

## Resultados de pruebas de un sistema de diagnóstico de medición por placa de orificio en laboratorio de flujo de CIATEQ

*M. en C. Diego Moncada*  
*M. en C. Iván Juárez*  
*M. en C. César Gutiérrez*  
*M. en C. José de Jesús Casillas*  
 CIATEQ AC  
*Dr. Richard Steven*  
*Kim Lewis*  
 DP Diagnostics LLC  
*M. Sc. Jennifer Rambone*  
 Swinton Technology Ltd

Información del artículo: Recibido: enero 2013- aceptado enero 2014

### Resumen

En las instalaciones del Laboratorio de flujo de CIATEQ localizado en Aguascalientes, Ags., se probó un medidor tipo placa de orificio de 4", con relación beta de 0.5, el cual cumplía totalmente con lo especificado en la norma ISO 5167, parte 2. El propósito de estas pruebas era demostrar de forma independiente el sistema de diagnóstico en línea, desarrollado por DP Diagnostics para medidores de flujo que funciona bajo el principio de presión diferencial.

Miembros de la Comisión Nacional de Hidrocarburos (CNH) presenciaron las pruebas debido al potencial del sistema descrito como herramienta para dar cumplimiento a la regulación emitida por la entidad descrita. El presente documento describe de forma general el principio de operación del sistema de diagnóstico y los resultados de las pruebas realizadas.

**Palabras clave:** Sistema de diagnóstico de medición, Laboratorio de flujo de CIATEQ, presión diferencial, sistema Prognosis.

## Test results of a measurement system for diagnostic laboratory orifice flow CIATEQ

### Abstract

In CIATEQ's Secondary Flow Laboratory located in Aguascalientes, Ags., a 4", 0.5 beta ratio, flange tapped orifice meter, which comply totally with ISO 5167 Part 2 standard, was tested. Purpose of this test was to demonstrate in a independent way functionality of diagnostic system developed by DP Diagnostics for flow meters which operate under differential pressure principle.

Members of Hydrocarbon National Commission (CNH) witnessed test because potential fo system described as tool to comply regulations emitted by this office. This document describes I a general way operational principle of diagnostic system and results of test developed.

**Keywords:** System for diagnostic laboratory, CIATEQ's Secondary Flow Laboratory, differential pressure, Prognosis system.

## Antecedentes

Entre 2008 y 2009 DP Diagnostics desarrolló una metodología [3,4] para el auto diagnóstico de sistemas de medición de flujo, que operan bajo el principio de presión diferencial. Se proponía una pantalla que mostraba en tiempo real los resultados del diagnóstico. Este tipo, y sus principios de diagnóstico son aplicables a medidores del tipo placa de orificio. Este sistema de diagnóstico lo desarrolló DP Diagnostics LLC y lo comercializó a la industria de hidrocarburos en forma de software denominado "Prognosis", por Swinton Technology Ltd.

Una serie de pruebas independientes se desarrollaron por CIATEQ en junio del 2012, en las que el medidor antes descrito y sus pruebas de diagnóstico fueron desarrolladas sin el uso del sistema Prognosis. Los datos así obtenidos se analizaron en una hoja de cálculo para probar que Prognosis funcionaba adecuadamente. En agosto del 2012, CIATEQ y DP Diagnostics adelantaron las mismas pruebas en el laboratorio secundario de flujo del primero, instalando una computadora con Prognosis para tomar los datos directamente del medidor tipo placa de orificio.

Los resultados de estas pruebas realizadas en conjunto por CIATEQ y DP Diagnostics, fueron muy similares a los obtenidos en pruebas de campo desarrolladas por British Petroleum (BP) y Conoco Phillips en el Reino Unido [2], y en el laboratorio de pruebas de ATMOS, uno de los distribuidores de gas natural más grandes de Estados Unidos, con oficinas centrales en Dallas. El desempeño del medidor tipo placa de orificio fue de acuerdo a lo esperado según ISO 5167 Parte 2. Cuando se generaba una malfunción en el laboratorio de flujo, Prognosis detectaba y establecía su origen (transmisor de presión diferencial, medidor placa de orificio, etc.) y generaba una lista de las causas posibles (mientras confirmaba cuales de las malfunciones podía descartarse).

## Objetivo

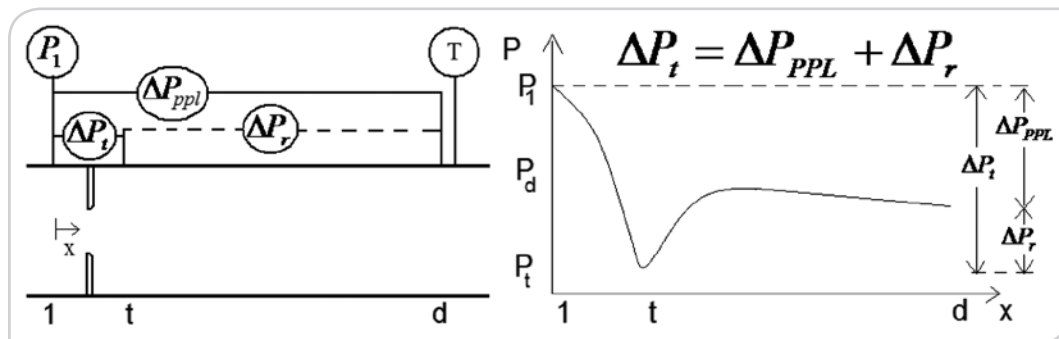
Verificar la funcionalidad del sistema Prognosis detallando sus beneficios, así como la aplicabilidad para la auditoría de sistemas de medición que operan bajo el principio de presión diferencial.

## Definición del problema y explicación de la teoría

### Descripción del sistema de diagnóstico para medidor por placa de orificio

La **Figura 1** muestra el arreglo de un medidor tipo placa de orificio con instrumentación y la gráfica (simplificada) de la fluctuación de la presión a través del cuerpo del medidor (tubo de medición). Los medidores tipo placa de orificio tradicionales muestran la presión de entrada ( $P_1$ ), la temperatura aguas abajo ( $T$ ), y la presión diferencial ( $\Delta P_t$ ) entre la toma de presión de entrada (1) y la toma de presión localizada justo después (1") de la cara aguas debajo de la placa de orificio (t). Es de hacer notar que la **Figura 1** muestra una tercera toma de presión (d) localizada a una distancia mayor aguas abajo de la placa de orificio, la cual permite la medición de dos datos extra de presión diferencial.

La presión diferencial entre el punto aguas abajo (d) y la toma (t) de presión de baja o presión diferencial recuperada,  $\Delta P_r$  y la presión diferencial entre la toma (1) y la toma de presión aguas abajo (d), se denomina pérdida de presión permanente,  $\Delta P_{PPL}$ , a veces llamada "PPL" o "pérdida total de cabeza de presión".



**Figura 1.** Arreglo de medidor tipo placa de orificio con instrumentación y gráfica de fluctuación de presión.

La suma de la DP recuperada y la PPL es igual a la presión diferencial tradicional, Ec. 1.

$$\Delta P_t = \Delta P_r + \Delta P_{PPL}. \quad (1)$$

Ecuación de flujo tradicional:  $m_t = EA_t \varepsilon C_d \sqrt{2\rho \Delta P_t}$ , incertidumbre  $\pm x\%$ . (2)

Ecuación de flujo por expansión:  $m_r = EA_t K_r \sqrt{2\rho \Delta P_r}$ , incertidumbre  $\pm y\%$ . (3)

Ecuación de flujo PPL:  $m_{PPL} = AK_{PPL} \sqrt{2\rho \Delta P_{PPL}}$ , incertidumbre  $\pm z\%$ . (4)

La ecuación de flujo tradicional es la mostrada como ecuación (2). Tradicionalmente, ésta representa el único cálculo de flujo; sin embargo, con la toma de presión adicional ( $d$ ) se pueden desarrollar en total tres ecuaciones de flujo. Esto es, la DP recuperada puede usarse para determinar el flujo con una ecuación que considera la expansión (ver ecuación 3) y la PPL puede utilizarse para calcular el flujo con la ecuación adecuada (ver ecuación 4). Debe notarse que  $m_t$ ,  $m_r$  y  $m_{PPL}$  representan las predicciones para el flujo másico tradicional, expansión y PPL del flujo másico real ( $m$ ), respectivamente.  $\rho$  representa la densidad del fluido. Los símbolos  $E$ ,  $A$  y  $A_t$

representan la velocidad de aproximación, área transversal de entrada, y el área transversal menor (garganta) a través del medidor, respectivamente. Estos tres valores son constantes para cierta geometría del medidor. El parámetro  $\varepsilon$  es el factor de expansión que considera las variaciones en la densidad del gas a través del medidor, (para líquidos  $\varepsilon = 1$ ). Los términos  $C_d$ ,  $K_r$  y  $K_{PPL}$  representan los coeficientes de descarga, el coeficiente de expansión y el coeficiente PPL, respectivamente. Estos parámetros se expresan usualmente como funciones de la geometría del medidor y del número de Reynolds.

$$Re = 4m / \pi \mu D. \quad (5)$$

El número de Reynolds se expresa de acuerdo a la ecuación 5.  $\mu$  es la viscosidad del fluido y  $D$  es el diámetro de entrada. En este caso, como el número de Reynolds (Re) es dependiente del flujo, los flujos arriba descritos se obtienen mediante métodos iterativos dentro del computador de flujo. El desarrollo detallado de esas tres ecuaciones de flujo fue propuesto por Steven <sup>[3]</sup>.

medidor que opere correctamente no deberá presentar una diferencia entre cualquiera de las dos ecuaciones de flujo mayor que la suma de sus incertidumbres (y típicamente no mayor que RMS de las dos incertidumbres).

## Solución y procedimientos de análisis

**Cada medidor tipo placa de orificio es en efecto tres medidores de flujo.** Dado que existen tres ecuaciones prediciendo el flujo a través del medidor, es posible comparar esas estimaciones y tener así un diagnóstico. Obviamente, estas tres ecuaciones de flujo poseen incertidumbres diferentes (llamadas  $x\%$ ,  $y\%$  &  $z\%$ , como se muestra en las ecuaciones 2 a 4). Por lo tanto, aun si un medidor de presión diferencial opera correctamente, los otros dos medidores no se ajustarán de manera precisa. Sin embargo, un

El sistema posee tres incertidumbres más, que son la diferencia máxima admisible entre dos ecuaciones de flujo, como se muestra en las ecuaciones 6a a 6c. Es esto lo que permite un sistema de auto diagnóstico. Si la diferencia porcentual entre cualquier par de ecuaciones de flujo es menor que el RMS de sus incertidumbres correspondientes, entonces no se detecta ningún problema y el valor de flujo obtenido de la manera tradicional es confiable. Si, por otro lado, la diferencia porcentual entre cualquier par de ecuaciones de flujo es mayor que el RMS de sus incertidumbres, entonces significa que existe un problema de medición, y que los valores de flujo obtenidos no son confiables. Las tres relaciones porcentuales de flujos se calculan de acuerdo con las ecuaciones 7a a 7c.

Diferencia admisible entre los medidores tradicionales y PPL

$$(\phi\%): \phi\% = \sqrt{(x\%)^2 + (z\%)^2} \quad (6a)$$

Diferencia admisible entre los medidores tradicionales y de expansión

$$(\xi\%): \xi\% = \sqrt{(x\%)^2 + (y\%)^2} \quad (6b)$$

Diferencia admisible entre los medidores de expansión y PPL

$$(\upsilon\%): \upsilon\% = \sqrt{(y\%)^2 + (z\%)^2} \quad (6c)$$

Comparación entre los medidores tradicionales y PPL:

$$\psi\% = \left\{ \left( \dot{m}_{PPL} - \dot{m}_t \right) / \dot{m}_t \right\} * 100\% \quad (7a)$$

Comparación entre los medidores de expansión y tradicional:

$$\lambda\% = \left\{ \left( \dot{m}_r - \dot{m}_t \right) / \dot{m}_t \right\} * 100\% \quad (7b)$$

Comparación entre los medidores PPL y de expansión:

$$\chi\% = \left\{ \left( \dot{m}_r - \dot{m}_{PPL} \right) / \dot{m}_{PPL} \right\} * 100\% \quad (7c)$$

La metodología de diagnóstico utiliza las tres mediciones individuales de los medidores de presión diferencial para predecir de forma independiente el flujo y luego compara esos resultados. En efecto, los medidores individuales están siendo de esa manera comparados. Sin embargo, es posible hacer un diagnóstico diferente de forma aproximada. La

razón de pérdida de presión (PLR por sus siglas en inglés) es la relación de PPL al medidor de presión diferencial tradicional. PLR es casi una constante para medidores del tipo placa de orificio que operan con flujo homogéneo en una sola fase, de acuerdo a ISO 5167 [1]. Se puede entonces reescribir la ecuación 1 así:

$$\frac{\Delta P_r}{\Delta P_t} + \frac{\Delta P_{PPL}}{\Delta P_t} = 1 \text{ -- (1a) donde } \frac{\Delta P_{PPL}}{\Delta P_t} \text{ es PLR.}$$

De la ecuación 1a, si PLR es una constante entonces tanto la relación de presión de recuperación o PRR por sus siglas en inglés (esto es, la relación de la presión diferencial de recuperación a la tradicional) como la relación de la presión de recuperación a PPL, o RPR por sus siglas en inglés,

deben ser también constantes. Esto es, las tres relaciones de presión diferencial obtenidas de las tres lecturas de los medidores de presión diferencial son efectivamente valores constantes para cualquier medidor tipo placa de orificio que opere correctamente. Se tiene entonces:

Relación de PPL a DP tradicional (PLR):  $(\Delta P_{PPL} / \Delta P_t)_{set}$ , incertidumbre  $\pm a\%$

Relación de DP recuperación a DP tradicional (PRR):  $(\Delta P_r / \Delta P_t)_{set}$ , incertidumbre  $\pm b\%$

Relación de DP recuperación a PPL (RPR):  $(\Delta P_r / \Delta P_{PPL})_{set}$ , incertidumbre  $\pm c\%$

Existe, entonces, otro método para verificar el desempeño de un medidor tipo placa de orificio utilizando los tres medidores de presión diferencial. Las relaciones de los DP que están en operación normalmente pueden entonces ser comparadas con valores correctos previamente conocidos. Se denotará la diferencia entre esta lectura ( $PLR_{read}$ ) y el valor correcto de PLR ( $PLR_{set}$ ) como  $\alpha$ , la diferencia entre los valores de PRR de lectura ( $PRR_{read}$ ) y de operación ( $PRR_{set}$ ) como  $\gamma$ , y la diferencia entre los valores de RPR de lectura ( $RPR_{read}$ ) y de operación ( $RPR_{set}$ ) como  $\eta$ . Estos valores se muestran en las ecuaciones 8a a 8c:

$$\alpha\% = \left\{ \frac{PLR_{read} - PLR_{set}}{PLR_{set}} \right\} * 100\% \quad (8a)$$

$$\gamma\% = \left\{ \frac{PRR_{read} - PRR_{set}}{PRR_{set}} \right\} * 100\% \quad (8b)$$

$$\eta\% = \left\{ \frac{RPR_{read} - RPR_{set}}{RPR_{set}} \right\} * 100\% \quad (8c)$$

Cabe anotar que con el objeto de calcular  $\pm \psi\%$ ,  $\pm \lambda$ ,  $\pm x\%$  and  $\pm \alpha\%$ ,  $\pm \gamma$ ,  $\pm \eta\%$ , se requiere conocer el conjunto del coeficiente de descarga, coeficiente de expansión, coeficiente PPL, y valores de PLR, PRR y RPR. Debido a que usualmente un medidor de placa de orificio no se calibra, es necesario obtener estos valores de acuerdo a la norma ISO 5167 Parte 2 <sup>[1]</sup>. ISO determina el coeficiente

de descarga por medio de la ecuación de Reader–Harris Gallagher, (RHG). Es de notar que con ISO 5167, también se puede obtener el valor de PLR (ecuación 9). Tomando en consideración la ecuación 1a, se pueden obtener los valores de PRR y RPR, como se muestra en las ecuaciones 10 y 11, respectivamente:

$$PLR = \frac{\sqrt{1 - \{\beta^4(1 - C_d^2)\}} - C_d\beta^2}{\sqrt{1 - \{\beta^4(1 - C_d^2)\}} + C_d\beta^2} \quad (9) \quad PRR = 1 - PLR \quad (10) \quad RPR = \frac{PRR}{PLR} \quad (11)$$

Adicionalmente, puede observarse que desde las primeras normas, el coeficiente de descarga, el factor PLR y los coeficientes PPL pueden obtenerse como se muestra en las ecuaciones 12 y 13. Por lo tanto, del método de obtención

del coeficiente de descarga y el factor PLR, se pueden deducir PPL, PRR y RPR. Desafortunadamente, ISO no establece valores de incertidumbre para PLR.

$$K_r = \frac{\varepsilon C_d}{\sqrt{1-PLR}} \tag{12}$$

$$K_{ppl} = \frac{E\beta^2 \varepsilon C_d}{\sqrt{PLR}} \tag{13}$$

donde

$$\beta = \sqrt{\frac{A_t}{A}} \tag{14}$$

En un medidor tipo placa de orificio con una toma de presión adicional aguas abajo, se pueden obtener seis parámetros de medición y nueve incertidumbres asociadas. Estos seis parámetros son el coeficiente de descarga, coeficiente de expansión, coeficiente PPL, PRR y RPR. Las nueve incertidumbres son las seis de los parámetros ( $\pm\chi\%$ ,  $\pm\gamma\%$ ,  $\pm z\%$ ,  $\pm a\%$ ,  $\pm b\%$  &  $\pm c\%$ ) y las tres incertidumbres de la intercomparación de los flujos ( $\pm\phi\%$ ,  $\pm\xi$ ,  $\pm\nu\%$ ). **Estos quince parámetros definen el modo correcto de operación**

**de un medidor de flujo por presión diferencial.** Cualquier desviación más allá de los límites aceptados de incertidumbre indica que el medidor presenta un desperfecto y el valor de flujo por el medidor de flujo tradicional no es confiable. La **Tabla 1** muestra las seis situaciones posibles que corresponden a una señal de alarma. Cabe anotar que en cada uno de los seis datos de diagnóstico los valores se normalizan; esto es: cada parámetro de salida del medidor se divide por la diferencia admisible para ese parámetro.

Tabla 1. Análisis de diagnóstico.

DP Pair	No Warning	WARNING
$\Delta P_t$ & $\Delta P_{ppl}$	$\psi\% / \phi\% \leq 1$	$\psi\% / \phi\% > 1$
$\Delta P_t$ & $\Delta P_{ppl}$	$\alpha\% / a\% \leq 1$	$\alpha\% / a\% > 1$
$\Delta P_t$ & $\Delta P_r$	$\lambda\% / \xi\% \leq 1$	$\lambda\% / \xi\% > 1$
$\Delta P_t$ & $\Delta P_r$	$\gamma\% / b\% \leq 1$	$\gamma\% / b\% > 1$
$\Delta P_r$ & $\Delta P_{ppl}$	$\chi\% / \nu\% \leq 1$	$\chi\% / \nu\% > 1$
$\Delta P_r$ & $\Delta P_{ppl}$	$\eta\% / c\% \leq 1$	$\eta\% / c\% > 1$

Para fines prácticos de uso en tiempo real, se desarrolló una representación gráfica del estado de la medición, que se actualiza periódicamente y se puede visualizar localmente o en un cuarto de control. Sin embargo, cualquier representación gráfica debe ser accesible y entendible para cualquier operador. Se propuso, entonces, que se ubiquen

tres puntos en una gráfica normalizada, **Figura 2**. Los ejes de la gráfica no tienen dimensiones, son sólo líneas numeradas. La diferencia en la razón de flujo normalizada se dibuja en las abscisas. La diferencia en la razón de presión diferencial se coloca en el eje de las ordenadas.

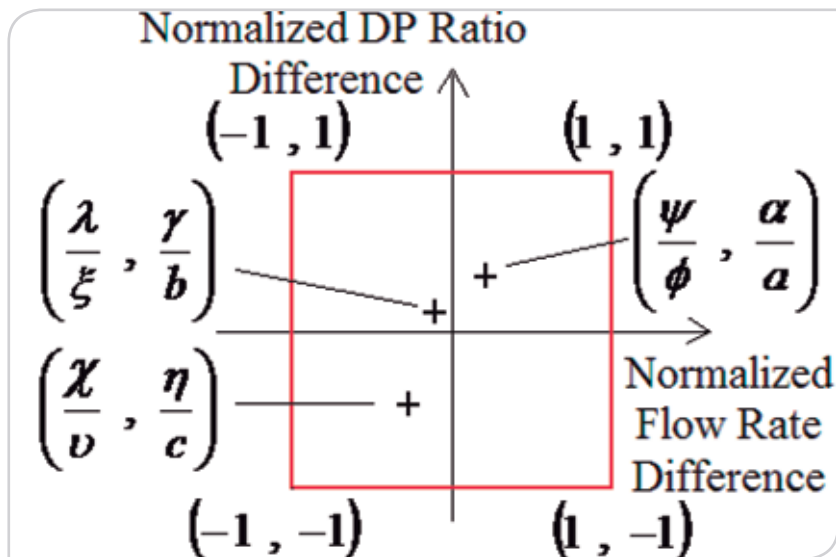


Figura 2. Ejemplo gráfico de resultado de diagnóstico.

Estos valores normalizados no tienen unidades. En esta gráfica, se superpone un cuadro de diagnóstico normalizado (NDB por sus siglas en inglés), con coordenadas en las esquinas: (1, 1), (1, -1), (-1, -1) y (-1, 1). En esta gráfica se dibujan tres puntos de diagnóstico del medidor, a saber:  $(\psi/\phi, \alpha/a)$ ,  $(\lambda/\xi, \gamma/b)$  y  $(\chi/v, \eta/c)$ . Esto es, las tres diferenciales de presión se han dividido en tres DP pares para comparar la diferencia entre dos razones de flujo y, de manera separada, la diferencia entre la razón del DP a la establecida, con las diferencias máximas permisibles. Si todos los puntos están dentro

del NDB, como se muestra en la **Figura 3**, el operador del sistema de medición verá que no existe ningún problema de medición y el valor de flujo que indica el medidor tradicional será confiable. Sin embargo, si uno o más de los tres puntos caen fuera del NDB, el operador tendrá una indicación visual que el medidor no opera correctamente y que el valor de flujo indicado por medidor tradicional (u otro), no es confiable. Además, cuando un problema es detectado se obtendrá información adicional para el diagnóstico que será útil para determinar la naturaleza del problema.

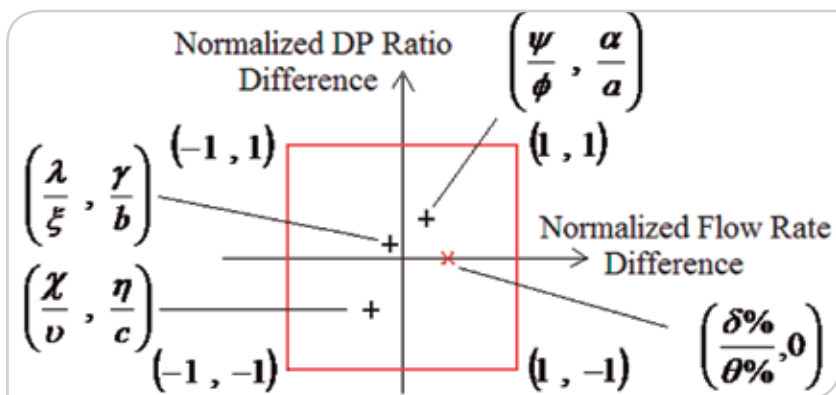


Figura 3. Cuadro de diagnóstico normalizado con resultados de diagnóstico normalizados y verificación de la medición del DP incluida.

Un séptimo método de diagnóstico se adiciona al NDB por DP Diagnostics y Swinton Technology. La ecuación 1 es válida para todos los medidores de flujo genéricos que operan por presión diferencial. La ecuación 1 es una consecuencia de la primera ley de la termodinámica, y como tal no puede ser alterada, aun si un medidor de flujo bajo el principio de presión diferencial no funcione correctamente. Por lo tanto, cuando los tres DP son leídos

$$\Delta P_{t,inf} = \Delta P_r + \Delta P_{PPL} \quad (1b)$$

Un medidor DP leyendo las tres DP puede inferir la DP tradicional ( $\Delta P_t$ ) sumando la lectura de la DP de recuperación ( $\Delta P_r$ ) y la pérdida de presión permanente ( $\Delta P_{PPL}$ ), como se indica en la ecuación 1b. Esto resulta en una DP tradicional inferida ( $\Delta P_{t,inf}$ ) que puede ser comparada con la DP tradicional leída directamente ( $\Delta P_t$ ). Mientras que

$$\delta\% = \left\{ \left( \Delta P_{t,inf} - \Delta P_t \right) / \Delta P_t \right\} * 100\% \quad (15)$$

El valor  $\delta\%$  puede ser normalizado dividiéndolo por la diferencia porcentual admisible entre los valores ( $\theta\%$ ). Es posible calcular una incertidumbre precisa para esta normalización de los manuales del transmisor DP y los valores leídos de DP. Sin embargo, se ha encontrado en la práctica que estableciendo  $\theta\%=1\%$  es un valor razonable que cubre

del medidor, si la ecuación 1 pareciese no ajustar hay sólo una conclusión. Como la primera ley de la termodinámica establece que debe ser cumplida, cualquier indicación de que no lo es, **significa entonces de forma determinante por el sistema de diagnóstico que hay un error en la lectura del DP originado en la instrumentación** (sin importar que el medidor de flujo opere o no).

teóricamente estos valores deben ser iguales, debido a las incertidumbres asociadas con los tres transmisores DP que operan correctamente, existe una ligera diferencia. La diferencia porcentual ( $\delta\%$ ) puede ser calculada como se muestra en la ecuación 15.

un amplio rango de la DP medida. Si este valor normalizado es menor que la unidad, entonces no habrá problema con las mediciones de los DP. Si este valor normalizado es mayor que la unidad, entonces hay un problema con las mediciones de los DP. La **Tabla 2** muestra la situación simple que debe indicar una alarma en la medición del DP.

**Tabla 2.** Posibles resultados de diagnóstico de las lecturas del DP.

Par de DP	No hay alarma	Alarma
$\Delta P_{t,inf}$ & $\Delta P_t$	$\delta\% / \theta\% \leq 1$	$\delta\% / \theta\% > 1$

Este séptimo diagnóstico puede ser adicionado al NDB. A diferencia del descrito anteriormente, este diagnóstico es sencillo y no una coordenada en la gráfica cartesiana, sino un punto en una línea, en donde éste debe pertenecer al intervalo:  $-1 \leq \delta\% / \theta\% \leq +1$ . Sin embargo, aún se puede usar la presentación del NDB si  $y=0$ , y adoptando el eje de las x como la línea donde se ubicará el punto. De forma similar el diagnóstico será favorable, si el punto está dentro del NDB o señalan una alarma en la lectura del DP si el punto está fuera del NDB. La **Figura 3** muestra el NDB actualizado con la verificación de la medición del DP incluida. La gráfica descrita permitirá al operador del sistema de medición no solamente ver que hay una malfunción, sino que podrá

distinguir si esa anomalía corresponde al instrumento DP u otra, (como una falla en el medidor, en la entrada de datos en el computador de flujo, etc.)

### Sistema instalado en el Laboratorio de flujo de CIATEQ

El sistema instalado en el laboratorio de flujo de CIATEQ corresponde a un medidor tipo placa de orificio de 4", instalado junto con tubería de 4" cédula 40, (es decir, diámetro interno de 4.026"). El fluido en cuestión era agua a temperatura ambiente y presión ajustada por una bomba centrífuga. Se escogió una relación beta de 0.5 (relación



de diámetro de orificio a diámetro interno de la tubería; diámetro orificio: 2.013”). La **Figura 4** muestra el arreglo inicial del dispositivo portaplaca de cámara sencilla. Para la prueba de la placa de orificio deflectada, y en virtud

que se complicaba instalarla y retirarla del dispositivo portaplaca, se utilizó un arreglo de dicha placa entre dos bridas portaplaca.



**Figura 4.** Arreglo de dispositivo portaplaca de 4” en el laboratorio secundario de flujo de CIATEQ.

Para cada una de las pruebas iniciales (cuando los DP fueron operados pero el sistema Prognosis no estaba todavía instalado) se consideraron tres flujos. Con el objeto de asegurar que los medidores de placa de orificio y los DP operaran correctamente, se ajustaron las condiciones de laboratorio y del medidor de referencia que se utilizó para tal fin. Con los datos obtenidos y con ayuda del método de diagnóstico se verificó que el medidor tipo placa de orificio operara correctamente. Posteriormente, se indujeron errores basados en las fallas más comunes para este tipo de medidores, estos fueron, la placa instalada de manera invertida, una placa parcialmente bloqueada, una placa con el borde de orificio ligeramente alterado y una placa deflectada. Asimismo, después de conocer la información de referencia del sistema, (baseline – los datos operativos para los cuales el sistema operaba correctamente). DPD inducía problemas virtuales en los datos de CIATEQ para evaluar la respuesta del diagnóstico a esos problemas. Los problemas virtuales fueron el cálculo de flujo, siendo llevado a cabo considerando un valor del diámetro de tubería erróneo (alto y bajo), cálculo de flujo siendo llevado a cabo considerando un valor del diámetro de orificio erróneo (alto y bajo), el transmisor DP leyendo el tradicional DP teniendo lecturas erróneas (alto y bajo), y finalmente el tradicional DP siendo saturado, (fuera de rango).

DP Diagnostics analizó los datos de CIATEQ. Se usaron los valores estándar definidos como parámetros de diagnóstico así:  $x=1\%$ ,  $y=2.5\%$ ,  $z=2.5\%$ ,  $a=3\%$ ,  $b=2.5\%$ ,  $c=4\%$ ,  $\theta=1\%$ .

## Discusión e interpretación de datos y resultados

### Resultados de las pruebas con el sistema Prognosis instalado

En agosto del 2012, DP diagnostics instaló Prognosis en el medidor tipo placa de orificio con relación beta de 0.5, en tubería de 4” – cédula 40. Se generó primero un flujo a 500 kg/min. El medidor de flujo por placa de orificio operaba correctamente y tanto éste, como el medidor másico de referencia presentaban incertidumbres adecuadas.

La pantalla de Prognosis muestra el diagnóstico del medidor, donde se aprecia que está trabajando de manera correcta, ver la **Figura 5**. Aunque el cuarto punto de diagnóstico no está incluido en esta primera edición del software. Sin embargo, la propia comprobación del diagnóstico está incluida, simplemente no se muestra como un cuarto punto en el NDB. La lectura de DP tradicional (85,2 “WC),

DP recuperación (23,3" WC) y PPL (61,6 "WC) se presentan en la esquina de la parte inferior izquierda por encima de los tres puntos de coordenadas. Por debajo de estas tres coordenadas es la calculada DP tradicional inferida. El valor de la "diferencia" está debajo de la DP tradicional inferida y

es la integridad del diagnóstico DP. En este caso la diferencia entre el DP tradicional leído y el inferido es -0,369% (que es < 1% y por lo tanto está bien). Este cuarto punto anterior es simplemente el trazado sobre el eje x de este valor "diferencia". Por lo tanto, las DP's se leen correctamente.

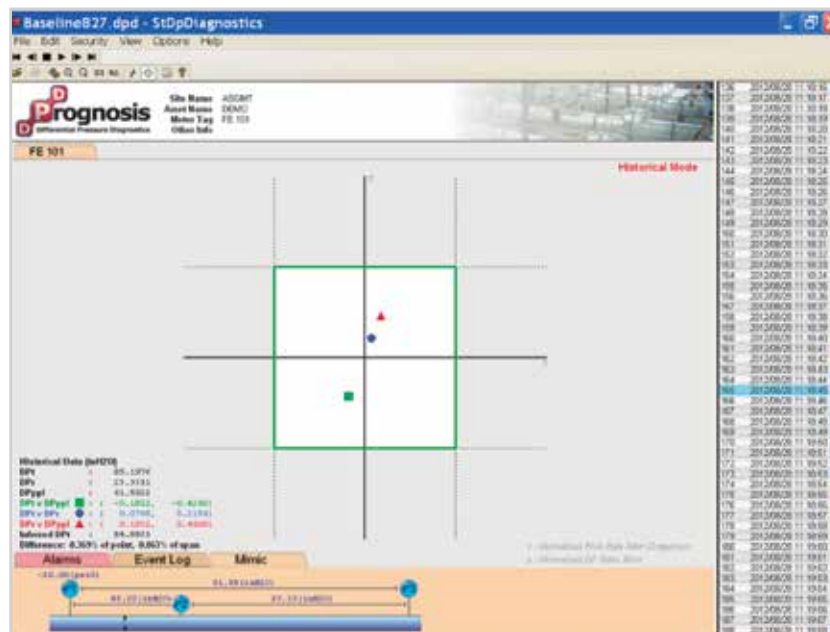


Figura 5. Imagen Prognosis con medidor operando correctamente.

### Fuga en el manifold de cinco vías del transmisor DP tradicional

Un mal funcionamiento común de un medidor de orificio está en el transmisor de presión diferencial que tiene la válvula de equalización en una de las cinco vías no propiamente cerrado o dañado, es decir, fugas entre los puertos de alta y baja presión. Esto provoca un error de lectura en la DP. Si la fuga no es excesiva, es probable que el operador no vaya a ver el problema por métodos convencionales. Prognosis verá este problema.

Con el flujo constante que produjo los resultados de referencia de la **Figura 5**, la lectura del transmisor DP proveniente del DP tradicional ahora con la válvula de equalización ligeramente abierta. La DP se redujo de la correcta 85.2 "WC a 75,6" WC. La DP se mantuvo estable en aproximadamente 75,6" WC, con el medidor para predecir caudal que tenía aproximadamente un sesgo de -5,5%. La respuesta de Prognosis a este problema se

muestra en la **Figura 6**. Revisando la DP de integridad de diagnóstico, es decir, la "diferencia" que se encuentra en la esquina inferior izquierda, se aprecia un gran problema con un resultado del 10,2%, es decir >> 1%. Con esto, Prognosis está declarando que la DP no es digna de confianza. Por otra parte, dos de los tres puntos de diagnóstico están fuera del NDB. El único punto en el NDB, es decir, sin mostrar problema, es el punto de que no utiliza el transmisor de presión diferencial que mide la DP tradicional. Los otros dos puntos fuera del NDB utilizan este transmisor. De esta forma se sabe que el medidor está funcionando mal, que la razón es la lectura DP y que la lectura tradicional DP es errónea. Por otra parte, sabemos que las otras dos lecturas DP. La de la DP recuperada y PPL son correctas. Por lo tanto, el DP tradicional inferido de 83,3 "WC es de confianza, el medidor tiene un problema y cuál es y cuál es el nivel de error y cuál es el caudal correcto. Sin Prognosis, este problema interno es imposible de diagnosticar.

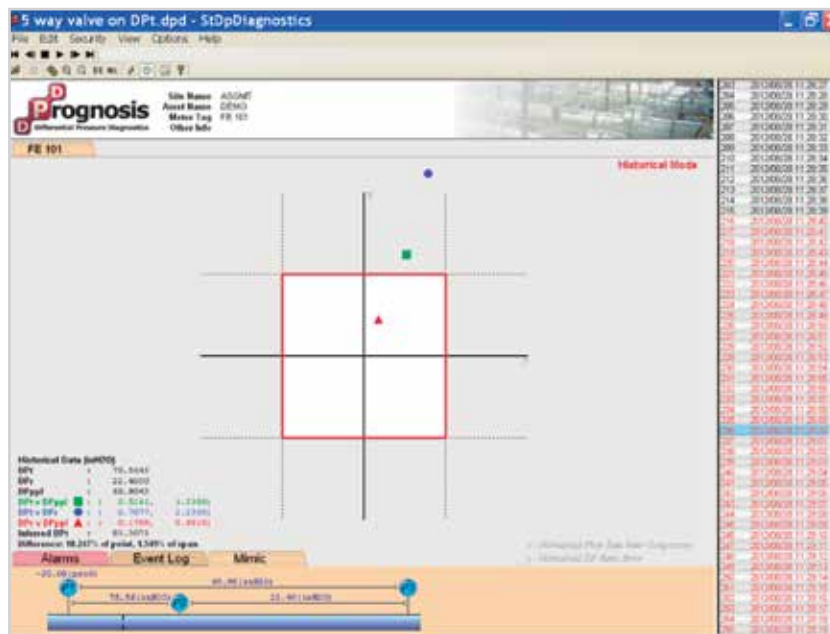


Figura 6. Imagen Prognosis con manifold fugando.

### Fuga en el manifold de cinco vías del transmisor DP recuperada

Una vez que la fuga en el manifold de cinco vías fue cerrada, los puntos regresan al interior del NDB, mientras que el valor “diferencia” es reducido a un promedio <1%. Pero qué pasa si la fuga hubiera estado en el manifold del transmisor de DP recuperación, esto no debería provocar un error en el diagnóstico de la velocidad de flujo, ya que no afecta a la lectura del DP tradicional. Sin embargo, un sistema de diagnóstico debe ser capaz de distinguir entre el medidor de mal funcionamiento y de un propio mal funcionamiento.

El DP tradicional permaneció estable en 83,9 “WC. La lectura DP recuperado disminuyó de 23,3 “WC a 21,3” WC. Revisando la DP integridad de diagnóstico, es decir, la “diferencia”, se presenta un problema con un resultado de -1,33%, es decir, > 1%. El pronóstico está declarando que la DP no es digna de confianza. Por otra parte, dos de los tres puntos de diagnóstico están fuera del NDB. El único punto en el NDB, es decir sin mostrar problema, es el punto que no utiliza el transmisor DP recuperado. Los otros dos puntos fuera del NDB, utilizan el transmisor de presión que mide el DP recuperado. Por lo tanto, el sistema no funciona correctamente, la razón es la lectura DP y la lectura de DP recuperado la del problema. De este modo se entiende que en el transmisor de presión diferencial la lectura de la DP sigue siendo útil, que el medidor está trabajando de

manera correcta y que el problema está en las necesidades de mantenimiento para el transmisor de presión diferencial recuperada. Una vez que esta prueba se completó se cerró la válvula de equalización en el transmisor de presión diferencial recuperada y los puntos regresaron al interior del NDB, mientras que el valor “diferencia” fue reducido a un promedio <1%.

### Calibración incorrecta en los transmisores de presión diferencial

Un transmisor de presión diferencial mal calibrado tiene el mismo resultado final, el DP que se está midiendo es incorrecto. A partir de la correcta operación del flujo en el sistema del medidor de placa de orificio, el transmisor DP tradicional fue deliberadamente manipulado para simular el efecto de una calibración incorrecta. En la **Figura 7** el transmisor DP tradicional de la lectura ha tenido la DP correcta asociada con su calibración 4-20mA ligeramente cambiada para producir una lectura más baja y luego más alta respectivamente para cada figura.

En la **Figura 7** la correcta DP de 85”WC ha cambiado a 80,4” WC, produciendo un error en la velocidad de flujo de aproximadamente -2,7%. La **Figura 7** muestra en la “diferencia” (esquina inferior izquierda), un problema con un resultado de 4,3%, que es > 1%. Con esto, Prognosis está declarando que la DP no es de confianza. También se

aprecia que dos de los tres puntos del diagnóstico están fuera del NDB. El único punto en el NDB sin mostrar problema es el que no utiliza el transmisor DP tradicional. Los otros dos puntos fuera del NDB utilizan el transmisor DP tradicional. Por lo tanto, el sistema no funciona

correctamente, la razón es la lectura DP y la lectura del DP tradicional la errónea, que las otras dos lecturas DP son dignas de confianza. Debido a esto se concluye que el DP tradicional inferido es de confianza y su lectura de caudal es la correcta.

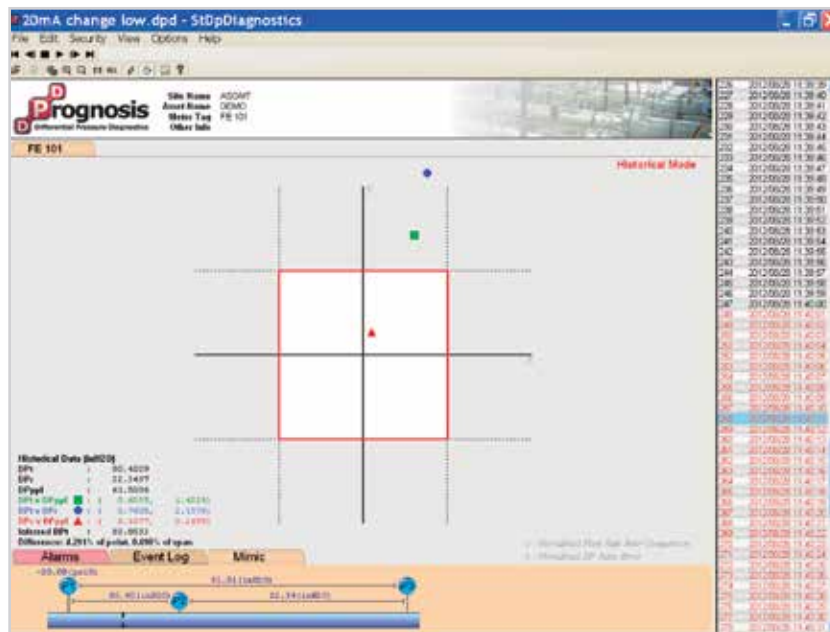


Figura 7. Transmisor DP tradicional con calibración errónea.

### Placa de orificio deflectada

En la **Figura 8** se aprecia una placa pandeada o deflectada que se utilizó para realizar esta prueba.



Figura 8. Placa deflectada o pandeada.



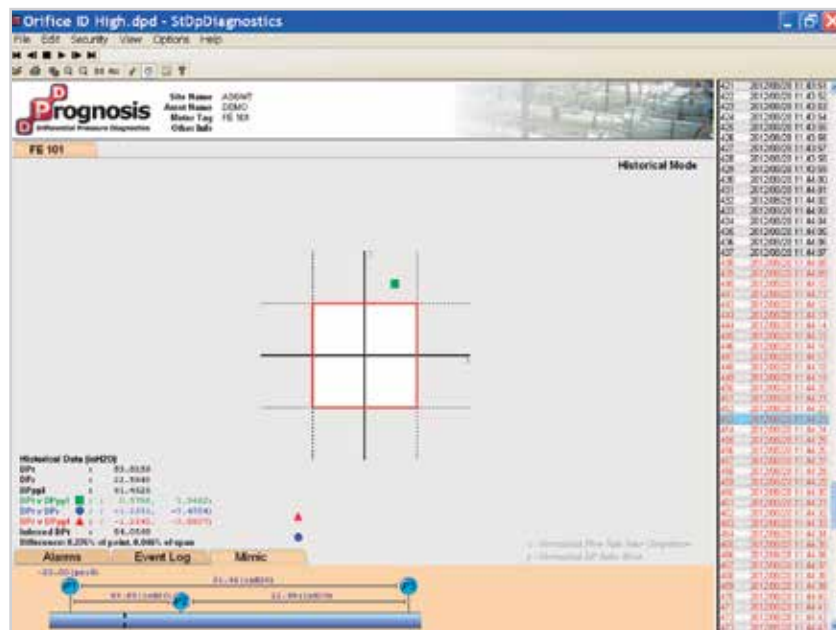


Figura 10. Diámetro de orificio erróneo.

A continuación, el diámetro real del orificio de 2.0128" ha sido sustituido por 1.9", lo contrario de la situación anterior. El error de velocidad de flujo resultante es aproximadamente -11,5%. La comprobación de integridad DP muestra que las lecturas DP son correctas con una "diferencia" registrada de -0,67%, que es <1%. Sin embargo, nuevamente los tres puntos están fuera de la NDB, señalando un error de predicción en la velocidad de flujo significativa, causada por un problema con el cuerpo del medidor. Nuevamente es el tamaño del medidor que tiene el computador de flujo, El patrón de los puntos en el NDB sugieren que el sesgo de velocidad de flujo ahora es negativo.

#### Error de dedo en el teclado del valor del diámetro del tubo de medición

Una vez que el valor correcto del diámetro del orificio fue ingresado en el computador de flujo, Prognosis mostró que no existía problema en la medición. Con este nuevo comienzo y con un flujo alto y bajo se procedió a ingresar nuevos valores en el computador. Ahora el diámetro real de la placa de 4.0044, "ha sido reemplazado por 4.1". La **Figura 11** es una imagen con el resultado de Prognosis. La comprobación de integridad DP muestra que las lecturas DP son correctas con una "diferencia" registrada de -0,64%, es decir <1%. Sin embargo, dos de los tres puntos están fuera del NDB señalando un error significativo en la predicción de la velocidad de flujo, causada por un problema con el cuerpo del medidor. En este caso es el tamaño del medidor que tiene cargado el computador de flujo. El patrón mostrado en el NDB sugiere un error de predicción en el caudal negativo.

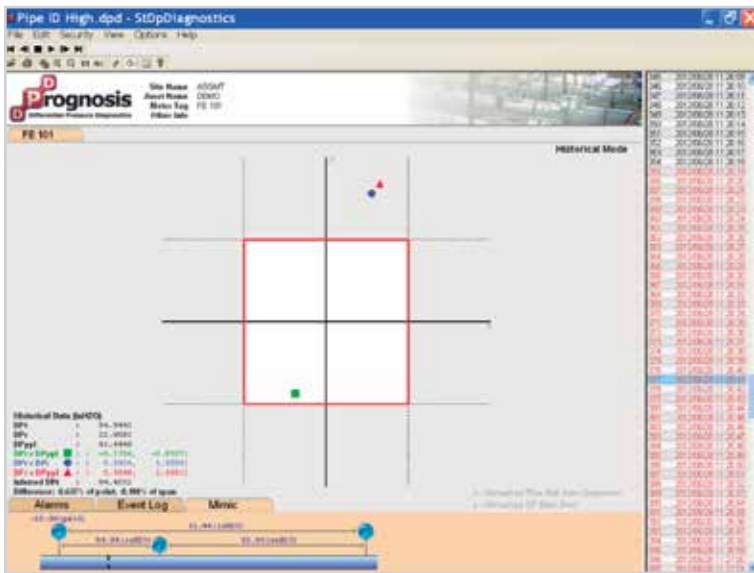


Figura 11. Diámetro interno, tubo medición erróneo.

A continuación, el diámetro actual de la placa de 4.0044" ha sido sustituido por 3.9", lo contrario de la situación anterior. El error de velocidad de flujo resultante es aproximadamente -11,5%. La comprobación de integridad DP muestra que las lecturas DP son correctas con una "diferencia" registrada de -0,47%, que es <1%. Sin embargo, nuevamente dos de los tres puntos están fuera de la NDB, señalando un error de predicción en la velocidad de flujo significativa, causada por un problema con el cuerpo del medidor. Nuevamente es el tamaño del medidor que tiene cargado el computador de flujo, el patrón de los puntos en el NDB sugieren que el sesgo de velocidad de flujo ahora es positivo.

#### Placa de orificio invertida, (o al revés)

En la **Figura 12** se aprecia el resultado de Prognosis para una placa invertida y un flujo constante de aproximadamente 515 kg/min. La DP se ha reducido de 90,5 "WC para una placa con un beta de 0.5 instalada correctamente a 65.5" WC con la misma placa colocada al revés. Esto nos arroja un error de predicción en la velocidad de flujo de aproximadamente -14%. La prueba de integridad DP muestra que las lecturas DP son correctas con una "diferencia" registrada de -0,55%, que es <1%. La **Figura 12** presenta que el medidor no tiene problema con la lectura DP, pero un problema importante en el cuerpo del medidor debido a que dos de los tres puntos del diagnóstico están fuera del NDB. Este patrón es indicativo de una placa de orificio invertida.

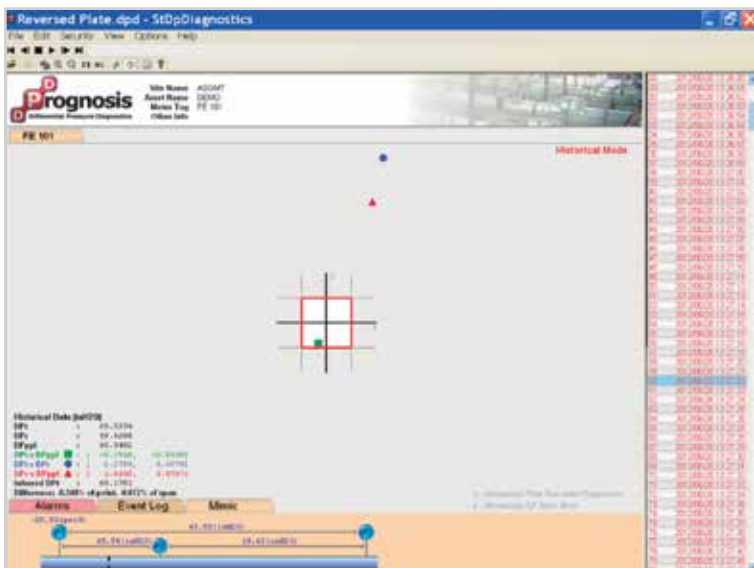


Figura 12. Placa invertida.

### Placa de orificio dañada

La **Figura 15** muestra una placa de orificio con daños considerables. En la **Figura 16** se observa una imagen con el resultado arrojado por Prognosis para esta prueba (medidor con placa dañada y un flujo constante de aproximadamente 500 kg / min). La DP se ha reducido de los aproximadamente 85" WC con una placa con una relación beta de 0.5 en buen estado a 77.45" WC para una placa dañada de las mismas dimensiones. Esto

representa un error de predicción en la velocidad de flujo de aproximadamente -4%. La prueba de integridad DP muestra que las lecturas son correctas, con una "diferencia" registrada de 0,37%, que es <1%. La **Figura 16** muestra que el medidor no tiene problemas en la lectura DP, pero sí un problema significativo en el cuerpo del medidor. Debido a que dos de los tres puntos de diagnóstico están fuera del NDB, el patrón de los puntos sugiere que el problema está en el cuerpo del medidor y eso está provocando un sesgo negativo en la predicción del caudal.

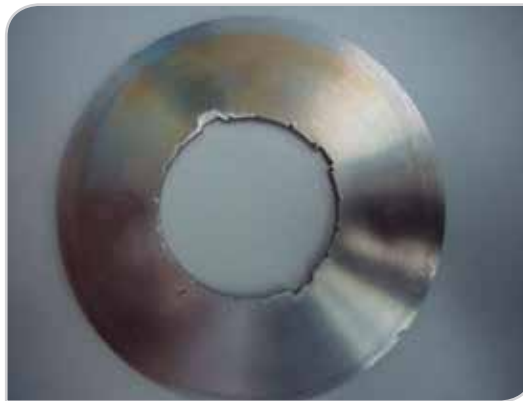


Figura 15. Placa con borde orificio desgastado.

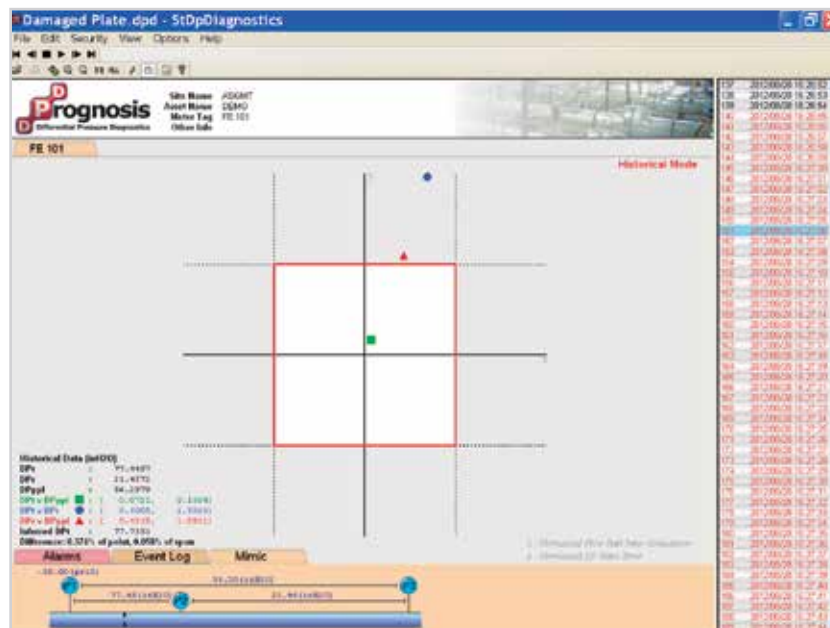


Figura 16. Placa con orificio dañado.



### Placa de orificio bloqueada parcialmente

La **Figura 17** muestra una placa con “medio orificio”, esto con el fin de imitar una placa de orificio con un bloqueo parcial. El bloqueo aumenta significativamente la velocidad de flujo a través del medidor y provoca sustancialmente una DP mayor. Por consiguiente, el bloqueo induce grandes errores de predicción en la velocidad de flujo. Debido a que la DP sube demasiado, la prueba requiere que la velocidad de flujo se reduzca sustancialmente de los 500 kg / min que aproximadamente se utilizan

en estas pruebas, esto con el fin de evitar la saturación de los transmisores de presión diferencial. La velocidad de flujo se varió hasta que el DP tradicional fue de aproximadamente 250” WC (en un transmisor de presión diferencial que tenía 400” WC). Desafortunadamente, no se registró el caudal real que produjo este DP, por lo que no es posible establecer un valor de error en la velocidad de flujo. Sin embargo, es evidente que el error de predicción en la velocidad es un error positivo sustancial, en suma con lo discutido anteriormente, inferimos que es de aproximadamente 99%.



Figura 17. Placa con obstrucción al 50%.

La **Figura 18** presenta una imagen con el resultado de Prognosis para esta prueba. La DP de integridad muestra las lecturas DP son correctas con una “diferencia” registrada de -0,4%, es decir <1%. Muestra que el medidor no tiene problema de lectura DP, pero un problema significativo en cuerpo del medidor. Los tres puntos de diagnóstico están

fuera del NDB mostrando que existe un mal funcionamiento en el medidor y un error potencialmente grande asociado con un problema en el cuerpo del medidor y el flujo. El patrón de diagnóstico en el NDB sugiere que hay un error en la tasa de flujo positivo muy alto.

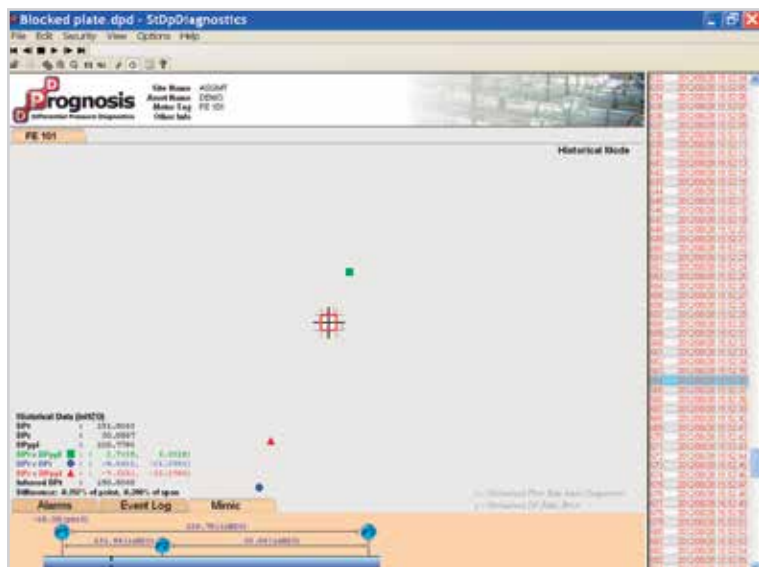


Figura 18. Placa parcialmente bloqueada.

## Conclusiones

Las pruebas realizadas en las instalaciones del Laboratorio secundario de flujo de CIATEQ en Aguascalientes en el tren de 4", cédula 40, para el medidor tipo placa de orificio de beta igual a 0.5 indicaron que el principio de diagnóstico funciona como se describió. El sistema de diagnóstico (llamado Prognosis), es el primero y más integral método para evaluar en línea medidores que operan bajo el principio de presión diferencial, incluidos los medidores tipo placa de orificio.

Prognosis tiene la habilidad de mostrar las malfunciones del medidor en tiempo real, o indicando en qué momento sucedieron al revisar un histórico de datos de desempeño del medidor. Esto protege al usuario de mediciones erróneas y puede reducir mantenimientos innecesarios o puestas fuera de servicio no programadas. Además, para aquellos casos en donde se requiera hacer mantenimiento, Prognosis podrá indicar qué actividades específicas requieren ser atendidas pues no se limita a indicar que hay un error en la medición, sino que puede identificar si el problema es con la instrumentación o el medidor en sí. Si la falla es en uno de los instrumentos, Prognosis podrá establecer en cuál de ellos está y tendrá información de respaldo para atender esa falla. Si la falla se presenta en el medidor en sí, Prognosis puede indicar una lista de las probables causas. Esto simplifica y reduce los tiempos de los procesos de mantenimiento.

Prognosis es de gran ayuda para los sistemas que operan por palca de orificio porque evita malfunciones del medidor que no eran detectadas antes, y cuando un medidor opera inadecuadamente simplifica en gran medida los procedimientos de mantenimiento requeridos para ajustar ese medidor tipo placa de orificio o similar.

Los resultados de las pruebas realizadas permiten avalar que el sistema denominado Prognosis detecta malfunciones en sistemas de medición de flujo que operan bajo la tecnología del tipo placa de orificio, permitiendo al usuario final determinar cuándo y por qué el valor de flujo medido puede estar alejado en una referencia.

El hecho de que las pruebas realizadas se hayan llevado a cabo con la presencia de personal de la Comisión Nacional

de Hidrocarburos (CNH), hace que esta autoridad considere la tecnología Prognosis como una alternativa para el cumplimiento de los lineamientos en Medición emitidos por esta entidad.

Dados los requerimientos regulatorios de la CNH (Lineamientos de medición) para auditar interna o externamente los sistemas de medición, para los cuales en varias ocasiones se hace necesario desmontar el sistema de medición para verificar la placa y el tubo, el hecho de contar con una tecnología que permita evaluar en línea el desempeño del sistema de medición hace su uso atractivo y práctico en el cumplimiento de las mencionadas regulaciones.

## Referencias

- ISO 5167-2:2003, Measurement of Fluid Flow by Means of Pressure Differential Devices, Inserted in Circular Cross Section-Conduits Running Full. Part 2: Orifice Plates. 2003. Ginebra, Suiza: ISO.
- Skelton, M., Barrons, S., Ayre, J., et al. 2010. Developments in the Self-Diagnostic Capabilities of Orifice Plate Meters. 28th International North Sea Flow Measurement Workshop, St Andrews, RU, octubre, 26-29.  
[http://www.dpdiagnostics.com/files/NSFMW\\_2010.pdf](http://www.dpdiagnostics.com/files/NSFMW_2010.pdf) (descargado el 10 de enero de 2013).
- Steven, R. 2008. Diagnostic Methodologies for Generic Differential Pressure Flow Meters. 26th International North Sea Flow Measurement Workshop, Escocia, RU, octubre 21-24.  
[http://www.dpdiagnostics.com/files/Diagnostic\\_Methodologies.pdf](http://www.dpdiagnostics.com/files/Diagnostic_Methodologies.pdf) (descargado el 10 de enero de 2013).
- Steven, R. 2009. Significantly Improved Capabilities of DP Meter Diagnostic Methodologies. 27th North Sea Flow Measurement Workshop, Tonsberg, Noruega, octubre 20-23.  
[http://www.dpdiagnostics.com/files/Significantly\\_Improved.pdf](http://www.dpdiagnostics.com/files/Significantly_Improved.pdf) (descargado el 10 de enero de 2013).

## Nomenclatura

$\Delta P_t$ :	Presión diferencial tradicional	$A$ :	Área transversal de entrada
$\Delta P_{PPL}$ o PPL:	Presión diferencial total o pérdida total de presión	$A_t$ :	Área transversal menor (garganta) a través del medidor
$\Delta P_r$ :	Presión diferencial recuperada o por expansión	$\epsilon$ :	Factor de expansión
DP:	Diferencial de presión	$C_d$ :	Coefficiente de descarga
$m_t$ :	Flujo másico tradicional	$K_r$ :	Coefficiente de expansión
$m_r$ :	Flujo másico de expansión	$K_{PPL}$ :	Coefficiente PPL
$m_{PPL}$ :	Flujo másico PPL	$\mu$ :	Viscosidad del fluido
x%:	Incertidumbre flujo másico tradicional	D:	Diámetro tubo de medición
Y%:	Incertidumbre flujo másico de expansión	d:	Diámetro orificio
Z%:	Incertidumbre flujo másico PPL		
E:	Velocidad de aproximación		

## Agradecimientos

El presente trabajo fue realizado gracias a la alianza tecnológica entre CIATEQ AC y DP Diagnostics.

## Semblanza de los autores

### M. en C. Diego Moncada

Es Ingeniero mecánico por la Universidad Nacional de Colombia con especialización en Automatización de Procesos Industriales de la Universidad de los Andes; Maestría en Comercialización de Ciencia y Tecnología del CIMAV-U de Texas y Candidato a Maestría en Ingeniería especialidad Diseño Mecánico del PICYT.

Está a cargo de la Gerencia de Medición Multifásica perteneciente a la Dirección de Sistemas de Medición en CIATEQ, AC. Ha participado y liderado proyectos relacionados con la evaluación de sistemas de medición, diseño y desarrollo de sistemas de medición, así como la fabricación de sistemas de medición para clientes como Pemex en varias de sus subsidiarias, ASA, CFE, Nitrógeno Cantarell, Transcanada, Gas natural Industrial, ENAP en la Patagonia chilena, etc.

Es autor de artículos relacionados publicados y/o presentados en foros como las Jornadas de Medición de la Asociación de Ingenieros Petroleros de México, la revista de Ingenieros Químicos de México, Jornadas de Medición del Instituto Argentino del Gas y del Petróleo, International Symposium on Fluid Flow Measurement, International North Sea Flow Measurement Workshop, Americas Flow Measurement Conference, Jornadas de Metrología del CENAM, Seminario Avanzado de medición de Flujo de Fluidos, entre otros. Es participe en el desarrollo de sistemas de medición y software de cálculo de flujo asociado para turbosina cuyos derechos de autor y patente están en trámite. Actualmente está en trámite la patente por un acondicionador de flujo híbrido desarrollado. Es asesor también de varias tesis de licenciatura y maestría en temas de medición de flujo de fluidos.

### **M. en C. Iván Juárez**

Ingeniero Especializado de CIATEQ, tiene Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica en la especialidad de Sistemas Térmicos por parte del Centro de Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET). Tiene experiencia en modelado mediante técnica de volumen finito en problemas de transferencia de calor, mecánica de fluidos, turbulencia, sistemas multifásicos, sistemas pasivos de climatización solar y problemas acoplados fluido-estructurales. Amplia experiencia teórico-práctica en sistemas HVAC. Ha participado en dos congresos y un simposio en tópicos de simulación CFD, ha publicado dos artículos en congresos internacionales en el área de simulación CFD aplicada a procesos de medición. Actualmente estudia doctorado en modelado de flujo multifásico con transferencia de calor.

### **M. en C. César Gutiérrez**

Cuenta con Maestría en Ciencias con especialidad en mecatrónica por parte del Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI). Tiene experiencia en sistemas electrónicos de control, comunicación y medición. Amplia experiencia teórico-práctica en sistemas de medición de hidrocarburos (gas y líquidos), participando en el desarrollo de ingenierías básicas, de detalle, así como análisis HAZOP y evaluaciones con normatividad API. Actualmente se desarrolla como Ingeniero Especializado de CIATEQ en el área de sistemas de medición. Imparte cátedra en la Universidad Tec Milenio.

### **M. en C. José de Jesús Casillas**

Líder de Especialidad en CIATEQ, A.C, tiene Maestría en Ingeniería en la especialidad de Diseño Mecánico por la Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica y Electrónica (FIMEE) de la Universidad de Guanajuato. Tiene experiencia en análisis por elemento finito y volumen finito en elementos fluido - estructurales, Signatario por Entidad Mexicana de Acreditación (EMA) para la evaluación de la conformidad en Sistemas de Medición bajo el principio de presión diferencial (placa de orificio). Ha publicado dos artículos en congresos nacionales e internacionales en las áreas de mecánica y simulación por CFD aplicada a procesos de medición. Actualmente realiza trabajo de tesis para obtener el grado de Doctor en Diseño de Sistemas Mecánicos (DDSM).

### **Dr. Richard Steven**

PhD in experimental fluid mechanics. Director of DP Diagnostics. Chairman of ASME MFC SC19 (wet gas metering committee). Convenor of ISO TC193 SC3 WG2 (wet gas metering committee). 20 years experience in flow metering”.

### **M. Sc. Jennifer Rambone**

With a background in Pure Mathematics, I have been working in the Oil & Gas Metering Industry for the last 11 years, with expertise in flow measurement calculations, verification software and metering computer systems. Since joining Swinton Technology in 2009 I have been lead UK consultant in Differential Pressure (DP) meter diagnostic systems, co-authored six papers on the subject and presented at the North Sea Flow Measurement Workshop in 2012.