

DISEÑO DE UNA VALVULA DE LLENADO PARA UNA LLENADORA ROTATIVA PARA EMBOTELLADO DE AGUA NATURAL SIN GAS

Richard Lavayen Garcia¹, Ernesto Martinez²

¹Egresado de Ingeniero en Mecánica. Escuela Superior Politécnica del Litoral 1992.

²Director de Tesis. Ingeniero en Mecánica. Escuela Superior Politécnica del Litoral 1983 , Profesor de la ESPOL desde 1983

RESUMEN

El constante crecimiento que se observa en el mercado del consumo de agua embotellada ha venido acompañado de un significativo aumento en la aparición de plantas embotelladoras de agua, muchas de las cuales realizan el trabajo de embotellado del agua de forma artesanal, recurriendo muchas veces a la utilización de grifos de agua domiciliarios para realizar ésta labor.

Mediante el presente trabajo se ha diseñado una válvula de llenado haciendo uso de las herramientas técnicas del diseño mecánico,. Como el diseño de forma y la mecánica de los fluidos para evaluar su operación. Adicionalmente al modelo matemático usado para evaluar la válvula, se construyen dos válvula parecidas en su operación y se evalúa una de ellas en base a las expectativas impuestas por el modelo matemático.

INTRODUCCIÓN

El negocio del agua natural sin gas embotellada Ecuador, nace en Guayaquil alrededor de mediados de la década de los 80 con la primera planta industrial AGUA CRISTAL. Esta planta embotelladora sale inicialmente al mercado con envases de 5Lt. vidrio y posteriormente con envases en diferentes presentaciones como lo es el envase de 500 cc. Con el paso del tiempo y debido a los numerosos problemas de potabilización y distribución del agua potable comienza el crecimiento descontrolado de las plantas embotelladoras de agua algunas de las cuales realizan la operación de embotellado de manera artesanal.

Esta situación presenta dos problemas una baja producción por los equipos de embotellado y el riesgo de contaminación del producto,

debido a la manipulación del mismo en el proceso de embotellado lo que conlleva un alto riesgo para el consumidor final. De modo que para darle atención a éste problema se procede al desarrollo, diseño y construcción de una válvula de llenado que permita tener la seguridad de no contaminar el producto y responder mas rápidamente a la demanda creciente de producto.

CONTENIDO

Para tener un entendimiento más cabal del funcionamiento de las válvulas de llenado, es conveniente detallar su función por medio de la maquina que la opera, en éste caso una llenadora rotativa.

Llenadora Rotativa.

Son aquellas en las que la alimentación de los envases, las válvulas de llenado y al operación de envasado se lo realiza en sistema tipo carrusel; para lo cual se utiliza un sistema de estrellas de alimentación y salida de envases las cuales van sincronizadas al tanque porta-válvulas de llenado. Estas llenadoras generalmente son automáticas en su operación.

La Llenadora Rotativa y sus Partes.

La llenadora rotativa consta de algunas partes principales las cuales se las puede agrupar en los diferentes sistemas de operación.

- Sistema de llenado
- Sistema de transferencia
- Sistema de alimentación
- Sistema estructural
- Sistema de elevación del tanque
- Sistema de elevadores de botella
- Sistema de transmisión

Sistema de llenado.

El sistema de llenado esta constituido básicamente por:

- El tanque de llenado
- El sistema de control de nivel del tanque
- La válvula de llenado.

La válvula de llenado.

Son elementos que impiden o limitan la salida de un líquido hasta que por algún medio mecánico, neumático o eléctrico se abre para dar paso a la salida del mismo.

En el mercado existen diferentes tipos de válvulas de llenado, las mismas que tienen diferentes formas y operación; según el tipo de producto que van retener o manejar.

Las válvulas en el mercado de los refrescos se las puede dividir en dos grandes grupos:

- Válvulas operadas por presión
- Válvulas operadas por gravedad

Válvulas operadas por presión y su operación.- Estas válvulas son usadas generalmente en la elaboración de refrescos y/o bebidas gasificadas, para ello se utiliza CO₂ como elemento gasificador el mismo que ayuda a mantener la contrapresión dentro del tanque de llenado de la máquina llenadora.

El proceso completo de llenado de las botellas en cuatro pasos:

1). Carga con gas ;2). Llenado ;3). Cierre de la válvula ;4). Alivio

Paso 1

Esto ocurre, cuando la palanca accionadora de la válvula gira, y el movimiento resultante es transferido a la palanca interna de la válvula de carga en la válvula de llenado. Entonces, aire o CO₂ de la parte alta del tanque fluye dentro de la botella, cargándola o introduciéndole presión por medio del tubo de venteo. Ver Fig.1

Paso 2

Mientras se establece la contrapresión y antes de que empiece el llenado, la leva neutral mueve la palanca accionadora de la válvula a la posición neutral. Esto permite que la válvula de carga se cierre automáticamente en caso de escape en una botella, o que esta explote y evite la pérdida de presión en el tanque. También se evita la pérdida de producto, ya que la válvula de líquido se cierra de forma automática cuando se pierde la contrapresión en la botella. Ver Fig.1

Paso 3

Conforme el nivel de líquido sobrepasa la ranura en el tubo de venteo, éste obstruye el flujo de contrapresión que retorna al tanque a través de ésta ranura. La presión en el espacio superior es ligeramente mayor, en este momento, que la presión en el tanque; causando que el resorte de la válvula secundaria eleve la válvula secundaria, detenido así el flujo del líquido. Ver Fig.1

Paso 4

La palanca externa de la válvula se mueve hacia la posición de cierre por medio de un obturador de válvula de dos secciones. Esta acción cierra tanto la válvula de líquido como las de carga. La presión de la parte superior de la botella escapa a la atmósfera conforme el botón de alivio en la válvula de llenado entra en contacto con la leva de alivio asegurada al cerrador de la segunda válvula. Ver Fig.1

Válvula operadas por gravedad.- A diferencia de las anteriores, éstas válvulas generalmente el tanque es abierto y el líquido en su interior se encuentra a presión atmosférica. Los tanques son generalmente de perfil alto para que el agua almacenada en su interior mantenga un elevado diferencial o cabezal piezométrico con relación a la posición de la válvula de llenado.

El proceso de operación de la válvula se lo puede detallar familiarizándose con los elementos que la componen.

- A.- Un cuerpo o carcasa. El cual debe ser capaz de resistir las fuerzas y presiones internas que se producen al paso de un fluido por su interior. Además de marcar el camino por donde debe ir el fluido debe ser capaz de mantener los elementos internos o componentes de la válvula.

- B.- Un elemento de cierre móvil. Éste elemento restringe o permite el paso de un fluido y puede tener forma de disco, cono truncado, bola, etc.

- C.- Un actuador del elemento de cierre. Éste elemento generalmente externo es el que permite girar, mover o desplazar el elemento de cierre. En las diferentes formas que tenga debe llevar un elemento de sello adecuado que no permita la fuga del fluido.

- D.- Un elemento de rebose. Éste elemento interno permite el desalojar primero el aire y luego el líquido en exceso que se derramaría del envase.

- E.- Una tuerca de montaje. La cual permite la fijación y sellado de la válvula en el fondo del tanque. Ver Fig.2

Operación de la válvula.

La válvula ha desarrollado es uno de los modelos más sencillos que se puedan producir y a semejanza de la operación de otros modelos ya existentes en el mercado. Debido a que el tipo de llenado es por gravedad el fluido saldrá a través de la válvula por la diferencia del cabezal estático del fluido que se halla aguas arriba.

La operación es sencilla, consiste en aplicar una fuerza ascendente en **C.**, la misma que vence la fuerza del resorte el mismo que al perder su equilibrio permite que se levante **C.** Después que **C.** Se mueve hacia arriba deslizándose por el interior de **A.** ; como la válvula esta normalmente inundada de agua al abrirse en su totalidad y como la presión a la salida de la válvula es igual a la presión del agua en el tanque de llenado, el fluido saldrá hasta llenar el envase que se encuentra en la parte inferior. Pero al producirse el ingreso del fluido éste tiende a desplazar el aire que se encuentra al interior del envase y a ocupar el volumen que éste deja libre de manera que para que se alcance el nivel de liquido deseado éste aire debe eliminarse y esto se logra al salir por el agujero inferior de **B.** , el que es comunica con el tubo de venteo. Cuando se elimina la fuerza ascendente el resorte comienza a recuperar su posición original de extensión y el elemento **C.** Se desplaza hacia abajo por el interior del cuerpo **A.**, hasta cerrar y aplastar el sello que se encuentra en **B.**, y el fluido deja de salir.

Diseño de la válvula.

Para el diseño de la válvula, se toma como base el diseño geométrico del Plano 8; con esas dimensiones iniciales, se determina de forma teórica el caudal neto que maneja la válvula y posteriormente de forma experimental el caudal real que es posible obtener de cada válvula evaluando las pérdidas que se presentan.

Caudal de la válvula.

Para encontrar el caudal neto de la válvula, se parte teniendo presente el valor del volumen estimado de producción de la llenadora.

$$\mathbf{VePrd = 240 \text{ BPM}}$$

Mediante el uso de la fórmula (1) se calcula el **caudal estimado** de llenado (**Qef**) .

$$\mathbf{Qef = VePrd * V_B \quad (1)}$$

De donde:

Qef : Caudal estimado de llenado

VePrd : Volumen estimado de producción.

V_B : Volumen del envase o botella a llenar.

* Como valor conservador de volumen de envase se toma medio lt. ó 500cc. Haciendo uso de la fórmula 1 se tiene :

$$\mathbf{Qef = 240 \text{ min} * 500\text{cc} ; \quad \mathbf{Qef = 120 \times 10^3 \text{cc. min}}$$

Ahora se procede a determinar el **caudal neto de llenado Qn**, que es el que determina cuanto caudal de líquido se debe manejar para el ángulo neto de llenado θ_N .

El ángulo neto de llenado corresponde al espacio real en el cual las válvulas se abren al 100 % y permiten que el fluido ingrese en el envase. Este valor se lo obtiene de la tabla 9 del diseño geométrico de la leva de pistones . Para este caso se tiene :

$$\mathbf{\theta_N = 4 \pi / 3}$$

De manera que el caudal neto se lo puede hallar por medio de la Fórmula (2). La cual relaciona el caudal efectivo con el neto

$$\mathbf{Qef * \theta_{ef} = Q_N * \theta_N \quad (2)}$$

Donde :

$$\mathbf{\theta_{ef} : 2 \pi \quad \text{y} \quad Qef : 120 \text{ lt / min.}}$$

Por tanto, la fórmula 2 quedará como la formula 3 de la siguiente forma:

$$Q_N = Q_{ef} * (2\pi / \theta_N) \quad (3)$$

Haciendo uso de la Formula 41 se calcula el caudal neto.

$$Q_N = 120 * (2\pi / (4\pi / 3)) ; \quad Q_N = 180 \text{ lt/min.}$$

El caudal neto unitario o por válvula Q_{NU} , se lo obtiene dividiendo el caudal neto para el número de válvulas. Formula 4

$$Q_{NU} = Q_N / N \quad (4)$$

Se procede a calcular el caudal neto unitario para una llenadora de 24 valvulas.

$$Q_{NU} = 120 \text{ lt/min} / 24 ; \quad Q_{NU} = 7.5 \text{ lt / min} ; \quad Q_{NU} = 1.25 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{seg}$$

Ahora, este caudal neto que sale por el tubo de la válvula es producto de un diferencial del nivel de líquido que hay en el tanque de llenado. Es decir, que el fluido que sale de la válvula con ese caudal neto lo logra gracias al cabezal piezométrico que se produce en el tanque.

Para determinar el nivel de agua en el tanque de modo de produzca este cabezal, se debe disponer de un modelo parecido que implique un tanque con agua el cual tiene en el fondo un tubo con contracción. Ver Figura 3.

Para resolver este problema, Fox y Mc. Donnal propone el uso de la ecuación de Bernulli entre los puntos 1 y 2 . Fórmula 5.

$$[(P_1 / \rho_1) + (\alpha_1 * V_1^2 / 2) + g z_1] - [(P_2 / \rho_2) + (\alpha_2 * V_2^2 / 2) + g z_2] = h_{lm} \quad (5)$$

Consideraciones:

- Flujo incompresible. - $V_1 = 0$ en el punto 1
- $Z_2 = 0$ en el nivel inferior - $P_1 = P_2 = P \text{ atm.}$
- $\alpha_2 = 1$

Por tanto la Formula 5 quedará como la Formula 6.

$$g z_1 - (V_2^2 / 2) = h_{lm} \quad (6)$$

Donde h_{lm} son pérdidas menores

Las pérdidas menores en general se representan por la fórmula 7. Fox & McDonal. Pag 367 (8.30 a).

$$h_{lm} = K * (V^2 / 2) \quad (7)$$

Si se reemplaza la Fórmula 7 en la Fórmula 6, se tiene la fórmula 8. como sigue:

$$Z_1 = (V_2^2 / 2g) * (K + 1) \quad (8)$$

Haciendo uso de la fórmula 9 se puede determinar la velocidad del fluido a la salida de la válvula. Esto es:

$$Q = V \times A \quad (9)$$

Donde :

Q : Caudal ; V : Velocidad del fluido; A : Área que cruza el fluido

El área transversal del tubo de la válvula es la que resulta de restar el área de un círculo con el área de un triángulo que es el elemento centrador y de apoyo del tubo de venteo.

$$A = 1.4 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

Puesto que el caudal neto se conoce y el área de la sección transversal de la válvula también, se puede hallar la velocidad del fluido, haciendo uso de la fórmula 47.

$$Q = V \times A ; V = 5 \times 10^{-4} / 1.4 \times 10^{-4} ; V = 3.57 \text{ m/seg}$$

Con éste valor de velocidad de fluido se recurre a la fórmula 8, para obtener el valor del cabezal piezométrico.

$$Z_1 = (V_2^2 / 2g) * (K + 1) \\ Z_1 = [(3.57)^2 / (2 * 9.8)] * (0.04 + 1)$$

Del libro de Fox & McDonald. Pag 371 . Tabla 8.2 se obtiene el valor de $K = 0.04$. Este es un valor que se asume con el propósito de resolver la ecuación ya que no existe el valor de K para el caso de ésta válvula. Por tanto el cabezal piezométrico quedará como:

$$Z_1 = 0.67 \text{ m}; H' = Z_1 - L_{\text{val}}; H' = 670 - 266; H' = 444 \text{ mm}$$

Por las limitaciones de espacio no se puede cambiar la altura del tanque como tampoco se puede aumentar el diámetro del tubo de salida de la válvula.

Por esta razón se debe establecer el caudal de la válvula en función de sus dimensiones geométricas y para un cabezal piezométrico que corresponda al 70 % de la altura física del tanque, la cual es 280mm (valor común entre los tanques de las llenadoras por gravedad). Ese valor del 70 % de la altura del tanque permite que exista una cámara de aire , sobre el nivel de agua . El mismo que permite el rebose de las válvulas por el tubo de venteo.

Haciendo uso de la Fórmula 8 y teniendo presente las mismas condiciones del cálculo anterior, se encuentra la velocidad del fluido V_2 .

$$Z_1 = (V_2^2 / 2g) * (K + 1); V_2 = [1 / (k + 1)^{1/2}] * (2g Z_1)^{1/2}$$

$$V_2 = [1 / (0.04 + 1)^{1/2}] * (2 * 9.8 * 0.422)^{1/2}; V_2 = 2.82 \text{ m/seg}$$

Haciendo uso de la formula 9 y reemplazando los valores correspondientes se puede determinar el **caudal de la válvula. Qval**

$$Q_{\text{val}} = V_2 * A_{\text{val}}; Q_{\text{val}} = 2.82 * (1.4 \times 10^{-4}); Q_{\text{val}} = 3.9 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{seg}$$

$$Q_{\text{val}} = 23.4 \text{ Lt / min.}$$

Como se puede apreciar los cálculos realizados han permitido hallar el caudal de la válvula teórico, partiendo de consideraciones ideales.

Caudal real de la válvula. Q_R

El caudal real de la válvula se lo obtiene de forma experimental, determinando el tiempo de llenado de un envase de 2000 cc. Manteniendo constante la altura o cabezal piezométrico en 280 mm.

De los resultados experimentales se tiene que la válvula llena 2000 cc en un tiempo de 9 seg. Por lo tanto haciendo uso de la Formula 10 se tiene:

$$Q_R = V / t \quad (10)$$

Donde :

Q_R : Caudal real ; V : Volumen del envase ; t : Tiempo

Conociendo $t = 9$ Seg y $V = 2$ Lt. Se calcula:

$$Q_R = 2 \times 10^{-3} / 9 \quad ; \quad Q_R = 2.2 \times 10^{-4} \text{ m}^3 / \text{seg}$$

Conocido el caudal real se determina la velocidad real del fluido (V_R). Haciendo uso de la Formula (9).

$$Q_R = V_R * A \quad (9)$$

$$V_R = 2.2 \times 10^{-4} / 1.4 \times 10^{-4} \quad ; \quad V_R = 1.59 \text{ m / Seg.}$$

Conocida la velocidad del fluido al pasar por la válvula se procede a determinar el coeficiente de válvula. K de la Formula (11).

$$V_R = D * (2 * g * Z1)^{1/2} \quad (11)$$

$$D = 1 / (K + 1)^{1/2} \quad ; \quad D = 1.59 / (2 * 9.8 * 0.472)^{1/2} = 0.522$$

$$0.522 = 1 / (K + 1)^{1/2} \quad ; \quad K = 0.91$$

Todos éstos valores se registran en la Tabla (1).

Tabla (1). Caudal Teórico y Real para una Válvula de Llenado

Condiciones	Cabezal piezometrico Z1 = 472 mm		Volumen envase 500cc	
	Caudal Q $\times 10^{-4}$ m ³ / Seg	Velocidad V m/Seg	Coefficiente De Válvula K	Perdidas h _{lm} m
Neto	1.25			
Teórico	3.9	2.82	0.04	0.16
Real	2.2	1.59	0.91	1.15

Análisis de la Tabla de caudal teórico y real.

De los valores registrados en la tabla se puede observar que el caudal real es menor que el caudal teórico debido a que el valor del coeficiente de válvula K, para el caso real de la válvula es mayor que el que se tomo del libro par el calculo teórico. Adicionalmente se puede ver que el caudal real es 1.76 veces mayor que el caudal estimado de producción lo que permite a la llenadora cumplir con la expectativa de llenar 240 BPM para cualquier envase de 500 cc.

Conclusiones.

De lo realizado en éste trabajo se ha podido determinar la factibilidad del desarrollo de válvulas de alta productividad con tecnología nacional, permitiendo que el manejo de productos como el agua embotellada se lo realice de manera higiénica.

Cabe anotar que los materiales que se utilizaron para la fabricación de la válvula modelo, se adquirieron localmente; así mismo el mecanizado realizado a las piezas que componen la válvula se lo realizo localmente. Esto abre la puerta para que otros profesionales, perfeccionen la operación de la válvula o también le realicen mejoras para mejorar su eficiencia, lo que redundará en una nueva industria de producción nacional, poniéndonos a competir con países como Colombia, Argentina, Brasil en los cuales ya se fabrican válvulas de llenado para la industria de los refrescos sin gas.

REFERENCIAS

a). Tesis.

1. R. Lavayen, "Diiseño de una llenadora rotativa para embotellado de agua natural sin gas" 2004.

b). Articulo de un manual de maquinaria.

2. Geo J.Meyer Manufacturing. Bottle Fillers. Manual de usuario (Milwaukee, Wis: Geo Meyer, 1975).pag.3-12 - 3-13

c). Libro.

3. Fox & McDonal, Mechanic of fluid (3th. edition).pag.132-145