



## **Diseño de arquitectura de naves interplanetarias**

Restricciones de ciencia y tecnología

Msc.Ing. Pedro Serrano Rodríguez  
Universidad Técnica Federico Santa María  
ACHIDE  
pedro.serrano@usm.cl

### **RESUMEN**

Una nave espacial, que transportará seres humanos por el vacío entre planetas, en el caso de este estudio taller, estará diseñada para ser ensamblada en órbita lunar, con el fin inicial de cubrir la ruta hacia Marte. Este es un desafío de diseño tecnológico por restricciones, que vienen dadas por cuestiones asociadas a los programas necesarios de espacialidad interna, por las condiciones de soportar vacío exterior, la necesidad fisiológica de considerar gravedad artificial, enfrentar radiación del viento solar y radiación cósmica, así como sistemas de acceso, salvamento, alunizaje, amortizaje. Considerando además la continuidad alimentaria la recirculación de agua y el reciclaje del aire en situaciones de confinamiento prolongado. Todo esto agregado al necesario cuidado de diseño interno con vistas a regular el ciclo circadiano y los efectos psicológicos de un viaje de este tipo en confinamiento total. La investigación académica desarrollada, abarca como referentes a la estación espacial internacional, sus distintos módulos, materialidades pesos y dimensiones, estudio de las lanzaderas o cohetes de las distintas plataformas existentes (ESA, NASA, ROKOSMOS, China, India, Emiratos, Israel) sus capacidades de carga hacia órbitas altas y lunares con vistas al desarrollo de módulos acoplables que constituyan el navío espacial.

**PALABRAS CLAVES:** Ingeniería, Arquitectura, Espacial, Interplanetario.

### **INTRODUCCIÓN**

Uno de los aportes que puede hacer el sistema universitario chileno en la carrera espacial en que está la humanidad, es precisamente ayudar a pensar científicamente, diseñar y modelar propuestas de construcciones espaciales, tecnológicamente sustentadas en las experiencias recogidas de las estructuras habitables que ya se han realizado, desde los viajes tripulados a la Luna, las estación espacial MIR y la Estación Espacial Internacional, sumado a esto los nuevos aportes del sector privado como lo son hoy, por ejemplo, Blue Origin, Spàce-X y Virgin Galactic.

Junto con lo anterior la bioclimática interna de un navío espacial tripulado requiere de recoger información sobre fisiología humana, manejo y recirculación de agua, recuperación de oxígeno, manejo del CO<sub>2</sub> manejo de desechos orgánicos y mantención y/o producción alimentaria, durante un viaje posible de hasta tres años fuera del ámbito terrestre, asuntos para los cuales se han probado y perfeccionado equipos sobre todo en la evolución de la Estación Espacial Internacional, EEI.

Lo importante en la búsqueda de información, en modo virtual durante la pandemia de COVID 19, ha sido enfocarse en las múltiples restricciones que impone hoy en día el viaje espacial tripulado y a partir de las maneras en que se han ido enfrentando dichas restricciones con ciencia y tecnología, realizar el proceso de diseño de volúmenes espacios y materialidades de un navío espacial.

La hipótesis principal de este trabajo es que es posible en Chile, asumiéndolas restricciones técnicas extremas de los viajes espaciales, enfrentar el diseño de arquitectura ingenierilmente soportada de propuestas viables de navíos espaciales para las décadas posteriores al 2030.

Se partió el trabajo con tres equipos de estudiantes de últimos años de Arquitectura, con el apoyo de ingenieros en aeronáutica de la Academia de Ciencias Aeronáuticas, ACA UTFSM, astrofísico de la NASA, físicos, expertos en producción alimentaria, registros de arquitectura de Rocosmos. La propuesta fue entonces detallar el diseño de 3 navíos espaciales para ser construidos por partes en Tierra, transportados en los carenados reales de las lanzaderas disponibles para órbitas lunares, ensamblados en órbita lunar, para un viaje ida y vuelta de tres años, (2035-2038), en las condiciones actuales de los impulsores disponibles. Con 10 tripulantes mixtos y la misión de bajar y subir desde Marte con módulos especiales para una misión de exploración en la opción de estadía larga (app 1 año)

Según la tecnología de impulsión actual el viaje tiene 2 opciones, (ESA) la más larga permite explorar evitar parcialmente la intensa radiación cósmica durante el viaje: Salida el 28 de agosto de 2037

Retorno 27 de febrero 2040, Fig. 1



Fig. 1. Etapas viaje extendido según tecnología actual.

### 1 Principales restricciones levantadas:

- La necesidad de gravedad artificial
- Uso de los espacios ingravidos o con microgravedad. ( arriba y abajo relativos)
- Las dimensiones reales de los carenados actuales de los cohetes disponibles (cabina de carga presurizadas o al vacío, volumen transportable, pesos permitidos)
- Materialidad e ingeniería para módulos laboratorios habitables en vacío espacial con posibilidades de impactos de micro meteoritos.
- El programa mínimo para desarrollar la misión con 10 tripulantes.

- La existencia de Gateway (USA) u otra estación Chino- Rusa, orbitando la Luna, apoyo Lunar disponible (año 2035)
- La existencia real del viento solar y la radiación cósmica en el espacio fuera de nuestro campo magnético.
- Los propulsores probados y aquellos en prueba viables al 2035.
- Psicología de confinamiento prolongado, ciclo circadiano
- Energía para impulsos y energía eléctrica para 3 años de viaje.
- Sistemas de manejo y recirculación de agua y aire sin reabastecimientos intermedios
- Sistemas de producción, mantención y recirculación alimentaria.
- Cápsulas de traslado en desarrollo y ya probadas.

## 2 Gravedad artificial

Permanecer durante mucho tiempo en espacios con microgravedad, como en la EEI, o ingravidos, como en los tránsitos interplanetarios produce en el cuerpo humano varios efectos peligrosos de deterioros y deformaciones orgánicas. Los y las astronautas que han retornado de la EEI luego de más de 6 meses en carencia de gravedad, a pesar de las intensas rutinas de ejercicios obligatorias, presentan un notable pérdida de masa muscular que incluye al corazón y lo que es más grave aun una pérdida de calcio en los huesos tornándolos más quebradizos. Estos cambios constatados se revierten en Tierra con las terapias adecuadas. Otros cambios también preocupantes es la pérdida neuronal, el aumento de tamaño, la deformación cardíaca y ocular. La Luna tiene 1/6 de la gravedad terrestre y Marte 1/3. Los efectos sobre la fisiología humana de un viaje de más de un año en baja o nula gravedad pueden generar trastornos de salud importantes durante el viaje y dificultar el retorno a gravedad terrestre: Figs. 2,3,4

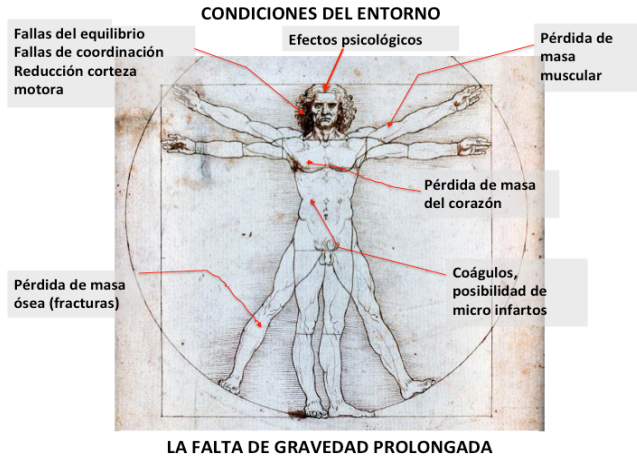


Fig.2 Los problemas de la falta gravitacional



Fig.3 Astronauta de regreso 6 meses (ESA)

Por lo anterior se calcularon sistemas de gravedad artificial con la única opción que aun maneja la ciencia: el uso de la fuerza centrífuga, donde aparecen dos parámetros a regular: el radio, a modo de distribuir a lo largo los efectos del cambio relativo de gravedad respecto del tamaño de un ser humano y su distancia cabeza-pies, la velocidad de giro a ese radio para lograr una fuerza centrífuga de  $9,8\text{m}/\text{seg}^2$  correspondientes a la gravedad terrestre a nivel del mar. La fuerza centrífuga es una resistencia por inercia no una fuerza activa



fig..4 Astronauta debe volver a caminar y recuperar equilibrio (ESA)

Una masa en movimiento rectilíneo, si somete a una fuerza perpendicular a su trayectoria, esta produce un cambio de dirección con una resistencia por inercia(masa) al cambio eso se conoce como fuerza centrífuga y ha sido impuesta por la fuerza centrípeta que ha provocado el cambio Existen varias formas de lograr el efecto centrífugo en una nave espacial, haciendo girar dos masas a los extremos de un cable o usando una rueda que en los cálculos para diseño se ajustaron a un toroide que gira en una estructura solidaria a un eje

$$\text{Fuerza Relativa Centrífuga FRC [g]} = 1,118 \cdot 10^{-5} \times \text{radio del rotor} \times \text{rpm}^2$$

Iterando radios con velocidades de giro distintas se busca la relación posible entre tamaños de la estructura para que sea factible y por otro lado en escala varias veces el tamaño promedio de un ser humano a modo que el diferencial de gravedades pie-cabeza no sea significativo.

Por ejemplo un cálculo acertado da por ejemplo, para un radio de 24 metros y una velocidad de 6 revoluciones cada minuto, 0,6 rad /s, la velocidad tangencial es de 15,1m/s y la aceleración centrífuga sería 9,5 m/s<sup>2</sup>, bastante cercana a los 9,8m/s<sup>2</sup> buscados.

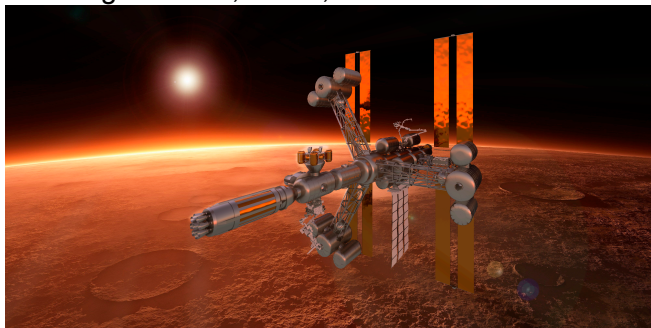


Fig. 5 Imagen Arq -X UTFSM taller avanzado 4 gr. 3,

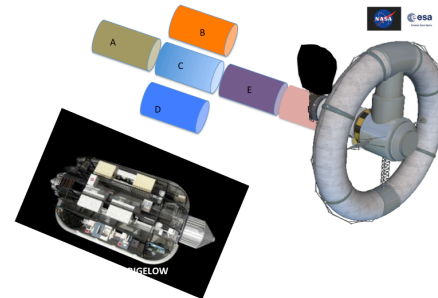


Fig. 6 eje rotatorio. Con módulo inflable

### 3 Cohetes, tamaños de carenados, cargas posibles.

Son varios los países que están en la carrera espacial y cinco de ellos han colocado satélites y algunos, rovers de Marte, lo que indica que tienen capacidad de llevar carga a órbitas altas y hacia otros cuerpos del sistema solar, vale decir, cohetes los suficientemente poderosos para llevar cargas pesadas fuera del planeta, los tienen al 2021 NASA, ESA, ROKOSMOS, INDIA, EMIRATOS, CHINA. Por ello investigar los tamaños y cargas de los carenados que cubren la etapa de carga de los cohetes.

Esa información entrega a los diseñadores los tamaños límite de las piezas a transportar tanto en dimensiones como en peso. Esta es una restricción fundamental de diseño, es la que permite modular la construcción y ensamble del navío espacial a partir de piezas, módulos y equipo que deben ser fabricados en Tierra para su transporte a órbita Lunar.

Son esas dimensiones y capacidades de carga las que permitieron ensamblar la Estación Espacial Internacional. En este caso en órbita baja, Se utilizaron 37 viajes del transbordador espacial y 75 de naves Progress, Proton y Soyuz de Rusia, un vehículo de transferencia japonés H-11. De esta larga historia de misiones se deduce que el montaje de una nave espacial en órbita lunar requerirá de múltiples lanzamientos de lanzaderas de carga. La especulación básica de esta investigación es que esto será una tarea multinacional, que además incluirá envíos de naves privadas como las de Space-X. Actualmente con contrato NASA para estación Gateway en la Luna.

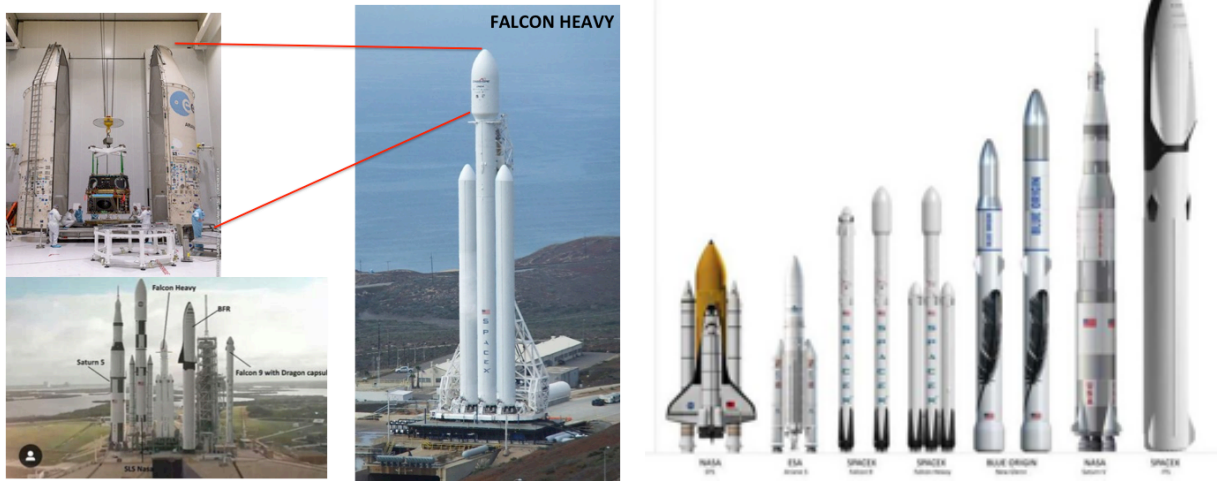


Fig.7 Carenados de algunos cohetes vigentes al 2021

#### 4 Uso de espacios ingravidos

La carencia de gravedad confiere a los espacios condiciones únicas que son a su vez restricciones importantes del diseño de arquitectura.

El sentido de las direcciones y orientación en estas condiciones es confuso para un ser humano normal, al no existir ni el arriba ni el abajo. Las experiencias de 3 décadas en la EEII y una década en la MIR, admiten que las 6 paredes de un recinto pueden ser usadas como planos horizontales para los efectos de colocar equipos y definir laboratorios, Rusia consideró importante usar colores para definir cielos y suelos con el fin de orientar psicológicamente a sus tripulaciones. En los módulos de la Estación Espacial Internacional se optó por colocar las pantallas y teclados de los computadores en una sola posición. Sin embargo, el uso de todas las superficies como horizontales permite un mejor aprovechamiento de la disposición de laboratorios.

Finalmente quedó claro que los equipos de astronautas se adaptan con facilidad a la situación ingravida generando un aprovechamiento distinto y más denso de los espacios internos. Evidentemente se constatan desorientaciones iniciales al igual que al retorno.

Este dato de uso de los volúmenes altera completamente lo que es usual en la arquitectura terrestre y ha sido considerados en las propuestas de diseño del presente proceso.



Fig.8, Uso de los espacios ingrávidos EEI



fig.9 Dormitorios en la EEI NASA 2008

### 5 Proceso de diseño:

Para cada navío diseñado, en equipos de 4 personas, se debió considerar las restricciones mencionadas en 2 y encontrar como se han resuelto tecnológicamente cada una, tanto en los vuelos espaciales como en el ensamble y uso de la estación espacial. Cada equipo debió proponer un programa a ser ubicado en los módulos diseñados de acuerdo a la tecnología de los módulos existentes en la EEI, basados en la materialidad y tamaños de los ya utilizados, más algunas innovaciones posibles tanto en el transporte, despliegue como por ejemplo, en el uso de módulos inflables como el sistema Bigelow. ([bigelow-aerospace.com](http://bigelow-aerospace.com))

La parte inicial fue la determinación programática de cada nave, Fig10, vale decir: que necesidades a distribuir, en que espacios, que tamaños, cuales en situación ingravida y cuales en gravedad artificial rotatoria. Esta última básicamente calculada como un toroide de revolución.

De este modo se calculan cuantos módulos y de que tamaño requiere cada nave espacial. Cada grupo calcula su toroide y define la disposición en la estructura diseñada. Por lo general almacenamientos, combustibles y equipos mayores se ubican en el sector ingravido del eje del navío y se diseñan los módulos gravitacionales a modo de facilitar una vida cómoda, segura y saludable de la tripulación.

Cada equipo debió calcular los tamaños reales, pesos y cantidad de viajes en la última generación de lanzaderas, debieron diseñar y modelar completamente los interiores de todas las secciones de la nave considerando las compuertas de acceso estándar, los vehículos de acceso y descenso ya en uso

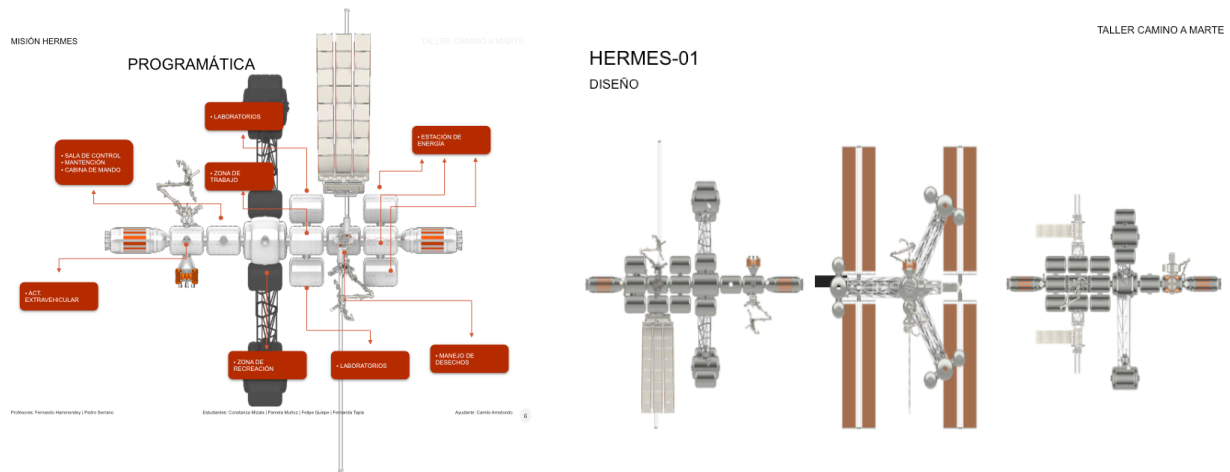
Se realizó una investigación competitiva sobre los sistemas de propulsión actualmente usados, desde los combustibles sólidos que usa la ESA, los combustibles líquidos que usa NASA Y ROKOSMOS, además de las últimas investigaciones en la propulsión de iones. Se espera que para el tiempo del viaje programado sea posible acortar el período de viaje, dado que no existen

soluciones para detener la radiación cósmica en el espacio, (núcleos de átomos pesados a velocidades lumínicas).

Fig. 11 Programa tipo de propuesta Hermes, grupo 3



Fig. 12 Ejemplo de distribución programática ( grupo 3)



### Conclusiones

Luego de un curso de investigación en Arquitectura Extrema, con énfasis en lo espacial, el desafío de un taller avanzado final de diseño, basado en ingeniería ciencia y tecnología, dio buenos resultados, según los profesionales invitados, un astrofísico de la NASA, un Ingeniero



aeronáutico de la ACA, una física de la UTFSM, un biólogo experto en cultivo de microalgas que dieron sus conferencias y apoyaron el trabajo de diseño tanto del exterior estructural de cada navío, como del interior habitable, incluyendo los más avanzados sistemas de recuperación de agua, recirculación de aire, recuperación de oxígeno, cultivos alimentarios eficientes, sistemas sanitarios para uso ingravido, motores cohete y de iones, paneles solares, incluso un micro reactor de fusión en prueba, cápsulas tripuladas probadas por NASA, ESA y Rocosmos, mas el uso de todos los sistemas estandarizados de acople, se logró el diseño final de tres navíos espaciales que pueden hacer rutas entre planetas si tener que ingresar a los suelos respectivos.

Tal vez lo más interesante fue que, tanto el curso de un semestre y el taller de otro semestre se hicieron de modo virtual bajo las restricciones de la pandemia de COVID19. De algún modo esto facilitó el intenso uso de internet y la posibilidad de conferencias internacionales accedidas de modo gratuito.

Los equipos de trabajo dibujaron, modelaron y conversaron entre si usando software de ultima generación, redes sociales, programas en la nube y finalmente entregaron sus trabajos por modelación y animación computadorizada. Configurándose un canal de YouTube donde es posible ver los resultados:

[https://www.youtube.com/channel/UCqDnQ\\_xiyy6gEquD-jgWVrA](https://www.youtube.com/channel/UCqDnQ_xiyy6gEquD-jgWVrA)

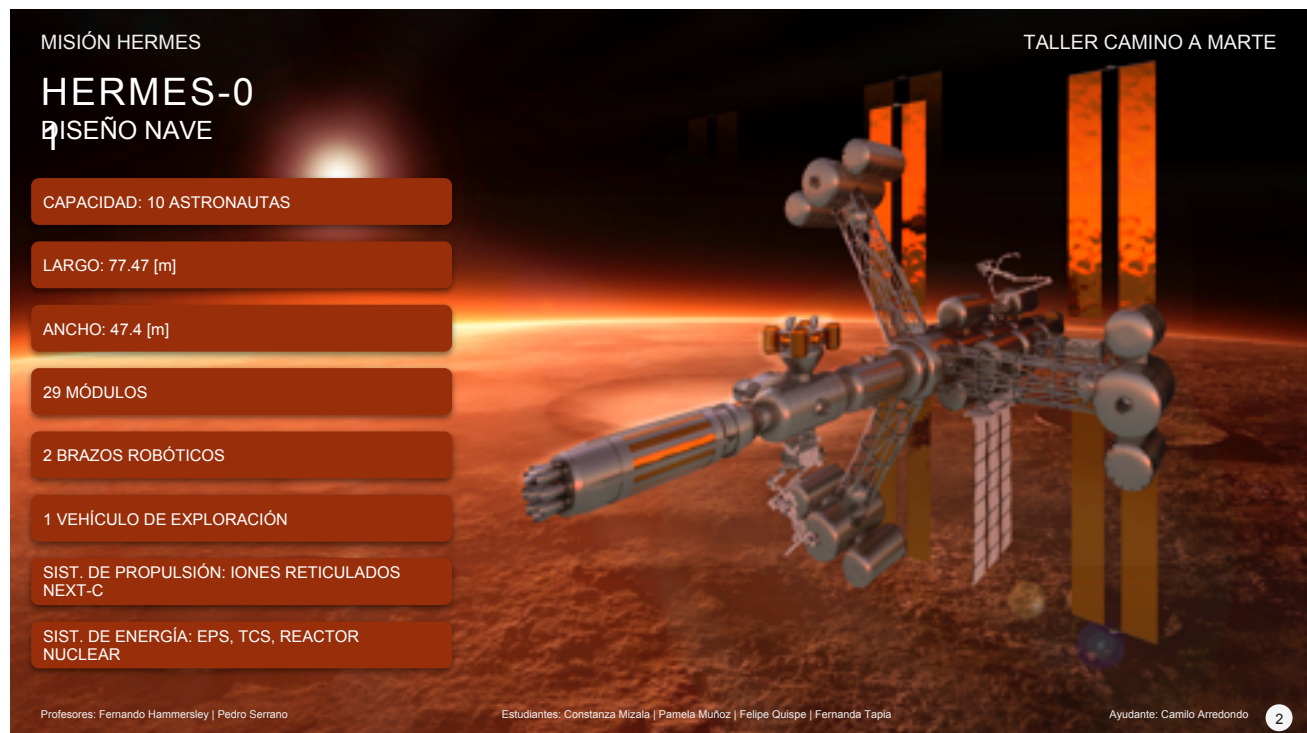


Fig. 13 , render de una de las tres presentaciones finales



## Referencias

Los artículos textos, informes, fotografías que fueron consultados durante esta investigación Taller provienen en su totalidad de la información abierta en internet de 4 agencias espaciales:

NASA, Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio: <https://www.nasa.gov>

ESA: European Space Agency: <https://www.esa.int>

ROCOSMOS: Agencia espacial Rusa: <http://en.rocosmos.ru>

CNSA: Administración Espacial China: <http://www.cnsa.gov.cn>

J. GOMEZ SANCHEZ J, Arquitectura espacial y diseño de los hábitats en el espacio exterior, ETSAM 2019, España

El autor es Director de la Unidad de Arquitectura Extrema UTFSM, Miembro de ACHIDE, Asociación Chilena del Espacio.

## Asesores y conferencias:

.-Ing. Rodrigo Suarez Villarroel, Investigación y Desarrollo Aeroespacial, Centro De Aplicaciones Aeroespaciales, Academia de Ciencias Aeronáuticas, ACA UTFSM

.-Dr. Mario R. Perez, Program Scientist, Astrophysics Division - Science Mission Directorate, Mary W. Jackson, NASA Headquarters Building

.-Profesora Yulia Poliakova, Departamento de Física UTFSM

.-Profesor Francisco Ayala, Microalgal Biotechnology Project Marine Culture Research Center, CICUM-Antofagasta, Casilla 1350, Antofagasta, 2nd Region, Chile



a) Revistas Científicas  
\_Uno o dos autores

Apellido Autor1, Inicial Nombre Autor 1., y (& en inglés) Apellido Autor2, Inicial Nombre Autor 2. (Año). Título del documento de referencia. *Revista donde fue publicado*, Volumen (Número), Página Inicial – Página Final.

Ejemplos:

Guerra, A. (2017). Integration of sustainability in engineering education: Why is PBL an answer?. *International Journal of Sustainability in Higher Education*, 18(3), 436-454.

Christie, M., & de Graaff, E. (2017). The philosophical and pedagogical underpinnings of Active Learning in Engineering Education. *European Journal of Engineering Education*, 42(1), 5-16.

\_Más de dos autores

Apellido Autor1, Inicial Nombre Autor 1., et al. (Año). Título del documento de referencia. *Revista donde fue publicado*, Volumen (Número), Página Inicial – Página Final.

Ejemplo:

Lucke, T., et al. (2017). Activating learning in engineering education using ICT and the concept of 'Flipping the classroom'. *European Journal of Engineering Education*, 42(1), 45-57.

b) Libros  
\_Uno o dos autores

Apellido Autor1, Inicial Nombre Autor 1., y (& en inglés) Apellido Autor2, Inicial Nombre Autor 2. (Año). *Título del Libro* (Edición). Lugar de publicación: Editorial.

Ejemplos:

Heywood, J. (2005). *Engineering education: Research and development in curriculum and instruction*. New Jersey: John Wiley & Sons.

Rahman, A., & Ilic, V. (2018). *Blended Learning in Engineering Education: Recent Developments in Curriculum, Assessment and Practice*. London: CRC Press.

\_ Más de dos autores

Apellido Autor1, Inicial Nombre Autor 1., et al. (Año). *Título del Libro* (Edición). Lugar de publicación: Editorial.

Ejemplo:

Edward, C., et al. (2014). *Rethinking Engineering Education: The CDIO Approach* (2nd ed.). New York: Springer.



**XXXIII CONGRESO**  
CHILENO DE EDUCACIÓN EN INGENIERÍA  
VALDIVIA 2021

La formación en ingeniería en ambientes tecnológicos:

La urgencia que imponen escenarios  
cambiantes y vulnerables