

DISEÑO DE UNA BOMBA IMPULSADA ELÉCTRICAMENTE PARA UN MOTOR COHETE

A. Patanella^a, M. Actis^a

ajpatane@ing.unlp.edu.ar, mactis@ing.unlp.edu.ar

^aCTA – Centro Tecnológico Aeroespacial, Universidad Nacional de La Plata Calle 116 e/47 y 48 (1900) La Plata, Argentina. <http://www.cta.ing.unlp.edu.ar>. cta@ing.unlp.edu.ar

RESUMEN

A partir de las ventajas de incorporar motores eléctricos del tipo brushless para reemplazar la turbina de un sistema de turbobombas, se presenta en este trabajo el diseño de una bomba para impulsar combustible en un sistema de propulsión cohete del tipo pump-fed. Estos sistemas pueden denominarse e-pump-fed. Se presenta el diseño del conjunto compacto motor+bomba y sus conexiones de entrada y de salida. Se hace hincapié en el diseño de la bomba en función de la performance del motor eléctrico utilizado. Para el primer diseño se decidió ajustar los parámetros de torque, velocidad y potencia a motores COTs. Se muestran los diseños del conjunto, los parámetros hidráulicos de la bomba y los parámetros de performance de la misma. Se realizan estimaciones de pesos y configuraciones reforzando el concepto de la ventaja de estos sistemas para etapas superiores. También se analiza la capacidad de variación de funcionamiento fuera de su rango nominal de diseño

1. INTRODUCCION

Debido a la alta velocidad específica de operación de las turbobombas, la industria de la propulsión a chorro ha tenido que desarrollar su propio criterio de diseño, diferente de los criterios de diseño convencionales. Los rangos de velocidad, proporciones geométricas, coeficientes de diseño, y otros detalles mecánicos de turbobombas están bien establecidos y basados sobre numerosos experimentos y diseños.

Para lograr los requerimientos en caudales de combustible y oxidante dentro de la cámara de combustión a través de los inyectores, es necesario proveer y mantener una presión relativamente alta a la entrada de los inyectores.

Generalmente, un sistema de turbobomba se compone de dos bombas y una turbina. La turbina se conecta directamente o indirectamente (a través de una caja reductora) a las dos bombas

para transmitir potencia necesaria para el bombeo del combustible y del oxidante. Según el diseño se le pueden agregar con mayor o menor grado de complejidad, los sistemas de lubricación, refrigeración y otros accesorios.

Los principales requerimientos de una bomba para los motores de propulsión son la confiabilidad, bajo peso, alto caudal a altas presiones de salida y flujo estable para un amplio rango de funcionamiento. Existen varios tipos de bombas, las más usadas son las centrífugas, axiales y las de flujo mixto [1] [2].

Bombas centrífugas

Casi todos los cohetes operacionales utilizan bombas del tipo centrífugo excepto para los motores de LH₂. [3]. Estas son adecuadas para manejar un gran caudal a altas presiones en forma eficiente, así como también en los

aspectos económicos en términos de peso y tamaño.

La bomba centrífuga consiste esencialmente de dos elementos básicos, rotor y estator. Su principio de funcionamiento básico es acelerar el fluido mediante paletas rotantes de alta velocidad (rotor) que imparte una energía cinética para luego ser recuperada en presión a través de un difusor (estator).

Para la mayoría de los diseños el rotor se compone de un inductor (inducer) [4] y un impulsor (impeller). El inductor es básicamente una bomba axial y su principal función es incrementar lo suficiente la presión estática a la entrada del impulsor para permitir el normal funcionamiento. De esta forma el uso de un inductor puede reducir sustancialmente la NPSH (presión neta positiva de aspiración) requerido de la bomba.

El estator consiste en una carcasa con paletas difusoras (radiales para impulsores centrífugas) estacionarias, una voluta, tobera de descarga, eje, sellos y cojinetes

Para requerimientos de presiones mayores, se utilizan bombas de múltiples etapas, que básicamente son varias bombas centrífugas dispuestas en serie.

Bombas axiales

Este diseño es en particular adecuado para LH₂ porque posee un orden de magnitud menor en densidad que otros propelentes. Los fluidos de baja densidad implican un alto flujo volumétrico y una alta altura de desarrollo, o sea, un elevado salto de presión.

Bombas de flujo mixto

Se considera como bombas de flujo mixto al conjunto de bombas centrífugas y radiales, en las que la energía se cede al líquido esencialmente mediante la acción de la fuerza centrífuga, hasta las axiales, en las que la energía se cede al líquido por la impulsión ejercida por los álabes sobre

el mismo.

En las bombas centrífugas radiales la corriente líquida se verifica en planos radiales, en las axiales en superficies cilíndricas alrededor del eje de rotación y en las diagonales se verifica radial y axialmente, denominándose también de flujo mixto.

El *tipo* de una bomba, según esta primera clasificación, que atiende al diseño hidráulico del rodete impulsor, viene indicado por su velocidad específica en el punto de máximo rendimiento de la curva característica. Por esto, según la velocidad de giro del impulsor, establecida como parámetro de diseño estaremos en condiciones de saber la forma del impulsor.

Las ventajas principales de las bombas centrífugas son: altos caudales, caudal constante, presión uniforme, sencillez de construcción, tamaño reducido y flexibilidad de regulación.

Uno de sus pocos inconvenientes es la necesidad de cebado previo al funcionamiento, ya que las bombas centrífugas, al contrario que las de desplazamiento positivo, no son autoaspirantes.

En el diseño de bombas hay que tener en cuenta los siguientes factores [6]:

- Las propiedades físicas del líquido, como el peso específico, tensión de vapor, viscosidad, temperatura, sólidos en suspensión, etc;
- Caudal y altura desarrollada por la bomba.
- El $NPSH_{DISPONIBLE}$, presión de aspiración e impulsión.
- Velocidad específica de la bomba y velocidad específica de succión.
- Tipo y dimensiones de la bomba, diámetro del impulsor, diámetro del eje, etc.

En las literaturas disponibles no existen reglas simples que permitan la optimización y correlación entre los

parámetros. Sin embargo, en el presente trabajo se evaluó el diseño de la bomba utilizando teoría general y parámetros fundamentalmente de bombas centrífugas existentes.

2. DESARROLLO

Los parámetros básicos para el diseño de las bombas son [10]:

Parámetros para el diseño de las bombas		
Fluido de trabajo	LOX	LCH4
Caudal máscico	6,17 kg/s	1,92 kg/s
Velocidad de giro	15000 rpm	
Presión de descarga	47 kg/cm ²	60 kg/cm ²
Temperatura promedio del fluido a la entrada de la bomba	90 °K	111,64 °K
Sentido de giro de la bomba, visto desde la entrada	Horario	

Tabla 1. Parámetros básicos para diseño de las bombas.

2.1. Criterios tenidos en cuenta para el diseño

El punto de diseño de la bomba se elige de manera de satisfacer los requerimientos del motor dentro de su rango de operación. Este punto debe selecciona en base a las siguientes consideraciones: [5] [7]

- Un punto debajo del margen del cual opera el motor, uno por encima y otros puntos de operación tales como puntos críticos.
- Las curvas de incremento de la capacidad de elevación, caudal y eficiencia de la bomba, incluyendo su corrimiento del punto de diseño, de manera que su variación no sea un inconveniente que afecte el funcionamiento del motor

Las especificaciones de diseño de la bomba deben de incluir la siguiente información:

- Requerimientos del punto de diseño nominal y tolerancias impuestas por el motor (estudios de Misión).

- Casos extremos de la variación del caudal de propelentes, capacidad de elevación (incremento de presión), requerimientos del $NPSH_R$ lo cual debe de incluir una predicción de la tolerancias de performance de los componentes del sistema y tolerancias impuestas por el motor a estos.
- Rodamientos o puntos de apoyos de giro, sellos, balanceo.
- Futuras modificaciones a los requerimientos (estudio de misión).
- Cargas y aceleración durante el despegue y la misión, impuesta a las bombas y sus componentes.
- Altitudes de uso de las bombas y condiciones del vuelo.
- Ciclo de funcionamiento, incluyendo tiempos de operación nominal, mínimo, máximo, tiempo y condiciones del estado de funcionamiento transitorio y permanente, condiciones de retardo.
- Requerimientos de ensayos y calibración.
- Factores de seguridad de diseño.
- Parámetros de Tradeoff (cambios en el impulso específico del motor por punto de eficiencia, por punto de peso de la bomba y por punto de longitud de esta).
- Fiabilidad y requerimientos de seguridad (Misión).

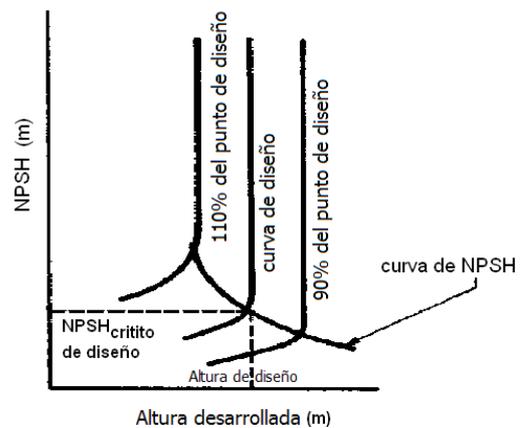


Figura 1. Variación del NPSH para dos rangos diferentes del caudal de diseño.

2.2. Diseño de las bombas de oxidante y combustible

En la **Figura 2** se exponen los componentes principales de las bombas diseñadas [8] [9]

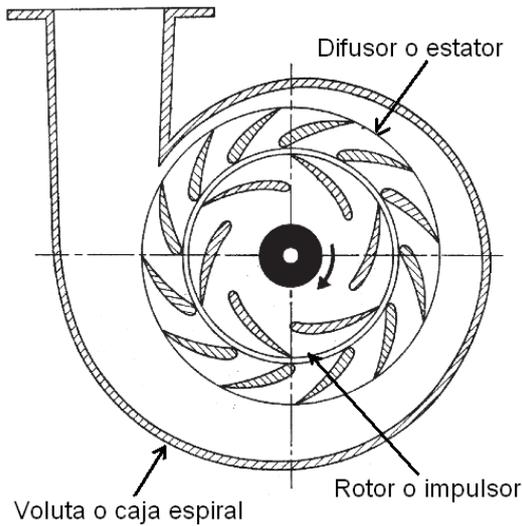


Figura 2. Configuración general de los componentes de las bombas.

En la **Tabla 2** se exponen los parámetros principales de ambas bombas según la nomenclatura de la **Figura 3**.

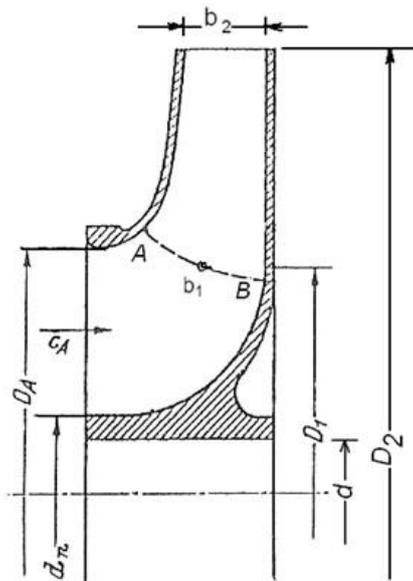


Figura 3. Nomenclatura de los parámetros principales de las bombas.

PARAMETROS	BOMBA DE OXIDANTE	BOMBA DE COMBUSTIBLE
Presión de descarga	47 Kg/cm ²	60 Kg/cm ²
Velocidad de giro	15000 rpm	
Caudal másico requerido	6,17 Kg/s	1,92 Kg/s
η (Rendimiento total)	0,732	0,7
H total (Capacidad de elevación total)	411,8 m	1397,3 m
Q (Caudal volumétrico útil)	0,0054 m ³ /s 85,7 gal/min	0,00447 m ³ /s 70,87 gal/min
N_a (Potencia mecánica consumida por la bomba con caudal normal)	48,21 HP	50,89 HP
M_d (Torque)	230,18 kgcm	243,02 kgcm
d_n (diámetro del cubo del impulsor)	0,02 m	0,02 m
C_A (Velocidad axial de entrada en el impulsor)	6,17 m/s	5,87 m/s
D_A (Diámetro del ojo del impulsor)	0,0395 m	0,0375 m
D_I (Diámetro medio de entrada del impulsor)	0,038 m	0,036 m
b_1 (Longitud de la línea normal AB)	0,0069 m	0,00637 m
D_2 (Diámetro de salida del impulsor)	0,105 m	0,201 m
z (Número de álabes del impulsor)	6	6
ψ (Coeficiente de altura de presión)	1,05	
Cantidad de fases	1	
b_2 (Anchura de salida del impulsor)	0,0089 m	0,00068 m
$NSPH_{REQUERIDO}$ 3% del impulsor	23,42 m	22,45 m
$P_{s\ min}$ (Presión de succión mínima del impulsor)	2,67 kg/cm ²	1 kg/cm ²
Γ (Grado de reacción)	0,52	0,56
C_{sal} (Velocidad en la sección final de la tobera de la caja espiral)	7,64 m/s	6,3 m/s

Tabla 3. Parámetros resultantes del diseño de las bombas.

En la **Figura 4** y **Figura 5** se exponen las curvas características de las bombas.

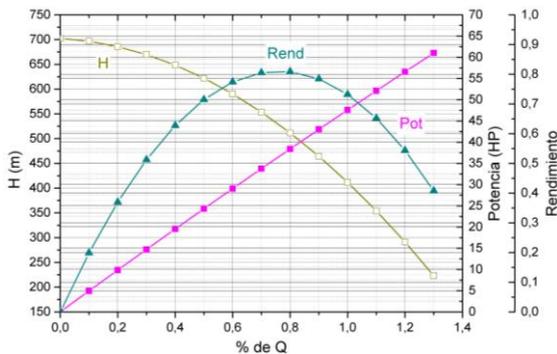


Figura 4. Curvas características de la bomba de oxidante.

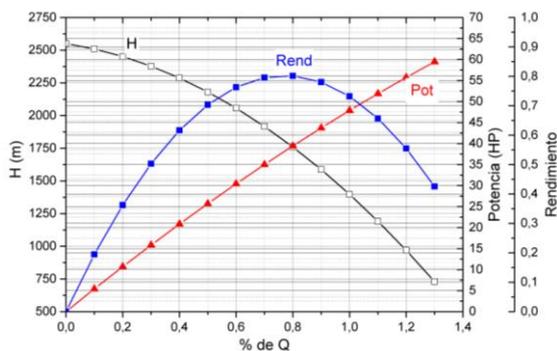


Figura 5. Curvas características de la bomba de combustible.

3. CONCLUSIONES

- Los parámetros expuestos en la tabla anterior y las curvas características son preliminares, estos podrán cambiar según el avance del diseño.
- Los diseños expuestos no poseen inductores, durante el avance de los diseños de las bombas se analizarán su necesidad o no.
- Del análisis se observa que es posible diseñar la bomba de oxidante y la de combustible de una sola etapa, de esta manera se disminuye el peso y se evitan pérdidas hidráulicas entre los pasajes de las dos etapas, en el caso que lo fuere.
- La potencia total consumida por la bomba es la suma de la potencia necesaria para lograr el salto de presión del caudal

requerido más la potencia consumida por la fricción de las partes móviles como cojinetes o rodamientos, por tal razón para el caso de mantener la válvula de ingreso del fluido a la entrada cerrada, o sea, a caudal cero, la potencia que aparecerá al hacer girar la bomba no será cero sino que tendrá un valor constante para esa velocidad de giro debido a la fricción mecánica. En la **Figura 4** y **Figura 5** se puede ver que la potencia graficada corresponde solo a la potencia consumida por la bomba para lograr el salto de presión con el caudal deseado, o sea no está incluida la potencia mecánica consumida o de lo contrario no coincidiría con el origen de coordenadas.

- El caudal mínimo de funcionamiento continuo de la bomba viene prefijado por el diseñador, por debajo del cual la bomba no debe operar; es función de los NPSH disponible y del requerido, de la presión de vapor del líquido y de los esfuerzos que aparecen sobre el rotor debido a la asimétrica distribución de presiones. A medida que el caudal disminuye, el rendimiento de la bomba también disminuye, lo que se traduce en un aumento de la temperatura del líquido, (por refrigeración insuficiente), y por lo tanto, de su presión de vapor, por lo que el $NPSH_{DISPONIBLE}$ será inferior. El caudal mínimo se obtiene cuando el $NPSH_{DISPONIBLE}$ ha disminuido a causa del aumento de temperatura, sea igual al $NPSH_{REQUERIDO}$.

4. REFERENCIAS

- [1] Modern Engineering for Design of liquid Propellant Rocket Engines, volumen 147.
- [2] Rocket propulsion, by Marcel Barrere, Andre Jaumotte, Baudouin Fraeijs de Veubeke y Jean Vandekerckhove.
- [3] Liquid rocket engine centrifugal turbopumps, NASA SP-8109.
- [4] Liquid rocket engine turbopumps inducers, NASA SP-8052.
- [5] Turbopump systems for liquid rocket engines, NASA SP-8107.
- [6] Turbopumps and pumping systems, Ahmad Nourbakhsh, Andre Jaumotte, Charles Hirsch and Hamideh B. Parizi.
- [7] Design study of a low-cost lox turbopump, Dr. David Japikse, Dr. Nicholas Baines, Michael J. Platt, Concepts ETI, Inc. 217 Billings Farm Road White River Junction, VT 05001-9486.
- [8] Hydrodynamics of Pumps, Christopher E. Brennen, *California Institute of Technology Pasadena, California* Concepts ETI, Inc. and Oxford University Press.
- [9] Diseño de bombas, Hellmuth Schulz. Novena edición.
- [10] Diseño de un motor cohete para etapa superior con propelentes LOx/Ch4, A. Patanella, M. Actis, *Noveno Congreso Argentino de Tecnología Espacial (CATE)*, 26-29 Abril de 2017