

Características peculiares de la operación de bombas rotodinámicas en paralelo

Peculiar characteristics of the operation of rotodynamics pumps in parallel

Yaset Martínez Valdés¹ y Félix Riaño Valle²

RESUMEN. Este es el primero de varios artículos que se presentarán sobre el tema de las bombas rotodinámicas operando en paralelo. En el se hace primeramente un breve resumen de las características de funcionamiento y comportamiento hidráulico de las bombas acopladas en paralelo. Se presenta el método de las bombas virtuales, un procedimiento sencillo y práctico para la solución de problemas de bombas conectadas en paralelo, cuando las condiciones de instalación y/o características propias de las bombas acopladas, no son las mismas.

Palabras clave: bombas, operación, virtuales, paralelo, centrífugas, rotodinámicas

ABSTRACT. This is the first of several articles that will be presented about the topic of the rotodynamics pumps operating in parallel. Firstly a brief summary of the operation characteristics and hydraulic behavior of the pumps coupled in parallel is presented. The method of the virtual pumps, a simple and practical procedure is presented for the solution of problems of pumps connected in parallel, when the installation conditions and/or characteristic of the coupled pumps, are not the same.

Keywords: pumps, operation, virtual, parallel, centrifugal, rotodynamics

INTRODUCCIÓN

Las instalaciones de bombeo constan generalmente de varias máquinas dispuestas en paralelo a un sistema general de tuberías. Esto está condicionado principalmente por la necesidad del trabajo de la instalación para cubrir el gráfico de gasto variable. Aunque normalmente se piensa que la colocación de bombas en paralelo se hace para aumentar el caudal en un sistema existente, lo más común es que las instalaciones de bombas en paralelo se dispongan para fraccionar un caudal total en caudales parciales para resolver situaciones especiales de operación (Pérez, 1974; Pardo y Ruiz, 1980; Cherkasski, 1986; Castillo, 1996).

Es conocido que si las bombas colocadas en paralelo son iguales, la capacidad y la potencia necesaria para cargas iguales se duplicarán, triplicarán, etc.; según sean dos, tres o más bombas iguales colocadas en paralelo, y la eficiencia del conjunto

será igual a la de la bomba original. Esta condición de trabajo solo se cumplirá, cuando los sistemas de tuberías secundarios - succión e impulsión de cada bomba - y las bombas instaladas sean iguales (Pardo y Ruiz, 1980; Karassik, 1986, Pérez, 1999). Para cualquier otra situación no se cumplirá la afirmación planteada en el párrafo anterior y deberá hacerse un ajuste para el cálculo del punto de operación real.

MATERIALES Y MÉTODOS

Teoría de la operación de bombas rotodinámicas en paralelo

Se plantea que varias bombas están operando en paralelo, cuando sus caudales van a parar a una tubería común, sumándose para obtener una mayor descarga. Como la carga a presión en la tubería común es una sola, cada bomba ajustará su funcionamiento a dicha carga, luego el resultado de la operación

Recibido 24/06/09, aprobado 21/06/10, trabajo 23/10, investigación.

¹ Ingeniero Hidráulico, Master en Ingeniería Hidráulica, Profesor Instructor. Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH). Instituto Superior Politécnico “José Antonio Echeverría”, calle 114 # 11901 e/ 119 y 127, Marianao, Ciudad de La Habana, Cuba, E-✉: yaset@cih.cujae.edu.cu

² Ingeniero Hidráulico, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Titular, Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH). Instituto Superior Politécnico “José Antonio Echeverría”, calle 114 # 11901 e/ 119 y 127, Marianao, Ciudad de La Habana, Cuba.

de bombas en paralelo será que:

1. Se sumarán las capacidades o caudales de las distintas bombas a cargas iguales, para así obtener el caudal total de bombeo.
2. La potencia necesaria resultante será la suma de las potencias para las cargas iguales correspondientes a cada caudal.
3. La eficiencia de la combinación se determina para cada carga, a través de la potencia de la combinación como suma de las potencias individuales para cargas iguales. (Pérez, 1974; Hicks, 1988; Arvizu y Santamarina, 1995; Pérez, 1999; Sterling, 2005; Riaño, 2007):

Si las bombas colocadas en paralelo son iguales, la capacidad y la potencia necesaria para cargas iguales se duplicarán, triplicarán, etc.; según sean dos, tres o más bombas iguales las colocadas en paralelo. La eficiencia será igual que en la bomba original para el punto de la curva de la combinación que signifique doble o triple capacidad, según el caso (Stepanoff, 1957; Colectivo de Autores, 1996; Castillo; 1996; Pérez, 1999).

Como característica fundamental a resaltar en un acoplamiento de bombas en paralelo, es que el caudal total entregado por la combinación siempre es menor que el número de bombas por el caudal que suministra una sola bomba (Cherkasski, 1986; Arvizu y Santamarina, 1995; Pérez, 1999). La relación existente entre el caudal que suministra una bomba y el que suministra la combinación dependerá de las características de cada una de las bombas acopladas, del conjunto en paralelo y de la curva característica del sistema de tuberías (Cherkasski, 1986; Hicks, 1988; Arvizu y Santamarina, 1995; Pérez, 1999).

Casos comunes de instalación de bombas en paralelo

Las bombas rotodinámicas, acopladas para el trabajo en paralelo, influyen mutuamente una en otra: el caudal, la carga, la potencia y la eficiencia de cada una de ellas depende esencialmente de los regímenes de carga individuales de las máquinas que funcionan conjuntamente (Pardo y Ruiz, 1980; Pérez, 1999; Riaño, 2007).

A continuación se presentan varios casos de operación de dos bombas en paralelo (Pardo y Ruiz, 1980):

1. **Caso 1:** bombas iguales operando contra sistemas de tuberías iguales hasta el punto donde comienza la tubería común de impulsión. Evidentemente, en este caso se cumplen las condiciones planteadas anteriormente, es decir, ambas bombas están operando contra la misma carga, por tanto, se cumplirá perfectamente que se suman los gastos para cargas iguales.
2. **Caso 2:** bombas iguales operando contra sistemas de tuberías diferentes hasta el punto donde comienza la tubería común de impulsión. En este caso como los sistemas de tuberías son diferentes hasta el punto de unión de las tuberías de descarga secundarias de las bombas, se puede afirmar que estas dos bombas no están operando contra la misma carga, pues en definitiva están operando contra sistemas diferentes.
3. **Caso 3:** bombas diferentes operando contra sistemas de tuberías iguales hasta el punto donde comienza la tubería común de impulsión. En este caso se tiene que los sistemas de tuberías son iguales para cada bomba pero por tratarse

de bombas diferentes, los gastos serán también diferentes y como consecuencia de ello, las pérdidas que se producen en cada tramo hasta el punto de unión serán diferentes y en conclusión las curvas de los sistemas serán distintos implicando esto que las bombas estén operando contra cargas diferentes a las salidas de las mismas.

4. **Caso 4:** bombas diferentes operando contra sistemas de tuberías diferentes hasta el punto donde comienza la tubería común de impulsión. Este es un caso en el cual es evidente, por todo lo anteriormente expuesto en los casos 2 y 3, que las bombas están operando contra diferentes cargas.

En conclusión, por todo lo analizado en estos cuatro casos, se puede afirmar que no siempre se suman los gastos para cargas iguales cuando dos bombas operan en paralelo.

Método de las bombas virtuales

En la práctica cotidiana se han utilizado diferentes procedimientos para determinar los puntos de operación de cada una de las bombas que trabajan, bien sea individualmente o en paralelo y que descargan contra un mismo sistema principal de impulsión. Estos procedimientos se pueden resumir de la manera siguiente:

1. Las pérdidas de carga en la succión y en la impulsión secundaria de cada bomba (sin incluirle conducto o sistema principal de impulsión) son despreciadas para el cálculo de la curva característica del sistema de tuberías.
2. Despreciar las diferencias en las pérdidas de carga que puedan existir en la impulsión secundaria y succión de las bombas e incluir las pérdidas de carga que se consideren importantes en esta parte de la instalación para el cálculo de la curva característica del sistema de tuberías de impulsión principal.

Ya que en los dos criterios anteriores se consideran iguales las pérdidas en la parte del sistema de conductos propios de cada máquina, se tiene entonces que si las bombas trabajan en paralelo y elevan desde el mismo nivel en la succión, ellas deberán trabajar necesariamente contra la misma carga total.

Es de anotar que procedimientos de cálculo basados en los criterios anteriores, particularmente en el segundo, producen buenos resultados para algunos problemas prácticos, especialmente cuando las pérdidas de carga en los conductos propios de cada bomba son pequeñas comparadas con las que se presentan en la tubería de descarga principal y por lo tanto no determinan la forma de la curva característica del sistema contra el cual se bombea (Castilla y Galvis, 1993).

Las bombas virtuales, son máquinas imaginarias que carecen de tuberías de succión e impulsión secundarias. Estas bombas están formadas por la bomba real suministrada por el fabricante y todos los accesorios y tuberías hasta el punto de unión con la tubería de impulsión principal. Estos equipos se caracterizan por trabajar siempre contra la misma carga total cuando operan en paralelo, sin que para conseguirlo se requieran suposiciones que puedan implicar soluciones solo aproximadas, como sucedería con los criterios anteriores. Este concepto de bombas virtuales simplifica grandemente el cálculo hidráulico de los puntos reales de operación y en general la comprensión

física del problema (Castilla y Galvis, 1993).

Si para un sistema de bombeo dado se toma como curva característica de la bomba virtual una que incluya tanto la tubería de succión como la de impulsión hasta el punto de descarga, se tendría que la longitud del sistema contra el cual se bombearía sería cero y las pérdidas de carga correspondientes, nulas. Consecuentemente la curva característica de este sistema estaría dada simplemente por los valores de carga versus caudal (Castilla y Galvis, 1993).

Planteamiento del método de las bombas virtuales

Tomando como referencia la Figura 1, se aplica la ecuación de Bernoulli desde los niveles del agua en los depósitos de succión de cada bomba, hasta el punto A, en donde existe una carga H_A común a las conexiones entre las estaciones de bombeo B – 1 y B – 2 con el nodo A.

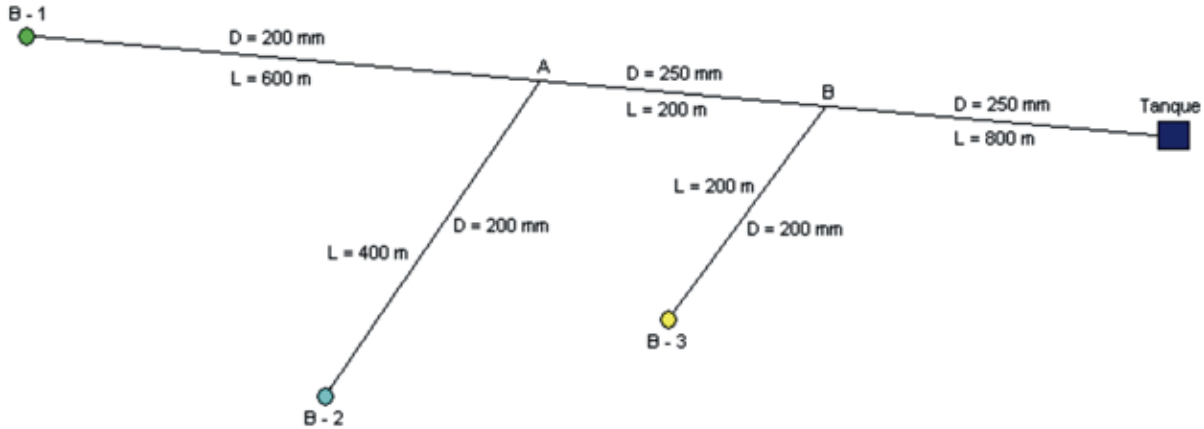


FIGURA 1. Esquema de instalación de bombas operando en paralelo.

Por el sistema (B – 1) – A se obtiene:

$$H_1 \pm Z_1 = H_A + h_{f(B-1)-A} \quad [1]$$

y, por la ruta (B – 2) – A:

$$H_2 \pm Z_2 = H_A + h_{f(B-2)-A} \quad [2]$$

donde: H_1 : carga total de la bomba 1, (m); H_2 : carga total de la bomba 2, (m); H_A : carga en el nodo A, (m); Z_1 : altura del nivel del agua en el pozo de la estación B – 1, respecto a un plano de referencia establecido, (m); Z_2 : altura del nivel del agua en el pozo de la estación B – 2, respecto a un plano de referencia establecido, (m); $h_{f(B-1)-A}$: pérdidas de carga totales por la ruta (B – 1) – A, (m) y $h_{f(B-2)-A}$: pérdidas de carga totales por el sistema (B – 2) – A (m).

Las ecuaciones 1 y 2 dan las bases teóricas para analizar el comportamiento de las bombas que trabajan en paralelo. Para esto se transforman así:

$$H_A \pm Z_1 = H_1 + h_{f(B-1)-A} \quad [3]$$

$$H_A = H_2 \pm Z_2 - h_{f(B-2)-A} \quad [4]$$

De aquí en adelante las bombas virtuales se denotarán de la manera siguiente:

Para el caso de la Figura 1, la bomba virtual B_{1A} , por ejemplo, estará representada por la bomba real 1 y todos los

accesorios y tuberías hasta el punto de unión común en la tubería principal de impulsión. La tubería de impulsión principal es la tubería desde el último empate de bombas que trabajan en paralelo, hasta el tanque final de descarga. Igual denominación se le aplicará a la bomba 2, para su correspondiente bomba virtual, B_{2A} .

La curva característica de una bomba virtual, por ejemplo, para la bomba virtual B_{1A} , se obtiene como sigue: a la carga total de la bomba real H_1 se le restan las pérdidas de carga para el caudal Q_1 en el tramo (B – 1) – A. Se obtiene así el valor de H_{1A} , para el caudal Q_1 .

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Aplicación del método de las bombas virtuales a un sistema con dos bombas

Para la realización de este ejemplo se toma como referencia la Figura 1. Las bombas 1 y 2 empleadas para este estudio son bombas sumergibles de pozo profundo, de una sola etapa (Bombas Worthington, 1986). El coeficiente de pérdidas para las tuberías para la ecuación de Hazen – Williams para todas las tuberías es $C = 150$. La carga estática de bombeo es de 15,00 m. En la Tabla 1 y la Figura 2 se presentan los datos y las curvas características carga vs. capacidad de las bombas reales y sus virtuales, respectivamente.

TABLA 1. Datos de las curvas características de las bombas reales y sus virtuales

Caudal Q (m ³ /h)	Cargas de las bombas reales		Pérdidas de carga en las tuberías de succión e impulsión secundarias		Cargas de las bombas virtuales	
	H ₁ (m)	H ₂ (m)	L _{1-A} = 600 m	L _{2-A} = 400 m	H _{1A} (m)	H _{2A} (m)
0	47,000	29,000	0,000	0,000	47,000	29,000
60	43,000	27,000	0,715	0,476	42,285	26,523
72	41,000	26,000	1,002	0,668	39,998	25,332
84	39,000	25,000	1,333	0,889	37,667	24,112
96	37,000	24,000	1,707	1,138	35,293	22,862
108	34,000	22,000	2,123	1,415	31,877	20,584
120	30,000	21,000	2,581	1,720	27,419	19,279
132	26,000	19,000	3,079	2,053	22,921	16,947
144		16,000		2,411		13,588
150	19,000	–	3,901	–	15,098	–

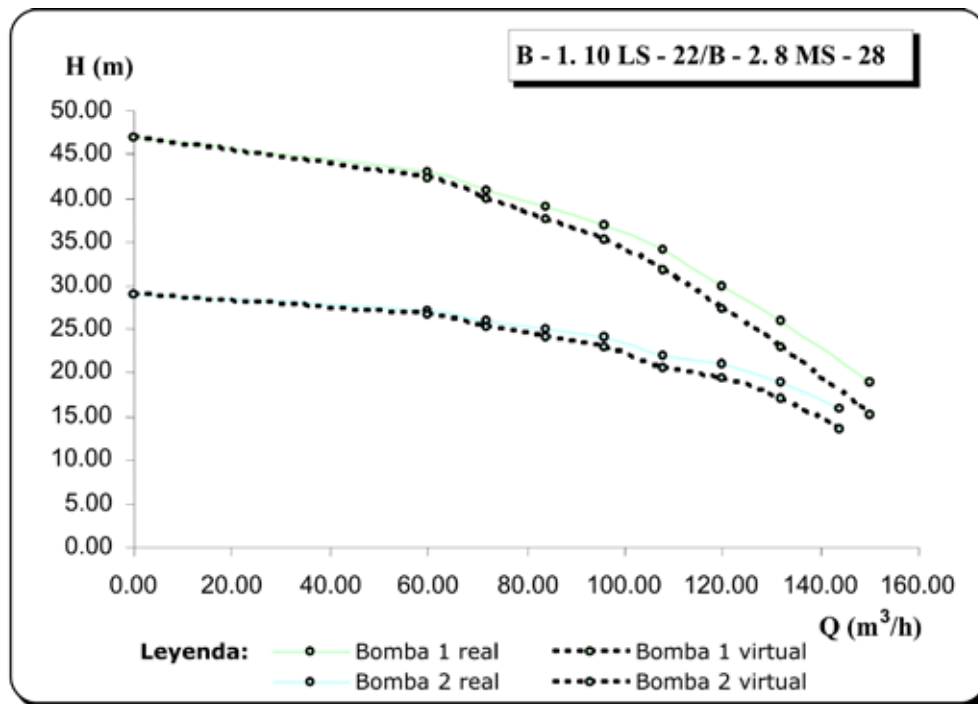


FIGURA 2. Curvas carga vs. capacidad de las bombas reales y sus virtuales.

Solución gráfica

La solución gráfica del problema de las dos bombas 1 y 2 que trabajan en paralelo, se obtiene a partir de la construcción de la curva de las dos bombas virtuales que trabajan en paralelo, de la manera siguiente:

1. La bomba virtual B_{1A} produce un caudal Q₁ para la carga H_A. La bomba virtual B_{2A} produce con la misma carga H_A un caudal Q₂. Las bombas virtuales trabajando conjuntamente contra la carga H_A producen el caudal Q_A = Q₁ + Q₂. El punto de la curva para el trabajo en conjunto viene representado por las coordenadas: H = H_A y Q = Q_A = Q₁ + Q₂.
2. Se obtiene, para diferentes valores de H_A, la curva de H_A vs. Q_A indicada en la Ilustración 3 como B_{(1,2)A} y que corresponde a una bomba virtual que reemplaza a todo el sistema hasta el punto A.
3. El punto de intersección de esta curva con la curva característica del sistema de tuberías para el tramo A – T, sin incluir las tuberías de succión e impulsión secundarias, es la solución buscada al problema, o sea, el punto de operación real para este sistema. Los datos de la curva característica del sistema de tuberías para el tramo A – T, se muestran en el Tabla 2.

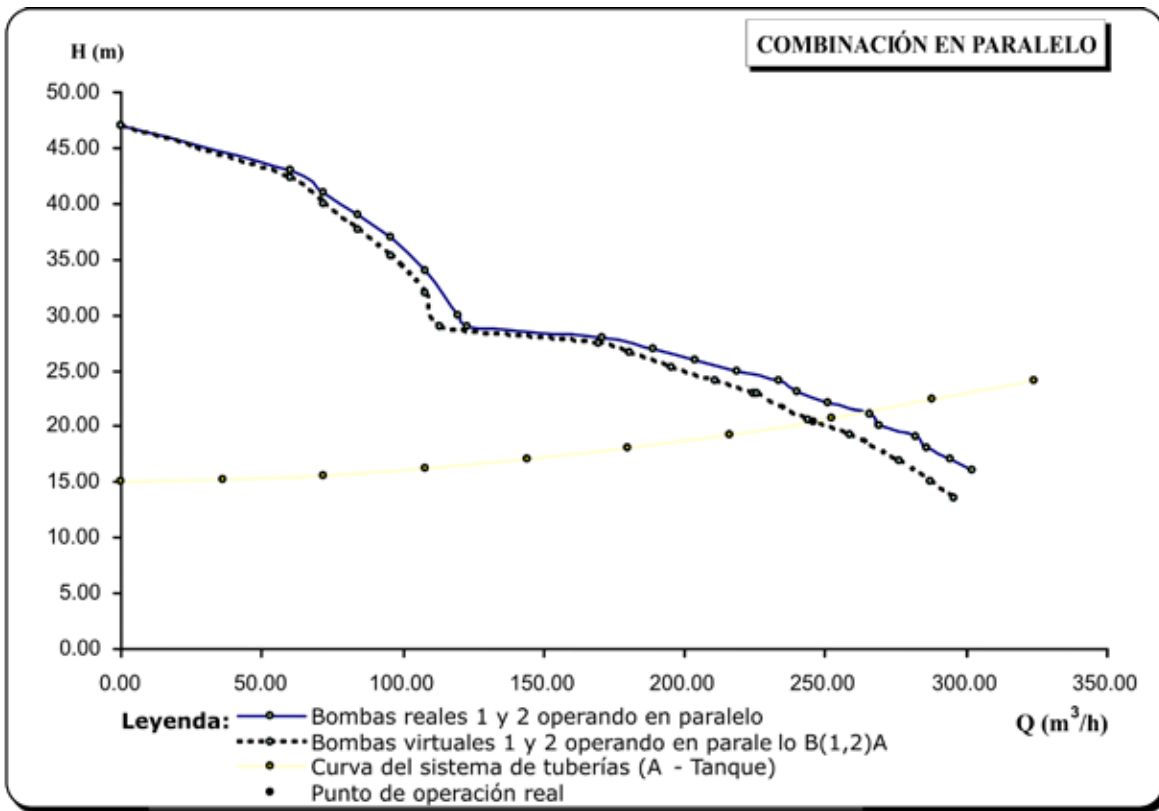


FIGURA 3. Operación de las bombas 1 y 2 en paralelo.

TABLA 2. Datos de la curva característica de la tubería de impulsión principal para el tramo A – T

Q(m³/h)	Pérdidas en la tubería de impulsión principal A – T L = 1000 m	H _{sist.} (m)
0	0,000	15,000
36	0,156	15,156
72	0,563	15,563
108	1,193	16,193
144	2,033	17,033
180	3,074	18,074
216	4,308	19,308
252	5,732	20,732
288	7,340	22,340
324	9,129	24,129

Solución analítica

Las ecuaciones de las curvas carga – capacidad de las bombas originales y virtuales, más la de la curva característica del sistema de tuberías A – T se presentan a continuación:

1. **Bomba real 1:** $H_1=47+0,0266Q_1-0,0014Q_1^2$ [5]
2. **Bomba real 2:** $H_2=29+0,0108Q_2-0,0007Q_2^2$ [6]

3. **Bomba virtual B_{1A}:** $H_{1A}=47+1,0237Q_{1A}-0,0016Q_{1A}^2$ [7]
4. **Bomba virtual B_{2A}:** $H_{2A}=29+0,0089Q_{2A}-0,0008Q_{1A}^2$ [8]
5. **Bomba virtual (B_{1,2})_A:** $H_{(1,2)A}=25+0,0813Q_{(1,2)A}-0,0004Q_{(1,2)A}^2$ [9]
6. **Curva característica del sistema de tuberías A – T:** $H_{sist.}=15+0,0002Q^{1,852}$ [10]

La ecuación 9 representa la unión de las dos bombas virtuales B_{1A} y B_{2A} trabajando en paralelo. La misma solo es aplicable en el rango o intervalo donde se unen los aportes de caudales de las dos bombas virtuales al sistema.

Trabajando con las expresiones anteriores se obtienen las soluciones siguientes:

1. Punto de intersección de las ecuaciones 9 y 10: $H_A = 20,48$ m y $Q_A = 248,71$ m³/h.
2. Para el valor de $H_A = 20,48$ m se tiene por la ecuación 7: $Q_{1A} = Q_1 = 135,92$ m³/h.
3. Para el valor de $H_A = 20,48$ m se obtiene por la ecuación 8: $Q_{2A} = Q_2 = 108,41$ m³/h.

Si se acoplara una tercera bomba cuya impulsión secundaria empatara en el punto B de la figura 1, se procedería de la siguiente manera:

1. Se transforma la curva (B_{1,2})_A en una segunda curva virtual restándole a cada carga las pérdidas de carga en el tramo A – B para cada caudal $Q_{1A} + Q_{2A}$, obteniéndose la curva (B_{1,2})_B.

2. De manera similar a como se obtuvieron las restantes curvas virtuales para las bombas 1 y 2 se obtiene la curva de la bomba virtual B_{3B} .
3. Se combinan las dos curvas anteriores para obtener la curva $(B_{1,2,3})_B$.
4. Se encuentra la intersección de dicha curva con la curva característica del sistema de tuberías para el tramo B – T, intersección que define el punto de operación para las tres bombas 1, 2, y 3 trabajando conjuntamente en paralelo.
5. Como paso final se obtienen los valores de H_B y Q_B , que definen la coordenada del punto de operación para el caso de tres bombas operando en paralelo.

CONCLUSIONES

1. El método de las bombas virtuales es un procedimiento práctico y sencillo que se utiliza para obtener las curvas características ajustadas de la combinación de bombas en paralelo. Este concepto de bombas virtuales simplifica grandemente el cálculo hidráulico de los puntos reales de

operación y en general la comprensión física del problema. En este trabajo se realizó una introducción al método y sus principios hidráulicos fundamentales.

2. El procedimiento se podría resumir de la manera siguiente: Con la información de las curvas características de las bombas y las curvas del sistema de tuberías desde las bombas hasta el punto de unión del sistema de tuberías, estas últimas se restan a las curvas carga – capacidad de las bombas, obteniéndose así las curvas características ajustadas de las bombas a la carga correspondiente al punto de unión de los sistemas de tuberías. Después de haberse realizado este primer paso, entonces se puede aplicar el método convencional de sumar las curvas ajustadas ya que todas están referidas a la misma carga.
3. Se presenta un ejemplo práctico de dos bombas acopladas en paralelo para ilustrar de una manera más eficiente dicho método mostrando sus bondades y utilidad práctica en la simulación de la operación de sistemas de bombeo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARVIZA VALVERDE, J. y SANTAMARINA CIURANA, C.: *Ingeniería Rural: Hidráulica*, Ed. Servicios de Publicaciones, Universidad Politécnica de Valencia (UPV), Valencia, 1995.
- BOMBAS WORTHINGTON: *Catálogo técnico: bombas sumergibles*, Sucursal Madrid, Madrid, 1986.
- CASTILLA RUIZ, A. y GALVIS CASTAÑO, G.: *Bombas y estaciones de bombeo*, Centro Inter. – Regional de Abastecimiento y Remoción de Agua (CINARA) – Universidad del Valle, Ed. Ultragraf Editores, Cali, 1993.
- CASTILLO RAMÍREZ, R.: *Máquinas hidráulicas*, Ed. Instituto Politécnico Nacional (IPN), Oaxaca, México, 1996.
- CHERKASSKI, V. M.: *Bombas ventiladores compresores*, Ed. Mir Moscú, Moscú, 1986.
- COLECTIVO DE AUTORES: *Ingeniería Hidráulica Aplicada a los Sistemas de Distribución de Agua*, 2^{da} Edición, Unidad Docente Mecánica de Fluidos – Universidad Politécnica de Valencia – Aguas de Valencia S.A., Ed. Unidad Docente Mecánica de Fluidos, Universidad Politécnica de Valencia (UPV), Vol. I, Valencia, 1996.
- PARDO GÓMEZ, R. y RUIZ SOTO, M.I.: “Algunas consideraciones sobre el funcionamiento de bombas en paralelo”, *Revista Ingeniería Hidráulica*, 1 (1): 20-28, La Habana, 1980.
- PÉREZ FRANCO, D.: *Equipos de Bombeo*, 3^{ra} edición, Ed. Pueblo y Educación, La Habana, 1974.
- PÉREZ FRANCO, D.: *Máquinas Hidráulicas Rotodinámicas*, Ed. ENPSES, La Habana, 1999.
- HICKS, T.G.: *Bombas, su selección y aplicación*, 21^{na} edición, Ed. CIA Editorial Continental, S.A. de CV. México D.F, 1988.
- KARASSIK: *Pump Handbook*, 2nd edition, Ed. John Wiley & Sons, Inc., New York, 1986.
- STEPANOFF, A. J.: *Centrifugal and Axial Flow Pumps. Theory, design and application*, 2nd edition, Ed. John Wiley & Sons, Inc., New York, 1957.
- STERLING SIHI: *Principios Básicos para el Diseño de Instalaciones de Bombas Centrifugas*, 7th edition, Ed. Sterling Fluid Systems Group, Madrid, 2003.
- RIAÑO VALLE, F.: *Estaciones y Sistemas de Bombeo*, Diplomado – Especialista Universitario en Instalaciones Urbanas de Agua, Instituto Superior Politécnico “José Antonio Echeverría” (ISPJAE), La Habana, 2007.