

Dispositivos de Manejo de Propelente Utilizados en Sistemas de Propulsión Líquida

Aldo Lostracco*, Johann Rodríguez, Eliecer Hernández

División de Propulsión

Centro de Investigación, Desarrollo e Innovación Espacial

Agencia Bolivariana para Actividades Espaciales

Borburata, Edo. Carabobo, Venezuela

aldo.lost.rod@gmail.com, rjohannr@gmail.com & ehernandez@abae.gob.ve

RESUMEN

El manejo y distribución de combustibles líquidos en el espacio es un tópico amplio y complejo, en el presente trabajo se sintetizan de forma práctica los diferentes medios utilizados en la actualidad que permiten proveer propelentes libre de gas en el sistema de propulsión de cualquier vehículo espacial. Fueron considerados aquellos dispositivos que permiten aprovechar el uso de fenómenos físicos, algunos despreciables en la Tierra como la capilaridad o la tensión superficial, que en ambientes de gravedad cero demostraron ser sumamente importantes. Fueron señaladas las ventajas y desventajas de cada método de control lo que permite al lector estimar los dispositivos adecuados para cada misión.

Palabras claves: *dispositivos, fenómenos físicos, gravedad cero.*

1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de propulsión líquida, ya sea monopropelente o bipropelente, presentan un punto crítico de estudio: el tanque, puesto que en éste se encuentran un líquido y un gas a alta presión, y resulta interesante determinar el comportamiento de ambos dentro del mismo. No obstante, la localización de un fluido en condiciones de gravedad cero es indeterminada a menos que ambos se encuentren separados.

Las fuerzas de tensión superficiales son despreciables en la mayoría de los problemas, Sin embargo, en los ambientes de baja gravedad estas fuerzas tienen un papel significativo y de forma general dictan la ubicación de los líquidos dentro de los contenedores. Entonces, diseñando dispositivos que operen dentro de los tanques es posible utilizar estas fuerzas para garantizar el suministro de propelente libre de gas. Dichos elementos se denominan Dispositivos de Manejo de Propelente (*Propellant Management Devices - PMD*).

Tradicionalmente los *PMD* son diseñados de forma particular para cada misión y tanque. Es por ello que existen diversas configuraciones, tamaños y disposiciones. De forma general: expulsión positiva y tensión superficial. La diferencia principal radica en el método utilizado para separar el gas del líquido, de forma mecánica y mediante la tensión superficial.

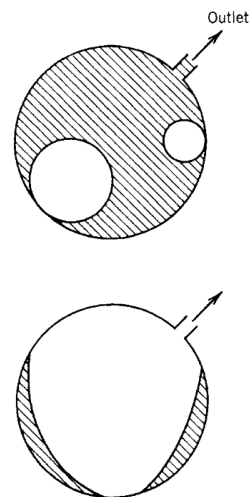


Figura 1. Comportamiento de líquido (zona rayada) y gas en condiciones de gravedad cero.

2. EXPULSIÓN POSITIVA

Durante la vida útil de un satélite éste se ve expuesto a distintos tipos de fenómenos que afectan principalmente su condición de operación en el espacio, concretamente su posición y orientación, ambas críticas para el cumplimiento de la misión. Dichos fenómenos, bajo este esquema, se denominan perturbaciones puesto que, tal como su nombre lo indica, entorpecen el correcto funcionamiento del satélite. Previo a la solución de cualquier error inducido por éstas se hace imperativo especificar el tipo de perturbación de tal manera que pueda ser sensada y corregida, a continuación se definen.

2.1 DIAFRAGMA Y VEJIGA

Los tanques de diafragma elastómero han estado en uso desde las primeras fases de los vuelos espaciales. Los Tanques de diafragma son dispositivos de expulsión positivos que forman una membrana para separar el compartimiento de propelente del compartimiento del agente presurizado (Gas

Presurizante). La *Figura 2* ilustra la forma de realización típica de un tanque de diafragma. En la mayoría de los casos, los diafragmas son secciones semiesferas o semiesféricas con una sección cilíndrica además el borde más extremo del diafragma esta sellado contra las paredes del tanque, pues el diseño del cordón de sellado es soportado por un anillo de retención metálico que está soldado a la carcasa del tanque. Existen varios tipos de alternativas de sujeción de estos anillos.

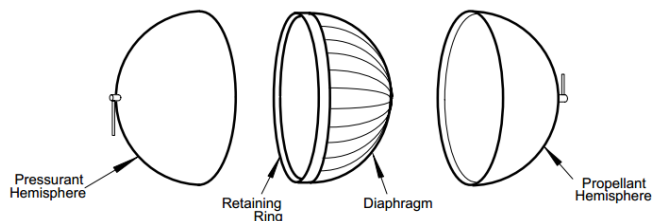


Figura 2. Forma característica de un PMD de diafragma.

Un aspecto importante a mencionar en los dispositivos de diafragma es que según su disposición puede actuar de forma diferente, así es el caso de las membranas tipo vejiga muy similar a los balones de futbol americano, en este caso tiene una disposición interna que equidista de las paredes del tanque de esta forma, y conectado a la entrada de gas presurizante, él se expande y obliga a el propelente a tener la salida deseada. En la *Figura 3* se muestra un corte transversal de un tanque de tipo vejiga.

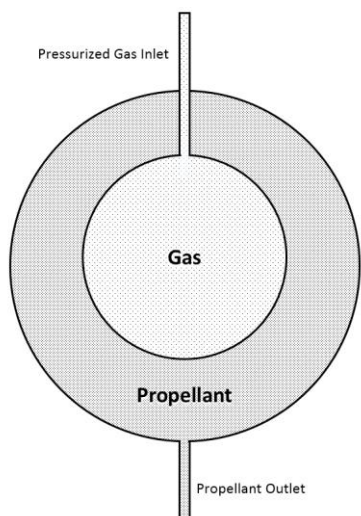


Figura 3. Forma característica de un PMD de diafragma.

La principal ventaja del principio de diafragma contra el de vejiga es que el primero es mucho más fácil de manufacturar además de que el patrón de plegamiento es más fácil de repetir, menos grave durante su operación y además de menor peso, ahora el de vejiga tiene como ventajas su pequeña área de sellado, fácil instalación y remoción por reemplazo.

Aunque estos dispositivos tienen, muchas ventajas presentan ciertos problemas, pues ellos han demostrado que los propelentes por sus características físico-químicas tienden a dañar la membrana y con ello el tiempo de duración es reducido, pues pueden tender a disminuir sus propiedades elásticas. Por ello se desarrollaron diferentes membranas (Elastómero) y aunque la más reconocida es la AF-E-322 de igual forma no es usado hoy en día para misiones de largo tiempo.

A continuación presentamos diferentes vistas laterales de tanques para efectos de la disposición de la membrana:

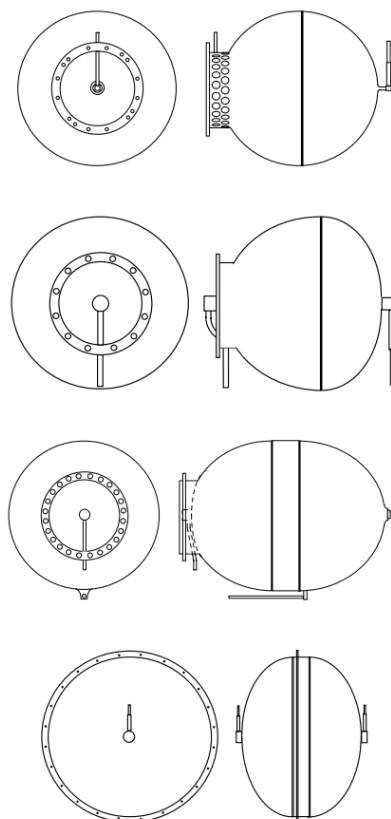


Figura 4. Vistas laterales de tanques; disposición de las membranas.

2.2 PISTÓN-FUELLE

Los dispositivos de expulsión positiva son de conceptualización, diseño y manufactura relativamente sencilla y presentan buenas características de acuerdo a las misiones requeridas. El PMD de tipo pistón consiste esencialmente en un fuelle que puede ser de material elastómero o metálico contenido en un recipiente de forma cilíndrica. Éste fuelle separa de forma física al gas presurizante del propelente, haciendo que el primero desplace al segundo cuando se requiera combustible.

Este tipo de dispositivo puede operar bajo cualquier régimen de flujo requerido a cualquier actitud sometido a elevadas aceleraciones (1 g) y ser compatible a largo plazo. Debido a la separación mecánica se previene la disolución del gas en el

propelente, previene una posible reacción entre los fluidos. A pesar de contar con un funcionamiento sencillo en la manufactura se presentan principalmente inconvenientes en cuanto a tolerancias y posibles fallos en el sello.

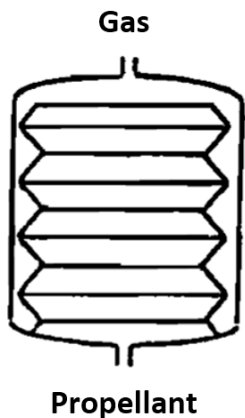


Figura 5. Sección transversal de un PMD tipo pistón.

3. TENSIÓN SUPERFICIAL

3.1 VENAS CAPILARES

El PMD tipo Vena, es una estructura localizada a lo largo de la pared del tanque o dentro del mismo, que se aferra al líquido y está diseñado para comunicar líquido de una burbuja en cualquier parte del tanque a la salida. El PMD que se muestra a continuación es un centro típico tipo vena, simplemente a partir de tres piezas de chapa.

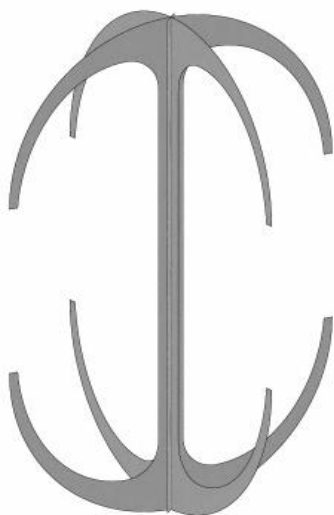


Figura 6. Representación tridimensional de un PMD tipo vena.

El encendido de los *thruster* podría amontonar propelente en cualquier lugar del tanque y crear burbujas, la idea de este PMD para este caso es crear un camino del líquido a la salida. Todos los propelentes modernos mojan esta estructura y se generan

paso por la vena. Mediante la creación de esquinas (tales como la esquina formada por las aletas laterales y la pared del tanque o las esquinas formadas por el poste central en sí), una trayectoria de flujo se establece a partir de la burbuja a la toma de corriente. Como se consume propelente, más propelente fluirá "cuesta arriba" para reemplazarlo.



Figura 7. Modelo real de un PMD tipo vena fuera del tanque.



Figura 8. Modelo Real de un PMD tipo Vena en un tanque.

Es utilizado para aceleraciones bajas por encendido de *thruster*, un PMD provee de propelente continuamente durante toda la duración de encendidos. Esta duración y la capacidad de dirección ilimitada hacen de este PMD por vena una excelente elección por su peso ligero además de bajo costo, así pues el PMD tipo Vena es la opción más deseable para cualquier misión. Desafortunadamente las paletas son solo capaces de levantar propelente sólo bajo condiciones de muy baja fuerzas (g) - tales como la creada durante encendido de los propulsores de hidracina (0,2 lbf). Este tipo de paletas son solo usadas normalmente en sistemas de propulsión que trabajen con hidracina como propelente. En los sistemas de bipropelente, estas paletas no pueden levantar propelente contra las aceleraciones típicamente más altas generadas en este sistema.

3.2 GALERÍAS

Este sistema tipo vena tiene una variedad de configuraciones, cada una para diferentes tipos de flujo y con diferentes tipos de dificultades a la hora de manufacturarlas, las venas más simples serán más fáciles de construir pero ofrecen menos área de flujo comprada con otras alternativas.

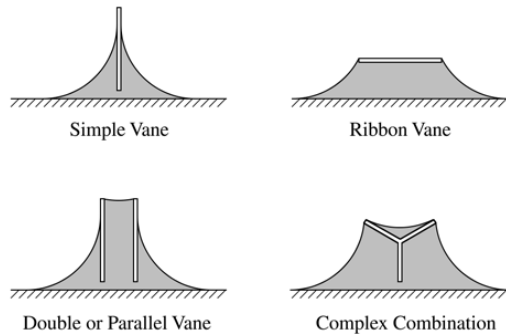


Figura 9. Diferentes configuraciones de venas.

El propelente se ilustra en la figura X fluirá por la pendiente contra la hidrostática sólo si el radio de aguas abajo es suficientemente menor que el radio de aguas arriba. En los términos más básicos, la presión en la superficie de conducción se equilibra con la dinámica, las pérdidas viscosas, y la hidrostática. Si la presión de la conducción no es suficiente para superar las fuerzas de oposición, el flujo por la pendiente no ocurrirá.

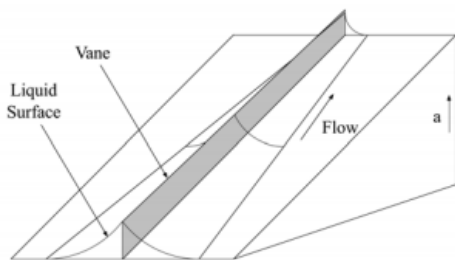


Figura 10. Desplazamiento de un fluido sobre una vena.

La conducción de la presión dentro de los líquidos es consecuencia de las fuerzas de tensión superficial que son definidas por la ecuación de Laplace:

$$\Delta p \equiv P_{gas} - P_{liquido} = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad \text{Ec. 1}$$

Por tanto la conducción de la presión dentro del líquido desde abajo a arriba por la vena es aproximadamente:

$$\Delta p = P_{arriba} - P_{abajo} \quad \text{Ec. 2}$$

$$\Delta p = \left[P_{gas} - \sigma \left(\frac{1}{R_{arriba}} \right) \right] - \left[P_{gas} - \sigma \left(\frac{1}{R_{abajo}} \right) \right] \quad \text{Ec. 3}$$

$$\Delta P_{drive} = \sigma \left(\frac{1}{R_{arriba}} - \frac{1}{R_{abajo}} \right) \quad \text{Ec. 4}$$

El *PMD* de galería se define como una estructura cerrada a través de la cual puede fluir el propelente desde el interior del tanque hacia la salida del mismo. Están compuestas por elementos porosos (mallas) que permiten el paso de fluido libre de gas debido a la tensión superficial, éstos se encuentran conectados mediante tuberías.

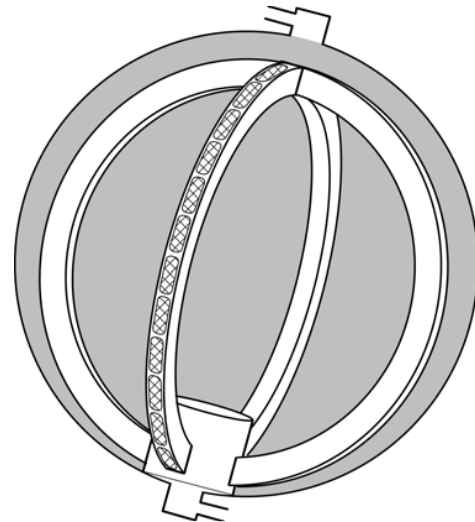


Figura 11. Modelo genérico de galería.

El accionamiento de los *Thrusters* puede desplazar la masa de propelente a cualquier espacio dentro del tanque, dado que los elementos porosos previenen el flujo del gas la tubería se encuentra siempre llena de propelente garantizando de forma continua el suministro hacia la salida del tanque, siempre que las pérdidas hidrostáticas, viscosas y dinámicas no superen el punto de ruptura de la tensión superficial. Bajo estas condiciones se categoriza a este *PMD* de comunicación total, es decir, que puede suministrar propelente de forma continua desde cualquier punto que se encuentre próximo a las paredes del tanque.

Las galerías pueden ser diseñadas para operar a aceleraciones tan elevadas como 0.1 g con el uso de mallas finas, sin embargo la capacidad de aceleración se ve limitada por el tamaño del poro en la malla y las propiedades del propelente. Las mallas muy finas poseen varias desventajas incluyendo incompatibilidad, posibilidad de contaminación del propelente y problemas estructurales. Para incrementar la confiabilidad del conjunto se debe evitar el uso de mallas finas a menos que sea absolutamente necesario.

En la figura Y se muestran las distintas configuraciones cada una con sus particularidades: *liners*, colector (*tube linking pickup*) y de canal cubierto (*screen covered channel*).

Los *liners* consisten en una barrera sólida a través de la cual fluye el fluido siguiendo el contorno de la pared del tanque. Las mallas están soldadas en posiciones donde se presume se encontrará el propelente. El fluido se traslada desde el interior del *liner* hacia la salida. Son el tipo de galería más ineficiente puesto que se debe construir un tanque dentro de otro y la brecha que se produce es difícil de mantener, no obstante lo hace ideal para contenedores pequeños que son difíciles de manufacturar y ensamblar. No se deben utilizar en tanques de gran volumen.

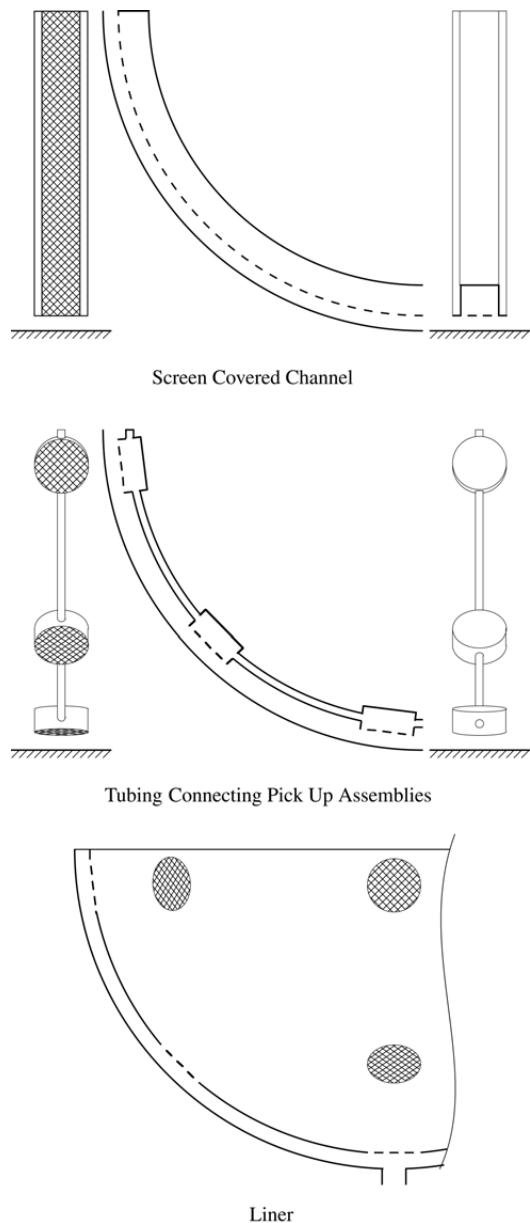


Figura 12. Tipos de galería.

Los colectores (*tube linking pick-up*) reducen el área cubierta por las mallas, éstos se conectan mediante tubos hasta llegar a

la salida del tanque, entonces, se colocan de forma precisa sólo donde son requeridos. En relación al diseño anterior este presenta una mayor confiabilidad puesto que reduce la cantidad de mallas y el principio de manufactura es similar al de los filtros. Se utilizan generalmente en tanques de moderado volumen debido a la complejidad intrínseca en la determinación de la localización del propelente.

Por último de canal cubierto (*screen covered channel*), éste elimina la mayoría de los inconvenientes de los diseños previos, lo que lo hace el *PMD* de galería más popular. Su principal ventaja radica en el contacto continuo del propelente con las mallas, esto permite el flujo de propelente libre de gas de forma continua. Adicionalmente permite una mayor flexibilidad de la misión con un desempeño razonablemente bueno. Son de manufactura compleja.

Un *PMD* de galería utiliza la tensión superficial producida en las mallas para evitar que el gas alcance la salida del tanque. Si la diferencia de presiones no supera la tensión superficial en la malla el gas no entrará.

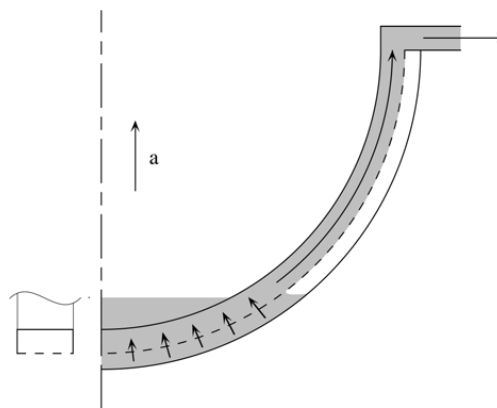


Figura 13. Galería.

El líquido ilustrado en la figura X fluye dentro de la galería en contra las fuerzas hidrostáticas porque no hay gas en la misma. Si la tensión superficial es superada el gas entra no existe el flujo. La diferencia de presiones a través de la interfaz gas-líquido en la malla está definida por la ecuación de Laplace-Poiseuille:

$$\Delta H = \frac{P_{gas} - P_{liq}}{\rho} = \frac{\sigma}{\rho} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad \text{Ec. 5}$$

A continuación se muestran las cargas que intentan pasar a través de las mallas:

$$\Delta H_{hydrostatic} = a \Delta z \quad \text{Ec. 6}$$

$$\Delta H_{Pe \text{ pérdidas flujo}} = f(u_{pe}, v, pe) \quad \text{Ec. 7}$$

$$\Delta H_{\text{Brazo perdidas flujo}} = f(Re) \frac{L}{D_{eq}} \frac{u_{arm}^2}{2} \quad \text{Ec. 8}$$

$$\Delta H_{\text{Punto dinámico}} = \frac{u_{arm}^2}{2} \quad \text{Ec. 9}$$

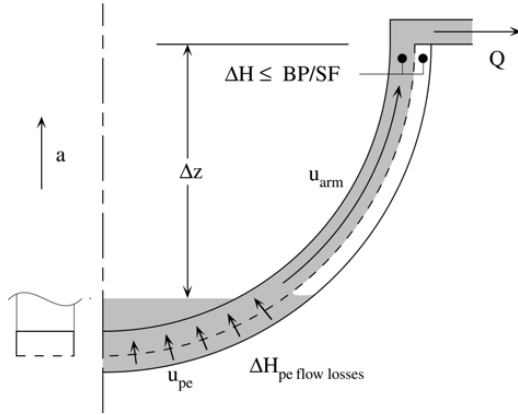


Figura 14. Fuerzas actuantes en una galería de tipo canal cubierta.

Entonces, el punto de ruptura de la tensión superficial (*bubble point*) se puede determinar mediante la suma de las cargas:

$$\frac{BP}{SF} \geq a \Delta z + f(u_{pe}, v, pe) + f(Re) \frac{L}{D_{eq}} \frac{u_{arm}^2}{2} + \frac{u_{arm}^2}{2} \quad \text{Ec. 10}$$

La ecuación precedente pareciera indicar que es preferible utilizar una malla fina (con un alto *bubble point*). Sin embargo, las pérdidas producidas por mallas finas elevadas y adicionalmente el espesor efectivo de la misma se ve reducido, lo cual es crítico para flujo transitorio. En dicho estado los efectos de las cargas sobre el *bubble point* son mayores que en flujo estacionario. Las ecuaciones que gobiernan el estado transitorio son:

Continuidad (espesor equivalente vs tiempo)

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{A}{w} \frac{\partial u}{\partial x} \quad \text{Ec. 11}$$

Conservación de Momento (aceleración y presión)

$$\frac{\partial u}{\partial t} = - \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial (\Delta H)}{\partial x} + a \frac{\partial z}{\partial x} + 2v \left(\frac{s}{A} \right)^2 u \right) \quad \text{Ec. 12}$$

Ecuación de Estado (presión vs espesor equivalente)

$$\frac{\partial (\Delta H)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} (f(BP, T, T_0)) \quad \text{Ec. 13}$$

La magnitud del flujo transitorio depende del tamaño de la galería (el largo determina el cambio de velocidad del líquido) y la malla (espesor equivalente en el *bubble point*). Mientras más pequeña la galería, mayor el flujo transitorio. Mientras

menor líquido pueda proveer por unidad de área, más severo el efecto del flujo.

5. CONCLUSIONES

Los *PMD* representaron un gran avance en el ámbito espacial, permitiendo obtener el mejor desempeño de los tanques de acuerdo a cada misión. Dentro de sus configuraciones destacan en la actualidad los de tensión superficial, principalmente porque el peso añadido al sistema de propulsión es mucho menor en comparación a los dispositivos de expulsión positiva y adicionalmente son compatibles a largo plazo con casi cualquier propelente. Esto no quiere decir que los dispositivos de expulsión positiva sean malos, sólo que se adecuan a misiones de corto plazo y bajo condiciones específicas.

No existe un criterio único en cuanto a la selección de un *PMD* para una misión. Se involucran muchos factores que inciden en esta decisión tales como: requerimientos de la misión, capacidades de manufactura y la evaluación de si realmente el *PMD* seleccionado es el más adecuado. Está tecnología es relativamente joven y por ende es posible concebir nueva configuraciones que concedan resultados superiores en relación a estado actual.

NOMENCLATURA

Δ = cambio
 ρ = densidad
 σ = tensión superficial absoluta
 μ = viscosidad absoluta
 ν = viscosidad cinética
 a = aceleración
 u = velocidad del flujo
 z = altura relativa al vector aceleración
 A = area
 BP = punto de burbuja (*bubble point*)
 D_{eq} = diámetro equivalente
 ΔH = diferencia de altura
 L = longitud del canal de flujo
 P = presión
 R = radio principal
 Re = número de Reynolds
 SF = tensión superficial
 T = espesor
 T_0 = espesor a ΔH cero

REFERENCIAS

- [1] Brown, Charles, D (2002). "Elements of Spacecraft Design".
- [2] Sutton, G, and Biblarz, O. (2001) (7ma ed) "Rocket Propulsion Elements".
- [3] Jaekle, D. (1991) "Propellant Management Device Conceptual Design and Analysis: Vanes" AIAA-91-2182.
- [4] Jaekle, D. (1997) "Propellant Management Devices Conceptual Design and Analysis: Galleries" AIAA-97-2781.