

Modificación de las condiciones de funcionamiento de una bomba centrífuga mediante la reducción del diámetro del impulsor: una aproximación experimental.

Marchegiani, Ariel Ricardo^{1,*} ariel.marchegiani@fain.uncoma.edu.ar

¹ Universidad Nacional del Comahue. Facultad de Ingeniería. Laboratorio de Máquinas Hidráulicas (La.M.Hi.) Neuquén, Argentina.

Resumen

La reducción del diámetro del rotor de una bomba centrífuga es una práctica común en la industria y se lleva a cabo con el objeto de cambiar el punto de funcionamiento de la bomba, a fin de obtener un ahorro en el consumo de energía. Esta reducción se lleva a cabo mediante las leyes de semejanza aplicadas a turbomáquinas, pero en la práctica no se cumple exactamente.

En el presente trabajo se adaptan las leyes de semejanza, a fin de obtener resultados más acertados respecto de la metodología de reducción del diámetro del rotor, con coeficientes obtenidos mediante ensayos experimentales.

Se analizaron los datos obtenidos de los ensayos y se obtuvieron las expresiones de nuevos coeficientes de las leyes de semejanza modificadas para cumplir el objetivo de una mejor aproximación.

Los resultados obtenidos a través de las modificaciones planteadas a las leyes de semejanza en lo referente al recorte del rodete de bombas centrífugas permiten obtener resultados más ajustados a la realidad que los obtenidos mediante la aplicación de las leyes de semejanza clásicas.

Palabras Clave – Bombas Centrífugas, Leyes de Semejanza, Recorte del Impulsor.

Abstract

The reduction of the rotor diameter of a centrifugal pump is a common practice in the industry and is carried out in order to change the operating point of the pump, in order to obtain a saving in energy consumption. This reduction is carried out by means of the similarity laws applied to turbomachines, but in practice it is not exactly fulfilled.

In the present work, the similarity laws are adapted in order to obtain more accurate results regarding the rotor diameter reduction methodology, with coefficients obtained through experimental tests.

The data obtained from the tests were analyzed and the expressions of new coefficients of the modified similarity laws were obtained to fulfill the objective of a better approximation.

The results obtained through the modifications made to the similarity laws regarding the impeller trimming of centrifugal pumps allow obtaining results that are closer to reality than those obtained through the application of the classical similarity laws.

Keywords – Centrifugal Pumps, Similarity Laws, Impeller Trimming.

1. Introducción

Las bombas centrífugas son una presencia inevitable de cualquier planta industrial, ya que son parte de casi todos los procesos allí presentes, y son importantes consumidoras de energía.

A pesar de una amplia gama de tipos y tamaños de bombas centrífugas, la elección de un modelo apropiado para una determinada aplicación es un problema complejo.

Como resultado de prácticas de ingeniería conservadoras, las bombas suelen ser sustancialmente más grandes que deben seleccionarse para cubrir los requisitos de un determinado proceso de una planta industrial.

Las bombas centrífugas a menudo pueden ser sobredimensionadas debido al "redondeo", tratando de acomodar aumentos graduales en la rugosidad de la tubería y la consiguiente resistencia al flujo a lo largo del tiempo, o anticipar futuras expansiones de la capacidad de la planta. Además, es posible que los requisitos de bombeo de la planta no se hayan definido claramente durante la fase de diseño.

Debido a este enfoque conservador, las bombas pueden tener puntos de operación completamente diferentes a sus puntos de diseño. La altura de la bomba suele ser menor de lo esperado, mientras que el caudal es mayor. Esto puede causar la aparición de cavitación y/o desperdicio de energía, ya que el caudal generalmente debe ser regulado por derivación o control por medio de una válvula que produce excesivas pérdidas de carga. Las bombas sobredimensionadas y reguladas por medio de válvulas que producen un exceso de presión son excelentes candidatas para recorte del impulsor, para ahorrar energía y reducir costos.

Uno de los métodos para mejorar la eficiencia de las bombas centrífugas es por medio del recorte de su rotor. Esta es una práctica común realizada en la industria cuando es necesario ajustar la altura y el caudal a las necesidades reales. Esta idea se basa en leyes de afinidad o leyes de semejanza, en las cuales los impulsores de la bomba se consideran similares si cumplen condiciones geométricas, cinemáticas y dinámicas de similitud.

De todas maneras, la bomba recortada no es estrictamente similar a la bomba inicial debido a que algunos parámetros son modificados, mientras que todos los demás permanecen sin cambios. Después de que el impulsor de la bomba se ha recortado, las condiciones de similitud no se conservan de manera estricta. La relación entre algunas dimensiones características (por ejemplo, entre la anchura del impulsor y el diámetro de salida, o entre el diámetro entrada del impulsor y diámetro de salida, etc.) sufren cambios, y por lo tanto la similitud geométrica no se alcanza. Además, la similitud cinemática no se conserva en la salida del impulsor debido a que el ángulo del álabe varía con el radio. Esto trae aparejado una disminución de la eficiencia después del recorte [1] y [2].

El efecto del recorte en el rendimiento hidráulico se puede observar en la Fig. 1. Para bombas de voluta, el impulsor completo (incluido el frente y la cubierta trasera) generalmente se recorta a un diámetro más pequeño.

Pero al mismo tiempo, las condiciones de similitud se satisfacen en muchos elementos, que incluyen la forma del impulsor, la disposición y el número de álabes del rodete, como también las condiciones cinemáticas en la entrada, la relación entre la anchura del impulsor y el diámetro de entrada, y muchos otros.

Por lo tanto, algunos autores sugieren que el recorte se debe limitar a aproximadamente 75% u 85% del diámetro del impulsor de una bomba. Un recorte excesivo puede dar lugar a un impulsor que se aleje demasiado del cumplimiento de las condiciones antes mencionadas.

A medida que el diámetro del impulsor disminuye, esto implicará una holgura entre el impulsor y la carcasa de la bomba que se traducirá en el aumento de recirculación de flujo interno, causando pérdida de carga, y la reducción de la eficiencia de bombeo.

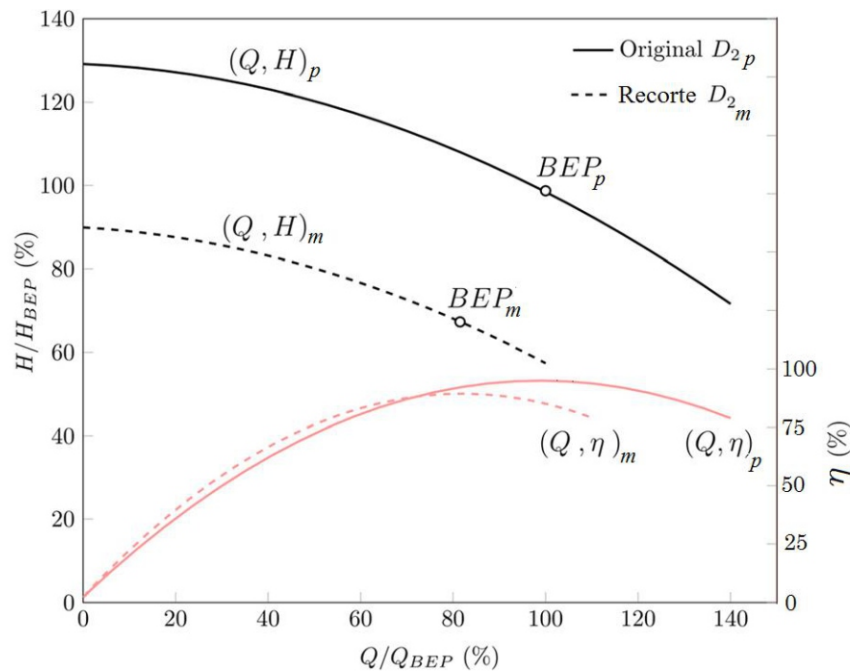


Fig. 1. Efecto del recorte sobre el rendimiento hidráulico. Los puntos de mayor eficiencia se denotan como BEP y BEP'.

Existen algunos métodos, principalmente gráficos, para estimar las nuevas condiciones de funcionamiento de una bomba centrífuga por medio del recorte de su impulsor, entre ellos se destacan los propuestos por Stepanoff [3] y Rütshi [4].

En este trabajo, se ensayaron varias bombas centrífugas industriales a las cuales se le practicaron sucesivos recortes de sus rotores a fin de obtener un modelo experimental para la aproximación de las leyes de semejanza más eficiente cuando se aplican al recorte del impulsor de una bomba centrífuga. Los impulsores originales se redujeron un 5%, 10%, 12,5% y 15%, respectivamente en su diámetro, y se realizaron sucesivos ensayos relevando sus parámetros de funcionamiento.

2. Banco de Ensayos

La Fig. 2 muestra el esquema del banco de pruebas utilizado para ensayar las bombas centrífugas mencionadas anteriormente. El líquido fluye desde la cisterna impulsado por la bomba centrífuga. El caudal es regulado a través de una válvula de globo ubicada en la tubería de impulsión, y finalmente regresa a la cisterna. El circuito de prueba se compone de una tubería de 2 ½ " de diámetro y el fluido de ensayo es agua.

Con el fin de obtener las curvas experimentales de la bomba, el procedimiento experimental implicó la medición de cuatro parámetros: la altura neta H_n entre la entrada y la salida de la bomba, el caudal Q , la tensión V y la corriente I del motor. Con estos últimos se obtiene la potencia consumida por la bomba.

Estos parámetros fueron determinados por medio de la instrumentación instalada y calibrada en el banco de ensayos. El caudal se midió con una placa orificio ubicada en la sección horizontal de la tubería de impulsión. La presión de succión se midió con un vacuómetro y la presión de descarga se midió la presión por medio de un manómetro, ambos del tipo de tubo Bourdón de clase 0,5. En la medición de tensión y corriente se utilizaron voltímetros y amperímetros.

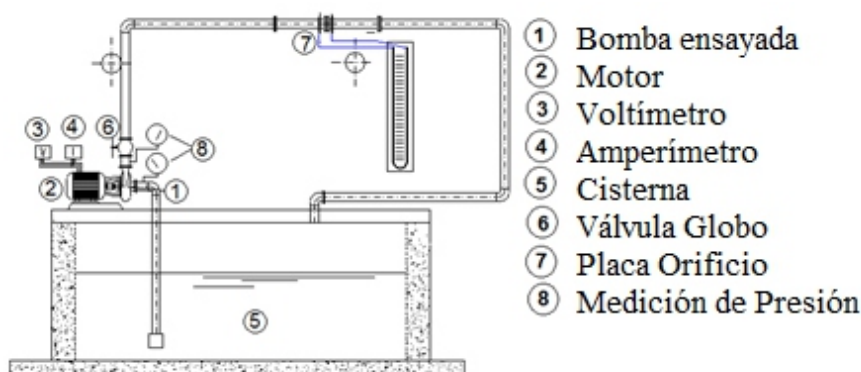


Fig. 2. Banco de ensayos.

3. Características y Ensayos de las bombas

Según Normas, para verificar el punto óptimo, se deben registrar al menos tres puntos de medición, cercanos y agrupados uniformemente alrededor de dicho punto, y para determinar el funcionamiento sobre el intervalo de operación indicado, la bomba debe ser operada desde capacidad cero hasta la máxima capacidad mostrada en la curva de operación suministrada por el fabricante, tomando como mínimo seis puntos de medición, considerando tres puntos arriba y tres abajo del punto garantizado habiendo considerado el grado de exactitud para ser llevada a cabo.

En el presente trabajo se llevaron a cabo los distintos ensayos superando la cantidad de puntos requeridos por norma, en todos los casos. Se determinó la curva experimental de la bomba para el diámetro original del rotor para luego, mediante sucesivas, reducciones del rodete bajo la misma velocidad de rotación, determinar las nuevas curvas de funcionamiento para cada recorte. En la Tabla 1 se muestran las características de las bombas ensayadas.

Tabla 1. Características de las bombas ensayadas

Fabricante	Modelo	Potencia [HP]	n [r.p.m]	D rotor [mm]	Tipo de impulsor	Nº álabes	ns_q
IRUMA S.A.	EMH-70/7	7,5	2860	180.4	Cerrado	7	21,2
IRUMA S.A.	EMH-60/5	4	2890	136,20	Cerrado	6	26.5
MARQUIS Co.	MCP 150M	1	2850	158.10	Cerrado	6	9

Donde ns_q es la velocidad específica de la bomba centrífuga obtenida como,

$$ns_q = \frac{n \cdot Q^{1/2}}{(H_n)^{3/4}} \quad (1)$$

Donde n en r.p.m., Q : caudal en m^3/s , H_n : Altura Neta en m, respectivamente.

En la Fig. 3 se observan las bombas centrífugas ensayadas.

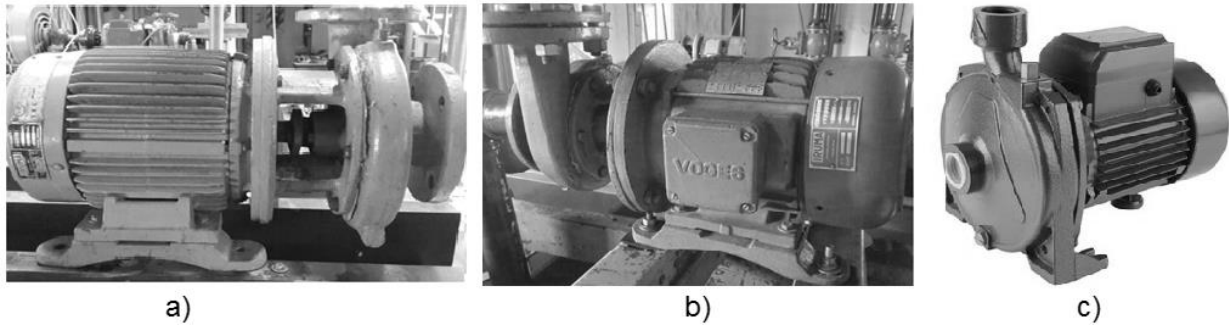


Fig. 3. a) EMH 70/7 b) EMH 60/5 c) CPM 150.

4. Leyes de Semejanza

Las leyes de semejanza se han aplicado por mucho tiempo a bombas centrífugas, las mismas posibilitan el ensayo de modelos a escala para luego poder diseñar los prototipos de los mismos teniendo en cuenta las condiciones tanto geométricas como las cinemáticas y dinámicas. Las condiciones generales de similitud hidráulica aplicadas a las bombas, intentan describir el funcionamiento de una máquina dada en comparación con el funcionamiento experimental conocido de otra máquina modelo o bien comparándola con la misma máquina bajo condiciones de operación modificadas tales como un cambio de en la velocidad de rotación o en el salto.

Para que haya una correlación entre el comportamiento de una máquina prototipo a partir de los ensayos realizados con una maquina modelo deben cumplirse tres condiciones básicas: Semejanza geométrica (proporcionalidad de longitudes), Semejanza cinemática (proporcionalidad de velocidades) y Semejanza dinámica (proporcionalidad de fuerzas).

Las leyes de semejanza pueden usarse para estimar el comportamiento hidráulico de bombas centrífugas con un cambio de velocidad o el diámetro del impulsor. De acuerdo con las leyes clásicas de similitud, se tiene en cuenta la igualdad de rendimientos. La Fig. 4 ilustra los triángulos de velocidades a la salida del impulsor cuando se acciona una bomba centrífuga en el punto de mejor rendimiento (BEP) antes y después de que el impulsor de la bomba sea recortado.

Para bombas centrífugas de baja velocidad específica, lo más probable es que el área de descarga a la salida del impulsor y el ángulo de salida del álabe permanezcan sin cambios después del recorte, como se muestra en [9-14], las leyes de afinidad para la reducción del diámetro del impulsor pueden escribirse mediante el siguiente conjunto de ecuaciones:

$$\frac{Q_m}{Q_p} = \lambda^{n_1} = \left(\frac{D_m}{D_p}\right)^{n_1} \quad \frac{H_m}{H_p} = \lambda^{n_2} = \left(\frac{D_m}{D_p}\right)^{n_2} \quad \frac{H_m}{H_p} = \lambda^{n_2} = \left(\frac{D_m}{D_p}\right)^{n_2} \quad \frac{P_m}{P_p} = \lambda^{n_3} = \left(\frac{D_m}{D_p}\right)^{n_3} \quad (2)$$

Donde n_1 , n_2 y n_3 se definen como los exponentes de las leyes de semejanza correspondientes al caudal, a la altura y a la potencia respectivamente.

Q_p , H_p and P_p , son el caudal, altura y potencia para el rotor original, y Q_m , H_m y P_m para e impulsor recortado.

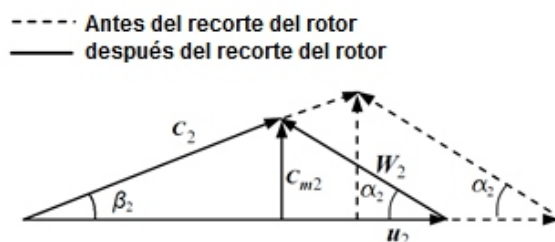


Fig. 4. Triángulo de Velocidades semejantes a la salida, antes y después del recorte del rotor, W_2 : velocidad relativa, C_2 : velocidad absoluta, u_2 : velocidad periférica, C_{m2} : velocidad meridiana.

En las leyes de semejanza clásicas los valores correspondientes a estos coeficientes son: $n_1 = 1$, $n_2 = 2$, y $n_3 = 3$. Sin embargo, la aplicación de estos valores no es del todo certera a la hora de aproximar las curvas de funcionamiento reales al recortar el impulsor. Por lo tanto, estos exponentes deben determinarse utilizando datos experimentales que arrojan los ensayos de bombas centrífugas.

$$\left\{ \begin{array}{l} n_1 = \frac{\ln\left(\frac{Q_m}{Q_p}\right)}{\ln\left(\frac{D_m}{D_p}\right)}, n_2 = \frac{\ln\left(\frac{H_m}{H_p}\right)}{\ln\left(\frac{D_m}{D_p}\right)}, n_3 = \frac{\ln\left(\frac{P_m}{P_p}\right)}{\ln\left(\frac{D_m}{D_p}\right)} \end{array} \right. \quad (3)$$

Se debe tener en cuenta que la reducción del diámetro de rodete no debe superar el 15% de las dimensiones originales del mismo y que los valores seleccionados tanto de caudal, altura como potencia deben ser homólogos para cada punto considerado como lo determinan las leyes de Semejanza. Esto implica que los puntos adoptados para las distintas reducciones deben tener igual rendimiento.

Los rotores fueron recortados en cuatro porcentajes: 5, 10, 12.5 y 15%, como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Características de los recortes

Fabricante	Mod.	Diám. rotor original [mm]	Diám. rotor Recorte I [mm]	I	Diám. rotor Recorte II [mm]	λ_{II}	Diám. rotor Recorte III [mm]	λ_{III}	Diám. rotor Recorte IV [mm]	λ_{IV}
IRUMA S.A.	EMH-70/7	180,40	171,30	0,95	162,30	0,90	157,80	0,875	153,30	0,849
IRUMA S.A.	EMH-60/5	136,20	129,30	0,95	122,50	0,90	119,10	0,875	115,70	0,849
MARQUIS Co.	MCP 150M	158,10	150,10	0,95	142,20	0,90	138,30	0,875	134,30	0,849

5. Resultados

La Fig. 5 ilustra las curvas de altura, potencia y rendimiento de las bombas ensayadas, con los cinco diámetros del impulsor, trabajando a una velocidad de rotación constante. Es obvio que las curvas de altura, potencia y eficiencia disminuyen continuamente con la reducción del diámetro. Tales patrones de variación son similares a los de investigaciones previas presentadas en [1, 2, 5].

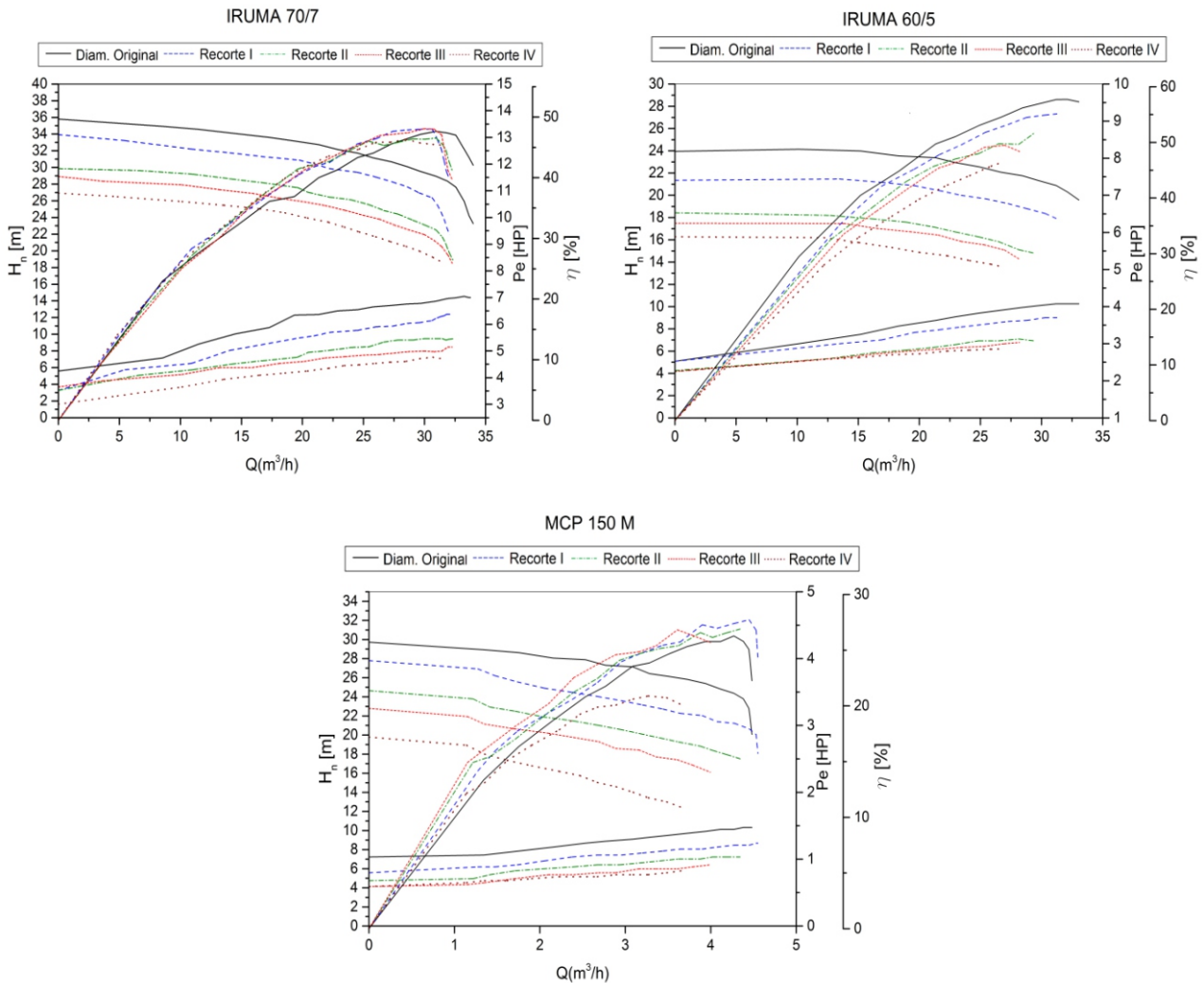


Fig. 5. Curvas de altura, potencia y rendimiento de las bombas ensayadas

Los exponentes de recorte n_1 a n_3 estimados por medio de la ecuación (3) basados en los resultados experimentales se muestran en la Fig. 6, en términos de la relación λ de diámetros del impulsor, y se observa una ligera dependencia de estos exponentes con dicha relación de diámetros. El análisis de estos coeficientes obtenidos para las distintas bombas muestra una tendencia en su variación, la que fue aproximada por una regresión lineal para cada uno de los componentes, y cuyas expresiones se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Expresiones de los coeficientes experimentales

n_1	n_2	n_3
$14,69112\lambda - 11,63783$	$-6,94016 \lambda - 8,01314$	$5,85154 \lambda - 2,15858$

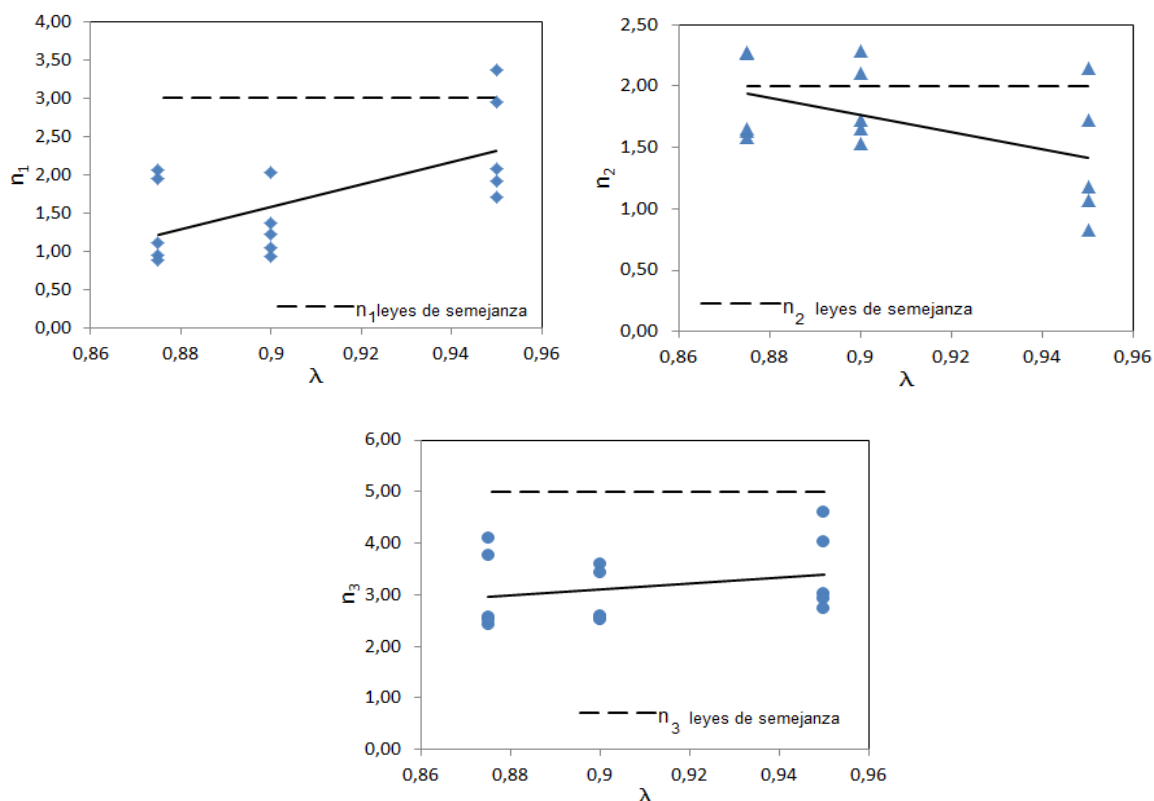


Fig. 6. Coeficientes n_1 , n_2 y n_3 estimados por medio de la ecuación (3).

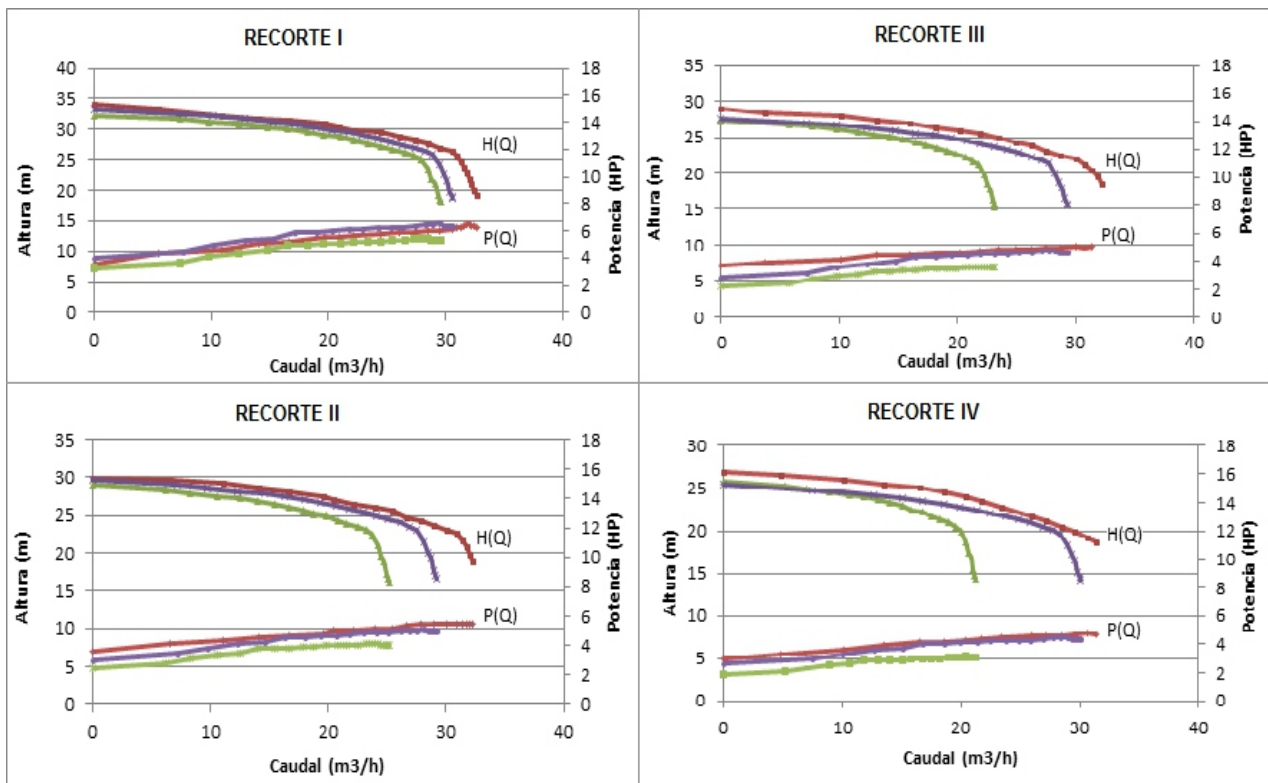
5.1. Comparación de los Coeficientes Experimentales con respecto a Leyes de Semejanza pura.

Se llevó a cabo una comparación de los datos experimentales de las bombas ensayadas con los resultados arrojados por las leyes de semejanza pura y los resultantes de las leyes modificadas con los coeficientes hallados, a fin de comprobar si existían mejoras con respecto a los resultados teóricos que generalmente se utilizan.

A modo de ejemplo se presentan en la Fig. 7 los resultados obtenidos para la bomba centrífuga IRUMA 70-7. Los coeficientes hallados para dicha bomba se observan en la Tabla 4.

Tabla 4. Coeficientes experimentales para la bomba IRUMA 70-7

		n_1	n_2	n_3
λ_1	0,95	2,318734	1,419988	3,400383
λ_2	0,9	1,584178	1,766996	3,107806
λ_3	0,875	1,2169	1,9405	2,9615175
λ_4	0,85	0,849622	2,114004	2,815229



— Valores Experimentales — Semejanza pura — Con Coeficientes calculados

Fig. 7. Análisis de resultados para la bomba IRUMA 70-7

Como puede observarse, las curvas obtenidas mediante los coeficientes experimentales no solo se aproximan de una manera más precisa a las obtenidas experimentalmente para cada una de las reducciones, sino que además cubre en su mayoría el rango de aplicación de caudales para las curvas de Altura y de Potencia.

6. Conclusiones

Se llevó a cabo la investigación del cambio de las condiciones de funcionamiento de una bomba centrífuga mediante la reducción del diámetro del rotor y se analizaron los resultados de los diferentes ensayos a fin de obtener una aproximación experimental de los coeficientes de las leyes de semejanza clásica para mejorar la predicción del funcionamiento de una bomba centrífuga cuando se recorta su impulsor. Las siguientes conclusiones pueden ser hechas:

A medida que el diámetro se reduce, las curvas de altura y potencia disminuyen continuamente, sin embargo, el rendimiento aumenta al principio hasta alcanzar un máximo y luego cae hasta cierto valor para el máximo caudal.

Se observa que el rendimiento varía a medida que se recorta el impulsor, por lo tanto, el concepto de “recorte a eficiencia constante” es incorrecto. De todas maneras, las aproximaciones obtenidas mediante los coeficientes hallados fueron satisfactorias de acuerdo a los resultados alcanzados en cada una de las bombas ensayadas.

Puede verse que los exponentes hallados dependen exclusivamente del porcentaje de reducción llevada a cabo en el diámetro del impulsor.

Se pudo apreciar una divergencia considerable en cuanto a la aproximación del caudal a través de los Coeficientes Experimentales hallados y los determinados por las Leyes de Semejanza pura. Esta diferencia se obtuvo en cada una de las reducciones del rodete independientemente de la velocidad específica de la máquina.

Si bien, por razones de espacio no se muestran en el presente trabajo, los análisis realizados evidencian que a medida que aumenta la velocidad específica (el rotor se vuelve más axial), el error de caudal cometido a través de ambas aproximaciones es más significativo. Esto se debe principalmente a una creciente variación del ángulo de salida del álabe.

La metodología propuesta fue muy satisfactoria, sin embargo, se cree que puede ser mejorada en gran medida. Esto se puede lograr implementando el ensayo de mayor cantidad de bombas. De esta manera se podrán obtener resultados más exactos y además que puedan cubrir un rango de velocidades específicas más amplio. Además, se deberá tener en cuenta la variabilidad del rendimiento que se produce al recortar el impulsor.

7. Referencias

- [1] Gulich, J. "Performance characteristics," in *Centrifugal Pumps*, 2nd ed., Springer Heidelberg Dordrecht London New York, USA, 4ª edición, 2020, ISBN 978-3030147877, pp. 165–182.
- [2] Detert Oude Weme D., Van der Schoot M., Kruyt N. , Van der Zijde E., "Prediction of the Effect of Impeller Trimming on the Hydraulic Performance of Low Specific-Speed Centrifugal Pumps", *Journal of Fluids Engineering*, Transactions of the ASME, 2018, Vol. 140 / 081202, pp 1-7.
- [3] Stepanoff A. J., "Specific Speed and Design Constants", in *Centrifugal and Axial Flow Pumps: Theory, design and application*; , John Wiley & Sons, New York, USA, 1957, ISBN 978-0-89464-723- 9, pp 69-89.
- [4] C. Pfeleiderer, "Die Kenngrößen der verschiedenen Radformen", in *Die Kreiselpumpen für Flüssigkeiten und Gase*, Berlin / Göttingen / Heidelberg, Springer –Verlag, 1955, E, 33, pp 164-165.
- [5] C. Sutardi D., Adliansuah R., Effect of impeller Trimming on Centrifugal Pump, *Rekayasa Mesin*, Mechanical Engineering Department, Faculty of Engineering, Brawijaya, Malang-East Java-Indonesia, 2021, Vol. 12 No. 3.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido llevado a cabo gracias al apoyo de la Universidad Nacional del Comahue (Proyecto de Investigación 04/I 268), por el apoyo brindado en la presente investigación.