

RECIBIDO EL 24 DE AGOSTO DE 2021 - ACEPTADO EL 23 DE NOVIEMBRE DE 2021

EFECTO DEL MODELO DE LA ECUACIÓN DE ESTADO EN LOS CÁLCULOS DE DESEMPEÑO DE COMPRESORES ALTERNATIVOS EN ALTA PRESIÓN

EFFECT OF THE EQUATION OF STATE MODEL IN THE PERFORMANCE CALCULATIONS OF RECIPROCATING COMPRESSORS IN HIGH PRESSURE

Mawency Vergel Ortega.

Universidad Francisco de Paula Santander

Carlos Sebastián Gómez Vergel

Universidad Simón Bolívar

Esteban Rogelio Gómez Vergel

Universidad Francisco de Paula Santander

RESUMEN

Un proceso de compresión, consiste en incrementar la presión de un fluido (gas o líquido) a través del intercambio de energía desde un medio externo, con el objetivo de tener los valores requeridos por un proceso en una planta. Esto se hace para crear reacciones químicas, estabilizar procesos, etc en plantas de generación de energía, refinerías, petroquímicas,

siderúrgicas, y otras. La investigación de tipo documental y descriptivo analiza el efecto del modelo de la ecuación de estado en cálculo de desempeño de compresores alternativos de alta presión. Se concluye que El conocimiento de los modelos de compresión de los gases reales permite entender el comportamiento termodinámico de los mismos y establecer un punto de comparación para diagnosticar la condición mecánica de los equipos.

ABSTRACT

compression process consists of increasing the pressure of a fluid (gas or liquid) through the exchange of energy from an external medium, with the aim of having the values required by a process in a plant. This is done to create chemical

reactions, stabilize processes, etc. in power generation plants, refineries, petrochemicals, iron and steel, and others. The documentary and descriptive research analyzes the effect of the equation of state model in calculating the performance of high pressure reciprocating compressors. It is concluded that Knowledge of the compression models of real gases allows us to understand their thermodynamic behavior and establish a point of comparison to diagnose the mechanical condition of the equipment.

INTRODUCCIÓN

Desde el siglo XVI se han tratado de crear modelos para entender el comportamiento de los gases en la naturaleza, y para esto se hicieron ensayos en laboratorio para reproducir experimentos que permitieran replicar las condiciones y hacer estudios controlados. El gas más estudiado es el aire cuya composición de 78% de N₂ y 21% de O₂ mas otros componentes es abundante en nuestro planeta y no es tóxico si ocurre una o accidental del mismo, hasta gases altamente tóxicos como el Cloro (Cl₂) o altamente explosivos como el Hidrogeno (H₂) o los hidrocarburos, asfixiantes con el Nitrogeno (N₂) o el dióxido de Carbono (CO₂) o el monóxido de Carbono (CO). En 1662 Robert Boyle estudio el comportamiento de los gases a temperatura controlada o procesos Isotérmicos y determinó la expresión (Van der Waals, 1967):

$$Pv = cte \quad (1)$$

En este experimento Boyle encontró una relación entre presión y el volumen y se podría describir “en un sistema cerrado, el volumen es inversamente proporcional a la presión del gas”. Luego en 1787 Jacques Charles y posteriormente Gay Lussac hicieron experimentos con los gases conocidos y su trabajo se basó en mantener constante la presión, llamados procesos isobáricos (Andrews, 1869). Ellos establecieron la siguiente propiedad de los gases en estudio.

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \quad (2)$$

Esto significa que el volumen del gas en un proceso isobárico es directamente proporcional a la temperatura. Cabe anotar en este punto que tanto las temperaturas como la presiones son mediciones absolutas, no se admiten mediciones relativas, porque ésta llevaría a errores y permitirían la división entre cero. En 1834 Emile Clayperon estableció la ley universal de los gases ideales (Salzman, 2004), combinando la ley de Charles y la ley de Boyle (Tambien estan los estudios de Amontom, que se basaron en procesos isotermicos). Se encontró un equilibrio entre presión, temperatura y Volumen, es decir, que las condiciones de los gases son funciones de (P, V, T) y esta relación es:

$$PV = RT \quad (3)$$

Donde P es la presión del gas, V es el volumen de Control, T es la temperatura absoluta, R es la constante universal de los gases Ideales (algunos autores la describen con R₀) R = 8.2057 m³·atm/mol·K. (Clerk-Maxwell, 1875). Hasta aquí, todo estaría resuelto, porque fueron trabajos en laboratorio, con condiciones controladas, cambios de temperatura, presión y volumen muy lentos, en los cuales casi no había perdidas

RESULTADOS

Análisis de una situación real, como se muestra en la figura 1 permite observar que en menos de 1/5 de segundo ocurre un cambio en la presión superior a 1500 psig pp (pico a pico), es decir, mas de 100 bar en el cambio de presión desde el nivel de succión hasta el nivel descarga, esto significa que el proceso se hace muy rápido y ocurre casi 5 veces en un segundo.

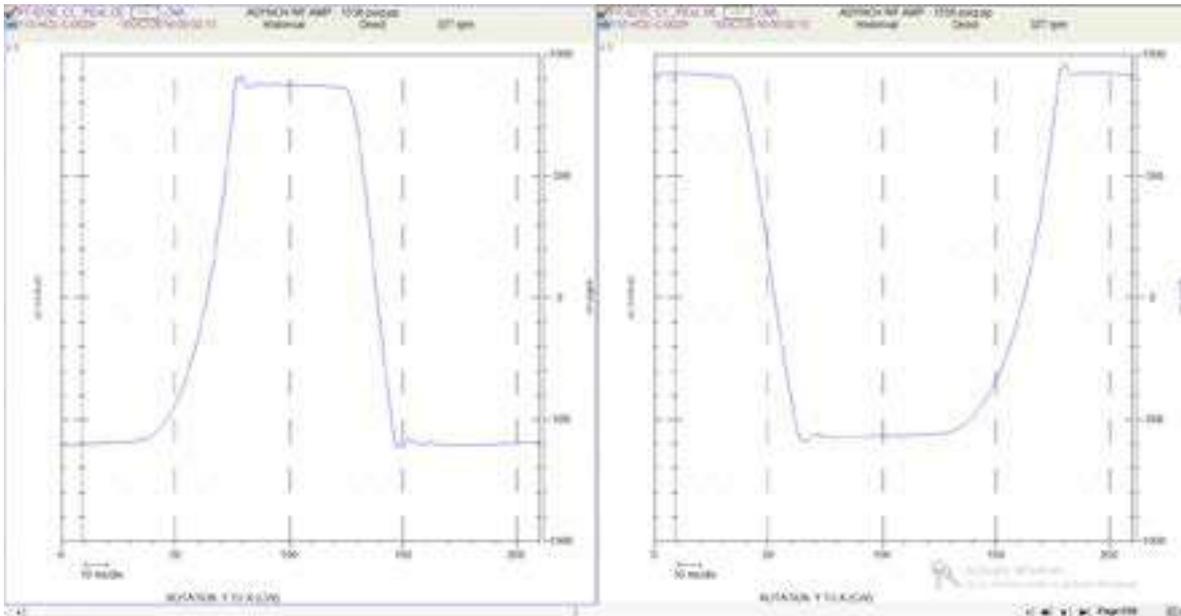


Figura 1. Proceso de compresión de un compresor alternativo que eleva la presión hasta 2500 psig.

Fuente: Autores

Este análisis lleva a considerar que el tratamiento de los gases ideales no es una buena aproximación al proceso real, ya que, es demasiado perfecto o eficiente para poderse aplicar en la industria. En 1873 Van der Waals (Kittel, Carlos; Kroemer, Herbert, 1980). crea un primer modelo aproximado a los gases reales y genera una ecuación (Van Van Wylen, Sonntag y Borgnakke, 1994), de la forma:

$$\left(p + \frac{a}{V_m^2}\right)(V_m - b) = RT \quad (4)$$

Donde

$$\begin{aligned} a &= 3p_c V_c^2 \\ b &= \frac{V_c}{3} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} a &= \frac{27(RT_c)^2}{64p_c} \\ b &= \frac{RT_c}{8p_c} \end{aligned}$$

Esta primera aproximación generó un gran avance en los cálculos de desempeño y permitió hacer cálculos del trabajo en locomotoras y máquinas de vapor con una mejor precisión, pero los valores de presión alcanzados, estaban muy lejos de los valores que se manejan hoy en día en la industria.

En la figura 2 se muestran los diagramas de Presión vs el ángulo de giro del cigüeñal y presión volumen de las cámaras de lado cabeza (Head End) en inglés en color naranja y lado ciguenal (Crank End) donde se puede observar claramente que este compresor que comprime Hidrogeno con un 99.999% de pureza sube la presión desde 1200 psig hasta casi 2700 psig. Este proceso de compresión se hace 327 veces por cada minuto, como se puede observar en el dato de velocidad de rotación del cigüeñal.

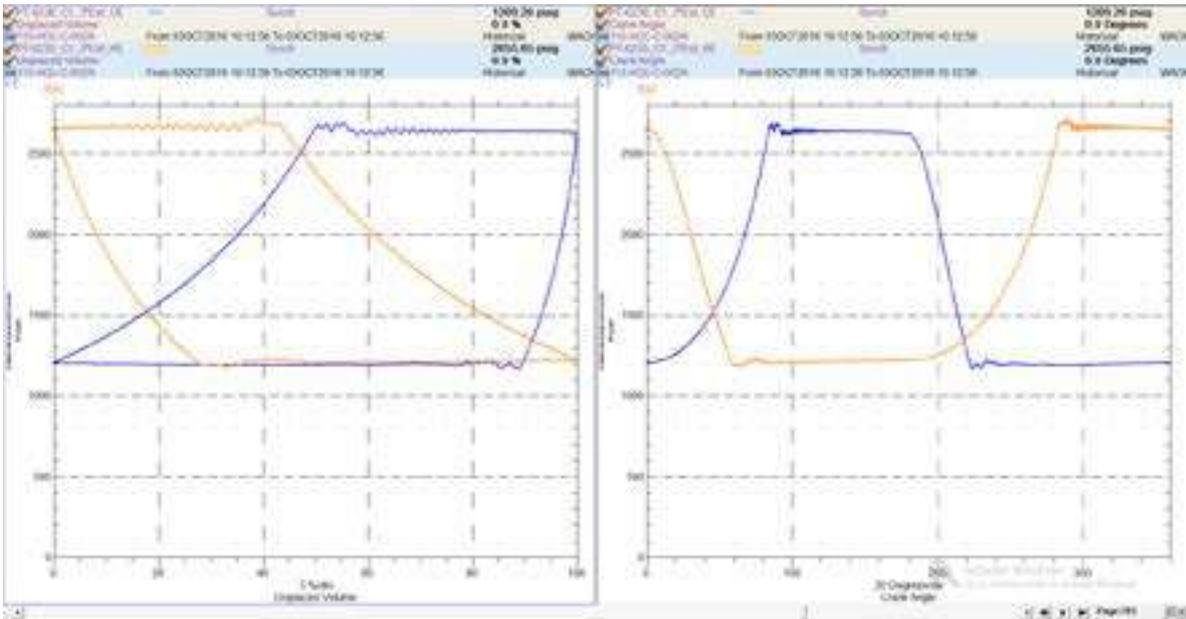


Figura 2. Diagrama de las cámaras de compresión de los lados HE y CE (por sus siglas en inglés) de la tercera etapa de un compresor alternativo de Hidrógeno vs Volumen desplazado a la izquierda y giro del cigüeñal a la derecha. Fuente: Autores

Estos procesos de compresión solo pueden entenderse si se hace una comparación con un modelo de gas que se adapte a las condiciones del proceso y que incluya las pérdidas por fricción, calentamiento del gas, procesos de enfriamiento del cilindro y otros procesos termodinámicos menores que afectan en desempeño, y el objetivo es determinar desviaciones en el mismo, para conocer componentes que estén en falla.

En la figura 3 se muestra una comparación entre el proceso real y tres modelos de ecuación de estado, para entender estos mecanismos de compresión y permitir hacer un análisis de la condición del proceso termodinámico y mecánico de los componentes de cada cámara de compresor y del cilindro como un todo.

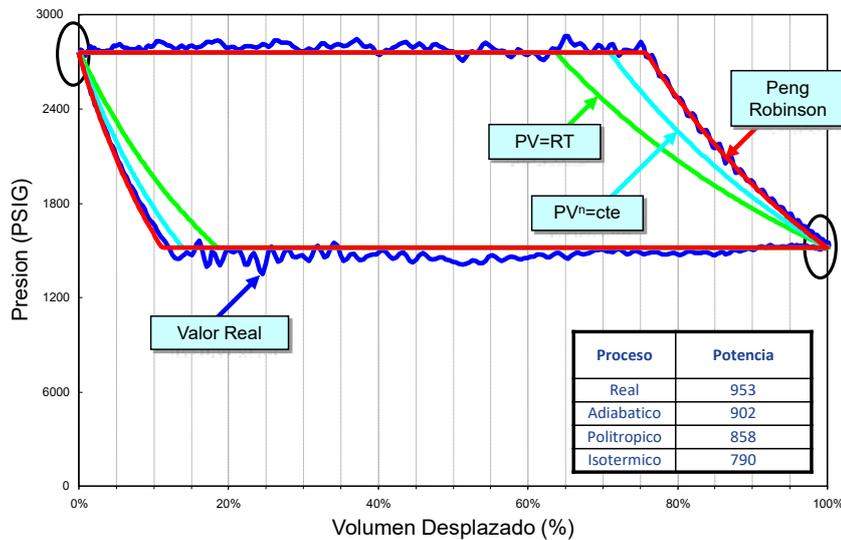


Figura 3. Diagrama de Presion vs Volumen desplazado del compresor mostrando los valores de comparación de la potencia consumida entre el valor real y tres modelos propuestos. Fuente: Autores

Como se muestra en la figura 3, el uso del modelo correcto, hace que la diferencia entre la medición real y el modelo se amplíe o disminuya, lo cual indica que, si se usa como comparación los gases ideales, la desviación en este caso fue del 15% a favor del proceso Isotérmico o $PV=RT$ (Cross, 2004), en el caso de la suposición politrópica (Van Van Wylen, Sonntag y Borgnakke, 1994):

$$Pv^n = cte \quad (6)$$

Donde n es el coeficiente politrópico ideal de compresión, el error fue del 10% a favor del proceso politrópico y en el caso de la suposición adiabática usando el modelo de Peng Robinson, el error fue del 5.3% muy acorde al proceso de compresión real. Acorde a Peng Robinson, este modelo está basado en lo siguiente:

$$P = \frac{RT}{V_m - b} - \frac{a\alpha}{V_m^2 + 2bV_m - b^2}$$

$$a = \frac{0.457235 R^2 T_c^2}{P_c}$$

$$b = \frac{0.077796 RT_c}{P_c}$$

$$\alpha = \left(1 + \kappa \left(1 - T_r^{0.5}\right)\right)^2$$

$$\kappa = 0.37464 + 1.54226\omega - 0.26992\omega^2$$

$$T_r = \frac{T}{T_c}$$

En forma polinomial queda

$$A = \frac{ap}{R^2 T^2}$$

$$B = \frac{bp}{RT}$$

$$Z^3 - (1 - B) Z^2 + (A - 2B - 3B^2) Z - (AB - B^2 - B^3) \quad (7)$$

Como se puede observar, hay una complejidad en los cálculos del modelo matemático de Peng Robinson, el cual fue publicado apenas en 1976, tres siglos después de los experimentos de Charles. Esto debido a los avances de la tecnología y la comprensión de los procesos que permitió desde la segunda mitad del siglo

XX, incrementar las presiones de los procesos para extraer nuevos productos como el polietileno de baja densidad, que requiere que el etileno sea presurizado hasta las increíbles presiones de 3500 bar para luego hacer una expansión súbita para formar las cadenas largas de Etileno, incrementos en las presiones de vapor de calderas y generadores nucleares para las turbinas de Ultra Alta Presión y potencias superiores a 1 GW, procesos en refinería para el manejo de bitumen y arenas aceitosas para sacar derivados del petróleo a partir de ellos.

Hay muchos modelos que se adaptan a diferentes gases y cada vez salen nuevas tecnologías que permiten hacer cálculos teóricos muy ajustados a la realidad de los procesos de los gases industriales, como mezclas, combustión, reacciones químicas primarias y secundarias, eliminaciones de polucionantes como el NO_x o SO_x , causantes de la lluvia ácida.

Esta compresión de los procesos permite hacer unos mejores cálculos de las máquinas y de los procesos para garantizar la seguridad de las personas, del medio ambiente y de los equipos como tales, y permiten optimizar las dimensiones de los mismos, para disminuir el impacto sobre los recursos no renovables.

CONCLUSIONES.

El conocimiento de los modelos de compresión de los gases reales permite entender el comportamiento termodinámico de los mismos y establecer un punto de comparación para diagnosticar la condición mecánica de los equipos.

El uso de los modelos permite mejorar los diseños de los equipos e incrementar la seguridad de las personas, el ambiente y de los equipos e incrementan el ahorro energético.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Montero, J. Tratado Moderno de termodinámica. S.c: Baehr.
- Andrews, T. (1869). "*The Bakerian Lecture: On the Gaseous State of Matter*". *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. **159**: 575–590. doi:10.1098/rstl.1869.0021.
- Clerk-Maxwell, J. (1875). "*Sobre la evidencia dinámica de la constitución molecular de los cuerpos*". *Naturaleza*. **11** (279): 357–359. Bibcode:1875Natur...11..357C. doi:10.1038/011357a0. ISSN 0028-0836.
- Cross, Michael (2004), "Lecture 3: First Order Phase Transitions" (PDF), Physics 127: Statistical Physics, Second Term, Pasadena, California: Division of Physics, Mathematics, and Astronomy, California Institute of Technology.
- Dermikan Rivera Salamanca C Análisis de interacción torsionales subsíncronas en sistemas de potencia con compensación serie y paralelo (México: Universidad Nacional Autónoma de México)
- H, Spoher J & Krishna V 2011 Service System Implementation (New York: Springer Publishing)
- Kittel, Carlos; Kroemer, Herbert (1980). *Física térmica (edición revisada)*. Nueva York: Macmillan. págs. 287-295. ISBN 0716710889.
- Ortega-Sierra A, Vergel-Ortega, M y Rojas-Suárez J P 2019 Microenseñanza en cálculo vectorial: su impacto desde un enfoque basado en competencias (Bogotá: Ecoe Ediciones)
- Soave, Giorgio (1972). "Constantes de equilibrio de una ecuación de estado de Redlich-Kwong modificada". *Ciencias de la Ingeniería Química*. **27** (6): 1197–1203. doi:10.1016/0009-2509(72)80096-4.
- Salzman, W. R. (2004). *Constantes críticas del gas de Van der Waals*. Termodinámica química. Departamento de Astronomía, Universidad Estatal de Arizona.
- Van der Waals, J. D. (1967) The equation of state for gases and liquids: Nobel Lecture, December 12, 1910» (PDF). *Nobel Lectures, Physics 1901–1921*. Amsterdam: Elsevier Publishing Company. 254–265
- Van Wylen, G; Sonntag, R. y Borgnakke, C. (1994) Fundamentals of Classical Thermodynamics. England: Jon Wiley and Son, 4th Edition
- Peláez M 2013 Dimensions of rules and their correspondence to rule-governed behavior European Journal of Behavior Analysis 14 259
- Yu Y 2010 Electric Power System Dynamics (USA: Editorial Academic press)