

Mirando al Pasado para Viajar al Futuro: Resucitando a la Propulsión Nuclear Espacial

Camilo Ospinal*

Instituto de Física, Universidad de Antioquia U de A, calle 70 No. 52-21, Medellín, Colombia*

RESUMEN

Actualmente nos encontramos en una nueva etapa de la exploración espacial, las principales agencias espaciales de todo el mundo están realizando estructurados planes que permitan al ser humano regresar a la Luna y establecer bases lunares a largo plazo que permitan, a su vez, servir de catapultas para las futuras misiones a Marte que se disponen realizar no más allá de la década de 2030. El sueño de ser una civilización interplanetaria está cada vez más cerca y ha habido avances fructíferos realizados por empresas privadas que nos han permitido reducir costos de misión. No obstante, los métodos actuales de propulsión espacial continúan siendo los mismos del anterior siglo, sistemas que desde entonces se sabía que en algún punto serían obsoletos. La propulsión a base de combustión química está alcanzando su máxima eficiencia posible, la cual es insuficiente para las metas del hoy y del mañana. Es necesario cambiar los sistemas de propulsión en aras de cumplir estos objetivos y la propulsión a base de energía nuclear parece ser la respuesta. En este artículo se examina la historia de la propulsión nuclear, desde sus primeras ideas hasta los actuales conceptos y programas que se están llevando a cabo, desde sus beneficios hasta sus inconvenientes y futuro.

Palabras clave: Propulsión Nuclear Espacial; Propulsión Nuclear de Pulso; Propulsión Térmica Nuclear; Propulsión Eléctrica Nuclear

1. INTRODUCCIÓN

La energía nuclear representa uno de los medios de producción de energía más eficientes y útiles en el desarrollo científico y tecnológico, siendo a la vez uno de los descubrimientos hechos por la humanidad más polémico, si es que no el principal, y con resultados más alejados entre sí, es decir, creando oportunidades para el progreso, pero también duras catástrofes. En este artículo nos centraremos en uno de los beneficios más importantes que nos ha dado la energía nuclear en el campo de los viajes espaciales. Debemos considerar que el solo hecho de lograr impulsar un vehículo que ascienda por los cielos intentando escapar de la fuerza gravitacional del planeta implica la condensación de un extensivo trabajo, minucioso y riguroso, que recolecta años de esfuerzo, estudio y análisis de diversos sistemas, propiedades, fenómenos y consideraciones físicas que entrelazadas dan lugar a la obra de ingeniería más compleja que desarrolle el ser humano. Hasta ahora hemos logrado llevar cohetes a la

órbita baja terrestre (Low Earth Orbit, LEO) que se han encargado de situar sondas, telescopios y satélites encargados de procesos indispensables para la sociedad actual, hemos instalado una Estación Espacial Internacional, han aterrizado misiones espaciales tripuladas y no tripuladas en otros cuerpos del sistema solar, el hombre ha caminado en la Luna, y Landers han aterrizado en Venus y Marte, sondas han analizado las atmósferas, superficies y composiciones de los planetas rocosos, a asteroides, a los gigantes gaseosos y a sus lunas, mostrándonos imágenes y datos que antes parecían inimaginables. Sondas ya se encuentran más allá de los confines de los cuáles ni siquiera muchos cuerpos celestes se encuentran (Voyager I y II) y otras se han acercado al Sol en un intento de lograr comprender la estrella (Sonda Parker). Todo esto se logró al utilizar sistemas de propulsión a base de combustible químico, cada uno de los cohetes utilizados para todas las misiones espaciales han almacenado toneladas de propelente que son accionados mediante combustión desde la superficie terrestre generando el empuje suficiente en una

explosión controlada que asciende el cohete en la trayectoria indicada. Es necesario utilizar grandes cantidades de combustible para elevar los grandes pesos de las etapas del cohete, cada tonelada de carga va sumando a la cantidad de propelente a utilizar. Evidentemente si se aumenta la cantidad de combustible también se aumenta el peso del cohete, y es necesario más combustible para generar el impulso necesario. Esto coloca un límite en la cantidad de carga útil que se puede llevar en un cohete, por lo que hay que ser extremadamente estrictos y cuidadosos con los materiales que se utilicen en la construcción de este y los dispositivos e instrumentos que se planeen llevar, se reduce, entonces, la eficiencia de la misión. Sumado a esto, si bien la cantidad de combustible liberado en un segundo es lo suficientemente fuerte para darnos los impulsos suficientes para maniobrar y realizar cambios de órbitas, no es lo apto para lograr tiempos de viaje viables si se trata de destinos del espacio profundo, las misiones actuales van del rango de meses, misiones a Marte utilizando las ventanas de lanzamiento más óptimas duran aproximadamente 9 meses. Cuando se trata de misiones no tripuladas, este es solo un problema que reta a la paciencia, sin embargo, al involucrar humanos en la ecuación, el tiempo es mucho más primordial que cualquier otro costo derivado de la construcción de la misión. Llevar personas al espacio es una tarea riesgosa, implica someterlos a intensas aceleraciones en el despegue, a correr el riesgo de que se produzca un error y la misión termine en catástrofe, también hay que lidiar con las altas temperaturas provocadas por la fricción del cohete con la atmósfera. Si todo lo anterior es superado de manera exitosa, una vez en el espacio sin la protección de una magnetósfera, los tripulantes están expuestos a las partículas de alta energía que provienen del alto flujo de viento solar que son capaces de traspasar materiales, inclusive si estos han sido diseñados para soportarlos. Es entendible que una misión de unos pocos días o meses no ponga en riesgo la vida de los tripulantes, pero si pone a prueba su salud, al fin y al cabo, se encuentran en condiciones para las cuales sus cuerpos no evolucionaron, la baja gravedad afecta su organismo, y la reclusión y soledad su compostura mental, si tenemos en cuenta que planeamos enviar humanos a Marte en los próximos años, no podemos dejar en manos del azar la vida de los astronautas que tendrán que valerse por sí mismos si algo sale mal a cientos de miles de kilómetros de la civilización en medio del espacio, o si bien logran aterrizar en la superficie marciana, dejarlos a la deriva mientras se abre una nueva ventana de lanzamiento 9 meses después de la comunicación de un problema. Volvemos a recalcar el ínfimo problema de la radiación cósmica, dentro del vecindario terrestre la magnetósfera es lo suficientemente grande para proteger, por ejemplo, a los astronautas que estuvieron dentro de la Estación Espacial Internacional, sin embargo, en el espacio no se cuenta con tal dinamo. En el contexto de la primera carrera espacial, cuando la investigación estaba bastante enfocada en lograr desplazar a humanos a través del espacio exterior en vías a aterrizar en la Luna, en las visiones generales, se daba por hecho que, como muchas perspectivas

de aquel siglo, un futuro que ni siquiera para nosotros ha llegado, estaría disponible en un corto plazo, primero se realizaría el alunizaje y en años posteriores los primeros astronautas pisarían el suelo del Planeta Rojo, alrededor de 1986, como comenta Lewis (2021) decía la edición de 1965 de *World Book Encyclopedia*. Es evidente que aquellas expectativas generales cuasi-utópicas del anterior siglo estuvieron lejos de llegar a hacerse realidad, algunas de las cuales aún para nosotros son difíciles de efectuar. Se vuelve imperioso buscar un nuevo sistema de propulsión que rompa el paradigma actual y que ayude a reducir los tiempos de viaje espacial, actualmente se está trabajando en ello y cada paso hacia el desarrollo es exponencialmente mayor al anterior. Entre todas aquellas antiguas ideas de ensueño que estamos empezando a construir como una realidad, este deseo de lograr que la humanidad sea una civilización interplanetaria cada vez está más cerca. El principal interés de las agencias aeroespaciales de todo el mundo es desarrollar sistemas que permitan llevar humanos a Marte de manera segura en 2030 y concentrar sus esfuerzos en programas que aseguren una estadía permanente, planes que, por nombrar un ejemplo, tiene la empresa que más está en la vanguardia en la actualidad, SpaceX (2023). Se conocen desde que el hombre llegó a la Luna estos combustibles y sistemas candidatos, la solución: construir sistemas de propulsión que utilicen la energía nuclear como sustento. Durante toda la segunda mitad del siglo XX y lo que se lleva del siglo XXI se han creado ideas con el objetivo de simplificar las naves espaciales y abaratar los costos producidos por el uso de combustibles químicos, de las cuales aquí se tratarán algunas. En ese orden de ideas, este artículo pretende realizar una revisión y explicación del progreso y el estado actual de la propulsión nuclear espacial, investigando las primeras propuestas que utilizasen el concepto de energía que datan de mediados del siglo XX y cuáles fueron los impedimentos para los avances de dichos proyectos (**Sección 2**). Acto seguido se detallan los funcionamientos físicos de los dos principales, más prometedores y asequibles sistemas de propulsión espacial que están siendo diseñados y optimizados en el presente, siendo estos la propulsión nuclear térmica y la propulsión nuclear eléctrica, que pretenden ser un remplazo de los cohetes a base de combustible químico (**Sección 3**). Se comentan algunas de las misiones que actualmente están en desarrollo y son llevadas a cabo por las principales agencias espaciales del mundo en aras de un cambio de paradigma de los vuelos espaciales para el 2030 (**Sección 4**), finalizando con una discusión acerca de la importancia y lo que implicaría para la humanidad. Para la realización de este artículo se revisaron cuatro bases de datos bibliográficos, Google Scholar, Scopus, ScienceDirect y Science Gov. La primera se utilizó para recolectar los artículos más relevantes a lo largo de la historia realizando una revisión del tópico. Para la segunda y tercera se aplicaron filtros específicos para seleccionar, junto a la cuarta base, los artículos más recientes que trataran especialmente de la propulsión nuclear térmica y eléctrica, con la intención de analizar propuestas actuales que

permitan tener un panorama concreto de su estado presente. Además, se realizó una búsqueda de noticias científicas que abordan el tema entre el periodo 2010 hasta 2023, haciendo hincapié en los avances y futuros desarrollos en el campo, y se buscó información de las misiones actuales de algunas de las principales agencias espaciales del mundo como la National Aeronautics and Space Administration (NASA).

2. PROPULSIÓN NUCLEAR DE PULSO

2.1. Primeras ideas

Las ideas de utilizar energía nuclear como medio de propulsión de naves tripuladas y no tripuladas se remontan a la par con la creación de la bomba atómica. El concepto es simple: utilizar una serie de detonaciones controladas cuya energía sea captada por una nave aumentando su momentum logrando incrementar su velocidad en cada explosión. Antes de la sofisticación de la idea que llevó a considerar la utilización de bombas nucleares, la llamada Propulsión Nuclear de Pulso (NPP), hubo aquellos quienes propusieron teóricamente a finales del siglo XIX (Hermann Ganswindt) y probaron científicamente detonaciones con dinamita a inicios del siglo XX (R. B. Gostkowski), encontrando las dificultades que tal tipo de sistema acarrea (Schmidt et al., 2002). Se debe considerar que, para lograr el mayor impulso por unidad de masa en un segundo, I_{sp} , es necesario poder aprovechar la mayor cantidad de energía distribuida sobre el explosivo. A diferencia de los sistemas de propulsión a base de propelentes químicos, las explosiones liberan su energía radialmente, haciéndolas difíciles de controlar. Como resultado y, como se explicará luego, una nave solo podrá aprovechar una fracción de la energía liberada. Por otro lado, la temperatura generada en la explosión es un limitante respecto al diseño de la nave, los materiales con los que esté construida deben ser capaces de soportarlas, conforme se aumenta la energía de la explosión, lo que es provechoso en términos de I_{sp} , se reduce el rango de materiales útiles. Si se considera que la temperatura de una bomba nuclear alcanza el orden de los millones de Kelvin, este es un serio problema que tratar.

En 1946 Stanislaus Ulam fue el primero en proponer una propulsión de pulsos a base de detonaciones de bombas nucleares, un año después junto a F. Reines realizaron los cálculos preliminares publicándolos en un memorándum de Los Alamos National Laboratory en USA, llegando a publicar junto a C. Everett un reporte donde hacen un tratamiento matemático más completo del sistema (Everett & Ulam, 1955). En aquella época ya se tenía claro que la propulsión a base de propelentes químicos en algún punto se podía considerar obsoleta, puesto que su I_{sp} es relativamente bajo, lo que lleva a reducir la carga útil del cohete. Everett y Ulam (1955) afirmaron que los beneficios de la propulsión nuclear

sobre la combustión química no radicaban en sus altos recursos de poder, debido a que son limitados, como se mencionó antes, por la temperatura alcanzada de la explosión, más bien lo provechoso se basa en el bajo peso molecular (μ) de los elementos de los cuales están constituidas las bombas nucleares, puesto que I_{sp} es proporcional a $\sqrt{T/\mu}$. Las principales ideas del planteamiento de Everett y Ulam fueron utilizar cargas explosivas a base de hidrógeno que fuera eyectadas del cohete en un intervalo de tiempo de 1 segundo siendo detonadas cuando estas estén a 50 metros, una placa detrás de la nave sería la encargada de recibir el impulso generado por la explosión, a su vez, luego de la eyección de las bombas, placas de algún propelente como agua unidas a la placa principal serían expulsadas en la misma dirección de la bomba tal que la distancia entre el cohete y los discos de propelente sea de 10 metros justo en el momento de la explosión, la energía térmica del plasma elevaría la temperatura del propelente que actuaría como impulsor adicional mientras se produce la siguiente detonación de la consecuente bomba. Quizás el más ingenioso agregado haya sido la creación de un escudo magnético sobre la placa que la protegiera de la radiación ionizante de la explosión, con el objetivo de mantener su integridad por mucho más tiempo.

2.2. Proyecto Orión

Durante la segunda guerra mundial los ojos de las grandes potencias estaban puestos en el desarrollo de armas capaces de destruir al enemigo. En este contexto, en USA se logró desarrollar la bomba atómica a partir del trabajo de científicos especializados en distintas áreas en Los Alamos, de ahí el interés de algunos físicos e ingenieros de ese entonces en los sistemas de NPP. Se puede decir, como mencionan Schmidt et al., (2002) que el proyecto Orión nació en Los Alamos en 1957, de la mano de Theodore Taylor, un físico que realizó una modificación a la idea original de Ulam, en vez de utilizar un sistema de discos de propelente, ingenió una unidad de pulso que contuviera tanto a la bomba como al propelente, un mecanismo que simplificaba el proceso. Junto a Francis Hoffman, el fundador de la General Atomic Division of General Dynamics en San Diego, y Freeman Dyson un físico teórico del Instituto de Princeton para Estudios Avanzados, ofrecieron el proyecto a la Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA) en 1958, quienes los financiaron y permitieron crear los primeros conceptos y prototipos del nuevo diseño (en la **Fig. 1** puede ver uno de los primeros diseños conceptuales de la nave), mientras que la NASA, por su lado, siguió trabajando en la propulsión química. Las principales motivaciones del equipo fueron lograr abaratar los costes que el combustible químico imponía, a la vez que buscaban que los viajes espaciales sean más viables cuando se trataba de recorridos mayores que el de la Luna.

El concepto base de Orión es la NPP externa, las detonaciones suceden en el exterior y son aprovechadas por la nave. También es posible pensar en una detonación interna dentro de una cámara que contenga la explosión permitiendo que se libere por una abertura, no obstante, para este modelo se debe lidiar con las altas temperaturas haciéndolo prácticamente casi inviable.

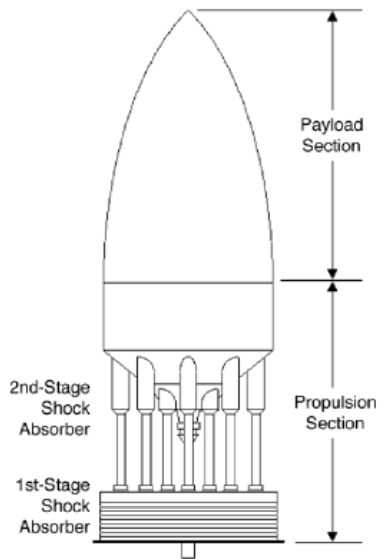


Fig. 1. Bosquejo temprano del Proyecto Orión. Consistía en un vehículo en forma de bala de 80 m de largo con un plato impulsor de 40 metros de diámetro. Su masa rondaba las 10000 toneladas, de las cuales la mayoría serían desechadas en órbita. Durante las fases de ascenso, una unidad de 0.1 kTon sería eyectada cada segundo, a medida que el vehículo aceleraba la tasa de eyección disminuía y se detonarían 20 kTon cada 10 s. *Imagen tomada de Schmidt et al., (2002).*

Cuando el dispositivo nuclear explota en el exterior este libera radiación, tanto en rayos x y gamma, los cuales son los primeros en contactar con el plato, posteriormente llega la energía de la explosión de la esfera de plasma y de escombros ionizados. Los rayos x afectan en gran medida el rendimiento de la propulsión, cuando estos chocan con el plato erosionan su superficie debilitándola, causando que sea cada vez menos eficiente al recolectar momentum procedente de la explosión, si no se controla el plato puede fragmentarse. También los rayos x generan ondas de choque que se propagan hacia el interior de la placa que luego rebotan hacia la superficie, si bien esta interacción transfiere energía y masa, lo que resulta en un impulso para la nave espacial, el proceso crea tensiones extremas en la placa impulsora debido a la alta energía. La solución a esto es convertir la energía de los rayos x en energía cinética de plasma, que es la energía asociada con el movimiento de las partículas cargadas en el plasma provenientes de la explosión, para esto se agregan materiales especiales como cobertura en la parte posterior del plato (aquella orientada hacia la nave) que realicen este proceso,

aumentando el impulso generado por el momento de la explosión.

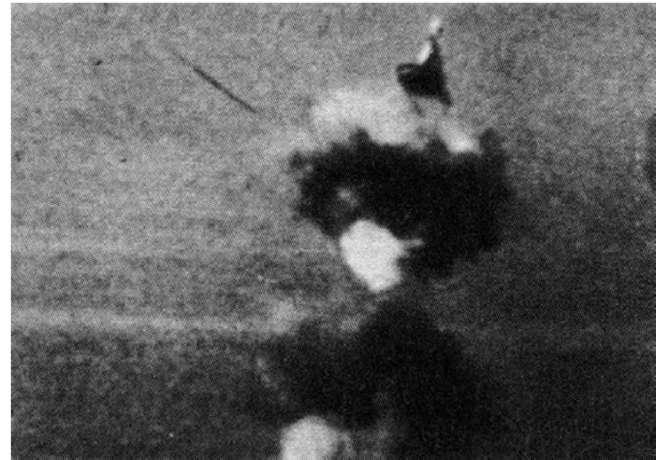


Fig. 2. Modelo "Putt-Putt" del proyecto Orión siendo probado para en un vuelo de 100 m en noviembre de 1959 para medir la estabilidad de vuelo y si placas hechas de aluminio soportaban las altas temperaturas y presiones momentáneas de las detonaciones. Los experimentos permitieron confirmar la estabilidad y que la placa tenía una mejor eficiencia si su grosor disminuía con el radio para minimizar las tensiones sobre el material y lograr una mejor relación resistencia peso. *Imagen tomada de Schmidt et al., (2002).*

La cantidad de flujo de energía, tomada como isentrópica, que llega de la explosión es igual a la fracción de energía inicial distribuida sobre la esfera de radio igual a la distancia entre la nave y el punto de detonación que se interseca con el área de la placa. Como la bomba se lanza en dirección contraria al movimiento de la nave, la placa está perpendicular a la onda de choque, entre más grande su área más energía aprovecha, no obstante, la energía máxima aprovechable tiene un máximo teórico con lo cual no se puede utilizar toda la energía de la explosión. En el momento en el cual la onda explosiva impacta con la nave, la oposición de esta produce una elevación de la temperatura de millones de Kelvin que terminan afectando el material, no obstante, el corto periodo de contacto evita que la placa eleve su temperatura hasta desintegrarse, además, se forma una capa protectora de gas opaco debido a la radiación inducida por ablación que limita la erosión de la placa. La secuencia de explosiones sucesivas trae consigo el aumento de la aceleración tras cada impacto que podrían dañar la estructura de la nave mediante la transferencia de ondas mecánicas, además, las altas aceleraciones serían perjudiciales para los hipotéticos tripulantes, alcanzado el orden de las 50000 g (Stetler, 2010). Para controlar las aceleraciones variables y reducirlas a unas cuantas g, el cohete cuenta con un sistema que funciona como amortiguador entre la placa y la nave, este se comprime cada vez que la onda explosiva impacta a la placa, moderando el impulso, se suma el hecho de que, en un momento dado, las bombas eyectadas reducen su frecuencia y aumentan su energía, buscando que cada explosión impacte en el

amortiguador, con el mismo impulso de la anterior descarga, permitiendo mover al amortiguador en una oscilación armónica, manteniendo la aceleración constante. En la **Fig. 2** se muestra una foto real de uno de los primeros ensayos del proyecto y en la **Fig. 3** se muestra un esquema de uno de los modelos finales del proyecto realizado en 1964.

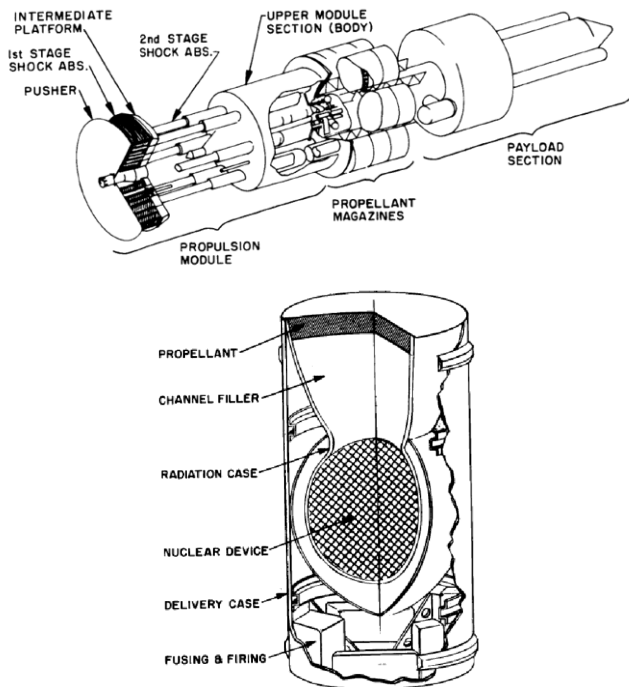


Fig. 3. Superior: La configuración usual de un vehículo propulsado por pulsos nucleares. **Inferior:** Unidad de pulso diseñada para un módulo de propulsión de 10 m. La unidad de pulso convierte la energía de la explosión nuclear en una bien enfocada nube de vapor propelente a altas velocidades. *Imágenes cortesía del George C. Marschall Space Flight Center, NASA (1964).*

El vehículo en sus etapas finales de diseño tenía una masa de 91000 kg y 10 m de diámetro, una reducción masiva respecto al comienzo. Permite transportar 900 cargas en el interior admitiendo aumentar la cantidad de ser necesario. El sistema de amortiguación entre la placa y la carga útil está compuesto de dos ensambles, uno conectado directamente a la placa es una serie de toroides llenos de gas a unos 100 psi, estos están conectados al segundo ensamble que es un sistema secundario de resortes más rígidos. Este diseño genera cerca de 3.5×10^6 N de empuje con un $I_{sp} = 2000$ s (Stetler, 2010). Otros cálculos también han mostrado que el I_{sp} está en el rango de los 3000 – 10000 s para los modelos Orión (Reynolds, 1972). Si se aplican las ideas de Everett y Ulam (1955) de utilizar un

escudo magnético sobre la placa con líneas paralelas a este de tal manera que el plasma y radiación de la explosión empuje las líneas de campo hacia el cohete transfiriendo todo su momento, además de protegerlo aprovechan el empuje otorgado por las partículas cargadas, logrando un máximo teórico de $I_{sp} = 50000$ s. Para detalles más completos del diseño del cohete del proyecto Orión se recomienda revisar el reporte *Nuclear Pulse Space Vehicle Study Vol. III – Conceptual Vehicle Designs and Operational Systems* de 1964.

Lastimosamente, el proyecto, que había demostrado la viabilidad de la utilización del sistema y las inigualables ventajas sobre cualquier otro tipo de propulsión que se estuviera trabajando en el momento, tuvo que ver su fin en 1964 debido a problemas que, como se sabe, siempre fueron más de tema político y burocrático que de ingeniería, capacidad, utilidad y proyección, o la ciencia detrás. Al haber nacido en un contexto global altamente tenso como el de la época, donde la palabra "nuclear" implicaba ser sinónimo de destrucción, caos y guerra, Estados Unidos, Reino Unido y la Unión Soviética, bajo el manto de su frío presente que sucedió a su reciente pasado, firmaron el Tratado de Prohibición Parcial de Ensayos Nucleares en 1963 (National Archives, 2022), lo que acobijaba, por supuesto, a un proyecto que utilizaba explosiones nucleares sin importar su pacífico propósito. Aunque, en teoría, esta prohibición no aplicaba a otros países quienes no habían sido parte del tratado, posteriormente, en 1967, se firmó el Tratado del Espacio Exterior que prohíbe, entre otras cosas, la colocación de armas nucleares u otras armas de destrucción en el espacio.

2.3. Nuclear Engine for Rocket Vehicle Applications, NERVA

La terminación del proyecto Orión afectó al que quizás es el concepto de nave espacial a base de energía nuclear más prometedor de la historia, no obstante, al mismo tiempo del desarrollo de este, otro programa vio la luz y se ha convertido en el estandarte de aquellas investigaciones vendrían luego sobre el marco conceptual de propulsión tratado hasta ahora. El Nuclear Engine for Rocket Vehicle Applications (NERVA) fue un programa que buscaba suceder al programa Apollo luego de que, si los resultados llegaran a ser exitosos, se buscara alcanzar destinos de espacio profundo, principalmente, como era lo pensado en aquella época, poder arribar en Marte.

Todo el bagaje detrás de NERVA se creó a partir del cambio de gestor de misión, pasando de ser la Fuerza Aérea en asociación con la Comisión de Energía Atómica, que inició la construcción de un misil nuclear luego de la finalización de la segunda guerra mundial con fines bélicos, a ser la NASA, en 1959, quienes empezaron la construcción de un cohete con los fines antes mencionados. El programa de la milicia estadounidense llamó al programa como ROVER, iniciaron

estudiando reactores básicos y combustibles nucleares, para que el misil fuera lanzado y una vez estuviera en el espacio activara su etapa nuclear (NASA Glenn Research Center, 2021). La notable innovación de este temprano proyecto fue idear otro método de remplazo a la propulsión química, que es justamente la base de los programas de sistemas de propulsión nuclear actuales, la *Propulsión Térmica Nuclear* (NTP) y la *Propulsión Eléctrica Nuclear* (NEP) de los cuales se dará una introducción de su funcionamiento en la siguiente sección. ROVER utilizaría un sistema NTP, remplazando el propelente químico por hidrógeno líquido que se redirige desde la zona de almacenamiento hasta el reactor, donde se convertiría la energía nuclear en energía térmica, calentando el hidrógeno y, por ende, expandiéndose, al cual se le permitiría salir de manera controlada por la tobera, al ser una eyección de masa, la ecuación del cohete se cumple. Principalmente se quería tener la seguridad de dominar los principios básicos de los reactores que se utilizarían en los cohetes nucleares, por lo que se crearon varios reactores cargados con uranio altamente enriquecido (aunque también se consideró plutonio-239) a los cuales llamaron Kiwi, proseguidos en los próximos años por los reactores Phoebe y Pewee. Para controlar la salida de neutrones se utilizó como moderador el grafito nuclear y como reflector el berilio, permitiendo así tener un control sobre el calor dispensado al hidrógeno y, por ende, la velocidad de eyección. Ya luego en la segunda fase, NERVA buscó desarrollar un primer motor volador, donde en el año 1969 se obtuvo un motor de segunda generación, NERVA XE, que fue probado decenas de veces exitosamente, en las **Fig. 4** y **Fig. 5** se puede ver dos de los diseños del programa. En estos años y hasta su cancelación en 1972, que se debió al cambio de prioridades de NASA, puesto que ya se había demostrado con la misión Apollo las capacidades del país en el terreno aeroespacial y, además, se prefirió priorizar la construcción de la Estación Espacial, y la reducción de presupuesto de parte del gobierno por cuestiones socio-políticas, el proyecto logró avances más que importantes que marcaron el camino a seguir para los futuros proyectos (Uri & Mars, 2023; Koenig, 1986).

Se debe recalcar que, debido a diferentes factores más allá de la ciencia, como los mencionados antes, y por las prioridades de las agencias y empresas a lo largo de los años en el campo de la propulsión nuclear, la información que tenemos del funcionamiento de los sistemas como NERVA, de hecho, mayormente proceden de este. En los años 90, otros programas se iniciaron en Estados Unidos con el objetivo de seguir estudiando las ventajas de los cohetes nucleares, se creó el Space Nuclear Thermal Propulsion Program de la mano del Laboratorio Philips de la Fuerza Aérea, pero rápidamente fue cancelado. Lo trabajado en el proyecto fue condensado en un reporte final en 1995 (Haslett, 1995)

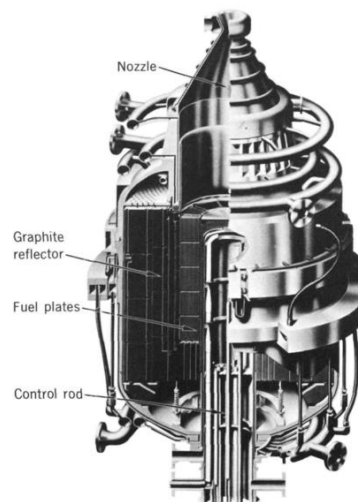


Fig. 4. Ilustración del reactor nuclear Kiwi diseñado para el proyecto ROVER/NERVA. Corliss et. al., (1971)

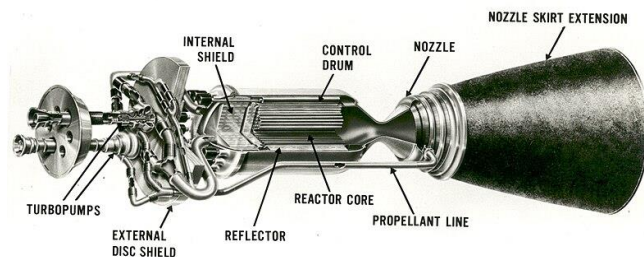


Fig.5. Ilustración del motor NTP desarrollado por NERVA.

3. PROPULSIÓN TÉRMICA Y ELÉCTRICA NUCLEAR

3.1. Propulsión Térmica Nuclear; NTP

Los sistemas NTP funcionan, en una primera aproximación, de la misma forma que los cohetes usuales, la idea es remplazar la reacción química del combustible, cuyo producido es liberado por la tobera, por un proceso de transferencia de energía nuclear a térmica, procedente del combustible del reactor hacia el propelente. Este último debe ser especialmente escogido para que satisfaga ciertas propiedades, para empezar, debe tener una capacidad alta de expansión volumétrica. Se escogen compuestos que por lo general se encuentran en estado gaseoso a condiciones ambientales, llevándolos a fase líquida donde son almacenados para luego, por medio de tuberías, ser llevados hacia el vecindario del reactor donde, en un instante, alcanzará las temperaturas y presiones necesarias dentro del motor siendo acelerado y despedido por la tobera. El compuesto que ha sido utilizado históricamente en los diseños ha sido el hidrogeno líquido (dihidrogeno), su viabilidad también radica

en su bajo peso molecular, lo que permite que el impulso específico se maximice. Dentro del cohete, el hidrogeno es empujado a través del núcleo sólido donde es calentado a una temperatura de unos 2700 K y eyectado por la tobera convergente/divergente para obtener un impulso específico de 900 s, unas 3 veces más que los cohetes convencionales. El hidrogeno líquido da muy buenos resultados, no obstante, el pequeño tamaño de sus moléculas lo vuelven un compuesto de difícil almacenamiento. El hidrogeno líquido tiende a escaparse de las paredes del contenedor, pese a que este haya sido diseñado especialmente para esta función, esto es un inconveniente debido a que sería muy poco funcional para misiones que requieran estar en el espacio por mucho tiempo. Se espera que en un futuro se logre desarrollar otro tipo de volátiles aprovechables.

La densidad de energía de la NTP es tan alta, alrededor de los 7 órdenes de magnitud más grande que la densidad de energía lograda por las mejores reacciones químicas, que sus capacidades, como en el caso del proyecto Orión, únicamente están limitadas por factores externos al núcleo, como es el tipo de materiales con los cuales se diseña el motor, que permitan o no incrementar la reactividad, o la capacidad de transmitir toda esa energía de calor del reactor al propelente. De entre toda la ingeniería detrás del sistema, el funcionamiento del núcleo es altamente interesante, consiste de un material radioactivo, también llamado *combustible*, que en el caso de NERVA se probó con grafito altamente enriquecidos con uranio (HEU), acompañado de dióxido de uranio y dicarbono de uranio, combustibles usuales en los reactores nucleares. Los núcleos sólidos funcionan a través de la fisión nuclear, cuando un elemento químico o compuesto es radioactivo, su vida media es muy corta, lo que significa que, cada tanto, uno de los átomos dentro del basto conjunto de ellos que conforman el material, se desintegra en otro elemento de menor peso liberando un neutrón cargado energéticamente. Cuando este neutrón impacta otro átomo es absorbido inestabilizándolo y permitiendo que el átomo se rompa en elementos más livianos y otro tipo de partículas (neutrones, partículas alfa, beta y fotones), la energía liberada en este proceso es masiva. Si los neutrones liberados en la anterior escena tienen la suerte de ser absorbidos por otros átomos del medio, la desintegración radioactiva vuelve a suceder. Si la densidad de un elemento radioactivo en un material es muy alta, mayor es la probabilidad de que haya una reacción en cadena. En los núcleos de los reactores de los sistemas NTP se propicia que suceda este fenómeno, al hacerlo, la energía liberada se traduce en energía térmica al ser captada por la materia circundante, permitiendo así, calentar el propelente.

Ciertamente la desintegración en el núcleo nunca se detiene, lo que conlleva a varias preguntas necesarias, entre ellas la clara incertidumbre de cómo se regula la eyección del propelente. El caso más obvio es aquel donde se corta su abastecimiento al reactor, una vez deja de pasar hidrógeno líquido, no hay más impulso. No obstante, el caso de interés es aquel donde se necesita regular las velocidades de escape

para distintas maniobras en el espacio, si la radiación liberada es siempre la misma, se obtiene la misma temperatura de propelente (que en el caso de NERVA con su último reactor Pewee demostró una temperatura pico de combustible de 2750 K y una temperatura de propelente de 2550 K) y, por ende, la misma velocidad. Anteriormente, en la **subsección 2.3**, se mencionó que para controlar la salida de neutrones se utilizaron reflectores y moderadores, para entender esto, volvamos a considerar las reacciones en cadena, no todos los neutrones que se liberan terminan dentro de otro átomo, estadísticamente y, como se dijo, dependiendo de la cantidad de elemento radioactivo dentro del material, se van a producir más o menos reacciones, algunos de los neutrones, sin embargo, terminarán escapando del núcleo, al igual que la otra gama de partículas, al exterior, esta es la razón por la cual el propelente y los materiales del cohete se calientan alrededor del núcleo y que, por supuesto, la radiación es nociva. Para controlar este flujo de neutrones el núcleo es rodeado por berilio o dióxido de berilio (reflector de neutrones) encargado de reflejar los neutrones que llegan a su superficie de vuelta al núcleo incrementando las reacciones en cadena. El núcleo está en estado estacionario si la cantidad de neutrones producidos es igual a la cantidad de neutrones absorbidos o que se escapan, si la cantidad de neutrones producidos es mayor, entonces la potencia del reactor es mayor, en caso contrario disminuye, de esta manera se pueden producir distintos enfoques que disminuyan o aumenten el poder del reactor. Uno de estos enfoques es presentado en **Fig. 6**. En este diseño que hace parte se muestra la sección transversal de un reactor, en el centro se haya el núcleo sólido cubierto de un material absorbente que Houts et. al. (2017) explican podría ser B_4C , esta envoltura está armada con cilindros rotatorios recubiertos de B_4C por una cara, si se necesita incrementar la cantidad de neutrones absorbidos, la cubierta se dispone en dirección del núcleo, si se necesita incrementar el poder del reactor, la cubierta se dispone en dirección contraria. Estos mecanismos actúan principalmente en la etapa de encendido y apagado del reactor, que se pueden considerar, relativamente, como etapas lentas. En el arranque al cohete le toma aproximadamente 12 segundos para llegar al máximo impulso en el arranque y unos cuantos minutos reducir el poder de operación luego del apagado, en unas pocas horas después de esto el reactor pasa a operar a $< 0.1\%$ de su capacidad. (NASA Glenn Research Center, 2021; Houts et. al., 2017; National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2021).

Actualmente, debido a los objetivos de la NASA de llegar a Marte en 2030, está trabajando en un nuevo programa de investigación de NTP llamado DRACO junto a DARPA (ver **sección 4**). También otros estudios y modelos computacionales se han estado llevando a cabo para optimizar sistemas de transportes de muy alta potencia siempre en vistas al planeta rojo (Maddock et. al., 2021).

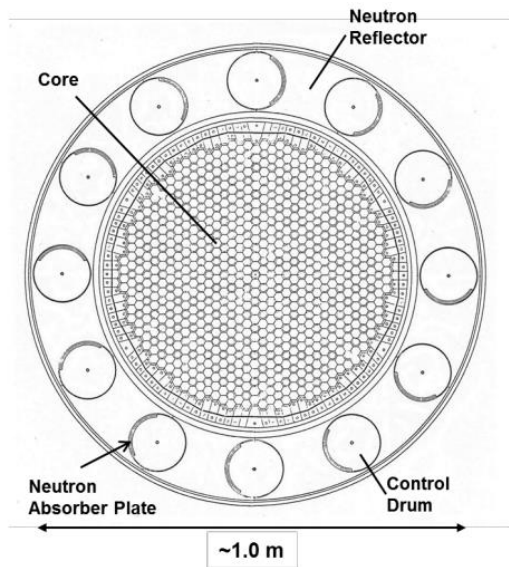


Fig. 6. Sección transversal de un diseño conceptual de un reactor perteneciente a un sistema NTP. El núcleo está rodeado de B₄C que actúa como regulador de salida de neutrones. Tomado de Houts et. al. (2017)

3.2. Propulsión Eléctrica Nuclear, NEP

Podemos hablar de la NEP como el método de propulsión nuclear más empleado y estudiado a partir de la numerosa cantidad de programas y misiones que las distintas agencias espaciales han realizado y se encuentran realizando. La NEP, incluso, resalta más en las referencias académicas que la propia NTP, este efecto es debido a que si bien la propulsión nuclear, que como ya vimos no es un tópico nuevo, recientemente se está volviendo a tener en cuenta con mayor ímpetu, la utilización de la energía nuclear en el espacio lleva varios años presente. La misión Mars 2020, que colocó sobre la superficie marciana al Rover Perseverance, utiliza una fuente de poder llamada *Multi-Mission Radioisotope Thermoelectric Generator*, el cual convierte el calor generado por decaimiento nuclear del plutonio en electricidad, permitiendo cargar sus baterías (NASA, 2023). Este efecto que permite convertir la energía térmica en calor se conoce como el efecto Seebeck, es la pieza clave que permite el sustento de energía a cualquier nave que utilice propulsión eléctrica. Los generadores termoelectrónicos de radioisótopos utilizan termocuplas aprovechando la diferencia de temperaturas entre el reactor y el exterior de este, como se sabe del efecto Seebeck, entre mayor sea la diferencia de temperaturas, mayor la corriente producida. Similarmente, las unidades de calentador radioactivo (radioactive heater units, RHU) utilizan el decaimiento de los elementos radioactivos para generar electricidad (Petrocelli, A., 2023). Los NEP utilizan la electricidad para generar campos eléctricos, corrientes o campos magnéticos para acelerar el propelente y lograr empuje. Los iones cargados del propelente pueden ser

acelerados usando campos eléctricos estáticos o acelerando el plasma casi-neutro portador de corriente mediante fuerzas electromagnéticas (Cassady, R. J., 2008). Una limitación de gran peso que tienen todos los tipos de sistemas de propulsión eléctrica, que no escapa al NEP, es el siguiente: un combustible químico debe afrontar acelerar la carga útil y la masa del mismo propelente, como habíamos discutido anteriormente; el NEP debe acelerar no solo esta masa, sino también la misma masa del reactor que, por supuesto, debe estar integrado con la nave. Pese a que la velocidad de escape de las partículas es muy alta, el peso agregado del sistema de conversión de energía más el reactor, reduce la cantidad de empuje, se debe dejar actuar al NEP durante largos periodos para que así se logren las prometedoras velocidades que el sistema dispone, la fuerza generada por este tipo de nave no supera los 0,001 N. Un parámetro que nos da una idea de la eficiencia del NEP es la *masa específica*, esta es una medida de eficiencia de un cohete, mide la razón entre la masa y el poder generado, entre menos masa y más poder, mayores aceleraciones. Para los sistemas NEP, la masa específica del sistema de poder domina sobre el sistema de propulsión eléctrica, pero es necesario, entonces, preocuparse de la eficiencia de ambos, aumentando la capacidad del reactor para utilizar la energía y del sistema en la transformación de esta. Para darse una idea de las ventajas de este sistema, algunos diseños de proyectos liderados por la NASA encontraron impulsos específicos de entre 6000 y 9000 s.

4. EL PRESENTE Y FUTURO DE LA PROPULSIÓN NUCLEAR

4.1. *Demonstration Rocket for Agile Cislunar Operations, DRACO*

DRACO es un proyecto liderado por DARPA y apoyado por NASA que busca construir un cohete que utilice un sistema NTP para ser probado en órbita (DARPA, 2023a). DRACO fue planteado desde sus comienzos como una alternativa y solución los sistemas de propulsión convencionales. En los libros de presupuesto públicos de DARPA se evidencia que desde 2020 se diseñó el proyecto con el objetivo de desarrollar y demostrar un sistema NTP de uranio bajo enriquecido de alto ensayo (HALEU, por sus siglas en inglés) que, en palabras de la propia agencia, "ampliara la presencia operativa de los Estados Unidos en el espacio a un volumen cislunar y mejorará las operaciones internas a un nuevo terreno elevado, que está en peligro de ser definido por el adversario." Para este mismo año se planeó demostrar la capacidad para fabricar de forma aditiva elementos combustibles de NTP de uranio. Para el año 2021 DARPA se propuso, entre otras cosas, iniciar el diseño preliminar de un reactor demostrativo NTP, iniciar el diseño conceptual del sistema de demostración (DS) y del sistema operativo (OS) de la nave espacial NTP, y demostrar diseños de elementos combustibles NTP en entornos de

prueba representativos, esto corresponde a la primera fase del proyecto, para esto se escogieron a tres compañías con experiencia en el campo aeroespacial: General Atomics, Blue Origin y Lockheed Martin. General Atomics estuvo encargada del diseño conceptual del reactor y el desarrollo del subsistema de propulsión, o *Track A*, mientras que los dos últimos desarrollarían independientemente el OS y el DS. Esta fase pretendió durar 18 meses, por lo que los planes a realizar en 2022 no variaron mucho respecto al año anterior, aunque ya se tenía claro que se buscaba colocar el cohete en órbita para 2025 y para finales de año e inicios de 2023 iniciar la fase 2 del programa, que busca realizar el diseño detallado del reactor y vehículo de vuelo, la construcción, las pruebas críticas de potencia cero y las pruebas de flujo en frío del motor NTR, y pruebas de fabricación y calificaciones espaciales de otros componentes importantes del vehículo de vuelo. La fase 3 consistiría para los próximos años, fundamentalmente, en el ensamblaje del resto de los componentes del vehículo espacial, las pruebas de carga del vehículo espacial integrado, la integración del vehículo espacial con un vehículo de lanzamiento y el lanzamiento al espacio para la demostración del cohete (DARPA, 2020; DARPA, 2021a; DARPA, 2021b; DARPA, 2021c; DARPA, 2022).

El 26 de julio de 2023, a través de una transmisión de NASA, se confirmó que el desarrollo y construcción de la nave sería llevada a cabo por Lockheed Martin. Establecieron, de paso, una ventana de lanzamiento tentativa a finales del 2025 e inicios de 2026. El cohete será llevado a órbita a una altitud de 700 a 2000 km, donde se dejará algunos meses con el único objetivo de probar el sistema NTP. Su utilizará como combustible el hidrógeno y se accionará el dispositivo nuclear solamente cuando se encuentre en órbita, para que no haya efectos nocivos dentro de la atmósfera terrestre (Wall, 2023). La NASA asume que la capacidad de su futuro cohete, que logra una eficiencia de 2 a 5 veces mayor que la del combustible químico en el espacio y un empuje 10000 veces más grande que los sistemas NEP, sea el carruaje que lleve a la humanidad, por primera vez, a la tan ansiada conquista del suelo marciano.

4.2. Roscosmos

A la par de las otras potencias, la Agencia Espacial Federal Rusa (FSA) o Roscosmos también tiene planes a futuro para vuelos espaciales basados en propulsión nuclear. Desde 2009 están planeando el diseño de un *remolcador espacial* basado en un sistema de propulsión de energía nuclear en el orden de los megawatts (megawatt-class nuclear power propulsion system, NPPS), el sistema es un NE. Está siendo desarrollado en el Keldysh Research Center, que es el centro de investigación de Roscosmos centrado el estudio y construcción de sistemas de propulsión de cohetes, en cooperación con empresas afiliadas a Roscosmos y la Rosatom State Atomic Energy Corporation (Koroteev, 2009).

Los diseños del módulo de transporte y energía (TPM) tuvieron su primera etapa entre 2010 y 2012, los parámetros del reactor nuclear son una potencia térmica de hasta 3.5 MW, un tiempo de servicio no menor a los 10 años, y una temperatura del gas a la salida del montaje del reactor de hasta los 1500 K. Además, en términos generales, el TPM, que puede encontrar en la **Fig. 7**, está conformado por una unidad de generación de energía y un sistema de propulsión eléctrica. La unidad de generación de energía incorpora un reactor que sirve como recurso de energía térmica, un sistema de conversión de energía que convierte la energía térmica del reactor en energía eléctrica, un sistema que de remoción de calor que extrae calor del sistema NPPS y por medio de radiadores lo libera al espacio, un sistema que distribuye y convierte la energía eléctrica y la energía del TPM para distribuirla en toda la nave, y un sistema automático de control (Koroteev et. al., 2015).

Hay varias propuestas para la utilización de remolcador espacial, el programa principal ha sido bautizado como *Zeus* y una de sus funciones previstas es ser utilizado para una misión no tripulada con rumbo a Júpiter, que duraría aproximadamente 50 meses, y sería lanzada tentativamente no más allá del 2030. Este ambicioso plan consistiría en un paso por la Luna donde el remolcador liberaría una nave con dirección a Venus, una vez en Venus, esta nave utilizaría la asistencia gravitacional del planeta para que se libere otra nave que emprenderá el viaje hacia Júpiter (Tangermann, 2021). También se ha considerado emplear el remolcador nuclear para solucionar el problema de basuras espaciales generadas por las explosiones autoprovocadas de sus satélites, al igual que utilizarlo con fines militares (Satam, 2023).

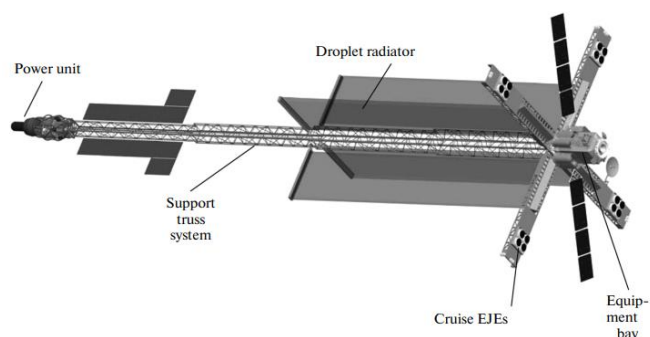


Fig. 7. Sistema de propulsión nuclear (TPM) propuesto por Roscosmos basado en NEP que será utilizado en el programa Zeus. Koroteev et. Al., (2015)

4.3. Agencia Espacial Europea, ESA

Como otras agencias espaciales alrededor del mundo, la ESA y sus contribuidores están al tanto de las virtudes de la propulsión a base de energía nuclear, por lo que ya desde hace

unos años ha iniciado programas enfocados en el análisis de estas tecnologías para la construcción de nuevas naves impulsadas con reactores nucleares. El Reino Unido inició en 2021 el programa VULCANS (Virtual Centre for the Applications of Nuclear Systems in Space) con el objetivo de utilizar los recursos e institutos más vanguardistas de la región para desarrollar NPPS enfocados en el espacio, su característica principal ha sido investigar los sistemas de reactores, diseño, producción de combustibles y sus posteriores pruebas. Han estado estudiando la eficiencia de diversos elementos y pretenden suplir las necesidades de materiales para la manufacturación de reactores para las futuras misiones de la ESA (UK Space Agency, 2022; Tinsley & White, 2023). La ESA a inicios de este año comenzó varios estudios de viabilidad que fueron delegados a distintos institutos, investigadores de universidades y empresas expertas en la propulsión espacial, la idea es utilizar un sistema NEP que sea operacional para 2035, el cual fue bautizado como *pReliminary eurOpean reckon on nuclear electric pROpulsion for space appLications* o *RocketRoll*, que hace parte del *Future Launchers Preparatory Programme* (Flpp). Actualmente se encuentran en las primeras etapas de la revisión del estado del arte de los pasados vehículos NEP y estudiando los posibles usos, tales como viajes en tránsito entre la Tierra y la Luna, misión tripulada a Marte o tránsito desde LEO a los puntos de Lagrange Sol-Tierra (Visvikis, 2023; OHB Czechspace, 2023a; OHB Czechspace, 2023b).

5. DISCUSIÓN

Hasta no hace mucho se ha mantenido la insistencia de aferrarnos a un método de propulsión que está llegando a los límites de eficiencia retrasando los avances que permitan convertir a la humanidad en una civilización interplanetaria. Se podría pensar que una de las soluciones está en mejorar los sistemas que aseguren el viaje de las personas a bordo y de las misiones en general, pero esto implicaría costos, posiblemente innecesarios e inútiles, para un método que, como se ha dicho, ya es obsoleto. La necesidad de visitar el pasado y mudarnos a los sistemas de propulsión nuclear espacial se vuelve más tentadora cuando vemos que la propulsión eléctrica puede alcanzar una velocidad de escape de 45 km/s comparada a los 3,5 km/s de los combustibles químicos, y cuando se incrementa la velocidad de escape también se incrementa el impulso específico, en unos rangos de entre los 1500 a los 9000 s (Szabo et al., 2012). Para el NTP la velocidad de escape llega a 8 km/s, más del doble. Pese a que ambos sistemas encuentren sus limitaciones, por ejemplo, en el bajo empuje generado (NEP) o en las altas temperaturas del núcleo, que inclusive sobrepasan las temperaturas de funcionamiento de las plantas nucleares, y en la poca disponibilidad de propelentes que justifiquen la utilización del método (NTP), se han propuesto soluciones híbridas de cohetes que utilicen los dos sistemas que prometen reducir los viajes a Marte en

cerca de un tercio del tiempo que toma utilizando la mejor órbita de transferencia de Hoffmann, unos 45 días (Kumar et al., 2020; Williams, 2023). Es innegable, entonces, que esta nueva etapa de la carrera espacial va a traer consigo el renacimiento y posicionamiento de los cohetes nucleares, la motivación es tanta y las posibilidades tan variadas que ya se pueden encontrar propuestas de modelación para la utilización de estos para viajes hacia las lunas de los gigantes gaseosos, como Titán o Tritón (Irvine, 2020; Gajeri et al., 2021; Paluszek et al., 2023), o intenciones de defensa planetaria ante posibles impactores (Petrocelli, 2023). Por otro lado, la propulsión nuclear de pulso quizá solo sea una curiosa idea, en el momento, lejos de hacerse realidad, pese a que demuestra ser el sistema de propulsión más efectivo, gracias a causas socio-pólicas y miedos generalizados de la población sobre el uso de la energía nuclear cuando se refiere a explosiones. Por lo tanto, analizada la historia y con los pies puestos en el futuro, es necesario que las agencias y los países sigan concentrando esfuerzos para lograr el avance deseado que permitan superar las barreras de nuestra presente tecnología y así, prontamente, traer los sueños de colonizar Marte (u otras misiones alrededor del sistema solar) a una realidad cada vez más cerca de nuestras manos.

AGRADECIMIENTOS

El autor de este artículo agradece al grupo ASTRA y demás organizadores de CODEAC por la oportunidad dada de participar en este primer congreso. Agradezco también a Alexander Gonzalez, Santiago Sierra, Andersson Rodríguez, estudiantes de Astronomía de la Universidad de Antioquia; a Valeria Londoño, estudiante de periodismo de la Universidad de Antioquia; y a Angela Rosero, estudiante de Ingeniería Aeroespacial, por su invaluable ayuda y apoyo con los cuales este artículo no habría sido posible en su forma actual.

REFERENCIAS

- Corliss, William, R., & Schwenk, F.C. (1971) Nuclear Propulsión for Space (Rev.) US Atomic Energy Commission (AEC). <https://www.osti.gov/biblio/1132518>
- DARPA. (2023, 24 de enero). DARPA, NASA Collaborate on Nuclear Thermal Rocket Engine. Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA). <https://www.darpa.mil/news-events/2023-01-24>
- DARPA. (2020, febrero). Department of Defense Fiscal Year (FY) 2021 Budget Estimates. <https://www.darpa.mil/attachments/DARPAJBookFY21.pdf>
- DARPA. (2021c, mayo) Department of Defense Fiscal Year (FY) 2022 Budget Estimates. https://www.darpa.mil/attachments/DARPA_PB_2022_19MAY2021_FINAL.pdf

DARPA. (2022, abril) Department of Defense Fiscal Year (FY) 2023 Budget Estimates. https://www.darpa.mil/attachments/U_RDTE_MJB_DARPA_PB_2023_APR_2022_FINAL.pdf

DARPA. (2021a, 4 de diciembre). DARPA Selects Performers for Phase 1 of Demonstration Rocket for Agile Cislunar Operations (DRACO) Program. Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA). <https://www.darpa.mil/news-events/2021-04-12>

DARPA. (2021b, 21 de diciembre). SPecial Notice (SN) DARPA-SN-22-17 Demonstration Rocket for Agile Cislunar Operations (DRACO) Proposers Day [Comunicado de prensa]. <https://sam.gov/opp/821dfb1cbffa45dd85a3e265e9a7f5e4/view>

Everett, C., & Ulam, S. M. (1955). *On a method of propulsion of projectiles by means of external nuclear explosions. Part 1*. <https://doi.org/10.21236/ada306631>

Esselman, W. H. (1965). The NERVA Nuclear Rocket Reactor Program. *Westinghouse Engineer*, 25(3). <https://www1.grc.nasa.gov/wp-content/uploads/NERVA-Nuclear-Rocket-Program-1965.pdf>

Gajeri, M., Aime, P. & Kezerashvili, R. Y. (2021). A Titan mission using the Direct Fusion Drive. *Acta Astronautica*, 180, 429-438. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.12.013>

George C. Marschall Space Flight Center, NASA (1964). Nuclear Pulse Space Vehicle Study Vol. III – Conceptual Vehicle Designs and Operational Systems (U). General Atomic. Retrieved October, 2023 from https://www.classe.cornell.edu/~seb/celestia/orion/files/19770085619_1977085619.pdf

Koenig, D. R. (1986). Experience Gained from the Space Nuclear Rocket Program (Rover). Los Alamos National Laboratory. <https://nuke.fas.org/space/la-10062.pdf>

Koroteev, A. S., Oshev, Y. A., Popov, S. A., Karevsky, A. V., Solodukhin, A. Y., Zakharenkov, L. E., & Semekin, A. V. (2015). Nuclear power propulsion system for spacecraft. *Thermal Engineering*, 62(13), 971–980. doi:10.1134/s0040601515130078

Kumar, S., Thomas, D., Cassibry, J., & Frederick, R. A. (2020). Review of nuclear thermal propulsion technology for deep space missions. AIAA Propulsion and Energy 2020 Forum. <https://doi.org/10.2514/6.2020-3915>

Haslett, R. A. & Grumman Aerospace Corp., Bethpage, NY (United States). (1995). SPACE NUCLEAR THERMAL PROPULSION PROGRAM FINAL REPORT. En *OSTI.GOV* (N.º 273151). <https://www.osti.gov/biblio/273151>

Houts, M., Mitchell, D. P., & Aschenbrenner, K. (2017). Low-Enriched Uranium Nuclear Thermal Propulsion Systems. 2017 AAS Guidance and Control Conference. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20170001462/downloads/20170001462.pdf?attachment=true>

Maddock, C., Parsonage, B., Ricciardi, L. A., Vasile, M., & Cohen, Orr (2021) *Design optimisation and analysis of very high power transportation system to Mars*. In: 72nd International Astronautical Congress, 2021-10-25 - 2021-10-29, Dubai World Trade Centre. <https://strathprints.strath.ac.uk/78566/>

NASA Glenn Research Center. (2021, 28 de septiembre). Nuclear Rockets | Glenn Research Center | NASA. Glenn Research Center | NASA. <https://www1.grc.nasa.gov/historic-facilities/rockets-systems-area/7911-2/>

NASA Glenn Research Center. (2023, 17 de abril). Nuclear Thermal Propulsion Systems | Glenn Research Center | NASA. Glenn Research Center | NASA. <https://www1.grc.nasa.gov/research-and-engineering/nuclear-thermal-propulsion-systems/>

Irvine, A. G., Hetterich, R., Edwards, S., & Rodriguez, M. A. (2020). Design reference mission development for nuclear thermal propulsion enabled science missions. *ASCEND 2020*. <https://doi.org/10.2514/6.2020-4126>

NASA. (2023). *Electrical Power - NASA*. MARS 2020 Mission Perseverance Rover. <https://mars.nasa.gov/mars2020/spacecraft/rover/electrical-power/#:~:text=The%20power%20source%20is%20called,the%20over's%20two%20primary%20batteries.>

National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. 2021. Space Nuclear Propulsion for Human Mars Exploration. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/25977>

National Archives. (2022, 8 de febrero). Test Ban Treaty (1963). National Archives. <https://www.archives.gov/milestone-documents/test-ban-treaty>

OHb Czechspace. (2023a, 20 de abril). New Space Transportation ERA: OHb CzechSpace will lead a study on the use of nuclear energy for challenging space missions. <https://www.ohb-czech.cz/news/new-space-transportation-era-ohb-czechspace-will-lead-a-study-on-the-use-of-nuclear-energy-for-challenging-space-missions>

OHb Czechspace. (2023b, 8 de agosto). Revolutionizing space travel: Nuclear Electric Propulsion Program “RocketRoll” successfully passes first project milestone, paving the way for efficient and sustainable space exploration. [https://www.ohb-czech.cz/news/revolutionizing-space-travel-nuclear-electric-propulsion-program-rocketroll-successfully-passes-first-project-milestone-paving-the-way-for-efficient-and-sustainable-space-exploration#:~:text=RocketRoll%20\(pReliminary%20eurOpean%20reckon%20on,to%20Sun%2DEarth%20Lagrange%20points.](https://www.ohb-czech.cz/news/revolutionizing-space-travel-nuclear-electric-propulsion-program-rocketroll-successfully-passes-first-project-milestone-paving-the-way-for-efficient-and-sustainable-space-exploration#:~:text=RocketRoll%20(pReliminary%20eurOpean%20reckon%20on,to%20Sun%2DEarth%20Lagrange%20points.)

Paluszek, M., Price, A., Koniaris, Z., Galea, C., Thomas, S., Cohen, S. A., & Stutz, R. (2023). Nuclear fusion powered Titan Aircraft. *Acta Astronautica*, 210, 82-94. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2023.04.029>

Petrocelli, A., Bettinger, R. A., Kutz, N. C., & Hartsfield, C. R. (2023). Atlas of historical and proposed nuclear devices and power systems in the Earth-Moon system and wider solar System. *Progress in Nuclear Energy*, 164, 104857. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2023.104857>

Reynolds, T. W. (1972). *Effective specific impulse of external nuclear pulse propulsion systems* (No. E-7013). <https://ntrs.nasa.gov/citations/19720025114>

Satam, P. (2023, 20 de abril). Russia sets 2030 timeline to launch its Nuclear-Powered Zeus Tug that can clean mounting space debris. Latest Asian, Middle-East, EurAsian, Indian News. <https://www.eurasiantimes.com/russia-sets-2030-timeline-to-launch-its-nuclear-powered-space-tug-that-can-clean-mounting-space-debris/>

Schmidt, G., Bonometti, J., & Morton, P. J. (2000). Nuclear pulse propulsion - Orion and beyond. *36th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit*. <https://doi.org/10.2514/6.2000-3856>

Skelly, C. (2021). Nuclear propulsion could help get humans to Mars faster. NASA. <https://www.nasa.gov/directorates/spacetechnology/nuclear-propulsion-could-help-get-humans-to-mars-faster>

SpaceX. (2023). Mars and Beyond: the road to making humanity multiplanetary. <https://www.spacex.com/human-spaceflight/mars/>

Stetler, B. (2010). Project Orion. Introduction to Physics of Energy PH240 course. Stanford University. Retrieved October, 2023 from <http://large.stanford.edu/courses/2010/ph240/stetler2/>

Szabo, J., Pote, B., Paintal, S., Robin, M., Hillier, A. C., Branam, R., & Huffmann, R. E. (2012). Performance evaluation of an Iodine-Vapor Hall thruster. *Journal of Propulsion and Power*, 28(4), 848-857. <https://doi.org/10.2514/1.b34291>

Tangermann, V. (2021, 26 de mayo). Russia wants to send a Nuclear-Powered «Space Tug» to Jupiter. Futurism. <https://futurism.com/russia-nuclear-powered-spacecraft-jupiter>

Tinsley, T. & White, J. (2023). UK Development of Deployable Nuclear Space Power Systems. IEEE Aerospace Conference, Big

Sky, MT, USA, 2023, pp. 1-7, doi: 10.1109/AERO55745.2023.10115805.

UK Space Agency. (2022, 14 de marzo). New space funding paves the way for pioneering approaches to energy, communication and resources. GOV.UK. <https://www.gov.uk/government/news/new-space-funding-paves-the-way-for-pioneering-approaches-to-energy-communication-and-resources#:~:text=Utilising%20its%2060%2Dyear%20nuclear,the%20government's%20Net%20Zero%20Strategy>.

Uri, J., & Mars, K. (2023, 23 de agosto). 50 years ago: NASA cancels Apollo 20 mission. NASA. <https://www.nasa.gov/history/50-years-ago-nasa-cancels-apollo-20-mission/>

Visvikis, D., Rocha-Paulo, A., Deja, K., Telloli, C., Ferrucci, B., Marques, R., Gilligan, P., Daifuku, K., Kechemair, D., Kirejczyk, M., & ENENplus. (2023). Report on HR needs in non-power nuclear sector applications. En ENENplus (N.o 101061677).

Wall, M. (2023, 26 de julio). NASA, DARPA to launch nuclear rocket to orbit by early 2026. Space.com. <https://www.space.com/nasa-darpa-nuclear-thermal-rocket-draco-2026>

Williams, M. (2023, 23 enero). *New NASA nuclear rocket plan aims to get to Mars in just 45 days: ScienceAlert*. ScienceAlert. <https://www.sciencealert.com/new-nasa-nuclear-rocket-plan-aims-to-get-to-mars-in-just-45-days>