



UNIVERSIDAD DE ALMERÍA

Escuela Superior de Ingeniería

MAQUINAS HIDRÁULICAS

Práctica I. Sistemas de bombeo complejos: Serie y Paralelo

GRUPO A1

ALBERTO CRUZ GARCÍA

Índice

1. Objetivos	2
2. Introducción	2
2.1. Conexión en Serie	2
2.2. Conexión en Paralelo	2
3. Materiales Empleados	3
4. Datos y Desarrollo	4
4.1. Mediciones Individuales de las Bombas	4
4.2. Mediciones en Configuración Paralelo	4
4.3. Mediciones en Configuración Serie	4
5. Curvas Características $H(Q)$ de las Bombas Individuales	5
5.1. Análisis de la Bomba 1 (Derecha)	5
5.2. Análisis de la Bomba 2 (Izquierda)	6
5.3. Ecuaciones de Ajuste de las Curvas	6
6. Curva Característica Medida y Estimada para Configuración en Serie	7
6.1. Datos Experimentales	7
6.2. Conversión al Sistema Internacional	7
6.3. Altura Manométrica Total en Serie	8
6.4. Curva Característica Teórica en Serie	8
6.5. Análisis Comparativo	9
7. Curva Característica para Configuración en Paralelo	9
7.1. Datos Experimentales	9
7.2. Conversión al Sistema Internacional	10
7.3. Altura Manométrica Total en Paralelo	10
7.4. Curva Característica Teórica en Paralelo	10
7.5. Análisis Comparativo	11
8. Análisis de los Resultados Obtenidos	12
8.1. Configuración en Serie	12
8.2. Configuración en Paralelo	13
8.3. Comparación Directa Serie vs Paralelo	14
8.4. Conclusiones	14

1. Objetivos

- Caracterizar el funcionamiento de dos bombas conectadas en serie y en paralelo.
- Determinar experimentalmente las curvas características individuales de cada bomba.
- Obtener la curva característica H-Q del sistema con bombas en serie.
- Determinar la curva característica H-Q del sistema con bombas en paralelo.

2. Introducción

En ingeniería hidráulica, el acoplamiento de bombas en diferentes configuraciones permite adaptar los sistemas de bombeo a las necesidades específicas de caudal y altura manométrica requeridas. Esta práctica se centra en el estudio de dos configuraciones fundamentales: conexión en serie y conexión en paralelo.

2.1. Conexión en Serie

En una conexión en **serie**, el fluido pasa secuencialmente a través de cada actuador. Las relaciones fundamentales son:

$$Q_{total} = Q_1 = Q_2$$

$$H_{total} = H_1 + H_2$$

- **Caudal (Q):** El caudal es el mismo a través de todos los componentes, ya que no hay caminos alternativos para el fluido ($Q_{total} = Q_1 = Q_2$).
- **Altura de Presión (H):** La pérdida de carga o altura total del sistema es la **suma** de las pérdidas de carga individuales de cada componente ($H_{total} = H_1 + H_2$). Esto explica por qué la presión disponible para cada actuador posterior es menor.

2.2. Conexión en Paralelo

En una conexión en **paralelo**, el fluido se envía a todos los actuadores simultáneamente desde una línea común. Las relaciones fundamentales son:

$$H_{total} = H_1 = H_2$$

$$Q_{total} = Q_1 + Q_2$$

- **Altura de Presión (H):** La caída de presión a través de cada rama del circuito es la misma, ya que todas están conectadas a los mismos puntos comunes ($H_{total} = H_1 = H_2$). Esto garantiza que cada actuador reciba la presión completa del sistema.
- **Caudal (Q):** El caudal total que sale de la bomba es la **suma** de los caudales que circulan por cada rama paralela ($Q_{total} = Q_1 + Q_2$).

Estos fundamentos teóricos serán verificados experimentalmente en el desarrollo de la práctica, comparando los resultados obtenidos con los modelos matemáticos establecidos.

3. Materiales Empleados

Para la realización de esta práctica se utilizó el siguiente dispositivo experimental, cuyos componentes principales se enumeran y detallan a continuación:

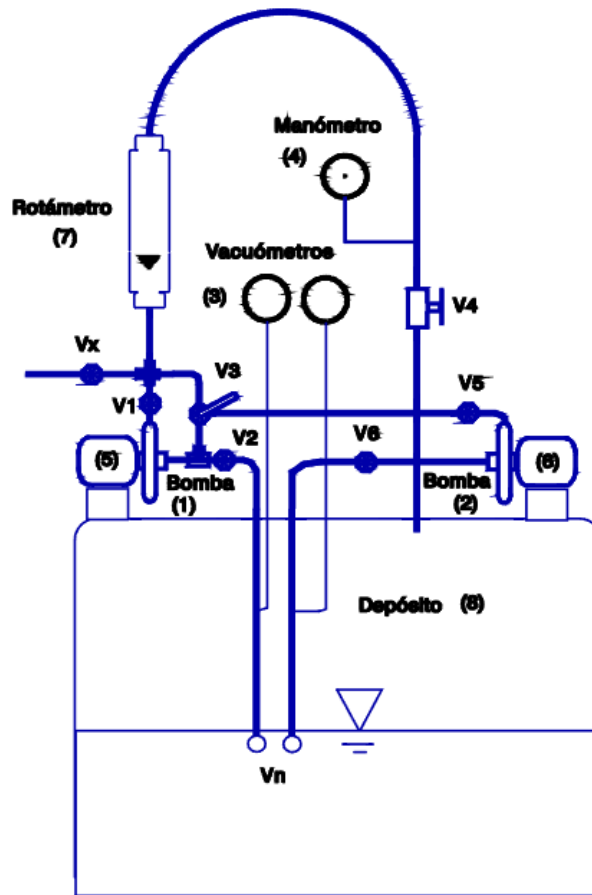


Figura 1: Esquema del dispositivo experimental utilizado en la práctica.

Lista de Componentes

- (1) y (2): 2 bombas centrífugas horizontales.
- (3): Vacuómetros analógicos situados a 0,4 m por encima del eje de la bomba.
- (4): Manómetro analógico situado a 0,4 m por encima del eje de la bomba.
- (5) y (6): 2 motores universales.
- (V2) y (V6): Llaves de control en aspiración.
- (V1) y (V5): Llaves de control en impulsión.
- (V4): Llave reguladora de caudal.
- (V3): Llave de tres vías.
- (Vn): Válvulas de retención.

- (Vx): Llave auxiliar para equipos externos.
- (7): Rotámetro para medidas de caudal.
- (8): Depósito.

4. Datos y Desarrollo

4.1. Mediciones Individuales de las Bombas

Punto	1	2	3	4	5	6	7
Q (L/h)	6000	5000	4000	3000	2000	1000	0
P_{asp} (bar)	-0.2	-0.16	-0.14	-0.13	-0.11	-0.1	-0.1
P_{imp} (bar)	0.42	0.8	1.15	1.48	1.7	1.8	1.95

Cuadro 1: Mediciones de la Bomba 1 (Derecha)

Punto	1	2	3	4	5	6	7
Q (L/h)	6000	5000	4000	3000	2000	1000	0
P_{asp} (bar)	-0.225	-0.19	-0.16	-0.14	-0.125	-0.115	-0.11
P_{imp} (bar)	0.72	1	1.25	1.55	1.75	1.85	1.95

Cuadro 2: Mediciones de la Bomba 2 (Izquierda)

4.2. Mediciones en Configuración Paralelo

Punto	1	2	3	4	5	6	7
Q (L/h)	6000	5000	4000	3000	2000	1000	0
P_{asp} (bar)	-0.21	-0.175	-0.159	-0.135	-0.122	-0.119	-0.1
P_{imp} (bar)	1.43	1.6	1.65	1.75	1.81	1.90	1.95

Cuadro 3: Mediciones del sistema en configuración PARALELO

4.3. Mediciones en Configuración Serie

Punto	1	2	3	4	5	6	7
Q (L/h)	6000	5000	4000	3000	2000	1000	0
P_{asp} (bar)	-0.2	-0.17	-0.15	-0.13	-0.123	-0.12	-0.11
P_{imp} (bar)	1.39	2.1	2.59	3.15	3.55	3.75	4

Cuadro 4: Mediciones del sistema en configuración SERIE

5. Curvas Características $H(Q)$ de las Bombas Individuales

5.1. Análisis de la Bomba 1 (Derecha)

Debemos pasar los datos obtenidos durante la práctica al SI. Convertimos las presiones de bar a Pa ($1 \text{ bar} = 100\,000 \text{ Pa}$) y calculamos H en metros mediante la fórmula:

$$H = \frac{P}{\rho \cdot g} = \frac{P}{9810 \text{ Pa m}^{-1}}$$

donde $\rho = 1000 \text{ kg m}^{-3}$ y $g = 9,81 \text{ m s}^{-2}$.

Punto	$Q \text{ (m}^3 \text{ s}^{-1}\text{)}$	$P_{\text{asp}} \text{ (Pa)}$	$P_{\text{imp}} \text{ (Pa)}$
1	$1,6667 \times 10^{-3}$	$-2,0 \times 10^4$	$4,2 \times 10^4$
2	$1,3889 \times 10^{-3}$	$-1,6 \times 10^4$	$8,0 \times 10^4$
3	$1,1111 \times 10^{-3}$	$-1,4 \times 10^4$	$1,15 \times 10^5$
4	$8,3333 \times 10^{-4}$	$-1,3 \times 10^4$	$1,48 \times 10^5$
5	$5,5556 \times 10^{-4}$	$-1,1 \times 10^4$	$1,70 \times 10^5$
6	$2,7778 \times 10^{-4}$	$-1,0 \times 10^4$	$1,80 \times 10^5$
7	0	$-1,0 \times 10^4$	$1,95 \times 10^5$

Cuadro 5: Mediciones convertidas al Sistema Internacional

Punto	$Q \text{ (m}^3 \text{ s}^{-1}\text{)}$	$H_{\text{asp}} \text{ (m)}$	$H_{\text{imp}} \text{ (m)}$	$H_m \text{ (m)}$
1	$1,6667 \times 10^{-3}$	-2.04	4.28	6.32
2	$1,3889 \times 10^{-3}$	-1.63	8.15	9.78
3	$1,1111 \times 10^{-3}$	-1.43	11.72	13.15
4	$8,3333 \times 10^{-4}$	-1.33	15.09	16.42
5	$5,5556 \times 10^{-4}$	-1.12	17.33	18.45
6	$2,7778 \times 10^{-4}$	-1.02	18.35	19.37
7	0	-1.02	19.88	20.90

Cuadro 6: Altura manométrica total de la bomba

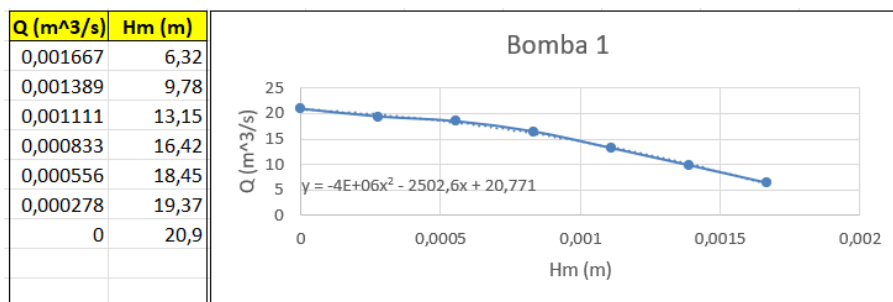


Figura 2: Recta de la bomba 1

5.2. Análisis de la Bomba 2 (Izquierda)

Aplicamos el mismo procedimiento de conversión al Sistema Internacional y cálculo de alturas:

$$H = \frac{P}{\rho \cdot g} = \frac{P}{9810 \text{ Pa m}^{-1}}$$

Punto	$Q \text{ (m}^3 \text{ s}^{-1}\text{)}$	$P_{\text{asp}} \text{ (Pa)}$	$P_{\text{imp}} \text{ (Pa)}$
1	$1,6667 \times 10^{-3}$	$-2,25 \times 10^4$	$7,2 \times 10^4$
2	$1,3889 \times 10^{-3}$	$-1,9 \times 10^4$	$1,0 \times 10^5$
3	$1,1111 \times 10^{-3}$	$-1,6 \times 10^4$	$1,25 \times 10^5$
4	$8,3333 \times 10^{-4}$	$-1,4 \times 10^4$	$1,55 \times 10^5$
5	$5,5556 \times 10^{-4}$	$-1,25 \times 10^4$	$1,75 \times 10^5$
6	$2,7778 \times 10^{-4}$	$-1,15 \times 10^4$	$1,85 \times 10^5$
7	0	$-1,1 \times 10^4$	$1,95 \times 10^5$

Cuadro 7: Mediciones de la Bomba 2 convertidas al Sistema Internacional

Punto	$Q \text{ (m}^3 \text{ s}^{-1}\text{)}$	$H_{\text{asp}} \text{ (m)}$	$H_{\text{imp}} \text{ (m)}$	$H_m \text{ (m)}$
1	$1,6667 \times 10^{-3}$	-2.29	7.34	9.63
2	$1,3889 \times 10^{-3}$	-1.94	10.19	12.13
3	$1,1111 \times 10^{-3}$	-1.63	12.74	14.37
4	$8,3333 \times 10^{-4}$	-1.43	15.80	17.23
5	$5,5556 \times 10^{-4}$	-1.27	17.84	19.11
6	$2,7778 \times 10^{-4}$	-1.17	18.86	20.03
7	0	-1.12	19.88	21.00

Cuadro 8: Altura manométrica total de la Bomba 2

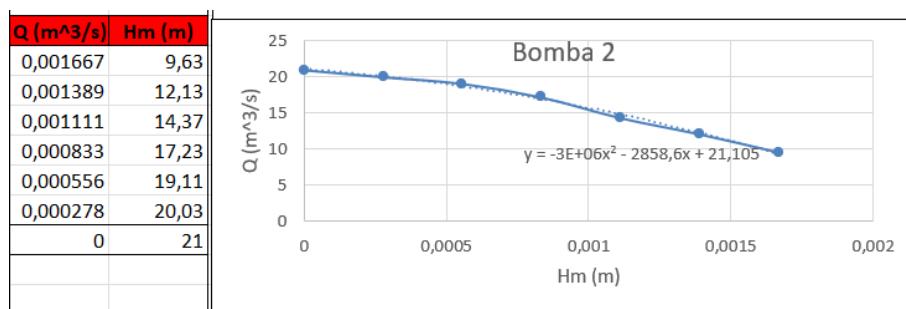


Figura 3: Recta de la bomba 2

5.3. Ecuaciones de Ajuste de las Curvas

Mediante regresión polinómica, se obtienen las ecuaciones que representan las curvas características:

- **Bomba 1:** $H_1(Q) = -4 * 10^6 Q^2 + 2502,6Q + 20,771$

- **Bomba 2:** $H_2(Q) = -3 \times 10^6 Q^2 + 2858,6Q + 21,105$

Donde los coeficientes se determinan experimentalmente a partir de los datos medidos.

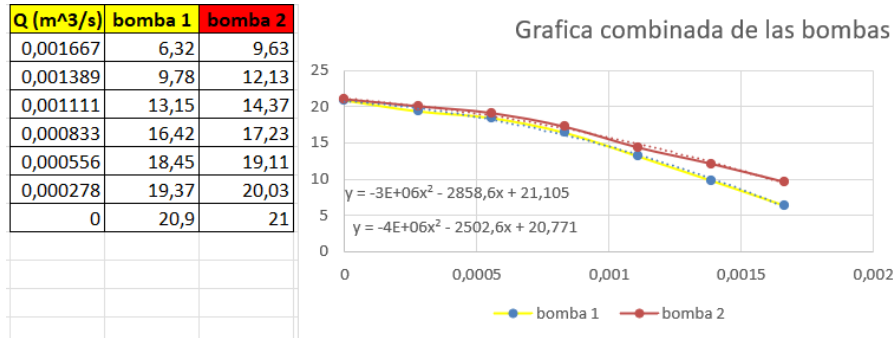


Figura 4: Gráfica Combinada de ambas bombas

La Bomba 2 demuestra un mejor desempeño hidráulico en términos de altura manométrica generada, lo que la hace más versátil.

6. Curva Característica Medida y Estimada para Configuración en Serie

6.1. Datos Experimentales

Punto	1	2	3	4	5	6	7
Q (L/h)	6000	5000	4000	3000	2000	1000	0
P_{asp} (bar)	-0.2	-0.17	-0.15	-0.13	-0.123	-0.12	-0.11
P_{imp} (bar)	1.39	2.1	2.59	3.15	3.55	3.75	4

Cuadro 9: Mediciones del sistema en configuración SERIE

6.2. Conversión al Sistema Internacional

Convertimos los datos al SI aplicando las mismas relaciones:

- Caudal: $1 \text{ L/h} = 2,77778 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$
- Presión: $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$

Punto	Q ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	P_{asp} (Pa)	P_{imp} (Pa)	H_{asp} (m)	H_{imp} (m)
1	$1,6667 \times 10^{-3}$	$-2,0 \times 10^4$	$1,39 \times 10^5$	-2.04	14.17
2	$1,3889 \times 10^{-3}$	$-1,7 \times 10^4$	$2,10 \times 10^5$	-1.73	21.41
3	$1,1111 \times 10^{-3}$	$-1,5 \times 10^4$	$2,59 \times 10^5$	-1.53	26.40
4	$8,3333 \times 10^{-4}$	$-1,3 \times 10^4$	$3,15 \times 10^5$	-1.33	32.11
5	$5,5556 \times 10^{-4}$	$-1,23 \times 10^4$	$3,55 \times 10^5$	-1.25	36.19
6	$2,7778 \times 10^{-4}$	$-1,2 \times 10^4$	$3,75 \times 10^5$	-1.22	38.23
7	0	$-1,1 \times 10^4$	$4,00 \times 10^5$	-1.12	40.77

Cuadro 10: Mediciones en serie convertidas al SI

6.3. Altura Manométrica Total en Serie

La altura total del sistema en serie se calcula como:

$$H_{serie} = H_{imp} - H_{asp}$$

$Q \text{ (m}^3 \text{ s}^{-1}\text{)}$	$H_{serie} \text{ (m)}$
$1,6667 \times 10^{-3}$	16.21
$1,3889 \times 10^{-3}$	23.14
$1,1111 \times 10^{-3}$	27.93
$8,3333 \times 10^{-4}$	33.44
$5,5556 \times 10^{-4}$	37.44
$2,7778 \times 10^{-4}$	39.45
0	41.89

Cuadro 11: Altura manométrica total experimental

6.4. Curva Característica Teórica en Serie

$$H_1(Q) = -4 \cdot 10^6 Q^2 + 2502,6Q + 20,771$$

$$H_2(Q) = -3 \cdot 10^6 Q^2 + 2858,6Q + 21,105$$

$$\begin{aligned} H_{serie}(Q) &= H_1(Q) + H_2(Q) \\ &= (-4 \cdot 10^6 Q^2 + 2502,6Q + 20,771) + (-3 \cdot 10^6 Q^2 + 2858,6Q + 21,105) \\ &= (-4 \cdot 10^6 + -3 \cdot 10^6) Q^2 + (2502,6 + 2858,6) Q + (20,771 + 21,105) \\ &= -7 \cdot 10^6 Q^2 + 5361,2Q + 41,876 \end{aligned}$$

Una vez obtenida la recta característica teórica, podemos determinar, a partir de los caudales que se emplearon en el laboratorio, los valores teóricos de H en ese punto.

$Q \text{ (m}^3 \text{ s}^{-1}\text{)}$	$H_{serie} \text{ Teórica (m)}$
$1,6667 \times 10^{-3}$	15.95
$1,3889 \times 10^{-3}$	21.91
$1,1111 \times 10^{-3}$	27.52
$8,3333 \times 10^{-4}$	33.65
$5,5556 \times 10^{-4}$	37.56
$2,7778 \times 10^{-4}$	39.4
0	41.9

Cuadro 12: Altura manométrica total teórica en serie

6.5. Análisis Comparativo

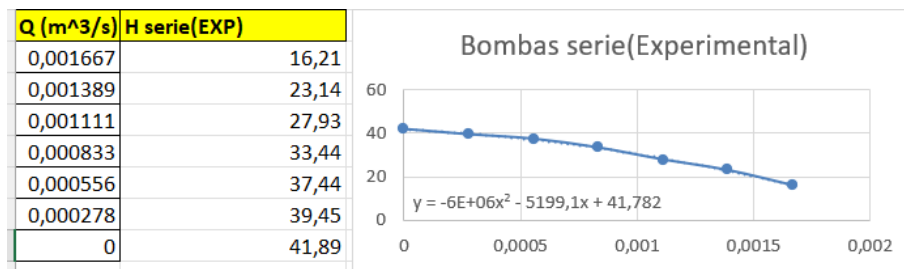


Figura 5: Gráfica de Bombas en serie Experimentalmente

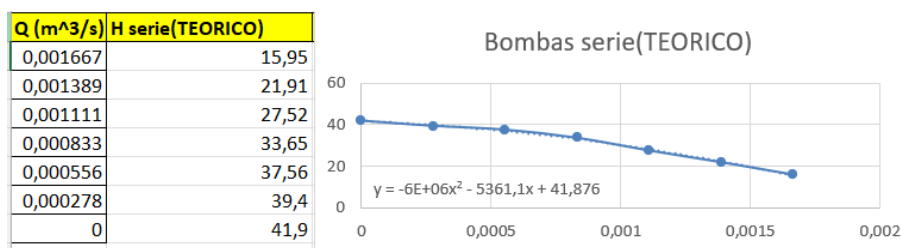


Figura 6: Gráfica de Bombas en serie Teóricamente

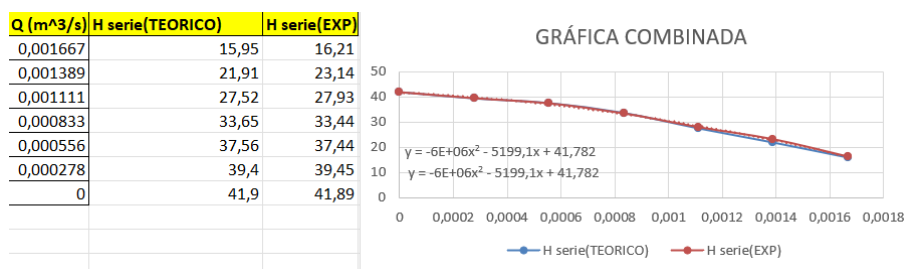


Figura 7: Gráfica combinada de la recta teórica y experimental

7. Curva Característica para Configuración en Paralelo

7.1. Datos Experimentales

Punto	1	2	3	4	5	6	7
Q (L/h)	6000	5000	4000	3000	2000	1000	0
P_{asp} (bar)	-0.21	-0.175	-0.159	-0.135	-0.122	-0.119	-0.1
P_{imp} (bar)	1.43	1.6	1.65	1.75	1.81	1.90	1.95

Cuadro 13: Mediciones del sistema en configuración PARALELO

7.2. Conversión al Sistema Internacional

Punto	Q (m ³ s ⁻¹)	P_{asp} (Pa)	P_{imp} (Pa)	H_{asp} (m)	H_{imp} (m)
1	$1,6667 \times 10^{-3}$	$-2,1 \times 10^4$	$1,43 \times 10^5$	-2.14	14.58
2	$1,3889 \times 10^{-3}$	$-1,75 \times 10^4$	$1,60 \times 10^5$	-1.78	16.31
3	$1,1111 \times 10^{-3}$	$-1,59 \times 10^4$	$1,65 \times 10^5$	-1.62	16.82
4	$8,3333 \times 10^{-4}$	$-1,35 \times 10^4$	$1,75 \times 10^5$	-1.38	17.84
5	$5,5556 \times 10^{-4}$	$-1,22 \times 10^4$	$1,81 \times 10^5$	-1.24	18.45
6	$2,7778 \times 10^{-4}$	$-1,19 \times 10^4$	$1,90 \times 10^5$	-1.21	19.37
7	0	$-1,0 \times 10^4$	$1,95 \times 10^5$	-1.02	19.88

Cuadro 14: Mediciones en paralelo convertidas al SI

7.3. Altura Manométrica Total en Paralelo

$$H_{paralelo} = H_{imp} - H_{asp}$$

Q (m ³ s ⁻¹)	$H_{paralelo}$ (m)
$1,6667 \times 10^{-3}$	16.72
$1,3889 \times 10^{-3}$	18.09
$1,1111 \times 10^{-3}$	18.44
$8,3333 \times 10^{-4}$	19.22
$5,5556 \times 10^{-4}$	19.69
$2,7778 \times 10^{-4}$	20.58
0	20.90

Cuadro 15: Altura manométrica total experimental en paralelo

7.4. Curva Característica Teórica en Paralelo

Para el cálculo de la curva característica en paralelo debemos tener en cuenta que:

- **Altura igual:** $H_1 = H_2 = H_{paralelo}$ (misma altura para ambas bombas)
- **Suma de caudales:** $Q_{paralelo} = Q_1 + Q_2$ (caudal total es la suma)

Q_{bomba} (m ³ s ⁻¹)	Q_{total} (m ³ s ⁻¹)	H_{B1} (m)	H_{B2} (m)	$H_{paralelo}$ (m)	$H_{estimada}$ (m)
0,00166667	0,00333334	6,32	9,63	16,72	7,97
0,00138889	0,00277778	9,78	12,13	18,09	10,96
0,00111111	0,00222222	13,15	14,37	18,44	13,76
0,00083333	0,00166666	16,42	17,23	19,22	16,83
0,00055556	0,00111112	18,45	19,11	19,69	18,78
0,00027778	0,00055556	19,37	20,03	20,58	19,70
0	0	20,90	21,00	20,90	20,95

Cuadro 16: Comparativa de alturas en configuración paralelo

7.5. Análisis Comparativo

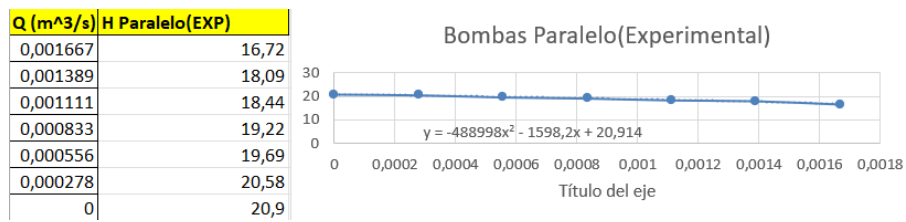


Figura 8: Gráfica de Bombas en Paralelo Experimentalmente

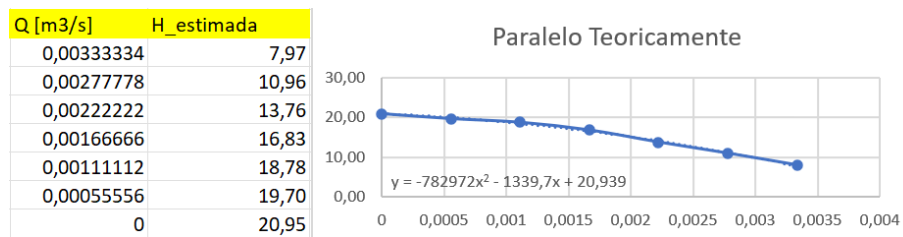


Figura 9: Gráfica de las bombas en paralelo teóricamente

8. Análisis de los Resultados Obtenidos

8.1. Configuración en Serie

Q (m ³ /s)	bomba 1	bomba 2	Bombas serie
0,001667	6,32	9,63	16,21
0,001389	9,78	12,13	23,14
0,001111	13,15	14,37	27,93
0,000833	16,42	17,23	33,44
0,000556	18,45	19,11	37,44
0,000278	19,37	20,03	39,45
0	20,9	21	41,89

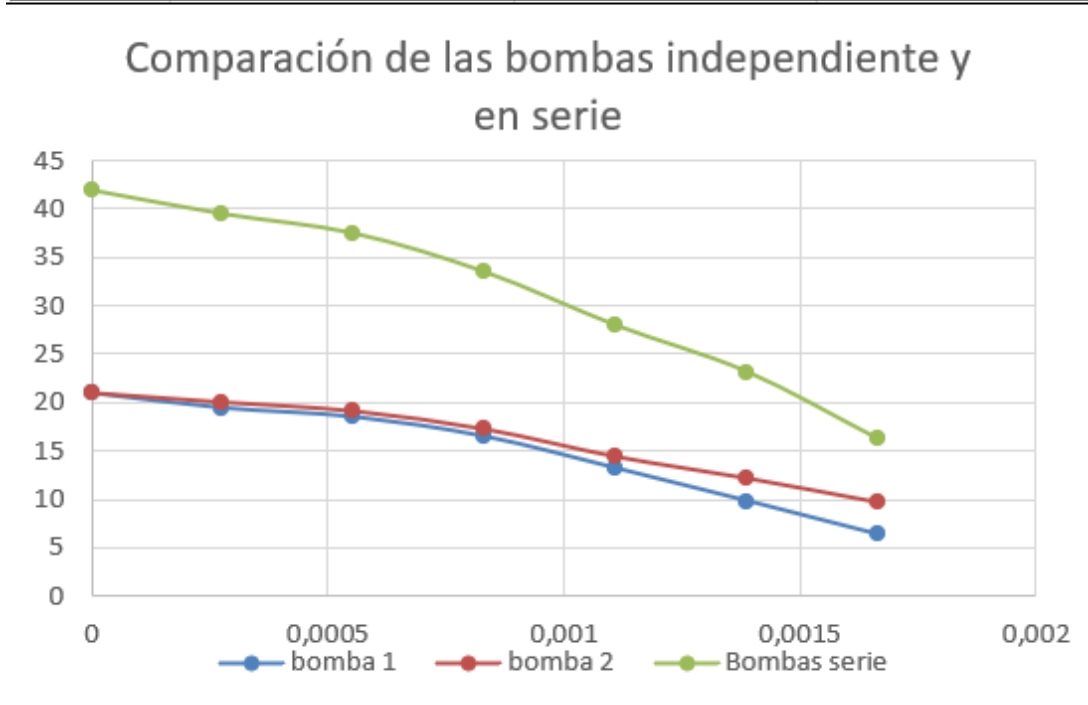


Figura 10: Comparación de las bombas en Serie

En la figura 7 se presentan los valores obtenidos tanto teórica como experimentalmente para el sistema en configuración serie, donde se observa una notable correlación entre ambos conjuntos de datos.

8.2. Configuración en Paralelo

Q (m ³ /s)	bomba 1	bomba 2	Bombas Paralelo
0,001667	6,32	9,63	16,72
0,001389	9,78	12,13	18,09
0,001111	13,15	14,37	18,44
0,000833	16,42	17,23	19,22
0,000556	18,45	19,11	19,69
0,000278	19,37	20,03	20,58
0	20,9	21	20,9

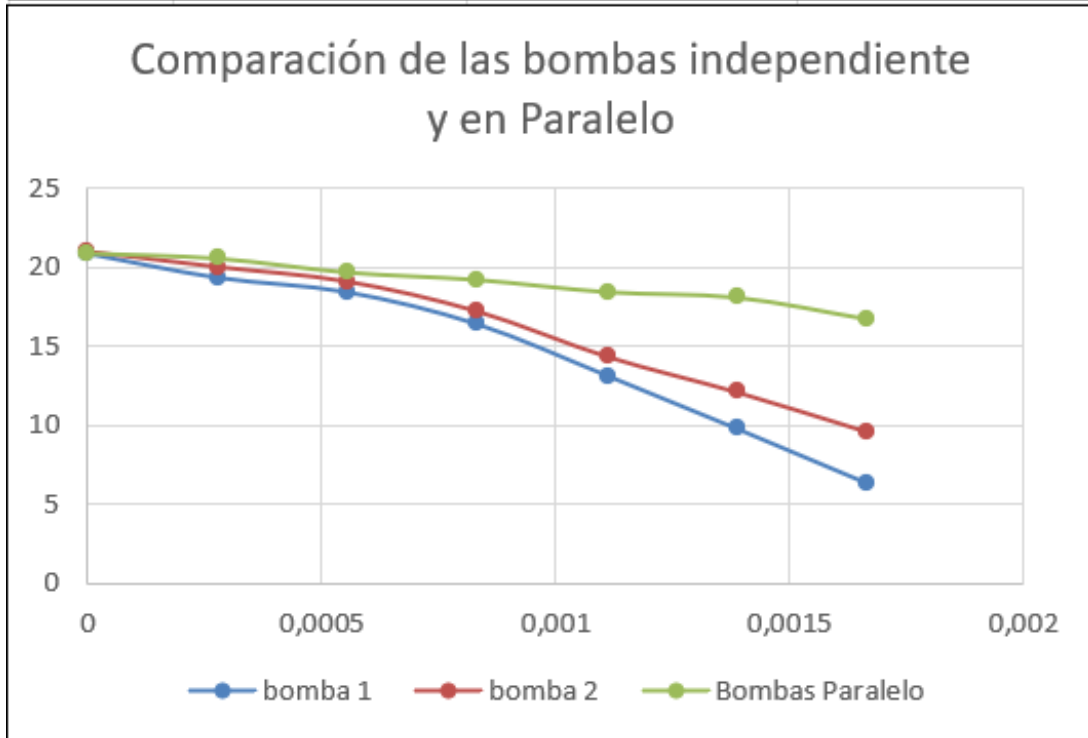


Figura 11: Comparación de las bombas en Paralelo

La gráfica de la figura 8 experimental evidencia que las bombas en paralelo proporcionan un caudal mayor manteniendo una altura relativamente estable, y el comportamiento obtenido concuerda con lo esperado teóricamente para este tipo de configuración.

8.3. Comparación Directa Serie vs Paralelo

Q (m ³ /s)	bomba 1	bomba 2	Bombas serie	Bombas Paralelo
0,001667	6,32	9,63	16,21	16,72
0,001389	9,78	12,13	23,14	18,09
0,001111	13,15	14,37	27,93	18,44
0,000833	16,42	17,23	33,44	19,22
0,000556	18,45	19,11	37,44	19,69
0,000278	19,37	20,03	39,45	20,58
0	20,9	21	41,89	20,9

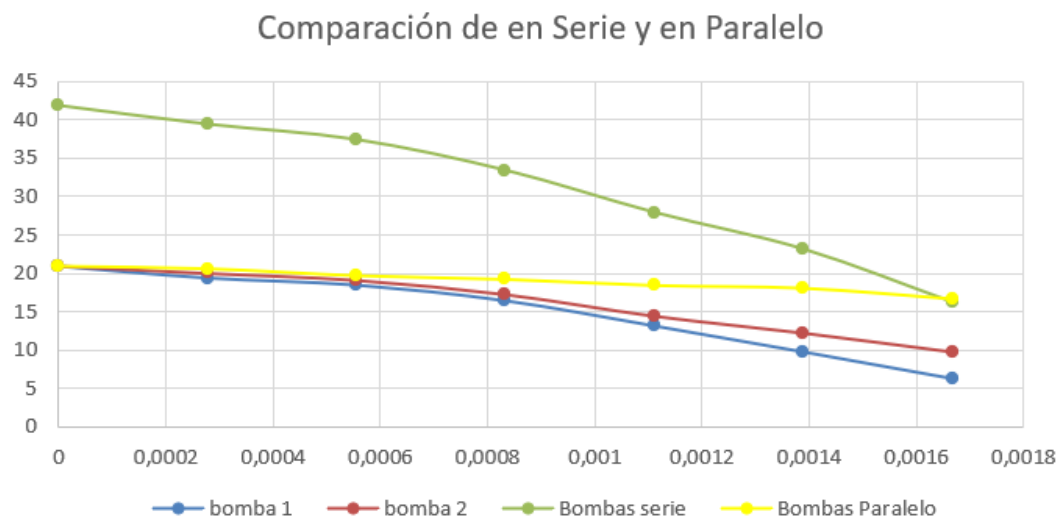


Figura 12: Comparación de Todas las Configuraciones

Los resultados experimentales obtenidos para ambas configuraciones, utilizando las mismas bombas en cada caso, revelan diferencias significativas en el comportamiento del sistema. Como se observa en la Figura 11, la configuración en serie genera alturas manométricas considerablemente superiores, alcanzando un máximo de 41,89 m con caudal nulo. Por el contrario, el sistema en paralelo mantiene una presión moderada de aproximadamente 20 m a lo largo de todo el rango de caudales.

Este comportamiento contrastante evidencia las ventajas específicas de cada configuración: mientras el sistema en serie es ideal para aplicaciones que requieren alta presión con caudal moderado, la configuración en paralelo resulta superior cuando se necesita operación simultánea de múltiples funciones con mayor demanda de caudal.

8.4. Conclusiones

La concordancia entre los valores teóricos y experimentales demuestra la robustez de la metodología empleada y la validez de los modelos matemáticos utilizados para predecir el comportamiento de los sistemas de bombeo complejos.