



Estudio experimental de la caída de presión en rectificadores de flujo

René Tolentino Eslava, Ivone Cecilia Torres Rodríguez, Pedro Francisco Huerta González

RESUMEN

En este trabajo se presenta la evaluación experimental de la caída de presión en un arreglo de rectificador-acondicionador de flujo en una instalación por la que circula agua en una tubería de diámetro de 6 plg (150 mm). El rectificador de flujo evaluado fue el de haz de tubos integrado por 37 tubos de 12 plg de longitud; por otro lado, el enderezador de flujo es del tipo placa perforada NEL (Spearman); estos se calcularon de acuerdo con la norma ISO 5167-1:2003. El estudio experimental se realizó con el fluido de trabajo a temperatura ambiente en un intervalo de flujo de 100 LPM a 300 LPM. La caída de presión obtenida para el flujo máximo fue de 12.08 kPa (1.23 mca).

ABSTRACT

This paper presents the experimental evaluation of the pressure drop in a conditioner-straightener flow arrangement in an installation through which water is circulated in a 6 in. (150 mm) diameter pipe. The evaluated flow rectifier was the tube bundle integrated by 37 tubes of 12 inches in length; on the other hand, the flow straightener is of the NEL (Spearman) perforated plate type; these were calculated according to ISO 5167-1:2003. The experimental study was carried out with the working fluid at room temperature in a flow range from 100 LPM to 300 LPM. The pressure loss for the maximum flow was 12.08 kPa (1.23 mca).

Palabras claves: Caída de presión, Enderezador/Rectificador de flujo, Instalación medidor de flujo, Longitud de tubería.

INTRODUCCIÓN

Para instalar los instrumentos de medición de flujo se debe tener un flujo desarrollado o un perfil de velocidades uniforme en el plano de medición. Por lo que es necesario tener una longitud de tubería recta corriente arriba y corriente abajo del instrumento de medición, distancia que se expresa en función del diámetro nominal de la tubería (D). Algunas aplicaciones en la industria no permiten contar con los tramos de tubería recta, por lo que es necesario emplear enderezadores o acondicionadores de flujo.

La distorsión del flujo y del perfil de velocidades en los procesos industriales se deben a los codos que pueden estar en uno, dos o tres planos, los accesorios como las “T” y “Y”. Las válvulas de control al regular el flujo generan una perturbación del perfil de

velocidades; también las válvulas check, válvulas de bloqueo y las válvulas solenoides contribuyen a alterar el perfil de velocidades. Por otro lado, los filtros, entradas de flujo desde tanques o desde la atmósfera también distorsionan el flujo. Cuando se requiere una exactitud alta en los medidores de esta variable se emplean dispositivos de acondicionamiento de flujo para reducir los errores en las condiciones de instalación (Brown G. y Griffith B., 2013).

Se han realizado diversos estudios experimentales sobre el desempeño de rectificadores y acondicionadores en la medición de flujo. Laribi B., et al (2003), evaluaron experimentalmente los efectos de acondicionadores de flujo Étoile, haz de tubos y placa perforada tipo Laws en la medición de una placa de orificio, encontrando una desviación en los coeficientes de calibración de ésta. Brown G. y Griffith B., (2013), estudiaron el desempeño de medidores de flujo ultrasónicos con y sin acondicionamiento de flujo. Liu, R., et al (2014), evaluaron el acondicionador de flujo de una terminal de volumen de aire variable (VAV) para regular el perfil de velocidad corriente arriba del sensor de flujo de la VAV e incrementar la exactitud de la medición del flujo de aire. Brown G. y Griffith B. (2015), evaluaron un rectificador de flujo tipo Laws y un diseño nuevo con un medidor de flujo de 4 pares de sensores, encontrando un desempeño similar del medidor de flujo cuando se reduce la caída de presión en el rectificador.

También se han realizado estudios mediante Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), para la evaluación de rectificadores de flujo. Yin, G., et al (2023), evaluaron el desempeño de un rectificador de haz de tubos en base a los perfiles de velocidad, la intensidad de vórtice y la desviación del flujo en una tubería recta. Štefanič, M., & Lipej, A. (2023), investigaron la reducción de las distancias corriente arriba y corriente abajo en una tubería de medición cuando se instalan diferentes acondicionadores (Zanker y NEL) en un flujo de aire, lo cual mejoró la exactitud de la medición.

El uso de rectificadores en la medición de flujo es una práctica común al controlar esta variable. Se tiene diversos rectificadores dentro de los que destacan: Étoile, AGA/ASME, AMCA, ISO, AGA, ASME, Zanker, Mitsubishi y Sprengle. Siendo su construcción en base a la unión de placas formando una estrella; un arreglo de tubos, placas perforadas; o una combinación de placas perforadas unidas con tubos. La ventaja de los rectificadores es que reducen la distancia de tubería entre un 20% a 50% dependiendo del instrumento de medición y el último accesorio que perturba el flujo antes del punto de medición. Por lo que en este trabajo se presenta la evaluación de la caída de presión en dos rectificadores de flujo normalizados haz de tubos y tipo Spearman (NEL).

* Instituto Politécnico Nacional, ESIME Zacatenco, Departamento de Ingeniería en Control y Automatización, rtolentino@ipn.mx, phuerta@ipn.mx, ictorres@ipn.mx.



CAÍDA DE PRESIÓN

El coeficiente de caída de presión (K) en los rectificadores y acondicionadores de flujo se determina con la ecuación (1), ISO 5167-1 (2003).

$$K = \frac{\Delta p_c}{\frac{1}{2} \rho V^2} \quad (1)$$

En la ecuación anterior: Δp_c , es la pérdida de presión en el acondicionador o rectificador de flujo; V, es la velocidad axial promedio del fluido en la tubería; ρ , es la densidad del fluido. El término del denominador representa la presión dinámica del fluido

Los coeficientes de pérdida de presión (K) aproximados de los rectificadores de flujo son: haz de tubos de 0.75, el tipo AMCA de 0.25 y el Étoile de 0.25. Los acondicionadores de flujo tienen los siguientes valores de K aproximados: el Gallagher de 2, el K-Lab NOVA de 2, el Nel (Spearman) de 3.2, el Sprengle entre 11 y 14, el Zanker de 5 y la placa Zanker de 3 (ISO 5167-1, 2003).

RECTIFICADORES DE FLUJO

La norma ISO 5167-1 (2003), establece que los rectificadores de flujo son dispositivos que remueven o reducen los remolinos o vórtices; como enderezadores se tienen los de haz de tubos (tube bundle), el tipo AMCA y el Étoile. Por otro lado, un acondicionador de flujo es un dispositivo que además de remover o reducir los vórtices, está diseñado para redistribuir el perfil de velocidad. Varios de los acondicionadores de flujo son o incluyen una placa perforada, estos tienen la ventaja de que su espesor es alrededor de D/8 comparada con la longitud mínima de 2D del haz de tubos. Algunos ejemplos de acondicionadores de flujo son el Gallagher, K-Lab Nova, NEL (Spearman), Sprengle y Zanker.

Para este trabajo se seleccionaron el rectificador de flujo de haz de tubos y el acondicionador de flujo NEL (Spearman). El acondicionador NEL se fabricó por duplicado para instalar uno corriente arriba y el otro corriente debajo de un transmisor de flujo electromagnético. La instalación en donde se evaluaron los transmisores cuenta con una expansión abrupta de 50 mm (2 plg) a 150 mm (6 plg) de diámetro, por lo que después de la expansión se colocó el rectificador de haz de tubos. Lo anterior, garantiza un flujo adecuado en el punto de medición.

El acondicionador de flujo NEL (Spearman), calculado según la norma ISO 5167-1 (2003) tiene las siguientes dimensiones:

- Cuatro perforaciones de 0.10 D (0.6 plg), en un diámetro de 0.18 D (1.08 plg).
- Ocho perforaciones de 0.16 D (0.96 plg), en un diámetro de 0.48 D (2.88 plg).
- Dieciséis perforaciones de 0.12 D (0.72 plg), en un diámetro de 0.86 D (5.16).
- Una placa de espesor de 0.12 D (0.72 plg).

Éste se manufacturó de placa de acrílico con perforaciones hechas con corte láser para garantizar las dimensiones calculadas, en la figura 1 se muestra el acondicionador de flujo.



Figura 1.- Rectificador tipo Spearman.
Fuente: elaboración propia.

El rectificador de flujo de haz de tubos se construyó con las siguientes consideraciones de acuerdo con la norma ISO 5167-1 (2003).

- Al menos 19 tubos.
- El espesor de los tubos debe ser menor a 0.025 D.
- El diámetro exterior del rectificador debe ser mayor a 0.95 D, pero menor a 1 D de la tubería que lo contendrá.
- Pueden ponerse 4 espaciadores que son opcionales.
- La longitud de los tubos debe estar entre 2 D y 3 D, pero lo más cercano a 2 D.

Se construyó de CVPV de 12.7 mm (1/2 plg) de diámetro el cual cuenta con las características requeridas en el diseño, para unir el rectificador se empleó pegamento para este tipo material, el rectificador construido se muestra en la figura 2 y está integrado de 37 tubos de 30.48 mm (12 plg) de longitud equivalente a 2D.



Figura 2.- Rectificador de tubos tipo bundle.
Fuente: elaboración propia.



INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

Para la evaluación de la caída de presión en los rectificadores de flujo, se empleó una instalación experimental para medición y control de flujo de agua, la cual se muestra en la figura 3 y se describe a continuación. Está integrada de un tanque atmosférico construido de aluminio con una capacidad de 270 litros. El fluido se recircula mediante una bomba sumergible trifásica marca PUMPS F&Q, modelo 50WQ0.55 – 2P3V, maneja un flujo de 400 LPM (24 m³/h) a una presión de 3 m H₂O, el diámetro de descarga es de 50.8 mm (2 plg). Es accionada por un motor eléctrico de 2 polos de 550 W (0.75 hp) alimentado a 220 V de CA y demanda una corriente de 4.2 A y su velocidad nominal es de 3450 rpm. El flujo circula por una tubería de 50 mm (2 plg) de diámetro de PVC cédula 40 que se expande a un tubo de 150 mm (6 plg) de diámetro de PVC de la misma cédula.



Figura 3.- Instalación experimental.
Fuente: elaboración propia.

La instalación cuenta con transmisores de flujo y presión. Para el flujo se tiene un transmisor electromagnético de la marca Endress+Hauser, modelo Promag 33F, con protocolo HART y señal de salida de 4 mA a 20 mA. Alcance ajustable de 0 m³/h a 636.2 m³/h, 150 mm (6 plg) de diámetro. Tiene un alcance ajustable en 3 modos de operación: mínimo de 0 m³/h a 19.09 m³/h a 0.3 m/s, de fábrica de 0 m³/h a 159.0 m³/h a 2.5 m/s y máximo de 0 m³/h a 636.2 m³/h a 10 m/s, Endress+Hauser, (2006). El transmisor se ajustó en un intervalo desde 0 l/min hasta 330 l/min (19.8 m³/h). La presión se mide con transmisores de presión absoluta marca Noshok, serie 100 con alcance de 0 psia a 30 psia, señal de salida 4 mA a 20 mA y alimentación 10 V CD a 30 V DC. Su conexión a proceso es roscada de 1/4 plg NPT.

El tubo de medición en el que se instaló el transmisor de flujo se muestra en la Figura 4, tiene una longitud de 11.5D (2.68 m, 105.6 plg.) antes del transmisor y 3.5D (0.53 m = 21 plg) después del medidor de flujo, se consideraron 2D para colocar el primer rectificador. Un acondicionador NEL (Spearman) está en la entrada a 5.5 D (838.2 mm = 33 plg) del transmisor, el rectificador de tubos se ubica a 7.5 D (1143 mm = 45 plg) del transmisor y el segundo acondicionador se localiza a 1.5 D (228.6 mm = 9 plg) después del transmisor.

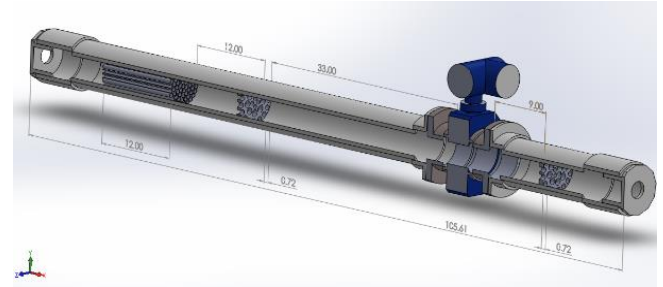


Figura 4.- Tubo de medición y rectificadores de flujo.
Fuente: elaboración propia.

La instalación se opera desde un tablero de control el cual tiene como elementos principales un Controlador Lógico Programable (PLC), un variador de frecuencia, una estación de operación y elementos de protección. La estación de operación se emplea para el arranque y paro de la bomba sin la necesidad de la HMI, también para establecer la operación en manual o automática.

RESULTADOS

Para determinar la caída de presión en los rectificadores de flujo que se tienen en el tubo de medición, se midió la presión en la entrada y salida de este. La caída de presión considera la expansión y contracción, así como los tres rectificadores de flujo. La evaluación se realizó a diferentes frecuencias de operación con la válvula de retorno al tanque abierta. Se obtuvo una presión de 0.070 mca en la entrada y una presión de 0.049 mca en la salida con un flujo de 100.99 l/min (20 Hz). Para un flujo de 302.97 l/min (60 Hz) se tuvo una presión de 2.685 mca en la entrada y de 1.455 mca en la salida. La figura 5 muestra el comportamiento de las presiones en la entrada (P1) y salida (P2) del tubo de medición. La separación entre las presiones representa la caída de presión en los rectificadores de flujo.

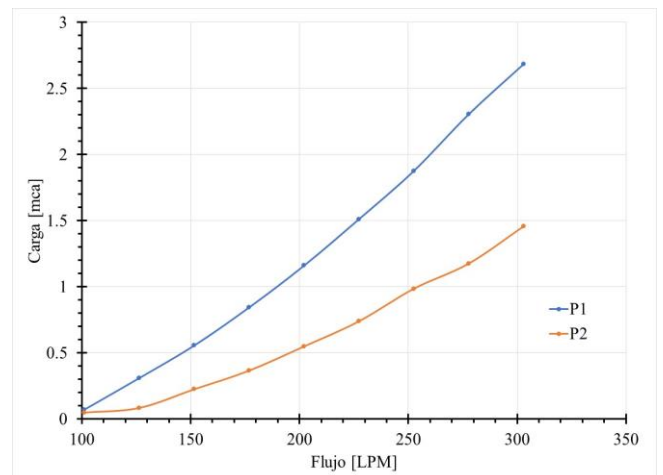


Figura 5.- Presión en entrada y salida del tubo de medición.
Fuente: elaboración propia.



En la tabla 1, se muestra la caída de presión con la válvula de recirculación abierta para todas las condiciones de flujo evaluadas en función de incrementos de cada 5 Hz con el variador de frecuencia.

Tabla 1. Caída de presión en los rectificadores de flujo.

f [Hz]	qv [LPM]	Δp [mca]
20	101.0	0.02
25	126.2	0.22
30	151.5	0.33
35	176.7	0.48
40	202.0	0.61
45	227.2	0.77
50	252.5	0.89
55	277.7	1.13
60	303.0	1.23

Fuente: elaboración propia.

El flujo mínimo evaluado fue de 101 LPM que representa un tercio del flujo máximo en la instalación. La caída de presión máxima fue de 1.23 mca para el flujo de 303 LPM (60 Hz) y la caída de presión mínima fue de 0.02 mca a un flujo de 101 LPM (20 Hz).

También se caracterizó la bomba sumergible, para lo cual se estableció una frecuencia constante de 60 Hz y se registró la presión en la entrada del tubo de medición, obturándose la válvula en diferentes posiciones. En la figura 5 se muestra la curva de flujo-carga de la bomba, teniéndose un flujo máximo de 303 LPM para una carga de 2.58 mca y una carga de 8.08 mca para un flujo de 32.4 LPM.

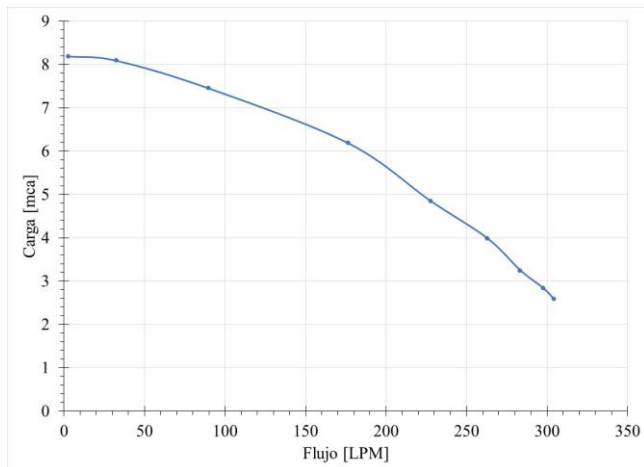


Figura 5.- Curva flujo-carga de la bomba.

Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

Se determinó la caída de presión en un conjunto de un rectificador de flujo (has de tubos) y dos acondicionadores de flujo (NEL-

Spearman) en una instalación para medición y control de flujo de agua. Los acondicionadores y el rectificador de flujo permitieron reducir la distancia del tubo adecuándose al espacio disponible en el laboratorio para la instalación experimental a cambio de una caída de presión máxima de 1.23 mca en el tubo de medición. Finalmente, la medición de flujo presentó una variación de $\pm 1.5\%$ reflejado en una variación de ± 5 lpm, valor aceptable para la medición de esta variable.

REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

- Brown, G. J., & Griffith, B. W. (2013). A new flow conditioner for 4-path ultrasonic flowmeters. Flomeko 2013, Paris, France.
- Brown, G. J., & Griffith, B. W. (2015). Ultrasonic flow meters and flow conditioning. Int. Flow Measurement Conference 2015, Coventry, UK.
- Endress+Hauser, (2006), Promag 33 Sistema de medición de flujo electromagnético, Manual de operación, No. 50063718
- ISO 5167-1. (2003). Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular-cross section conduits running full. Part 1: General principles and requirements.
- Laribi, B., Wauters, P., & Aichouni, M. (2003). Comparative study of aerodynamic behaviour of three flow conditioners. *European journal of mechanical and environmental engineering*, 48(1), 21-30.
- Liu, R., Wen, J., & Waring, M. S. (2014). Improving airflow measurement accuracy in VAV terminal units using flow conditioners. *Building and environment*, 71, 81-94.
- Štefanič, M., & Lipej, A. (2023). Numerical Investigation and Experimental Validation of Different Air Flow Conditioners using Up-and Down-Stream Pipeline. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 16(5), 983-991.
- Yin, G., Ong, M. C., & Zhang, P. (2023). Numerical investigations of pipe flow downstream a flow conditioner with bundle of tubes. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 17 (1), e2154850.

INFORMACIÓN ACADÉMICA

René Tolentino Eslava: Ingeniero Mecánico de ESIME Azcapotzalco, IPN. M. en C. en Ingeniería Mecánica por la SEPI, ESIME Zacatenco, IPN. Profesor titular del departamento de Ingeniería en Control y Automatización de la ESIME Zacatenco.

Pedro Francisco Huerta González: Ingeniero Electricista de ESIME Zacatenco, IPN. M. en C. en Ingeniería Eléctrica, SEPI ESIME Zacatenco, IPN. Profesor titular del departamento de Ingeniería en Control y Automatización de la ESIME Zacatenco.

Ivone Cecilia Torres Rodríguez: Ingeniera en Control y Automatización de ESIME Zacatenco, IPN. M. en C. en Ingeniería Eléctrica por la SEPI ESIME Zacatenco del IPN. Profesora titular del departamento de Ingeniería en Control y Automatización de la ESIME Zacatenco.