

REAL ACADEMIA DE INGENIERÍA

**EXPLORACIÓN DE LUNAS
HELADAS DE LOS PLANETAS
GIGANTES**

DISCURSO DEL ACADÉMICO

EXCMO. SR. D. JUAN RAMÓN SANMARTÍN LOSADA

Leído en el acto de Clausura del Curso Académico 2019-2020
El día 20 de octubre de 2020



MMXX

EXPLORACIÓN DE LUNAS
HELADAS DE LOS PLANETAS
GIGANTES

REAL ACADEMIA DE INGENIERÍA

EXPLORACIÓN DE LUNAS
HELADAS DE LOS PLANETAS
GIGANTES

DISCURSO DEL ACADÉMICO

EXCMO. SR. D. JUAN RAMÓN SANMARTÍN LOSADA

Leído en el acto de Clausura del Curso Académico 2019-2020
El día 20 de octubre de 2020



MMXX

Editado por la Real Academia de Ingeniería
@ 2020, Real Academia de Ingeniería
@ 2020, del texto, Juan Ramón Sanmartín Losada
ISBN: 978-84-95662-79-8

Exploración de Lunas Heladas de los Planetas Gigantes

Juan R. Sanmartín

Universidad Politécnica de Madrid
Real Academia de Ingeniería

I.- Introducción

Exploración de los muy lejanos planetas Urano y Neptuno (*Ice Giants*), que sólo se han visitado en *flyby* (órbita abierta), a diferencia con los *Gas Giants* Júpiter y Saturno, es de particular interés. Pero existe una dificultad básica con métodos *standard*. La *Introducción* del *NASA's Ice Giants Pre-decadal Mission Study Report*, JPL-D-100520, de junio 2017 (529 pp.), señala, en la Sec.3.2.3, medio siglo de múltiples estudios en diseño de misión, con variedad conceptual en su arquitectura, usando o no *gravity assists*, y propulsión eléctrica ó puramente química. Tales misiones lejanas aparecen muy costosas, y la potencia solar disponible es prácticamente nula durante la mayor parte de la operación.

Captura química de la nave espacial (*S/C*) requiere alta masa de propulsante, con carga científica limitada a una pequeña fracción másica y maniobras orbitales muy reducidas tras la captura. La misión concepto típica dispone de sonda atmosférica con nave en órbita. Objetivos científicos básicos son delimitar condiciones del interior planetario, incluyendo estructura de capas, *bulk composition*, y comprensión detallada del proceso de *dynamo*. Estos objetivos ciertamente resultarían en avances fundamentales en Ciencia planetaria. *Aerocapture* y *Radioisotope power systems* fueron tentativamente considerados para propulsión y potencia eléctrica, respectivamente.

En el presente, sin embargo, existe una importante variante en la exploración de los planetas Gigantes, que introduce el concepto

Oceanworld, no mencionado en el JPL D-100520 *Report*. En mayo de 2015 el Congreso de EE.UU. aprobó financiar un nuevo programa NASA para explorar lugares habitables en el Sistema Solar, con océanos internos que permitirían formas simples de vida. Eso conduce a la búsqueda de *Oceanworlds* en *Icy Moons* de los 4 *Gigantes*.

Vida requeriría fuente de energía, agua, y química apropiada. Un océano se extendería de fondo rocoso, calentado por fuerzas de marea de sus planetas gigantes, a fría cubierta de hielo, por la que podría emerger *a plume* ('*penacho*, *geyser*') de océano. En esquema simplificado de proceso *hydrothermal (red-ox)*, moléculas de agua perderían oxígeno a *reduced minerals* en el fondo, y serían de nuevo oxidadas por moléculas CO₂, generando H₂O y CH₄ (*metanogénesis*).

Icy moons incluirían, muy en particular la luna *Encelado* de Saturno, con moléculas H₂ detectadas en *plume* en la misión *Cassini*^[1]; la luna *Europa* de Júpiter, que podría presentar *plume*, como sugieren revisiones recientes de viejos datos de la misión *Galileo*^[2]; y la luna *Triton* de Neptuno, donde *geysers* fueron detectados en el flyby del *Voyager 2* de 1989. Misiones, en cierto sentido *menores*, utilizarían *electrodynamic tethers* (cables conductores en órbita) multi-kilométricos que permitirían, al campo magnético planetario, procesos disipativos de captura de *S/C*, y de maniobras de visita a lunas.

II.- *Icy Moons* y *Bare Tethers*

Misiones a *Icy Moons* pueden requerir conceptos no convencionales. *Tethers* electrodinámicos son termodinámicamente disipativos, no usan propulsante y no necesitan potencia eléctrica...

[1] Waite *et al*, *Science* **356** (2017) 155-159

[2] Jia, Kivelson, Khurana, Kurth, *Nature Astronomy* **2** (2018) 459-464 // Huybrighs *et al*, *Geophys. Res. Letters* **47**, (2020) 10

pero pueden generarla, a conveniencia, cerca del planeta respectivo^[3]. Varias particularidades geométricas en la operación de *Bare tethers* pueden hacerla efectiva en el estudio de *Oceanworlds*.

II- i) Concepto básico.

El campo eléctrico en el *plasma* en el exterior del *tether* es despreciable, en su propio referencial, por ser altamente conductor. En el referencial del tether, sin embargo, hay un campo exterior \mathbf{E}_m , que lo polariza y genera corriente \mathbf{I} ($\mathbf{I} \cdot \mathbf{E}_m > 0$), determinado por la transformación relativista,

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{E}}(\text{tether frame}) - \bar{\mathbf{E}}(\text{plasma frame}) \\ = (\bar{\mathbf{v}} - \bar{\mathbf{v}}_{pl}) \times \bar{\mathbf{B}} \equiv \bar{\mathbf{E}}_m \end{aligned} \quad (1)$$

donde \mathbf{v} , \mathbf{v}_{pl} son velocidades de S/C y plasma co-rotando con planeta, y \mathbf{B} el campo magnético planetario.

En la fuerza de frenado de *Lorentz* $L \mathbf{I}_{av} \times \mathbf{B}$ sobre el tether, con corriente promedio \mathbf{I}_{av} a lo largo de su longitud L , interviene 2 veces el campo \mathbf{B} , haciendo manifiesto su carácter termodinámico. Captura planetaria requiere 1) longitud L suficiente y 2) contacto eléctrico efectivo con el plasma ambiente, de baja densidad, para alcanzar toma de corriente y ‘*Lorentz drag*’ substanciales.

Hacia 1990, *deorbitado* por *tethers*, de S/C en *Low Earth Orbit*, estaba sujeto a esas mismas condiciones 1) y 2). El concepto *standard* era esfera conductora en extremo *anódico* (polarizado positivo) de tether recubierto de aislante en toda su longitud. El problema eran

[3] Sanmartin, *Overall review on thin-tape bare tether operation as just thermodynamic process*, 14th Spacecraft Charging Technology Conference, 4-8 April 2016, ESA-ESTEC, Noordwijk, Netherlands // Sanmartin, <https://arXiv.org/abs/1703.02884>

valores de *longitud de Debye* $\lambda_D \propto \sqrt{T_e/N_e}$ y *giroradio electrónico* $l_e \propto (\sqrt{T_e})/B$ tan pequeños (~ 1 centímetro) que *apantallamiento eléctrico* y *guiado magnético* reducen notablemente corriente a un colector-3D pasivo útil, tal como una esfera conductora de 1 metro de diámetro.

El problema de contacto anódico se resolvió en torno a 1993^[4], eliminando la esfera y el aislante del tether, para permitirle tomar electrones sobre el segmento que resulte anódico, como una sonda cilíndrica de *Langmuir* gigante en el óptimo régimen *OML* (*orbital-motion-limited*). Esto supone reemplazar colección 3D con una dimensión mucho mayor que λ_D y l_e por colección 2D con dos dimensiones muy dispares.

Una es la longitud multi-kilométrica del segmento anódico, aportando muy alta área colectora, y otra caracterizando a la sección transversal del tether, comparable a λ_D y l_e , que determina la toma de electrones en planos perpendiculares al tether. El campo magnético de Júpiter es unas 20 veces el de Saturno y Neptuno (y la Tierra), pero la solución anódica vale para las diferentes capturas en *Gigantes*. El concepto *bare-tether* presenta otra fundamental ventaja, como se verá en la Sec. IV.

II- ii) Forma/tamaño de sección transversal.

Interesa determinar la forma de sección transversal óptima, y el máximo tamaño para el que la ley OML es válida. *Laframboise* y *Parker* habían demostrado que corriente OML a una sección convexa sólo depende del perímetro p ; a alta polarización ΔV ($e\Delta V \gg$ energía de electrones ambiente, caso de captura planetaria), la ley OML toma la forma simple^[5],

^[4] Sanmartin, Martinez-Sanchez, Ahedo, *J. Prop. Power* **9** (1993) 353-360

^[5] Laframboise, Parker, *Phys. Fluids* **16** (1973) 629- 636

$$I_{OML} \approx eN_e \times L \frac{p}{\pi} \sqrt{\frac{2e\Delta V}{m_e}} \propto p, \quad (2)$$

con N_e densidad de plasma. Esto sugiere usar tethers con sección de cinta muy fina, frente a sección circular:

La comparación apropiada considera tethers de igual longitud y masa, y por tanto de igual área de sección transversal para igual material. Esto resulta en igual resistencia eléctrica, e igual *máxima* (*short-circuit limited*) densidad de corriente $\sigma_i E_m$ (σ_i = conductividad del tether) y *Lorentz drag*. La cinta, sin embargo, tiene mucho mayor perímetro y capacidad de colección de corriente y maniobra; a baja densidad de plasma la cinta puede tomar corriente mucho mayor que el tether de sección circular.

Ventaja alternativa: A perímetros iguales la cinta es mucho más ligera, y además presenta 3 longitudes dispaes, espesor $h \ll$ anchura $w \ll$ longitud L , facilitando diseño escalable. La cinta, no obstante, no recoge toda la corriente *OML* debido a barreras de potencial en la vecindad de superficies colectoras planas, pero ese efecto es débil, $\sim 1\%$ [6].

En ausencia de campo B , análisis asintótico de colección de corriente por un cilindro de radio R a polarización $\Phi(R)$ determinó el complejo perfil 2D, $\Phi(r)/\Phi(R)$ versus R^2/r^2 [6]. La corriente *OML* requiere $\Phi(r)/\Phi(R) \geq R^2/r^2$ para $r > R$. que se cumple para $R < R_{max}$ [$e\Phi(R)/kT_e$, T_i/T_e], del orden de λ_D . La proximidad de la corriente al valor *OML* en cierto dominio paramétrico, permite operar tethers en subida/bajada de órbita, donde λ_D , T_e/T_i varían con la altitud [7].

El límite de validez *OML* para una cinta se obtiene de R_{max} . A alta polarización ΔV la carga espacial tiene débil efecto en una extensa vecindad de la sonda, donde se puede aplicar la ecuación de Laplace,

[6] Sanmartin, Estes, *Phys. Plasmas* **6** (1999) 395-405

[7] Estes, Sanmartin, *Phys. Plasmas* **7** (2000) 4320-4325

pero el débil apantallamiento resulta en una más extensa *vaina de plasma*. Una cinta puede aproximarse por un segmento recto, que es el límite de una familia de elipses cofocales. Resolviendo la ecuación de Laplace en coordenadas elípticas, el potencial toma forma límite lejos de la sonda (donde elipses se aproximan a círculos), pero dentro de la vaina, y se encuentra $w_{max} \approx 4R_{max}$ [6].

En presencia de un campo magnético, la máxima corriente a alta polarización es

$$I_{PM} \approx I_{OML} \times \sqrt{\pi/2} l_e / R,$$

que es el límite *Parker-Murphy* de corriente en un plasma magnetizado [8]. Un valor grande del cociente l_e / R junto a valores $R / \lambda_D = O(1)$ hacen la colección de corriente independiente de efectos magnéticos. Efectos del campo magnético generado localmente por la corriente del tether resultan mucho más débiles para cintas que para tethers circulares [8].

II- iii) Contacto catódico

El alto cociente de masas *ion/electron* resulta en muy pequeña corriente de iones ambiente que llegan al segmento a polarización negativa. La salida de electrones, aunque incrementada por emisión secundaria, es demasiado baja para ser efectiva. El contacto catódico standard usa un *Hollow Cathode*, que eyecta electrones dentro de una nube neutra de *expellant*, con baja impedancia de contacto, y fácil de encender y apagar.

Recubriendo aluminio con materiales recientemente disponibles de muy baja *Work Function* W , del orden de 1 eV [9], resulta en

[8] Parker, Murphy, *J. Geophysical Res.* **72** (1967) 1631-1636 // Sanmartin, Estes, *J. Geophysical Res.* **107** (2002) 1-7

[9] Toda, Matsuishi, Hayashi, Ueda, Kamiya, Hirano, Hosono, *Adv. Mater.* **16** (2004) 685-689

emisión termiónica substancial a temperaturas de trabajo, y contacto catódico exento de consumibles. A un segmento de tether desde el extremo anódico A hasta un punto B con polarización cero, tomando electrones en régimen OML, sigue un segmento complejo, con polarización crecientemente negativa de B al extremo catódico C .

Hay emisión *space-charge-limited* (SCL) de B a un punto B^* , y *Richardson-Dushman* desde B^* a C con densidad de corriente $J_{RD} \propto T_i^2 \exp(-W/k_B T_i)$; la emisión SCL en presencia de iones ambiente atraídos resulta en estructura de *double-layer* sin solución general, frente al segmento catódico. Un análisis aproximado de esa estructura^[10] determina 2 regímenes paramétricos límite, uno no conveniente en que no se alcanza emisión RD , otro con corto segmento SCL y poca contribución a la corriente total, lo que permite no modelarla^[11].

III.- Validez del análisis Bare-Tether

El análisis bare-tether fué validado en el espacio, de modo no programado. Mediciones en la Estación Espacial Internacional en 2001, involucrando 3 Centros NASA, NOAA/Boulder, Univ. Houston, y SAIC, mostraron que contactores de plasma HC (instalados a bordo para expulsar electrones en caso la estructura de la ISS se hiciese muy negativa) expulsaban corriente substancial bajo condiciones-ambiente muy moderadas^[12].

Ya el *Abstract* reconoce que 400 m en barras de tensión de cada mástil de 40 m del panel solar podrían recoger electrones como *bare-*

^[10] Williams, Sanmartin, Rand, *IEEE Trans. Plasma Sci.* **40** (2012) 1441-1445 // Chen, Sanmartin, *Phys. Plasmas* **22** (2015) 53504

^[11] Sanmartin, Chen, Sanchez-Arriaga, *Phys. Plasmas* **24** (2017) 13515

^[12] Bering, Koontz, Katz, Gardner, Evans, Ferguson, *The Plasma Environment of the ISS in the Austral Summer Auroral Zone Inferred from Plasma Contactor Data*, Paper 2002-0935, 40th AIAA Aero. Sci. Meet. and Exhibit, Reno, NV, 14-17 Jan. 2002

tethers, con modelo “*based upon J. R. Sanmartin’s bare wire collection theory*”, incorporándolo al ‘complex ISS computer code’ (*Environment Work Bench*), que modela la geometría ISS, su órbita, el campo \mathbf{B} terrestre y perfil de densidad del plasma *vs* altitud. Optimizar acuerdo de datos y teoría llevó a crítica del clásico perfil (IRI)-90.

Y en 2007 se mostró en simulaciones *Vlasov-code* en el régimen OML de alta ΔV , en PhD Thesis, Univ. Michigan, por E. Choinière [13], que el perfil de densidad $N_e(r) / N(\infty)$ *versus* $\ln(r/R)$ coincidía en muy alta aproximación, en comparación^[13] con detallados resultados analíticos previos, en valores correspondientes en el perfil $\Phi(r)/\Phi(R)$ *versus* R^2/r^2 en [6].

IV.- El problema de la densidad de plasma planetario

En la fuerza de Lorentz, $L \mathbf{I}_{av} \times \mathbf{B}$, la corriente promedio I_{av} (\mathbf{B} , N_e) depende de campo magnético ambiente y densidad de plasma en la órbita de la S/C. El campo \mathbf{B} de los 4 Planetas Gigantes ha sido determinado, a distancia, razonablemente bien, pero esto no es así con la densidad de plasma N_e , como ‘campo’ describiendo un *medio continuo* (excepto para Júpiter, por abundantes datos *in-situ* de la misión *Galileo*). Esto es crítico para los Ice Giants, sólo visitados en misiones *flyby*. Afortunadamente, se pueden tratar perfiles de densidad incompletos apelando a cintas más bien largas (explicando también porque *bare tethers* pueden ser poco sensibles a caídas de N_e a lo largo de la órbita) [6].

Un *bare tether* acomoda variaciones de densidad auto-ajustando la fracción *anódica* de la longitud L , mayor a menor N_e , manteniendo corriente nula en el extremo catódico. Esto permite un amplio rango

^[13] Choinière, Gilchrist, *IEEE Trans Plasma Sci.*, **35** (2007) 7-22 // Sanmartin, Choinière, Gilchrist, Ferry, Martinez-Sanchez, *IEEE Trans. Plasma Sci.* **36** (2008) 2851-2858

de valores N_e dar corriente promedio I_{av} próxima al *short-circuit* máximo $wh \times \sigma_i E_m$, (una referencia de diseño independiente, de hecho, de valores N_e), para un rango conveniente de longitud L , a masa de tether constante si la anchura w se reduce a espesor h fijo.

En el régimen OML, la corriente promedio puede escribirse

$$I_{av} = wh \sigma_i E_m \times i_{av}(L / L^*), \quad (3)$$

$$L^* \propto E_m^{1/3} (\sigma_i h / N_e)^{2/3} \quad (4)$$

donde L^* , mayor a menor N_e , es longitud característica que mide la impedancia *bare-tether* de colección de corriente frente a la resistencia óhmica. La corriente promedio adimensional $i_{av} < 1$ se desvanece con el cociente L / L^* y se aproxima a la unidad para L / L^* grande.

En caso de usar *Hollow Cathode*, despreciando su impedancia (y la corriente catódica de electrones) se tiene^[14]

$$i_{av} \approx 1 - L^* / L, \quad \text{for } L / L^* > 4. \quad (5)$$

La Ec. (5) exhibe acomodación de corriente *OML* a caídas en N_e : Considere L / L^* bajando de 20 a 4, con longitud de tether L y parámetros en L^* constantes en (4). El valor de N_e bajaría en un factor 0.09, mientras la corriente i_{av} en (5) tan sólo bajaría de 0.95 a 0.75. En el caso de *thermionic emission*, segmentos *SCL* y *Richardson-Dushman* hacen papeles de corriente iónica y *Hollow Cathode*.

Los resultados dependen de solución a ecuaciones para corriente I y polarización ΔV a lo largo del segmento anódico,

^[14] Sanmartin, Charro, Lorenzini, Garrett, Bombardelli, Bramanti, *IEEE Trans. Plasma Sci.* **36** (2008) 2450-2458

$$\frac{dI}{ds} = eN_e \frac{2w}{\pi} \sqrt{\frac{2e\Delta V}{m_e}}, \quad \frac{d\Delta V}{ds} = \frac{I}{\sigma_t hw} - E_m$$

(6 a, b)

siendo s distancia desde extremo A y considerando (al modo usual en tethers) que cocientes $L/w \sim 10^6$ permiten suponer que cada punto recoge corriente como si fuese parte de un cilindro infinito polarizado uniformemente al valor local.

Obsérvese que el modelo standard de tether previo al concepto *bare-tether*, con colección de corriente por un conductor esférico dado, no podría tratar al modo de *bare tether* con similar falta de información detallada de la densidad de plasma ambiente. De igual modo, operación de *aerocapture*, que NASA ha considerado usar en exploración de *Giant Planets*, tampoco puede tratar con falta de información detallada del medio atmosférico planetario.

V.- Nuevo Paradigma en Exploración de *Icy Moons*

Uso de bare tethers en misiones de exploración de *Icy moons*, se efectúa en 2 etapas ya en la vecindad del planeta: primero capturando la S/C, de una órbita *flyby* a una órbita planetaria con periapsis muy próximo al planeta, después bajando repetidamente el apoapsis para permitir secuencia de visitas a lunas de interés. El campo \mathbf{B} de *Outer Giants* se debe a corrientes persistentes de cargas en un pequeño volumen en el interior del planeta. Fuera del planeta, por tanto a ‘gran distancia’ del sistema de corrientes, el campo se describe usualmente con el concepto universal de vector *magnetic-moment* y su simple aproximación de ley dipolar:

Un momento magnético $\mathbf{m} = m\mathbf{u}_m$ de magnitud m (*gauss* \times *metro*³) y *vector-unidad* \mathbf{u}_m , en un ‘punto’ $\bar{\mathbf{r}}_m$, produce un campo dipolar en un punto ‘lejano’ $\bar{\mathbf{r}}$,

$$\bar{\mathbf{B}}(\bar{\mathbf{r}}) \approx \left[3(\bar{\mathbf{u}}_\rho \bullet \bar{\mathbf{m}})\bar{\mathbf{u}}_\rho - \bar{\mathbf{m}} \right] / \rho^3$$

$$\bar{\rho} = \rho\bar{\mathbf{u}}_\rho \equiv \bar{\mathbf{r}} - \bar{\mathbf{r}}_m$$

Para Saturno, y aproximadamente para Júpiter, \mathbf{m} está en su centro y casi paralelo a su eje de rotación.

El frenado de Lorentz disminuye como $1/r^6$ con r creciente. Captura eficiente requiere así periapsis muy próximo al planeta, $r_p \approx R_{pl}$ (y sería sólo efectivo en un arco orbital corto); para $r_p \approx 2R_{pl}$ el frenado sería menor en un factor 1/64. Si se mantiene la corriente del tether en una secuencia de órbitas tras la captura, efecto en el periapsis es débil pero se baja el apoapsis, buscando *flyby* de una luna particular. Apagar la corriente permitiría entonces repetida exploración de esa luna. Tales maniobras de tethers tienen carácter disipativo, en oposición a condiciones en misiones de NASA que requieren usar propulsión y potencia eléctrica. La operación podría continuar a otra luna más próxima al planeta.

VI.- Exploración de *Encelado*

Brent Sherwood (*JPL/CalTech*) diseñó una estrategia para la búsqueda de vida fuera de la Tierra^[15]. Entre los diversos *Ocean Worlds* de nuestro sistema solar, eligió a *Encelado* como único en su combinación de relevancia astrobiológica y facilidades de exploración: extenso océano de agua líquida con clara actividad *hydrothermal*, abiertamente accesible en su *plume* del polo Sur.

[15] Sherwood, *Acta Astronautica* 126 (2016) 52-58.

Considera esencial una secuencia de etapas de investigación para alcanzar consenso sobre financiación de tan ambicioso objetivo, partiendo de una misión con tope de presupuesto, hasta alcanzar entrada bajo la *plume* y exploración oceánica, *each mission step if justified by results from previous steps*.

Pero Sherwood también enfatiza que el precedente del programa de exploración de *Marte* demuestra que un espíritu de exploración optimista permitiría alcanzar un programa continuado en el presupuesto de NASA; ayudaría también la disposición a tomar atajos que ha mostrado la exploración de Marte. Y defiende asimismo el mutuo beneficio de colaboraciones con agencias espaciales internacionales. Alrededor de un año más tarde (abril 2017), J.H. Waite y 12 coautores encontraron la evidencia de moléculas de H_2 en la *plume* de *Encelado* ya citada ^[1].

En enero, 2019, 28 coautores de 16 *Centros* en EE.UU., enumeraron etapas de trabajo necesarias sobre *Icy-Moons*, “*The NASA Roadmap to Ocean Worlds*”^[16]. El primer *escenario* sería *Encelado*, *habitable* según la misión *Cassini*. Se proponían i) *Flybys* de *plume*, con detallado análisis *in situ*; ii) *Flyby* + muestra para análisis en laboratorio; iii) *Crawler*; iv) Submarino para acceder al océano y a aberturas *hydrothermal* en su fondo, y recoger muestras, determinando número y alcance de misiones necesarias para responder a la pregunta... ¿hay vida en *Encelado*?

Hay variedad of propuestas de misión a *Encelado*. El *DLR-Enceladus Explorer* usaría un reactor nuclear de 5 kW para propulsión eléctrica en transferencia a Saturno e inserción orbital, y para una sonda *ice-melting*, el *Ice Mole*, para explorar el *Océano de Encelado*^[17]. El *Enceladus Life Finder* [J. I. Lunine *et al.*, 46th *Lunar and Planetary Science Conference* (2015)], misión de clase menor (*Discovery*), usaría potencia solar de 325 W. La misión **THEO** [K. K.

^[16] Hendrix, Hurford *et al.*, *Astrobiology* **19** (2019) 1-27.

^[17] Konstantinidis *et al.*, *Acta Astronáutica* **106** (2015) 63-89.

John y 19 coautores de 15 Centros en EE.UU., 47th *Lunar and Planetary Science Conference* (2016)], de tipo medio (*New Frontiers*), usaría paneles solares de 72 m² para 594 W de potencia, y *gravity assists* de Venus y Tierra para completar propulsión.

Una misión *bare-tether*, menor pero capaz de situar una S/C con instrumentos a bordo, en cierto lugar óptimo, en Saturno, serviría de *cost-capped start-step* de Sherwood: **Es un hecho afortunado** que una órbita elíptica en Saturno con apoapsis en la órbita circular de Encelado y periapsis justo afuera de Saturno (resultado de captura óptima), tiene excentricidad 0.59, en resonancia 1:2 de Laplace con Encelado, permitiendo repetidos flybys tangentes y lentos^[18]. No habría tal resonancia si Encelado estuviese más cerca; no habría flybys tangentes, lentos, si más lejos.

VII.- Conclusiones

Problemas de propulsión y potencia, serios en misiones NASA, son irrelevantes para *bare-tethers*. Por otra parte, la captura magnética, a gran altitud, no produce calentamiento que requiera un *thermal protection system*.

Misiones programadas a la luna *Europa*, *Clipper* de NASA y JUICE de ESA, no encajan bien en el programa de *Ice Moons*. Sería muy importante una misión conjunta a *Europa*, a explorar su *plume*, si se confirma su existencia.

En cuanto a *Triton*, el campo magnético de Neptuno es tan débil como el de Saturno y Neptuno está mucho más lejos, pero la captura puede ser más eficiente. Para Neptuno (y Urano) m no está en el centro, y u_m tiene orientación compleja, y la aproximación dipolar para B falla sobre vecindad del planeta, con términos multipolo necesarios. Para simples estimaciones, se puede usar una descripción

[18] Sanmartin, Pelaez, *Acta Astronáutica* **168** (2020) 200-203

de dipolo magnético inclinado 47° al eje de rotación del planeta, y a $0.55 R_N$ del centro. Claramente, eficiencia de captura sería máxima con la S/C frente a m , en el periapsis ^[19].

Objetivos científicos requieren moon *flybys* en órbita retrógrada como la luna misma. Los comparativamente lento giro y alta densidad de Neptuno (que hacen rápido el movimiento de S/C en torno al periapsis, si próximo), reducen la rotación de Neptuno durante el corto arco de captura, con eficiencia no afectada por el orbitado retrógrado. El cual, por otra parte, resulta en fuertes mareas debidas a su planeta, y procesos *hydrothermal*, en Triton.

^[19] Sanmartin, Pelaez (2020) Tether capture of spacecraft at Neptune *Acta Astronáutica*, <httpsdoi.org/10.1016/j.actaastro.2020.03.024>

