

# Modelo predictivo para la determinación del flujo de descarga en válvulas de alivio de presión en aplicaciones de vapor

Predictive model for the determination of the discharge flow in pressure relief valves on steam applications

Jorge Duarte Forero<sup>1\*</sup>, Carlos García Rincón<sup>1</sup>, Carlos Camargo Fiorillo<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ingeniería Mecánica, Universidad del Atlántico, Barranquilla, Colombia.

\*jorgeduarte@mail.uniatlantico.edu.co

**Resumen**— Este artículo presenta el desarrollo de un modelo predictivo para cuantificar el flujo de descarga de vapor en válvulas de seguridad, a partir de ensayos realizados con Nitrógeno en un banco de prueba. El modelo propuesto se construyó con datos experimentales obtenidos a través de mediciones en banco de prueba que cumplen los lineamientos de la normativa ASME/API vigente. Se realizaron simulaciones en la herramienta CFD del software ANSYS®, las cuales fueron validadas con los datos experimentales obtenidos, con el fin de aumentar los puntos de muestreo dentro del rango de operación de las válvulas y de esta forma reducir los costos de experimentación. Estos resultados se relacionaron con las variables que influyen el fenómeno en estudio a través de una regresión multivariable, con lo que se obtuvo una expresión capaz de predecir el flujo de vapor a través de la válvula de seguridad. La correlación propuesta calcula el factor de corrección para predecir el flujo desalojado por la válvula operando en el generador de vapor, pero basado en la medición del flujo de descarga de Nitrógeno en el banco de prueba. Se validó la reproducibilidad del modelo desarrollado a través de una prueba de Durbin-Watson para residuos, una prueba de hipótesis para el modelo y una prueba de normalidad, en donde se verificó la alta capacidad de predicción de las correlaciones desarrolladas en el presente estudio.

**Palabras clave**— CDF, Modelo estadístico, Simulación, Termo-fluidos, Válvula de seguridad.

**Abstract**— This article presents the development of a predictive model which quantify the flow discharge of steam in safety valves, based on tests conducted with Nitrogen in a test bench. The proposed model was built with experimental data obtained through test bench measurements that meet the requirement of the current ASME / API regulations. Simulations were performed in the CFD tool of the ANSYS® software, which was validated using the experimental data obtained, to increase the sample size within the operating range of the valves and thus reduce the costs of experimentation. These results were related to the variables that influence the phenomenon through a multivariate regression, which yielded an expression capable of predicting the steam flow

through the safety valve. The proposed correlation calculates the correction factor to predict the flow discharged by the valve operating in the steam generator and based on the measurement of the Nitrogen discharge flow in the test bench. The reproducibility of the developed model was validated through a Durbin-Watson test for residues, a hypothesis test for the model and a normality test, where the predictive capacity of the correlations was verified.

**Keywords** — CFD, Statistic model, Simulation, Safety valve, Thermo-fluids .

## I. INTRODUCCIÓN

Las válvulas de seguridad son dispositivos de alivio de presión que protegen sistemas presurizados, en sistemas de generación de vapor. La norma ASME hace obligatoria su presencia como última acción de seguridad en caso de sobrepresión. Las válvulas de seguridad son mecánicas, por lo que su accionamiento se presenta cuando hay un desbalanceo entre la fuerza ejercida por el fluido y el resorte de la válvula [1]. Según Darby [2], la estabilización de la presión de accionamiento toma alrededor de 30 ms y es función de la posición de los anillos de regulación, que suavizarán o intensificarán la rampa de cierre de la válvula, a diferencia de la rampa de apertura, la cual depende de parámetros geométricos de la boquilla y el tapón [3].

En la norma ASME sección I parte PG-69.2.3 [4] se define el coeficiente de descarga de las válvulas de seguridad operadas en sistemas de vapor, el cual es directamente proporcional a la presión de entrada y a la posición del alza del obturador. Esta última variable depende a su vez de las propiedades mecánicas del resorte de la válvula. Ortega [5] formula un modelo matemático para determinar el coeficiente de descarga. Autores como Crosby [6] han desarrollado una expresión a partir de variables geométricas y del vapor para determinar el flujo de descarga, la cual tiene la forma descrita por la Ec. (1).

$$A_d = 0,1791 \frac{W_{N_2} \sqrt{Z} \sqrt{T}}{C_{of} K_d P_1 \sqrt{M}} \quad (1)$$

Manczyk [7] reconoce la importancia económica de conocer el flujo másico de descarga a través de un orificio, por lo que propone una expresión para predecirlo en función del diámetro y la presión de operación. API [8] propone expresiones para determinar el área requerida de descarga con el fin de garantizar el correcto funcionamiento de las válvulas de seguridad en operación con diferentes gases. Estudios más recientes como el de Song *et al.* [9], consideran el efecto de la fuerza de fricción existente entre las superficies en contacto en la apertura de la válvula, lo cual describe de manera más detallada el fenómeno en estudio. Mediante modelos experimentales se puede estudiar el comportamiento de la apertura de la válvula, caracterizando las fuerzas debido al flujo sobre el disco [10]. Singh [11] determinó que el tiempo en que permanece abierta la válvula y la estabilidad total de la misma, generalmente puede ser aumentada con la disminución del anillo de ajuste, un resorte menos rígido o disminución del backpressure.

El desarrollo de modelos CFD (Siglas en Inglés de Dinámica Computacional de Fluidos) reduce los costos de experimentación y fabricación de prototipos para una aplicación en particular. Es una inversión tecnológica que permite simular condiciones de operación y obtener resultados muy cercanos a los reales. Es por esto que en otros trabajos como el de Crosby [12] se analiza el comportamiento de diferentes válvulas operando con diferentes gases en las mismas condiciones de operación. Song *et al.* [13] realiza simulaciones en ANSYS-CFX, donde una malla deformable es utilizada para considerar la dinámica del sistema empleando. Incluso, trabajos con modelos más sencillos del mismo autor [14], muestra la relación de una de las características de la válvula (blowdown) y su dinámica operativa. Otros trabajos utilizan principios de cuerpo rígido y dinámica de fluidos [15], los cuales parten de un modelo dinámico no lineal, encontrando que el tiempo de apertura de la válvula está linealmente relacionado con la longitud del orificio y su radio.

Simulaciones en ANSYS-FLUENT [16] muestran un excelente desempeño en la predicción de la fuerza debido al flujo compresible en una válvula. Song *et al.* [17] verifican mediante simulaciones que el flujo másico de descarga se estabiliza luego de 0,1 segundos, lo cual muestra que la cantidad de masa desalojada en este periodo de tiempo es muy corto y el estudio en estado estacionario sería adecuado.

El mantenimiento e inspección de las válvulas de seguridad se realiza en bancos de prueba con nitrógeno, pues se ha demostrado experimentalmente que no hay un cambio significativo en el ajuste en esta condición y en sitio con vapor, por la influencia de la temperatura en el módulo elástico del resorte [18]. Sin embargo, la medición del flujo de descarga se ve afectada significativamente debido a las diferencias en las propiedades del fluido [19]. La capacidad de descarga es una

de las principales variables de prueba y el blowdown define la cantidad de fluido [20] [21]. Pierorazo [22] realizó un estudio de cómo el comportamiento de la apertura de la válvula afecta el comportamiento del fluido almacenando en un recipiente a presión.

El uso de herramientas estadísticas para predecir comportamientos en este tipo de válvulas ha sido de gran interés para varios autores [23]. Gross [24] usa la metodología propuesta por API RP 580 para predecir el tiempo de falla de una válvula de seguridad, a través de modelos probabilísticos. Otro modelo de análisis estadístico también propuesto por Gross [25] propuso una evaluación estadística del comportamiento de válvulas de seguridad con asientos blandos, en donde usando un modelo probabilístico geométrico y pruebas de hipótesis se calcula y compara la tasa de falla de una válvula de asientos duros con respecto a una de asientos blando.

El flujo de descarga de una válvula de seguridad que opera en sistemas con vapor generalmente no puede ser medido usando este fluido, debido a los altos costo de producción de vapor y el nivel de riesgo asociado a esta actividad. Por esta razón, en el presente artículo se propone un modelo de regresión múltiple, a partir datos adquiridos y simulaciones validadas experimentalmente, de manera que se puede predecir el flujo de descarga con vapor en este tipo de válvulas a partir del flujo medido en banco con nitrógeno.

## II. METODOLOGÍA

Para el desarrollo de esta investigación se utilizaron los siguientes recursos:

### A. Banco de pruebas para válvulas de seguridad

Para cuantificar el flujo de descarga con nitrógeno en la válvula de seguridad, se implementó un banco de pruebas utilizando como base el montaje sugerido por la norma ASME PTC 25 [4], que consiste en una estación de medición de flujo aguas abajo de la válvula de seguridad. Para determinar el caudal de descarga se utilizó un medidor de presión diferencial Rosemount 3051 con precisión de 0.04% de 0-200 in H<sub>2</sub>O para monitorear presión y temperatura se utilizaron manómetros Dwyer DCGII con precisión de 0.05% de 0-500 psig y termómetros bimetálicos Ashcroft CI con precisión 1% de 0 – 120 °C. Este montaje se muestra en la Figura 1.

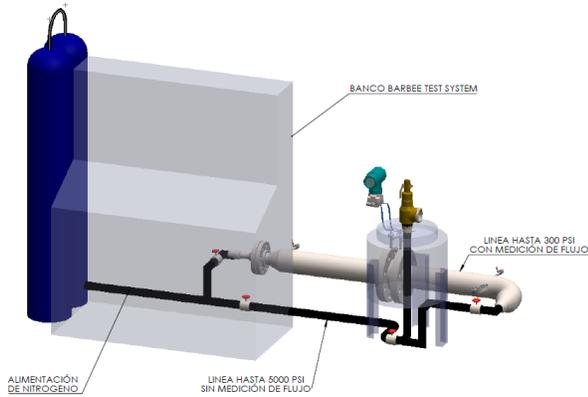


Fig. 1. Esquema del banco de prueba para medición de flujo de Nitrógeno

Ya que el flujo medido es flujo volumétrico, la determinación del caudal másico de nitrógeno se hace mediante Ec. (2) y Ec. (3).

$$\rho_{N_2} = 1,25 \left[ \frac{(P_1 + 14,7) * 273,15}{14,7 * T_p} \right] \tag{2}$$

$$W_{N_2} = Q_{N_2} * \rho_{N_2} \tag{3}$$

Donde  $\rho_{N_2}$  es la densidad del nitrógeno a las condiciones de prueba [kg/m<sup>3</sup>],  $P_1$  es la presión a la entrada de la válvula [psi] y  $T_p$  es la temperatura de prueba en K.  $W_{N_2}$  es el flujo másico de nitrógeno [kg/s] y  $Q$  es el flujo volumétrico [m<sup>3</sup>/s].

**B. Banco de pruebas para resortes**

Este banco es utilizado para estimar la constante elástica del resorte de cada válvula. Consiste en un cilindro hidráulico al que se le adaptó una línea de conexión para un manómetro digital Druck DPI 104. En la parte superior de este cilindro hidráulico se dispone de un soporte sobre el cual se sitúa el resorte de la válvula, que a medida que se comprime, un imán se desplaza solidario al soporte y se desliza sobre un sensor SICK MPA 215, el cual mide la deformación del resorte. Al conocer la constante de elasticidad del resorte, se estudia el mecanismo de acción de la válvula, donde se observa que la deformación del resorte es ocasionada por la presión del fluido, actuando sobre el obturador que se desplaza verticalmente solidario al resorte. Para comprobar que el alza medida sea real, se compararon los valores medidos con valores de alza estampados en placa por los fabricantes, logrando valores coincidentes.

**C. Modelado CFD**

En el software ANSYS® se realizaron simulaciones, las cuales fueron validadas experimentalmente en el banco de prueba. La configuración básica de las simulaciones realizadas se presenta en la Tabla 1 y Tabla 2.

Entrada		Salida	
Masa y Momento	Presión Estática	Masa y Momento	Presión Estática
Dirección de Flujo	Gradiente Cero	Criterio de Convergencia	
Turbulencia	Gradiente Cero	Tipo de Residual	RMS
Transferencia de Calor	Temperatura Total	Objetivo de Residual	0,0001

TABLA 1. Configuración básica de modelo de simulación en CFD

Configuración CFD ANSYS®	
Dominio	
Tipo de análisis	Estado Estable
Presión de referencia	14,7 psi
Transferencia de Calor	Energía Total
Turbulencia	K-Epsilon

Tabla 2. Configuración básica de modelo de simulación en software CFD

Se analizó la capa en las zonas cercanas a las paredes fijas de la válvula, pues en estos puntos se calcula mejor los gradientes de velocidad que se generan, la turbulencia, separación entre el fluido y las paredes, y demás pérdidas de forma, lo cual conlleva a una mejor predicción. Se trabajó con un valor promedio de 0,25 para el factor de asimetría, lo que califica el mallado realizado para el estudio excelente (Tabla 3).

Valor de Asimetría	Calidad de la celda
1	Degenerada
0,9-<1	Mala
0,75 - 0,9	Pobre
0,5 - 0,75	Aceptable
0,25 -0,5	Buena
>0 - 0,25	Excelente
0	Ideal

Tabla 3. Clasificación de la malla según factor de asimetría

Con la validación experimental del modelo CFD, se procedió a realizar un estudio de independencia de malla, el cual demuestra la poca influencia del tipo de mallado realizado con los resultados de cada simulación. Lo anterior implica que los resultados obtenidos en cada simulación dependen principalmente de las configuraciones establecidas en la entrada, dominio y salida del fluido, y por mas refinamiento de malla que se utilice para las condiciones simuladas, los

resultados no varían considerablemente. Los resultados obtenidos son mostrados en la Figura 2.

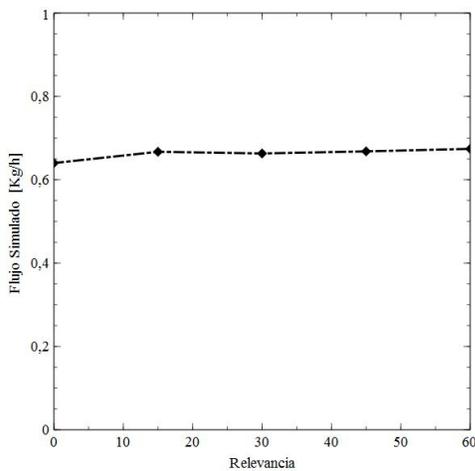


Fig. 2. Resultados de independencia de malla

Una vez realizada la validación experimental por medio de simulaciones, se procedió a aumentar la muestra mediante simulaciones en diversos puntos de operación, con el fin de tener un mayor número de puntos y hacer el modelo estadístico más robusto.

### III. DESARROLLO Y MODELO ESTADISTICO

Con el fin de determinar el factor de corrección  $K_{NV}$  se realizaron una serie de pruebas a las válvulas con vapor y con nitrógeno, donde se tomaron datos de flujo másico en la descarga con vapor y pruebas con nitrógeno midiendo flujo volumétrico de descarga. Se emplearon tres válvulas de diferentes rangos de presión, cuyas características se muestran en la Tabla 4.

Válvula	Alza [mm]	Presión Set [psi]	Sobrepresión
SPIRAX SARCO 561	5,25	170	0,03
LESER 4412 (1)	11,2	145	0,05
LESER 4412 (2)	3,61	175	0,05

Tabla 4. Válvulas de seguridad usadas para la validación experimental del modelo de simulación

En la Figura 3 se ilustra el montaje experimental utilizado para la prueba de las válvulas en estudio.



Fig. 3. Banco de prueba de válvulas con Nitrógeno

En la Figura 4 se observan los datos experimentales y simulados, en donde se superponen las tendencias de los resultados obtenidos, mostrando la buena predicción de los resultados utilizando la simulación CFD.

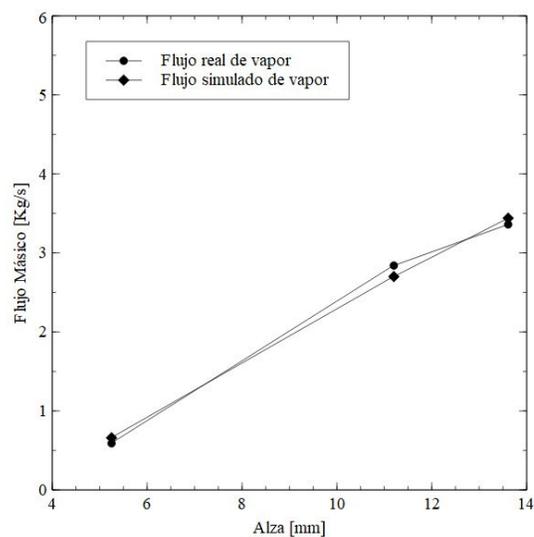
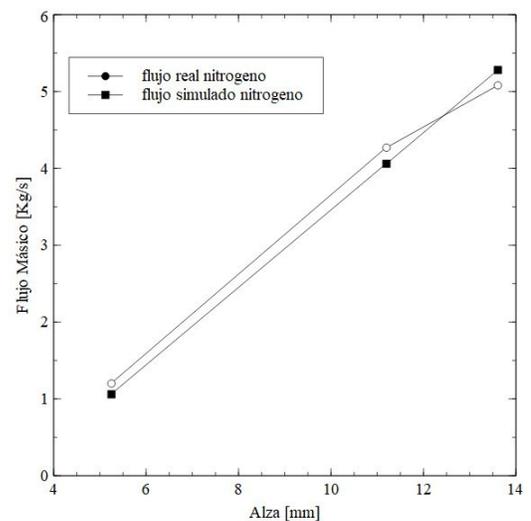


Fig. 4. Resultados de la validación experimental del modelo de simulación propuesto para la determinación del flujo de descarga

En la Figura 5 se observa la distribución de presiones en la zona adyacente a la boquilla y el obturador de la válvula, donde se aprecia la caída de presión debido a la pérdida de energía por el desplazamiento del obturador (carga inicial), y luego la energía asociada a mantener el obturador en la parte superior (alza máxima).

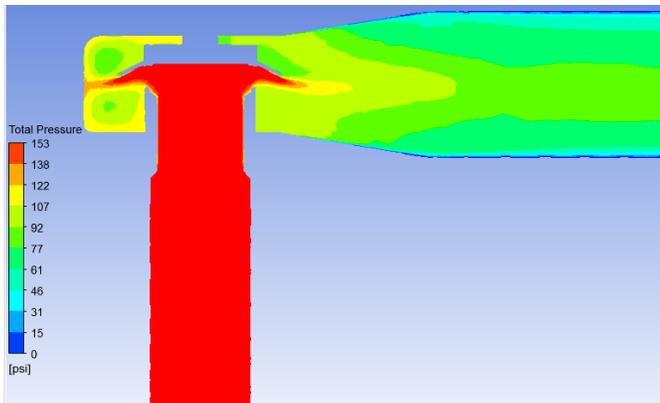


Fig. 5. Distribución de presiones a lo largo de la válvula Leser 4412

Una vez validado el modelo computacional, se analizó la influencia de la presión de accionamiento entre 75 y 289 psi. Para las regresiones estadísticas a implementar, los puntos de simulación se acotaron tomando en cuenta las restricciones reales en operación de la válvula y el número mínimo de muestras calculado para una población normal, considerando la desviación estándar de los instrumentos.

Para calcular el tamaño mínimo de la muestra, se fijó un delta, que es el mínimo error admisible para la variable en estudio y fue definido en función de las características de resolución de los instrumentos y cuanto se ve afectado la variable de salida por cambios en la variable de muestra. Para la aplicación de la Ec. (4) no se tomó en cuenta los instrumentos en que se obtuvieron valores de  $\sigma$  muy cercanos a 0, debido al insignificante aporte al número de muestras.

$$n_m = Z_\alpha \left( \frac{\sigma^2}{\delta^2} \right) \tag{4}$$

CALCULO DE NÚMERO DE MUESTRA				
$Z_\alpha$ (99%) =	TRANSMISOR		MANOMETRO	
2,575	ROSEMOUNT		PRENSA	
$\sigma^2$	2,167	[in H <sub>2</sub> O] <sup>2</sup>	0,334	psi <sup>2</sup>
$\delta$	1,000	in H <sub>2</sub> O	0,500	psi
$\delta^2$	1,000	[in H <sub>2</sub> O] <sup>2</sup>	0,250	psi <sup>2</sup>
$n_m$	5,579		3,437	

TABLA 5. Calculo del número mínimo de la muestra

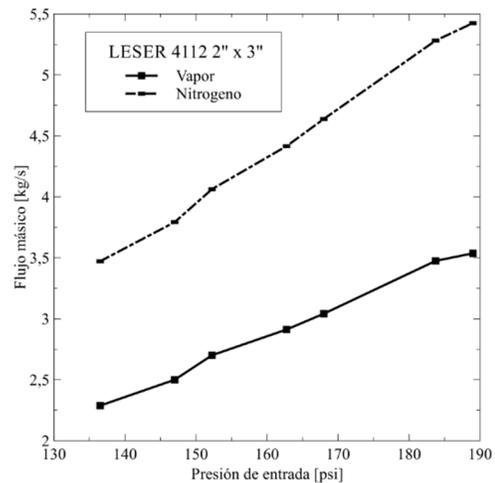


Fig. 6. Resultado de las simulaciones para la determinación de caudal de descarga de las válvulas utilizadas en Leser 4112

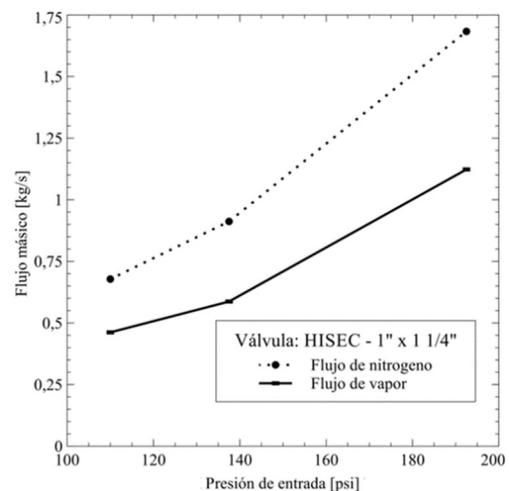


Fig. 7. Resultado de las simulaciones para la determinación de caudal de descarga de las válvulas utilizadas en HISEC

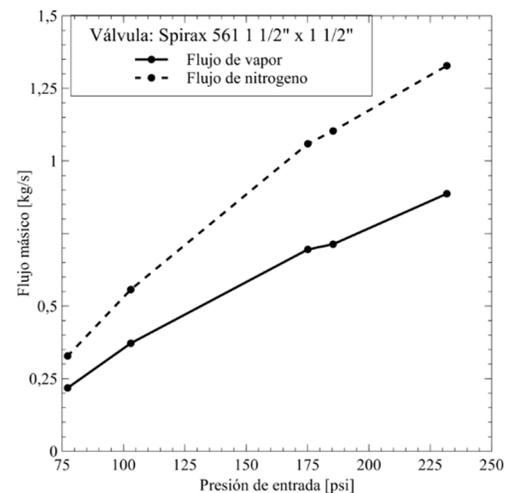


Fig. 8. Resultado de las simulaciones para la determinación de caudal de descarga de las válvulas utilizadas en Spirax Sarco 561

De los resultados en las Figuras 6, 7 y 8 se seleccionaron los factores significativos utilizando pruebas T-student. En las regresiones iniciales se descartaron combinaciones de variables geométricas y la mecánica de la válvula. Se obtuvo como resultado final que el modelo se ve influenciado solo por características del fluido. En este caso las variables densidad de nitrógeno y volumen específico del vapor, como se muestra en la Tabla 6.

Variables dependientes	Coefficiente	Estadístico t	Probabilidad
Volumen específico vapor	2,8041	21,9468	1,1729E-11
Densidad de nitrógeno	0,1163	26,7268	9,5374E-13
Densidad de nitrógeno (orden 2)	-0,0028	-14,0597	3,0601E-09

Tabla 6. Pruebas de hipótesis en una distribución t-student para cada variable

En esta prueba, se puede observar que todos los estadísticos t, están en la zona de rechazo por lo que con un nivel de 95% de confianza estos coeficientes son diferentes a 0 y son significativos para la regresión. A partir de estos resultados se infiere que las combinaciones de variables utilizadas tienen relación de alta significancia estadística con el factor de corrección propuesto.

Se propone una regresión múltiple lineal con a partir de la Ec. (5) [20], utilizando el software SPSS, usado por otros autores en estudios similares para la predicción de variables a partir de regresiones [21]. De estas variables y prediciendo el coeficiente de corrección  $K_{NV}$ , se evaluaron las variables influyentes en el modelo a través de pruebas de hipótesis y a través de un ANOVA se evaluó la robustez del modelo obtenido.

$$\mu|x_1, x_2, x_3, x_n| = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_k x_n \quad (5)$$

El modelo final, mostrado en (6), fue obtenido usando la siguiente configuración de variables:  $K_{NV}$  como variable pronosticada, densidad de nitrógeno de primer y segundo orden, y volumen específico de vapor saturado como variables dependientes. Los resultados del análisis ANOVA del modelo se ilustran en la Tabla 7.

$$K_{NV} = (0,12\rho_{N_2} + 2,90\vartheta - 0,0030\rho_{N_2}^2)^{-1} \quad (6)$$

Análisis de Varianza					
Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F	
Regresión	3	36,6614	12,2212	19738,331	2,028E-22
Residuos	13	0,008	0,0006		
Total	16	36,6694			

tabla 7. Anova para regresión lineal múltiple de Ec. (5)

La prueba de Fisher para la regresión tiene como resultado que se rechaza la hipótesis nula, por lo tanto, los coeficientes obtenidos son significativos para la regresión, ya que con un nivel de confianza del 95% los coeficientes son diferentes de 0. Los resultados de los estadísticos de la regresión se muestran en la Tabla 8.

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación múltiple	0,99
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0,99
Ajustado R <sup>2</sup>	0,92
Error típico	0,03
Observaciones	16

Tabla 8. Estadísticos de la regresión lineal múltiple

Se observa que el 99,98% de la varianza del modelo se explica por las variables dependientes usadas, por lo que este modelo tiene una excelente capacidad de predicción, además con el R<sup>2</sup> ajustado se verificó que las variables del modelo son altamente influyentes en el fenómeno.

Se realizó un análisis de residuales, el cual se ilustra en la Figura 9. Se muestra como varían los residuales con respecto a cada una de las variables dependientes del modelo. No se observan patrones extraños que puedan inferir interdependencia o relación causal en las variables independientes, un modelo inadecuado o varianzas desiguales. Los residuos se representan en las gráficas con una aleatoriedad adecuada alrededor de 0, lo que confirma la idoneidad de las variables independientes definidas para el modelo.

Se realiza una prueba de Durbin Watson donde la hipótesis nula es que no existe interrelación entre las variables independientes del modelo, con el fin de medir interdependencia entre ellas. El análisis conlleva a que se acepta la hipótesis nula ya que el estadístico es mayor a 1,4, por lo que no hay interdependencia.

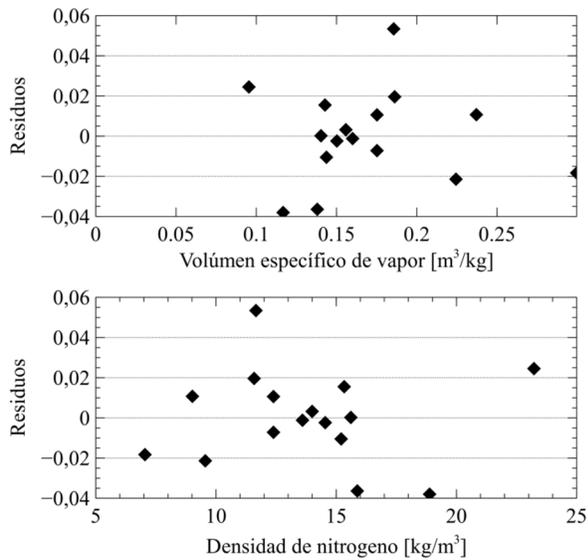


Fig. 9. Gráficos de los residuales para el modelo ajustado

En la Figura 10 se muestra la gráfica de probabilidad normal de la muestra. Se observa una buena tendencia ajustable a una línea recta, lo que indica que son muestras aleatorias de una distribución normal.

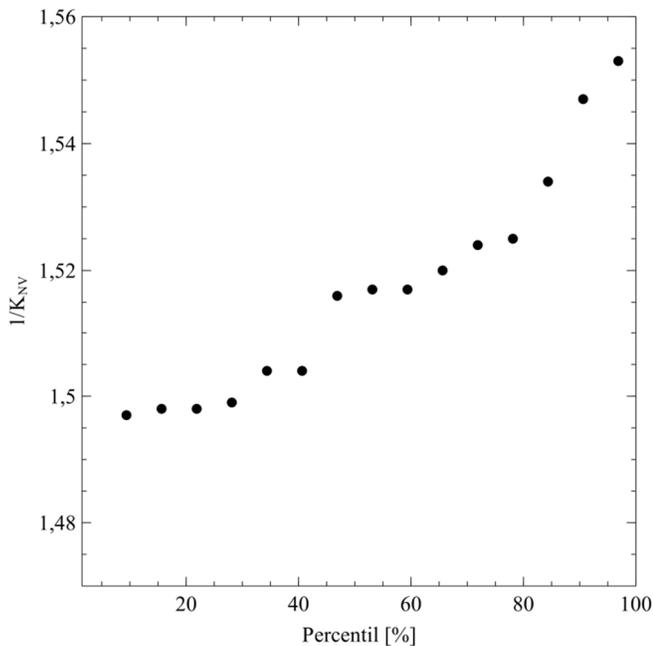


Fig. 10. Gráfico de probabilidad normal para la muestra utilizada en la regresión lineal múltiple

Para evaluar la capacidad de predicción del modelo, se presenta en la Figura 11 los pronósticos de  $K_{NV}$  y los valores experimentales de  $K_{NV}$  en función de la variable dependiente del modelo, en donde se observan desviaciones menores al 2% entre el pronóstico y el valor real.

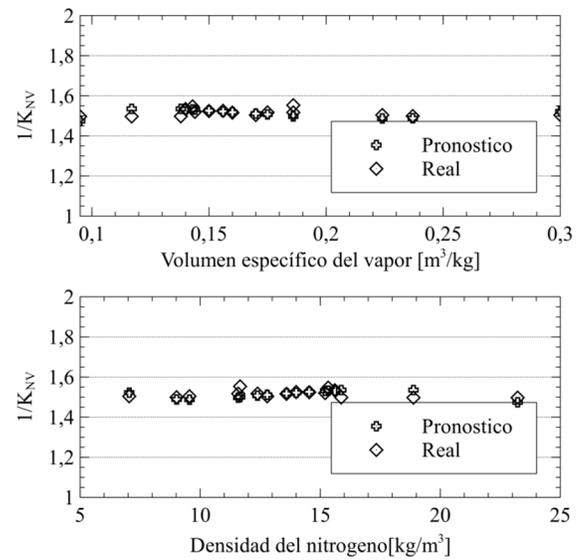


Fig. 11. Grafica de pronósticos del modelo ajustados comparado con resultados de simulación/experimentales

#### IV. RESULTADOS

En la Figura 12 se observan los valores obtenidos en las 16 corridas realizadas y los valores obtenidos del factor de corrección  $K_{NV}$ , el cual lleva el flujo de nitrógeno a un equivalente en flujo de vapor, bajo las mismas condiciones de operación. Se observa que este valor es muy cercano entre sí, a ser una constante independiente del área de descarga en la válvula. Las variaciones máximas son del orden de 0,036, lo cual se puede explicar por las fluctuaciones en la presión o pequeños cambios en la temperatura de operación.

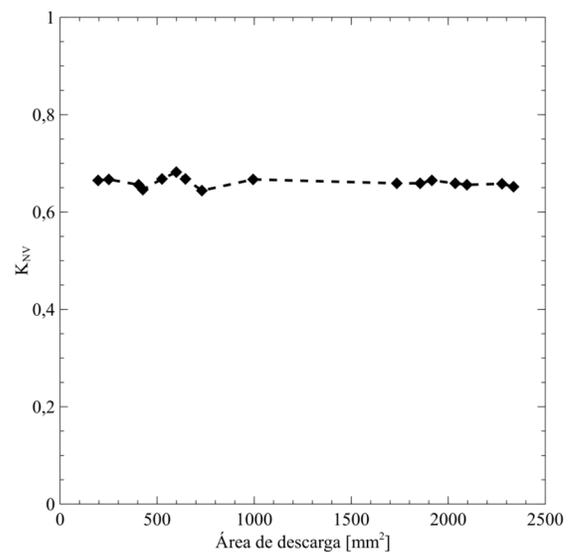


Fig.12. Resultados obtenidos en modelo de simulación para el factor de corrección  $K_{NV}$

La densidad y el volumen específico (inverso de la densidad) tienen una gran influencia en el flujo másico desalojado por la válvula, pues por continuidad, este depende de la velocidad, área y densidad. El cambio de velocidades en la entrada y la descarga de la válvula en ambas condiciones de operación (Nitrógeno y Vapor) son constante, debido a que esta depende de la caída de presión (transformación de energía de presión a energía cinética) debido a la restricción impuesta por el obturador. El área de la boquilla es una constante tanto en operación como en banco de prueba (geometría de la válvula). Esto indica que la variable que induce el cambio del valor de flujo de un fluido a otro es su densidad o volumen específico.

Para validar lo conclusiones anteriores, se realizaron simulaciones CFD con Hidrógeno y Helio, obteniendo los resultados mostrados en las Tablas 9 y 10. Se seleccionaron el Helio e Hidrógeno como fluidos para realizar la comprobación, ya que sus densidades son muy diferentes a la del Nitrógeno y ampliaría el rango de densidades para evaluar el fenómeno estudiado. El valor del factor de corrección se definió con 6 cifras significativas, debido a que usar menor cantidad de éstas representa variaciones significativas en la predicción.

Válvula	Flujo de Vapor	Factor de corrección	Flujo Helio
	[kg/s]	$K_{HeV}$	[kg/s]
LESER 4412	3,474	1,69607	2,049
LESER 4412	2,288	1,72077	1,330

Tabla 9. Determinación de factor de corrección para gas helio

Se observa que el factor de corrección cambio de valor, esto porque es diferente la densidad del fluido (Helio) pero se mantiene constante a diferentes condiciones de operación, por lo anteriormente explicado. Así se puede afirmar que el factor es una constante para un fluido de trabajo, ya que el volumen específico de vapor y densidad del gas siempre varían porcentualmente igual según varíen las condiciones de operación.

Se realizó una segunda revisión de esta hipótesis utilizando un gas aún más ligero, Hidrógeno, donde se obtuvo el siguiente resultado:

Válvula	Vapor	Factor de corrección	Hidrógeno
	[kg/s]	$K_{H_2V}$	[kg/s]
LESER 4412	3,537	2,43724	1,451
LESER 4412	2,288	2,45236	0,933

Tabla 10. Determinación de factor de corrección hidrógeno

El flujo de Nitrógeno será medido directamente en el banco de pruebas y luego usando la Ec. (7) se podrá obtener el flujo de

descarga que esa válvula en particular tendría en operación con vapor.

$$W_{H_2O(g)} = W_{N_2} * K_{NV} \quad (6)$$

Tomando en cuenta la importancia que tiene la densidad y el volumen específico sobre el factor de corrección, el modelo propuesto para el cálculo de dicho factor puede ser utilizado con un alto nivel de predicción para conocer el caudal de descarga actual de una válvula en aplicación con vapor (calderas, distribuidores, autoclaves), sin necesidad de realizar peligrosas mediciones in situ.

Al comparar el trabajo de Song et al. [14] con la Figura 5, notamos similitud en la distribución de presiones a la salida de la válvula, en la zona cercana al obturador, esto se debe a que el modelo propuesto en el presente trabajo describió de manera satisfactoria el fenómeno estudiado. No es de esperar resultados iguales, dado que los estudios están enfocados de manera distinta (transitorio y estacionario respectivamente), por lo que difieren en la estabilidad de presiones y de alza de la válvula.

## V. CONCLUSIONES

- Las validaciones experimentales realizadas con el software ANSYS® V17.0, recrearon los resultados obtenidos en el banco de pruebas de válvulas de seguridad, por lo que las simulaciones realizadas para ampliar la muestra son confiables. Esto muestra una excelente alternativa para disminuir costos, riesgos operativos y tiempos al momento de realizar caracterizaciones en este tipo de válvulas.
- La aplicación de una regresión múltiple arrojó excelentes resultados en cuanto a la significancia estadística y teórica del modelo propuesto. Todas las pruebas aplicadas a la regresión desarrollada con el fin de medir su capacidad de predicción dentro del rango de operación conllevaron a excelentes resultados, lo que traduce en un modelo robusto para predecir el flujo desalojado por una válvula instalada en un sistema de vapor a partir de la medición en banco de pruebas con Nitrógeno.
- La formulación presentada solo aplica para pruebas con Nitrógeno dentro de 75 y 289 psi. El factor de corrección del flujo de descarga de Nitrógeno hacia el flujo de descarga con vapor solo depende de variables intrínsecas del fluido (densidad y el volumen específico del vapor). Este factor de corrección es aproximadamente una constante para una misma válvula y fluido de trabajo.
- Los errores de la simulación con respecto a los datos reales fueron menores al 5%, lo que verifica la alta

capacidad de predicción del modelo desarrollado en el presente estudio.

- El factor de corrección determinado por el modelo propuesto es una constante, independiente de geometría y variables intrínsecas del fluido con una desviación máxima del 3,6%.

## REFERENCIAS

- [1] J. L. Li, L. Z. Chen, and X. G. Song, "Multi-objective Design Optimization of a Pressure Safety Valve for Raped Opening and Reclosing," *Procedia Eng.*, 130, 113–124, 2015.
- [2] R. Darby, "The Dynamic Response of Pressure Relief Valves in Vapor or Gas Service Part I: Mathematical Model," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 26, 1262–1268, 2013.
- [3] R. Darby, "The dynamic response of pressure relief valves in vapor or gas service, part II: Experimental investigation," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 31, 127–132, 2014.
- [4] THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. Boiler and pressure vessel code part PG general requirements for all methods of construction. ASME SECTION I PART PG, New York, 2010.
- [5] A. J. Ortega, B. N. Azevedo, L. F. G. Pires, A. O. Nieckele, and L. F. A. Azevedo, "A numerical model about the dynamic behavior of a pressure relief valve," in *12th Brazilian Congress of Thermal Engineering and Sciences*, 2008.
- [6] Anderson Greenwood Crosby, Crosby Pressure Relief Valve Engineering Handbook, no. May. 1997.
- [7] B. H. Manczyk, "Estimating the Cost of Steam Loss Through the Orifice of a Steam Trap." [Online]. Available: <http://invenoinc.com/file/Estimating-the-Steam-Loss-through-a-Orifice-of-a-Steam-Trap.pdf>, 2017.
- [8] LESER, "Sizing according to AD 2000-Merkblatt A2," 2010. [Online]. Available: [http://frame.leser.com/engineering/file/EHB\\_en\\_7.6-Sizing-according-to-AD-2000-Merkblatt-A2.pdf](http://frame.leser.com/engineering/file/EHB_en_7.6-Sizing-according-to-AD-2000-Merkblatt-A2.pdf). [Accessed: 24-Apr-2016].
- [9] X. G. Song, L. T. Wang, Y. C. Park, and W. Sun, "A Fluid-structure Interaction Analysis of the Spring-Loaded Pressure Safety Valve during Popping Off," *Procedia Engineering*, 130, 87–94, 2015.
- [10] V. Kourakos, P. Rambaud, J.-M. Buchlin, and S. Chabane, "Flowforce in a Safety Relief Valve Under Incompressible, Compressible, and Two-Phase Flow Conditions (PVP-2011-57896)," *J. Press. Vessel Technol.*, 135, 11305-1 – 11305-11, 2013.
- [11] A. Singh, "An Analytical study of the dynamics and stability of a spring loaded safety valve", *Nuclear Engineering and Design*, 72, 197–204, 1982.
- [12] Anderson Greenwood Crosby, "Pressure Safety Valves, Some considerations on their use & sizing," 2009. [Online]. Available: <http://www.dynaflow.com/wp-content/uploads/2015/04/Lecture-09-07-2009-Pressure-safety-valves-by-Tyco.pdf>, 2017.
- [13] X. Guan, S. Ji, H. Jung, H. S. Lee, D. K. Kim, and Y. C. Park, "2-D Dynamic Analysis of a Pressure Relief Valve by CFD," *Proceedings of the 9th WSEAS Int. Conference on APPLIED COMPUTER and APPLIED COMPUTATIONAL SCIENCE*, 136–140., 2009.
- [14] X. Song, Y. C. Park, and J. H. Park, "Blowdown prediction of a conventional pressure relief valve with a simplified dynamic model," *Math. Comput. Model.*, 57 (1–2), 279–288, 2013.
- [15] A. Ray, "Dynamic modeling and simulation of a relief valve," *Simulation*, 31(5), 167–172, 1978.
- [16] B. K. Saha, H. Chattopadhyay, P. B. Mandal, and T. Gangopadhyay, "Dynamic simulation of a pressure regulating and shut-off valve," *Comput. Fluids*, 101, 233–240, 2014.
- [17] X. G. Song, L. Wang, and Y. C. Park, "Transient Analysis of a Spring-Loaded Pressure Safety Valve Using Computational Fluid Dynamics (CFD)," *J. Press. Vessel Technol.*, 132(5), 54501, 2010.
- [18] R. G. Budynas and J. K. Nisbett, *Shigley's Mechanical Engineering Design*, 9th ed. New York: McGraw-Hill, 2011.
- [19] T. M. Rv-, S. R. Valves, D. Gauge, and D. Acquisition, "MODEL RV-5000 MODEL RV-5000."
- [20] M. Bilgili and B. Sahin, "Comparative analysis of regression and artificial neural network models for wind speed prediction," *Meteorol. Atmos. Phys.*, 109 (1), 61–72, 2010.
- [21] E. Uludamar, E. Tosun, and K. Aydın, "Experimental and regression analysis of noise and vibration of a compression ignition engine fuelled with various biodiesels," *Fuel*, 177, 326–333, 2016.
- [22] A. J. Pierorazio and A. M. Birk, "Effects of Pressure Relief Valve Behavior on 2-Phase Energy Storage in a Pressure Vessel Exposed to Fire," *J. Press. Vessel Technol.*, 124, (2), 247, 2002.
- [23] E. M. Mitchell, R. E. Gross, and S. P. Harris, "Evaluating Risk and Safety Integrity Levels for Pressure Relief Valves Through Probabilistic Modeling," *J. Press. Vessel Technol.*, 135 (2), 21601, 2013.
- [24] R. E. Gross, E. M. Mitchell, and S. P. Harris, "Evaluation of Maintenance Intervals for Spring-Operated Relief Valves Using a Risk-Based Inspection Technique," *J. Press. Vessel Technol.*, 134 (6), 61601, 2012.
- [25] R. E. Gross and S. P. Harris, "Statistical Performance Evaluation of Soft (Elastomer) Seat Pressure Relief Valves," *Mater. Fabr.*, V06AT06A077, 2013.