

# REVISTA DE INGENIERIA

## UNIVERSIDAD DE LOS ANDES

Volumen 2, Enero de 1992  
ISSN 0121 - 4993

### INVESTIGACION

Actividades de Energía Eólica en Uniandes Alvaro Pinilla	1
Adquisición de datos para el análisis y síntesis en Ingeniería de Control: Modelaje y Diseño de un controlador digital para un horno rotatorio Edith Charry, Mauricio Duque, Martín González	8
Modelación Numérica de la Resistividad Eléctrica del Subsuelo Carlos E. Molano Cajigas	13
Requisitos y Propuestas para el Desarrollo de las Fuentes de Energía Nuevas y Renovables en Colombia Angela Inés Cadena M.	17

### OPINION

<i>Una Reflexión acerca del Futuro de las Ciencias Básicas en Colombia</i> Sergio Fajardo V.	27
Tecnología y Desarrollo en Latinoamérica: Algunas Observaciones Apropiadas para una Economía Abierta Rafael Bautista	35
La Deducción, Enemiga de la Docencia de las Ciencias Exactas. Sergio F. Barrera T.	38

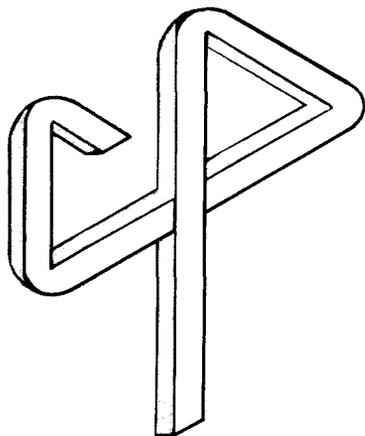
### RESUMENES DE INVESTIGACION

Técnicas Avanzadas para la Generación de Imágenes Carlos E. Alvarez Guerrero	41
Propuesta Metodológica para Realizar el Proyecto de Investigación: Indagación Piloto sobre la Investigación en el Área Informática en los sectores Privado, Gobierno y Universidades Colombianas Martha Lilia Camargo C.	41
Extensión del Algoritmo Ascendente para el Manejo de Gramáticas Atribuidas Fernando Aguirre Hurtado	42
La Tasa Efectiva como Patrón para Comparar Activos y Pasivos Financieros: Un Criterio Equivocado Fernando Palacios Gómez	42
Necesidades de Educación Informática en la Ingeniería Civil Camilo J. Jaramillo Cardoso	42
Algoritmos de Visualización, Colisión y Planificación en un Ambiente de Programación de Robots Eduardo Villegas J., Jorge Morales V., Jorge A. Villalobos S.	43
Diseño de Piezas Metalmecánicas en un Ambiente CAD de Propósito Específico: Una Propuesta por Rasgos Mario Fernando De La Rosa, José Tiberio Hernandez	43
Construya un Interpretador de su Lenguaje Favorito en Ocho Líneas Hector Muñoz Avila	44
Hacia una Metodología Orientada por Objetos para el Diseño de Aplicaciones Gráficas Interactivas Luis B. Chicaíza S., Jorge A. Villalobos S.	44
Diseño de una Herramienta para Desarrollo de Sistemas Operativos Paralelos Experimentales (XSOP) Juan Manuel Pereira	45

### INFORMACION

Educación Continuada, Facultad de Ingeniería	46
Publicación de Libros, Ediciones Uniandes	48

  
**Cal Publicidad**  
arte- impresores **Itda.**



diseño e impresión de:

- \* revistas
- \* libros
- \* afiches
- \* plegables
- \* papeleria en general
- \* artes finales - impresión laser

**diseño por computador**

calle 56 No. 16-34 Int.1 - Tels: 248 0255 - 212 5686 Fax: 2178267 a.a. 59939  
Santafé de Bogotá, Colombia

Colombo Coreana de Seda S.A.  
**COSEDA**

Colombo Coreana de Seda S.A. Calle 18 Norte No. 11-45 - Tel.: (9282) 35657  
Fax: (9282) 35667 - A.A. 303 Popayán, Colombia, Sur América.

 **INCOLBESTOS**

Por el desarrollo tecnológico  
de Colombia

# Investigación

La sección de Difusión de Investigación en Ingeniería, como su nombre lo indica, pretende divulgar el trabajo de investigación y desarrollo que se haga en esta Facultad y otras Facultades de Ingeniería en el país.

Esperamos que esta sección pueda servir para aumentar los mecanismos de comunicación de la comunidad científico-tecnológica en el país. Consecuentes con lo anterior invitamos a investigadores de otras universidades para que usen este espacio para divulgar resultados que sean de interés para un sector amplio de la ingeniería.

Alvaro Pinilla  
**Resumen**

## Actividades de Energía Eólica en Uniandes

**ALVARO PINILLA** - Ingeniero Mecánico, Uniandes. PhD, University of Reading Inglaterra. Profesor de Ingeniería Mecánica, Uniandes. Área de Especialización Energía Eólica.

El presente artículo resume parte de las actividades de investigación que se realizan en el campo de la energía eólica en el Departamento de Ingeniería Mecánica.

Esta labor se ha realizado desde 1986, con mayor intensidad desde 1988 con la apertura del Magister en Ingeniería Mecánica, donde a través de varios trabajos de tesis se han podido encontrar resultados concretos en los varios tópicos aquí descritos.

### Introducción<sup>1</sup>

El Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de los Andes ha estado trabajando en el campo de las energías renovables desde hace ya algunos años, especialmente en

el desarrollo de pequeñas turbinas hidráulicas, sistemas de conversión de energía de la corriente de los ríos, esquemas de energía solar para el calentamiento de agua y secado de productos y en energía eólica, principalmente para el bombeo de agua.

Resultados prometedores de la labor realizada hasta ahora, por profesores y estudiantes, han animado al grupo de energía eólica a continuar trabajando, no solamente en la actividad investigativa universitaria sino también actuando como consultor de los fabricantes locales de equipos eólicos de bombeo de agua.

Esta contribución describe en algún detalle los diferentes proyectos que se están llevando a cabo por parte de los miembros del grupo. Vale la pena resaltar que los proyectos realizados han sido enteramente financiados por el CIFI (Centro de

Investigaciones de la Facultad de Ingeniería) y el Departamento de Ingeniería Mecánica. El grupo esta compuesto por algunos asistentes graduados que cursan el Magister del departamento y estudiantes de pregrado y posgrado; en total, unas 20 personas.

El creciente interés de los estudiantes en esta área de las energías renovables es el resultado de la inclusión en el pensum de cursos electivos en este campo a nivel de pregrado y posgrado. Entre otros, están los cursos de: Maquinaria Hidráulica, Energía Eólica, Teoría de las Alas Bombas y Fuentes de Energía Renovables.

### Proyectos De Investigación

Esta sección del artículo da una descripción de algunos de los proyectos que se están

*1 - Este trabajo es una traducción del artículo presentado por el autor en el International Workshop on Wind Energy for Rural Areas WERA'91, Octubre 1991, Holanda.*

realizando, y en cada uno se harán comentarios sobre los resultados parciales encontrados hasta ahora.

### Instalación de una Estación de Pruebas de Aerobombas

A finales de 1988, el grupo inició la instalación de una estación de pruebas para aerobombas a unos 25 Km de Bogotá, en el municipio de Mosquera. La estación contiene 5 sistemas que suministran agua a la granja bajo condiciones reales de operación. Esta disposición ha permitido identificar no solamente los problemas técnicos de los equipos sino además conocer los problemas a los cuales se enfrentan los usuarios de estas máquinas al operarlos y mantenerlos. Los equipos instalados son: un molino multipala americano, una aerobomba JOBER, un GAVIOTAS MV2E, un molino GAVIOTAS-GUAJIRA recientemente desarrollado para comercialización, además de un pequeño aerogenerador comercial. Vale la pena mencionar que todos los equipos instalados son equipos comerciales. (ver fotografía No.1)

El grupo al instalar esta estación se vió enfrentado a la dificultad de conseguir la instrumentación apropiada para la realización de pruebas técnicas sobre los equipos. Así pues gran parte de los instrumentos requeridos fueron desarrollados por los miembros del grupo. Entre los instrumentos desarrollados se encuentran los anemómetros, flujómetros,

celdas de carga, tacómetros, etc. Los cuales envían funciones análogas para ser adquiridas por un computador personal a través de una tarjeta de adquisición de datos.

Una descripción completa de la estación de pruebas se encuentra en Pinilla & Mateus (1991).

### Pruebas de campo Sobre Aerobombas Comerciales

Las aerobombas son sometidas a pruebas de campo del tipo intensivo y extensivo, con el fin de caracterizar completamente su funcionamiento. Los sistemas que han sido probados son el equipo multipala americano y la

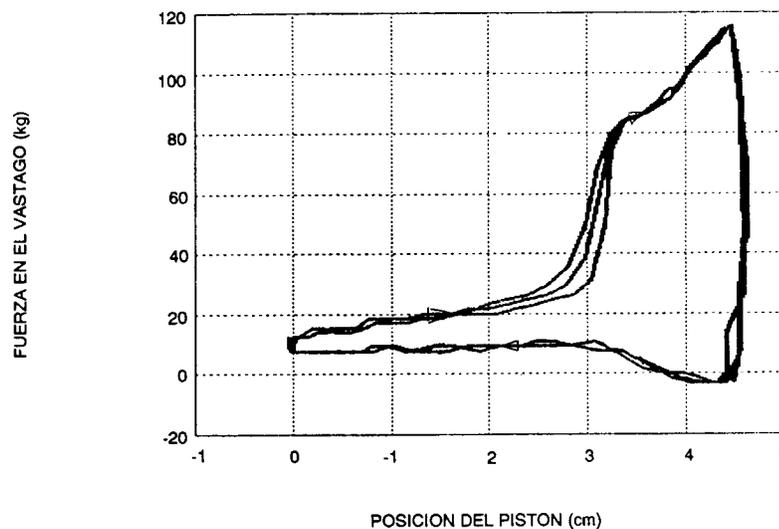
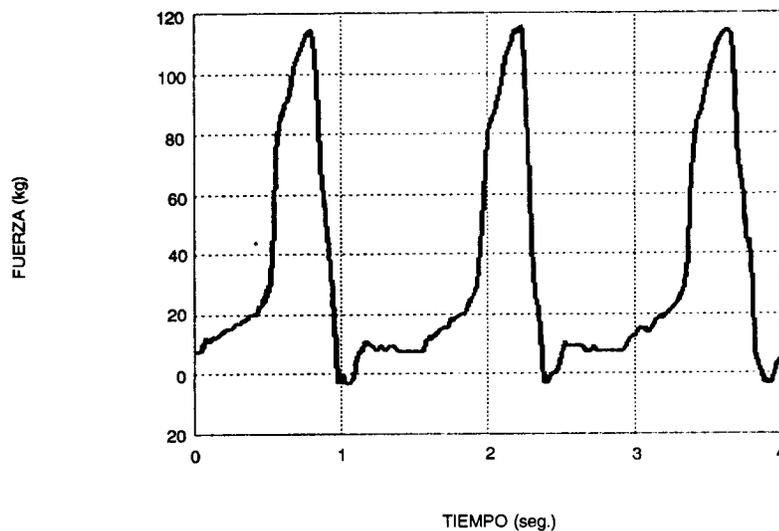


Figura No.1- Pruebas Intensivas - Fuerza en el Vástago y Diagrama indicador. Aerobomba JOBER

aerobomba comercial JOBER.

El tipo de mediciones que se realizan sobre los sistemas son:

Para pruebas intensivas, los datos suministrados por los instrumentos son colectados a una tasa de 100 Hz y algunas veces más rápido. Las variables que son simultáneamente medidas y grabadas son: la velocidad del viento, la velocidad rotacional del rotor, fuerza en el vástago de la bomba y desplazamiento del pistón. Las curvas características de Coeficiente de Potencia (medida de la eficiencia aerodinámica del equipo) contra la relación de velocidad de punta son determinadas permitiendo al rotor girar sin carga en un viento estable. Estas pruebas duran de dos a tres segundos.

Para pruebas extensivas las variables medidas son: la velocidad del viento, la tasa de flujo de agua y la velocidad rotacional del equipo. Es de anotar que, debido a la intensa variabilidad del viento en el sitio de la estación, el tiempo promedio de toma de datos es de un minuto, inferior a la recomendación internacional de promedio de cinco minutos.

Las figuras 1 a 3 ilustran algunos resultados de estas pruebas, arriba descritas, realizadas sobre la aerobomba JOBER. Nótese la baja velocidad del viento de arranque de este equipo, debido a que el sistema de bombeo está

contrabalanceado por un resorte. La condición de bombeo para las pruebas realizadas es de una altura estática de bombeo de 11 metros tomando el agua de un pozo de 5,5 metros de profundidad. La longitud de bombeo es de 390 metros a través de manguera de 1 pulgada en diámetro y un cilindro de la bomba de 2,5 pulgadas. Pruebas similares a éstas se han también realizado

sobre el equipo multipala americano.

Las pruebas de campo son complementadas con pruebas realizadas en el Laboratorio de Máquinas Hidráulicas sobre las bombas, primordialmente. Las instalaciones con que cuenta el laboratorio permiten caracterizar las bombas bajo condiciones variables de altura estática de bombeo y velocidad.

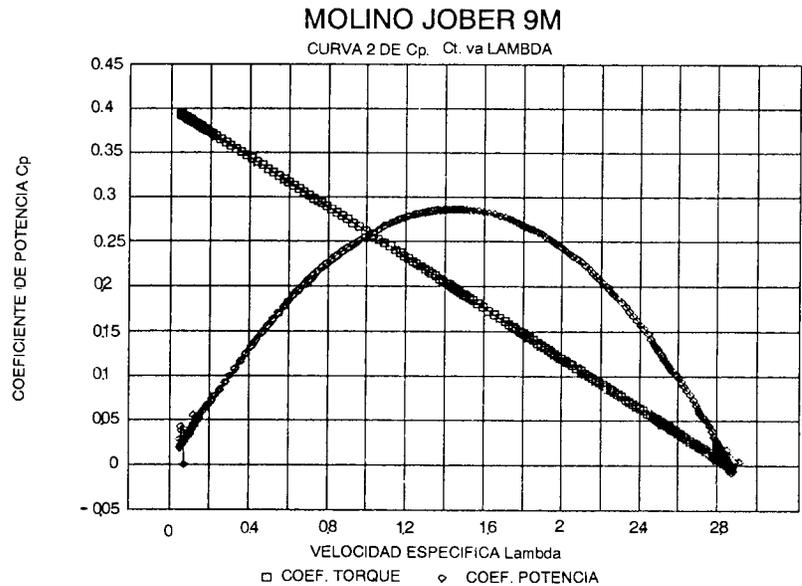


Figura No. 2 Pruebas Intensivas-Coeficiente de Potencia vs. Velocidad Específica

Aerobomba JOBER

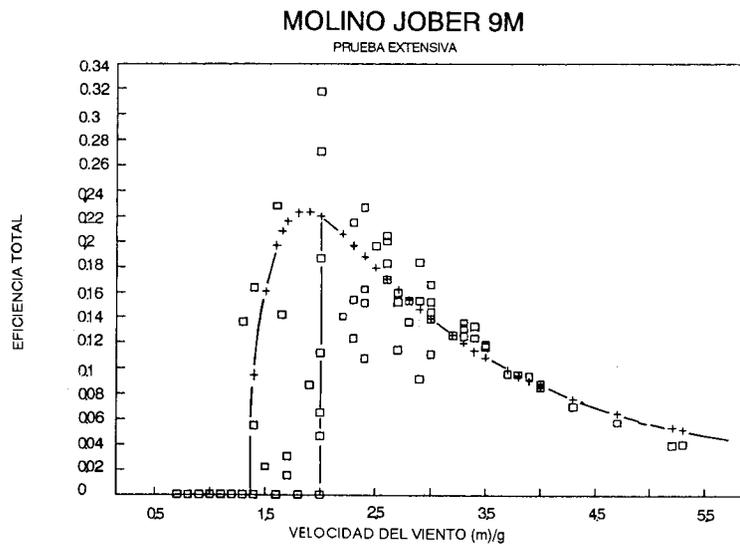
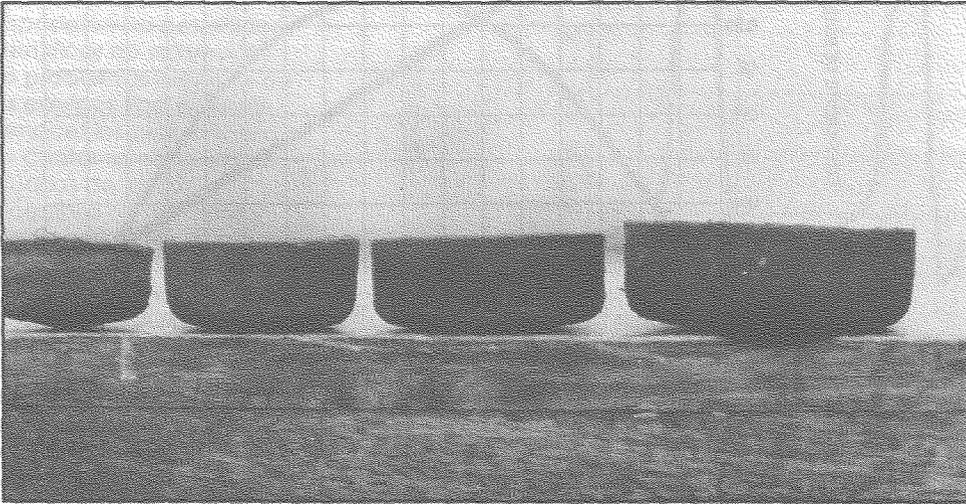


Figura No. 3 - Pruebas Extensivas-Eficiencia Global vs Velocidad del Viento

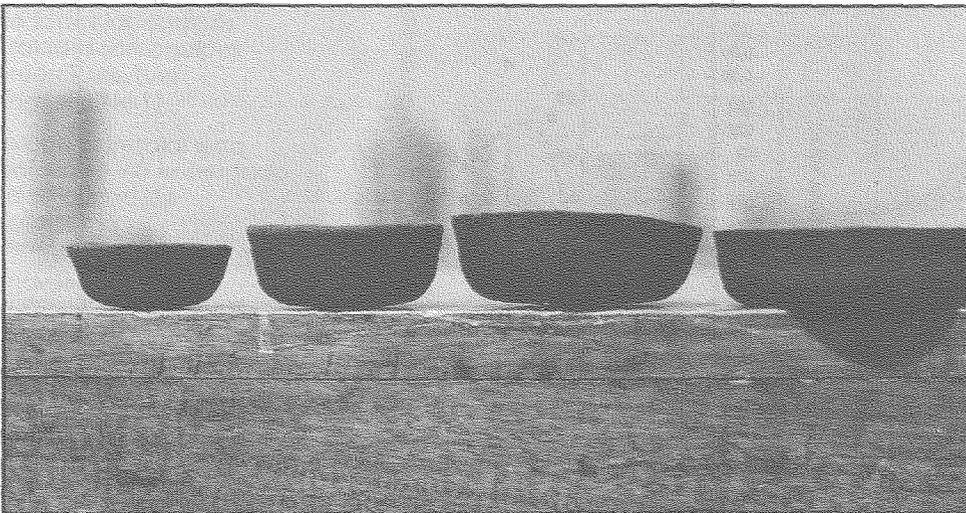
Aerobomba JOBER



Fotografía No.1- Vista de la Estación de Pruebas de Aerobombas.  
De Izquierda a Derecha: Molino Multipala americano, Jobber, Gaviotas MV2E, Gaviotas Guajira.



Fotografía No. 2- Sellos de copa de cuero antes de pruebas de absorción



Fotografía No. 3- Sellos de copa de cuero después de pruebas de absorción

Prototipos de diferentes bombas de desplazamiento positivo del tipo recíprocante; que son desarrolladas por miembros del grupo, también han sido probadas. El resultado más interesante es el funcionamiento de una bomba recíprocante de doble acción con cámaras de descarga conteniendo bolas de caucho para bajas cabezas de bombeo y gran volumen de agua. Esta bomba que ha sido probada solamente en el laboratorio, presenta eficiencias volumétricas hasta el 240% a bajas velocidades. Se planea instalar esta bomba en uno de los molinos de viento comerciales para pruebas de campo.

### Estudio Sobre Sellos de Copa de Cuero

Otro proyecto de interés es el de entender el comportamiento de los sellos de copa de cuero o émbolos de cuero que se encuentran en el mercado colombiano. El sello de copa de cuero es el elemento sellante de la cámara de bombeo comúnmente utilizado en las bombas de los molinos de viento.

Este proyecto se inició por conocer los diferentes procesos a los cuales es sometido el cuero. Se realizaron visitas a diferentes industrias del cuero que producen este tipo de sellos. La práctica común es producir los sellos a partir de los retazos que quedan después de la apropiada selección del material que se utiliza en la fabricación de

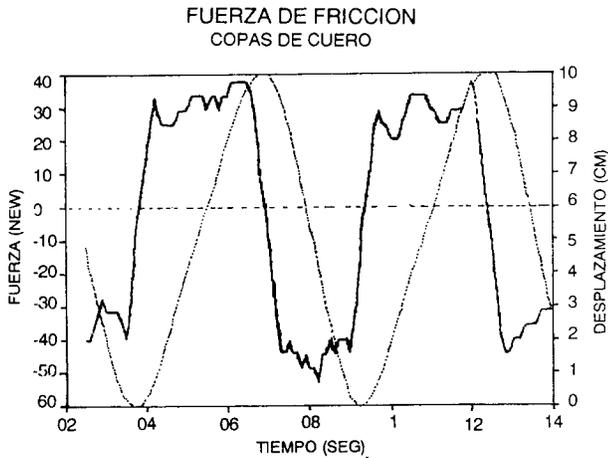


Figura No.4- Fuerza de Fricción Copa de cuero 2" - Cilindro de Bronce

absorción de agua por peso es de 30 % (impregnado) a 80 % (no impregnado), sin importar el tamaño del sello.

Con respecto a las dimensiones de las copas de cuero, no existe homogeneidad, aún del mismo fabricante; consecuentemente las copas quedan o muy holgadas o muy apretadas en el cilindro de la bomba que las va a contener.

La fotografía No.2 ilustra los sellos de cuero después de la manufactura y la fotografía No. 3

camisas de diversos materiales y diámetros. La figura No.4 muestra un ejemplo de los resultados del tipo de fuerzas de fricción que se presentan.

Una de las dificultades es que ninguno de los fabricantes ha mostrado interés en mejorar el proceso y la calidad de los sellos de copa de cuero.

### Estudio Sobre Sellos Hidrodinámicos

En contraste con el trabajo sobre los sellos de copa de cuero, el grupo está también explorando la posibilidad de producir sellamiento de la cámara de presión de una bomba recíprocante por medio de un sellamiento hidrodinámico. El beneficio de sellamiento de esta

zapatos. Esto implica que los sellos que se encuentran en el mercado son de baja calidad. Más aún, los fabricantes no producen sellos de copa de cuero a partir de cuero al tanino o curtido vegetal, el cual es el recomendado para este tipo de sellos. Los sellos que se consiguen son fabricados a partir del cuero curtido mineral o al cromo.

Además de lo anterior, los sellos de copa de cuero deben tener impregnación de estearina, sin embargo no todos los fabricantes someten su producto al proceso de impregnación. Del trabajo se ha encontrado que la diferencia entre sellos impregnados y los no impregnados en términos de

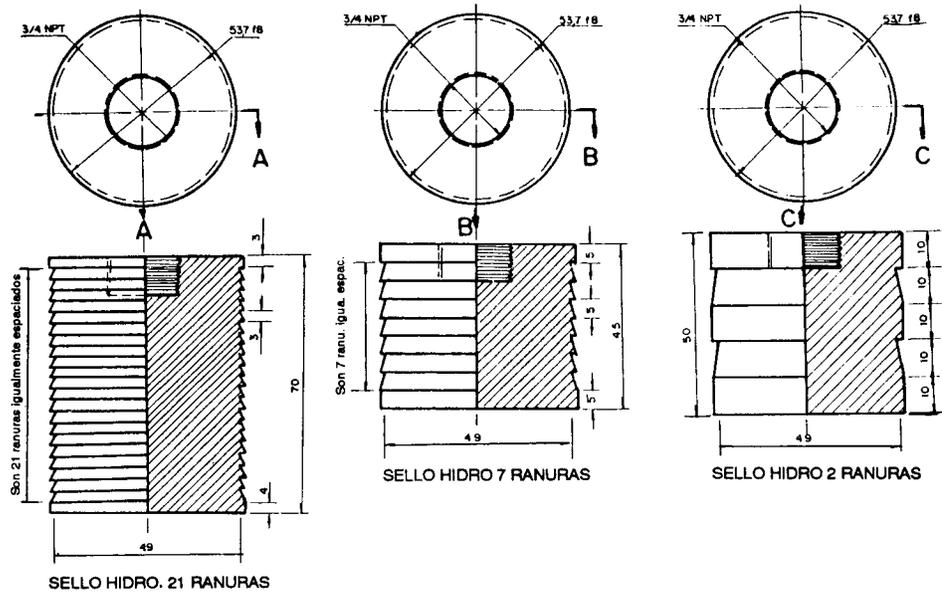


Figura No.5 -Geometrías probadas para sellos hidrodinámicos

muestra los sellos de cuero después de saturación completa en agua (4 a 5 días).

Otra prueba realizada sobre las copas de cuero es la determinación de la fuerza de fricción causada sobre diferentes

cámaras por medio de fenómenos de la dinámica de fluidos resultaría en el suavizamiento de la operación de la bomba misma.

Hasta ahora, algunas geometrías de ranuras sobre el cuerpo del

pistón (ver fig.No.5) han sido probadas bajo condiciones estáticas con el fin de entender y visualizar el fenómeno del sellamiento.

Una conclusión preliminar, que debe ser nuevamente corroborada, es que cuando las ranuras (cambio de geometría abrupto) están sujetas a una diferencia de presión sobre las dos caras del pistón, se genera una fuerte circulación dentro de ellas comportándose como un cuerpo sólido. Esto es, actúa como un pistón sólido, no lográndose producir el efecto deseado.

Bajo estas circunstancias, un enfoque diferente ha sido utilizado. Este consiste en la creación de pequeños canales de comunicación entre la cara de presión del pistón y la parte cilíndrica de éste, como se ilustra en la figura No. 6. La idea esencial es la de simular el efecto que se presenta en los cojinetes presurizados externamente para generar la película de lubricación. De los primeros experimentos realizados con esta disposición se encontraron resultados prometedores. Los experimentos se llevaron a cabo, variando el número de canales de comunicación desde dos hasta doce, simétricamente distribuidos alrededor del pistón. El pistón fue sujeto a diferencias de presión desde 18 a 48 libras por pulgada cuadrada. En este primer conjunto de experimentos, la única variable ha sido el número de huecos, sin cambios en la

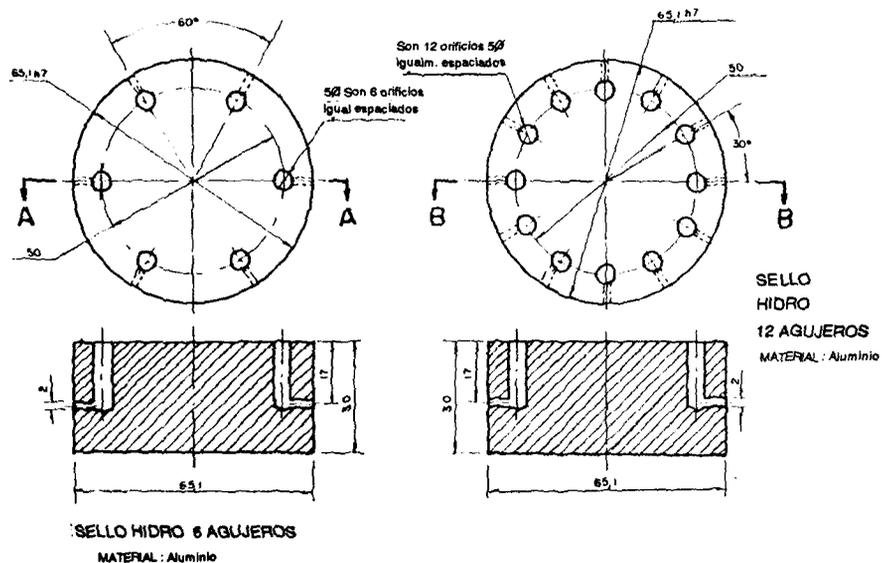


Figura No.6-Sello hidrodinámico.

geometría, holgura diametral y diámetro de los huecos.

De estas pruebas se encontró además que, a altas presiones, solo un tercio de los escapes se presentan a través de la holgura del pistón cuando se compara con la primera alternativa de pistones con ranuras. En el escape que se presenta también se encontró un comportamiento transiente, el cual requeriría un profundo análisis; adicionalmente el número de huecos en el pistón parece influir profundamente en el comportamiento del sello hidrodinámico. Más trabajo se deberá realizar sobre el último enfoque, ya que promete ser una interesante opción al problema de sellos de pistones y no está completamente entendido.

### AEROBOMBEO REMOTO

Al considerar las condiciones topográficas del país y los requerimientos de agua en la

mayoría de las regiones, la opción de utilizar la energía eólica para bombeo remoto o por transmisión es muy atractiva. Este tipo de solución ha sido estudiada en Kenia y Brasil, mostrando buenos resultados para ser tenidos en cuenta. En este campo de aplicación el grupo recientemente inició un trabajo con el Centro Las Gaviotas sobre la realización de pruebas sobre un sistema de bombeo remoto manual con el propósito de acoplarlo a un molino de viento. El sistema es de tipo hidráulico, muy similar al que se implementó en Kenia, hace ya algunos años. El sistema está siendo sometido a pruebas bajo una condición de altura de bombeo estática de 20 metros. El prototipo es fabricado en tuberías y accesorios de PVC, con el objetivo final de producir el sistema en acero galvanizado.

El estudio no solamente incluye la experimentación sobre la unidad de bombeo sino también el modelamiento matemático de la

operación de la unidad como una herramienta de diseño para optimizar su uso bajo condiciones de carga (esto es, velocidad del viento, velocidad de rotación, cabeza de bombeo, altura, longitud y diámetro de la tubería, etc).

Además de los proyectos descritos brevemente en párrafos anteriores existen otros proyectos en áreas relacionadas; para mencionar solo unos cuantos están: el mejoramiento de los instrumentos desarrollados, implementación de una unidad de transmisión de datos, el acoplamiento de una bomba centrífuga a un molino de viento de giro rápido, un regulador electrónico de carga para un pequeño aerogenerado.

En conjunto con el Centro Las Gaviotas, se ha iniciado otro proyecto muy recientemente, sobre la posibilidad de fabricación de uno de los equipos comerciales utilizando materiales plásticos y nuevos materiales que sean disponibles en Colombia. Otra actividad ha sido la fabricación de dos aerobombas de diseño Holandés (CWD2000), adaptando los materiales a aquellos que se consiguen en el mercado local.

## Contacto con los Fabricantes Locales de Aerobombas

El grupo ha consolidado alguna experiencia en el campo del aerobombeo, al mismo tiempo que se ha ganado cierta reputación entre los tres fabricantes locales de estos equipos. Existe una buena interacción y cooperación con dos de los fabricantes locales. La colaboración más reciente consiste en el desarrollo de un molino de viento con el Centro Las Gaviotas, para ser instalado y comercializado en la zona norte de Colombia, específicamente en la Guajira. El equipo se

construyó y en el momento de escritura del presente artículo se encuentra bajo prueba en la estación de pruebas de aerobombas en Cundinamarca. Se espera que a partir del diseño básico del equipo se puedan realizar modificaciones menores para ser adaptado en aplicaciones en las diversas regiones del país.

## Trabajo Futuro

El grupo ha presentado dos propuestas de investigación para su estudio. Una de ellas se presentó a la Comisión de las Comunidades Europeas para el desarrollo de una bomba recíproca adaptable a molinos de viento la cual ya fue aprobada. Esta investigación se hará en conjunto con la Universidad Técnica de Eindhoven en Holanda y la Universidad de Reading en Inglaterra. La otra propuesta se presentó a Colciencias para

investigar sobre la aplicación de equipos dinámicos en el bombeo directo y remoto con aerobombas. Los dos proyectos tendrán una duración aproximada de dos años.

## Bibliografía

- (1) Granados A. & Pinilla A. (1991). *Estudio y Evaluación de la Aerobomba JOBBER. VII Simposio de Energía Solar y Energías No Convencionales, Julio, Bogotá.*
- (2) Pedraza R. (1991). *Análisis y Diseño de Sellos Hidrodinámicos para Bombas Recíprocas. Proyecto de Grado. Departamento de Ing. Mecánica, Agosto, Bogotá.*
- (3) Pinilla A. & Mateus L. (1991). *Comparative Field Tests Results of Two Colombian Windpumps. Wind Energy: Technology & Implementation. Proceedings of Amsterdam European Wind Energy Conference, October 91, Elsevier, PP 682-686.*
- (4) Reyes W. & Pinilla A. (1991). *Análisis de Sellos de Cuero utilizados en Bombas de Desplazamiento Positivo. VII Simposio de Energía Solar y Energías no Convencionales, Julio, Bogotá.*
- (5) Rey R. & Pinilla A. (1991). *Bombeo Remoto con Aerobombas. VII Simposio de Energía Solar y Energías No Convencionales, Julio, Bogotá.*



20 AÑOS

## CONSULTORES UNIDOS

MIEMBRO DE Alco

**CONSULTORES - INTERVENTORES - ASESORES**

**INGENIERIA CIVIL**

**INGENIERIA ELECTRICA Y MECANICA**

**ESTUDIOS ECONOMICOS Y DE FACTIBILIDAD**

**ESTUDIOS ADMINISTRATIVOS**

**INFORMACION Y SISTEMAS**

CALLE 57 No. 18-25 APTO. AEREO 53830  
TEL: 210 2355 - FAX: 3102850  
BOGOTA D.E. COLOMBIA