

## Disminución de carga de arranque en aerobombas

**E**l presente trabajo describe resultados experimentales de pruebas realizadas sobre bombas de pistón acondicionadas con válvulas especiales, con el propósito primordial de disminuir la carga de arranque requerida en un molino de viento convencional para el bombeo de agua. El trabajo muestra pruebas de campo sobre una aerobomba comercial colombiana, la cual presenta un comportamiento típico de histéresis entre la velocidad de viento de arranque y de parada. Se explica el principio de operación y las ventajas de acondicionar las bombas de pistón con válvulas de acoples, con el fin de permitir operación a velocidades de viento bajas. Pruebas de laboratorio sobre dos bombas de pistón provistas con válvulas de acoples diferentes, permiten corroborar las predicciones teóricas de su comportamiento. Las bombas fueron sometidas a pruebas de larga y corta duración. El trabajo presenta, además, el comportamiento de estas bombas en términos de su eficiencia volumétrica contra velocidad de excitación, junto con la determinación de las fuerzas en cada ciclo de bombeo. Se realizan comentarios sobre la adaptabilidad de este concepto de válvula de acople, en lo que tiene que ver con las características mecánicas del material en que debe ser fabricada, y se realiza una predicción teórica sobre el mejor comportamiento de la aerobomba comercial colombiana, al tener acondicionada una bomba de pistón con válvula de acople.

### Comportamiento típico de aerobombas.

El acoplamiento típico entre molino de viento (rotor) y su correspondiente bomba recíprocante de pistón, implica cargas de arranque que sobrepasan la carga promedio de



Alvaro Pinilla, Ph.D., M.Sc.,  
Ingeniero Mecánico.  
Director y Profesor del  
Departamento de Ingeniería  
Mecánica.

operación del sistema en un factor de cuatro (Pinilla, A. et al, 1984). Consecuentemente, la aerobomba presenta un comportamiento de histéresis entre la velocidad de viento de arranque y la velocidad de diseño (máxima conversión de energía eólica en agua bombeada); siendo este

fenómeno, consecuencia de la historia instantánea de la intensidad del viento. La figura No. 1 ilustra el comportamiento instantáneo real y teórico de la aerobomba comercial colombiana JOBER (Granados, 1991), impulsando agua a una carga estática de bombeo de 9 metros y una distancia lineal entre pozo y tanque de almacenamiento de 300 metros. Las características técnicas de la Aerobomba Comercial JOBER se muestran en Pinilla & Mateus (1993), artículo publicado en esta revista.

Las condiciones físicas de la prueba de la Figura No. 1, implican una velocidad de viento de arranque de 3.1 m/s, una velocidad de viento de diseño de 2.0 m/s y velocidad de parada de 1.5 m/s. Este comportamiento de histéresis se presenta, ya que el rotor debe suministrar la carga de par momento requerido por la bomba a una velocidad de arranque mayor que la correspondiente de diseño. En el

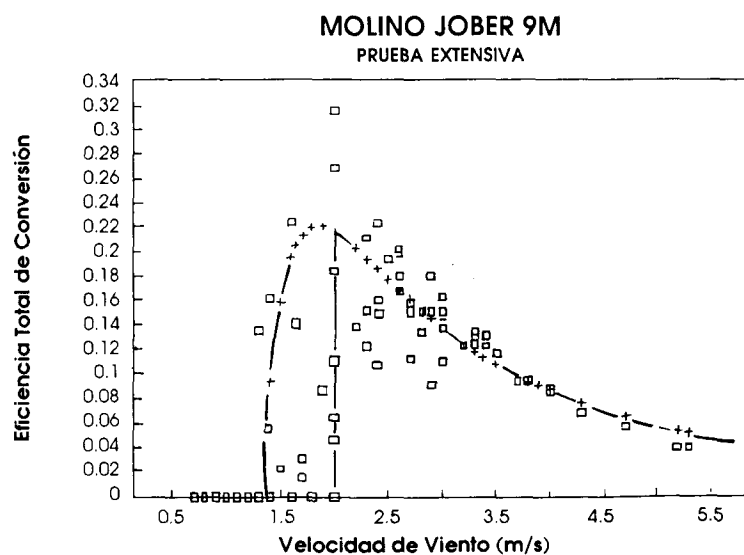


Figura No. 1 - Pruebas de Comportamiento de Molino JOBER  
Cabeza de Bombeo: 9 mts, Bomba: 63 mm, Carrera 50 mm

momento de presentarse una menor velocidad del viento, la misma inercia de las partes móviles, homogenizan el par momento requerido promedio, condición

comercialmente.

La alternativa, objeto de esta investigación, consiste en un dispositivo simple que basa su

## Principio de operación de la válvula de acople.

La válvula de acople funciona bajo el principio de flotabilidad en agua. Al ser construida en un material con menor densidad que el agua y aprovechando un mayor volumen que las válvulas convencionales, se diseña de tal forma que selle la cámara de bombeo, cuando el equipo ha adquirido energía cinética. Esto quiere decir que, cuando la válvula de acople permanece abierta, el molino empezará a aumentar su velocidad rotacional y la carga de arranque solo es la causada por: peso del vástago y del pistón de la bomba; fricción en los sellos de cuero y pérdidas mecánicas de transmisión de fuerza. La válvula comenzará a cerrarse cuando las fuerzas hidrodinámicas, que actúan sobre ella, son mayores que la fuerza de flotación. Las fuerzas hidrodinámicas dependen de la velocidad lineal de

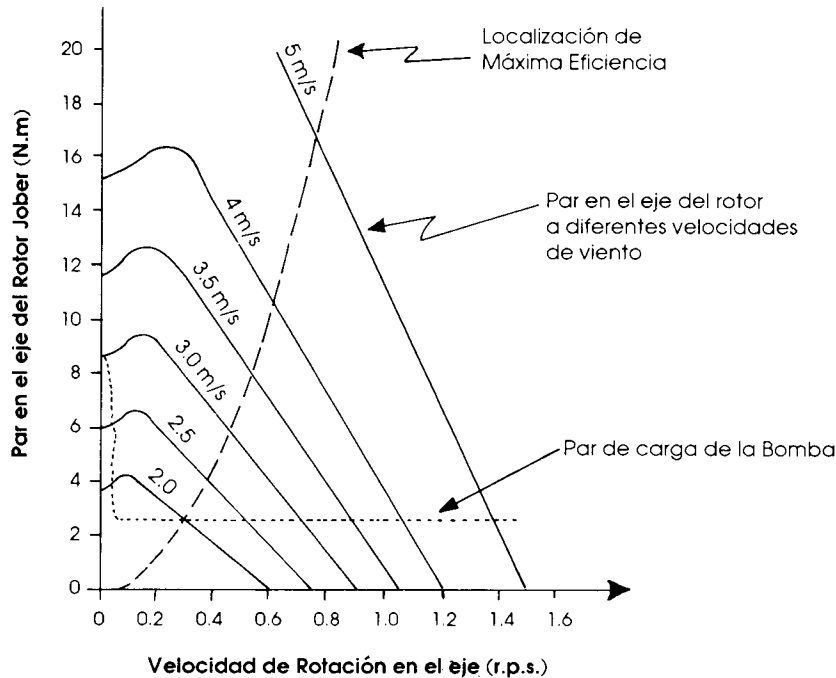


Figura No. 2 - Curva de Par de carga Bomba Jober 63 mm Cabeza de Bombeo: 9 mts.

cuatro veces menor que la impuesta en el arranque. La figura No. 2 ilustra este comportamiento para un rango de velocidades de viento. Adicionalmente, este comportamiento irregular reduce severamente la confiabilidad y disponibilidad global de la aerobomba.

Diversas alternativas se han estudiado para mejorar esta condición de arranque en aerobombas, como son: mecanismos de carrera variable, contrabalanceo de resorte, disposición de bombas diferenciales (para pequeñas cabezas de bombeo), entre otras. Sin embargo, algunas de estas alternativas resultan demasiado costosas para ser implementadas

operación en el principio de flotación. Esta solución que se conoce como válvula de acople (Smulders, 1992), fue concebida y diseñada por el grupo de Energía Eólica de la Universidad Técnica de Eindhoven en Holanda y es estudiada por UNIANDES dentro del contexto del Proyecto de Cooperación Científica Internacional (ISC) patrocinado por la Comisión de Comunidades Europeas, para ser incorporada en diseños colombianos de aerobombas. Este proyecto se realiza conjuntamente entre la Universidad Técnica de Eindhoven (Holanda), Universidad de Reading (Inglaterra) y Universidad de los Andes (Colombia).

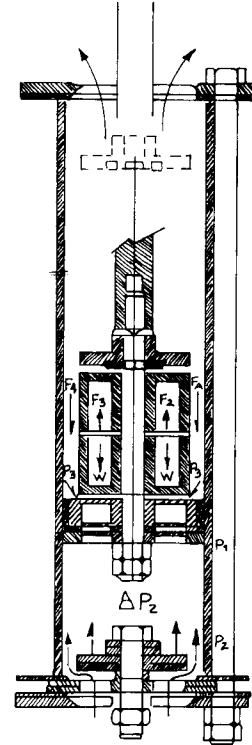


Figura No. 3 - Diagrama Esquemático Bomba con Válvula de acople

desplazamiento del pistón (i.e., directamente proporcional a la velocidad rotacional del rotor), de la geometría del conjunto válvula - pistón y de la altura de cierre de la válvula. La figura No. 3 ilustra esquemáticamente la disposición de la válvula de acople y los diferentes parámetros geométricos que influyen en su apropiado funcionamiento.

Así pues, cuando el pistón, accionado por el vástago, adquiere una cierta velocidad lineal crítica, las fuerzas hidrodinámicas producen cierre de la válvula. Vale la pena notar que la velocidad crítica será alcanzada solo en parte del ciclo de bombeo,

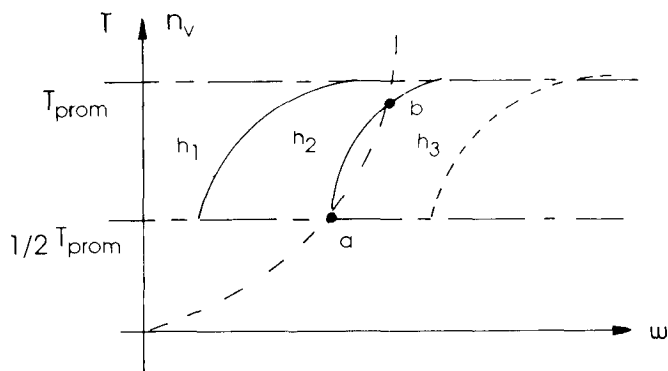


Figura No. 4 - Par de Carga y Eficiencia Volumétrica Bomba con válvula de acople

sobre todo a bajas velocidades, de manera que el comportamiento de par momento requerido por la bomba y su correspondiente eficiencia volumétrica serán como se ilustra en la figura No. 4. Varias ventajas se pueden prever del comportamiento instantáneo de una bomba de pistón acondicionada con válvula de acople, como son: Se reduce la carga de arranque del molino en un factor de casi seis veces al compararse con la misma bomba sin válvula de acople (Ver Figura No. 4); el comportamiento irregular entre velocidad de arranque y de diseño desaparece; se presentan dos picos de eficiencia donde se extrae la máxima energía del viento y por último, la confiabilidad y disponibilidad global de la

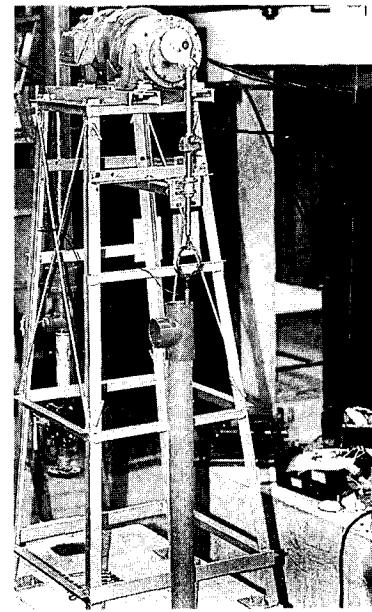
aerobomba se aumenta sustancialmente. Esto implica que para una aerobomba convencional, se podrán diseñar bombas de mayor volumen por ciclo con esta nueva válvula; eso sí, teniendo en cuenta que se aumentan las fuerzas de operación en la aerobomba.

## Pruebas experimentales con válvulas de acople

El propósito de las pruebas experimentales es entender el comportamiento dinámico de la válvula de acople en una bomba de pistón convencional. El banco de pruebas consiste de un motor de 3 HP de velocidad variable y una caja de reducción de velocidad para probar la bomba en rangos de operación entre 20 y 120 RPM. Para

estas pruebas se construyeron dos bombas de 63 mm de diámetro de cilindro, para dos geometrías diferentes de válvula de acople.

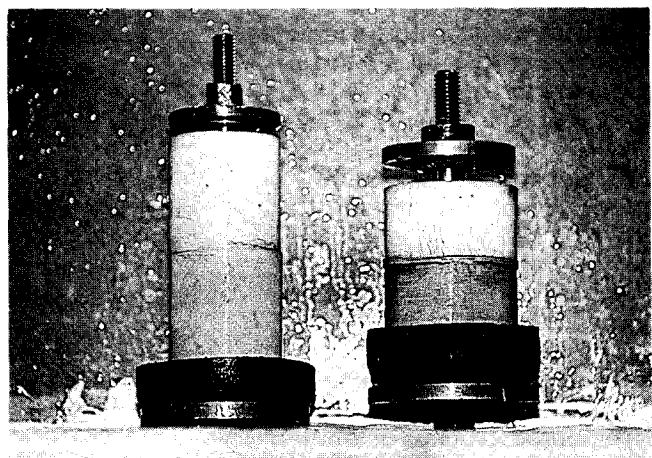
Todos los equipos se montaron sobre una torre y la bomba en prueba es sumergida en un tanque de agua. La transmisión mecánica se realiza a través de un sistema de bieja manivela y la longitud de carrera es de 100 mm. Las fotografías Nos. 1 y 2 ilustran la disposición de los



Fotografía No. 1 - Banco de Pruebas de Bombas

elementos en el banco de pruebas y las válvulas de acople que fueron probadas (Pinilla, 1993).

Para las pruebas intensivas, los instrumentos utilizados fueron: Celda de Carga para medir la fuerza instantánea transmitida a la bomba, un transductor de desplazamiento lineal para determinar el movimiento del pistón, un tacómetro para medir la velocidad de excitación de la bomba. Con estos instrumentos se puede determinar la velocidad lineal crítica de cierre de la válvula de acople, el comportamiento de



Fotografía No. 2 - Válvulas de Acople en Prueba

la fuerza en el momento del cierre de la misma y el instante angular en que se presenta este comportamiento.

volumétrica de las bombas en prueba, para un amplio rango de velocidades de excitación. En estas figuras se comprueba, entonces, la

el comportamiento real de una bomba con válvula de acople, tanto en reducción de cargas de arranque como en eficiencia volumétrica y par momento requerido, es similar a la predicción teórica, pudiendo entonces utilizar esta información para predecir su comportamiento al ser acoplada con un molino de viento comercial. En esta sección se hace referencia a las características esenciales del material de la válvula, junto con una comparación teórica de comportamiento de la Aerobomba comercial JOBER, con y sin válvula de acople, mostrando así el beneficio que se puede alcanzar sin realizar mayores modificaciones en un equipo comercial existente.

### VALVULA DE ACOPLE, PRUEBA DINAMICA DESPUES DEL CIERRE, DIAGRAMA INDICADOR

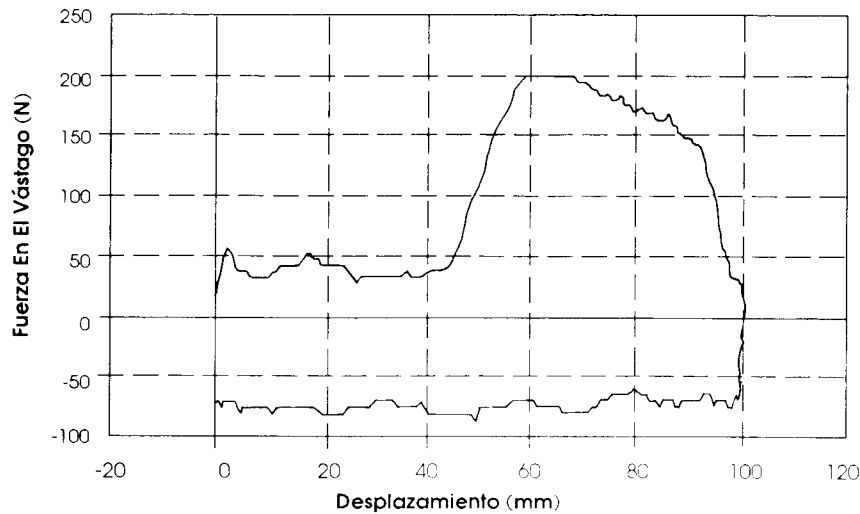


Figura No. 5

Para la determinación del comportamiento de la eficiencia volumétrica de la bomba, se utilizó un flujómetro de paletas y un tacómetro. Las pruebas, en general, se realizaron para diversas cargas estáticas de bombeo y diferentes niveles de apertura de la válvula de acople (i.e., 4.5 mm; 5.5 mm y 7.0 mm).

correspondencia de la predicción teórica con los resultados experimentales (Hernández, 1993).

## Adaptabilidad en aerobombas comerciales

De la sección anterior, es claro que

**Material de la Válvula:** Se debe tener particular cuidado en la escogencia del material en que se fabrica la válvula de acople ya que, aparte de requerir una menor densidad que el agua, sus características mecánicas en cuanto a deformabilidad, resistencia al impacto, absorción de agua y resistencia a la fatiga, son de extrema importancia en la operación y durabilidad de la válvula misma. El material que más se ajusta a las condiciones requeridas, después de rigurosas pruebas, es el polipropileno (Smulders, 1992). En la actualidad, se está explorando la posibilidad de

La figura No. 5 ilustra el comportamiento instantáneo de fuerza en el vástago contra desplazamiento del pistón. Claramente se puede observar, el incremento súbito en la fuerza al producirse el cierre de la válvula de acople. Vale la pena anotar que el diagrama corresponde a la velocidad crítica de cierre para la geometría en prueba. De este resultado se corrobora el fenómeno, mencionado anteriormente, en el que la carga de arranque (fuerza transmitida por el vástago), es solamente debido a fuerzas de fricción y no debido a la carga estática de bombeo.

Las figuras Nos. 6 y 7 resumen el comportamiento de la eficiencia

### VALVULA CORTA, H=2.54 m, h=5.5 mm PRUEBA DE EFICIENCIA VOLUMETRICA

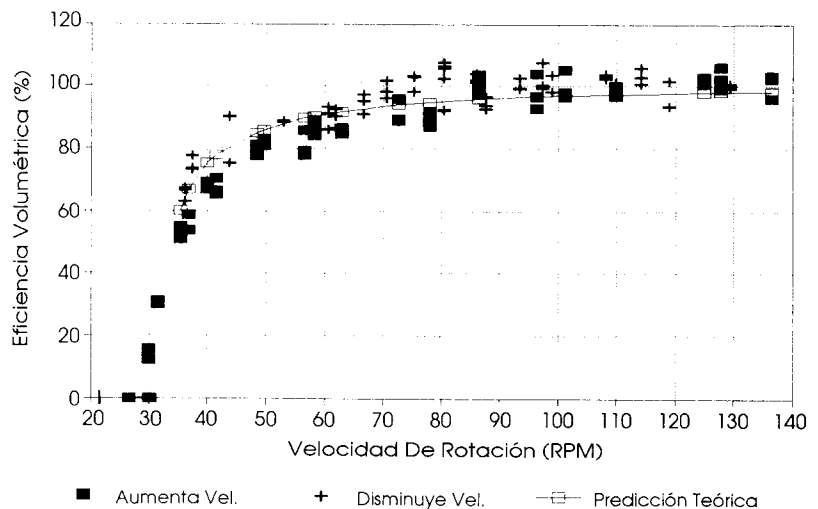


Figura No. 6

**VALVULA LARGA, H=2.54 m, h=5.5 mm**  
PRUEBA DE EFICIENCIA VOLUMETRICA

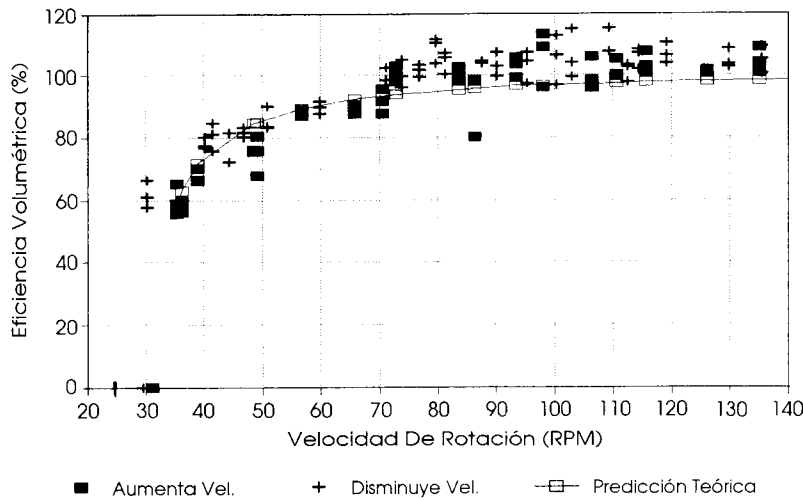


Figura No. 7

carrera al doble de la original. Así pues, estas serán las nuevas condiciones de operación de la aerobomba:

- Cabeza Estática de Bombeo: 12 m
- Diámetro del cilindro: 63 mm
- Nueva carrera con válvula de acople: 100 mm
- Nueva velocidad de viento de arranque y parada: 2.0 m/s
- Nuevas velocidades de viento de diseño: 2.24 m/s y 2.9 m/s

En la figura No.8 se ilustra, además la nueva condición de operación para la misma bomba (63 mm Día) acondicionada con válvula de acople y el doble de la carrera. Vale la pena anotar que con esta nueva carrera, la aerobomba requeriría una velocidad de viento de arranque de 5.3 m/s para operar sin válvula de acople.

La ventaja de esta nueva disposición, se ilustra en la Figura No. 9, donde se resume comparativamente, el caudal bombeado por la aerobomba bajo las condiciones, aquí

fabricación de la válvula en una espuma de poliuretano de formulación especial, que cumpla con los requerimientos físicos particulares de esta aplicación.

**Predicción de Comportamiento de Aerobomba Jober:** Con base en las pruebas de laboratorio realizadas sobre la bomba de 63 mm, y observando el comportamiento real de la Aerobomba Jober, tanto el rango de velocidades como el tamaño de la bomba se ajustan adecuadamente. En la predicción teórica que se realizará a continuación, se asumen las siguientes condiciones físicas de bombeo; para dicha aerobomba sin y con válvula de acople:

- Cabeza Estática de Bombeo: 12 m
- Diámetro del cilindro: 63 mm
- Carrera original JOBER: 50 mm

Para estas condiciones, y teniendo en cuenta las características de conversión de energía del rotor Jober (Pinilla & Mateus, 1993), se encuentra que las velocidades de operación de la aerobomba serán

- Velocidad de viento de arranque: 3.76 m/s
- Velocidad de viento de diseño (máxima eficiencia de

- conversión): 2.24 m/s
- Velocidad de viento de parada: 1.8 m/s

La figura No. 8 muestra el par momento en el eje del rotor Jober, a diferentes velocidades de viento, junto con la correspondiente curva de carga que impone la bomba, para esta predicción.

Para estas condiciones, se puede utilizar una válvula de acople que opere aproximadamente en el mismo rango de velocidades de viento (instalación en un régimen de viento dado), lo cual se logra aumentando la carrera del pistón.

Para efectos comparativos se decide aumentarla

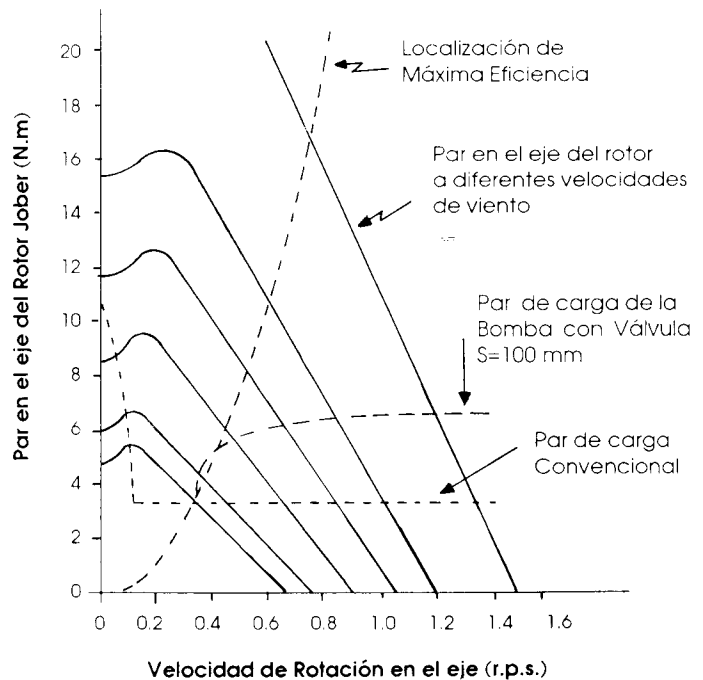


Figura No. 8 - Comparación Curvas de carga para Bomba Convencional y con válvula de acople - JOBER

## Referencias

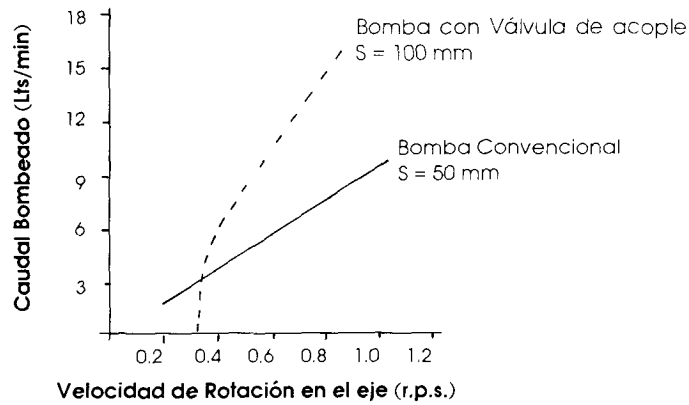


Figura No. 9 - Predicción de entrega de Caudal Molino Jober con y sin válvula de acople  
Cabeza: 12 m, 63 mm Dia.

expuestas. Notese que el caudal bombeado para el mismo rango de velocidades de viento se aumenta notoriamente al acoplar este nuevo concepto de válvulas con una aerobomba, con algunas modificaciones mecánicas menores.

**Trabajo futuro:** En el corto plazo se

realizarán pruebas de campo de comportamiento global de aerobombas comerciales colombianas, utilizando la válvula de acople, con el fin de probar el concepto e identificar sus bondades y dificultades en aerobombas. Estas pruebas se realizarán en el campo de pruebas de UNIANDES.

Granados, A. (1991). *Estudio y Evaluación Técnica de un Molino Jober*. Tesis de Magister en Ingeniería Mecánica Depto. de Ing. Mecánica Universidad de Los Andes, Bogotá, Colombia. Septiembre.

Hernández, H. (1993) *Matching Valve Dynamic Tests. First Report of Activities*. Research Memorandum. FIVA, Mechanical Engineering Dept. - Universidad de Los Andes Bogotá, Colombia, Mayo.

Pinilla, A. Burton J. & Dunn, P. (1984) *Wind Energy to Water pumped: Conversion Efficiency Limits using Single Acting Lift Pumps*. Wind Energy Conversion. Cambridge University Press pp 334-45

Pinilla, A. (1993) *ISC Development of a 3S Pump. First Annual Report*. Submitted to the Commission for European Communities, Bogotá, Colombia. August.

Pinilla, A. & Mateus, L. (1993). *Estación de Pruebas de Aerobombas*. Artículo presentado al Sexto Congreso de la Asociación Latinoamericana de Energía Solar. La Plata, Argentina, Diciembre.

Smulders, P. (1992). *Matching Valve: Compilation of Calculations and Measurements*. Technical University of Eindhoven, Eindhoven, The Netherlands, April.

