



Actualización sobre el empleo de alabes de regulación de entrada en el bombeo de líquidos

An update about Inlet guide vanes in centrifugal pumps

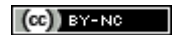
Oswaldo Heriberto Mariño-Abarca¹, †Juan José González-Bayón^{II},
Reinaldo Delgado-García^I, Rubén Borrajo-Pérez^{II, *}

I. ESPE. Universidad de las Fuerzas Armadas, Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica. Sangolquí, Ecuador.

II. Universidad Tecnológica de la Habana José Antonio Echeverría. Centro de Estudio de Tecnologías Energéticas Renovables. La Habana. Cuba

*Autor de correspondencia: borrajo@ceter.cujae.edu.cu

Este documento posee una [licencia Creative Commons Reconocimiento-No Comercial 4.0 internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



Recibido: 8 de marzo de 2019

Aceptado: 12 de mayo de 2019

Resumen

Los prerotadores de flujo empleados en compresores centrífugos, han demostrado su utilidad para régimen de trabajo fuera de diseño. Actualmente están expandiéndose a las bombas centrífugas. Denominados perfiles guía de entrada y dispuestos en la succión de la turbo-máquina delante del impelente, provocan una prerotación del flujo. La prerotación resulta de la inducción de una desviación angular de la velocidad absoluta del fluido al ingresar al impelente. La velocidad circunferencial de entrada al rodete afecta la eficiencia y la carga de la bomba, regulando así su régimen de funcionamiento. Los resultados muestran que la fricción con la superficie del perfil, los vórtices creados y la obstrucción al fluido que estos dispositivos crean degrada el performance de la bomba ante la cavitación. Una conclusión

del trabajo es que el empleo de los prerotadores no ha sido suficientemente investigado, notándose aspectos no totalmente dilucidados sobre su empleo en bombas. Las técnicas de dinámica computacional son de utilidad, reduciendo los costos de los análisis. En los trabajos analizados, el empleo de prerotadores con un perfil, un número, un ángulo y a una distancia de la succión, modificaron el patrón de flujo a la entrada del rodete, el comportamiento y la aparición de la cavitación en bombas trabajando fuera de condiciones de diseño.

Palabras claves: perfiles guía de entrada, prerotadores, bomba centrífuga.

Abstract

The flow rotation traditionally used in centrifugal compressors, have been useful for work regimes far from the nominal. This technique, is being applied in centrifugal pumps looking for the same effect. They are called inlet guide vanes and are employed to regulate the flow inlet. They are arranged at inlet of the turbomachine before the impeller, inducing a prewhirl of the flow field. That rotation is result of the angular deviation induced to the absolute speed of the fluid in the impeller. The circumferential velocity at the inlet of the impeller is related to the efficiency and head of a centrifugal pump, regulating its operating regime. Due to the surface friction over the profile, the vortices and flow

obstruction, they limit the pump capacity to overcome cavitation. The literature shows that the use of pre rotators has not been investigated enough. Computational fluid dynamics is a very useful technique to made cheaper analysis. However, it is proved that using pre rotators located next to the inlet pump, with a given profile and some rotation angle, modify the flow pattern at the inlet of the impeller. As results the centrifugal pump efficiency working outside of design conditions could be improved.

Key words: inlet guide vanes, prewhirl, centrifugal pump.

Cómo citar este artículo:

Mariño Abarcal OH, González Bayón JJ, Delgado García R, et al. Actualización sobre el empleo de alabes de regulación de entrada en el bombeo de líquidos. 2019;22(3):133-141. ISSN 1815-5944.

Introducción

Los elementos de regulación de flujo a la entrada de las turbo-máquinas, conocidos como prerotadores o álabes de regulación de entrada consisten en dispositivos uniformemente distribuidos en la tubería de succión antes de que el fluido alcance el impelente de la máquina. Tradicionalmente han sido usados en los compresores centrífugos como método de regulación, buscando seguir de la mejor manera posible los regímenes de operación fuera del régimen nominal del equipo [1-3] y en el caso de ventiladores centrífugos como elementos para ahorrar energía [4]. Es común llamar a estos dispositivos *Inlet Guide Vanes* de ahí el empleo de las siglas IGVs. Están compuestos de láminas rectas o con alabeo para mejorar su aerodinámica. Muchas veces estos dispositivos son

referidos como elementos reguladores de geometría variable. Su función es provocar una prerotación, en cualquiera de las direcciones del flujo que ingresa al equipo. Esto modifica el ángulo de giro del flujo durante su acercamiento al impulsor o impelente de la máquina, desviando el flujo de la dirección principal o axial.

La tecnología no está limitada a fluidos de baja densidad como ocurre en compresores o ventiladores, sino que se ha extendido, aunque con mucha menor frecuencia, a las bombas centrífugas. Una correcta disposición de los parámetros que caracterizan a los IGVs es necesaria para cada régimen de flujo, aunque para ciertas condiciones de funcionamiento, se consiguen mejoras en el rendimiento hidráulico de una bomba centrífuga incluso cuando los parámetros de los IGVs poseen una disposición única. Luego, estos elementos consiguen reducir los consumos de energía de las bombas e incrementar su eficiencia si se compara con la situación en la que la bomba no posee IGVs. No debe olvidarse que a pesar de estas mencionadas bondades los prerotadores de entrada provocan pérdidas adicionales, debidas a la fricción viscosa que ocurre sobre su superficie y a los pequeños efectos de expansión y compresión sucesivos que experimenta el fluido cuando los atraviesa. La incidencia del flujo en los bordes de ataque y los vórtices generados en su seno disminuyen la carga total en la succión de la bomba y en consecuencia acercan la bomba al estado donde ocurre cavitación siempre que se mantengan constantes las demás variables. El empleo de estos elementos debe siempre valorarse a partir del compromiso entre las ganancias de eficiencia y las afectaciones a la carga de succión positiva neta (*Net Positive Suction Head*, NPSH).

Este artículo tiene como objetivo realizar un estudio del estado del arte de los elementos de regulación de entrada y de los efectos sobre el desempeño de las bombas centrífugas para diferentes condiciones de operación. En el trabajo se consideran los artículos más significativos de los últimos años, que abordan esta temática siguiendo una aproximación numérica empleando dinámica de los fluidos computacional (*Computational Fluid Dynamics*, CFD), así como aquellos que presentan un abordaje experimental.

Alabes de prerotación de entrada

La presencia de los álabes de regulación de entrada o IGVs modifica la característica de operación de las máquinas hidráulicas. El patrón de flujo a la entrada de la máquina mejora pues este se adapta mejor antes de entrar al impelente de la máquina. En resumen, los IGVs alteran la componente de velocidad circunferencial del flujo de entrada a la máquina, modificando la transferencia de energía entre el fluido y el impelente que gira. Los IGVs se ubican circunferencialmente en el conducto de succión de la bomba, antes del impelente. El dispositivo de prerotación puede estar compuesto por uno o varios perfiles guía. Los perfiles guía de regulación de entrada IGVs pueden ser fijos u orientables respecto a un eje de rotación axial, tal como se muestra en la figura 1. La orientación del ángulo de prerotación se define como 0° si la dirección tangencial del perfil guía se alinea con la dirección principal del flujo. Por otro lado, un ángulo de prerotación es positivo (ángulo de giro mayor que 0°), si la velocidad circunferencial de salida del prerotador tiene la misma dirección de giro del impelente, y la prerotación negativa (ángulo de giro menor que 0°), si la velocidad circunferencial de salida del perfil guía posee sentido contrario a la dirección de giro del impelente.

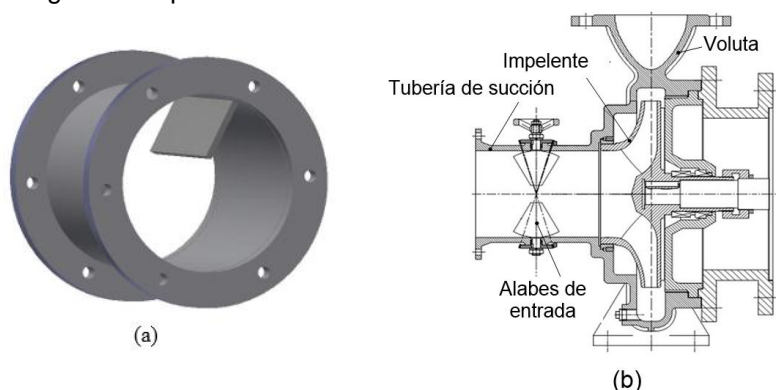


Fig. 1. Prerotadores de entrada: (a) uno solo fijo, (b) múltiples y orientables [6]

Perfiles fijos

Dupac y Furley [5] proponen el diseño y colocación de un perfil guía o varios perfiles guías fijos, con el objetivo de uniformizar la distribución de flujo en la succión de las turbo-máquinas y minimizar la creación de vórtices a la entrada del impelente, inducidos por su propia velocidad de rotación. El diseño del elemento guía es realizado empleando simulación por métodos de Dinámica de los Fluidos Computacional. Los perfiles, con la característica de ser fijos son llamados perfiles anti prerotación, por su efecto en la atenuación de vórtices y la reducción a valores mínimos de la inestabilidad hidráulica en la entrada de la máquina. Empleando estos elementos, probados en unión de un fabricante de bombas centrífugas según los autores se reduce la pérdida de eficiencia de la máquina al salir de su condición de operación nominal, la vibración y el ruido. En su estudio Dupac y Furley [5] investigan el diseño de los prerotadores empleando tres modelos de bombas artificiales muy similares en su diseño, con solo pequeñas diferencias y empleando valores de la presión de succión suministrados directamente

por el fabricante. Los autores suponen las bombas con una eficiencia del 100 % e independizan el rendimiento con una condición límite establecida en la superficie de entrada a la succión. Los perfiles de prueba o IGVs se ubican en un dispositivo situado en la sección delantera de la bomba entre la tubuladura de succión y el impelente. Los diferentes perfiles estudiados se comparan contra un perfil único propuesto por el fabricante y considerado el de diseño inicial.

En la simulación numérica del diseño de los perfiles se explora el uso de múltiples perfiles producidos a partir del perfil de diseño inicial. Los cambios de diseño en los perfiles son considerados tanto en forma como en tamaño, con perfiles curvados y perfiles helicoidales, de esa forma son valorados cambios de longitud, ancho, altura, cantidad de perfiles y ángulo del perfil guía respecto a un plano vertical. Todos los diseños son obtenidos a partir de la experiencia e ideas de los colaboradores del fabricante. Los resultados de las simulaciones numéricas muestran que el diseño de un perfil único, con una longitud igual a la del diámetro de entrada, incrementa la efectividad del perfil guía en comparación con un perfil de menor longitud, pues produce un flujo más uniforme en la succión de la máquina, lo que se refleja en un mayor rendimiento de la bomba. En el trabajo se sugiere el uso de 4 perfiles guía con estas características, sin embargo, los resultados solo son beneficiosos para algunas bombas, mientras que para el resto de las bombas estudiadas no producen mejoras. Los resultados son solo numéricos y deben ser validados experimentalmente antes de poder ser generalizados.

Perfiles orientables

En Zhou, *et al* [6] se propone el estudio de la aplicación de perfiles guía para elevar el rendimiento de las bombas centrífugas que operan en condiciones de trabajo fuera del régimen de diseño de las mismas. Para ello se investigó experimentalmente la influencia de diferentes tipos de álabes perfilados con ángulos de giro positivos. El objetivo se centró en la aerodinámica de los perfiles guías de regulación de entrada IGVs. Se utilizaron dos tipos de perfiles representados en la figura 2: a) un perfil aerodinámico tipo Gottingen y b) un perfil recto con forma de cuchilla. Los bordes externos de ambos perfiles fueron pulidos para reducir las pérdidas debidas a la incidencia del flujo. El perfil guía basado en el perfil aerodinámico Gottingen-364 se caracteriza por poseer un adecuado cociente de la relación sustentación-arrastre, una carga aerodinámica uniforme y buena capacidad para atenuar la cavitación, siendo usado comúnmente en bombas de flujo axial.

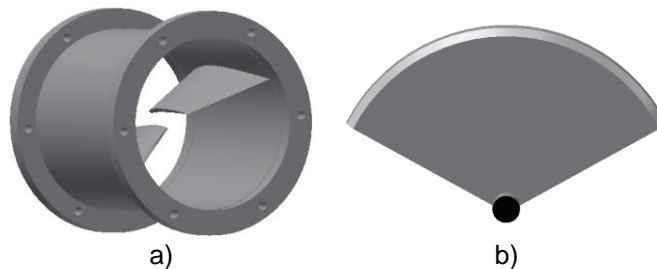


Fig. 2: a) aerodinámicos tipo Gottingen, b) recto tipo cuchilla

El estudio se realizó con una bomba centrífuga de una sola etapa y trabajando en diferentes condiciones de operación. Se estudió la bomba sin perfiles guía y con tres perfiles guía de cada tipo espaciados 120° , con ángulos de prerotación positivos de $+20^\circ$ y $+40^\circ$, distribuidos uniformemente a lo largo de la superficie interna de la tubería de succión. Fueron ensamblados en un dispositivo de regulación del ángulo de prerotación colocado en la succión de la bomba. Los resultados experimentales muestran que los perfiles ensayados causan cierta pérdida de carga, no obstante, reducen el consumo de energía, incrementan la eficiencia de la bomba y desplazan el punto de mayor eficiencia hacia las regiones de la característica con menores flujos, si se compara con el desempeño de la misma bomba, pero en condición normal o sin perfiles guía de entrada. El perfil tipo Gottingen-364 se caracteriza por ampliar la región o intervalo de flujo en el que la bomba alcanza una alta eficiencia, lo que puede interpretarse como si la curva de eficiencia de la bomba se hiciera más plana alrededor del punto de operación. Los resultados se muestran en la figura 3.

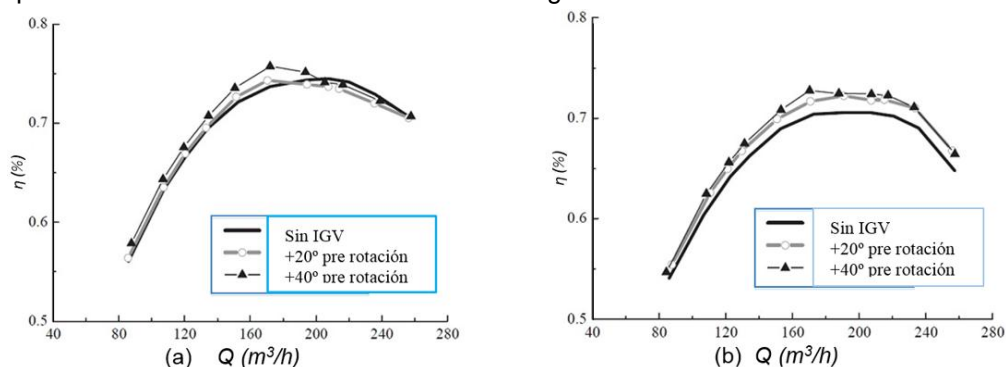


Fig. 3. Curvas de eficiencia de la bomba usando: (a) perfil recto tipo cuchilla, (b) tipo Gottingen-364 [6]

El empleo de prerotadores de entrada regulables fue estudiado experimentalmente en Ahmed, *et al* [7] las características de la bomba analizada fueron una carga de 20 m, un flujo volumétrico de 37 m³/h y una velocidad de giro de 1200 rpm. Se emplearon 5 elementos o alabes de entrada dispuestos de manera homogénea en la circunferencia de la tubería de entrada. De acuerdo con los autores, la bomba con IGVs posee una eficiencia mayor que cuando estos no son empleados. Las ganancias de eficiencia estuvieron en el entorno del 2 % en las condiciones de diseño. El rango de prerotación se movió entre 0° y 60° presentando su mejor comportamiento cuando el ángulo es de 30°. No obstante, la carga de la bomba con respecto a la de diseño se encontró disminuyendo o aumentando según fuera el ángulo de pre rotación. En todos los casos fue constatada una influencia negativa sobre la cavitación en la bomba. El mecanismo de regulación de los IGVs empleado en este trabajo se presenta en la figura 4.

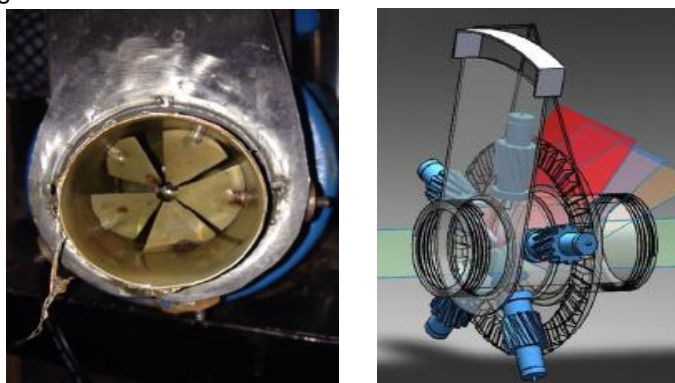


Fig. 4. Instantánea y diagrama del sistema de regulación de alabes de entrada o IGVs [7]

La cantidad de alabes directores de entrada o IGVs fue analizada en un trabajo de carácter experimental y numérico por Hou, *et al* [8] El trabajo se centra en la influencia que ejerce esta variable sobre el comportamiento hidráulico y las pulsaciones de presión. Fueron analizados un número de 5, 6, 7 y 9 alabes. Los resultados fueron tales que cuando se usó prerotación positiva de 15° la carga fue siempre menor que la de la bomba sin IGVs, independientemente del número de álabes usado, obteniéndose la mayor carga cuando se usaron 6 elementos o álabes. La eficiencia siempre aumentó con el número de álabes, pero al ir de 7 a 9 elementos se encontró un aumento muy discreto en eficiencia, presuponiendo que no es recomendable aumentar más el número de alabes. Al estudiar la pulsación de la presión en el dominio del tiempo se encontró un resultado diferente para los flujos por debajo del de diseño y los que lo superan. El número de IGVs puede mejorar la estabilidad hidráulica, pues al analizar el dominio temporal fue hallado que 5 o 7 alabes disminuyen significativamente las pulsaciones, para una mejor estabilidad hidráulica pero solo a elevados valores del flujo; mientras que a bajos valores de flujo la mejor configuración es de 7 o 9 álabes. Cuando se analiza el dominio de frecuencia el resultado es que un número de alabes igual a 6 disminuye la densidad espectral de potencia en promedio hasta un 17,81 %, como puede observarse en la tabla 1. La causa para este comportamiento radica en la igualdad entre el número de alabes del impelente de la bomba y el de álabes en el IGV. Una conclusión del trabajo es que a pesar de no ser fácil determinar cuál es el mejor número de álabes de entrada a emplear, se sugiere que un número de 6 alabes sería la mejor recomendación desde el punto de vista ingenieril. Se debe ser cuidadoso con la generalización de este resultado pues el análisis realizado es válido sólo para la bomba estudiada por los autores.

Tabla 1. Densidad espectral de potencia en el dominio de frecuencia para varios números de alabes [8]

Veces el flujo volumétrico de diseño	Número de álabes				
	0	5	6	7	9
0,7 Q _d	28,27	19,35	18,73	27,50	24,76
0,8 Q _d	7,53	11,47	4,94	9,5	9,48
0,9 Q _d	1,89	3,10	2,70	3,15	2,85
1,0 Q _d	1,14	1,04	0,95	1,20	1,22
1,1 Q _d	3,26	3,97	2,10	4,21	5,02
1,2 Q _d	6,96	9,36	4,92	9,26	10,86

Perfiles orientables de diseño tridimensional

Tan, *et al* [9] proponen un método de diseño hidráulico para el perfil guía de tipo tridimensional sobre el perfil guía de tipo bidimensional para bombas centrífugas, con el objetivo de mejorar el desempeño de los prerotadores. La investigación realizada comprende la simulación numérica y el ensayo experimental de perfiles guía bidimensionales y tridimensionales con similares parámetros geométricos y similar distribución de espesor del perfil, variando el ángulo de prerotación en el intervalo de -60° a +60° y con una distancia entre el eje de rotación de los perfiles y el impelente de 380 mm. Los resultados permiten constatar que el perfil guía tridimensional propuesto, permite mejorar la eficiencia de la bomba con relación a la alcanzada con el perfil guía diseñado en dos dimensiones, como se muestra en la figura 5. Liu, *et al* [10] amplían numérica y experimentalmente la investigación proponiendo un método de diseño para los perfiles guía de prerotación de flujo soportados en el método de control del momento de velocidad a lo largo de la línea de corriente meridional

de los perfiles en base al método del vórtice de Ossen. Los resultados muestran que el perfil guía tridimensional planteado puede reducir la pérdida por impacto en el borde delantero de los álabes del impelente de la bomba en condiciones fuera de diseño en comparación con la bomba sin prerotadores, modificando las velocidades a la entrada del impelente como se muestra en la figura 6 donde los subíndices a, b, c denotan el caudal de diseño, el caudal parcial y el caudal mayor al de diseño respectivamente, c_1, w_1, u_1, c_m denotan la velocidad absoluta, la velocidad relativa, la velocidad tangencial y la velocidad meridional respectivamente. Asimismo los triángulos de velocidad que se producen por el efecto de la prerotación del flujo a la entrada y salida del impelente fueron estudiados por Zibin [11].

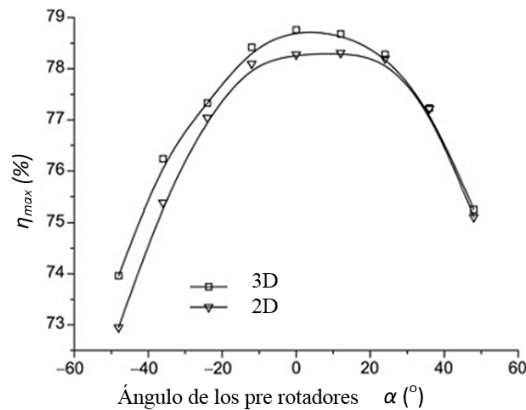


Fig. 5. Comparación de la eficiencia de la bomba, usando perfiles bidimensionales y tridimensionales [9-10]

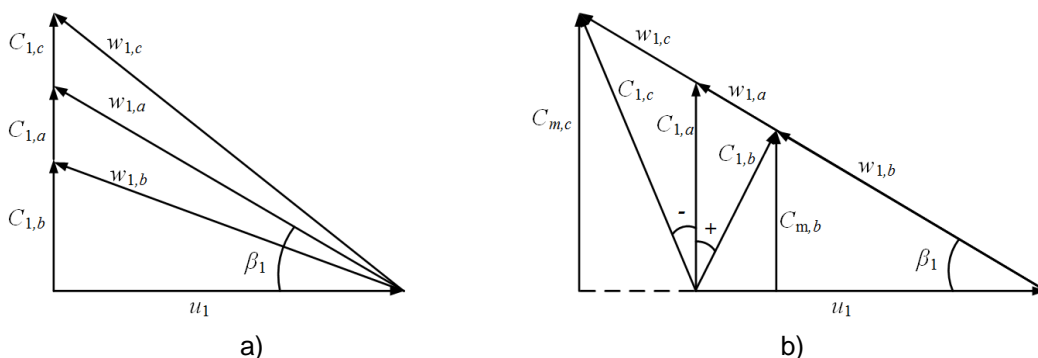


Fig. 6. Triángulos de velocidad a la entrada del impelente a diferentes flujos: (a) sin prerotadores (b) con prerotadores [10]

Liu, *et al* [12] complementan experimentalmente el estudio para perfiles guía tridimensionales y bidimensionales estableciendo los efectos de la fluctuación de la presión en puntos de monitoreo ubicados en el impelente y la voluta por el método de la transformada rápida de Fourier (FFT). Los resultados permiten determinar que las amplitudes máximas de las fluctuaciones de la presión disminuyen notablemente con el empleo de los prerotadores en comparación con la bomba sin prerotadores. Un resultado adicional que fue obtenido de estos trabajos es que al emplear el perfil guía tridimensional con ángulo de prerotación 0° se logra ampliar la zona de alta eficiencia hidráulica de la bomba en 2,13 % para condiciones de funcionamiento fuera de diseño en comparación con la bomba centrífuga sin prerotador, que el empleo de los prerotadores pueden mejorar el patrón de flujo en el impulsor y reducir las fluctuaciones de presión. La incertidumbre de la medición de acuerdo con los autores fue de $\pm 0,358$ %. Sin embargo, en estos estudios no se analiza cómo influye el número de perfiles guía dispuestos sobre el comportamiento de la bomba.

En otra investigación Hou, *et al* [13] presentan un diseño hidráulico del perfil guía de prerotación tridimensional basado en un perfil bidimensional, soportado por el método de diagnóstico de Flujo de Vorticidad de Límites *Boundary Vorticity Flux* (BVF) para medir la velocidad de creación de vórtices. El trabajo realizado comprende el ensayo experimental de perfiles guía tridimensionales con 6 álabes, variando el ángulo de prerotación en el rango de $+30^\circ$ a -48° , con una distancia axial entre los perfiles y el impelente de 200 mm en un ducto de 150mm de diámetro. Los resultados determinan que el perfil tridimensional propuesto mejora la eficiencia de la bomba en comparación a la alcanzada sin los perfiles guía. Adicionalmente obtienen como resultado que el perfil guía de diseño tridimensional propuesto alcanza el punto de mayor eficiencia en el ángulo de prerotación de -12° , incrementando la eficiencia hidráulica de la bomba en 1,43 % para condiciones de funcionamiento fuera de diseño comparado con la bomba centrífuga sin dispositivos de prerotación. La simulación numérica muestra que los prerotadores de diseño tridimensional de hélice pueden ofrecer un mejor efecto de rotación del campo de flujo en comparación con los perfiles tridimensionales rectos. Sin embargo, la diferencia de incremento de eficiencia entre estos dos tipos de perfiles tridimensionales es poco significativo.

Distancia axial de los perfiles

En otro trabajo Tan, et al [14] empleando un abordaje experimental investigaron la influencia de la colocación de los perfiles guía de acuerdo a la distancia entre estos y la succión de la bomba. Además, se investigó al mismo tiempo el efecto que produce la variación del ángulo de prerotación. Las distancias desde el eje del prerotador al impelente ensayadas fueron tres, es decir, 280 mm, 380 mm y 460 mm variando el ángulo de prerotación entre valores desde -60° a $+60^\circ$. Liu, et al [15] complementan la investigación estableciendo los efectos de la prerotación y la fluctuación de la presión en puntos de monitoreo ubicados en el impelente y la voluta, en idénticas condiciones que en el trabajo anterior con valores de ángulos de prerotación de -24° a $+24^\circ$. Los resultados mostraron que el mejor resultado se obtiene cuando la distancia axial es de 380mm, distancia para la cual el rendimiento hidráulico de la bomba alcanza mayores valores en un mayor intervalo de variación del flujo, como se muestra en la figura 7, y las fluctuaciones de presión disminuyen gradualmente en la bomba cuando la distancia axial aumenta de 280 mm a 460 mm.

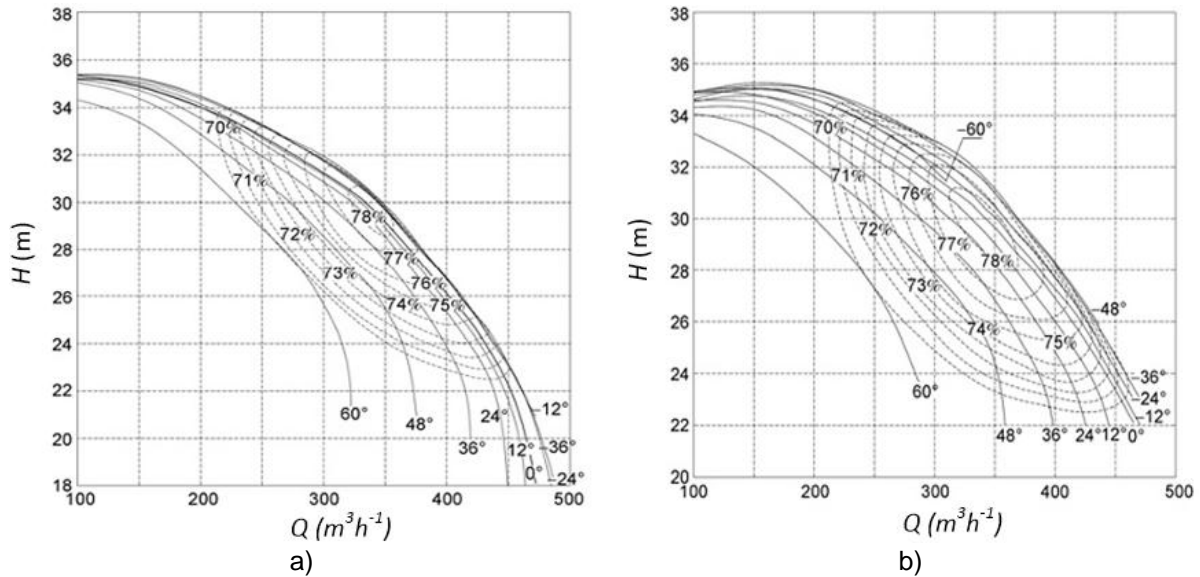


Fig. 7. Curvas de rendimiento hidráulico en función de distancia axial: a) 280 mm, b) 380 mm [14]

Se obtiene además que la mayor eficiencia de la bomba centrífuga con prerotadores es mayor que sin prerotadores, para todos los ángulos de prerotación ensayados entre -24° y 36° , y que fuera de este intervalo de ángulos el rendimiento de la bomba disminuye para todas las distancias, como se muestra en la figura 8. En el propio trabajo se propone un valor, obtenido empíricamente, de la distancia axial de ubicación de los prerotadores (en forma adimensional) más conveniente para elevar el desempeño de la bomba. Se recomienda una distancia entre 1,8 y 2,0 veces el diámetro de la tubería de succión de la bomba. Los trabajos tienen como limitante que solo se emplean tres valores de distancia y el intervalo adimensional resulta muy estrecho.

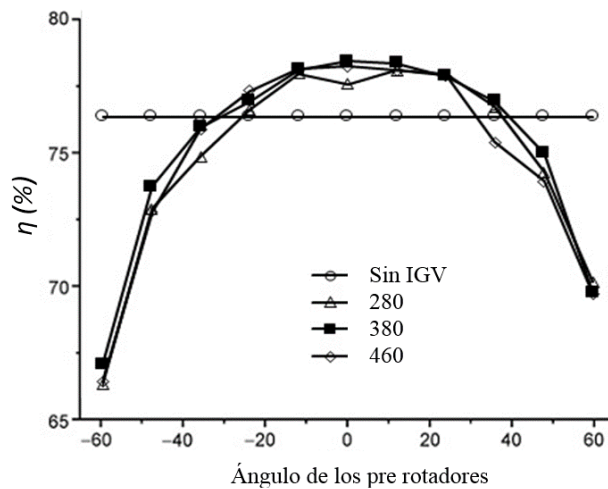


Fig. 8. Eficiencia de la bomba en función del ángulo de prerotación del perfil guía [14]

Influencia sobre la cavitación

La caída de presión en la succión de las bombas centrífugas es uno de los factores que decide en el fenómeno de aparición de la cavitación. En Tan, et al [14,16] se analiza numérica y experimentalmente la influencia que ejerce la regulación de los prerotadores y las características del flujo sobre la cavitación en bombas centrífugas. La carga neta de succión positiva disponible (*Net Positive Suction Head Admissible*, NPSHA), es definida como

la diferencia entre la energía total y la energía de cambio de fase por unidad de masa del fluido en la succión de la bomba. Generalmente, cuando el valor de NPSHA cae un 3 % se establece que se ha alcanzado la carga neta de succión positiva crítica (*Net Positive Suction Head Critical*, NPSHC).

En el trabajo de Tan, *et al* [17] se emplea un modelo de turbulencia del tipo *RNG k-ε*, modificándolo para tener en cuenta la influencia de la compresibilidad del flujo sobre la cavitación. Son evaluados ángulos de prerotación entre -24° y 24° con un error relativo del 5%. Por su parte, Tan, *et al* [17] utiliza una combinación del modelo de turbulencia *RNG k-ε* con el modelo de cavitación de transporte de masa. Los resultados muestran que la mayor pérdida de presión total entre la tubería de succión y la entrada del impelente se obtiene cuando el ángulo de prerotación es de 24° positivo, correspondiendo con un 7,6 % de pérdida de presión. En el trabajo se verifica que la regulación positiva de la prerotación tiene mayor influencia sobre la degradación del rendimiento de la cavitación de la bomba que la regulación negativa. Sin embargo, la comparación de los resultados de las simulaciones numéricas y las mediciones experimentales no muestran similar tendencia, especialmente para pequeños valores de NPSHA, como se muestra en la figura 9.

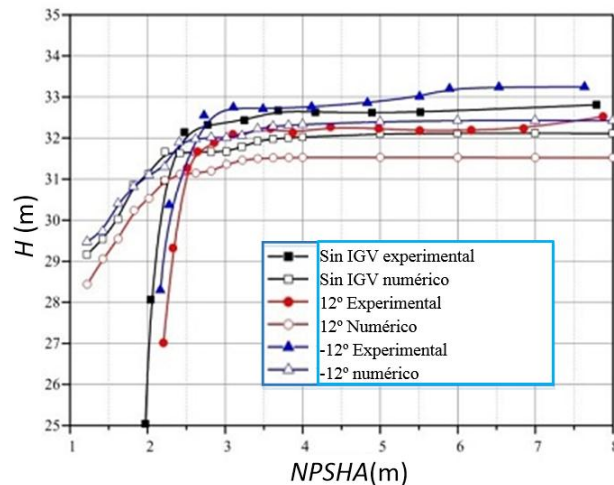


Fig. 9. Comparación de resultados experimentales y numéricos de la cavitación [17]

La influencia sobre la cavitación no solamente afecta a las bombas centrífugas, sino también a aquellas con disposición axial. Siguiendo un abordaje numérico-experimental Feng, *et al* [18] demuestran que la capacidad de una bomba axial para resistir la cavitación puede ser mejorada empleando *IGVs*. Los resultados del trabajo muestran que el rendimiento ante la cavitación de la bomba de flujo axial puede mejorarse cuando esta trabaja fuera del flujo de diseño, si son ajustados los ángulos de los *IGVs* a valores positivos y los caudales son bajos. Por otro lado, cuando se está en presencia de caudales elevados los ángulos de los pre rotadores de entrada deben prepararse para valores negativos de la pre rotación. Claro que en este caso no es adecuado emplear *IGVs* con una sola posición pues no sería efectivo su empleo y en todos los casos quedaría afectado el rendimiento de la bomba ante la cavitación. Este estudio presenta un resultado que en la literatura analizada no ha encontrado homogeneidad, pues la presencia de los *IGVs* generalmente provoca que la altura neta de succión negativa disminuya por aumento de la fricción viscosa y la incidencia del flujo sobre los bordes de ataque de los alabes de los *IGVs*.

El empleo de la dinámica de los fluidos computacional ha demostrado que la determinación de la carga neta positiva de succión puede ser determinada con elevada precisión empleando esta herramienta. En Lorusso, *et al* [19] se obtiene el valor de la NPSH utilizando una aproximación numérica y el trabajo se centra en disminuir el tiempo de cómputo empleando una malla de densidad no muy elevada. Comparando estos resultados con valores experimentales se llega a la conclusión de que el número de celdas empleado en la determinación de este parámetro relacionado con la cavitación no posee una influencia importante sobre el resultado. Sin embargo, no debe perderse de vista que la carga de la bomba si se afecta con la densidad de la malla, incrementándose asintóticamente con el aumento del número de celdas. En dependencia del objetivo pueden ser seleccionadas mallas más gruesas o más refinadas, estableciéndose un compromiso entre el tiempo de cómputo y el resultado pretendido.

Flujo no estacionario

En Wang, *et al* [20] se realiza una investigación numérica sobre la influencia de los *IGVs* sobre el flujo en régimen no permanente de una bomba centrífuga. Se valora en el estudio la independencia de la solución con respecto a la densidad de malla empleada, el tamaño del intervalo de tiempo asumido y analiza los modelos de turbulencia. La investigación valora los tres modelos de turbulencia más comúnmente usados; *k-ε* estándar; *RNG k-ε* y el *k-ω*, llegando a la conclusión de que el más adecuado es el modelo de turbulencia *k-ε* estándar, pues los resultados obtenidos para la oscilación de presión se ubican entre los valores máximos y mínimos obtenidos por los otros dos métodos. En [21] también se realiza una comparación similar entre los modelos de turbulencia, pero incluyendo el método realizable *k-ε* y obteniéndose resultados similares con los cuatro modelos, con pequeñas

diferencias entre ellos. Los resultados de los experimentos numéricos para los diferentes métodos reproducen con bastante exactitud los resultados obtenidos por vía experimental.

En las simulaciones numéricas realizadas por [20] llevadas a cabo en las interfaces creadas entre el dominio fijo y el dominio móvil son establecidas usando dos métodos: el método de rotor congelado para el análisis estacionario y del estator rotor transitorio para el análisis no estacionario. Los resultados del análisis estacionario son utilizados como campo de flujo inicial para el análisis no estacionario, la comparación de los resultados de la simulación numérica con los resultados experimentales, para la carga versus flujo del análisis estacionario, muestra errores relativos, según el autor, del orden de aproximadamente 3 %, pero las diferencias realmente son mayores que 4,7 % para pequeños flujos y 4,0 % para grandes flujos. Teniendo en cuenta que en el trabajo no se especifican las incertidumbres experimentales de la curva con la cual se valida el modelo numérico, ésta pudiera ser una causa de que las diferencias entre experimento y simulación sean tan grandes, para el caso sin prerotadores *IGVs*. Al incluir los *IGVs* variables las diferencias entre simulación y experimento alcanzan hasta un 7 %, como se muestra en la figura 10, presentando los mayores valores a bajos flujos. Un análisis crítico de la investigación permite considerar que una importante limitante de la validación realizada es la falta de información sobre la incertidumbre experimental.

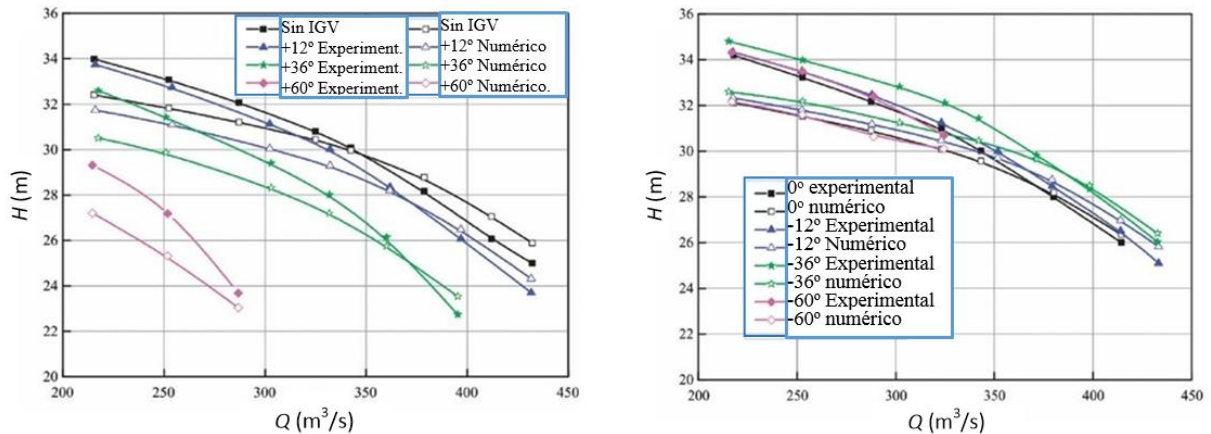


Fig. 10. Resultados experimentales y numéricos: (a) prerotación positiva, (b) prerotación negativa [20]

En Qu, *et al* [22] se realiza un estudio numérico y experimental del efecto reloj (*clocking effect*), producido por la posición relativa en la dirección circunferencial entre los perfiles fijos de guía de regulación y la lengüeta de la voluta. Las posiciones de los perfiles guías influyen en las diferentes características del flujo y en el rendimiento energético debido a la interacción entre el impelente y la voluta de la turbo-máquina. Este efecto ha sido investigado extensamente en compresores y turbinas de gas, pero no así en bombas centrífugas. En el trabajo se investiga el rendimiento de la bomba centrífuga en términos de energía característica y de la fluctuación de presión en la voluta producida por el efecto reloj.

Para el estudio se emplean seis posiciones (CP1-CP6), rotando los *IGVs*, a lo largo de la dirección circunferencial, con intervalos de 10° entre posiciones para tres condiciones de flujo. Los resultados muestran que el efecto reloj no ejerce influencia sobre la carga de la bomba centrífuga, ni sobre la eficiencia, pero si tiene notable influencia sobre la presión en la voluta. Se obtiene que la máxima fluctuación de amplitud de la presión aparece para la frecuencia de paso de los álabes de la máquina para las seis posiciones analizadas, como se muestra en la figura 11. Las amplitudes de las oscilaciones de presión máxima, en los puntos monitoreados, cambian de magnitud hasta 28 % para el flujo de diseño en las distintas posiciones del efecto reloj.

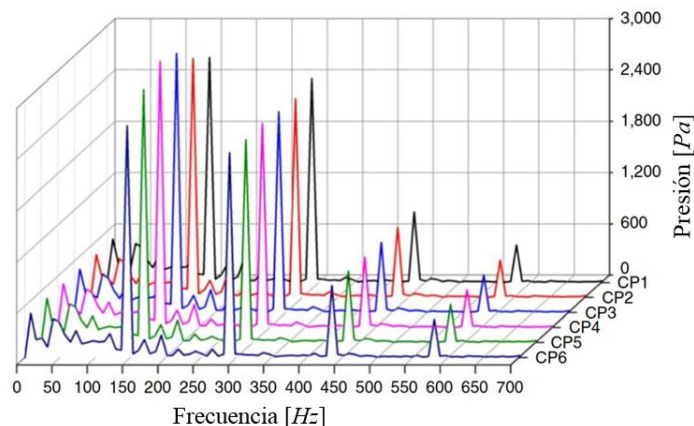


Fig. 11. Espectro de frecuencia de la fluctuación de presión [22]

En los estudios numéricos y experimentales en las bombas centrífugas con prerotadores de flujo, se emplea un número indistinto de perfiles que componen estos dispositivos tanto para los de disposición fija como para los

orientables. Van desde uno solo [5] hasta cuatro perfiles, distribuidos circunferencialmente en la tubería de succión. Dispositivos con seis [8] y ocho perfiles [4] que guardan correspondencia con el número de álabes con que cuenta el impelente. No existe una relación propuesta del número de perfiles guía de regulación de entrada con la eficiencia hidráulica de la bomba centrífuga a pesar de los resultados de Hou, *et al* [8] donde se brindan elementos sobre esta variable. No obstante, es importante notar que en la medida en que el número de perfiles guía empleados aumenta se hace menor el área de paso del fluido y aumentan las pérdidas de presión debidas a la fricción, lo cual es poco favorable para el fenómeno de cavitación. Un número mayor de perfiles implica mayor efecto de incidencia del fluido sobre el frente de los álabes y mayor área para que se manifieste la fricción viscosa.

Conclusiones

La revisión bibliográfica de la temática del empleo de prerotadores de entrada en las bombas centrífugas permite concluir que las investigaciones en este campo se hallan aún en un estado incipiente, siendo una temática de reciente inclusión para las bombas centrífugas, como demuestra la escasez de artículos en la literatura científica. El empleo de los *IGVs* permite incrementos de eficiencia en la operación de la bomba centrífuga, para régimen de diseño, y al mismo tiempo, aplanar la característica de eficiencia de la bomba. A pesar de las ventajas que estos dispositivos aportan a la bomba, son también responsables por el aumento de la pérdida de carga en la succión, propiciando la aparición de la cavitación en la bomba. El balance entre mejoras y pérdidas que los *IGVs* provocan depende de los parámetros de estos y de la localización de los mismos. Entre los parámetros fundamentalmente se encuentran el tipo de perfil del prerotador, el número de estos, el ángulo de prerotación y la distancia hasta el impelente. Estas magnitudes han sido investigadas, pero aún no existen resultados concluyentes de su influencia para ser generalizados. El empleo de simulaciones numéricas utilizando técnicas de CFD en el estudio de los efectos de los *IGVs* es efectivo en comparación con los métodos experimentales, posibilitando la realización de estudios menos costosos. La tendencia de los estudios se inclina, dada su simplicidad, al empleo del modelo *k-ε* estándar de turbulencia.

Referencias

- Mohseni A. Novel IGV designs for centrifugal compressor and their Interaction with the impeller. *Journal of Turbomachinery*. 2012;134:1-8.
- Dick E. *Fundamentals of Turbomachines, Fluid Mechanics and Its Applications*. Gent, Belgium: Springer Science and Business Media Dordrecht; 2015.
- Chunjun J. Study of High Efficiency Flow Regulation of IGV in Centrifugal Compressor. *International Journal of Rotating Machinery*. 2016;24:1-7.
- Raheem A. CFD simulation to enhance the efficiency of centrifugal pump by application of IGV. In: 4th International Conference on Materials Processing and Characterization;2015.
- Dupac M, Furlé G. Improving pump efficiency by modifying the size and shape of the anti-pre-rotation vane. *Transactions of Famen*. 2012;36(1):45-54.
- Zhou C. Influence of the positive pre-whirl on the performance of centrifugal pumps with different airfoils. *Earth and Environmental Science*. 2012;15:1-7.
- Ahmed S, Muiz A, Mubashir M, et al. Efficiency Enhancement of Centrifugal Water Pump by Using Inlet Guided Vanes. *European Journal of Advances in Engineering and Technology*. 2016;3(10):1-4.
- Hou H. A CFD study of IGV vane number on hydraulic characteristics and pressure pulsation of an is centrifugal pump. *Journal of Vibroengineering*. 2017;19(1):563-76.
- Tan L. Hydraulic design and pre-whirl regulation law of inlet guide vane for centrifugal pump. *Technological Sciences*. 2010;53(8):2142-51.
- Liu M. Controllable velocity moment and prediction model for inlet guide vanes of a centrifugal pump. *Engineering Computations*. 2018;35(3):1364-82.
- Zibin X. Study on the H-Q Characteristic Curves of Centrifugal Pump with Inlet Pre-whirl. In: Sixth International Conference on Intelligent Systems Design and Engineering Applications (ISDEA);2015.
- Liu M. Influence of Geometry of Inlet Guide Vanes on Pressure Fluctuations of a Centrifugal Pump. *ASME. Journal of Fluids Engineering*. 2018;140:091204-13.
- Hou Hucan. Hydraulic design of inlet guide vane and its full flow passage numerical simulation on centrifugal pump. In: ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition; 2014.
- Tan L. Influence of axial distance on pre-whirl regulation by the inlet guide vanes for a centrifugal pump. *Technological Sciences*. 2012;55(4):1037-43.
- Liu Yabin. 2017. Influence of Prewhirl Angle and Axial Distance on Energy Performance and Pressure Fluctuation for a Centrifugal Pump with Inlet Guide Vanes. *Energies*. 2017;10(5):1-14.
- Tan L, Zhu B, Cao S, et al. Influence of Pre-whirl Regulation by Inlet Guide Vanes on Cavitation Performance of a Centrifugal Pump. *Energies*. 2014;7(2):1050-65.
- Tan L. International Symposium of Cavitation and Multiphase Flow. Series: Materials Science and Engineering Cavitation performance and flow characteristic in a centrifugal pump with inlet guide vanes. 2015;72:1-6.
- Feng W, Cheng Q, Guo Z, et al. Simulation of cavitation performance of an axial flow pump with inlet guide vanes. *Advances in Mechanical Engineering*. 2016;8(6):1-8.
- Lorusso M, Capurso T, Torresi M, et al. Efficient CFD evaluation of the NPSH for centrifugal pumps. *Energy Procedia*. 2017;126:778-85.
- Wang Y, et al. Numerical investigation of influence of inlet guide vanes on unsteady flow in a centrifugal pump. *Journal of Mechanical Engineering Science*. 2015;229(18):3405-16.
- Petit O, et al. Numerical investigation of unsteady flow in a centrifugal pump with a vaned diffuser. *International Journal of Rotating Machinery*. 2013;37:1-14.
- Qu W. Numerical investigation of clocking effect on a centrifugal pump with inlet guide vanes. *International Journal for Computer Aided Engineering and Software, Engineering Computations*. 2016;33(2):465-81.