



TRACTORES Y MÁQUINAS AGRÍCOLAS *TRACTORS AND AGRICULTURAL MACHINES*

NOTA TÉCNICA

Metodología para el diseño de bomba de pistones axiales para máquinas pulverizadoras

Methodology for the design of axial pistons bomb for sprayer machines

José Antonio Gómez Bauzá¹, Yunia Parra Escalona² y Pedro Paneque Rondón³

RESUMEN. Este trabajo tiene por objetivo desarrollar un estudio hidromecánico integrador, orientado al diseño de bombas de pistones axiales de máquinas pulverizadoras para la agricultura, basado no solo en estudios anteriores sino en la experiencia acumulada durante los años de trabajo en este tema, dado que la información existente está dirigida fundamentalmente a la selección y explotación de este componente, no sucediendo así para el diseño, y esto dificulta en gran medida el desarrollo de estos equipos en países como Cuba que no cuentan con una tradición y experiencia en este campo, lo que demuestra la importancia del tema para el desarrollo de estos equipos en el país. Para ello se propone una metodología de cálculo específicamente orientada al diseño de estos equipos, y además se realiza un estudio estadístico basado en los datos recopilados de más de cien bombas de producción extranjera de diecinueve firmas de reconocido prestigio internacional que permiten analizar aspectos como: velocidad máxima real de desplazamiento del pistón, caudal y presión de trabajo para estas bombas, respondiendo a las nuevas tendencias internacionales. El aporte teórico de la investigación radica en que este estudio constituye una guía metodológica integradora para el diseño de este tipo de bombas y como aporte práctico la fabricación de estas bombas con la consiguiente sustitución de importaciones y la puesta en marcha del parque de máquinas pulverizadoras, fundamentalmente de producción nacional, que en la actualidad requieren de este componente.

Palabras clave: velocidad, desplazamiento, caudal, presión, hidromecánico.

ABSTRACT. This work aims to develop a study of hydro mechanical design oriented axial piston pumps, spraying machines for agriculture, based not only on previous studies but on the experience gained during the years of work on this issue, since information is primarily aimed at existing selection and operation of this component it is not going well for the design, and this greatly impedes the development of these equipments in countries like Cuba that do not have a tradition and experience in this field, demonstrating the subject's importance for the development of these equipments in the country. To achieve this, a calculation methodology specifically aimed at the design of such equipment, and we perform a statistical study based on data collected over a hundred pumps of foreign production of nineteen internationally recognized firms that analyze aspects such as: maximum speed of piston displacement, flow and pressure of work for these pumps, responding to international trends. The theoretical contribution of the research is that this study is an integrative methodological guide for the design of this type of pump and as practical contribution the manufacturing of these pumps with consequent replacement of imports and the implementation of the spray machine, primarily from domestic production, which currently requires this component.

Keywords: speed, displacement, flow, pressure, hydromechanical.

INTRODUCCIÓN

Estudiando el estado actual del arte de las bombas de pistones axiales utilizadas en las máquinas pulverizadoras para

la protección fitosanitaria de plantas en la agricultura, se puede concluir, que la bomba es el elemento principal en estas máquinas, de su correcto diseño, selección y funcionamiento depende la aplicación del producto fitosanitario y por ende

Recibido 10/09/08, aprobado 22/11/09, trabajo 05/10, metodología.

¹ Ing., Centro de Desarrollo de la Maquinaria Agrícola (CEDEMA), Peralta # 65 Esq. a Coliseo Rpto. Peralta, Holguín, Cuba, Apartado Postal 3. CP: 80100, Teléfonos: 461251, 424362, 422906, Fax: 422906, E-✉: jgomez@cedema.cu.

² M.Sc., CEDEMA, Holguín, Cuba.

³ Dr. C., Profesor e Investigador Titular, Universidad Agraria de La Habana (UNAH), Facultad de Ciencias Técnicas, La Habana, Cuba.

la calidad del producto final a consumir, como parte de una agricultura más sostenible con alimentos sanos sin afectar el medio ambiente (COMET, 2007; Gama, 2007; Agroinformacion, 2008a; Agroinformacion, 2008b; Syngentaagro, 2008; Members.fortunecity, 2008; Porras, 2008; Fernández, 2005; Gutiérrez, 2004).

El control fitosanitario de los cultivos supone realizar una serie de técnicas de aplicación de productos que impliquen su correcta distribución para lo cual será imprescindible disponer de la maquinaria adecuada, de forma que se consigan altas efectividades y rendimientos, dependiendo fundamentalmente de la forma de presentación del producto fitosanitario (Aca, 2008; Conarefi, 2008; Engormix, 2008; INTA, 2008; Pestalart, 2008; Sanidadvegetal, 2008; Wto, 2008).

La capacidad operativa de la maquinaria utilizada en estas labores se relaciona directamente con el funcionamiento de los distintos componentes del equipo. Las fallas o defectos que se produzcan en algún o algunos de los componentes de la máquina pulverizadora, incidirán en forma negativa en la calidad del trabajo y por ende en el resultado de la aplicación (Cooperativasdegalicia, 2008).

La efectividad de estas máquinas se debe al correcto funcionamiento de cada uno de sus componentes, entre los que se destaca por su función e importancia la bomba, la cual se puede considerar como el corazón de la misma, accionada por la toma de fuerza del tractor. Esta realiza la función de transformar la energía mecánica que se le entrega en energía hidráulica, es decir succiona el caldo, desde el depósito y lo impulsa hacia las boquillas a una presión determinada (Hardi, 2007).

A nivel nacional se han desarrollado un grupo de máquinas pulverizadoras fundamentalmente para la agricultura cañera, con resultados favorables al igual que se ha estado trabajando para lograr una familia de bombas cubanas. En la Figura 1 se muestra la bomba BPA3-120/25 desarrollada en un proyecto del Centro de Desarrollo de la Maquinaria Agrícola (CEDEMA), con el objetivo de introducirla a la producción nacional y sustituir importaciones.

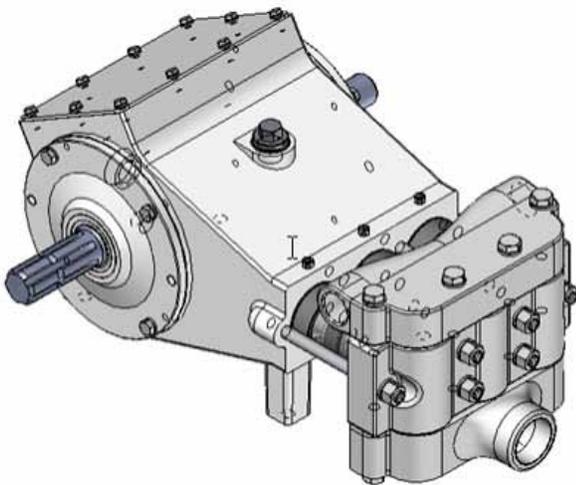


FIGURA 1. Esquema de la bomba BPA3-120/25.

El estudio de la bibliografía consultada sobre el tema de las bombas de pistones axiales y su metodología de cálculo demuestra que éstas, independientemente de estar ampliamente abordadas, están orientadas a la selección y explotación de este componente y no al diseño, lo que demuestra la importancia del tema para desarrollar estos equipos en el país.

Es por ello que este trabajo tiene por objetivo desarrollar el estudio hidromecánico para el diseño de bombas de pistones axiales de máquinas con la integración de tres metodologías independientes: el cálculo del mecanismo, de la bomba y de las válvulas, garantizando las correctas dimensiones de todos los elementos que intervienen en el funcionamiento de estas lo que constituye una guía metodológica integradora para el diseño de este tipo de bombas y su fabricación con la consiguiente sustitución de importaciones y la puesta en marcha de las máquinas pulverizadoras fundamentalmente de producción nacional.

DESARROLLO DEL ESTUDIO HIDROMECAÁNICO

Estudio hidromecánico para el diseño de bomba de pistones axiales para máquinas pulverizadoras

Análisis de parámetros indispensables para el desarrollo de la metodología de cálculo orientada al diseño de bombas de pistones axiales de las máquinas pulverizadoras

Para dar respuesta al problema de la investigación, el estudio hidromecánico para el diseño de bombas de pistones axiales de las máquinas pulverizadoras en la agricultura, se propone una metodología de cálculo específicamente orientada al diseño de estos equipos, basados no solo en estudios anteriores sino en la experiencia acumulada durante los años de trabajo en este tema.

De forma diferenciada se realiza un estudio estadístico basado en los datos recopilados de más de cien bombas de producción extranjera de diecinueve firmas de reconocido prestigio internacional que se muestran en la Tabla 1 y que permiten analizar aspectos como:

- Determinación de la velocidad máxima real de desplazamiento del pistón;
- Análisis del comportamiento del caudal para estas bombas;
- Análisis del comportamiento de la presión de trabajo para estas bombas.

Estos parámetros resultan indispensables para comenzar los cálculos, luego se expone de forma detallada la metodología de cálculo la cual no solo integra las tres metodologías indispensables que son el cálculo del mecanismo, de la bomba y de las válvulas, sino que se aplican estudios importantes como el de Chiniaev (1983) y Fernández (2005), que resultan de obligatorio cumplimiento para garantizar el correcto funcionamiento de estos equipos.

Esta investigación constituye en primer lugar una guía metodológica integradora para el diseño de las bombas de pistones axiales de las máquinas pulverizadoras y por otra parte contribuye a la sustitución de importaciones para el país. El

estudio fue realizado con más de 40 bombas extranjeras, en la Tabla 1 se muestra un resumen de la cantidad de bombas y firmas por países analizados para realizar el estudio.

Determinación de la velocidad máxima real de desplazamiento del pistón

Partiendo de la recomendación expuesta por Fernández (2005), en su trabajo “Bombas centrífugas y volumétricas” donde plantea como velocidad máxima teórica de desplazamiento del pistón 1,5 m/s, la cual a su vez constituye la velocidad máxima recomendada para el líquido en la línea de succión; y del estudio realizado con más de 40 bombas extranjeras, para determinar la velocidad lineal máxima real utilizada en equipos de firmas de reconocido prestigio en dependencia de la frecuencia de rotación del árbol y el recorrido del pistón. Para el procesamiento de los datos fue utilizado el programa STATGRAPHICS Plus Version 5.0. Se obtuvo como resultado del análisis de regresión el gráfico que se muestra en la Figura 2.

TABLA 1. Resumen de la cantidad de bombas y firmas por países analizados para realizar el estudio

Nº	País	Cantidad de Firmas	Cantidad de Bombas
1	2	3	4
1	Italia	2	19
2	Dinamarca	1	4
3	Francia	4	15
4	España	3	6
5	Bulgaria	1	3
6	Polonia	1	1
7	Holanda	1	2
8	Estados Unidos	1	8
9	Brasil	1	2
10	Alemania	1	2
11	Inglaterra	1	1
12	Rusia	1	6
13	Suecia	1	34
Total	13	19	103

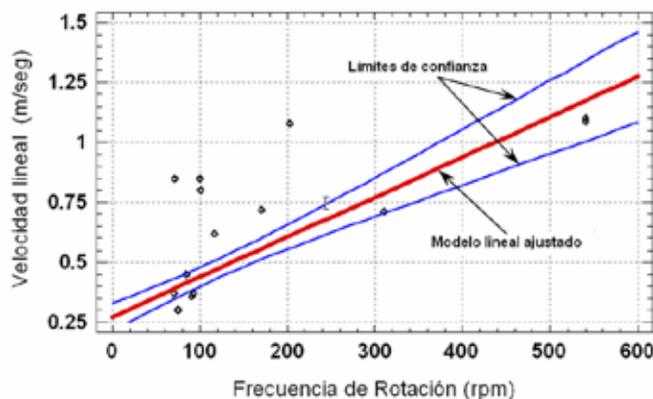


FIGURA 2. Gráfico de velocidad lineal del pistón ajustado.

Independientemente del resultado obtenido, el gráfico muestra que en ningún caso la velocidad es superior a los 1,1 m/s, por lo que se recomienda este valor para comenzar a desarrollar los cálculos.

Análisis del comportamiento del caudal para estas bombas

El caudal de la bomba por tarea técnica se exige hasta 120 dm³·min⁻¹, no obstante realizando un análisis con los datos de las bombas estudiadas y con el objetivo de conocer el rango en que se encuentra este parámetro en los equipos de este tipo producidos internacionalmente y utilizando el método anterior se obtuvo el gráfico que se muestra en la Figura 3.

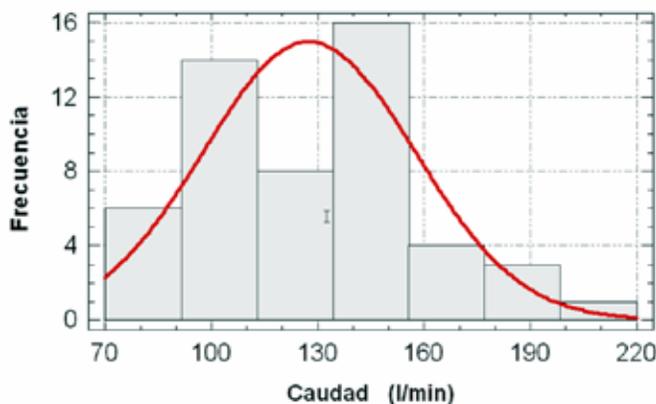


FIGURA 3. Gráfico de distribución normal del caudal.

Independientemente del caudal exigido por tarea técnica se puede concluir que efectivamente 120 dm³·min⁻¹, constituye un valor intermedio entre las bombas de mediano y gran caudal específicamente para estos equipos, por tanto se recomienda trabajar en un equipo que permita con un mínimo de modificaciones garantizar un caudal entre (80÷120) dm³·min⁻¹, y por tanto se toma este valor para comenzar a desarrollar los cálculos.

Análisis del comportamiento de la presión de trabajo para estas bombas

La presión de trabajo exigida por tarea técnica es de hasta 20 bar, no obstante realizando un análisis con los datos de las bombas estudiadas con el objetivo de conocer los rangos de presión utilizados en diferentes máquinas y utilizando el método anterior se obtuvo el gráfico que se muestra en la Figura 4.

Independientemente del rango de presión exigido por tarea técnica se puede concluir que efectivamente 25 bar, constituye un valor correspondiente a las bombas de mediana presión, por tanto y basado no solo en la tendencia mundial de aumento de este parámetro, sino en las variaciones de presión principalmente durante la puesta en marcha y la manipulación del equipo se recomienda tomar como valor para comenzar a desarrollar los cálculos 40 bar.

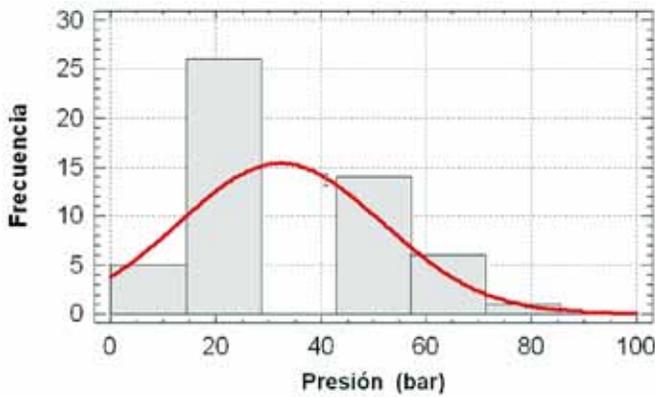


FIGURA 4. Gráfico de distribución normal de presión.

METODOLOGÍA

Desarrollo de la metodología de cálculo

Para comenzar a desarrollar la metodología se cuenta con los siguientes datos que están relacionados tanto con las condiciones de trabajo del equipo como las condiciones del lugar de instalación:

- Frecuencia de rotación del árbol de la bomba ... n (min^{-1});
- Velocidad lineal máxima del pistón..... v_{max} (m/s);
- Presión máxima p_{max} (bar);
- Relación recorrido diámetro $\Psi_{\text{inicial};c}$;
- Cantidad de pistones inicial C_{pist} ;
- Coeficiente de efectividad volumétrica η_o ;
- Longitud de la tubería de succión L_{succ} (m);
- Altura de succión Z_{succ} ;
- Aceleración de la gravedad g (m/s^2);
- Presión atmosférica p_o (m col. agua);
- Presión mínima de desprendimiento de gases p_{gases} (m col. agua);
- Masa inicial del disco de la válvula M_{valv} (kg);
- Velocidad del líquido en la válvula v_{valv} (m/s);
- Caudal de la bomba Q_{bomba} ($\text{dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$).

Expresiones básicas para la realización del cálculo

Cálculo de la velocidad angular (ω)

$$\omega = (\pi \cdot n) / 30 \text{ (1/s)} \quad (1)$$

Cálculo de excentricidad máxima (r_{max})

$$r_{\text{max}} = v_{\text{max}} / (1,02 \cdot \omega) \text{ (m)} \quad (2)$$

Cálculo del recorrido máximo (S_{max})

$$S_{\text{max}} = 2r_{\text{max}} \text{ (m)} \quad (3)$$

Cálculo del diámetro del pistón ($D_{\text{pistón}}$)

$$D_{\text{piston}} = \sqrt[3]{\frac{0,24 \cdot Q_{\text{bomba}}}{60 \cdot C_{\text{pist}} \cdot \pi \cdot \Psi_{\text{inicial}} \cdot n \cdot \eta_o}} \text{ (m)} \quad (4)$$

Cálculo de verificación del coeficiente (Ψ_{real})

$$\Psi_{\text{real}} = \frac{S_{\text{max}}}{D_{\text{piston}}} \quad (5)$$

Si $0,65 > \Psi_{\text{real}} > 0,85$ entonces tomar $C_{\text{pist}} = 3$ y volver a calcular D_{piston} de lo contrario se puede continuar el cálculo.

Cálculo de la presión máxima de succión (h_{bo})

$$h_{bo} = p_o - p_{\text{gases}} - Z_{\text{succ}} - \left(\frac{L_{\text{succ}}}{g} \cdot r_{\text{max}} \cdot \omega^2 \right) \quad (6)$$

Cálculo de verificación de la frecuencia de rotación (n) en dependencia de las condiciones de trabajo del equipo.

$$n = 9,55 \cdot \sqrt[3]{g \cdot \left(\frac{p_o - p_{\text{gases}} - Z_{\text{succ}} - h_{bo}}{r \cdot L_{\text{succ}}} \right)} \quad (7)$$

Si $n < 540$ entonces disminuir r_{max} y repetir cálculo.

Cálculo de caudal máximo (Q_{max})

$$Q_{\text{max}} = 0,7854 \cdot D_{\text{piston}}^2 \cdot v_{\text{max}} \quad (8)$$

Cálculo del área de la válvula de succión (A_{valv})

$$A_{\text{valv}} = \frac{Q_{\text{max}}}{V_{\text{valv}}} \quad (9)$$

Cálculo del recorrido máximo del disco de las válvulas ($h_{\text{max valv}}$)

$$h_{\text{max valv}} \leq \frac{4000}{n \cdot \sqrt{\frac{M_{\text{valv}}}{g \cdot A_{\text{valv}}}}} \quad (10)$$

Seleccionar $h_{\text{valv}} \leq h_{\text{max valv}}$ y continuar cálculo.

Cálculo del diámetro de entrada a las válvulas (d_{valv})

$$d_{\text{valv}} = \frac{A_{\text{valv}}}{\pi \cdot h_{\text{valv}}} \quad (11)$$

Cálculo del diámetro del platillo de las válvulas (d_{platvalv})

$$d_{\text{platvalv}} = d_{\text{valv}} + 4 \quad (12)$$

Cálculo del espesor mínimo del platillo de las válvulas (h_{min})

Se asume para el acero inoxidable $[\sigma] = 2000 \text{ kgf/cm}^2$

Y como dato de entrada $\mu = 0,3$

Radio del platillo de las válvulas

$$r_{\text{platvalv}} = \frac{d_{\text{platvalv}}}{2} \quad (13)$$

Cálculo del momento en dependencia del radio

$$M_r = \frac{p_{\text{max}}}{16} \cdot (3 + \mu) \cdot (r_{\text{platvalv}}^2 - \Delta r_{\text{platvalv}}^2) \quad (14)$$

Donde: $\Delta r_{\text{platvalv}} = (0 \div r_{\text{platvalv}})$

Entonces para el espesor mínimo se tiene:

$$h_{\text{min}} = \sqrt{\frac{6 \cdot M_r}{[\sigma]}} \quad (15)$$

Cálculo de la masa real del disco de las válvulas
 $(M_{valvreal})$
 Volumen real del platillo $V_{platreal}$ en dm^3

$$M_{valvreal} = 7.85 \cdot V_{platreal} \quad (16)$$

Entonces se sustituye este valor en (10) y se repiten los cálculos hasta tanto se ajusten todos los parámetros.

Cálculo de los parámetros técnicos y características del mecanismo

Como datos de entrada se tiene:

$$\lambda_o = \frac{r_{max}}{l_{man}} = 0,2 \quad (17)$$

Donde:

l_{man} -longitud de la manivela

Entonces tenemos:

$$l_{man} = \frac{r_{max}}{0,2} \quad (18)$$

A continuación se realiza el estudio dinámico del mecanismo en dependencia del ángulo de rotación del cigüeñal y te-

niendo en cuenta la longitud final de la manivela, desde el punto muerto inferior (**PMI**) hasta el punto muerto superior (**PMS**); o sea, para un ángulo de rotación del cigüeñal $(\phi) = (0 \div 180^\circ)$, por medio de las expresiones que se muestran a continuación:

Cálculo del desplazamiento del pistón:

$$x = r_{max} \cdot \left[(1 - \cos \phi) + (0.5 \cdot \lambda_o \cdot \text{sen}^2 \phi) \right] \quad (19)$$

Cálculo de la velocidad:

$$u = r_{max} \cdot \omega \cdot (\text{sen} \phi + 0.5 \cdot \lambda_o \cdot \text{sen} 2\phi) \quad (20)$$

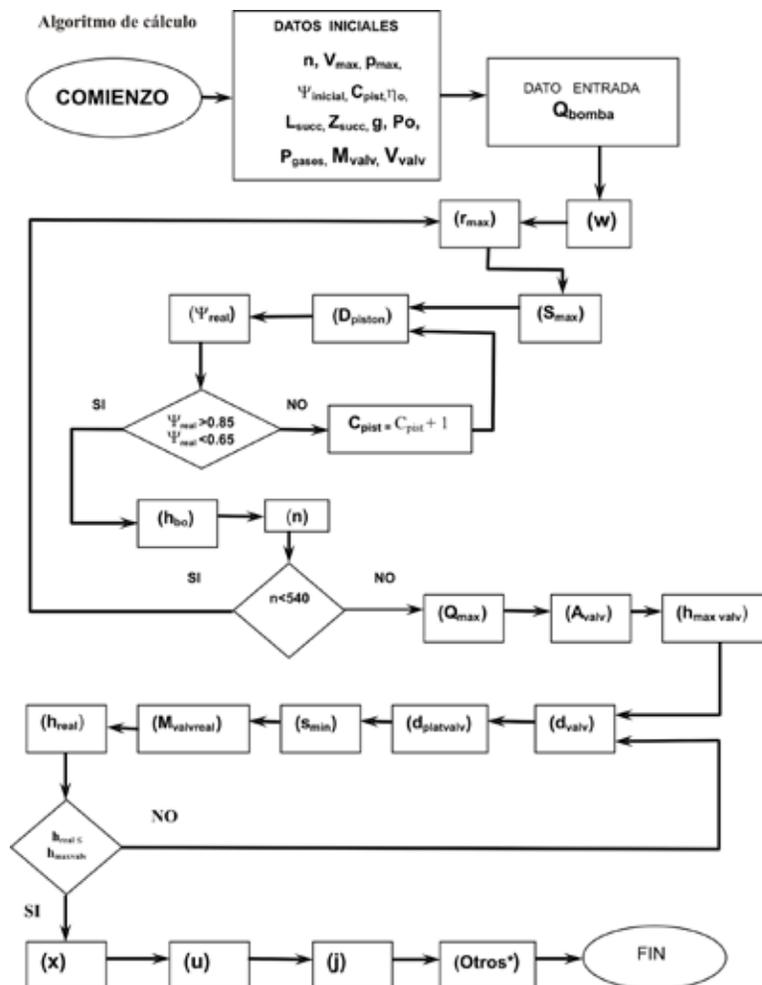
Cálculo de la aceleración:

$$j = r_{max} \cdot \omega^2 \cdot (\cos \phi + \lambda_o \cdot \cos 2\phi) \quad (21)$$

Los valores que se obtienen pueden ser tabulados o graficados para analizarlos, determinando los valores críticos, los cuales serán utilizados para los cálculos de resistencia de las diferentes piezas que componen el mecanismo.

En la Figura 5 se representa el algoritmo de cálculo para el diseño de bomba de pistones axiales para máquinas pulverizadoras.

Algoritmo de cálculo



Nota: Otros*-comprende los cálculos por la metodología propuesta por Fernández (2005).

FIGURA 5. Algoritmo de cálculo para el diseño de bomba de pistones axiales para máquinas pulverizadoras.

CONCLUSIONES

- El análisis estadístico de la velocidad máxima real del pistón demuestra que su valor no sobrepasa 1,1 m/s.
- El análisis estadístico de distribución normal de caudal y presión demuestra que: Distribución normal de caudal ajustada: media=127,577 dm³·min⁻¹. Distribución normal de presión ajustada: media=32,4038 bar, por tanto se propone utilizar hasta 120 dm³·min⁻¹ y 30 bar, para la realización de los cálculos.

- La secuencia lógica de los cálculos para obtener las dimensiones básicas para el diseño de la bomba objeto de estudio constituye una novedad.
- Las expresiones básicas para realizar la metodología de cálculos integran no solo la parte estadística, sino importantes estudios desarrollados sobre partes específicas, como son las válvulas y el mecanismo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACA: *Criterios para la aplicación de productos fitosanitarios [en línea]* Disponible en: www.aca.com.uy [Consulta: febrero 8 2008].
- AGROINFORMACION: *Maquinaria para la aplicación de fitosanitarios (1ª parte) [en línea]* Disponible en: www.agroinformacion.com [Consulta: enero 7 2008a].
- AGROINFORMACION: *Maquinaria para la aplicación de fitosanitarios [en línea]* Disponible en: www.agroinformacion.com [Consulta: enero 7 2008b].
- COOPERATIVASDEGALICIA: *Maquinaria para tratamientos [en línea]* Disponible en: www.cooperativasdeg Galicia.com [Consulta: enero 7 2008].
- COMET: *ATASA Bombas agrícolas de presión COMET. [en línea]* Disponible en: www.comet.re.it [Consulta: noviembre 27 2007].
- CONAREFI: *Convención internacional de protección fitosanitaria, nutrición, protección del consumidor AGP: Producción y protección vegetal AGS: Infraestructura y agroindustrias Codex [en línea]* Disponible en: www.conarefi.ucr.ac.cr [Consulta: enero 7 2008].
- CHINIAEV, I. A.: *Bombas de pistones con biela*, 176pp., (En idioma ruso), Editorial Construcción de Maquinarias, Leningrado, URSS, 1983
- ENGORMIX: *Problemas relacionados con la tecnología de aplicación de productos fitosanitarios [en línea]* Disponible en: www.engormix.com [Consulta: febrero 8 2008].
- FERNÁNDEZ, P.: *Bombas centrífugas y volumétricas*, 537pp., Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética. Universidad de Cantabria, España, 2005.
- GAMA: *Bombas IMOVILLI [en línea]* Disponible en: www.gamaespaciosverdes.com [Consulta: noviembre 27 2007].
- GUTIÉRREZ, CH. T.: *Bombas y sus aplicaciones*, 45pp., Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca, México, 2004.
- HARDI: *Bombas Hardi [en línea]* Disponible en: www.hardi.es [Consulta: noviembre 27 2007].
- INTA: *Tecnología de aplicación de agroquímicos [en línea]* Disponible en: www.inta.gov.ar [Consulta: febrero 8 2008].
- MEMBERS.FORTUNECITY: *Bombas hidráulicas de pistones [en línea]* Disponible en: www.members.fortunecity.es [Consulta: enero 8 2008].
- PESTALERT: *Sistema de alerta fitosanitaria de la organización norteamericana de protección a las plantas [en línea]* Disponible en: www.pestalert.org [Consulta: enero 7 2008].
- PORRAS, P. A.; A. PORRAS: *Tecnología de la pulverización de productos fitosanitarios sobre las plantas cultivadas [en línea]* Disponible en: www.uclm.es [Consulta: febrero 4 2008].
- SANIDADVEGETAL: *Portal del centro Nacional de Sanidad Vegetal [en línea]* Disponible en: www.sanidadvegetal.cu [Consulta: enero 30 2008].
- SYNGENTAAGRO: *Manual para el buen uso de los fitosanitarios [en línea]* Disponible en: www.syngentaagro.es [Consulta: enero 7 2008].
- WTO: *La OMC y la Convención Internacional de Protección Fitosanitaria (CIPF) [en línea]* Disponible en: www.wto.org [Consulta: enero 7 2008].