

## ANALISIS DE RESULTADOS

Una gran variedad de bombas se encuentran disponibles para transportar líquidos en sistema de flujo de fluidos. La selección y aplicación adecuadas de las bombas requieren una comprensión de sus características de funcionamiento y usos típicos. En esta sección se discutirá el comportamiento de las curvas características de un sistema de bombas centrífugas operando de forma individual y en serie, operando a las siguientes condiciones de presión  $(692,1 \pm 0,1)\text{mmHg}$  y temperatura  $(26,0 \pm 0,1)^\circ\text{C}$ .

A continuación se evaluarán los comportamientos de las bombas trabajando en forma individual mediante la comparación de los valores experimentales con los suministrados por el fabricante.

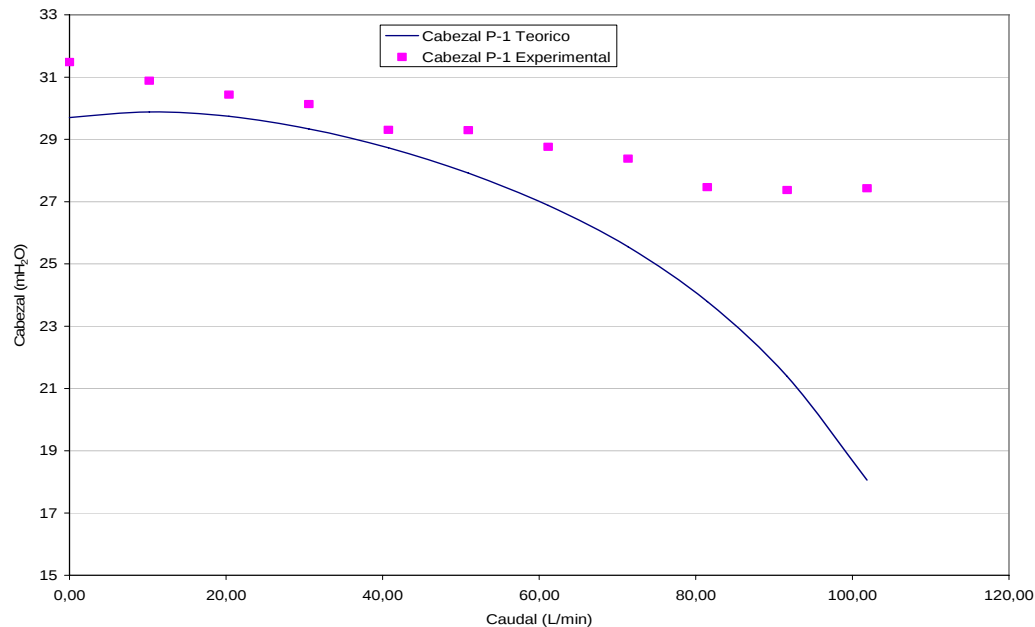
La siguiente tabla muestra los valores teóricos y prácticos de cabezal, proporcionados por el fabricante y obtenidos mediante la experiencia realizada, para la bomba de 110v:

**Tabla N° 1:** Cabezales teóricos y prácticos para la bomba de 110v.

| Caudal<br>(L/min) | Cabezal Teorico<br>(m H <sub>2</sub> O) | Cabezal Experimental<br>(m H <sub>2</sub> O) | %Desviacion |
|-------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------------|-------------|
| 101,88            | 18,06                                   | 27,43                                        | 51,88       |
| 91,68             | 21,39                                   | 27,38                                        | 27,98       |
| 81,48             | 23,79                                   | 27,47                                        | 15,46       |
| 71,34             | 25,55                                   | 28,38                                        | 11,07       |
| 61,14             | 26,88                                   | 28,76                                        | 7,01        |
| 50,94             | 27,92                                   | 29,30                                        | 4,93        |
| 40,75             | 28,73                                   | 29,31                                        | 2,01        |
| 30,56             | 29,34                                   | 30,13                                        | 2,70        |
| 20,38             | 29,74                                   | 30,43                                        | 2,34        |
| 10,19             | 29,88                                   | 30,88                                        | 3,36        |
| 0,00              | 29,7                                    | 31,48                                        | 5,99        |

En la tabla N° 1 se observa que existe discrepancia entre los valores experimentales y teóricos correspondiente al cabezal de la bomba de 110v para los diferentes caudales, llegándose a obtener una desviación máxima de 51,88% y una desviación mínima de 2,01%, para caudales de 101,88 L/min y 40,75 L/min, respectivamente.

Para una mejor ilustración de lo expuesto en la tabla anterior se presenta la siguiente grafica:



**Gráfico N° 1:** Comportamiento del cabezal teórico y experimental para la bomba de 110v con respecto a diferentes caudales.

En la gráfica N° 1 se observa que la curva obtenida por medio de los datos recogidos experimentalmente posee la misma tendencia decreciente en comparación con la presentada por el fabricante, por lo que se demuestra que el cabezal de la bomba disminuye a medida se aumenta el flujo volumétrico de agua.

Si se sigue la trayectoria a través de toda la curva se obtiene que los porcentajes de desviación con respecto a la curva suministrada por el fabricante se mantienen bajos para caudales entre (0-70)L/min, sin embargo cuando el caudal es mayor al rango anterior, el porcentaje de desviación aumenta notablemente hasta un máximo de 51%. Esto se debe a que al aumentar el caudal se incrementan considerablemente las pérdidas por fricción.

Puesto que el cabezal de una bomba representa la cantidad de energía que se añade a un fluido a medida que pasa a través de la bomba, la capacidad de una bomba para suministrar energía decrece a medida que el caudal aumenta [MOTT,1996]. Las fuerzas asimétricas generadas dentro de la bomba cuando el ángulo de la velocidad relativa en la entrada a los álabes es inapropiado (no es el considerado en el diseño), así como los efectos de fricción provocan pérdidas de cabezal [STREETER, 2000]. Ambos tipos de pérdidas varían con el caudal. Puede observarse que la curva obtenida cumple con esta tendencia, mientras que las de fricción se incrementan a lo largo del tiempo en que opera la bomba, debido a la erosión, problemas de cavitación, aparición de óxido y deposición de sales minerales dentro de la bomba. Esto también ocurre en el sistema de tuberías, lo puede provocar que las pérdidas por fricción a lo largo del sistema sean mayores de lo calculado. Otras causas para la disminución del cabezal suministrado por la bomba son incrementos de la fricción interna entre los componentes de la bomba, debido a desgaste, y posibles escapes internos a través de pequeñas luces, que causan pérdidas importantes cuando el fluido luego de chocar con el impulsor, en lugar de ser recogido por la voluta se devuelve hasta el lado de succión del impulsor [STREETER, 2000].

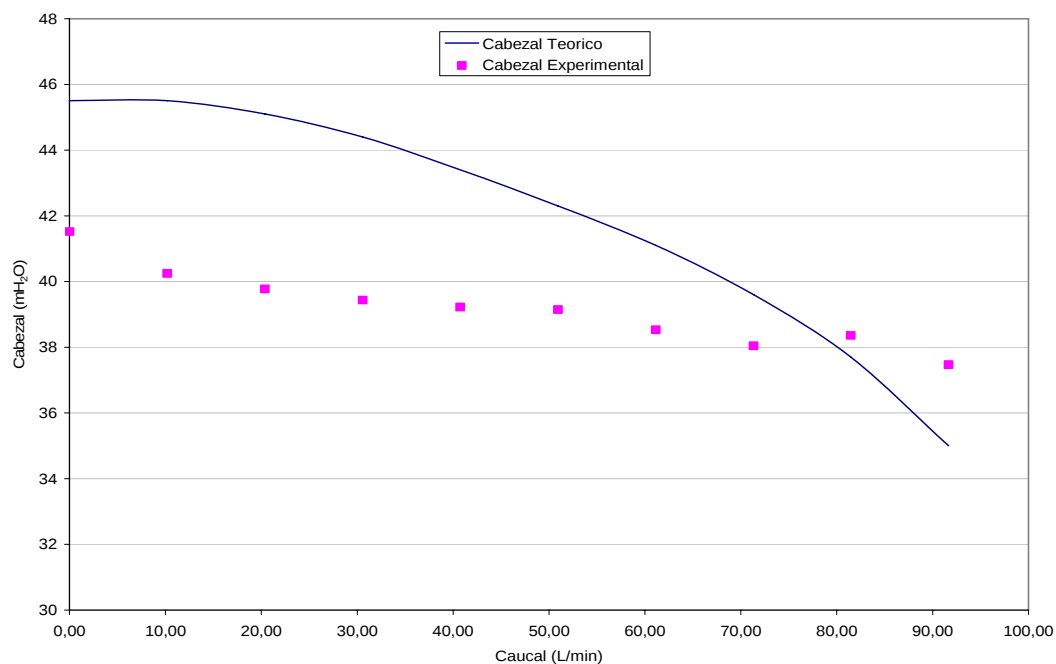
La siguiente tabla muestra los valores teóricos y prácticos de cabezal, proporcionados por el fabricante y obtenidos mediante la experiencia realizada, para la bomba de 220v:

**Tabla N° 2:** Cabezales teóricos y prácticos para la bomba de 220v.

| Caudal<br>(L/min) | Cabezal Teorico<br>(m H <sub>2</sub> O) | Cabezal Experimental<br>m H <sub>2</sub> O) | %Desviacion |
|-------------------|-----------------------------------------|---------------------------------------------|-------------|
| 91,68             | 35,00                                   | 37,47                                       | 7,05        |
| 81,48             | 37,70                                   | 38,36                                       | 1,75        |
| 71,34             | 39,60                                   | 38,04                                       | 3,93        |
| 61,14             | 41,10                                   | 38,53                                       | 6,25        |
| 50,94             | 42,30                                   | 39,15                                       | 7,46        |
| 40,75             | 43,40                                   | 39,22                                       | 9,62        |
| 30,56             | 44,40                                   | 39,43                                       | 11,18       |
| 20,38             | 45,10                                   | 39,78                                       | 11,81       |
| 10,19             | 45,50                                   | 40,25                                       | 11,54       |
| 0,00              | 45,50                                   | 41,52                                       | 8,75        |

En la tabla N° 2 se observa que no existe mayor discrepancia entre los valores experimentales y teóricos correspondiente al cabezal de la bomba de 220v para los diferentes caudales, llegándose a obtener una desviación máxima de 11,81% y una desviación mínima de 1,75%, para caudales de 20,38 L/min y 81,48 L/min, respectivamente.

Para una mejor comprensión del comportamiento de los datos de la tabla anterior, se presenta la siguiente gráfica:

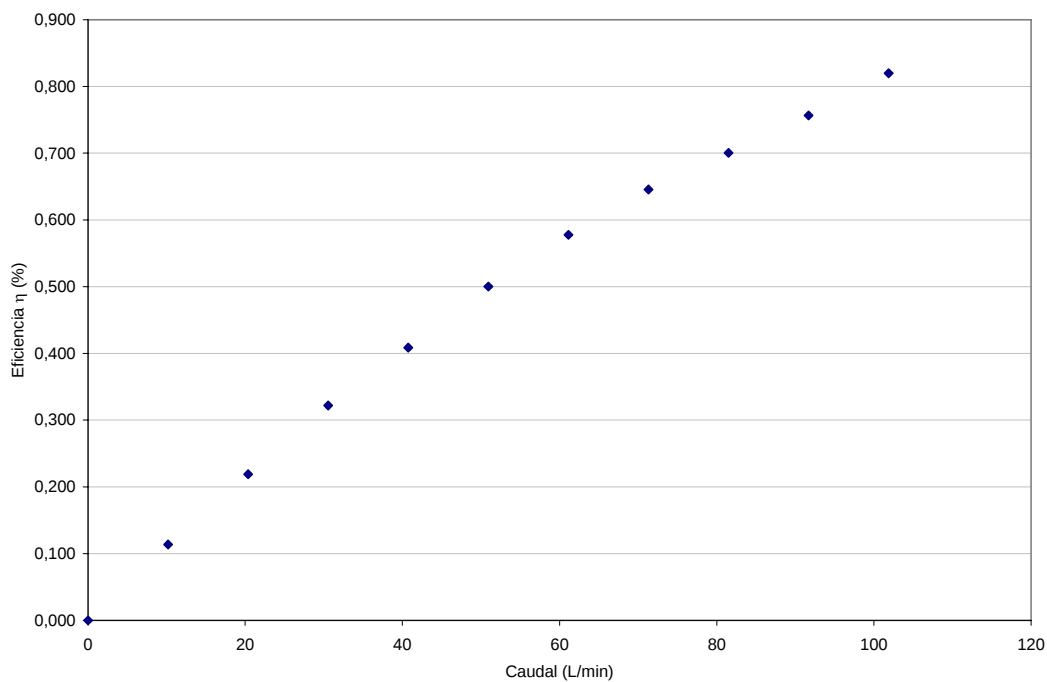


**Gráfico N° 2:** Comportamiento del cabezal teórico y experimental para la bomba de 220v con respecto a diferentes caudales.

En la gráfica N° 2 se aprecia que las curvas experimental y la proporcionada por el fabricante presenta un comportamiento similar por lo que se demuestra que el cabezal de la bomba disminuye a medida se aumenta el flujo volumétrico de agua. Estudiando los comportamientos de las curvas se obtiene que los porcentajes de desviación son bajos, indicando una buena precisión en los datos experimentales.

A continuación se estudiarán las curvas características de un sistema de bombas centrífugas operando de forma individual.

La gráfica siguiente ilustra el comportamiento de la eficiencia de la bomba centrífuga de 110v con respecto al caudal manejado:



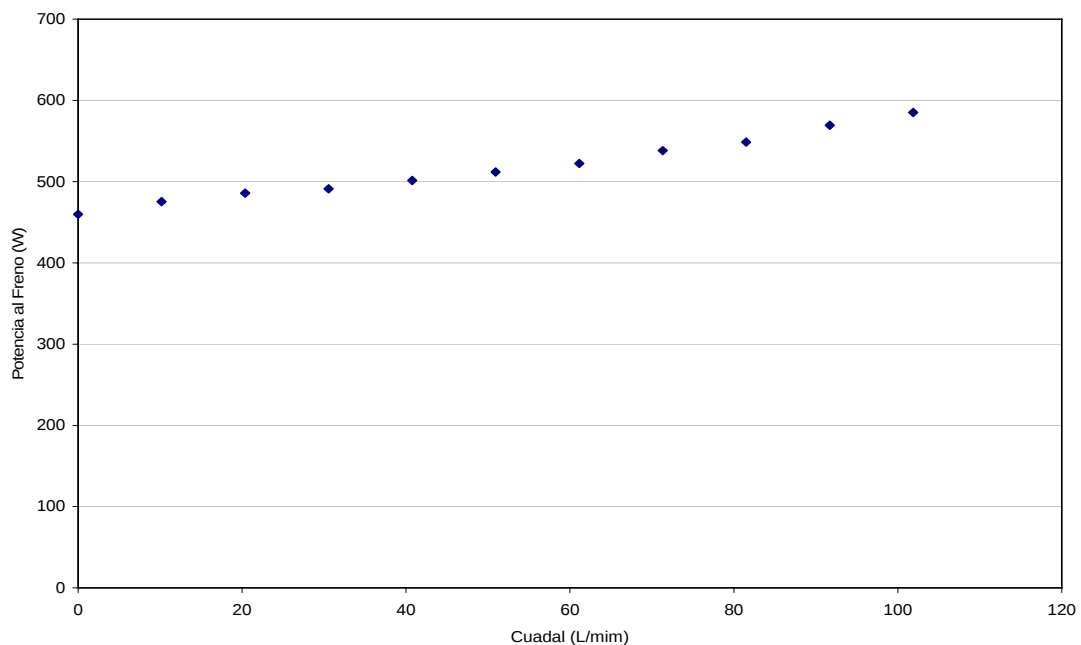
**Gráfico N° 3:** Comportamiento de la eficiencia para la bomba de 110v con respecto a diferentes caudales.

En la gráfica N° 3, se observa que el comportamiento de la curva de eficiencia de la bomba de 110v aumenta hasta alcanzar un valor máximo. Este comportamiento se debe a que las bombas centrífugas tienen un punto de operación óptimo para el cual la eficiencia es máxima, y este punto depende de consideraciones de diseño. El ángulo dado a los álabes del impulsor se fija tomando en cuenta cierta velocidad relativa del fluido a la entrada al impulsor. Cuando la velocidad del fluido no es la de diseño, se generan fuerzas

asimétricas dentro de la bomba que provocan turbulencias e inducen pérdidas, lo que causa que cuando la velocidad de operación se aleja de la de diseño, caiga la eficiencia [STREETER, 2000], caso que no se observa en la gráfica debido al caudal de operación manejado.

El punto de máxima eficiencia se sitúa en 82% para un caudal de 101,88 L/min. Valor aceptable, considerando que para bombas centrífugas utilizadas principalmente para transferir líquidos o hacerlos circular, el intervalo de eficiencias está comprendido entre 50% y 85% , aproximadamente [MOTT, 1996].

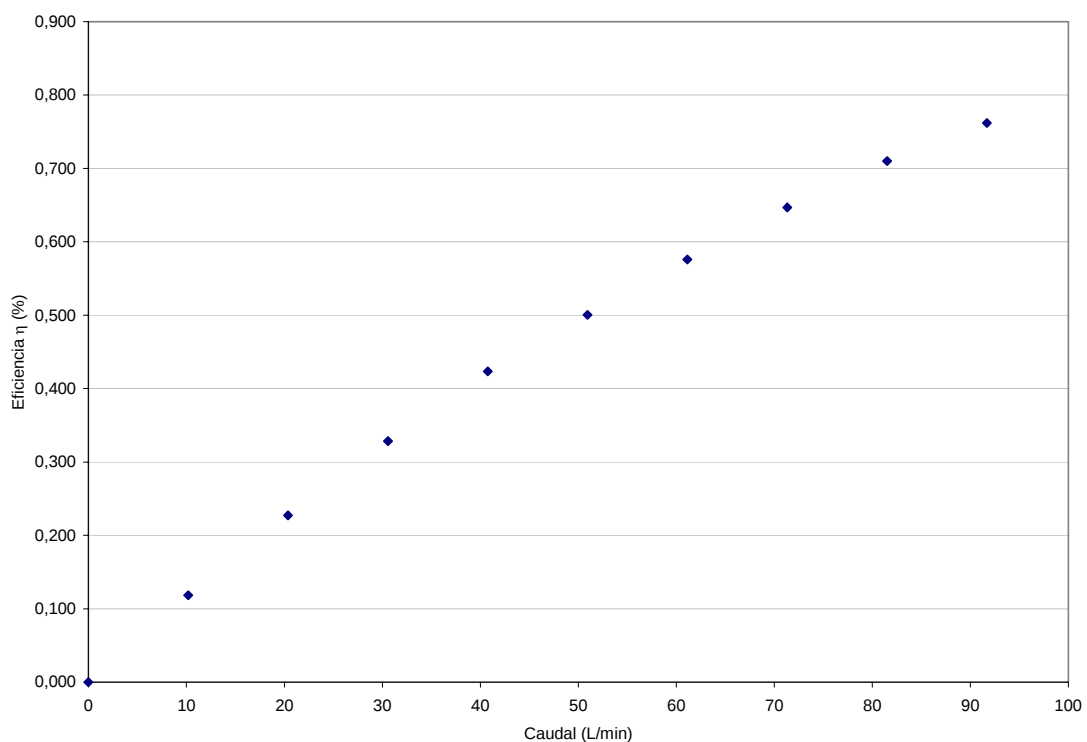
El comportamiento de la potencia al freno con respecto a diferentes caudales se muestra en la gráfica siguiente:



**Gráfico N° 4:** Comportamiento de la potencia al freno para la bomba de 110v con respecto a diferentes caudales.

La gráfica N° 4 muestra el comportamiento de la potencia al freno-caudal obtenida a partir de los resultados experimentales. La curva sigue la tendencia teórica, es decir, la potencia al freno aumenta al incrementarse el caudal de manera prácticamente lineal, esto debido a que se necesita mayor potencia para que la bomba funcione cuando se manejan grandes caudales de fluido, a pesar de que la energía efectiva entregada al fluido (representada por el cabezal) tiende a disminuir. Este comportamiento aparentemente contradictorio se debe a las relaciones entre cabezal, potencia al freno y eficiencia.

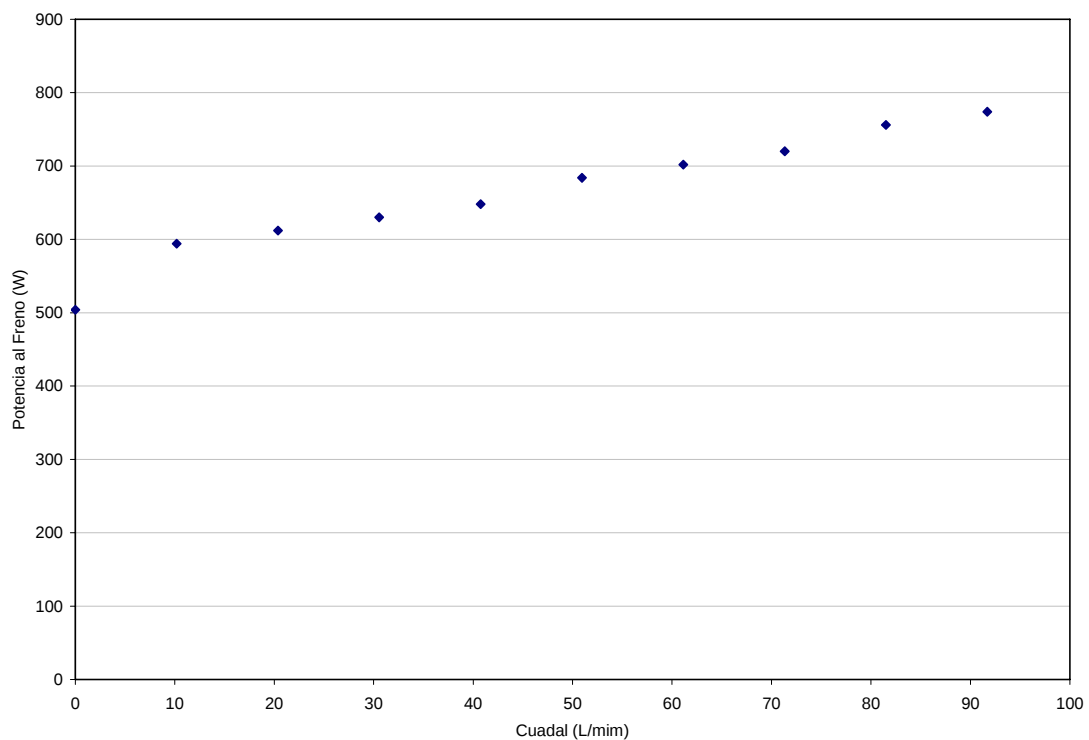
La gráfica siguiente ilustra el comportamiento de la eficiencia de la bomba centrífuga de 220v con respecto al caudal manejado:



**Gráfico N° 5:** Comportamiento de la eficiencia para la bomba de 220v con respecto a diferentes caudales.

En la gráfica N° 5, se observa que la curva aumenta hasta alcanzar un valor máximo, situado en 76,2% para un caudal de 91,69 L/min, valor aceptable, considerando que los valores reportados en la bibliografía se ubican entre un 50% y 85% [MOTT, 1996]. El comportamiento creciente de la curva se debe a que las bombas centrífugas tienen un punto de operación óptimo para el cual la eficiencia es máxima, punto que depende de las consideraciones de diseño.

El comportamiento de la potencia al freno con respecto a diferentes caudales se muestra en la gráfica siguiente:



**Gráfico N° 6:** Comportamiento de la potencia al freno para la bomba de 220v con respecto a diferentes caudales.

La gráfica N° 6 se observa que la curva posee un comportamiento creciente con una tendencia prácticamente lineal, en concordancia con los basamentos teóricos, es decir, la potencia al freno crece constantemente con el caudal elevado, esto debido a que se necesita mayor potencia para que la bomba funcione cuando se manejan grandes caudales de fluido, a pesar de que la energía efectiva entregada al fluido (representada por el cabezal) tiende a disminuir. Este comportamiento aparentemente contradictorio se debe a las relaciones entre cabezal, potencia al freno y eficiencia.

Para continuar con el estudio de las bombas centrífugas se analizará el sistema de bombas conectadas en serie.

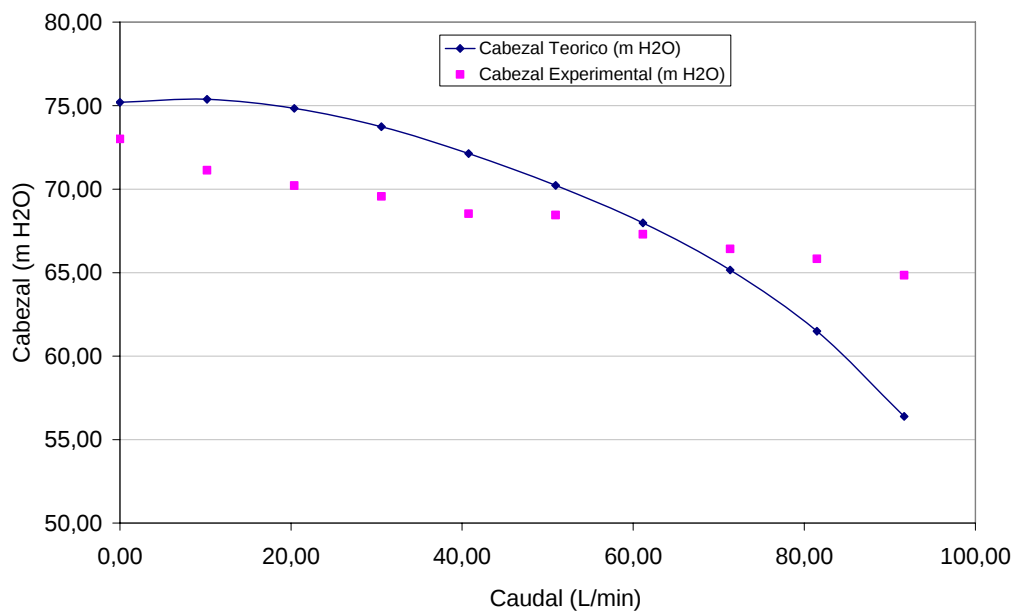
La siguiente tabla muestra los valores teóricos y prácticos de cabezal, proporcionados por el fabricante y obtenidos mediante la experiencia realizada, para un par de bombas (una bomba de 110v y otra de 220v), conectadas en serie:

**Tabla N° 3:** Cabezales teóricos y prácticos para las bombas trabajado en serie.

| Caudal<br>(L/min) | Cabezal Teorico<br>(m H <sub>2</sub> O) | Cabezal Experimental<br>(m H <sub>2</sub> O) | %Desviacion |
|-------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------------|-------------|
| 91,68             | 56,39                                   | 64,85                                        | 2,15        |
| 81,48             | 61,49                                   | 65,83                                        | 2,07        |
| 71,34             | 65,15                                   | 66,42                                        | 2,02        |
| 61,14             | 67,98                                   | 67,29                                        | 1,99        |
| 50,94             | 70,22                                   | 68,44                                        | 1,97        |
| 40,75             | 72,13                                   | 68,53                                        | 1,95        |
| 30,56             | 73,74                                   | 69,57                                        | 1,94        |
| 20,38             | 74,84                                   | 70,21                                        | 1,94        |
| 10,19             | 75,38                                   | 71,13                                        | 1,94        |
| 0,00              | 75,20                                   | 73,00                                        | 1,97        |

En la tabla N° 3, se observa que no existe mayor discrepancia entre los valores experimentales y teóricos correspondiente al cabezal del sistema de bombas operando en serie para los diferentes caudales trabajados, obteniéndose una desviación máxima de 2,15% y una desviación mínima de 1,94%, para caudales de 91,68 L/min y entre (10-30)L/min, respectivamente.

En la siguiente gráfica se estudia el comportamiento del cabezal de las bombas trabajando en serie en función del caudal manejado mediante la comparación de esta curva con la suministrada por el fabricante:



**Gráfico N° 7:** Comportamiento del cabezal para las bombas trabajando en serie con respecto a diferentes caudales.

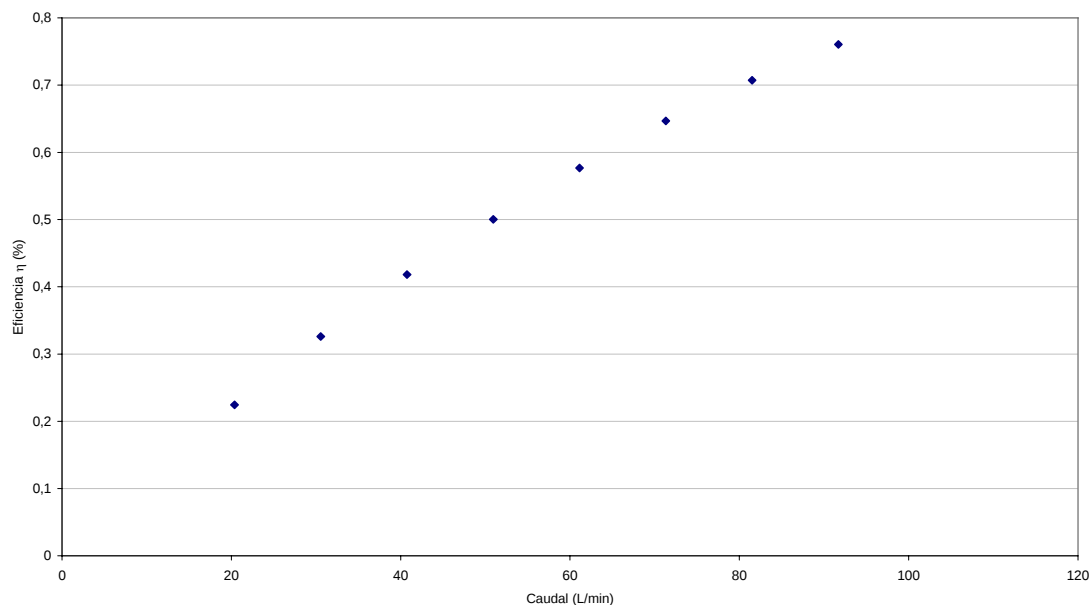
Para obtener el cabezal de un sistema de bombas trabajando en serie, se suman los cabezales de las bombas trabajando individualmente conservándose el mismo caudal, de esta manera se obtuvo la curva suministrada por el fabricante y la curva experimental. La curva que representa el sistema en serie es el equivalente a la contribución de los cabezales de cada una de las bombas. Esto se lleva a cabo cuando se necesita que el fluido recorra una distancia mayor a la que puede ofrecer cada bomba por separado, es por ello que la tendencia de la curva es similar a los sistemas bomba 110V y 220V pero con cabezales mayores que cada uno por separado.

En la gráfica N° 7 se observa que la curva obtenida por medio de los datos recogidos experimentalmente posee la misma tendencia decreciente en comparación con

la presentada por el fabricante, por lo que el cabezal de las bombas operando en serie disminuye a medida que se aumenta el flujo volumétrico de agua.

Si se sigue la trayectoria a través de toda la curva experimental se obtiene que los porcentajes de desviación, con respecto a la curva suministrada por el fabricante, son bajos, aunque al aumentar el caudal se incrementan considerablemente las pérdidas por fricción, este aspecto no desfavoreció el proceso.

En la siguiente gráfica se observa el comportamiento de la eficiencia del sistema de bombas trabajando en serie con respecto al caudal manejado:

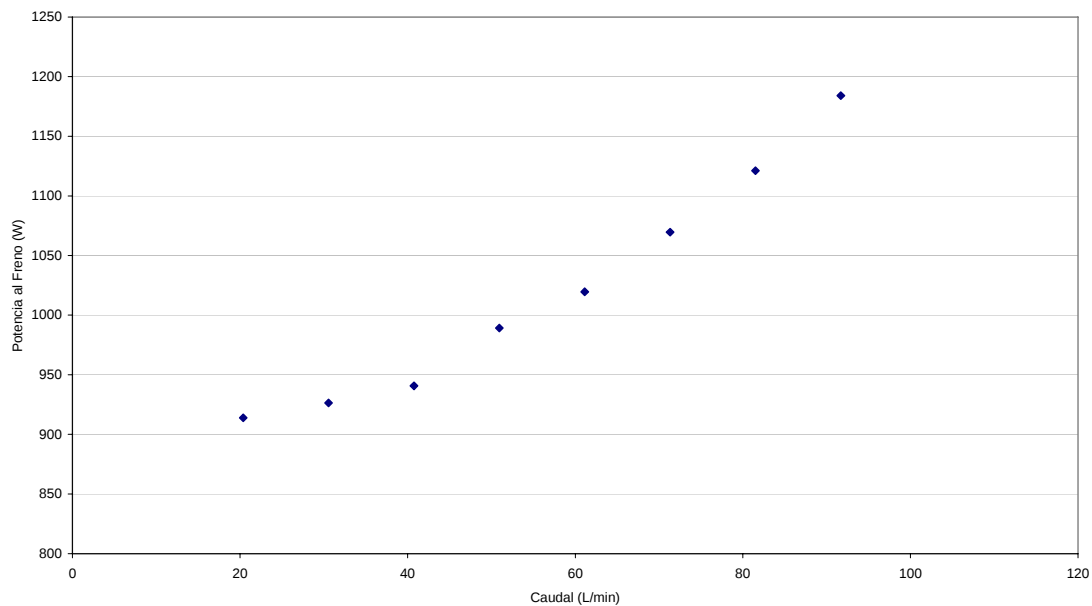


**Gráfico N° 8:** Comportamiento de la eficiencia para las bombas trabajando en serie con respecto a diferentes caudales.

En la gráfica N° 8, se observa que la eficiencia resultante de las bombas operando en serie sigue el comportamiento esperado, ya que la curva es creciente hasta alcanzar un valor máximo de 76,03% con un caudal de 91,69 L/min, resultando menor a lo obtenido para las bombas operando de manera individual, pero concuerda con lo esperado, pues

los arreglos en serie resultan menos eficientes en suministrar energía que una bomba que suministre el mismo cabezal [WHITE, 1988].

En la siguiente ilustración se observa la variación de la potencia al freno para el sistema de bombas trabajando en serie con respecto al caudal de trabajo:

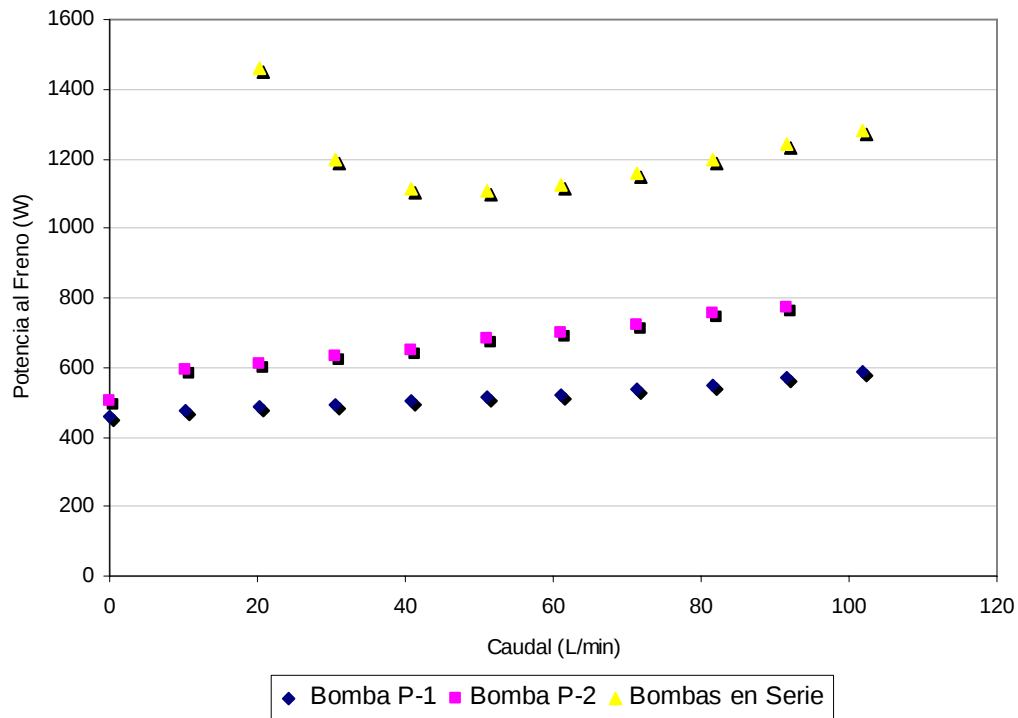


**Gráfico N° 9:** Comportamiento de la potencia al freno para las bombas trabajando en serie con respecto a diferentes caudales.

En la gráfica N° 9, puede observarse la curva de potencia al freno-caudal de las bombas operando en serie, la cual sigue el comportamiento esperado, es decir, se requiere una mayor potencia a medida que el caudal aumenta.

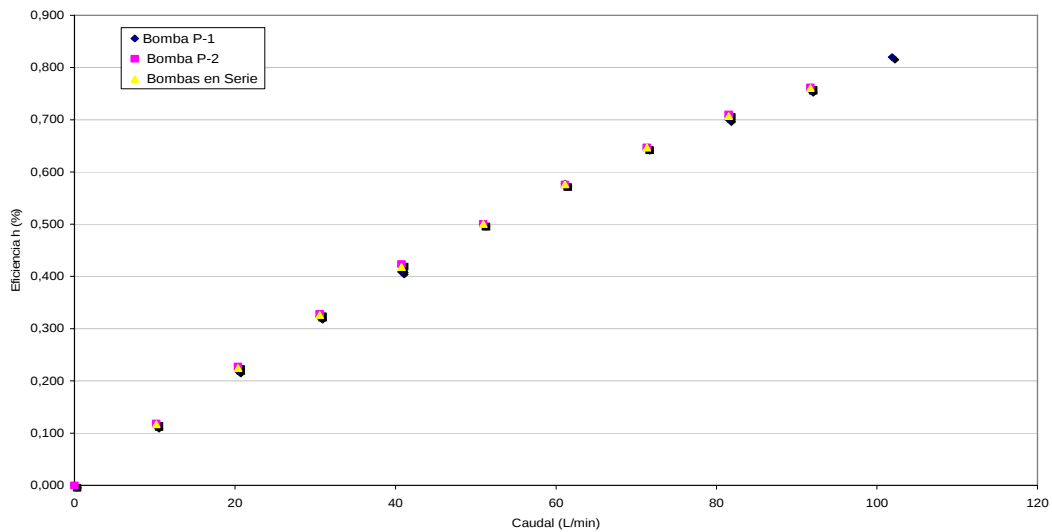
La curva sigue la misma tendencia que cada una de las bombas por separado pero con potencia al freno mayor a cada una de las mismas. Este comportamiento se debe a que cuando el sistema opera en serie la potencia al freno se incrementa ya que se necesita mayor potencia para hacer funcionar a las dos bombas al mismo tiempo.

A continuación se presenta las gráficas con las comparaciones de las curvas características experimentales para las bombas en funcionamiento individual y el sistema en serie:



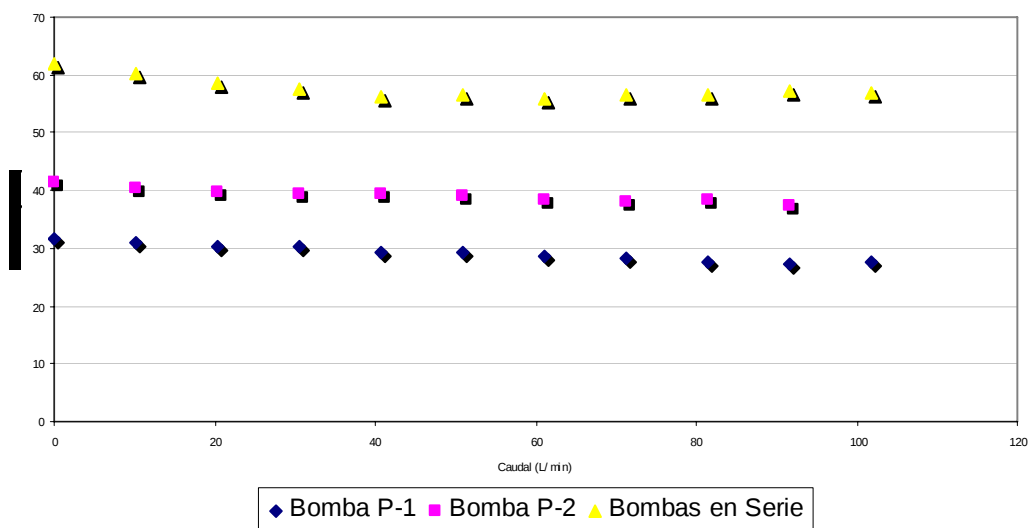
**Gráfico N° 10:** Comparación Potencia al freno respecto al caudal para las bombas operando en serie e individualmente.

En la figura anterior puede notarse que la potencia para la bomba de 220V es mayor que para la bomba de 110V; sin embargo para el sistema de bombas conectadas en serie la potencia es mucho mayor debido a que la curva resultante para el sistema en serie puede aproximarse como la suma de las curvas individuales [WHITE, 1988]. Esto también se debe a que es necesaria una mayor potencia para que ambas bombas funcionen al mismo tiempo.



**Gráfico N°11:** Comparación de la eficiencia con respecto al caudal para las bombas operando en serie e individualmente

Se puede observar que la eficiencia tanto para la bomba de 220v y 110v como para el sistema de bombas conectados en serie no alcanza su punto máximo de eficiencia igual a 85% [MOTT,1996]; debido a que las bombas poseen mayor capacidad, se debió manejar caudales más grandes para la visualización del comportamiento. También se puede ver que para un sistema en serie la eficiencia no aumenta en comparación cuando las bombas operan de forma individual.



**Gráfico N°12:** Comparación del cabezal con respecto al caudal para las bombas operando en serie e individualmente.

Puede Notarse en la figura anterior que para el sistema de bombas conectadas en serie el cabezal es mucho mayor; fenómeno que se esperaba; debido a que teóricamente el cabezal de un sistema de bombas conectadas en serie es la suma de los cabezales de las mismas cuando estas trabajan en forma individual. [WHITE, 1988]. Además puede decirse que la bomba de 220v tiene mayor cabezal hecho que es totalmente cierto puesto que es una bomba de mayor capacidad que la de 110v.