

CURSO DE COHETERÍA CIVIL: LECCIÓN NRO 11

Perspectivas del Futuro

II) Propulsión que apela a una materia propulsora y a una fuente de energía distinta.

Un sistema propulsor y una fuente de energía separada, está constituido por un reactor nuclear que produce la energía necesaria para acelerar la materia en una tobera de eyección. Pueden considerarse dos modos de aceleración: *la aceleración termodinámica y la aceleración mediante campos de fuerzas*. La aceleración termodinámica consiste en calentar el propulsor, llevado previamente al estado gaseoso, y a expandirlo en una tobera. Ésta es la formula utilizada por todos los reactores de fisión, llamados todavía reactores *termonucleares*. La aceleración por campos de fuerza necesita la conversión de la energía producida por el reactor en energía eléctrica capaz, por una parte, de ionizar una sustancia y, por otra, de crear campos de fuerzas suficientes para acelerar las partículas engendradas por la ionización. Este segundo método de aceleración se aplica esencialmente a los motores de iones (lección 10) y a los motores de plasma. En este caso, al reactor se le dice: *electronuclear*.

Los sistemas de reactor termonuclear son aquellos cuya tecnología es la más conocida. Han sido objeto desde hace tiempo de varios proyectos en los Estados Unidos.

En un sistema tal, la energía producida por la fisión nuclear del uranio 235 es transformada en calor para calentar un propulsante, que se expande luego isoentrópicamente en una tobera de Laval, como los gases de combustión de los Propergoles Clásicos. Por ser las características termodinámicas del propulsor generalmente superior a la de los gases de combustión para una misma temperatura inicial, se deduce que los impulsos específicos serán mucho más fuertes. Es importante recordar que la fisión del uranio 235 proporciona una energía que puede ser comparada diez millones de veces de la que produciría una masa igual de un combustible ultrapotente. Lamentablemente, solo una ínfima fracción del calor liberado (0,20 a 0,25) puede ser convertida en energía cinética utilizable. El resto, es decir, la mayor parte, debe ser arrojada al espacio por un dispositivo que juega el papel de fuente fría.

Dada la enorme cantidad de calor excedente que se debe evacuar, no cabe duda de que las dimensiones de este dispositivo han de alcanzar proporciones considerables, lo que puede tener una gran influencia en la relación de masa.

El impulso específico máximo se obtiene evidentemente con el hidrógeno, pero su baja densidad trae siempre un problema de transporte muy delicado. En efecto, no sería cuestión de almacenarlo bajo forma de gas y su conservación al estado líquido necesita aparatos de refrigeración muy voluminosos. El helio o el amoníaco podrían ser igualmente utilizados, pero con un rendimiento mucho más bajo. La ganancia en impulso específico es, a pesar de todo, apreciable; dos a tres veces la de los mejores cohetes termoquímicos actuales; los empujes, por el contrario, son muy disminuidos.

La realización de cohetes nucleares es seguramente una de las alternativas futuras más viables para formas de propulsión no convencional.

III) Propulsión por eyección de Plasma

En lugar de neutralizar a posteriori un haz de iones acelerados, sería más simple eyectar sustancia ionizada neutra, es decir *plasma*.

Introducido en el vocabulario científico desde hace solo algunos años, el término plasma define un estado de la materia muy difundido en el Universo, donde los Astrofísicos habían descubierto su presencia aún antes de que comenzaran los primeros estudios sobre la fusión controlada. Antes de abordar el problema de su utilización como propulsante, nos ha parecido interesante proporcionar algunas nociones sobre los que hoy día se denomina “cuarto estado de la materia”.

Se sabe que un gas a temperatura ordinaria está constituido por un conjunto de moléculas generalmente biatómicas animadas de movimientos rápidos e incesantes en todos los sentidos. Esta agitación molecular representa, conforme a la teoría cinética de los gases, la totalidad del calor contenido en el fluido. Al aumentar la temperatura del gas, las moléculas se encuentran llevadas a un nivel de energía superior al que poseían antes de manera tal que los choques intermoleculares se vuelven lo suficientemente violentos como para disociar un cierto número de ellas en dos átomos. Frecuentemente se dice que hay *atomización* de las moléculas. Si el nivel de energía se eleva convenientemente, los electrones periféricos de los átomos pueden ser arrancados del campo nuclear, en cuyo caso los átomos son ionizados. El *plasma* se definirá, por lo tanto como una sustancia gaseosa ionizada, globalmente neutra desde el punto de vista eléctrico, compuesta de partículas de carga negativa, los electrones, y de partículas de carga positiva, los iones, cuya presencia caracteriza el plasma.

Cuando no está totalmente ionizado, el plasma contiene igualmente átomos neutros, como también moléculas. Es, entonces, un fluido heterogéneo más o menos alejado del estado de equilibrio, en el cual las partículas que se escapan a su ínter unión se comportan como cargas libres, sometidas aisladamente a la acción de campos eléctricos y magnéticos. Así pues, bajo el efecto del campo eléctrico, los iones fluirán hacia el cátodo y los electrones hacia el ánodo.

Lo primero que debemos pensar es que la producción de plasma conduce únicamente a un problema de ionización, esto puede obtenerse por muchos medios, fundamentalmente elevando la temperatura como por ejemplo el arco eléctrico estacionario, el choque de compresión hipersónica o la vaporización brusca de un hilo metálico.

Todos los fenómenos engendrados por el estado de plasma están gobernados por las leyes de la *magnetohidrodinámica*, que asocia los principios de la hidrodinámica con los del electromagnetismo.

Los efectos térmicos y las interacciones electromagnéticas naturales o artificiales que acompañan a la formación de un plasma producen un desplazamiento conjunto de grandes masas fluidas cuya impulsión puede ser utilizable para la propulsión. Aún cuando se producen simultáneamente, estos fenómenos, en general, no tienen la misma intensidad, de manera que uno de ellos ejercerá siempre una influencia preponderante sobre el otro.

Por analogía con los motores cohetes de combustibles químicos, se puede ante todo considerar un motor de eyección termodinámica en el cual un plasma térmico caliente, producido por un arco eléctrico de gran energía, es expandido en una tobera apropiada. Hay que hacer notar que en un motor de este tipo, la energía eléctrica es transferida únicamente a los electrones y es por el choque de estos con los iones como se establece el equilibrio de temperaturas, es decir, en el límite, la equipartición de energía entre partículas de los dos tipos. No obstante, aun suponiendo realizado en el equilibrio de temperaturas, la velocidad de los electrones es siempre muy superior a la de los iones, dado que la relación entre estas dos velocidades mediadas es igual a la raíz cuadrada de la relación de las masas. Desde luego es evidente que el rendimiento propulsor de la cantidad de movimiento debido a los electrones es casi nulo y, por lo tanto, toda la energía cinética correspondiente se pierde. La solución más ventajosa es compensar este inconveniente sería encontrar un modo de aceleración que comunicara la energía de la fuente directamente a los iones.

Otro problema particularmente delicado impuesto por el motor termodinámico de plasma es el de la tobera de expansión. No puede recurrirse a la clásica tobera de Laval, por no haber ningún material apropiado para resistir las temperaturas previstas, que son del orden de varias decenas de miles de grados. En cuanto al enfriamiento de la tobera, parece imposible de realizar durante el curso de un vuelo interplanetario, faltar de fuente fría suficiente para evacuar esa energía, sin contar el inmenso gasto que representaría una operación tal. Pero, siendo el plasma un medio conductor, puede ser una solución el empleo de una pared privada de toda materia y constituida de campos magnéticos. Los campos magnéticos utilizados en estos dispositivos, como en las máquinas experimentales de fusión controlada, son análogos al campo terrestre, salvo en lo que concierne a su intensidad, que puede alcanzar varios millares de gauss. Precisemos que el empleo de un campo eléctrico es imposible como consecuencia de los fenómenos de difusión, que afectarían a uno de los constituyentes del plasma. Solo el campo magnético permite el confinamiento, aún cuando no sea una pared perfecta puesto que puede ser franqueada por las partículas bajo el efecto de campos magnéticos y eléctricos inducidos (inestabilidad del plasma).

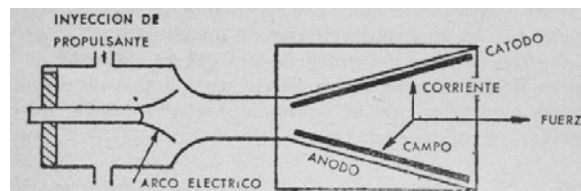
La transferencia de energía eléctrica a los iones está subordinada, en un motor de plasma térmico, a la intervención previa de los electrones. Por lo tanto la energía eléctrica es transmitida indirectamente a los iones y se sabe que toda operación de este género trae consigo cierto porcentaje de pérdidas. Numerosas tentativas se han hecho para liberarse de estos molestos intermediarios que son los electrones. La mayor parte de ellas tiene por objeto la aceleración directa de los iones con ayuda de los fenómenos magnetohidrodinámicos. La idea fundamental es que un campo magnético estacionario ejerce una fuerza sobre una carga eléctrica en movimiento, lo mismo que un campo magnético variable con el tiempo ejerce una fuerza sobre una carga eléctrica estacionaria. Partiendo de este principio, el método general consiste, primero, en ionizar una gas a baja presión mediante descargas eléctricas intensas. El plasma conductor así producido es recorrido en la superficie por corrientes paralelas intensas que se atraen mutuamente por interacción de los campos magnéticos inducidos que ellos producen. Resulta, para el plasma, un efecto de restricción radial, llamado efecto *pinch*, que contrae la materia transversalmente en una delgada columna axial sin ningún contacto con las paredes hasta que la presión del gas comprimido equilibra la fuerza radial magnética de compresión, que da, por efecto

Joule, una elevación considerable de la temperatura. Numéricamente se estima que una presión de 100 atmósferas es equilibrada por un campo magnético de alrededor de 50000 gauss. este efecto de adelgazamiento magnético es eminentemente inestable. La columna de plasma puede sufrir toda clase de deformaciones, siendo las más corrientes el estrangulamiento y la distorsión en hélice. Una de las soluciones propuestas para estabilizar el plasma consiste en un enroscamiento coaxial alrededor de la cámara, que al crear un campo magnético longitudinal en el interior del plasma comprimido le impediría distorsionarse. Éste es el mismo principio que ha sido citado anteriormente en el caso de la tobera de descarga de los motores de plasma térmico.

Existen numerosos tipos de motores magnetohidrodinámicos que difieren entre sí por la manera en que se producen la corriente eléctrica y el campo magnético. Veamos ahora rápidamente como funciona un motor de aceleradores lineales.

Un fluido propulsante se introduce en uno de extremos de un tubo para ser transformado en plasma por calentamiento, a 3000 K aproximadamente, mediante un arco eléctrico.

Este plasma se desplaza entre dos planos ligeramente divergentes entre los cuales reina un campo eléctrico estacionario. El plasma es, por lo tanto, recorrido por una corriente que circula de un electrodo al otro, y como el tubo es atravesado por un campo magnético perpendicularmente al plano (ver figura), resulta una fuerza que acelera el plasma.



Esquema de un motor de aceleradores lineales (Revista Astronautics)

La simple aplicación de la regla de Ampère da la dirección de esta fuerza aceleradora. Una variante de este tipo de motor consiste en utilizar electrodos cilíndricos coaxiales, en cuyo caso la sustancia eyectada se presenta bajo la forma de un anillo de plasma en rotación sobre sí mismo. Una de las principales ventajas de los motores de electrodos reside en su temperatura de funcionamiento, que puede ser mantenida relativamente baja, teniendo en cuenta todas las proposiciones con respecto a las que estamos habituados en cuanto a plasma se refiere.

Los proyectos de propulsión por eyección de fotones, verdaderos “granos de luz”, imaginados por el Profesor Sanger, nos fascina por las inmensas ventajas de un sistema cuyo impulso específico es del orden de 10^{10} segundo o más, pero todavía falta mucho camino por recorrer.

Prof. Dr. Raúl Roberto Podestá

Presidente LIADA

Coordinador de los Cursos LIADA

rrpodesta@hotmail.com