos micrófonos marca AKG D-230 implementado en la tarjeta de evaluación DSP56002EVM de Motorola. Este filtro cumple la función de reducir el nivel del sonido del equipo en la señal que contiene la voz, para que el sistema de reconocimiento pueda tener buena eficiencia y por lo tanto un bajo índice de error. La señal filtrada ingresó al sistema de reconocimiento implementado en la tarjeta de desarrollo TMS320C6711 que permitió el control en tiempo real, es decir en el instante en que la orden sea pronunciada, el sistema procesa la señal de voz y genera una respuesta enviando una señal infrarroja a través de un pequeño circuito IR que es la interfase entre la tarjeta y el equipo de sonido. Asimismo, el autor afirma que esta investigación es la base para controlar cualquier sistema que posea audio, como el caso de un TV, un DVD u otro.
- b) Luis Cruz y Marco Acevedo [14], en el artículo titulado Reconocimiento de Voz usando Redes Neuronales Artificiales Backpropagation y Coeficientes LPC, utilizan en la captura 05 archivos de audio en formato WAV en 05 personas diferentes, bajo el formato de monofónico, 16 bits por muestra y una frecuencia de muestreo de 11 KHz. Luego, acotaron la señal de voz eliminando la parte inicial y final, para luego hacerlo pasar a través de un filtro pasa-bajo de la familia Wavelets Daubechies que dio como resultado un mayor porcentaje de compactación de energía de la señal acotada. Posteriormente, se continuó con la normalización de la nueva señal filtrada con la finalidad de ajustar los parámetros a una sola escala, y de esa forma al ser utilizados por la Red Neuronal no cause problema de estabilidad. Para la normalización, se procedió a obtener la media y la varianza de la señal de interés. Y se restó la media de la señal de voz dividida por la varianza, y también dividida por el mayor valor absoluto. Posteriormente, se continuó con la obtención de los coeficientes LPC, comenzando la prueba con 2 coeficientes y finalizando

con 15 coeficientes. Finalmente, se procedió al entrenamiento de la red neuronal backpropagation conformada por 3 capas de neuronas: 25, 21 y 5, un error cuadrático medio igual a 0.005, y una tasa de aprendizaje de 0.05. Los resultados obtenidos de este proceso señalan que para los vectores de entrada que participaron en la etapa de entrenamiento, el grado de reconocimiento fue del 100%, mientras que para aquellos que no participaron en el entrenamiento, el reconocimiento disminuyó al 96%.

- c) Jaime Varela y Johan Loaiza [15], en el trabajo de grado titulado Reconocimiento de Palabras aisladas mediante redes neuronales sobre FPGA, señalan que el nivel de paralelismo de las Redes Neuronales es ampliamente significativo, tanto que no es explotado cuando su implementación se realiza en computadores de propósito general. Por lo cual, en este trabajo de investigación se buscó diseñar el sistema de reconocimiento de palabras aisladas en un computador de propósito general y diseñar en VHDL la red neuronal del sistema de clasificación apta para la implementación sobre una FPGA, para aprovechar el paralelismo y comparar los resultados del desempeño, eficiencia y confiabilidad. De esta manera, en esta tesis de grado se presentaron ambos desarrollos y se validaron según la velocidad de procesamiento de paquetes de palabras. El resultado final correspondió a diseños iguales, con aciertos similares, pero con velocidades de procesamiento realmente diferentes. Para el pre-procesamiento de la voz, se utilizó la energía y la magnitud para distinguir segmentos de voz sordos y sonoros. Asimismo, se empleó un filtro de pre-énfasis y una normalización con una ventana de Hamming. También se emplearon los coeficientes LPC para extraer las características de las señales de voz utilizadas y posteriormente se complementó con los Coeficientes Cepstrum sobre la Escala de Frecuencias Mel (MFCC). En cuanto a la red neuronal, se valieron de tres estructuras diferentes, pero utilizando siempre 3 capas de neuronas, lo cual permitió que una de ellas alcance un mejor resultado respecto al error medio cuadrático.
- d) M. Yommi [16], en el artículo titulado Sistema automático de reconocimiento de voz para control de acceso, señala que esta investigación aborda el estudio de las técnicas de procesamiento de señales de voz que permiten extraer las características intrínsecas de la identificación del locutor. El objetivo de este trabajo fue delimitar el acceso a solo aquellos locutores identificados y habilitados, donde dicho procedimiento se realiza por medio de una interfaz máquina-usuario. El método propuesto en esta investigación posee una capa física (hardware) implementada en torno a Arduino Uno y una capa de aplicación (software) desarrollada sobre la plataforma de MatLab 7.10. Para evaluar las características de los locutores se utilizaron los coeficientes cepstrales de frecuencia Mel. Para la clasificación, una red neuronal artificial con topología perceptrón multicapa y un aprendizaje supervisado del tipo Backpropagation. El entrenamiento y prueba del sistema se llevó a cabo con una base total de 80 muestras diferentes de voz. Finalmente, el rendimiento arrojado refleja que el sistema posee un porcentaje de acierto promedio del 64,58 %.

## Marco Conceptual

El marco conceptual está comprendido por los siguientes subtítulos.

### a) Hardware embebido NI myRIO 1900

Es un dispositivo de diseño embebido que ofrece una herramienta accesible que ayuda a los estudiantes y profesores a convertir sus ideas de proyectos de ingeniería en sistemas reales. Es un desarrollo de la compañía National Instruments, como una evolución de las tarjetas de adquisición de datos NI USB 6008 y NI USB 6009. Este dispositivo permite la manipulación de hasta 10 entradas analógicas, 6 salidas analógicas, 40 líneas de entrada y salida digital. Además, cuenta con un acelerómetro interno, LEDs, tecnología inalámbrica por WiFi, un procesador dual-core ARM Cortex-A9 en tiempo real, un Xilinx FPGA (Field Programmable Gate Array) personalizado y es programable con el software Labview o lenguaje C, tal como lo indica la página oficial de National Instruments [2].

A continuación, la figura 01 muestra una fotografía del dispositivo de hardware utilizado, y al lado derecho una representación de los principales puertos de acceso del mismo.

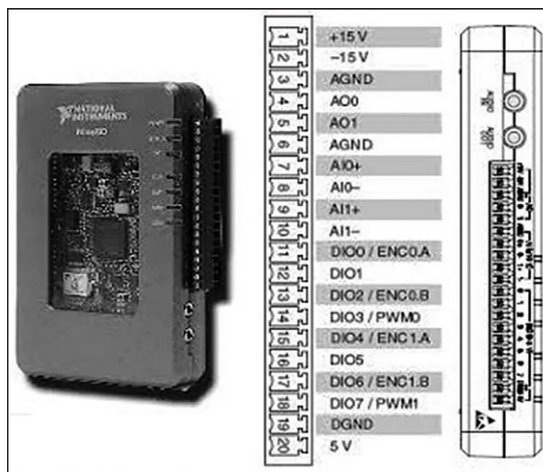


Figura 01. Fotografía del dispositivo myRIO 1900 y representación de los puertos de acceso [2].

### b) Red Neuronal Adaptativa ART2

Una de las definiciones de red neuronal artificial es la de una agrupación de elementos procesadores interconectados masivamente, que imitan de manera somera el comportamiento de una neurona biológica. Con un campo de acción amplio y aplicaciones múltiples en reconocimiento de patrones, predicción de señales e identificación de sistemas. Por otro lado, una red neuronal artificial adaptativa ART



(Adaptive Resonance Theory), es un modelo de red que cuenta con un aprendizaje del tipo competitivo, donde una neurona se identifica como ganadora dentro de un conjunto de neuronas definidas en la red. Esta neurona vencedora se caracterizará porque contará con un vector de pesos que representará a un cluster particular, tal como lo indica Martín Bonifacio en [1].

En cuanto a la diferencia de red neuronal adaptativa ART1 y ART2, se basa principalmente en el tipo de señal que se utilizará en el entrenamiento de dicha red. Es decir, si se utilizan señales binarias representadas por 0's y 1's, será la red ART1 la utilizada. Sin embargo, si se utilizan señales reales, la ART2 será la elegida. Para este trabajo de investigación, por tratarse del procesamiento y reconocimiento de señales de voz, se ha propuesto utilizar la red adaptiva ART2.

La representación matemática de la actualización de los pesos sinápticos, basado en el aprendizaje competitivo, se muestra a continuación, según S. Haykin [7]. Asimismo, la estructura de red neuronal se expresa en la figura 02.

$$w[n+1] = w[n] + \alpha * (x[n] - w[n]) \quad (01)$$

Donde:

- $w[n]$  : es el vector de pesos sináptico actual.
- $w[n+1]$  : es el nuevo vector de pesos sináptico.
- $x[n]$  : representa el vector de entrada actual.
- $\alpha$  : representa el factor de aprendizaje.

### c) Filtrado y digitalización de la voz

Una señal de voz es un tipo de onda acústica que, a través de un transductor como el micrófono, se convierte a una señal eléctrica. Sin embargo, aún continúa siendo del tipo analógico. Por tal razón, es necesario realizar la digitalización de la misma, haciendo cumplir el Teorema de Muestreo.

De esta manera, una señal de voz, generalmente, es digitalizada a razón de 125 micro segundos. Lo cual representa a 8000 muestras por cada segundo de señal de voz.

Una vez realizada la operación de digitalización, es necesario aplicar un tipo de filtro digital que puede ser del recursivo o no recursivo. Según Antoniou [11], el filtro digital recursivo, todo polo, tiene la siguiente función de transferencia:

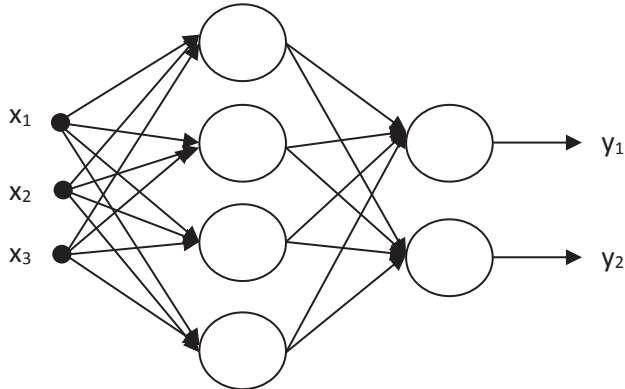


Figura 02. Ejemplo de estructura de red neuronal artificial adaptativa.

$$H(z) = \frac{1}{1 - \sum_{i=1}^p a_i z^{-i}} \quad (02)$$

Donde:

$a_i$ , para  $i=1, 2, 3, \dots, p$ , representa los coeficientes del filtro digital recursivo.

Y, el filtro no recursivo presenta la siguiente variante:

$$H(z) = \sum_{i=1}^p a_i z^{-i} \quad (03)$$

Donde:

$a_i$ , para  $i=1, 2, 3, \dots, p$ , representa los coeficientes del filtro digital no recursivo.

#### d) Coeficientes Predictivos Lineales LPC

Representan a un conjunto de parámetros que caracterizan el aparato vocal, obtenidos a partir de un modelo de filtro-fuente de producción de voz, según Alcaim [5]. Asimismo, se indica, que el modelo LPC de producción de voz está basado en la observación de que cada muestra de voz puede ser estimada, a partir de combinaciones lineales de muestras anteriores. Es decir, se cumple la siguiente expresión matemática [5]:

$$\hat{s}[n] = \sum_{i=1}^P a_i * s[n-i] \quad (04)$$

Por lo tanto, considerando a  $e[n]$  como señal de excitación o error de una estimación, se tiene [5]:

$$s[n] = \left( \sum_{i=1}^P a_i * s[n-i] \right) + e[n] \quad (05)$$

Donde:

- $a_i$  : es el coeficiente LPC.
- $s[n]$  : señal de voz.
- $e[n]$  : señal de excitación.

### e) Software LabVIEW de National Instruments

Es un entorno de desarrollo diseñado específicamente para acelerar la productividad de ingenieros y científicos. Cuenta con una sintaxis de programación gráfica que facilita visualizar, crear y codificar sistemas de ingeniería. Asimismo, este software de programación gráfica, ayuda a ingenieros a convertir sus ideas en realidad, reducir tiempos de pruebas y ofrecer análisis de negocio basado en datos recolectados, según como lo señala la página oficial de National Instruments [3]. Asimismo, cuenta con módulos adicionales que permiten ampliar sus prestaciones a diferentes campos de acción: módulo de Control Design and Simulation, módulo IMAQ Vision, módulo Real Time, módulo FPGA, entre otros. A esto se le suma la variedad de dispositivos de hardware, propias de National Instruments, desarrollados tanto para la enseñanza como para la industria, permitiendo de esta manera una mejor y mayor aplicación de la ingeniería.

## OBJETIVOS

### • Objetivo General

Reconocer patrones de voz, en tiempo real, utilizando una red neuronal ART2 embebida en el dispositivo de hardware myRIO.

### • Objetivos Específicos

- a. Desarrollar algoritmos de procesamiento digital de señales para el reconocimiento, en tiempo real, de un conjunto de 10 mandos de voz, para luego embeberlos en el hardware myRIO 1900 de NI.
- b. Entrenar una red neuronal artificial adaptativa ART2, con la participación de un grupo de 10 personas, para luego embeber las matrices de pesos sinápticos en el hardware myRIO 1900 de NI.
- c. Utilizar el dispositivo de hardware myRIO 1900 de NI para realizar una acción final a partir del conjunto de mandos de voz reconocidos, en tiempo real.

## VARIABLES DE ESTUDIO

En cuanto a las variables de estudio empleadas en este trabajo de investigación, en función al tipo de investigación correlacional desarrollada, se tiene:

- **Variable Independiente:**

Aplicación de técnicas matemáticas de procesamiento digital de voz.

Indicadores: Filtrado Digital de Voz, Segmentación de la Señal de Voz y Obtención de Coeficientes LPC.

- **Variable Dependiente:**

Reconocimiento de 10 mandos de voz.

Indicadores: Encendido de una combinación de 4 leds del hardware embebido myRIO.

## METODOLOGÍA

- **Tipo de investigación**

El tipo de investigación empleado fue tecnológico y aplicativo.

- **Método de investigación**

El método de investigación fue del tipo empírico y experimental. Debido a que se tomaron datos a través de un medio digital y se procedió a aplicar técnicas matemáticas de procesamiento digital de señales de forma práctica.

- **Diseño de investigación**

El diseño específico de investigación es del tipo experimental y correlacional.

- **Instrumento de recolección de datos: Captura y digitalización de mandos de voz**

La captura y digitalización de las señales o mandos de voz se realizaron directamente con el software Matlab, haciendo uso de un micrófono omnidireccional conectado al puerto multimedia de la Laptop, y apoyado de las librerías de Audio y Video del propio software utilizado. Seguidamente se muestra el código de programa utilizado para el proceso de captura y a la vez digitalización, teniendo presente las siguientes características para el procedimiento de digitalización.

- Frecuencia de muestreo igual a 8000 muestras/segundo.

- Número de bits por muestra igual a 8.

- Número de canales: monofónico.

- Número de segundos de grabación igual a 2.0 s.

```
>> Fs = 8000;
```

```
>> y = wavrecord( 2*Fs , Fs , 'double');
```

```
>> size(y)
```

Una vez digitalizado los mandos de voz, se continuó con el almacenamiento para crear la base de datos para este proyecto.

### • Creación de Base de Datos

Como fueron 10 personas las que participaron en el proceso de captura y digitalización de los mandos de voz, se procedió a realizar 06 grabaciones de voz por cada una de las personas participantes. Esto permitió que se alcance un total de 600 archivos de audio en formato WAV. Ver la tabla 01, así como la lista de los mandos de voz utilizados con los respectivos nombres de archivos de extensión WAV<sup>3</sup>.

1ra persona	10 mandos de voz	6 grabaciones mando de voz	por	60 archivos de audio
2da persona	10 mandos de voz	6 grabaciones mando de voz	por	60 archivos de audio
3ra persona	10 mandos de voz	6 grabaciones mando de voz	por	60 archivos de audio
4ta persona	10 mandos de voz	6 grabaciones mando de voz	por	60 archivos de audio
5ta persona	10 mandos de voz	6 grabaciones mando de voz	por	60 archivos de audio
6ta persona	10 mandos de voz	6 grabaciones mando de voz	por	60 archivos de audio
...	...	...		...
10ma persona	10 mandos de voz	6 grabaciones mando de voz	por	60 archivos de audio
<b>TOTAL DE ARCHIVOS O GRABACIONES</b>				600 archivos de audio

Tabla 01. Base de datos conformada por mandos de voz.

1er mando de voz: IZQUIERDA	→	izquierda_pp_gg.wav
2do mando de voz: DERECHA	→	derecha_pp_gg.wav
3er mando de voz: DELANTE	→	delante_pp_gg.wav
4to mando de voz: ABAJO	→	abajo_pp_gg.wav
5to mando de voz: ABRIENDO	→	abriendo_pp_gg.wav
6to mando de voz: CERRANDO	→	cerrando_pp_gg.wav
7mo mando de voz: APAGAR	→	apagar_pp_gg.wav
8vo mando de voz: ENCENDER	→	encender_pp_gg.wav

<sup>3</sup> Formato de archivo de audio digital de Microsoft

9no mando de voz: PARADA → parada\_pp\_gg.wav  
10mo mando de voz: AVANZA → avanza\_pp\_gg.wav

Como puede observarse, se eligieron 10 mandos de voz todos ellos conformados por palabras de tres sílabas, lo cual permitió la diferenciación entre ellos y la facilidad de reconocimiento por la técnica matemática empleada. Asimismo, por comodidad de lectura de los archivos de audio de mandos de voz, se utilizó una denominación particular.

A continuación, se explica con un ejemplo.

“avanza\_pp\_gg.wav”

Donde:

avanza: es el nombre correspondiente al mando de voz utilizado.

pp: conformado por dos caracteres que representan al número de persona que participó en la grabación del mando de voz.

gg: conformado por dos caracteres que representan al grupo de grabación del mando de voz realizada por la persona “pp”.

Seguidamente se muestra el código de programa empleado para representar gráficamente 04 señales de audio digital de la segunda persona, y correspondientes a la primera grabación de los mandos de voz: IZQUIERDA, DERECHA, DELANTE y ABAJO. Ver la figura 03.

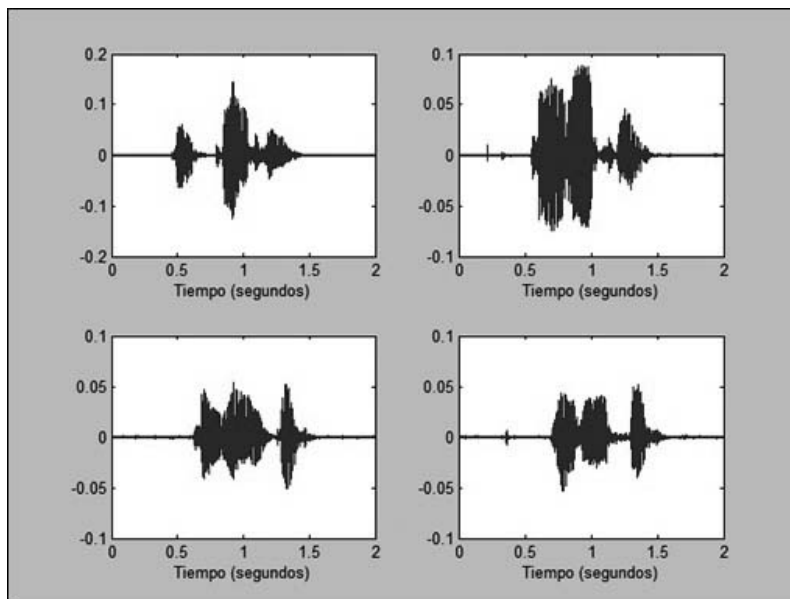


Figura 03. Representación temporal de 04 mandos de voz en función al tiempo.

```
>> Fs = 8000;
>> t = linspace( 0 , 2 , 2*Fs );
>> y1 = wavread('izquierda_02_01.wav');
>> y2 = wavread('derecha_02_01.wav');
>> y3 = wavread('delante_02_01.wav');
>> y4 = wavread('abajo_02_01.wav');
>> figure(1)
>> subplot(2,2,1), plot( t , y1 ), xlabel('Tiempo (segundos)')
>> subplot(2,2,2), plot( t , y2 ), xlabel('Tiempo (segundos)')
>> subplot(2,2,3), plot( t , y3 ), xlabel('Tiempo (segundos)')
>> subplot(2,2,4), plot( t , y4 ), xlabel('Tiempo (segundos)')
```

• **Técnicas de procesamiento de datos**

Por tratarse de un tipo de investigación aplicativo y tecnológico, no se utilizaron técnicas estadísticas, sino únicamente teorías matemáticas. Por lo cual, el procesamiento se dividió en diversas etapas comenzando con el desarrollo de los algoritmos de tratamiento digital de mandos de voz, siguiendo con la obtención de los coeficientes predictivos lineales (LPC), continuando con el entrenamiento de la Red Neuronal Adaptiva en el software Matlab, y finalizando con el almacenamiento de las técnicas matemáticas y los pesos sinápticos de la Red Neuronal, en el hardware embebido NI myRIO, con el fin de alcanzar el reconocimiento de los 10 mandos de voz. Seguidamente, se describen las etapas mencionadas, partiendo de la captura y digitalización de los mandos de voz. Ver el diagrama de bloques de la figura 04, como referencia.

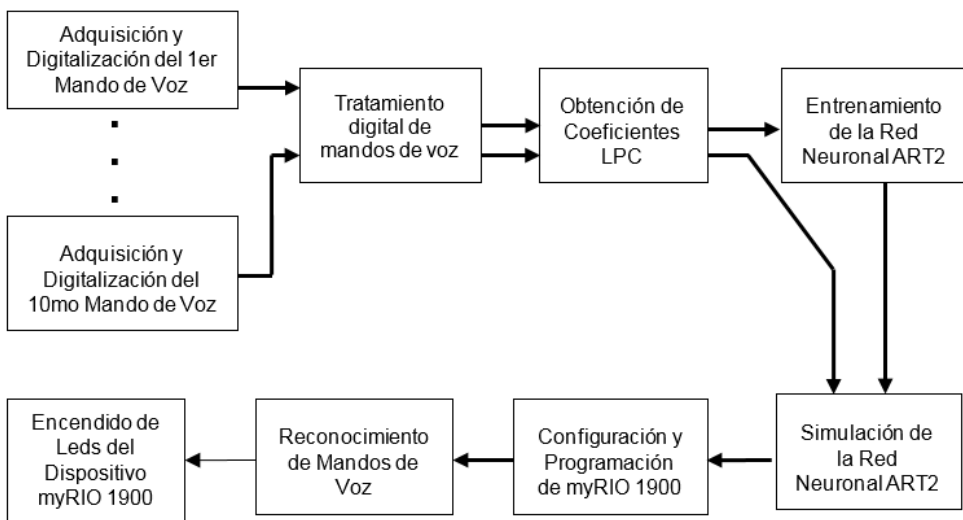


Figura 04. Diagrama de bloques de las etapas de la técnica de procesamiento de datos.

## f) Tratamiento digital de mandos de voz

Según lo indicado en la sección de Captura, Digitalización y Almacenamiento de Mandos de Voz, se utilizaron 2 segundos de grabación por cada mando de voz. Por lo tanto, si la frecuencia de muestreo utilizada fue igual a 8000 Hz, o también entendido como 8000 muestras por segundo, entonces el mando de voz digitalizado ascendió a un total de 16000 muestras que fueron representadas a través de una variable del tipo vector en el software Matlab.

Por lo tanto, a continuación, se muestran cada uno de los pasos realizados para sobre el vector de 16000 muestras.

Primero, se procedió a recortar la señal digital de 16000 muestras. Pues, a pesar que dichas señales están constituidas por 3 sílabas, se presentaron partes de silencios al inicio y al final de la grabación. Para realizar el recorte de la señal de audio digital, se procedió a abstraer cada vector representativo de la señal digital de mando de voz por su valor promedio. Luego, se normalizó dividiéndolo por el elemento máximo del nuevo vector obtenido. Este proceso fue realizado en cada segmento de 10 mili segundos, lo que equivale a 80 muestras, obteniendo el módulo seguido del promedio ponderado para después compararlo con un umbral, tanto en la búsqueda de izquierda a derecha, como de derecha a izquierda. A continuación, se representa el diagrama de flujo correspondiente a este primer procesamiento. Ver la figura 05.

Por otro lado, en la figura 06, se representa dos de los mandos de voz de la figura 03 complementados con el proceso de recorte del inicio y fin.

```
>> y1r = recorta(y1 );  
>> y2r = recorta(y2 );  
>> subplot(2,2,1); plot( t, y1 ), title('Señal IZQUIERDA ORIGINAL')  
>> subplot(2,2,2); plot( t, y2 ), title('Señal DERECHA ORIGINAL')  
>> subplot(2,2,3); plot( y1r ), title('Señal IZQUIERDA Recortada')  
>> subplot(2,2,4); plot( y2r ), title('Señal DERECHA Recortada')
```

Segundo, se continuó con el uso de un filtro de pre-énfasis, con la finalidad de hacer menos sensible la causa de los efectos de cuantización por longitud finita de palabra. Para esto, se empleó el filtro no recursivo de primer orden pasa alto mostrado en la ecuación 06.

$$H(z) = 1 - 0.95 z^{-1} \quad (06)$$



Como tercer paso, se aplicó un filtro pasa banda del tipo recursivo, para limitar el ancho de banda en frecuencia de los mandos de voz digitalizados, evitando así tonos de frecuencia ajenos al de la de voz humana. En la figura 07 se muestra la representación en frecuencia para dicho filtro con una banda limitada entre 500 Hz. y 3900 Hz. Y, en la figura 08 se representa el resultado de la operación de filtrado sobre las señales recortadas de la figura 03.

```
>> Fs = 8000;
```

```
>> Orden = 4; Ripple = 40;
```

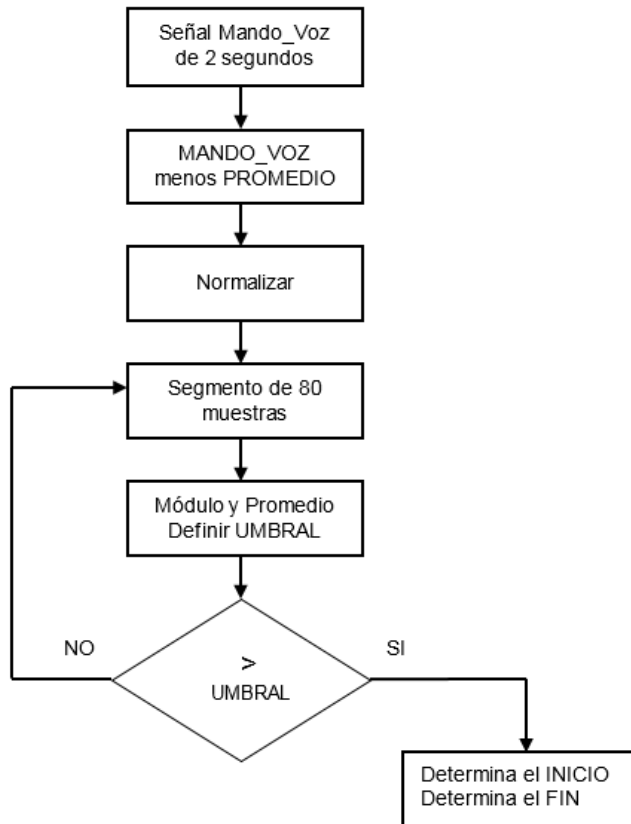


Figura 05. Diagrama de flujo del proceso de recorte de la señal digital.

```
>> Frecuencia_corte = [ 500 3900 ];
```

```
>> [ B , A ] = cheby2( Orden ,Ripple, Frecuencia_corte/(Fs/2) );
```

```
>> figure(1), freqz( B , A , Fs , 'whole' , Fs )
```

```
>> y1rf = filter( B , A , y1r );
```

```
>> figure(2),  
>> subplot(2,1,1),  
>> plot(y1r),  
>> xlabel('Tiempo (segundos)')  
>> figure(2),  
>> subplot(2,1,2),  
>> plot(y1rf),  
>> xlabel('Tiempo (segundos)')
```

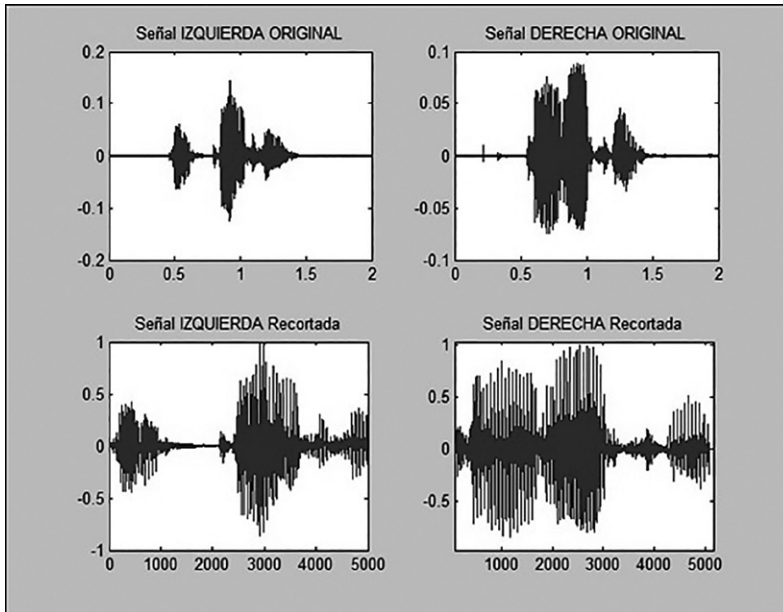


Figura 06. Representación temporal de 02 mandos de voz y sus respectivos recortes.

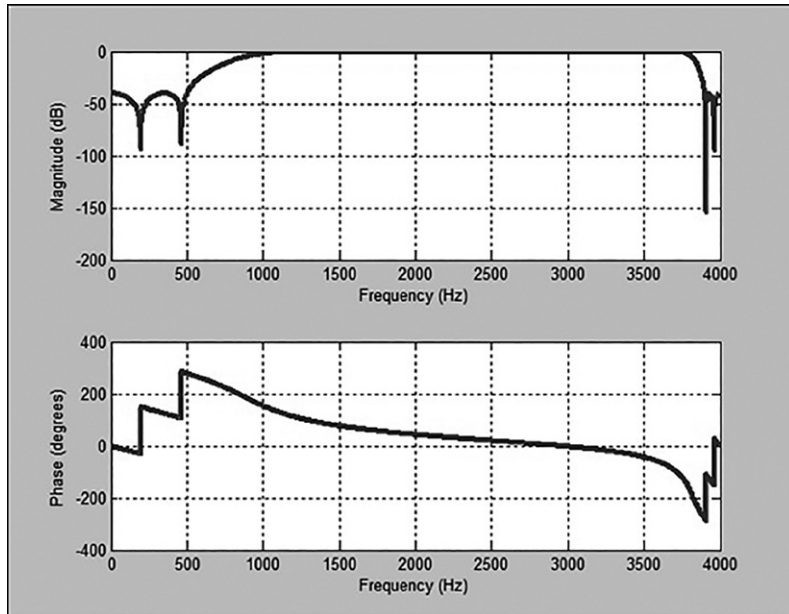


Figura 07. Filtro pasa banda Recursivo del tipo Chebyshev.

### g) Obtención de Coeficientes LPC

La obtención de los Coeficientes de Predicción Lineal (LPC), fue el siguiente paso al tratamiento de los mandos de voz. Por lo cual, teniendo presente que las grabaciones de 2 segundos no siempre fueron recortadas a un tamaño uniforme de muestras, aun perteneciendo a una misma persona y grabación de mando de voz, se procedió a obtener un número fijo de coeficientes LPC para cada una de las señales recortadas.

De esta manera, después de realizar varias pruebas de efectividad en cuanto al número apropiado de coeficientes LPC, se determinó el valor de 84. Para ello, se recurrió al toolboxSignalProcessing del Matlab y se utilizó la función denominada LPC sobre cada una de las señales digitales de mando de voz filtrada, recortada y ventaneada. El procedimiento de ventaneo tiene como significado, multiplicar el mando de voz pre procesado, por una ventana de hamming con el mismo tamaño de muestras. A continuación, se muestra el código de programa utilizado.

```
>> coef = 85;
>> h = hamming(coef);
>> y1rfv = y1rf.* h';
>> coef_LPC = lpc(y1rfv, coef);
>> coef_LPC_01 = coef_LPC(2:end);
```

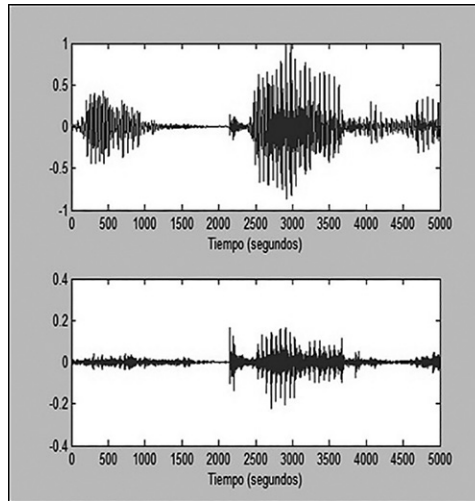


Figura 08. Mando de voz filtrado con el filtro Pasa Banda.

En vista que el conjunto de coeficientes LPC de cada mando de voz presentó oscilaciones continuas, se optó por aplicar un filtro pasa bajo de orden 30 y con frecuencia de corte igual a 2 KHz. a cada grupo de mandos de voz con la finalidad de suprimir tales oscilaciones. Por lo cual, antes de filtrar, se normalizó el conjunto de coeficientes LPC. Luego, se incrementó el tamaño del vector de coeficientes LPC con 30 muestras al inicio, y en forma invertida para así eliminar el transitorio resultante después de aplicar la operación de filtrado con un filtro no recursivo, de orden relativamente reducido. A continuación, se representa el código de programa empleado en el Matlab para la normalización y filtrado de los coeficientes LPC, así como una representación gráfica del resultado de la operación de filtrado sobre los coeficientes LPC. Ver la figura 09.

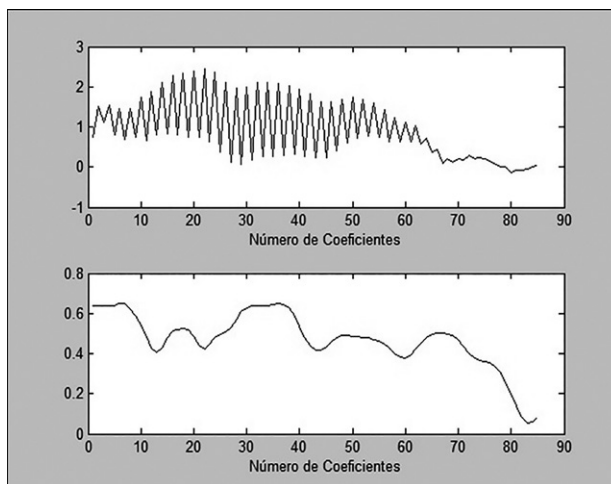


Figura 09. Filtrado pasa bajo de los coeficientes LPC de un mando de voz.

```

>> coef_LPC_01_N = coef_LPC_01 / max(coef_LPC_01);
>> a = [flipud(coef_LPC_01_N(1:30)) coef_LPC_01_N];
>> hpb = fir1(30, 2000 / 4000);
>> b = filter(hpb, 1, a);
>> coef_LPC_01_N_F = b(31:end);
>> figure(2),
>> subplot(2,1,1), plot(coef_LPC_01), xlabel('Número de Coeficientes')
>> subplot(2,1,2), plot(coef_LPC_01_N_F), xlabel('Núm. de Coefic.')
```

## h) Entrenamiento de la Red Neuronal ART2

La Red Neuronal ART2<sup>4</sup> es un tipo de estructura de red que utiliza el principio de hacer resonar los vectores de entrada con las clases reconocidas por la propia red neuronal. Es decir, si entra en resonancia con una clase la red considera que pertenece a ella y se realiza una adaptación que incluye algunas características de los nuevos datos a la categoría existente. Y, por el contrario, cuando no resuena, la red se encarga de crear una nueva clase con el vector de entrada como ejemplo de la misma. Todo esto lo señala Jorge Rodríguez en [04, pág. 23].

Consecutivamente, se muestra un diagrama de flujo del funcionamiento simplificado de la Red Neuronal ART2, el cual fue implementado a través de un código de programa del software Matlab. Ver la figura 10.

Para la realización de la etapa de entrenamiento de la Red Neuronal ART2, se utilizó el 80% del total de 600 vectores de audio almacenados inicialmente. Y el 20% para la etapa de prueba. Esto quiere decir, que se contó con dos grupos de vectores, uno para la etapa de entrenamiento y un segundo para la de prueba. De esta manera, haciendo uso de 480 vectores, el proceso de entrenamiento hizo que se creara una matriz de pesos sinápticos de tamaño 46 x 84, esto significa que se crearon 46 clases para reconocer los 10 tipos de mandos de voz, donde algunas de las clases pertenecieron a un mismo mando de voz. Por lo tanto, se procedió a almacenar dicha matriz de pesos en un archivo de extensión TXT, para posteriormente ser leído a través del software Labview.

---

<sup>4</sup> Teoría de la Resonancia Adaptativa Tipo 2

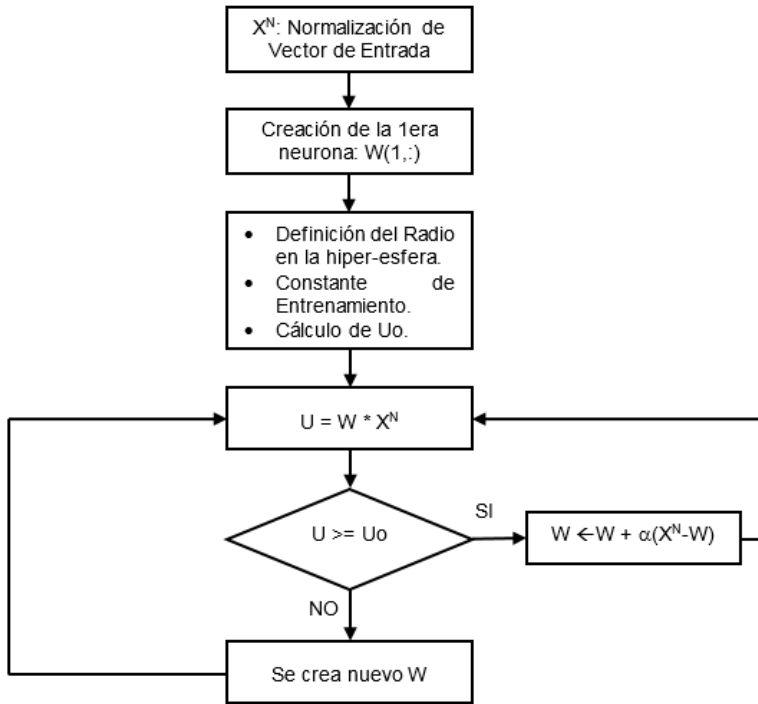


Figura 10. Diagrama de flujo de la Red Neuronal Artificial ART2 simplificada.

El tamaño de la matriz de pesos sinápticos resultante dependió mucho del radio elegido en la superficie de la hiper-esfera. Es decir, se tomó un valor de radio igual a 0.15 y no mayor a este, con la finalidad de evitar crear sub clases mayores que podían encerrar a un conjunto de mandos de voz diferentes. Asimismo, la constante de entrenamiento elegida fue de un valor pequeño e igual a 0.05, para evitar inestabilidad de la red neuronal durante el proceso de entrenamiento. De esta manera, se hicieron tres pruebas de valores de radio diferentes, llegando a la conclusión de tomar una cantidad igual a 0.15. Es decir, fue una elección a partir de un procedimiento de ensayo y error.

Posteriormente, para mantener la precisión de cada uno de los elementos de la matriz de pesos final, se optó por almacenarlos con un total de hasta 8 dígitos decimales en formato de punto fijo.

```

>> fid=fopen('pesos.txt', 'w');
>> fprintf(fid, '%4.8f\t\n', w);
>> fclose(fid);
  
```

### i) Simulación de la Red Neuronal ART2

Una vez entrenada la Red Neuronal ART2, se procedió a simularla utilizando los 600 vectores de entrada de mandos de voz por vez. Es decir, primero con el grupo

de entrenamiento en donde los resultados fueron mejores, y luego con el grupo de prueba. A continuación, se muestra el código de programa utilizado para el proceso de simulación con la red neuronal.

```
>> load Pesos
>> clases = zeros( 1 , 600 );
>> for i=1:600
    d = W * coef_LPC_N_F( : , i );
    [ x , y ] = max( d );
    clases( i ) = y;
end
```

### **j) Configuración y Programación de myRIO 1900**

Para la configuración del dispositivo de hardware embebido myRIO 1900, se utilizó el software LabVIEW y las librerías correspondientes al hardware en mención. Por lo cual, consistió en conectar dicho hardware a la toma de 220 VAC y a la laptop por medio del cable USB. Esto permitió el reconocimiento automático del dispositivo con un número de serie y dirección IP, propio. Luego, una vez realizada la configuración automática, se procedió a hacer click en la opción Launch the Getting Started Wizard de la primera ventana, obteniendo una nueva presentación de ventana (figura 11).

Posteriormente, al hacer click en el botón NEXT, se llegar a una nueva ventana que sirve de prueba para verificar el funcionamiento del acelerómetro incluido, el encendido de un led a través de un botón, y el encendido directo de los 4 leds. Todo esto puede apreciarse en la figura 12. En este proyecto de investigación, solamente se utilizó la opción de encender los 4 leds del propio hardware embebido, pero a partir del reconocimiento de cada uno de los 10 mandos de voz.

Realizada la configuración del myRIO, se continuó con la implementación de un código de programa gráfico para la adquisición de la señal de voz en tiempo real, a partir de un micrófono conectado directamente al puerto de audio de la laptop. Esto puede observarse en la figura 13, la cual representa la Ventana Diagrama de Bloques del Labview. Luego, se procedió a trasladar todo el código de programa desarrollado en el software Matlab al software Labview. Para esto, se utilizaron librerías propias del Labview que permitieron que interactúe en tiempo real con el Matlab, tal es el caso del MATHSCRIPT NODE. Esta opción de programación solo es posible de utilizarlo si tanto el Matlab y el Labview se encuentran instalados correctamente en la misma PC o Laptop. Asimismo, dicha librería sólo necesitó de una entrada y una salida. Por un lado, la entrada es la señal de voz digitalizada en formato de un vector, con 16000 muestras. Mientras que la señal de salida es el filtrado pasa bajo del conjunto de 84 coeficientes

LPC listos para ser ingresados a la red neuronal artificial adaptativa, previamente entrenada en el software Matlab. Ver la figura 14.



Figura 11. Ventana de Reconocimiento de la Configuración del hardware embebido myRIO.

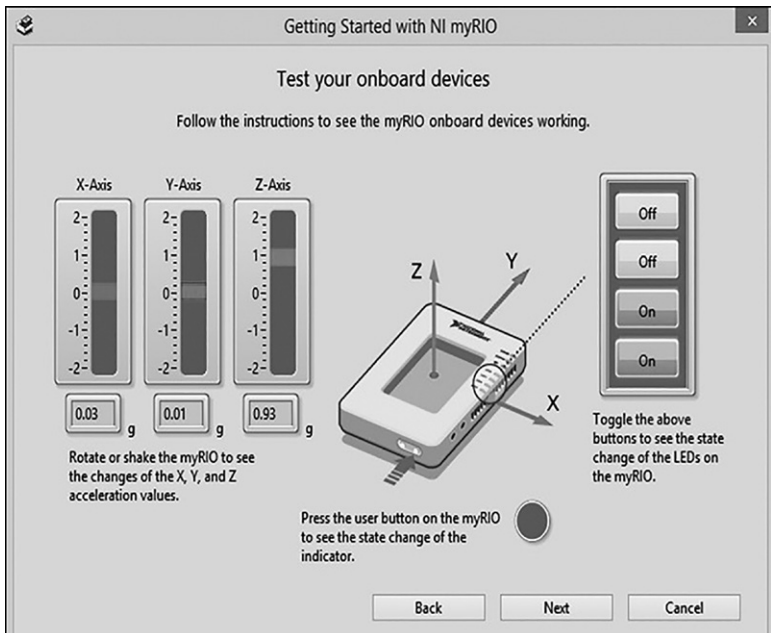


Figura 12. Ventana de prueba para el hardware embebido myRIO.



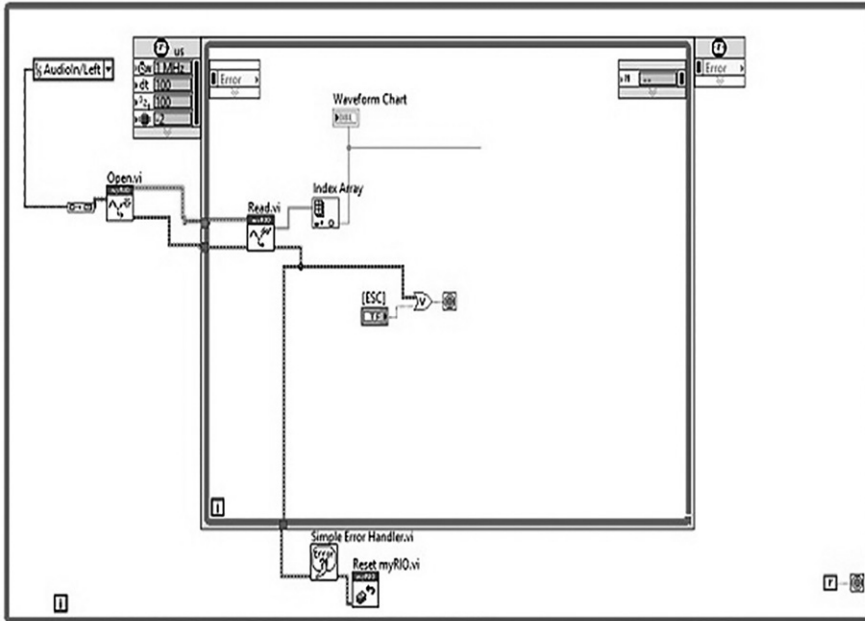


Figura 13. Programación de la lectura del audio en tiempo real.

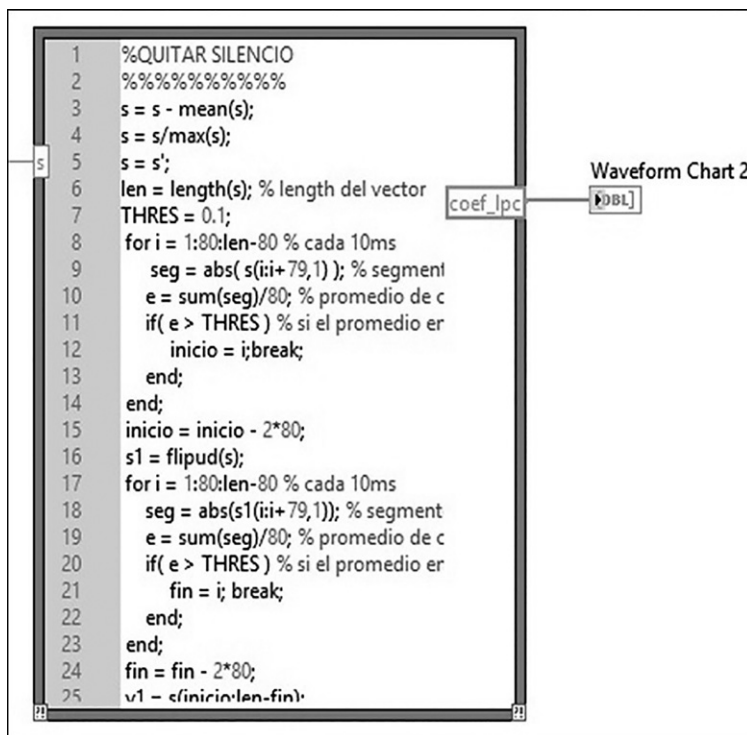


Figura 14. Programación del procesamiento de la señal de audio en el MathScriptNode del Labview.

Por otro lado, el Math Script Node de la Red Neuronal Adaptiva recibió como primera entrada el filtrado pasa bajo de los coeficientes LPC, previamente pre procesados, y como segunda entrada el nombre del archivo donde se almacenaron los pesos sinápticos de la red neuronal. Y otorgó como salida un valor correspondiente a la clase de mando de voz reconocida. Asimismo, como parte de esta programación, se incluyó la lectura del archivo PESOS.TXT que contiene a la matriz de pesos sinápticos entrenados previamente en el software Matlab. Ver la figura 15 para identificar la programación realizada en Labview, correspondiente a la etapa de reconocimiento por parte de la red neuronal.

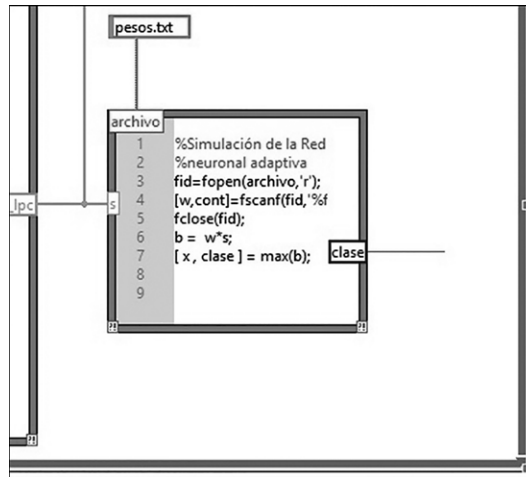


Figura 15. Programación del reconocimiento de los mandos de voz por medio de la Red Neuronal ART2, implementada en el Math Script Node del Labview.

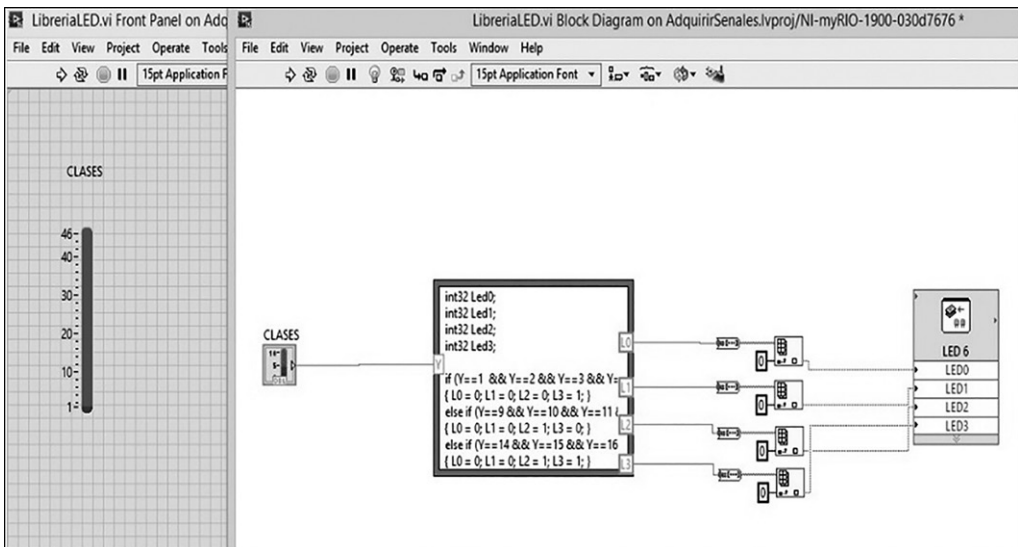


Figura 16. Librería para encendido/apagado de leds del myRIO 1900.

También se puede apreciar, de la figura 16, una combinación de encendido y apagado de leds, con una conversión previa de un formato numérico a booleano según al conjunto de clase a la cual pertenece un mando de voz específico.

La lista de mandos de voz en función al encendido y apagado de los leds, puede observarse en la tabla 02, lo que equivale a 10 combinaciones utilizando los 4 leds del myRIO 1900.

	<b>MANDOS DE VOZ</b>	<b>LED 01</b>	<b>LED 02</b>	<b>LED 03</b>	<b>LED 04</b>
1	IZQUIERDA	OFF	OFF	OFF	ON
2	DERECHA	OFF	OFF	ON	OFF
3	DELANTE	OFF	OFF	ON	ON
4	ABAJO	OFF	ON	OFF	OFF
5	ABRIENDO	OFF	ON	OFF	ON
6	CERRANDO	OFF	ON	ON	OFF
7	APAGAR	OFF	ON	ON	ON
8	ENCENDER	ON	OFF	OFF	OFF
9	PARADA	ON	OFF	OFF	ON
10	AVANZA	ON	OFF	ON	OFF

Tabla 02. Situación de encendido de 4 leds del hardware embebido myRIO 1900.

Además, es preciso añadir que el reconocimiento no fue totalmente efectivo debido a algunas razones que serán explicadas en la sección de resultados. Por lo cual, hubo clases compartidas por mandos de voz diferentes, tal es el caso del mando de voz DERECHA y DELANTE.

## RESULTADOS

Para mostrar los resultados de este proyecto, se hicieron pruebas con la matriz de pesos sinápticos obtenidos después del entrenamiento de la red neuronal, y tomando como entrada las 600 grabaciones capturadas inicialmente con el software Matlab. Por lo cual, en la tabla 03 se muestra un resumen del grado de reconocimiento que se tuvo al identificar los 10 mandos de voz tomados como referencia.

<b>MANDOS DE VOZ</b>	<b>RECONOCE</b>	<b>NO RECONOCE</b>
IZQUIERDA	53 señales	07 señales
DERECHA	52 señales	08 señales
DELANTE	52 señales	08 señales
ABAJO	55 señales	05 señales
ABRIENDO	54 señales	06 señales
CERRANDO	54 señales	06 señales
APAGAR	53 señales	07 señales
ENCENDER	52 señales	08 señales
PARADA	50 señales	10 señales
AVANZA	53 señales	07 señales
<b>SUB TOTAL</b>	<b>528 señales</b>	<b>72 señales</b>
<b>TOTAL</b>	<b>600 señales</b>	

Tabla 03. Resumen del grado de reconocimiento con los mandos de voz capturados y almacenados.

Del resultado anterior, se obtiene el porcentaje de Reconocimiento y No Reconocimiento del total de señales de audio utilizadas.

$$\%No\_Reconocimiento = \frac{72 \cdot 100}{600} = 12 \%$$

$$\%Reconocimiento = \frac{528 \cdot 100}{600} = 88 \%$$

También, se procedió a realizar pruebas reales con un nuevo número de mandos de voz, dictados en tiempo real a través del micrófono conectado a la Laptop. Para esto, se eligió a una de las personas participantes para que pronunciara los 10 mandos de voz, bajo la misma característica de los mandos de voz inicialmente capturados. Por lo cual, los resultados alcanzados, se muestran a continuación en la tabla 04.

MANDOS DE VOZ	RECONOCE
IZQUIERDA	SI
DERECHA	SI
DELANTE	SI
ABAJO	SI
ABRIENDO	NO
CERRANDO	NO
APAGAR	SI
ENCENDER	SI
PARADA	SI
AVANZA	NO
<b>RECONOCE</b>	<b>07 MANDOS</b>
<b>NO RECONOCE</b>	<b>03 MANDOS</b>
<b>TOTAL</b>	<b>10 MANDOS</b>

Tabla 04. Resumen del grado de reconocimiento con los mandos de voz capturados en tiempo real.

De esta manera, el proceso de reconocimiento de los 10 mandos de voz tuvo como principal objetivo capturar efectivamente la voz humana a través del micrófono omnidireccional, para luego ser procesado por el hardware embebido y mostrar la combinación de encendido/apagado de leds en forma correcta. A continuación, en la figura 17 se muestra una fotografía de la manera como se conectó el hardware myRIO a la Laptop y a su vez el encendido y apagado de los leds, según el mando de voz reconocido. Para este caso: cerrando.

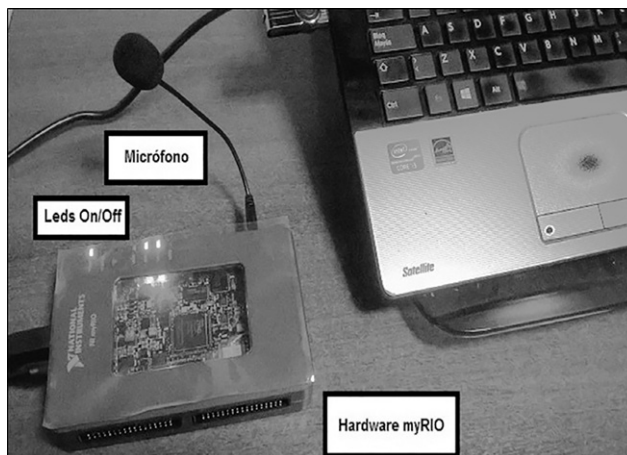


Figura 17. Fotografía del hardware embebido después de reconocer un mando de voz ingresado por el micrófono

## **DISCUSIÓN**

Para mejorar más aún esta investigación, es necesario contar con un micrófono de mejores características técnicas para capturar la señal de voz, y así contar con una información con menos ruido y con el uso de técnicas matemáticas de procesamiento digital menos complejas, para lograr por completo la etapa de pre procesamiento.

Como una posterior investigación, se podría optar por utilizar un procesamiento frecuencial adicional para extraer mejor las características de la señal de audio capturada. Como, por ejemplo, los Coeficientes Cepstrales de frecuencia MEL. O como también podría ser necesario utilizar los Modelos Ocultos de Markov para obtener una mejor extracción de las principales características de una señal digital de voz. De esta manera, el entrenamiento de la red neuronal mejoraría al contar con un total de padrones de entrada menos similares entre ellos. Por lo cual, mejoraría la definición de las clases y muy probable simplificaría el número de neuronas en la red neuronal.

Además, para convertir este proyecto en una aplicación más práctica y útil para personas discapacitadas, se haría necesario invertir en una etapa de diseño de hardware para manipular señales de voltaje o corriente en continua o alterna. Para ello sería necesario circuitos electrónicos para potencia, aislamiento y amplificación. Debido a que la tarjeta myRIO cuenta con puertos de salida analógica, pero para voltaje continuo y a una baja corriente. Por tal razón, se puede extender el desarrollo de este proyecto al uso de otro tipo de hardware denominado CompactRIO, el cual si se acomoda para situaciones reales e industriales.

## **CONCLUSIONES**

a) Se logró desarrollar las técnicas de procesamiento digital de señales para el reconocimiento de los mandos de voz. Inicialmente, las técnicas matemáticas fueron implementadas algorítmicamente en el software Matlab para verificar la efectividad de las mismas. Posteriormente, se trasladaron hacia el software Labview, haciendo uso de la librería Math Script Node que facilitó tal migración conservando el lenguaje de código propio del Matlab. No obstante, se hace necesario que tanto el software Matlab como el Labview, se encuentren correctamente instalados en la misma PC o Laptop utilizada. Entre las técnicas matemáticas utilizadas se tuvo al del recorte de los segmentos no sonoros basada en una comparación de energía frente a un umbral, por cada segmento de 10 mili segundos de duración. De igual manera, se aplicaron operaciones de filtrado digital de pre-énfasis de orden igual a 1, y un pasa banda de orden igual a 4. Y finalmente, se determinaron los coeficientes LPC, los cuales fueron filtrados por un pasa bajo. Todo ello fue señalado en la sección de Metodología de este informe de proyecto. En conclusión, se afirma que existe una variedad de técnicas matemáticas para pre procesar y extraer las características principales de

una señal de voz, y por lo cual debe comprobarse las distintas combinaciones de técnicas existentes.

- b) El entrenamiento de la red neuronal artificial ART2 fue lograda para un total de 480 vectores, que a su vez correspondieron a 10 personas distintas al momento de capturar los 10 mandos o patrones de voz digital. Este grupo de vectores se denomina conjunto de entrenamiento, y se hace necesario su uso para verificar luego la efectividad de la red neuronal con otro conjunto de vectores que no participaron. Denominados conjunto de prueba. Cabe señalar, que dicho entrenamiento se basó en implementar algorítmicamente el proceso de actualización de pesos sinápticos de la red neuronal ART2 en el software Matlab, debido a que este proceso de entrenamiento no se requiere que sea en tiempo real. Una vez realizada dicha tarea, se obtuvo como resultado la matriz de pesos sinápticos con 84 columnas debido a la cantidad de coeficientes LPC utilizados. Por lo cual, fue necesario almacenar dicha matriz de pesos en un archivo de texto, para luego ser leído por el software Labview al momento de utilizar la red neuronal en el proceso de validación de los vectores de mandos de voz. Si bien es cierto, que, en este proyecto de investigación, el hardware embebido no almacenó la matriz de pesos; existe la posibilidad de realizar rutinas de programación que, si lo permitan, haciendo que el myRIO 1900 tome el control total del reconocimiento de patrones a través de la red neuronal. En conclusión, la red neuronal adaptativa fue entrenada en off-line en el software Matlab, y luego se almacenó la matriz de pesos sinápticos obtenido en un archivo de texto del propio disco duro de la laptop utilizada, para finalmente leer tal archivo y utilizar los pesos en el reconocimiento de los mandos de voz. Tal proceso se realizó a través de rutinas de programación en el software Labview que fueron insertadas o embebidas en el myRIO 1900.
- c) Con la inserción de las técnicas matemáticas de procesamiento de señal, y la rutina de reconocimiento de patrones por medio de la red neuronal adaptativa en el dispositivo de hardware myRIO 1900 de NI, se permitió simular una acción final según el mando de voz reconocido. Dicha simulación correspondió a la combinación de encendido/apagado de 4 leds, propios del myRIO. No obstante, pudo ser posible utilizar los puertos de salida de este dispositivo para poder conectarlos externamente. Pero, asimismo, hubiera sido necesario contar con una circuitería electrónica adicional para facilitar el tema de potencia o mayor voltaje/corriente, según sea el caso. En conclusión, se logró combinar el encendido o apagado de los 4 leds del dispositivo de hardware myRIO, en función al tipo de mando de voz reconocido en tiempo real, cuando fue capturado a través de un micrófono omnidireccional que también fue conectado al mismo hardware en mención.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] M. Bonifacio y A. Sanz, *Redes Neuronales y Sistemas Borrosos*, 2da edición. México D.F.: Alfaomega y Ra-Ma, 2001.
- [2] National Instruments. (2016) NI myRIO Project Essentials Guide. Visitado en noviembre del 2016. [Online]. Disponible:<http://www.ni.com/academic/myrio/project-guide.pdf>
- [3] National Instruments. (2016) Software de Desarrollo de Sistemas NI LabVIEW. Visitado en diciembre del 2016. [Online]. Disponible: <http://www.ni.com/labview/esa/>
- [4] J. Rodríguez, “Redes Neuronales Artificiales para la Clasificación de Imágenes Satelitales,” *AVANCES Investigación e Ingeniería*, No 9, p. 20-31, 2008. [Online]. Disponible: [http://www.unilibre.edu.co/revistaavances/avances\\_9/r9\\_art2.pdf](http://www.unilibre.edu.co/revistaavances/avances_9/r9_art2.pdf)
- [5] A. Alcaim e C. Dos Santos, *Fundamentos do Processamento de Sinais de Voz e Imagem*. Rio de Janeiro, Brasil: Interciência, 2011.
- [6] P. Diniz, E. Barros e S. Lima, *Processamento Digital de Sinais. Projecto e Análise de Sistemas*. Porto Alegre, Brasil: Editorial Bookman, 2004.
- [7] S. Haykin, *Neural Networks A Comprehensive Foundation*. New Jersey, USA: Editorial Prentice Hall, 1994.
- [8] S. Haykin, *Adaptive Filter Theory*, Third Edition. New Jersey, USA: Editorial Prentice Hall, 1996.
- [9] J. Lajara y J. Pelegrí, *LabVIEW Entorno gráfico de programación*, 2da edición. México D.F.: AlfaomegaGrupo Editor, 2011.
- [10] P. Porcuna, *Robótica y domótica básica con Arduino*. Bogotá, Colombia: Editorial Ra-Ma, 2016.
- [11] A. Antoniou, *Digital Filters Analysis, Design, and Applications*, Second Edition. Singapore: McGraw-Hill, 1993.
- [12] M. Hagan, H. Demuth, M. Hudson, O. De Jesús, “Neural Networks Design”, Second Edition. eBooks. [Online]. Disponible: [hagan.okstate.edu/nnd.html](http://hagan.okstate.edu/nnd.html)
- [13] G. Simón, “Filtro Adaptativo LMS y su aplicación en el reconocimiento de palabras aisladas para el control de un equipo de sonido por medio de la voz”, Tesis de Ingeniero Electrónico, Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Ciencias e Ingeniería, Perú, 2004. [Online]. Disponible:[http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/123456789/280/SIMON\\_BENDEZU\\_GIOVANI\\_FILTRO\\_ADAPTIVO\\_LMS\\_APLICACI%C3%93N.pdf?sequence=1](http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/123456789/280/SIMON_BENDEZU_GIOVANI_FILTRO_ADAPTIVO_LMS_APLICACI%C3%93N.pdf?sequence=1)



- [14] L. Cruz y M. Acevedo, “Reconocimiento de voz usando Redes Neuronales Artificiales Backpropagation y Coeficientes LPC”, CICos, p. 89-99, 2008. [Online]. Disponible: <http://campusv.uaem.mx/cicos/cicos2008/imagenes/memorias/6tocicos2008/Articulos/Ponencia%207.pdf>
- [15] J. Varela y J. Loaiza, “Reconocimiento de palabras aisladas mediante redes neuronales con FPGA”, Tesis de Ingeniero Electricista, Universidad Tecnológica de Pereira, Facultad de Ingeniería, Colombia, 2008. [Online]. Disponible:<http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/1712/6213822V293.pdf?sequence=1>
- [16] M. Yommi, “Sistema automático de reconocimiento de voz para control de acceso”, XIII Congreso Argentino de Acústica, CADA E, 2015. [Online]. Disponible: <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/1712/6213822V293.pdf?sequence=1>



# **OPTIMIZACIÓN DE LA MEDICIÓN DE FLUJO BAJO EL PRINCIPIO DE LA PRESIÓN DIFERENCIAL Y SU IMPORTANCIA EN LA INGENIERÍA DE CONTROL Y AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL**

Ing. Humberto Chong Rodríguez  
Universidad Ricardo Palma

## **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.

### **Planteamiento del Problema**

#### **a) 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.

### **b) 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.

### **c) Formulación del problema**

#### **Problema general**

¿Cómo 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?

#### **Problemas específicos**

- a) ¿Cómo la configuración de un computador de flujo influye en la optimización y mejora de la medición de flujo?
- b) ¿En qué medida el cálculo correcto del diferencial de presión del sensor incide en un mejor cálculo del flujo en el computador?
- c) ¿De qué manera las enseñanzas de esta tecnología electrónica digital denominada computador de flujo incide en el desarrollo profesional del alumno de pregrado de Ingeniería?

### **d) 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 más 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.

### **e) Delimitación del problema**

a) Delimitación espacial:

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

b) Delimitación temporal:

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

### **• 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 del este consumo está en función directa con los costos.

### **• 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.

### • **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 más 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.

### • **Marco conceptual**

En el presente proyecto de investigación se analiza y estudia cómo 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 cómo 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 como 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.

### **a) 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 estos 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>5</sup>:

#### *a.1) Campo de medida (range)*

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

---

<sup>5</sup> Creus,A (2011) Instrumentación Industrial. Editorial Marcombo, Barcelona, México D.F., 8ª. Edición. 776 p



*a.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.

*a.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.

*a.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 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 régimen 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, se tiene:

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

Error absoluto = Valor leído – Valor verdadero

Error relativo = Error absoluto / Error verdadero

*a.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 patrón 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 está en función de una serie de magnitudes de entrada y la expresión de esta función puede ser experimental o un algoritmo de cálculo o bien una combinación.

*a.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 términos:

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

*a.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.

*a.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.

*a.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.

*a.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.

*a.11) Repetibilidad (Repeatibility)*

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.

*a.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 máxima desviación respecto del Span de salida. Ver la figura 18.

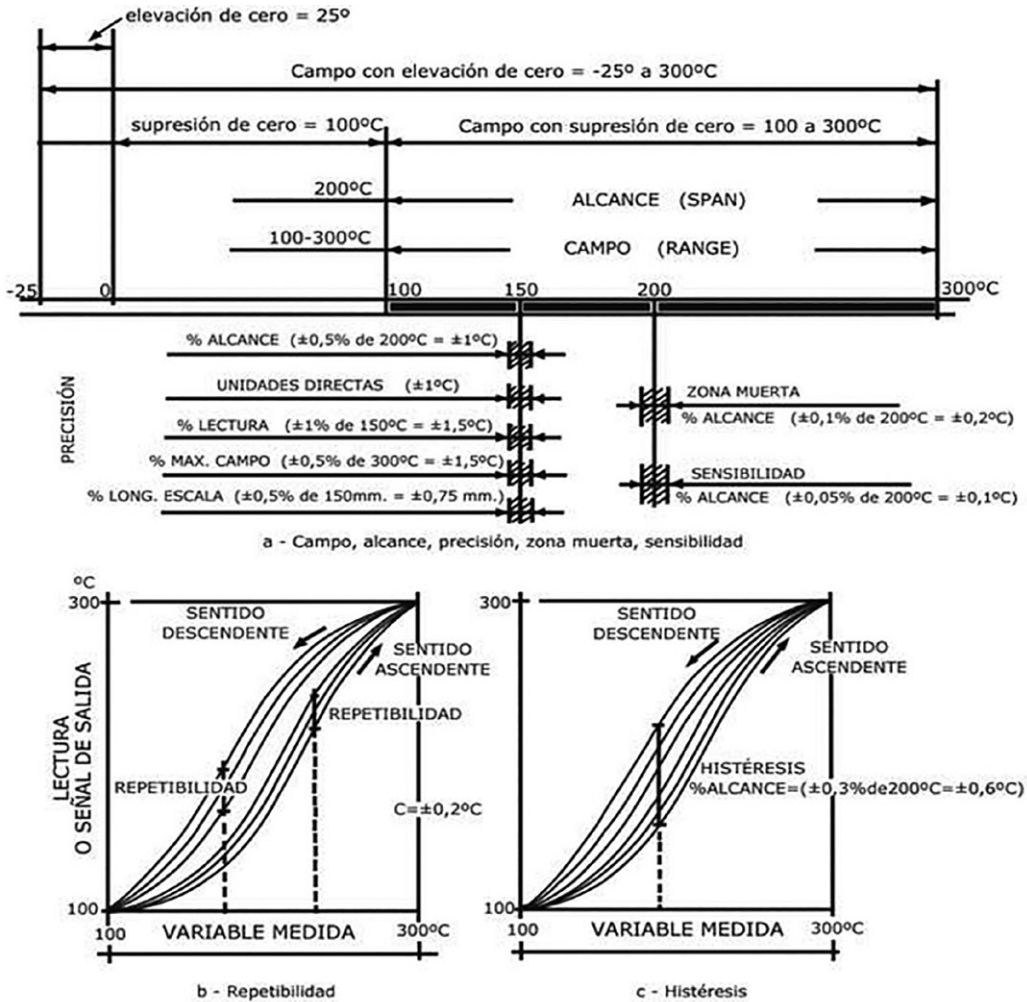


Figura 18. Definiciones de los instrumentos

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

## b) 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>6</sup>:

<sup>6</sup> Smar (2006). AuditFlow Sistema de Medición de Flujo.  
Web: <http://www.smar.com/espanol/faleconosco.asp>

## 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 volumétrico 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 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 tránsito 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 apéndices 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

### **e) 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>7</sup>.

#### c.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 más importantes).

---

<sup>7</sup> Creus,A (2011) Instrumentación Industrial. Editorial Marcombo, Barcelona, México D.F., 8ª. Edición. 776 p.

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

TuboPitot

Tubo Venturi

Tobera

TuboAnnubar

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

### c.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

#### d) 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 más 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.

d.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 Bernoulli.

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.

A continuación, en la figura 19, se representa el principio del Teorema de Bernoulli aplicado a una tubería horizontal.

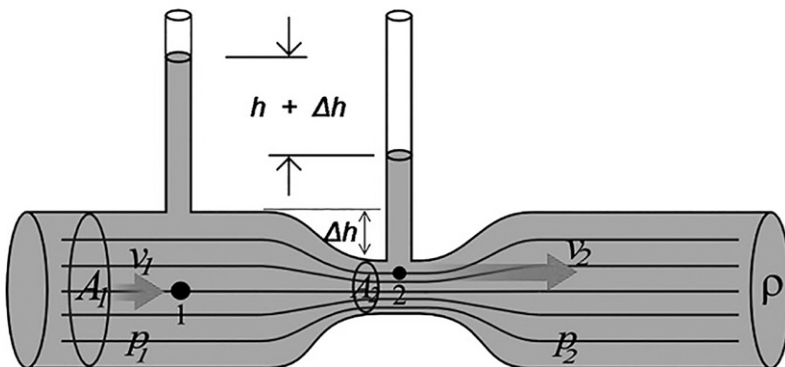


Figura 19. Principio de Bernoulli

Fuente: [es.wikipedia.org/wiki/Principio\\_de\\_Bernoulli](https://es.wikipedia.org/wiki/Principio_de_Bernoulli). Última revisión 25 Diciembre 2016

El Teorema de Bernoulli está definido por:

$$P_1 + A_1 + V_1 = P_2 + A_2 + V_2 \quad (07)$$

Donde:

$P_{1,2}$ : presiones absolutas

$V_{1,2}$ : velocidades

$A_{1,2}$ : secciones

d.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:

$$Q_v = C_d A_t E \varepsilon \sqrt{\frac{2 \Delta P}{\rho}} \quad (08)$$

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 para fluidos gaseosos)

$\rho$  = Densidad del fluido

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

d.3) Placa de orificio

#### 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, unas aguas arriba y otras 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 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, o 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.

#### Tipos de placas de orificio

Existen 3 tipos de placas de orificio:

- Concéntrica
- Excéntrica
- Segmentada

Los orificios excéntricos y segmentados permiten medir el flujo de fluidos que tengan pequeñas cantidades de sólidos y gases. Ver la figura 20. El pequeño agujero que aparece en la placa se usa para evitar que se acumulen líquidos o gases en la tubería.

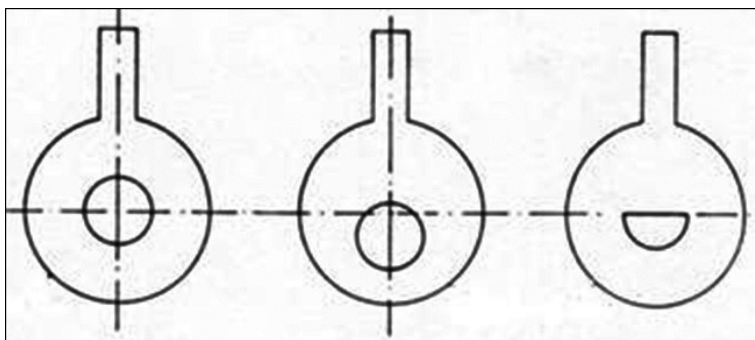


Figura 20. Placa de orificio, concéntrica, excéntrica y segmentada

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

### Vena Contracta

Es el punto de máxima velocidad y mínima presión. Está 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.

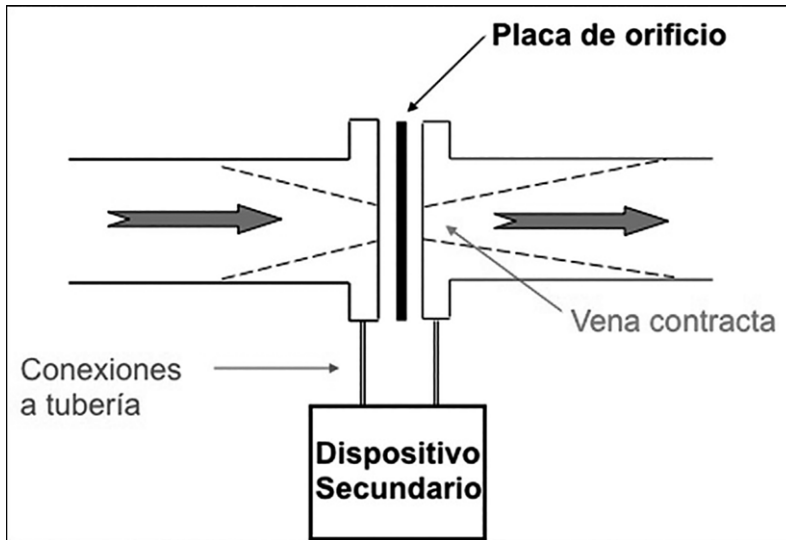


Figura 21. Vista de corte de la instalación de una placa de orificio en una tubería y punto de vena contracta. Fuente propia

### 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  $0.0004d$ .

H e I: Chaflanes de salida, no requieren tanta precisión como G.

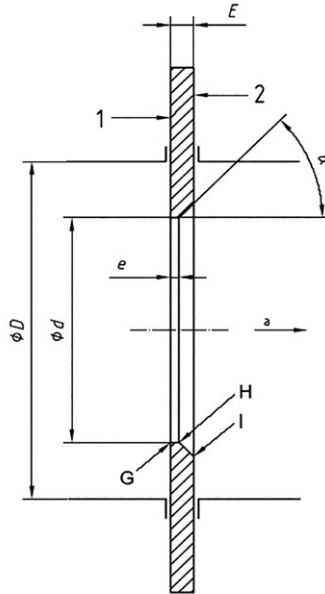


Figura 22. Geometría de una placa de orificio

Fuente: [www.atareao.es/otros/geometria-de-placas-de-orificio](http://www.atareao.es/otros/geometria-de-placas-de-orificio). Última revisión 26 de Noviembre, 2015

### 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, se obtiene:

$$\beta = \frac{d}{D} \quad (09)$$

Además, la relación de diámetros debe estar comprendida entre:

$$0.1 < \beta < 0.75 \quad (10)$$

### Ecuaciones Básicas

$$A_t = \frac{\pi}{4} * (D^2 - d^2) \quad (11)$$

$$E = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^4}} \quad (12)$$

$$\beta = \sqrt{\frac{D^2-d^2}{D^2}} \quad (13)$$

Donde:

$A_t$  : Área efectiva

$E$  : Velocidad de Approach

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

*Tipos de diseños de placas de orificio*



Figura 23.a.  
Placa de orificio tipo universal  
Fuente: Catálogo de Cameron  
MeasurementSystems

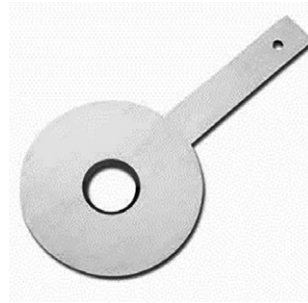


Figura 23.b.  
Placa de orificio tipo paleta  
Fuente: Catálogo de Cameron  
MeasurementSystems

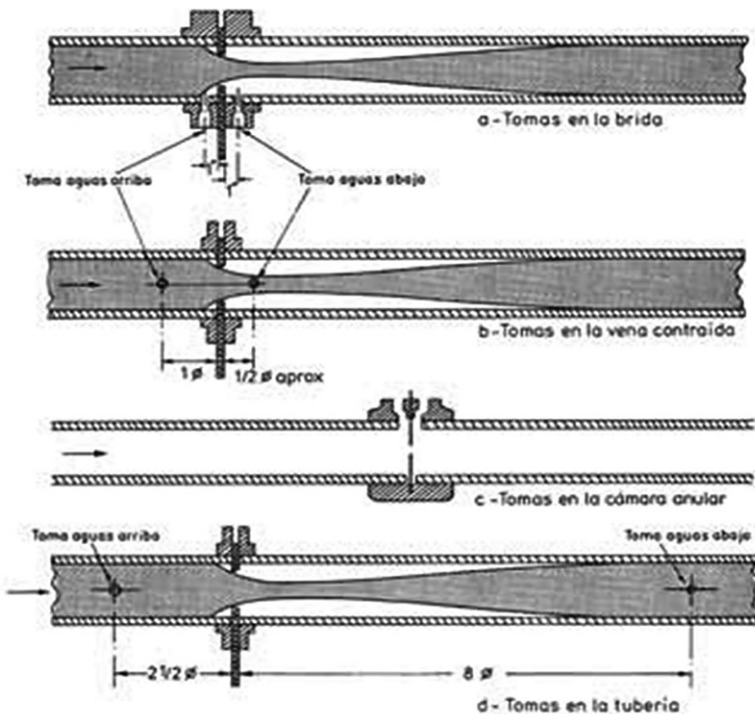


Figura 24. Instalación de una placa de orificio. Disposición de las tomas de presión diferencial  
Fuente: Instrumentación Industrial Antonio Creus Solé. Octava edición: Alfaomega Grupo Editor, México, Septiembre 2010

### *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 está constituido por tubos pequeños ensamblados dentro de un tubo más grande.

### *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 la toma 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.

### *Tomas de Bridas (FlangeTaps)*

Es el tipo de toma más 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.

### *Bridas porta placas de orificio*

Las placas de orificio es uno de los más 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 máquinas en estas bridas.

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

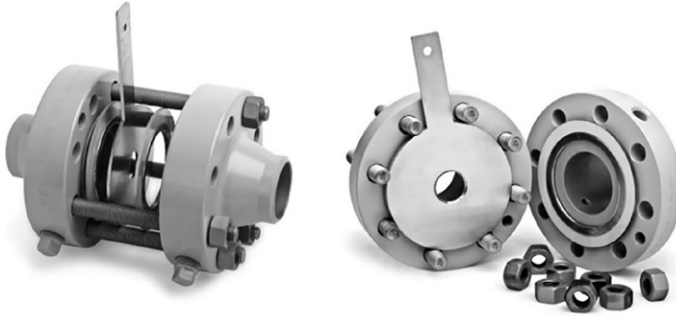


Figura 25. Brida – unión porta placa de orificio  
Fuente: Cameron MeasurementSystems



Figura 26. Unión de brida de orificio de presión diferencial Daniel  
Fuente: Emerson Process

#### d.4) Sensor para medir flujo tipo Cono (V-Cone)<sup>8</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>8</sup> McCrometer (2007) Lit. #24508-94 Rev.2.9/02-08. Tecnología avanzada de medidores de flujo de presión diferencial

Cuadro 2.1 Especificaciones de las presiones / materiales

Pressure Ranges	ANSI 300 lb to 2500 lb	
Flange Material	ASME A105 N carbon steel ASME A350 LF2 carbon steel ASME A182 F316 stainless steel	-20° F to 800° F (-29° C to 426° C) -50° F to 800° F (-46° C to 426° C) -425° F to 1500° F (-254° C to 816° C)
Studs/Nuts Material	ASME A193 B7/A194 2H (-40° F) ASME A193 B7M/A194 2HM (NACE) ASME A320 L7M (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

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 está 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 más 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 más 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 instantánea 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 más 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. Ver la figura 27.

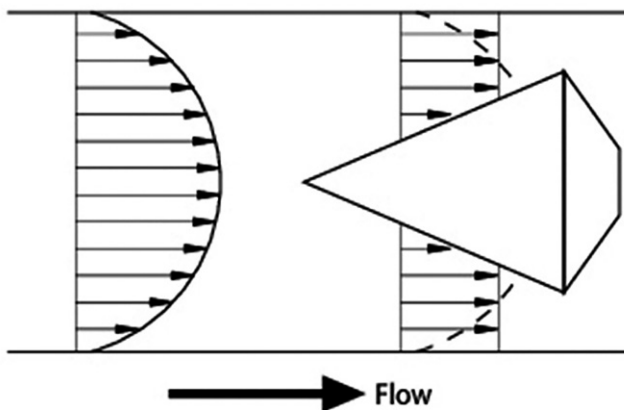


Figura 27. Geometría de un sensor tipo cono  
Fuente: Cameron MeasurementSystems



NUFLO DP Cone Meter shown with the Scanner® 2000 microEFM

Figura 28. Sensor tipo cono ensamblado con computador de flujo  
Fuente: Cameron MeasurementSystems

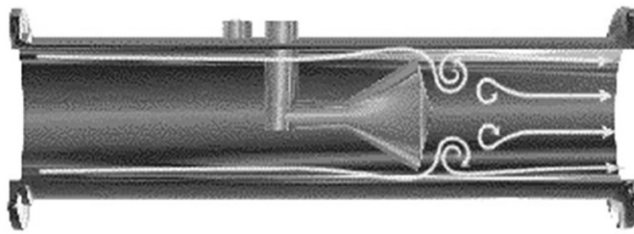


Figura 29. Sensor tipo Cono, vista interior dentro de la tubería formado vórtices  
Fuente: Mc Crometer

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.

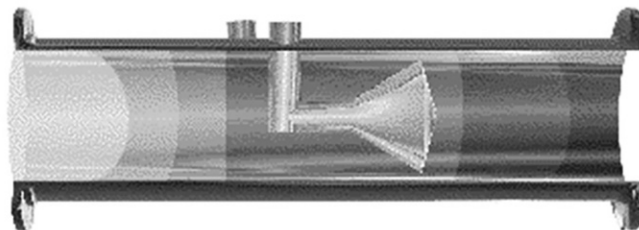


Figura 30. Sensor tipo Cono, vista interior dentro de la tubería  
Fuente: Mc Crometer

### *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.

### *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.

*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.

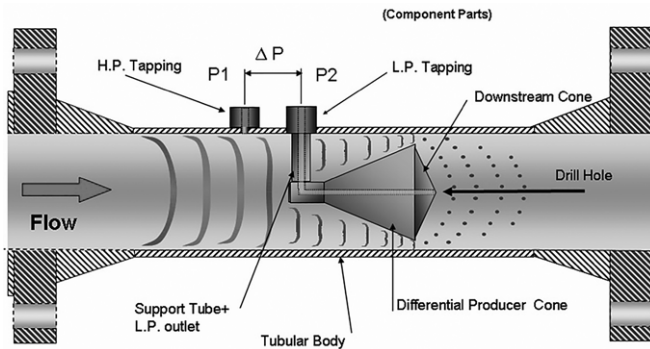


Figura 31. Partes de un sensor tipo cono  
Fuente: Cameron MeasurementSystems

*Nuevo cono inteligente para medición de flujos por el principio de presión diferencial*

Principales aplicaciones

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

Ecuaciones básicas

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

$$A_t = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) \quad (14)$$

$$\beta = \sqrt{\frac{D^2 - d^2}{D}} \quad (15)$$

$$E = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^4}} \quad (16)$$

Flujo volumétrico expresado en:

$$Q_v = (C_d * A_t * E * \varepsilon) \sqrt{\frac{2 \Delta P}{\rho}} \quad (17)$$

Flujo másico, expresado como:

$$Q_m = (C_d * A_t * E * \varepsilon) \sqrt{\frac{2 (P_1 - P_2)}{\rho}} \quad (18)$$

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)

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

$\rho$  = Densidad del fluido

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

### 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).

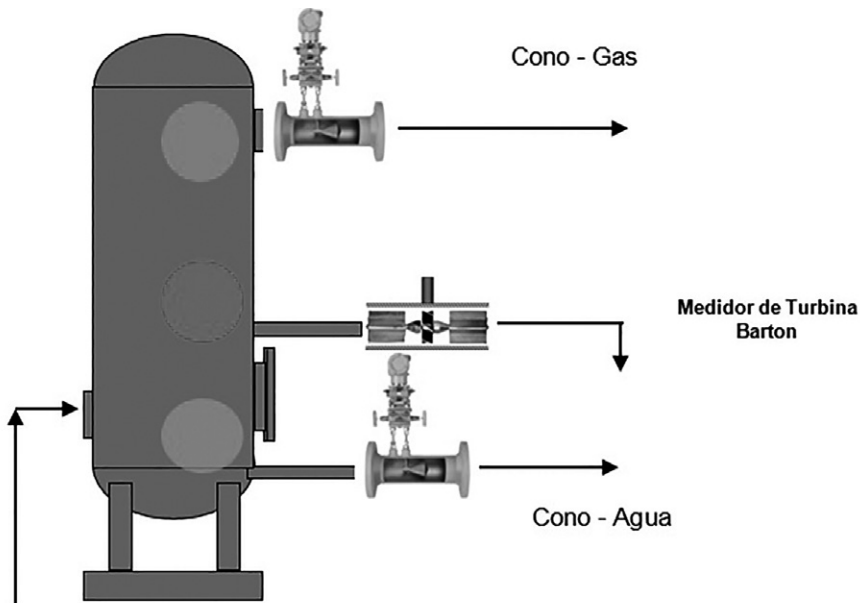


Figura 32. Separador de 3 fases en una batería de producción de petróleo.  
Aplicación del sensor tipo cono en la fase de agua y gas  
Cortesía: Cameron MeasurementSystems

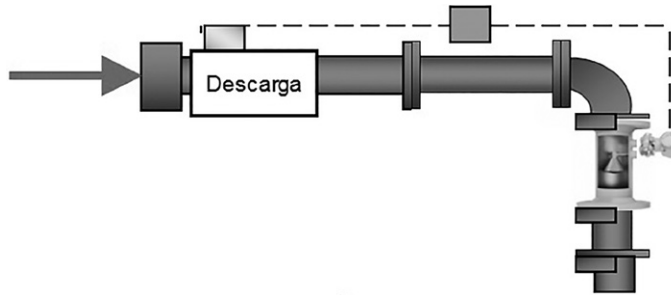


Figura 33. Sistema de Inyección de agua  
Cortesía: Cameron MeasurementSystems

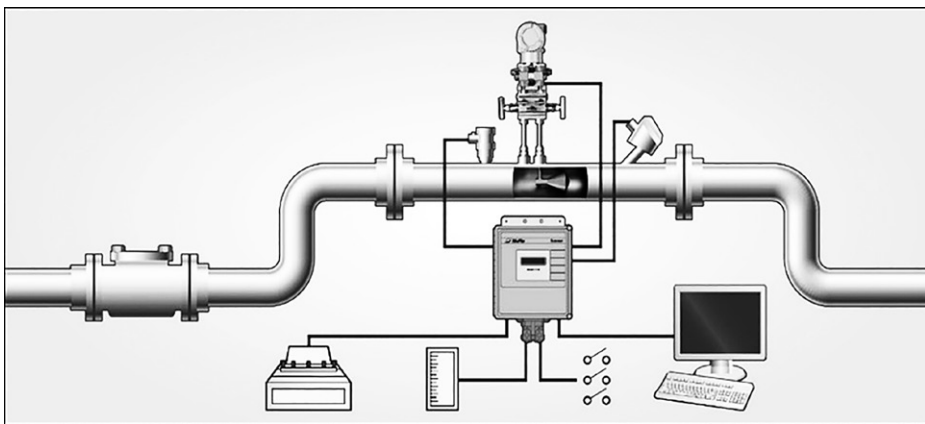


Figura 34. Sistema de medición de flujo Computador de Flujo + Sensor tipo Cono  
Cortesía: Cameron MeasurementSystems

#### d.5) Sistemas Electrónicos de Medición (EMS-ElectronicMeasurementSystem) denominado Computadores de Flujo<sup>9</sup>

Los computadores de flujo son los dispositivos más 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.

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.

<sup>9</sup> Cameron / Scanner (2015) Computadores de flujo serie Scanner 2000 CAMERON

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 FieldbusFoundation, 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.

#### *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.

#### *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.

#### *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.



### 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.

### Comunicaciones

Los computadores de flujo utilizan estructuras Modbus universales para el intercambio de datos entre computadores, SCADA's 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.

### 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.

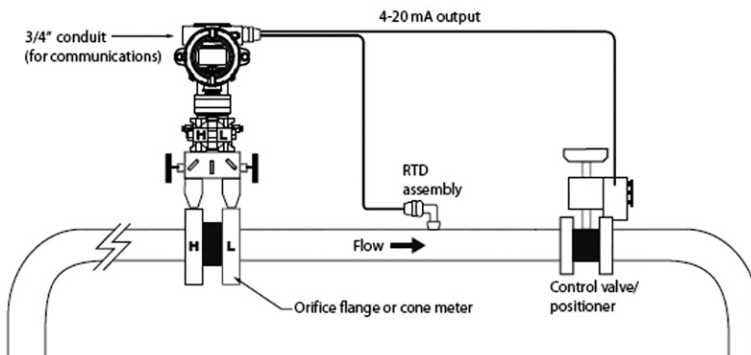


Figura 35. Sistema de medición de flujo en lazo cerrado, utilizando un computador de flujo  
Cortesía: Cameron MeasurementSystems

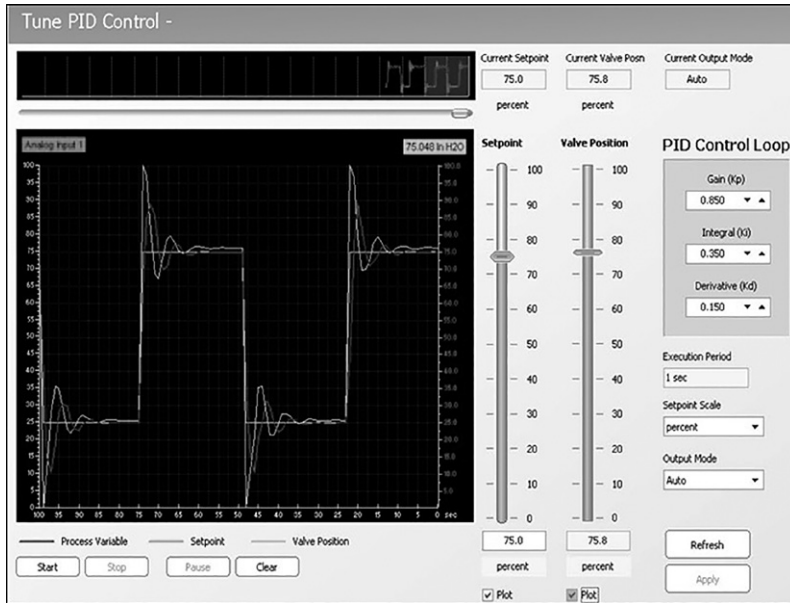
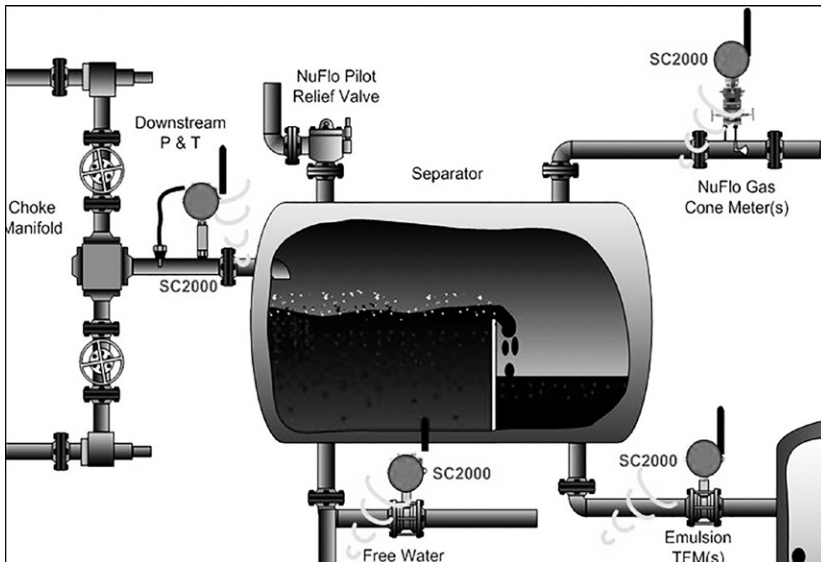


Figura 36. Gráfica de salida de la señal de control en un computador de flujo  
Cortesía: Cameron Measurement Systems



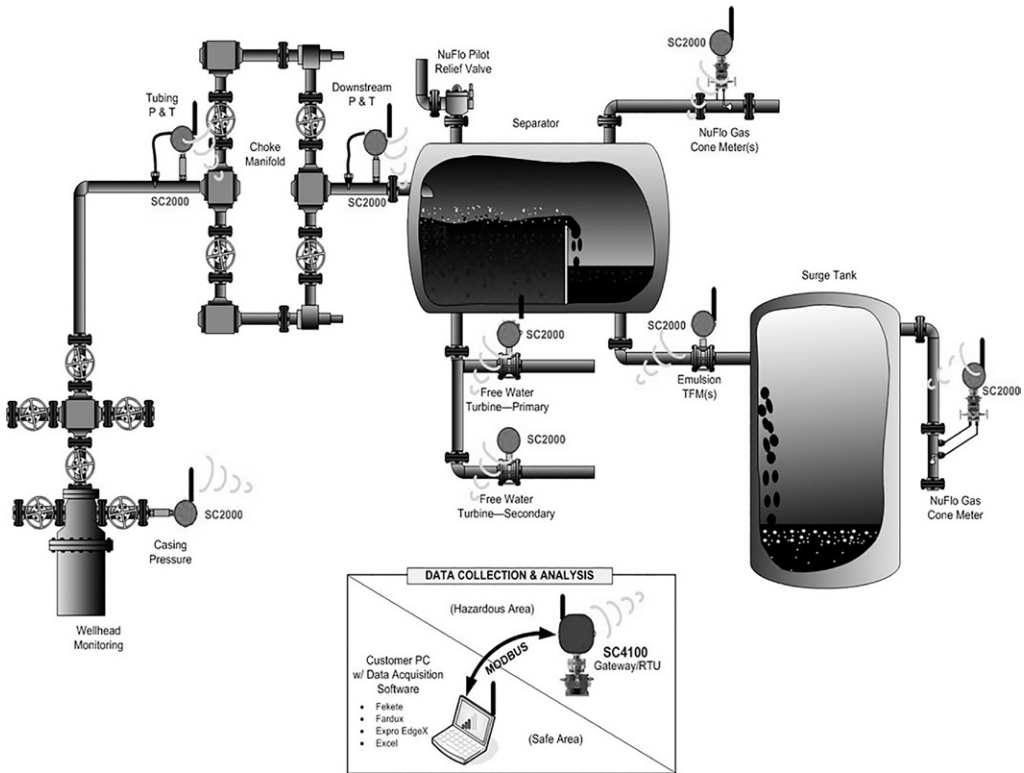


Figura 37. Aplicaciones de los computadores de flujo en sistemas de separación trifásicos  
 Agua - Petróleo - Gas  
 Cortesía: Cameron MeasurementSystems

## OBJETIVOS

### Objetivo General

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.

### 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.

- d. 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.

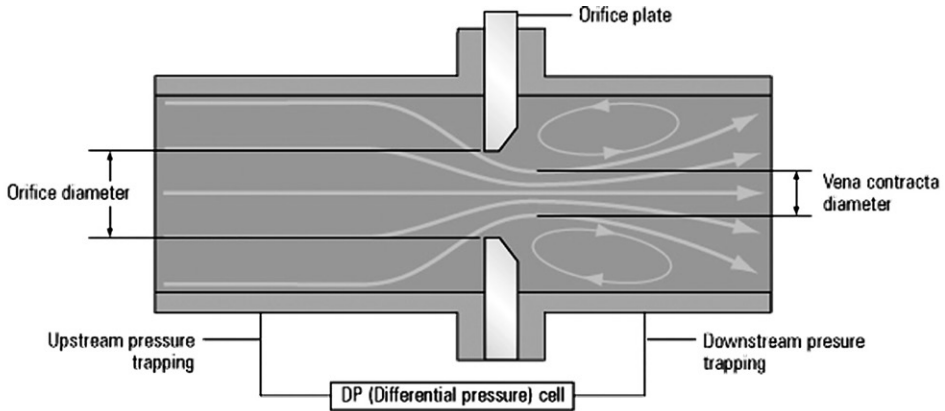


Figura 38. Típico sensor de presión diferencial denominado placa de orificio.  
Fuente: [www.http://pointing.spiraxsarco.com](http://pointing.spiraxsarco.com)

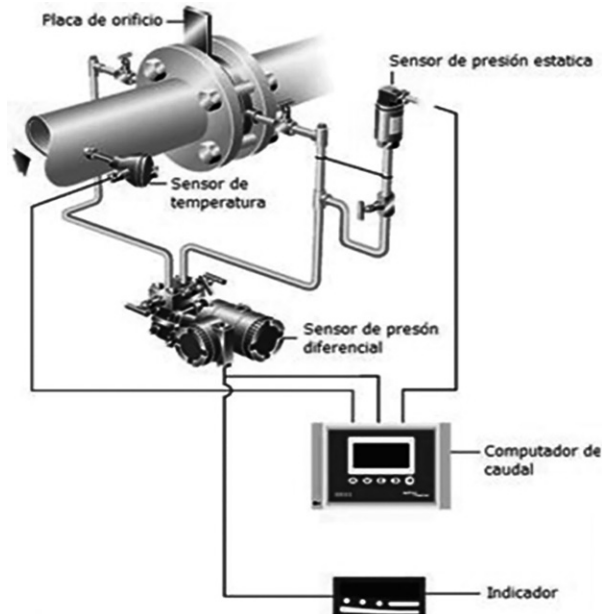


Figura 39. Sensor de flujo tipo placa de orificio conectado a un computador de flujo  
Fuente: Manual de medición de hidrocarburos – Capítulo 5 Medición Dinámica  
Ecopetrol (2008)

## VARIABLES DE ESTUDIO

### Variable Independiente

Sensores de flujo por el principio de presión diferencial integrados a los computadores de flujo.

Indicadores: Evaluación del proceso industrial a medir, diseño y selección del sensor de presión diferencial, y aplicación del computador de flujo en el proceso industrial.

### Variables Dependientes

1) Mejoras significativas en la medición de flujo de los procesos industriales.

Indicadores: Proceso industrial, evaluación del diseño del sensor propuesto, y el computador de flujo y su incidencia en la mejora de la medición de flujo.

2) Calidad de la formación profesional de los alumnos de las especialidades de ingeniería.

Indicadores: actualización del plan curricular, conocimientos previos, desarrollo de proyectos utilizando los sistemas de medición de flujo propuestos.

## METODOLOGÍA

### 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.

### 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.

### 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.

### **Universo, población y muestra**

#### a) Universo

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

#### b) 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.

#### c) 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.

### **Sub-muestra por tipo de sensor**

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

<b>Submuestra: Computador de flujo + placa de orificio</b>				
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

<b>Submuestra: Computador de flujo + cono</b>				
No.	Lote	Ubicación	SN	SN/N
1	LOTE VI SAPET	Talara	4	0.666666667
2	OLYMPIC	Piura	2	0.333333333
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 está 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. 3**

Cliente: OLYMPIC SUCURSAL PERÚ  
Lugar: Piura

**CONDICIONES DE OPERACIÓN**

Tipo de fluido: Gas Natural  
Máximo flujo volumétrico 7.0 mmcf/day  
Temperatura de entrada 80 F  
Presión de entrada 558 PSIG ( 572.1 PSIA )

**ESPECIFICACIONES DEL FLUÍDO**

Densidad relativa del gas: 0.56543

**RESULTADOS DEL CÁLCULO**

Sensor tipo placa de orificio de borde afilado por A.G.A. Reporte No. 3

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

Placa de orificio y espesor del borde ( Plate and edge thickness )

Espesor de la placa de orificio para condiciones normales de operación a 100 " W.C. por A.G.A - 3, Parte 2 ( 2000 )

Mínimo espesor: 0.115 "  
Máximo espesor: 0.163 "  
Espesor recomendado: 0.125 "  
Espesor mínimo del borde e: 0.021 "  
Espesor máximo del borde E: 0.1152 "  
Profundidad del bisel de salida: E - e  
Profundidad del bisel de salida recomendado: 0"  
Mínimo espesor requerido para asegurar la no deflexión de la placa de orificio a 100" W.C. 0.053152 "  
Obtenido del diseño:  
Espesor estándar: 1/16"



	<u>Condiciones referenciales</u>
Presión atmosférica:	14.069 PSI
Presión base:	14.696 PSI
Temperatura base:	60 F
Flujos auditables a 100" W.C, 572.1 PSIA y Temperatura de 80 F:	
Máximo flujo volumétrico a condiciones estándares:	6.99846 mmcf/día
Máximo flujo másico:	12589.1 lbm/hora
Flujo máximo volumétrico actual:	0.17442 mmcf/día
Propiedades del fluido aguas arriba de la placa de orificio	
Densidad del fluido:	27.748 kg/m <sup>3</sup>
Densidad base:	0.6916 kg/m <sup>3</sup>
Viscosidad absoluta:	0.011088 cp
Exponente isentrópico:	1.29763
Operación del medidor de flujo operando a condiciones subsónicas	
Coeficiente de descarga:	0.5996
Número de Reynolds en la tubería:	1244611.9
Factor de expansión:	0.9982
Factor de velocidad de aproximación:	1.009

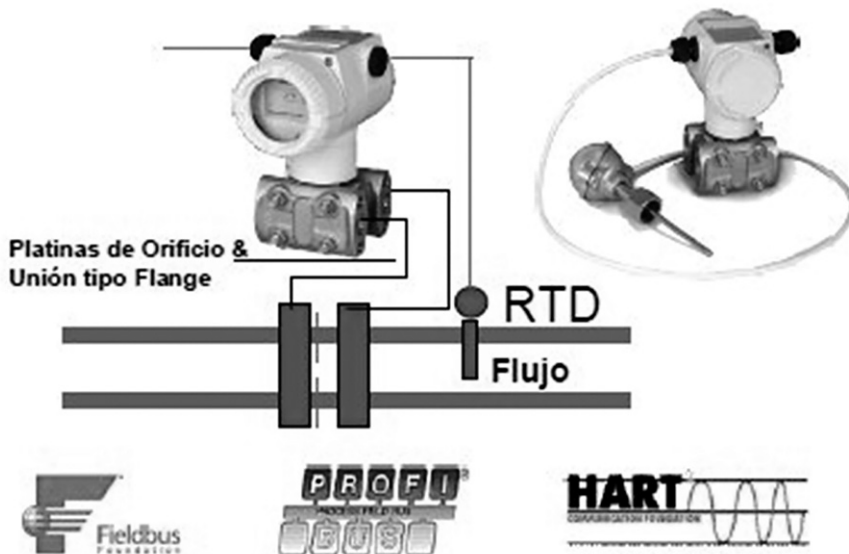


Figura 40. Placa de orificio instalada en tubería de producción  
Fuente: Emerson ProcessSystems

A continuación se presenta el cálculo del diseño de un sensor tipo cono para la submuestra No. 2 de la compañía Olympic. El diseño se realizó con el software de propiedad del fabricante Cameron Measurement Systems de los Estados Unidos.

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

**SENSOR TIPO CONO**

Cliente: OLYMPIC SUCURSAL PERÚ  
Lugar: Piura

**CONDICIONES DE OPERACIÓN**

Tipo de fluido: Gas Natural  
Máximo flujo volumétrico 20.0 mmcf/day  
Flujo volumétrico promedio 16.0 mmcf/day  
Temperatura de entrada 100 F  
Presión de entrada 850 PSIG ( 863.6 PSIA )

**ESPECIFICACIONES DEL FLUIDO**

Densidad relativa del gas: 0.0474 lbm/ft3  
Densidad del fluido: 2.8757 lbm/ft3

**RESULTADOS DEL CÁLCULO**

Sensor tipo Cono

Diametro de la tubería 6" ( 150 mm )  
Acero al Carbono  
Cédula 40 ( Sch 40 )  
Diámetro interno de la tubería 6.065"  
Diámetro del cono ( OD ) 5.416"  
Valor Beta 0.45  
Presión Diferencial a escala total 150 " W.C.  
Coeficiente de descarga: 0.8527 ( estimado )  
Material de construcción del cono Acero Inoxidable 316, tap 1/2" NPT 3k  
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 mmcf/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 ( CONE METER )

Cliente:

OLYMPIC SUCURSAL PERU

Lugar:

Piura

## Tabla de Flujos

#	Número de Reynolds	Flujo volumétrico en mmcf/día	Velocidad del flujo dentro de la tubería en Pie/seg	Factor de expansión Y	Caída de presión en pulgadas de 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, la performance individual de los medidores pueden variar.

Coeficiente de descarga:

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

## **Técnicas de procesamiento de datos**

### **a) Propuesta Académica**

#### **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 más 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 está 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 antecedida de las necesidades formativas requeridas en el sector industrial. El programa debe ser pertinente y responder a las necesidades existentes en la industria.

### **b) 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.

**c) 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.

**d) 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 más 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.

**e) 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.

**f) 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 Profesionales: 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 Créditos: 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 y Mantenimiento.
  - Cono ( VCono): Diseño, Operación y 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

## RESULTADOS

### Resultados estadísticos descriptivos

**Cuadro de sub-muestras 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 VI SAPET	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 = [ 0.25; 0.75 )			
Rango ( R )	R = 0.75 - 0.25 = 0.50			
Intervalo de clase (I)	Clasifica las mediciones en sub-grupos			
Número de intervalos de mediciones = K				
K = 1 + 3.3 Log (N)				
Marca de mediciones (xi)	xi = [ (límite superior) + (límite inferior) / 2 ]			
Frecuencia absoluta (fi)	Cantidad de veces que aparece un determinado valor			
	f1 + f2 + .....+fK = N			
Frecuencia absoluta acumulada (Fi)	Fi = f1 + f2 + .....+fi			
Frecuencia relativa ( hi )	hi = fi/N			
Frecuencia relativa acumulada ( Hi )	Hi = FL/N			

**Cuadro Estadístico 8.2**

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

Figura 41. Rangos de diseño de los Betas para diferentes campos petroleros.

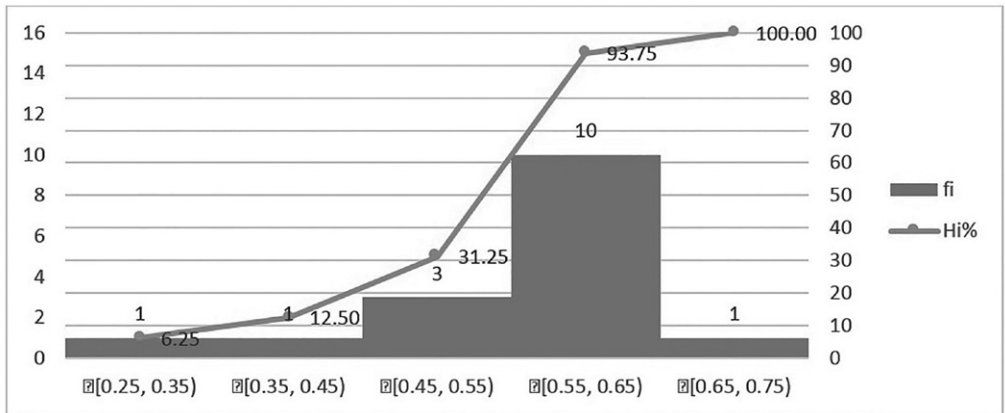


Figura 42. Pareto

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

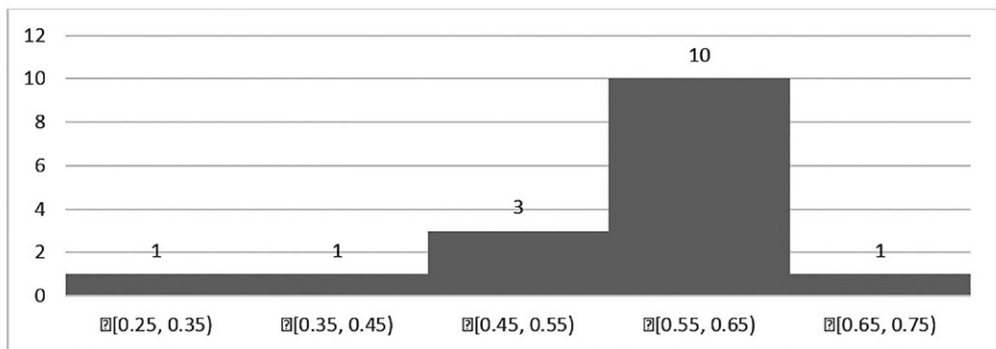


Figura 43. Histograma

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

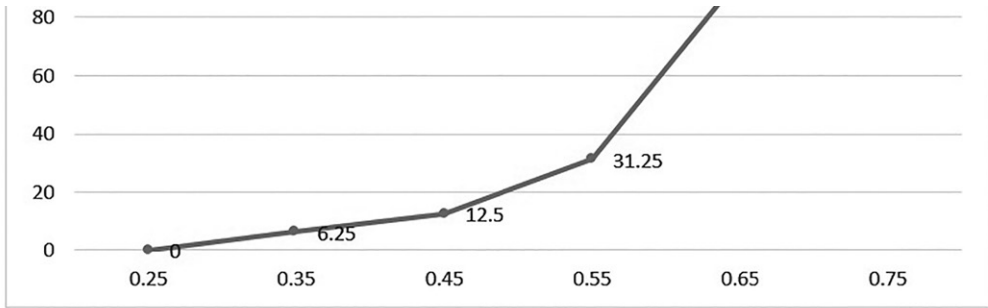


Figura 44. Ojiva

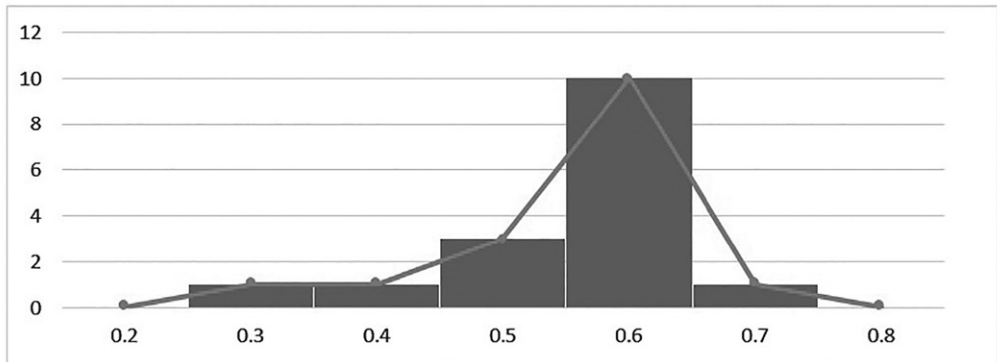


Figura 45. Histograma y polígono de frecuencias

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.

## 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  $\pm 1\%$ . 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  $\pm 0.05\%$  (La MVT es el equivalente a la DPU en un computador de flujo).

El sensor tipo cono por diseño presenta una exactitud hasta de  $\pm 0.5\%$  (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  $\pm 0.05\%$  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 sensores de presión diferencial estudiados y complementados con los computadores de flujo permitirán al alumno de pregrado de ingeniería mayor competitividad en el ámbito laboral dentro del sector industrial.

## **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 más 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 GrawHill.

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.

EdicionesGPA-2145-08 (2005). "Table of Physical Properties for Hydrocarbons and Other Compounds of Interest to the Natural Gas Industry". Tulsa: Gas ProcessorsAssociation.

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 Europeen of Recherches.

A.G.A. Report No. 3 (2012). *Orifice metering of natural gas and other related hydrocarbon fluids; Part 1 – General equations and uncertainty 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> [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.smar.com/espanol> [Consulta: 2 de Junio 2016]

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

### **ANEXOS**

ANEXO No. 01: Sensor de flujo tipo Cono – Fabricante Cameron Measurement Systems.

ANEXO No. 02: Computador de flujo – Fabricante Cameron Measurement Systems.

Se terminó de imprimir en  
Enero 2018  
BUSINESS SUPPORT ANETH S.R.L.  
Av. Marginal 259 – Urb. Javier Prado – 6ta. Etapa – Salamanca – Ate  
Teléfono: 01 434-5101  
Celular: 991258218

En los últimos años, la tecnología digital ha tenido un incremento sustancial y con ello su uso se ha encaminado hacia muchos sectores; desde el comercial con la producción de electrodomésticos y equipos electrónicos que nos hace una vida más cómoda en el quehacer cotidiano, pasando por el militar con el diseño y fabricación de sofisticados radares y sonares, hasta el sector industrial donde el mayor interés es la medición, control y transmisión de variables físicas para automatizar grandes procesos industriales.

Sin embargo, debemos reconocer el aporte de las ciencias básicas hacia las investigaciones tecnológicas. Pues sin las ciencias básicas no hubiera sido posible alcanzar los innumerables avances tecnológicos que en la actualidad gozamos.

De esta manera, con el resultado de las dos investigaciones tecnológicas de este cuaderno de investigación, se demuestra el uso de las ciencias formales tanto en la inteligencia artificial como en la instrumentación industrial.

Pedro F. Huamaní Navarrete

