

Modeling and Simulation of Blowdown in High-Pressure Gas Pipelines: A Comparative Approach in Real Scenarios


Abelardo Contreras, Ing.¹ 

^{1,3}Universidad Nacional de Ingeniería, Perú, acontrerasp@uni.edu.pe

Abstract– This study addresses the estimation of times and profiles for depressurization in high-pressure gas pipelines, a crucial aspect for the safety and efficiency in managing energy infrastructures. Given the operational range of pipelines in Peru, with diameters from 18” to 34” and pressures from 50 to 145 Barg, and the risks associated with venting, whether planned or not, precision in predicting the times and profiles of depressurization becomes imperative. This work evaluates five dynamic models for this purpose, contrasting their results with empirical data associated with a real venting event, in order to determine the most precise and applicable methodology. The models range from simplified approaches, such as those from AGA and Weiss et al. (1988), to more complex and sophisticated ones, like modeling using Pipeline Studio software. The results show that, although Pipeline Studio offers the greatest precision, the simplified models present an acceptable margin of error, suggesting their utility in contexts where access to advanced tools is limited. This analysis not only validates the applicability of these models under real conditions but also establishes a basis for future research aimed at improving the precision and reliability of depressurization estimates in pipelines.

Keywords– Pipeline blowdown, natural gas, dynamic modeling, process simulation, comparative analysis.

Modelamiento y Simulación de Venteos en Gasoductos de Alta Presión: Un Enfoque Comparativo Frente a Escenarios Reales

Abelardo Contreras, Ing.¹ 

^{1,3}Universidad Nacional de Ingeniería, Perú, acontrerasp@uni.edu.pe

Abstract— *This study addresses the estimation of times and profiles for depressurization in high-pressure gas pipelines, a crucial aspect for the safety and efficiency in managing energy infrastructures. Given the operational range of pipelines in Peru, with diameters from 18" to 34" and pressures from 50 to 145 Barg, and the risks associated with venting, whether planned or not, precision in predicting the times and profiles of depressurization becomes imperative. This work evaluates five dynamic models for this purpose, contrasting their results with empirical data associated with a real venting event, in order to determine the most precise and applicable methodology. The models range from simplified approaches, such as those from AGA and Weiss et al. (1988), to more complex and sophisticated ones, like modeling using Pipeline Studio software. The results show that, although Pipeline Studio offers the greatest precision, the simplified models present an acceptable margin of error, suggesting their utility in contexts where access to advanced tools is limited. This analysis not only validates the applicability of these models under real conditions but also establishes a basis for future research aimed at improving the precision and reliability of depressurization estimates in pipelines.*

Keywords— Pipeline blowdown, natural gas, dynamic modeling, process simulation, comparative analysis.

Resumen— *El presente estudio aborda la estimación de tiempos y perfiles de despresurización en gasoductos de alta presión, un aspecto crucial para la seguridad y eficiencia en la gestión de infraestructuras energéticas. Dado el rango operativo de los gasoductos en Perú, con diámetros de 18" a 34" y presiones de 50 a 145 Barg, y los riesgos asociados al venteo, ya sea planificado o no, se hace imperativa la precisión en la predicción de los tiempos y perfiles de despresurización. Este trabajo evalúa cinco modelos dinámicos para tal fin, contrastando sus resultados con datos empíricos asociados a un evento real de venteo, con el fin de determinar la metodología más precisa y aplicable. Los modelos incluyen desde enfoques simplificados, como los de la AGA y Weiss et al. (1988), hasta modelos más complejos y sofisticados, como el modelamiento mediante el software Pipeline Studio. Los resultados demuestran que, aunque Pipeline Studio ofrece la mayor precisión, los modelos simplificados presentan un margen de error aceptable, lo que sugiere su utilidad en contextos donde el acceso a herramientas avanzadas es limitado. Este análisis no solo valida la aplicabilidad de estos modelos en condiciones reales, sino que también establece una base para futuras investigaciones dirigidas a mejorar la precisión y confiabilidad de las estimaciones de despresurización en gasoductos.*

Keywords— Venteos en gasoductos, gas natural, modelamiento dinámico, simulación de procesos, análisis comparativo.

I. INTRODUCCIÓN

La gestión eficiente y segura de los gasoductos de alta presión es una prioridad crítica en la infraestructura energética, especialmente en regiones como Perú, donde los sistemas de transporte de gas natural presentan configuraciones de diámetros entre 18" y 34" y operan en un rango considerable de presiones de entre 50 a 145 Barg aproximadamente, tal como se muestra en la Tabla 1 [1]. Este escenario impone desafíos significativos en términos de mantenimiento, seguridad y operatividad, subrayando la necesidad de métodos precisos y confiables para la estimación de tiempos de despresurización de gasoductos. El proceso de venteo ya sea planificado o no, conlleva riesgos inherentes y requiere un enfoque meticuloso para minimizar las consecuencias adversas sobre la seguridad y el medio ambiente.

En ese sentido, el fenómeno de despresurización de gasoductos implica una serie de etapas dinámicas que van desde la propagación de la onda de despresurización hasta el flujo crítico, tanto estrangulado como no estrangulado, dentro del ducto [2]. Estas etapas son críticas para comprender y modelar los efectos de la despresurización, incluyendo las variaciones de temperatura y presión que acompañan al venteo de gas en condiciones de alta presión [3].

En línea con lo anterior, se han desarrollado y aplicado una variedad de modelos con el propósito de estimar tiempos de venteo, así como el comportamiento hidráulico del mismo en gasoductos. Estos modelos abarcan desde métodos simplificados, como los introducidos por la American Gas Association (AGA) [4], hasta los descritos por Weiss et. al. En 1998 [5], hasta enfoques más sofisticados y rigurosos que emplean simulaciones transitorias mediante software especializado. La inclinación por el uso de estos últimos se ha incrementado debido a su capacidad para incorporar de manera integral el análisis sobre los efectos en la mecánica de fluidos, transferencia de calor y masa, así como los parámetros termodinámicos. No obstante, la complejidad y la ocasional inaccesibilidad de dicho software especializado subrayan la importancia de desarrollar metodologías alternativas y accesibles que permitan realizar estimaciones con mayor precisión, especialmente cuando los modelos convencionales no están disponibles.

Este estudio se centra en la evaluación técnica de cinco modelos dinámicos orientados a calcular los tiempos de venteo y analizar el comportamiento de la presión durante el proceso

de despresurización en condiciones específicas de los gasoductos. Se realizará una comparativa de los resultados de cada modelo con datos empíricos de despresurización, con el objetivo de identificar la metodología que ofrezca la mayor precisión y aplicabilidad en sistemas de gasoductos sometidos a altas presiones. Dicha comparativa se fundamentará en evidencia experimental consolidada, revelando cuál de los modelos evaluados se alinea más estrechamente con los fenómenos físicos observados en la práctica.

TABLA I
GASODUCTOS DE MAYOR DIÁMETRO EN PERÚ

Compañía	Longitud (km)	Diámetros (in)	Rango de operación (Barg)
Perú LNG	408	34"	130 - 80
Transportadora de Gas del Perú (TGP)	730	32"/24"/18"	145 - 80
Contugas	200	20"	60 - 50

Fuente: Elaboración propia

II. METODOLOGÍA

A. Consideraciones técnicas asociadas al fenómeno de venteo de gas natural

El venteo de gas natural en un gasoducto constituye un desafío técnico que requiere un entendimiento detallado de la dinámica de fluidos gaseosos. En ese sentido, para llevar a cabo una operación de esta naturaleza, el área transversal del riser de venteo (tubería de evacuación del gas natural) es considerablemente menor que la de la tubería principal, lo que resulta en velocidades de gas muy altas durante la descarga sónica y supersónica. La presión a la salida del riser, que determina el flujo másico de gas de descarga a la atmósfera, es además una función de la presión en el gasoducto en la entrada del riser y las pérdidas de presión en el mismo. En contraste, con un evento de rotura, el área de la sección de salida puede ser tan grande como la sección transversal del tubo principal, generando velocidades de flujo altas y variables en el tiempo.

La Fig. 1 ilustra un riser de venteo al final de una sección de un gasoducto. El flujo interno durante la descarga sónica desde el riser ocurre con baja velocidad en el tubo principal L y de diámetro D_s , velocidad moderada a lo largo de L_{s1} , velocidad sónica en la garganta de la válvula y mayormente velocidad supersónica a lo largo de L_{s2} y en la salida. Este patrón es característico de un riser de venteo típico con una válvula de tapón, cuya geometría se caracteriza por una relación del área efectiva transversal de la garganta y el riser de aproximadamente 0.6, y una relación L_{s2}/D_s menor a 10.

La precisión en la predicción del tiempo de venteo depende de una descripción adecuada del comportamiento termodinámico y dinámico del gas durante este estado transitorio. Factores como la relación longitud/diámetro, las características del riser, y la rugosidad del gasoducto principal

y del riser influyen en las pérdidas de presión. Aunque la literatura relacionada con la predicción del tiempo de venteo es relativamente escasa [6], existen numerosos estudios sobre transitorios lentos [7], [8] y rápidos [9], [10] en estos sistemas.

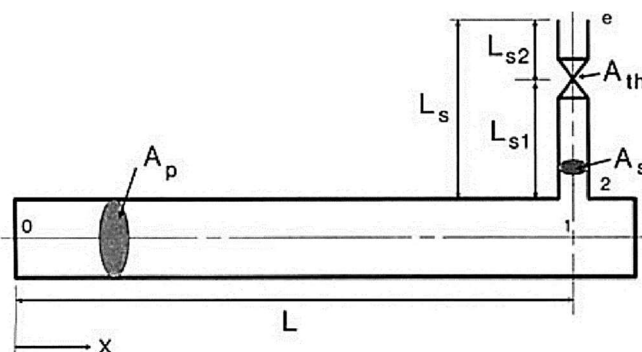


Fig. 1 Esquema típico de venteo de un gasoducto

Respecto a la dinámica del fluido, el gas acumulado en la sección de gasoducto a ventear se considera ya sea como un volumen con condiciones de estancamiento en su interior o como un tubo con velocidad que aumenta hacia la salida. Las soluciones de las ecuaciones pertinentes para cada modelo de venteo de gas se obtienen analíticamente con algunos parámetros de referencia de gas y numéricamente tomando en cuenta las propiedades reales del gas en cada paso de tiempo durante el venteo.

Respecto a las propiedades termodinámicas del fluido, la expansión del gas en el gasoducto principal se considera un proceso isotérmico debido a que el venteo más breve dura al menos un par de minutos, durante los cuales ocurre la transferencia de calor hacia el gas. La capacidad térmica del gasoducto y del suelo circundante asegura un flujo de calor suficiente para prevenir cambios significativos en la temperatura del gas. No obstante, durante la expansión isentrópica del gas en el riser, la temperatura del gas disminuye considerablemente, pero debido al tiempo de ocurrencia del fenómeno, la condensación no debería afectar el proceso de expansión y, por tanto, la tasa de flujo.

Con estas consideraciones técnicas, a continuación, se describirá la nomenclatura a emplear en la definición de los modelos dinámicos que se emplearán para la estimación del tiempo de venteo de gas natural.

α	Coefficiente de Transferencia de Calor
A_p	Área de la Tubería Principal
A_r	Relación de áreas
A_{th}	Área de la garganta de la válvula
A_w	Área de la pared
$a_{1,2,3}$	Funciones que dependen de la relación de áreas
c	Velocidad media del sonido
C_d	Coefficiente de descarga de la válvula
C_f	Factor de corrección de venteo

D	Diámetro de tubería principal
DN	Diámetro Nominal
d	Diámetro de la tubería de venteo
F _c	Factor de estrangulación
f	Factor de Fricción de Darcy
G	Flujo másico de gas
h	Entalpía específica
ID	Diámetro interior
IWT	Temperatura interior de la pared
k	Exponente isentrópico
L	Longitud de la tubería principal
M _{out}	Flujo másico de salida
m	Cantidad en moles
P	Presión instantánea
P _a	Presión atmosférica
P _i	Presión inicial
Q	Calor transferido
Q*	Calor transferido (inicial)
SpGr	Gravedad Específica
T	Temperatura
t	Tiempo
τ _c	Tiempo de venteo sónico adimensional
τ _s	Tiempo de venteo subsónico adimensional
τ _v	Constante de tiempo
U	Energía interna del fluido
V	Volume
Z	Factor de compresibilidad

Tapón lubricado regular	2.0
Tapon lubricado tipo venturi	3.2

Fuente: [4] Shashi Menon (2005)

B. Modelo I: AGA (American Gas Association)

De acuerdo con el modelo de la Asociación Americana de Gas (AGA), el tamaño del tubo necesario para el venteo de una sección del gasoducto se determina en función de la gravedad específica del gas, el diámetro del tubo, la longitud de la sección del tubo, la presión en el gasoducto y el tiempo de venteo [4]. En ese sentido, AGA sugiere emplear la siguiente ecuación para calcular el tiempo estimado de venteo en una sección de tubería:

$$t = \frac{0.0588P_i^{1/3} SpGr^{1/2} D^2 L F_c}{d^2}$$

Donde: F_c es el factor de estrangulamiento el cual se selecciona de acuerdo con el tipo de Boquilla/Válvula empleada durante el proceso de venteo y se determinará de acuerdo con la Tabla II:

TABLA II
FACTOR DE ESTRANGULAMIENTO

Boquilla/Válvula	Factor de estrangulamiento (F _c)
Boquilla ideal	1.0
Compuerta pasante	1.6
Compuerta regular	1.8

C. Modelo II: AGA versión mejorada

Galatro (2016) [11], a partir de un conjunto de simulaciones realizadas con modelos basados en procedimientos analíticos rigurosos, como el propuesto por Haque et al. (1992) [12], determina un modelo mejorado de AGA. Estos modelos integran de manera significativa los efectos de la mecánica de fluidos (flujo cuasi-estacionario para una fase), la transferencia de calor y masa, y una termodinámica rigurosa.

La ecuación mejorada AGA para la estimación de tiempos de venteo en gasoductos se presenta como sigue:

$$t = 0.762t_{AGA} + 59.104P_i^{-0.389}$$

En ese sentido, el algoritmo para estimar el tiempo de venteo en gasoductos se describe de la siguiente manera:

1. En primer lugar, se estima el tiempo de venteo utilizando la ecuación de AGA (Modelo I), definida como t_{AGA}
2. Se sustituye el valor de t_{AGA} en la ecuación AGA versión mejorada

D. Modelo III: Weiss et. al (1988)

Un modelo simplificado para predecir los tiempos de venteo en gasoductos fue desarrollado por Weiss et al. (1988) [5]. Según este método, el venteo de gas natural de una sección de tubería que va desde una alta presión hasta la presión atmosférica ocurre en dos etapas: una etapa de descarga sónica seguida de una etapa de descarga subsónica.

La descarga sónica tiene lugar en la etapa inicial durante la cual el flujo en la garganta de la válvula se encuentra estrangulado. En el transcurso del venteo, la presión en la tubería disminuye y el flujo en la garganta de la válvula permanece estrangulado hasta que la relación de presiones se vuelve menor que la crítica. Luego, el flujo permanecerá subsónico hasta que la presión en la tubería alcanza la presión atmosférica.

Los pasos involucrados en la estimación del tiempo de venteo son:

1. Determinar la velocidad media del sonido y el exponente isentrópico; calcular la constante de tiempo:

$$\tau_v = \frac{V \left(\frac{k+1}{2} \right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}}}{c A_{th} C_d}$$

$$c = \sqrt{\frac{ZkRT}{M}}$$

2. Calcular el tiempo de venteo sónico adimensional:

$$\tau_c = \ln\left(\frac{P_i}{P_a}\right) - \left(\frac{k}{k-1} \ln\left(\frac{k+1}{2}\right)\right)$$

3. Determinar el tiempo de venteo subsónico adimensional utilizando la Tabla III:

TABLA III
TIEMPO DE VENTEO SUBSÓNICO ADIMENSIONAL

k (Cp/Cv)	t _s
1.2	0.7371
1.25	0.7605
1.3	0.7833
1.35	0.8058
1.4	0.8278
1.45	0.8495
1.5	0.8707
1.55	0.8916
1.6	0.9122

Fuente: [5] Weiss et al. (1988)

4. Estimar el factor de corrección C_f:

$$C_f = a_1 + a_2 \log_{10}\left(\frac{fL}{D}\right) + a_3 \left[\log_{10}\left(\frac{fL}{D}\right)\right]^2 + a_4 \left[\log_{10}\left(\frac{fL}{D}\right)\right]^3$$

Donde a₁, a₂ y a₃ son funciones que dependen de la relación de áreas A_r:

$$A_r = \frac{A_p}{A_{th} C_d}$$

Para valores de A_r mayores de 3 y menores de 30 se consideran los siguientes coeficientes:

$$a_1 = 1.0319 - 5.2735 \left(\frac{1}{A_r}\right) + 25.680 \left(\frac{1}{A_r}\right)^2 - 38.409 \left(\frac{1}{A_r}\right)^3$$

$$a_2 = -0.26994 - 17.304 \left(\frac{1}{A_r}\right) + 86.415 \left(\frac{1}{A_r}\right)^2 - 144.77 \left(\frac{1}{A_r}\right)^3$$

$$a_3 = 0.24175 - 12.637 \left(\frac{1}{A_r}\right) + 56.772 \left(\frac{1}{A_r}\right)^2 - 88.351 \left(\frac{1}{A_r}\right)^3$$

$$a_4 = -0.054856 + 2.6258 \left(\frac{1}{A_r}\right) - 8.9593 \left(\frac{1}{A_r}\right)^2 + 12.139 \left(\frac{1}{A_r}\right)^3$$

5. Sumar los tiempos de venteo adimensionales y multiplicar por la constante de tiempo y el factor de corrección:

$$t = (t_c + t_s) \tau_v C_f$$

6. Incluir un aumento del 5% al cálculo del tiempo en el paso 5 para tener en cuenta las pérdidas de entrada y en el riser de venteo.

E. Modelo IV: Angulo (2020)

Basándose en ecuaciones establecidas para la medición de la masa de gas real y del flujo másico a través de una restricción antes de su liberación a la atmósfera, Angulo (2020) [13], desarrolla un modelo dinámico diseñado para ser resuelto de manera eficiente y directa, la cual es verificada mediante un modelo computacional creado a partir de estas mismas ecuaciones. Este modelo divide el cálculo en intervalos temporales breves para replicar de forma adecuada un fenómeno de flujo y presión que varían con el tiempo.

Para calcular el tiempo de venteo, el autor postula que el proceso hasta alcanzar la presión atmosférica comprende tanto un flujo en régimen sónico como uno en régimen subsónico, y que el tiempo total de venteo es la suma de los tiempos determinados para cada régimen.

Durante el flujo sónico, en la garganta del venteo la velocidad del gas alcanza la del sonido en ese medio, y el flujo se determina únicamente por la presión en la garganta. Por otro lado, en el flujo subsónico, la velocidad del gas en la garganta del venteo es inferior a la velocidad del sonido, y el flujo a través de la garganta se ve influenciado tanto por la presión del recipiente (P) como por la presión atmosférica (P_a). El tiempo total "t" desde una presión que genera un régimen crítico hasta alcanzar la presión atmosférica se calcula sumando los tiempos estimados para ambos regímenes (en segundos), resultando en la ecuación siguiente:

$$t = 0.03636 \frac{D^2 L}{C_d d^2 Z^{0.9}} \sqrt{\frac{SpGr}{T}} \left[\ln\left(\frac{1.2P}{P_a}\right) \right]$$

E. Modelo V: Pipeline Studio

El software comercial Pipeline Studio considera al venteo como un flujo tomado perpendicularmente a un área transversal A, donde el rate de descarga másica, w, se describe como:

$$w = \frac{dm}{dt} = v\rho A$$

Para el caso de fluidos compresibles, el área transversal generalmente está convergiendo/divergiendo, resultando en un área mínima en la vena contracta, A_c . Esta área también corresponde al punto de estrangulamiento. En el flujo estrangulado, el flujo másico de descarga es insensible a la presión aguas abajo. La velocidad en el punto de estrangulamiento es sónica (Mach 1) y, por lo tanto, conocida, pero el área, A_c , no se conoce. En tal sentido es necesario relacionar el rate de descarga con el área de liberación medible, A_{dis} . Esto se tiene en cuenta aplicando el coeficiente de descarga, C_D [14]:

$$w = A_{dis} C_D \rho v$$

Así, el coeficiente de descarga se define, efectivamente, como la relación del área transversal en el punto de estrangulamiento (vena contracta) por el área en el punto de descarga:

$$C_D = \frac{A_c}{A_{dis}}$$

Con estas consideraciones introducidas en un riguroso motor de cálculo, así como el modelo termodinámico y dinámico asociado a fluidos incompresibles (gas natural), el software estima la solución de la ecuación indicada en dos modalidades, implícita y explícita. La solución implícita resuelve un sistema de ecuaciones no lineales para las condiciones reales en el orificio, mientras que la solución explícita aproxima las condiciones de presión y temperatura en el orificio asumiendo un gas ideal. Luego, la densidad se calcula basada en estas condiciones asumidas.

III. RESULTADOS

Para realizar la comparativa de los resultados de cada modelo con datos empíricos de despresurización se tomará como referencia la ejecución de un venteo real de un gasoducto en Perú, el cual posee las siguientes características:

- Longitud de tubería: 31,161 m
- Diámetro interno de la tubería: 581 mm
- Fluido: Gas natural, gravedad específica de 0.6
- Presión inicial de la tubería: 7,891 kPa abs
- Temperatura inicial: 21 °C
- Exponente isentrópico: 1.283

- Diámetro interno de venteo: 76.2/114.3/165.1 mm
- Coeficiente de descarga de la válvula: 1
- Factor de fricción de Darcy: 0.011
- Presión atmosférica: 101.325 kPa abs
- Tiempo real de venteo: 375 min

El proceso de venteo real se realizó de manera controlada en 03 etapas de incremento del diámetro en el riser de venteo a través de la apertura progresiva de la válvula de tapón lubricado. Esta maniobra tuvo como finalidad la mitigación de los efectos drásticos de caída de temperatura (efecto Joule-Thompson), así como la minimización del ruido y/o posibles escenarios de jet fire en la instalación. Es importante indicar que, en condiciones sónicas, el gas se libera a la máxima velocidad posible a través de esta restricción, lo que podría generar un chorro de gas muy energético que, si encuentra una fuente de ignición, puede resultar en un incendio de chorro intenso y de alta velocidad. Las etapas consideradas se establecieron de la siguiente manera:

- 1era etapa: apertura a 3 in (hasta el minuto 150)
- 2da etapa: apertura a 4.5 in (hasta el minuto 240)
- 3era etapa: apertura a 6.5 in (hasta el final del venteo)

En base a los datos de entrada del evento de referencia se desarrollaron los modelos dinámicos de venteo (AGA, AGA mejorada, Weiss et. al. (1988), Angulo (2020) y Pipeline Studio), obteniéndose las gráficas comparativas indicadas en la Fig.2:

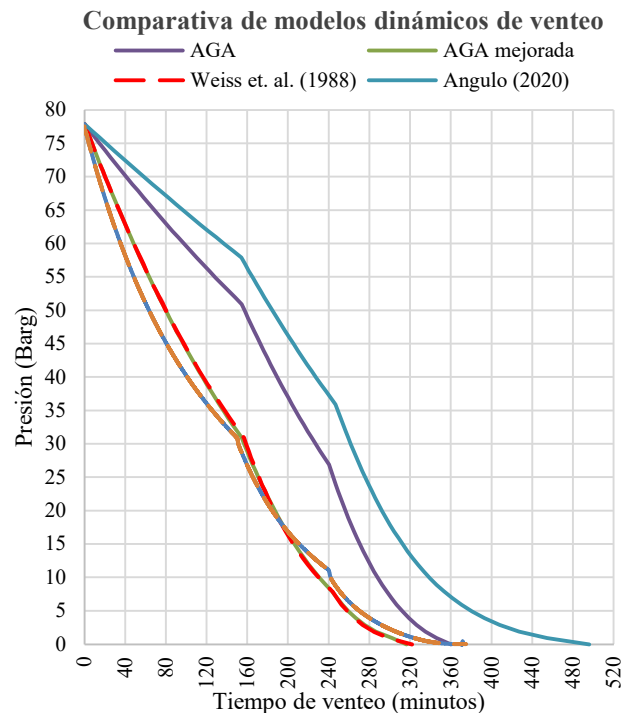


Fig. 2 Tendencia de caída de presión en función del tiempo para los diferentes modelos de venteo

TABLA IV
COMPARACIÓN DE TIEMPO DE VENTEO

Modelo	Tiempo de venteo, min	% Error
AGA	360	4%
AGA mejorada	316	15%
Weiss et.al. (1988)	321	14%
Angulo (2020)	496	-32%
Pipeline Studio	375	0.03%

Fuente: Elaboración propia

La Tabla IV muestra un análisis comparativo respecto a las desviaciones del tiempo de venteo total respecto del tiempo real de venteo. En ese sentido se puede observar que el modelo con mayor precisión será el realizado por el software comercial Pipeline Studio, no obstante, los modelos AGA, AGA mejorada y Weiss et. al.(1988) presentan también un error aceptable respecto a este parámetro (menor o igual al 15%). Por otro lado, el modelo dinámico de Angulo (2020) presenta una desviación de -32%. Por otro lado, la Tabla V muestra las desviaciones del perfil de presiones desarrollado en el tiempo en cada uno de los modelos respecto de la data real de venteo:

TABLA V
COMPARATIVA DEL PERFIL DE PRESIONES DESARROLLADO EN LOS MODELOS DINÁMICOS

DATA REAL	AGA	% Error	AGA mejorada	% Error	Weiss et. al. (1988)	% Error	Pipeline Studio	% Error
Presión (Barg)	Presión (Barg)		Presión (Barg)		Presión (Barg)		Presión (Barg)	
77.6	77.9	0%	77.9	0%	77.9	0%	77.9	0.4%
66.9	73.9	11%	69.9	5%	69.9	5%	66.9	0.0%
58.2	69.9	20%	62.9	8%	62.9	8%	58.2	0.0%
51.1	66.9	31%	55.9	9%	55.9	9%	51.1	0.0%
45.2	62.9	39%	49.9	11%	49.9	11%	45.2	0.0%
40.2	59.9	49%	43.9	9%	43.9	9%	40.2	0.0%
36.1	55.9	55%	38.9	8%	38.9	8%	36.1	0.0%
32.5	52.9	63%	33.9	4%	33.9	4%	32.5	0.0%
26.7	48.9	83%	28.9	8%	28.9	8%	26.7	0.1%
21.0	42.9	104%	21.9	4%	21.9	4%	21.0	0.1%
16.8	36.9	119%	15.9	5%	15.9	5%	16.8	0.0%
13.6	31.9	134%	12.9	5%	12.9	5%	13.6	0.1%
11.0	26.9	145%	8.9	19%	8.9	19%	11.0	0.3%
6.3	17.9	183%	5.9	6%	5.9	6%	6.3	0.1%
3.9	11.9	205%	3.9	0%	3.9	0%	3.9	0.1%
2.3	6.9	206%	1.9	15%	1.9	15%	2.3	0.3%
1.1	3.9	253%	0.9	18%	0.9	18%	1.1	0.2%
0.4	0.9	154%	0.4	11%	0.4	11%	0.4	0.3%
0.1	0.0	0%	0.1	10%	0.1	10%	0.1	0.0%
0.0	0.0	0%	0.0	0%	0.0	0%	0.0	0.0%

Fuente: Elaboración propia

Puesto que la desviación del modelo de Angulo (2020) supera el 300%, para fines prácticos se suprimen estos valores de error en la comparativa.

Desviaciones en el modelamiento dinámico de venteo

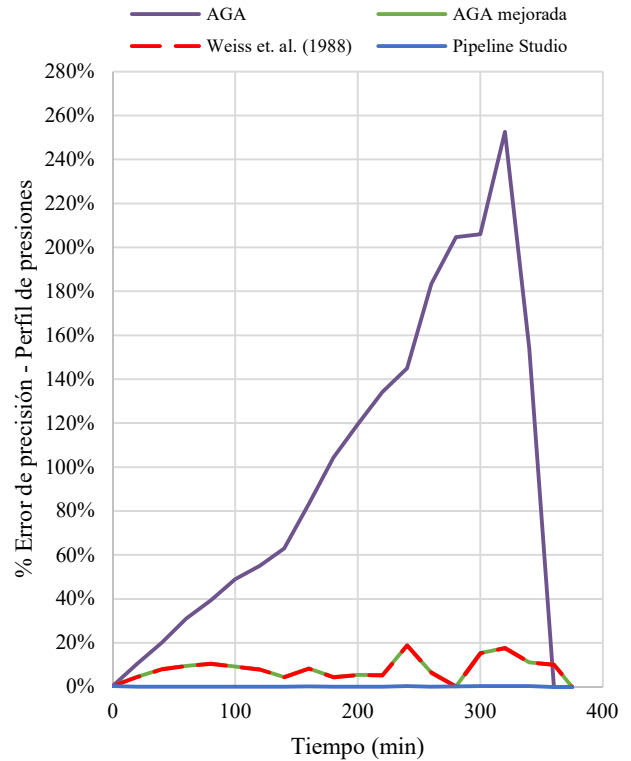


Fig. 3 Comportamiento del error de precisión para cada modelo dinámico de venteo

Del análisis realizado se puede determinar que, el modelo desarrollado por el software Pipeline Studio presenta errores ínfimos (menores a 0.3%) y por tanto una mayor precisión para la predicción de perfiles de presión durante el proceso de venteo, sin embargo, los modelos desarrollados por Weiss et.al. (1988) y AGA mejorado poseen márgenes de error aceptables durante el modelamiento (menores o iguales al 20%). No obstante, el modelo desarrollado por AGA, así como el modelo proporcionado por Angulo (2020), presentan desviaciones considerables para este tipo de predicción (mayores al 150%).

IV. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

El estudio realizado presenta una evaluación exhaustiva y detallada de cinco modelos dinámicos para la estimación de tiempos de venteo y análisis del comportamiento de la presión durante el proceso de despresurización en gasoductos de alta presión en Perú. La comparativa basada en datos empíricos de

un evento de venteo real ha permitido validar la precisión y aplicabilidad de los modelos en contextos reales.

Respecto a los modelos analizados, el implementado por el software comercial Pipeline Studio demostró la mayor precisión en la predicción de tiempos de venteo y perfiles de presión, con una desviación mínima respecto al evento de venteo real. Si bien este resultado era el esperado, debido a la fiabilidad, robustez y precisión del modelo basado en la integración de ecuaciones no lineales que gobiernan la mecánica de fluidos, transferencia de calor y masa, así como la termodinámica en el modelado de procesos de despresurización.

Los modelos AGA, tanto en su versión original como la mejorada, y el modelo de Weiss et. al. (1988), aunque presentan desviaciones mayores comparados con Pipeline Studio, ofrecen un margen de error aceptable (entre 15% y 20%) tanto para el modelamiento del tiempo de despresurización como el perfil de presiones desarrollado durante la dinámica del fenómeno de venteo. Estos resultados sugieren que, a pesar de su simplicidad relativa, estos modelos pueden proporcionar estimaciones razonablemente precisas y servir como herramientas útiles en situaciones donde el acceso a software especializado es limitado.

Por otro lado, el modelo desarrollado por Angulo (2020) mostró una desviación significativa en la predicción de tiempos y perfiles de presión durante el venteo, lo que subraya la necesidad de una revisión y ajuste del modelo para mejorar su precisión y confiabilidad.

Para el avance futuro en este campo de estudio, es esencial llevar a cabo una validación más amplia de los modelos existentes, comparando sus resultados con una variedad más amplia de eventos de venteo bajo diferentes condiciones operativas. Esto no solo ayudará a solidificar la base de validación, sino que también proporcionará una comprensión más profunda de las limitaciones y aplicabilidad de los modelos actuales. Además, se hace imperativo la mejora y ajuste de modelos como el desarrollado por Angulo (2020), que mostraron desviaciones significativas, mediante la incorporación de ajustes basados en un conjunto más amplio de datos experimentales y teniendo en cuenta factores como las variaciones en las propiedades del gas y las especificaciones de los gasoductos.

Por otro lado, la investigación debe extenderse hacia el desarrollo de nuevos modelos que integren más efectivamente los complejos fenómenos físicos asociados al proceso de despresurización. La adopción de técnicas avanzadas de modelamiento y discretización, así como la inteligencia artificial podría ser relevante para mejorar la precisión y fiabilidad de las predicciones.

Asimismo, la colaboración interdisciplinaria se presenta como un enfoque valioso, pues permitirá abordar de manera integral los desafíos relacionados con la gestión de gasoductos y los procesos de despresurización, fomentando la innovación

y el desarrollo de soluciones más eficientes y sostenibles que proporcionen avances en la investigación en este campo.

AGRADECIMIENTOS

El autor del presente trabajo agradece a la Universidad Nacional de Ingeniería y a la Unidad de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de Petróleo, Gas Natural y Petroquímica por las facilidades técnicas para el desarrollo de la presente publicación. Adicionalmente, un especial reconocimiento al Grupo de modelamiento matemático y simulación numérica (GMMNS) por el soporte académico y la motivación constante.

REFERENCIAS

- [1] Osinergmin, "La industria del gas natural en el Perú: A diez años del proyecto Camisea," 2014.
- [2] S. Richardson y G. Saville, "Blowdown of Pipelines," en Offshore Europe Conference, Aberdeen, 1991, doi: 10.2118/23070-MS.
- [3] Y. V. Fairuzov, "Blowdown of Pipelines Carrying Flashing Liquids," AIChE Journal, vol. 44, no. 2, pp. 245-254, 1998.
- [4] S. Menon, Transmission Pipeline Calculations and Simulations Manual, Gulf Professional Publishing, 2005.
- [5] M. Weiss, K. Botros, y W. Jungowski, "Simple Method Predicts Gas-line Blowdown Times," Oil and Gas Journal, vol. 86, no. 50, pp. 55-58, Dec. 1988.
- [6] R. J. Cradle, "Design of Gas Pipeline Blowdowns," Energy Processing Canada, pp. 15-20, Jan.-Feb. 1984.
- [7] A. Osiadacz, "Simulation of Transient Gas Flows in Networks," Int. Journal for Numerical Methods in Fluids, vol. 4, pp. 13-24, 1984.
- [8] V. L. Streeter y E. B. Wylie, "Natural Gas Pipeline Transients," SPE Paper No. 2555, Society of Petroleum Engineering, 1970.
- [9] R. Flatt, "Unsteady Compressible Flow in Long Pipelines following a Rupture," Int. Journal for Numerical Methods in Fluids, vol. 6, pp. 83-100, 1986.
- [10] J. S. Cronje, P. R. Bishnoi, y W. Y. Svrcek, "The Application of the Characteristic Method to Shock Tube Data that Simulate a Gas Pipeline Rupture," Can. J. Chem. Eng., vol. 58, pp. 289-294, 1980.
- [11] D. Galatro, "Considerations for Gas Pipeline Blowdown," in Volume 3: Operations, Monitoring and Maintenance; Materials and Joining, 26 Sept. 2016, doi: 10.1115/ijpc2016-64210.
- [12] M. Haque, G. Richardson, y G. Saville, "Blowdown of Pressure Vessels – I: Computer Model," Trans. I. Chem. E. part B: Process Safety Environmental Protection, vol. 70, pp. 3-9, 1992.
- [13] M. Angulo Bustillo, "Cálculo Del Tiempo de Venteo de Gas de Un Gasoducto," MET&FLU Ciencia-Tecnología-Innovación, ISSN 2145-5716, Dec. 2020.
- [14] J. L. Woodward, "Source Modeling – Discharge Rates," Reference Module in Chemistry, Molecular Sciences and Chemical Engineering, 2014, doi: 10.1016/b978-0-12-409547-2.10792-9.