

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ  
FACULTAD DE ARQUITECTURA Y URBANISMO



**Arquitectura Espacial:  
Respuestas arquitectónicas a la condición de  
ingravidez**

**TRABAJO DE INVESTIGACIÓN PARA OBTENER EL  
GRADO DE BACHILLER EN ARQUITECTURA**

**AUTOR**

Cesar Antonio Requejo Peña

**CÓDIGO**

20161319

**ASESOR:**

Wiley Hermilio Ludeña Urquiza  
Milton Renan Marcelo Puente

Lima, Diciembre, 2020

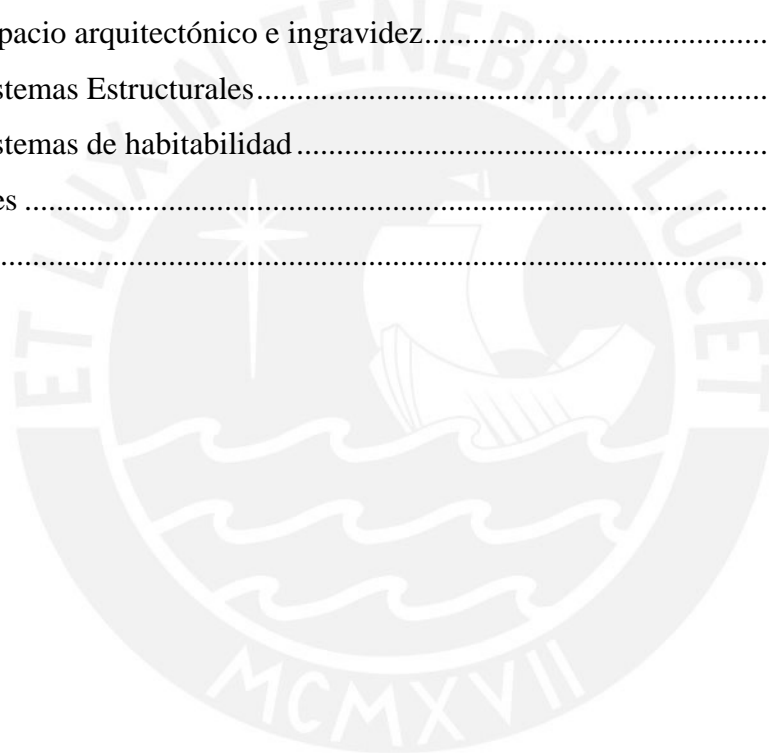
## RESUMEN

La gravedad se ha presentado como la única constante ineludible en el diseño arquitectónico. En la Tierra, históricamente las respuestas desde la arquitectura se han limitado a la evolución del entendimiento de esta. El espacio arquitectónico se reinterpretaba en base a los nuevos conocimientos científicos de este fenómeno. La historia de la relación entre la gravedad y la arquitectura empieza a cambiar desde que el ser humano decide cruzar la línea de Kármán y embarcarse en exploración espacial. En búsqueda no solamente de conocimiento, sino también de recursos para la supervivencia del hombre contemporáneo, distintos hábitats espaciales han sido construidos. La arquitectura en el espacio sideral dispone a los diseñadores nuevos campos de investigación y la ingravidez es una variable fundamental en estos. Después de la reconocida Estación Espacial Internacional, una gran cantidad de proyectos se ha diseñado en base a los aprendizajes de este hábitat. El interés de este trabajo es conocer cómo la variable de la ingravidez ha influido en tomas de decisiones arquitectónicas en hábitats diseñados posteriormente a esta estación espacial. El análisis de dos pares de proyectos de distintas dimensiones devela la influencia de esta condición en variables de diseño de hábitats en el espacio sideral. Para este objetivo, se encuentran relaciones entre las distintas gravedades y tomas de decisiones arquitectónicas, y también se determinan variables relacionadas a la ingravidez en proyectos de arquitectura espacial. Además, se crea un criterio de selección de proyectos que demuestre la influencia de la ingravidez en tomas de decisiones arquitectónicas y posteriormente clasificarlos en base a los criterios. Con ello, se demuestra que la ingravidez es una variable que determina en gran medida distintas tomas de decisiones en proyectos de arquitectura en el espacio sideral y potencia las capacidades de su diseño.

## Índice

1. Presentación y Antecedentes del Problema.....	pg. 5
2. Estado de la Cuestión .....	pg. 8
3. Marco Teórico .....	pg. 12
3.1. Gravedades y arquitectura .....	pg. 12
3.1.1. Gravedad .....	pg. 12
3.1.2. Microgravedad e ingravidez.....	pg. 13
3.1.3. Gravedad gradiente .....	pg. 14
3.1.4. Gravedad artificial.....	pg. 15
3.2. Arquitectura espacial .....	pg. 16
3.2.1. Hábitat y Sistemas de Habitabilidad .....	pg. 17
3.2.2. Interacción humano-espacio.....	pg. 18
3.2.3. Motricidad humana en ingravidez.....	pg. 19
3.2.4. Sistemas estructurales espaciales .....	pg. 22
3.2.5. Objetivos y alcances tecnológicos.....	pg. 23
4. Marco Histórico.....	pg. 23
4.1. Espacio arquitectónico y gravedad.....	pg. 24
4.1.1. Aristóteles, el peso y la caída .....	pg. 24
4.1.2. Gravititas y pondus romano.....	pg. 24
4.1.3. Revolución tecnológica e industrial .....	pg. 25
4.1.4. Nuevas espacialidades.....	pg. 26
4.2. Espacio Sideral y Arquitectura .....	pg. 26
4.2.1. Apollo.....	pg. 27
4.2.2. Skylab.....	pg. 29
4.2.3. MIR .....	pg. 33
4.2.4. Estación espacial internacional (ISS).....	pg. 35
5. Metodología y Criterios .....	pg. 38
5.1. Casos de estudio .....	pg. 38
5.1.1. Omicron – Phari Base .....	pg. 38
5.1.2. Kalpana One – Colonized Interstellar Vessel.....	pg. 42
5.2. Variables de estudio de las respuestas arquitectónicas en condiciones de ingravidez .....	pg. 46
5.2.1. Orientación, movimiento y recorrido .....	pg. 46
5.2.2. Espacio arquitectónico e ingravidez.....	pg. 47

5.2.3.	Sistemas estructurales .....	pg. 47
5.2.4.	Sistemas de habitabilidad .....	pg. 48
6.	Análisis de las Respuestas Arquitectónicas en Condiciones de Ingravidez.....	pg. 48
6.1.	Omicron – Phari Base.....	pg. 48
6.1.1.	Orientación, movimiento y recorrido .....	pg. 48
6.1.2.	Espacio arquitectónico e ingravidez.....	pg. 55
6.1.3.	Sistemas Estructurales.....	pg. 63
6.1.4.	Sistemas de habitabilidad .....	pg. 68
6.2.	Kalpana One – Colonized Interestellar Vessel.....	pg. 73
6.2.1.	Orientación, movimiento y recorrido .....	pg. 74
6.2.2.	Espacio arquitectónico e ingravidez.....	pg. 79
6.2.3.	Sistemas Estructurales.....	pg. 86
6.2.4.	Sistemas de habitabilidad .....	pg. 90
7.	Conclusiones .....	pg. 98
8.	Referencias .....	pg. 102



## **1. Presentación y Antecedentes del Problema**

En sus inicios, la arquitectura se desarrolla desde la pura intuición, pues la física como forma objetiva del conocimiento humano no aparece prácticamente hasta la antigüedad clásica. Son los filósofos griegos quienes conceptualizan esas intuiciones sobre la realidad física del mundo. (O. Linares de la Torre, 2015, p. 53)

Óscar Linares de la Torre afirma que el conocimiento científico que posee cierta civilización es capaz de repercutir en su proyectar arquitectónico, pues es recién cuando los filósofos griegos interpretan la realidad es que su arquitectura deja de ser un acto de mera intuición y se consolida como una conjunción de decisiones de interpretación de la realidad basadas en parámetros objetivos. La gravedad no solamente ha presentado una influencia en la construcción de los proyectos arquitectónicos, sino también la propia concepción de esta ha sido capaz de determinar el imaginario arquitectónico del proyectista. Esto se debe a que toda materialización de ideas se ve fuertemente influenciada por la conceptualización de la observación de algún fenómeno concreto de la realidad. Así, cada cultura iba forjando su propia interpretación de la realidad y, a la vez, construyendo proyectos e ideas en forma de reacción frente a esta. Es por ello que es posible relacionar la concepción de la idea de la gravedad, además de como un fenómeno físico, con diversas conceptualizaciones de variables arquitectónicas.

A través del tiempo, la arquitectura ha ido evolucionando paralelamente a la evolución de la concepción de la gravedad. Actualmente, el concepto de gravedad es sumamente complejo gracias al enorme trabajo de los científicos, entre los cuales resalta Albert Einstein. La teoría de la relatividad general no resultó en exponer una nueva fuerza, sino en una revolución conceptual más profunda del entendimiento del nuevo constructo de espacio-tiempo. Este descubrimiento científico, gracias a corrientes artísticas de vanguardia europeas, tiene una repercusión en la arquitectura de una manera consciente y coincidente con el tiempo (O. Linares de la Torre, 2015).

Sin embargo, después de ello, aún se han presentado cambios en la relación gravedad y el diseño arquitectónico. Uno de los más resaltantes es la introducción del fenómeno de la ingravidez, el estado en el que se anulan los efectos de la gravedad. La introducción de este concepto para la disciplina arquitectónica se debe principalmente al desarrollo científico que ha sido capaz de permitir a los diseñadores explorar de mejor manera formas de proyectar

en el espacio sideral, fuera de cualquier cuerpo celeste. En este contexto, la arquitectura ha encontrado un campo de exploración y es innegable que la ingravidez es parte de este.

En ese sentido, es importante remarcar la labor de la disciplina arquitectónica en el diseño de hábitats espaciales. “Engineers think architects make things prettier, difficult to build, and more expensive. Some can, but space architects are different. They analyze like an engineer and synthesize like an architect.” [Los ingenieros piensan que los arquitectos hacen las cosas más bellas, difíciles de construir y más caras. Algunos pueden, pero los arquitectos espaciales son diferentes. Ellos analizan como un ingeniero y sintetizan como un arquitecto] (Griffin, 2014, p. 2). Además, según Sandra Häuplik-Meusburger y Olga Bannova (2016), la arquitectura es el principal eje que posibilita la vida humana en el Espacio y está necesariamente presente en casi todas las etapas de diseño del proyecto. Esto se debe a que se reconoce la labor del arquitecto en la optimización de sistemas que posibiliten el habitar humano. De esta manera, ha sido posible el diseño y construcción de la Estación Espacial Internacional (ISS por sus siglas en inglés), la cual ya lleva alrededor de 20 años viajando 15 veces al día alrededor de la órbita baja terrestre, en condiciones de ingravidez y manteniendo humanos en su interior. El trabajo de esta estación es de gran ayuda para toda clase de investigaciones de cualquier disciplina que quiera involucrarse en labores fuera del planeta. Como menciona Neil Leach (2014), el aprendizaje a partir de esta estación espacial abre una nueva era para la disciplina de la arquitectura espacial.

Varios motivos que impulsan estas búsquedas, pero uno de los principales motores es la supervivencia de la raza humana que se ve limitada por el problema de obtención de recursos para la persona promedio de un mundo desarrollado. Fuera de la Tierra, los recursos disponibles crecen a gran escala. No es necesario pensar en otros planetas ni en grandes distancias para ser capaces de obtener en estos recursos. De hecho, en la década de los 70, Estados Unidos, mediante la NASA, empezó con la evaluación de programas espaciales que cuenten con la posibilidad de obtener energía solar desde el espacio. Este estaría ubicado en la órbita geoestacionaria, a 35 786 Km de la superficie terrestre (Lyndon B. Johnson Space Center, 1997).

Estos proyectos se ven potenciados actualmente por los mayores conocimientos y capacidades que se ha obtenido en los últimos años acerca del espacio exterior. También influyen los grandes avances tecnológicos que se han desarrollado en el ámbito de la obtención de energía solar espacial, los cuales incluyen el mejoramiento de la eficiencia y

eficacia de captación de energía de los paneles solares. Sin embargo, aún sigue siendo enorme el costo y esfuerzo de construcción de estos proyectos desde la Tierra y aún mayor es la dificultad para lograr que estos proyectos lleguen al espacio. Nuevas soluciones se tienen que idear. Una de ellas, mencionada por el reconocido físico experto en exploración espacial, Gerard O'Neill (1975), es colonizar el espacio. Teniendo en cuenta que la gravedad es prácticamente nula ahí, la energía requerida para realizar construcciones se reduce enormemente.

Por otro lado, los recursos que se necesitan para estas operaciones tampoco tienen que provenir de la Tierra. Isaac Asimov plantea la idea de extraer minerales de cuerpos espaciales, tales como los asteroides o la propia Luna (Hayes et al., 1975). Esto no dista de la realidad. En el campo de la minería espacial, se han logrado grandes avances tecnológicos gracias a la propia NASA u otros grupos como SpaceX de Elon Musk. En realidad, la minería espacial es más aún necesaria de lo que parece. La industria moderna requiere una gran cantidad de materiales para poder producir cada uno de los aparatos tecnológicos que el ciudadano promedio en un mundo desarrollado cuenta en su vida diaria. Sin embargo, se prevé que en 50 o 60 años se habrán agotado estos recursos en la Tierra (D. Cohen, 2007). Gracias a estudios astronómicos, actualmente se puede conocer que la carencia de estos materiales en la Tierra se puede suplir con minerales que contienen diversos asteroides que rodean la Tierra y otros lugares relativamente cercanos a este planeta.

La colonización del espacio sideral es mucho más que necesaria. Y, como se ha explicado anteriormente, la arquitectura no solo tiene la necesidad, sino el deber de mantenerse al tanto de investigaciones acerca del diseño de hábitats espaciales. Evidentemente, actualmente es imposible imaginar construcciones de gran escala en el espacio, pues la tecnología disponible no lo permite. No obstante, es deber de las actuales generaciones de arquitectos el avanzar progresivamente con el desarrollo de estos proyectos para facilitar respuestas a las generaciones futuras.

La gravedad ha influido de sobremanera en el ámbito del diseño arquitectónico y en el espacio la ingravidez es una variable ineludible. Por ello, en la presente investigación, se encuentra relevante estudiar de qué maneras y con qué criterios ha influido la ingravidez en la toma de decisiones en proyectos de arquitectura espacial diseñados posteriormente a la ISS. Al contrario de en la Tierra, en el espacio sideral la ingravidez es la constante ineludible y esta investigación revelará estrategias de respuesta a esta variable. Este análisis se

desarrollará mediante el estudio de variables arquitectónicas en proyectos diseñados en condiciones de ingravidez en el espacio sideral, fuera de la Tierra. También es de interés el conocimiento de los aprendizajes adquiridos a partir de la ISS con el fin de entender el desarrollo contemporáneo de esta disciplina. Se pretende contribuir a la disciplina mejorando el entendimiento de la adaptación de distintas variables arquitectónicas a un entorno ingravido para, en el futuro, contar con la posibilidad de dominarlas de mejor manera. Además, se develará el nivel de involucramiento de la disciplina arquitectónica en el diseño de hábitats espaciales con el fin de informar al lector que, para esta labor, el pensamiento arquitectónico será crucial en todo momento.

## **2. Estado de la Cuestión**

Como se ha mencionado en los antecedentes del problema, la arquitectura en el espacio sideral es un tema que tiene larga trayectoria de análisis desde el siglo XX. Evidentemente, para lograr proyectar adecuadamente, la ingravidez ha sido una variable presente y necesaria en cada uno de los diseños. Al ser el opuesto directo a la variable permanente de gravedad en la arquitectura terrestre, la gravedad y la influencia de esta en la arquitectura también deben ser analizadas. Ello mejorará el entendimiento de la influencia de la ingravidez en el proyectar de la arquitectura en el espacio sideral.

Para la investigación acerca de la influencia de la ingravidez en la proyección arquitectónica, se ha considerado adecuado el uso de diversos recursos bibliográficos que ayuden a abordar el tema de una manera más acertada. Asimismo, se debe mencionar que no existe bibliografía que haya abordado el tema de la misma manera que lo hará esta investigación. Sin embargo, sí existen abordajes de distintos problemas relacionados tanto directa como indirectamente a la problemática de la tesis y enriquecerán de gran manera las conclusiones alcanzadas.

Entre los textos más valiosos para esta investigación está la tesis doctoral que Óscar Linares de la Torre publicó en 2014: *La estructuración del espacio arquitectónico por la gravedad y la luz*, y un artículo que escribió para la revista *Arquitectura, Urbanismo y Sostenibilidad* en el año 2015: *La influencia de la comprensión de la gravedad como hecho físico en la configuración del espacio arquitectónico*. Ambos textos reflejan un análisis notablemente profundo acerca de cómo la arquitectura ha respondido al fenómeno de la gravedad a través del tiempo y también cómo diversos arquitectos también expresan ideas respecto a este entendimiento. Igualmente, Ondřej Doule en su texto *Ground Control Space Architecture as*

*Defined by Variable Gravity* del año 2014 explica las relaciones y respuestas entre los distintos niveles de gravedad y la arquitectura en distintos momentos en el tiempo. La arquitectura es capaz de presentar una postura frente a estos distintos niveles gracias a la llegada del ser humano al espacio sideral.

Adicionalmente, existe una gran cantidad de textos que abarcan el tema de la arquitectura en el espacio tanto como los que evalúan cómo el ser humano ha respondido a condiciones de ingravidez. Entre las investigaciones que indagan sobre la arquitectura espacial existe la que Sandra Häuplik-Meusburger redactó en 2011: *Architecture for astronauts, an activity-based approach*. En esta describe el resultado de investigaciones acerca de las relaciones entre las personas, los espacios arquitectónicos y sus objetos en el contexto del espacio sideral. Además, explica las actividades diarias de los astronautas en las estaciones espaciales y cómo afrontarlas arquitectónicamente. Tiempo después, la misma autora junto a Olga Bannova escribió otro libro que aborda el mismo tema. El libro explica detalladamente las preocupaciones de la disciplina de la arquitectura en el espacio sideral, además de su involucramiento en los procesos de diseño y construcción junto con otras disciplinas. El título de este texto es *Space Architecture education for engineers and architects designing and planning beyond Earth* y se publicó en el año 2016. En este existe un capítulo en el libro que trata acerca de la adaptación del cuerpo humano al entorno ingravido y cómo se puede afrontar este tema para facilitar el trabajo de los astronautas en esas condiciones. Sin embargo, se llega a una mayor profundidad de investigación de la relación del humano y la ingravidez en el texto de Regis Faquit y Jun Okushi: *Architectural studies relating to the nature of human body motion in microgravity* del año 1995. Los dos investigadores lograron consolidar diversas conclusiones de las maneras en las que el ser humano reacciona a lo que es permanente en la Tierra: la gravedad. Estas conclusiones son ligadas arquitectónicamente a los cambios posturales, perceptuales y al movimiento.

Al mismo tiempo, se utilizarán algunos textos de Theodore Hall para entender de mejor manera la relación del ser humano con un entorno en el cual se genera gravedad artificial. Específicamente, son los siguientes *Artificial Gravity Visualization, Empathy and Design* y *The architecture of artificial gravity, Theory, Form, and Function in the High Frontier*. Ello ayudará a entender la manera en la que diversas estrategias de generación de gravedad artificial pueden estar acorde con parámetros relacionados a la habitabilidad humana.

Una tesis magistral también será muy valiosa para aclarar las preocupaciones de la arquitectura en el diseño de hábitats espaciales: *An inquiry of space architecture, design considerations and design process*. En esta tesis, Ece Yegen responde a la pregunta de ¿cuáles son las aproximaciones de diseño que pueden responder al complejo problema de diseño de la habitación espacial? Mediante esa pregunta, indaga acerca de las múltiples variables necesarias a tomar en cuenta para que sea posible diseñar un hábitat en el espacio que permita adecuadamente la existencia humana adecuadamente. Asimismo, *Human Migration to Space Alternative Technological Approaches for Long-Term Adaptation to Extraterrestrial Environments* de Elizabeth Lockard en 2014 analiza las capacidades que la tecnología es capaz de brindar a la arquitectura espacial para alcanzar ciertos objetivos. Estos se basan en la capacidad de afrontar mediante la tecnología las condiciones extremas del espacio. Cabe mencionar que Anthony Handford estudia los sistemas que han posibilitado la habitabilidad en la ISS en el texto *Advanced Life Support Research and Technology Development Metric*, el cual será útil para determinar variables que ayuden a estudiar la habitabilidad en hábitats espaciales.

Debido a que la evaluación de proyectos espaciales de menor escala y, por ende, más cercanos a nuestro tiempo y tecnología será un propósito para la investigación. Se explorará, en primer lugar, el texto *Human Spaceflight: Phobos Base* del año 2017. Al describir el proceso de diseño de la base Phari, en el satélite marciano Phobos, este proyecto ganador de un concurso realizado por The American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) resuelve las dificultades que se presentan al proponerse construir un hábitat en este satélite, el cual presenta condiciones de ingravidez. El proyecto también analiza el problema que esta variable es capaz de presentar para los astronautas que pasarán varios meses habitándolo. En segundo lugar, se estudiará el proyecto Omicron, de Ondrej Doule. Sus detalles están resueltos en el texto *Omicron Space Habitat – research stage II*, escrito en el 2011. En este, tomando de referencias a estaciones espaciales diseñadas anteriormente, Doule desarrolla este proyecto pensando en un hábitat enfocado en la exploración de un diseño interior resuelto para la antropometría humana en un entorno ingravido, además del uso de innovadores sistemas estructurales (Doule et al., 2011).

De la misma forma, Al Globus, Nitin Arora, Ankur Bajoria y Joe Straut son autores de uno de los proyectos que serán tomados como casos de estudio para esta investigación: *Kalpana One*. En sus 3 artículos, *Kalpana One: A New Orbital Space Colony Design*, *The Kalpana One: Orbital Space Settlement Revised* y *Kalpana One: Analysis and design of space colony*,

se describe detalladamente las consideraciones a tomar en cuenta para hacer posible la construcción de un hábitat espacial de escala suficiente como para que más de 3000 personas lo habiten sosteniblemente por un largo periodo. También desarrollan las bases de diseño utilizadas para realizar el proyecto, evidentemente, sustentadas mediante datos científicos y a la vez comparadas con postulados de proyectos predecesores similares. Asimismo, las imágenes creadas por Bryan Versteeg en su página web *spacehabs.com* serán de mucha utilidad para visualizar este proyecto. Steve Summerford, por otro lado, posee la autoría del otro proyecto que será analizado paralelamente a Kalpana One, el hábitat *Colonized Interstellar Vessel*, el cual tiene como fin albergar a más de 10 000 habitantes. Como parte del Project Hyperion Study Group, este se propone consolidar respuestas a cuáles son los componentes necesarios y las consideraciones inherentes para el potencial desarrollo de comunidades autosuficientes que sean capaces de realizar viajes interestelares (Summerford, 2012).

Como se puede notar, las fuentes anteriormente mencionadas abarcan en gran medida cuestionamientos relacionados al tema de la arquitectura en el espacio sideral. Sin embargo, no se ignora la necesidad de recurrir a fuentes que trabajen el tema de la influencia de la gravedad en la proyección arquitectónica terrestre. Ello será de utilidad para acentuar las bases para las futuras conclusiones. Además, se ha optado por una selección de textos que sean capaces de explicar de manera clara las preocupaciones de la disciplina arquitectónica en el diseño de hábitats espaciales. Con ello, se hará posible determinar las variables a tomar en cuenta al cambiar de un entorno con gravedad a uno ingrávito. Adicionalmente, los textos que refieren a los proyectos tomados como casos de estudio son fundamentales. Esto se debe a que servirán para demostrar explícitamente los recursos arquitectónicos relacionados directamente a la variable de la ingravidez que se utilizan para que sea posible la vida humana en el espacio.

Además, la investigación a realizar se incluye en el grupo de los de análisis de arquitectura espacial. De igual manera, contribuirá a establecer un precedente de entendimiento de la manera en que la ingravidez ha determinado distintos planteamientos arquitectónicos mediante el estudio de cuatro proyectos rigurosamente diseñados bajo esta variable. Ello es importante para la disciplina, pues es necesario el interés de esta por el conocimiento de cómo la ingravidez influye en la toma de decisiones arquitectónicas. Finalmente, será útil también para informar acerca de distintas estrategias ideadas por diferentes arquitectos,

ingenieros, entre otros profesionales, frente a la ingravidez a todos aquellos que en un futuro se encuentren interesados en diseñar un hábitat espacial.

### **3. Marco Teórico**

El siglo XXI ha sido enriquecido por grandes avances en todas las disciplinas, los cuales han sido posibles gracias a los pilares de conocimiento que han construido investigadores en décadas y siglos pasados. Al ser el tema de investigación un poco lejano para las enseñanzas arquitectónicas tradicionales, se ha optado por develar la manera en la que estos investigadores han erigido los pilares que hacen posible el tema que se indagará en las siguientes páginas. Así, se pretenderá definir de una manera clara y concisa los términos necesarios para que la lectura de este texto sea lo más fluida posible.

#### **3.1. Gravedades y arquitectura**

Se ha considerado de importancia establecer algunas relaciones de distintos conceptos entre la gravedad y sus implicaciones en la arquitectura, puesto que, fuera de la Tierra, la gravedad no es una constante. Por ello, se trabajará en base al texto de Doule (2014a) para la selección de lo que se conoce acerca de las relaciones entre distintos conceptos relacionados con la gravedad y lo que actualmente abarca la disciplina arquitectónica.

##### **3.1.1. Gravedad**

Einstein publicó la teoría de la relatividad general en 1915, la cual significó un gran giro para el mundo de la física y, por ende, al entendimiento del universo. Esta teoría se plantea y logra resolver diversos problemas que no eran compatibles bajo la teoría de gravitación newtoniana. Basándose en el espacio cuatridimensional de Minkowski, Einstein (1999) explica que el universo está compuesto de sucesos individuales que se pueden describir mediante cuatro variables, 3 de posición relativa en el espacio y 1 de tiempo. Asimismo, para el reconocido físico, ver el espacio desde una perspectiva euclidiana es increíblemente limitado, pues pensar en solamente rectas y geometrías planas no describe la realidad. El universo se debe ver curvado: un espacio en donde la distancia más corta entre dos puntos no es una recta, donde las rectas paralelas sí pueden cruzarse y cuyas curvaturas son generadas por la materia y la energía que existen en este.

La teoría de la relatividad general expone que las curvaturas que la materia y energía generan en el espacio-tiempo son también las generadoras de la gravedad. Así, la gravedad deja de

ser una fuerza y pasa a ser un campo de interacción. Por ello, mientras mayor sea la deformación que alguna materia en el universo genere sobre el espacio-tiempo, mayor será el campo gravitatorio. Además, la relatividad general soluciona distintos problemas de la física newtoniana y que serán de gran ayuda para la futura exploración del universo. Por ejemplo, se resuelve el problema de la inexistencia del éter demostrando su innecesidad y se clarifican las dinámicas del comportamiento de la luz en el nuevo conjugado del espacio-tiempo (Rees, 2012).

En un contexto en el que la gravedad es inmutable como en la totalidad de la superficie terrestre, esta teoría desarrollada por Einstein y Minkowski solo repercute en la manera de interpretación del espacio arquitectónico en su época. La nueva interpretación del espacio y la gravedad en el campo de la física gracias a ambos especialistas brindó a los artistas nuevas maneras de expresar lo que se entendía por este. “El espacio se abre al exterior sin perder su carácter interior, combinando la transitividad y la apertura propias del siglo XIX con la dicotomía espacial entre interior y exterior que caracteriza a las etapas anteriores” (O. Linares de la Torre, 2015, p. 56). La arquitectura no era una excepción y, mediante las nuevas tecnologías constructivas, se consolidaba un espacio arquitectónico dicotómico.

### ***3.1.2. Microgravedad e ingravidez***

No existe lugar en el universo que esté fuera de las interacciones gravitatorias. La gravedad es lo que hace posible la existencia de los cuerpos celestes, los sistemas solares, las galaxias, entre muchos otros elementos que se conocen actualmente. Sin embargo, ello no significa que no se pueda contrarrestar el efecto de la gravedad con otras fuerzas y crear un efecto de la liberación de esta. Ello se logra al contrarrestar la interacción gravitatoria con fuerzas inerciales, lo cual se puede lograr en condiciones de caída libre (The Editors of Encyclopaedia Britannica, 2019). Las estaciones espaciales que orbitan la Tierra paralelamente a la superficie se encuentran en estas condiciones y, de esta forma, son capaces de contrarrestar la fuerza de la gravedad (Häuplik-Meusburger, 2011). Cabe mencionar que lo mismo sucede al salir de la Tierra, pues todo objeto en el sistema solar orbita paralelamente alrededor de la superficie del sol.

Por desgracia, no existe manera de simular microgravedad por suficiente tiempo como para replicar operaciones en hábitats en condiciones de ingravidez (Doule, 2014a). La única manera para desarrollar una investigación acerca de los modos de habitar ideales bajo estas

condiciones es *in situ*, es decir, en el espacio sideral. Por esta razón, el análisis de la ingravidez en la arquitectura trae consigo la resolución de sistemas que permitan la subsistencia del ser humano en el espacio, resolviendo el problema de la habitabilidad. El futuro de la exploración espacial – y de la raza humana – se encontrará favorecido por los estudios que se puedan desarrollar actualmente sobre las respuestas de diseño a esta variable en hábitats espaciales, en los que la arquitectura cumple un rol fundamental.

Asimismo, Doule (2014a) menciona que la geometría de la estructura bajo estas condiciones es determinada por la mayor eficiencia interna en base a la presión interna, lo cual resulta en geometrías esféricas, cilíndricas y toroidales. La ingravidez determina tomas de decisiones que influirán la definición de la geometría arquitectónica y estructural en base a parámetros que permitan la habitabilidad en su interior. Por otro lado, Fauquet & Okushi (1991) comentan que el diseño interior del espacio arquitectónico debe responder a los parámetros de orientación y motricidad humana en condiciones de ingravidez. En ese sentido, es posible encontrar respuestas arquitectónicas que soluciones estos parámetros.

### **3.1.3. Gravedad gradiente**

Tanto como para la arquitectura terrestre es clara la variable de la gravedad, para la arquitectura espacial la ingravidez es la que se debe tomar en cuenta. Sin embargo, la situación es distinta cuando se diseña un hábitat capaz de soportar ambientes con gravedad gradiente – la transición entre distintos grados de interacción gravitatoria. Estos eventos son los que usualmente enfrentan las naves espaciales capaces de entrar o salir de atmósferas de distintos cuerpos celestes. En estos proyectos, el diseño arquitectónico, tanto como los de otras disciplinas, debe responder tanto a la ingravidez como a la hipergravedad – valores sobre la gravedad terrestre –, así como la transición entre estos dos extremos (Doule, 2014a). Una de los principales requerimientos frente a estas condiciones es la estabilización de los ambientes. Sebestyen et al. (2018) mencionan que la estabilización de las naves espaciales es alcanzable mediante sistemas pasivos de cargas en los que la longitud de estos transportes es una variable importante, pues se relaciona con el torque y la deflexión. En este contexto, dependerá de la geometría el éxito o el fracaso de las operaciones interplanetarias, además de otros sistemas que permitan soportar la entrada y salida de la atmósfera terrestre.

Las naves espaciales reutilizables, como la Space Shuttle o el Virgin Galactic, son antecedentes de resolución de estas variables. Uno de los principales objetivos del diseño

arquitectónico de su interior fue asegurar el funcionamiento de sistemas que permitan la seguridad de los tripulantes frente al cambio radical de gravedad y también la ingravidez que se experimenta fuera de la Tierra (Doule, 2008). La seguridad en su despegue y frente a los diversos cambios de gravedad para salir de la atmósfera se garantizó gracias al diseño de los asientos. Esto se da gracias a que los astronautas se mantienen en una posición estable y cuentan con todos los instrumentos de emergencia a su disposición en ellos. Al superar esta gravedad gradiente, el diseño del interior de estas naves es capaz de responder a las necesidades humanas en condiciones de ingravidez tanto en dimensiones como en sistemas que permitan una adecuada habitabilidad.

#### **3.1.4. Gravedad artificial**

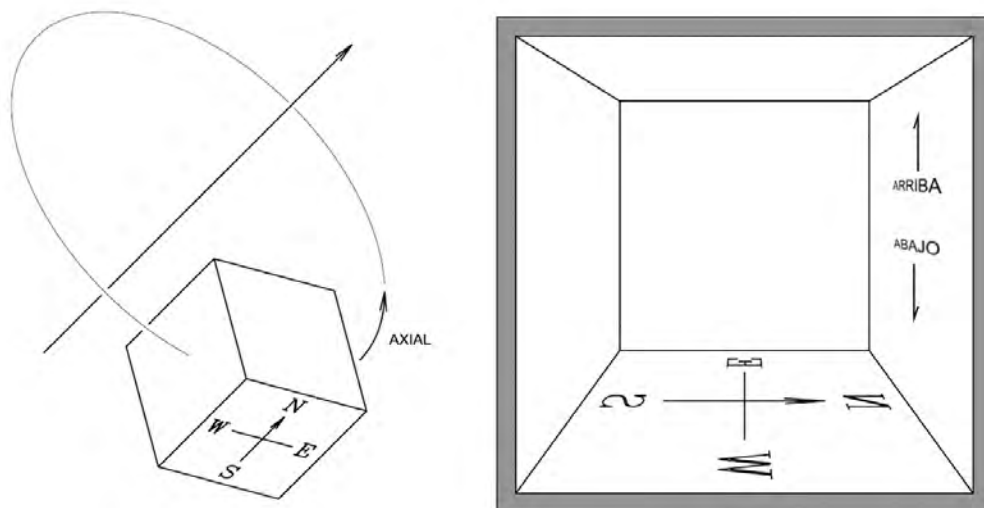
El fenómeno de gravedad artificial ha sido ampliamente estudiado por los especialistas en astronáutica. Esto se debe a que es una condición necesaria para lograr una adecuada habitabilidad en colonias espaciales que mantengan habitantes en su interior por tiempos indefinidos, pues la ingravidez puede presentar efectos adversos en el organismo humano (NASA, 1977). La forma más común y práctica de generarla es mediante la fuerza centrífuga, la cual resulta de la rotación de un cuerpo en base a su propio eje o alguno fuera del mismo. La rotación de una estación espacial dirige cualquier cuerpo dentro de ella hacia la cáscara de esta, lo cual da un efecto de empuje gravitacional hacia el exterior (Seedhouse, 2013). La principal diferencia entre la gravedad y la gravedad artificial se evidencia en que, mientras la gravedad jala todos los cuerpos hacia el centro de un cuerpo, la gravedad artificial los empuja fuera del eje de rotación. La arquitectura que busque generar gravedad artificial siempre considerará como una de las principales variables este eje de rotación. Por ello, la geometría de estos proyectos se encontrará influenciada por las estrategias generadoras de gravedad artificial.

Además, debido a que esta es determinada por una rotación, los factores determinantes para la habitabilidad en gravedad artificial son determinados por las rotaciones por minuto y el radio de rotación (Hall, 2006). Mientras mayor sean las rotaciones por minuto o el radio de rotación, mayor será la fuerza centrífuga. Ella debe ser la misma que se genera por la gravedad terrestre y mínimo el 0.3 de esta para encontrarse dentro del rango de confort humano. Según Gilruth (1969), las rotaciones ideales deben ser menos de 2 por minuto con el fin de no generar ninguna clase de efecto en la salud del usuario y poder facilitar sus actividades.

La generación de gravedad artificial por rotación presenta diversos cambios en la percepción del espacio. Para Theodore Hall (1995), debido a que la gravedad artificial distorsiona el efecto de la caída hacia el oeste – efecto conocido como viento gravitacional –, uno principal es el incremento de direcciones a considerar. Así, en un ambiente con gravedad artificial, serán 5 como mínimo: arriba, abajo, este, oeste y axial. Ello también es una variable a considerar respecto a cómo se resuelve el tema de la orientación en hábitats que generan gravedad artificial. El aprovechamiento de estas nuevas condiciones y del fenómeno del viento gravitacional para el diseño arquitectónico de estos hábitats debe contar con la posibilidad de mejorar el confort en los astronautas.

### Figura 1

*Cinco direcciones a considerar en un ambiente con gravedad artificial*



Adaptado de Hall (1995)

### 3.2.Arquitectura espacial

Las arquitectas Sandra Häuplik-Meusburger & Olga Bannova (2016) analizan y exponen una larga serie de variables a considerar al estudiar arquitectura espacial. Se presentarán algunas de ellas por su relación con los factores que involucran decisiones arquitectónicas y también a la influencia de la ingravidez en las mismas. El criterio de esta selección se fundamenta en lo entendido de lo descrito por Doule (2014a) y Fauquet & Okushi (1991) sobre la relación entre la ingravidez y tomas de decisiones arquitectónicas. Cabe resaltar que

para algunas de estas es necesario recurrir a teorías de otros autores que tratan de manera más extensa las variables elegidas y que fueron de fuentes de estas arquitectas.

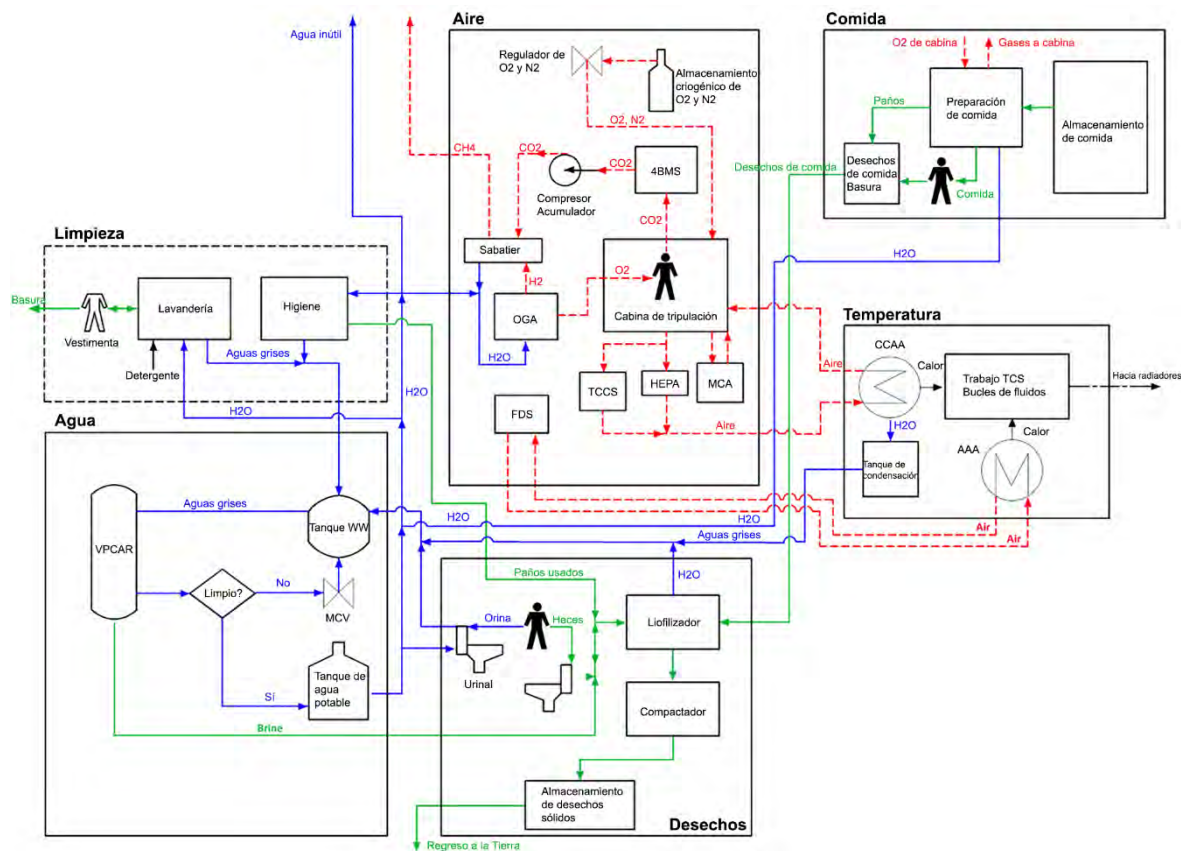
### **3.2.1. Hábitat y Sistemas de Habitabilidad**

El objetivo de la arquitectura espacial es hacer posible la vida en el espacio mediante la creación de un hábitat que proteja al ser humano de las condiciones extremas de este. En el espacio, la habitabilidad se puede entender como qué tan bien el ambiente construido es capaz de mantener la vida humana segura y completamente capaz de efectuar exitosamente una misión (Häuplik-Meusburger, 2011). Por estas razones, un diseñador espacial debe reconocer cuáles son las variables que posibilitan la existencia de la vida en el planeta y no en el espacio exterior. De esta forma, el desarrollo de sistemas complejos que sean capaces de resolver estas diferencias es el objetivo de la arquitectura espacial. Además, cabe resaltar que, a lo largo de la historia de esta disciplina, hábitats espaciales de distintas escalas han sido proyectados. Se ha diseñado desde una estación capaz de mantener a una sola persona – como la estación Vostok – hasta un gran ecosistema capaz de posibilitar la vida de 25 000 personas – como la esfera de Bernal.

Por otro lado, Hanford (2004) menciona que el ECLSS, sistema que posibilita la habitabilidad en la ISS, resuelve las siguientes seis necesidades básicas para esta escala: aire, comida, temperatura, desechos, agua y limpieza. Se resalta no solamente por el diseño los complejos vínculos de entrada y salida de recursos y desechos entre estas seis necesidades, sino también porque tiene una gran capacidad de reciclaje y administración de recursos. Por estas razones, este sistema puede reciclar hasta el 90% del agua que recibe desde la Tierra. Ello permite la adecuada habitabilidad en hábitats de esa escala. Sin embargo, en hábitats de mayor escala, el problema es distinto. Una vivienda resuelve la habitabilidad para un pequeño grupo de personas de una manera y las ciudades necesitan mayor complejidad. Los hábitats espaciales de menor escala y los de mayor escala abordan resuelven diferentes tipos de necesidades. Para la NASA (1977), las necesidades humanas a resolver en esta circunstancia son la gravedad artificial, atmósfera, comida y agua, estrés, diseño ambiental y la relación con la vastedad del espacio. Cabe resaltar que estas no son excluyentes a las variables de menor escala, pues la habitabilidad de estos hábitats dependerá de la medida en la que los sistemas diseñados resuelvan esas necesidades.

**Figura 2**

*Esquema de circuitos del ECLSS de la ISS*



Adaptado de Doule et al. (2011)

### 3.2.2. Interacción humano-espacio

La importancia de conocer la forma en la que afectan las condiciones del espacio sideral al humano se evidencia desde el inicio del proceso proyectual del hábitat espacial. Para Yegen (2019), seis son los factores del espacio que afectan al ser humano y deben ser tomados en cuenta al pretender salir del planeta: gravedad, radiación, composición y densidad atmosférica, temperatura, luz y campos magnéticos. Además, remarca que la gravedad es el cambio más radical, ya que ausencia de la sensación de esta en el cuerpo humano provoca una gran cantidad de cambios en este. Por esta razón, la gravedad artificial ha sido estudiada y tomada como estrategia para varios proyectos.

Asimismo, la radiación es energía en tránsito en forma de ondas electromagnéticas o partículas a alta velocidad. En la Tierra, la propia atmósfera sirve como filtro para la

radiación que existe en el espacio. De igual manera, la composición de la atmósfera y su densidad influye en factores como la velocidad del sonido, la presión, el aire, entre otros. Por ello, es imprescindible el uso de trajes en caminatas espaciales, en las que no existe tal protección como la atmósfera. Respecto a la temperatura, el problema a solucionar es que las variaciones son muy drásticas. Inclusive estas dependen del lado del cuerpo que está siendo afectado por la energía calorífica. Por ejemplo, la ausencia de elementos termorreguladores en la Luna logra que esta se encuentra bajo temperaturas de  $123^{\circ}\text{C}$  bajo la influencia de energía solar, mientras que el lado que no está siendo afectado llega a  $-153^{\circ}\text{C}$ . Por otro lado, la luz es la energía que permite la visión humana. Bajo esa premisa, el ser humano percibe su entorno en base a la luz que recibe. En el espacio, la luz afecta de distintas maneras a los cuerpos, lo cual también presenta efectos psicológicos y fisiológicos en el ser humano. Por último, los campos magnéticos también deben ser tomados en cuenta, pues el cerebro humano es sensible a la dirección de las ondas electromagnéticas. Además, también puede perder sensibilidad al alejarse del campo geomagnético terrestre (Yegen, 2019).

### **3.2.3. Motricidad humana en ingravidez**

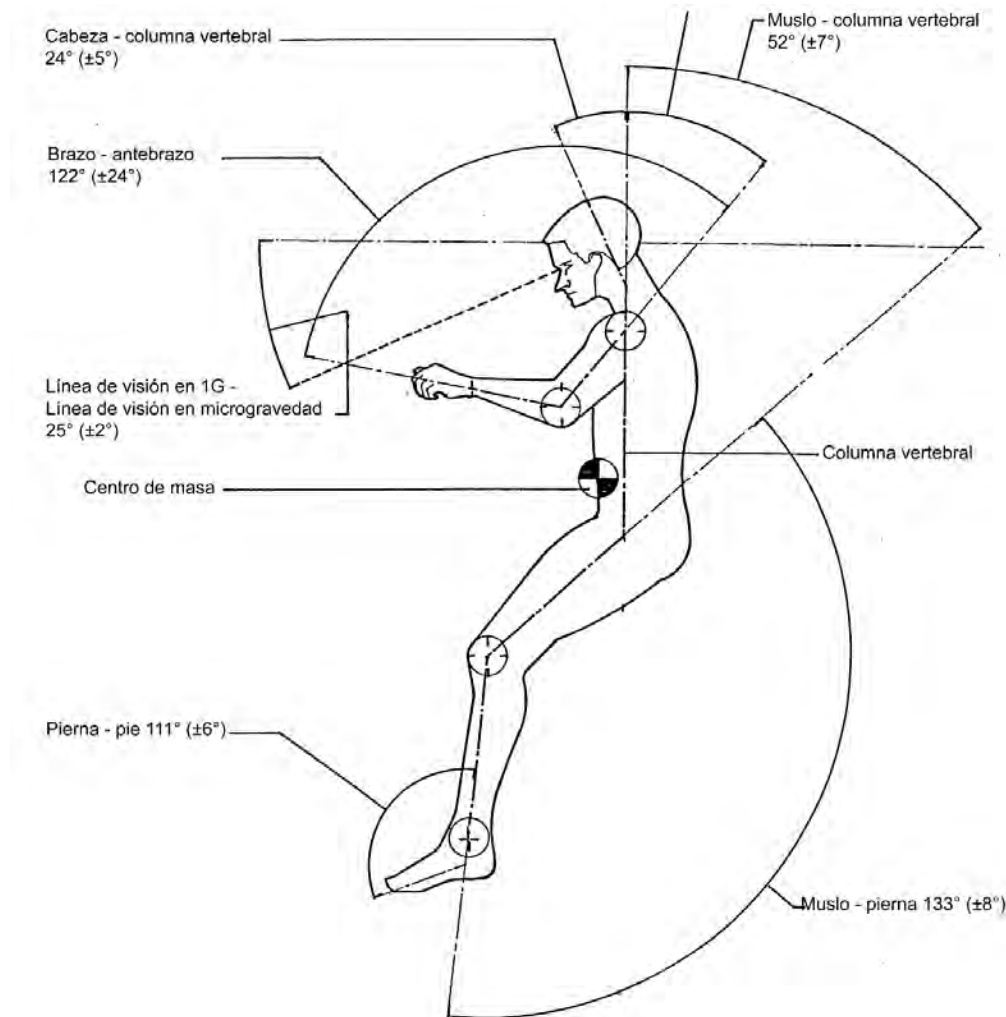
Es natural que el humano presente cambios perceptuales en el espacio respecto a la Tierra debido a la ausencia del sentido de la gravedad. Uno de los principales factores que marcan la diferencia es la ausencia del ‘arriba o abajo’, pues estas direcciones estaban netamente definidas por la gravedad. Esta sensación de direccionalidad es denominada *local vertical* – verticalidad local – según Gary Kitchmacher (2002), quien además menciona que es una decisión de esta disciplina el mantener esta característica terrestre en un hábitat espacial.

Por otro lado, el cambio más dramático y fascinante es la posición neutra o de descanso del cuerpo humano Fauquet & Okushi (1991) señalan que, a diferencia de la posición erguida de una persona en la Tierra, la postura neutral del cuerpo se caracteriza por el decrecimiento en la altura del cuerpo efectiva, un menor ángulo de cabeza y de vista, hombros arqueados, brazos flotantes, columna vertebral recta, una cintura reducida, distinto ángulo del pie y un cambio en el centro de masa del cuerpo. Estos cambios mencionados pueden afectar la orientación del habitante y la percepción espacial, por lo que es posible que se presenten efectos adversos. Es labor del arquitecto determinar un sistema de control de estos. Asimismo, la ingravidez también permite que el cuerpo humano sea capaz de moverse sin restricciones y que mejore su capacidad de movilidad. Por consiguiente, el arquitecto no

debería pensar en limitar esta nueva libertad motora que se le presenta al ser humano, sino presentar un diseño capaz de potenciar esta capacidad.

### Figura 3

*Representación de vista lateral del cuerpo humano en posición neutra en microgravedad*



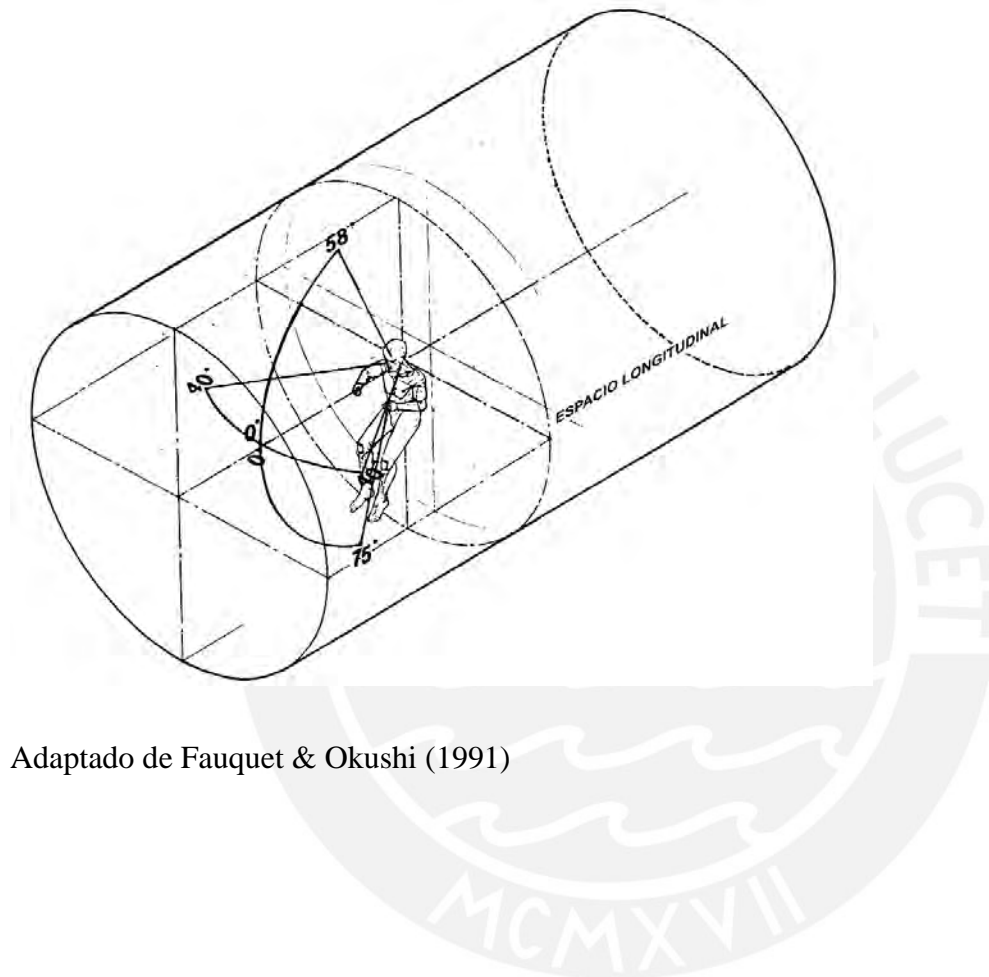
Adaptado de Fauquet & Okushi (1991)

Adicionalmente, la ingravidez también permite que el cuerpo humano sea capaz de moverse sin restricciones y que mejora su capacidad de movilidad. Por consiguiente, el arquitecto no debería pensar en limitar esta nueva libertad motora que se le presenta al ser humano, sino presentar un diseño capaz de potenciar esta capacidad. Fauquet & Okushi (1991) mencionan que el movimiento en ingravidez se definiría de dos maneras dependiendo de la verticalidad del usuario. Es decir, si el usuario se moverá paralela o perpendicularmente al eje

longitudinal del espacio diseñado. Estos datos repercutirán en la manera en la que se diseñen las estrategias que determinen el recorrido al interior del hábitat.

#### Figura 4

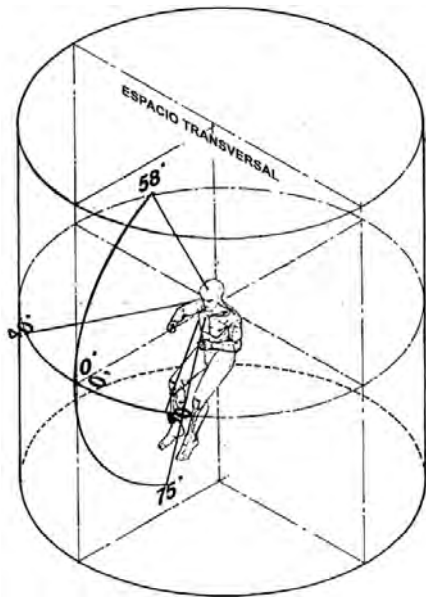
*Usuario en ingravidez en espacio longitudinal*



Adaptado de Fauquet & Okushi (1991)

## Figura 5

*Usuario en ingravidez en espacio transversal*



Adaptado de Fauquet & Okushi (1991)

### 3.2.4. *Sistemas estructurales espaciales*

A diferencia de la Tierra, en el espacio, el principal objetivo de la estructura no es evitar el fenómeno de la caída, sino lograr un sistema capaz de mantener funcionales los sistemas que posibilitan la vida humana frente a las adversidades que presentan las condiciones extremas del exterior descritas anteriormente. Ello es posible gracias a los avances tecnológicos en el campo de la ingeniería acerca de distintos sistemas que permitan la habitabilidad del astronauta (Porter & Bradley, 2016).

Según Häuplik-Meusburger & Bannova (2016), para cumplir con ese objetivo, las estructuras en un entorno de microgravedad deben ser correctamente presurizadas y también deben integrar todos los sistemas que soporten la vida humana. De igual forma, deben cumplir los siguientes requerimientos: proveer temperatura adecuada, utilizar materiales anticorrosivos, minimizar la vibración y sonido, ser a prueba de humo y fuego, y trabajar con redundancia estructural.

Actualmente, los sistemas estructurales más utilizados en el espacio se han proyectado bajo la prefabricación en tierra o neumáticas, pero también existen los sistemas híbridos y algunos

experimentales, como la impresión 3d en el espacio. Cabe mencionar que los módulos de la Estación Espacial Internacional han sido prefabricados en la superficie terrestre y solo uno fue inflado después de acoplarse a la estación. Sin embargo, el uso de neumáticas está ganando cada vez más popularidad debido a que requiere de menor peso al lanzamiento, lo cual es un gran avance para la astronáutica, pues reduce el combustible necesario para despegar y, por ende, el costo.

### **3.2.5. *Objetivos y alcances tecnológicos***

Para Elizabeth Lockard (2014), la tecnología ha brindado a la humanidad la posibilidad de afrontar las condiciones extremas en base a cuatro objetivos: supervivencia, desempeño, habitación y adaptación. Estos son progresivos y cada uno requiere la resolución del anterior (pp. 92-94). También se menciona que actualmente los dos primeros niveles se han logrado adecuadamente, mientras que el tercero está en desarrollo y actualmente se evalúan consideraciones para el cuarto nivel. El primer nivel, supervivencia, solo demanda sistemas que eviten la muerte del ocupante en el espacio: el confort no es algo a resolver en este nivel, pues el tiempo bajo este contexto es reducido. El siguiente nivel refiere al cumplimiento de investigaciones científicas. Para cumplir el nivel de desempeño, el humano debe encontrarse en un entorno capaz de realizar sus tareas de manera práctica y efectiva mediante toda la tecnología que encuentre disponible. En tercer lugar, el nivel de habitación se logra al asegurar el bienestar físico, psicológico y social de los habitantes. Ello se logra mediante sistemas que permitan la gravedad artificial, luz diurna simulada, tratamiento de acústicas, recreación, entre otros. Por último, las tecnologías que permiten la adaptación al espacio son aquellas que permiten una relación con este en vez de solo protegernos de él. Además, permite al ser humano expresar ciertas estéticas tanto como encontrar experiencias fenomenológicas. Solo en este nivel es posible asegurar la longevidad y durabilidad del hábitat.

## **4. Marco Histórico**

Es menester conocer las diversas respuestas terrestres al fenómeno de la gravedad que son posibles de reconocer a lo largo de la historia. La importancia de realizar esta operación radica en la imposibilidad de ignorar el punto de partida de la arquitectura terrestre, el punto de partida para la proyección de hábitats espaciales. El entendimiento de la evolución de la

respuesta arquitectónica a la gravedad será capaz de brindar mayor información acerca de las variables afectadas por la ingravidez en el diseño arquitectónico de hábitats espaciales.

#### **4.1. Espacio arquitectónico y gravedad**

La gravedad es la única constante que ha permanecido invariable a lo largo de la historia en todo lugar del mundo. No existe construcción en el planeta que ha sido capaz de liberarse de esta. Sin embargo, las sociedades sí han evolucionado y, junto a ellas, el conocimiento y tecnologías disponibles. Por ello, desde el inicio de la arquitectura han existido distintas respuestas ante este fenómeno. A continuación, se revisarán los textos de Linares de la Torre (2015; 2014) para la siguiente línea de tiempo.

##### ***4.1.1. Aristóteles, el peso y la caída***

Los eruditos de Grecia son los primeros en sistematizar un conocimiento capaz de ser llamado ciencia. Previamente, la arquitectura estaba basada en meras intuiciones. Aristóteles fue quien planteó uno de los primeros acercamientos hacia la gravedad. Para él, las fuerzas verticales eran las naturales y las fuerzas horizontales eran artificiales. Sin embargo, este acercamiento no era aún el descubrimiento del fenómeno de la gravedad, sino una idea resultante del hecho de que los cuatro elementos de la naturaleza tienden a regresar a su origen – la roca regresa a la tierra y el humo regresa al cielo. En la arquitectura, esta idea de la contraposición de fuerzas naturales y fuerzas artificiales se notó también entre la contraposición de soporte versus cubrimiento. Además, se diferenciaron las ideas de peso y caída: todo cuerpo que cae no pesa y todo cuerpo que pesa no cae. La arquitectura, al evitar el fenómeno de la caída, recurre a la verticalidad de elementos portantes como forma más eficiente de soportar el peso del cubrimiento.

##### ***4.1.2. Gravitas y pondus romano***

En cuanto a Roma, ahí se hizo un gran avance respecto al entendimiento del fenómeno de la gravedad. Es Plutarco quien relaciona la esfericidad de los planetas y su recorrido circular con la caída de los objetos al suelo. De esta manera, ya existe una primera indagación y entendimiento de las interacciones gravitatorias, pues anteriormente se confundía con el peso – la fuerza vertical para los griegos. Esta idea, que la vertical no es la única forma de evitar la caída, sino también indicio de la relación entre la curvatura y la gravedad, repercute en diseños abovedados en distintos proyectos: el Panteón de Agripa es un gran ejemplo (O.

Linares de la Torre, 2015). La cúpula más alta jamás construida de hormigón armado presenta una distinta manera de enfrentar el fenómeno de la caída. Se utiliza la gravedad como recurso para comprimir la propia masa en una esfera que cae en una estructura vertical que, a su vez, es capaz de proporcionar la adecuada cohesión al diseño de la cúpula. Esta nueva perspectiva de diseño que incluye la curvatura como forma de enfrentar la gravedad repercute en muchas generaciones posteriores de arquitectos y se evidencia en la arquitectura gótica y sus características nervaduras.

#### **4.1.3. *Revolución tecnológica e industrial***

Después de Plutarco, la persona que dio el siguiente paso fue Isaac Newton y su ley de gravitación universal; sin embargo, esta ley fue puesta en duda en el siglo XIX y posteriormente rechazada. El mundo carecía de un entendimiento o propuesta sobre la gravedad después de ello. Mientras tanto, la revolución industrial inició y marcó un hito en la historia de la humanidad. La arquitectura y la concepción del entendimiento del diseño también se ven influenciados de diversas maneras por este suceso histórico. Uno de los principales aportes de esta revolución fue la inclusión del acero y del vidrio, materiales que ya existían anteriormente, pero que no eran comercializados al mismo nivel. Debido al avance en conocimientos de ingeniería estructural, la arquitectura cobra nuevos sentidos y, con ello, una nueva forma de afrontar la gravedad. Frente a la masividad de los antiguos materiales, el acero brinda la posibilidad de cubrir espacios de muchas mayores dimensiones con menor masa y elementos más esbeltos. A partir de las posibles cualidades arquitectónicas que es capaz de brindar este material, se crean proyectos como la Torre Eiffel o el *Palais des Machines* de París. En esos proyectos, la propia estructura es capaz de mostrarse como una arquitectura completamente esbelta y capaz de contener grandes espacios nunca antes vistos en la historia.

La obsolescencia de la gravedad newtoniana en el ámbito de la física conduce a la reformulación de los valores tradicionalmente atribuidos a la gravedad estructural en la arquitectura. Libre de la opresión de las masas pesantes que lo configuran, el espacio se abre y expande en todas direcciones. (Ó. Linares de la Torre, 2014, pp. 387)

Pese a esta evolución en el ámbito de la espacialidad arquitectónica gracias a la inclusión del acero y el vidrio, aún existían remanentes historicistas durante ese siglo. Es decir, se

mantuvieron estándares referidos al espacio arquitectónico previamente establecidos – o asumidos – y aún no se lograba un completo desligue del pasado, probablemente por la ausencia de un entendimiento de la gravedad.

#### **4.1.4. Nuevas espacialidades**

En ese contexto de carencia de un entendimiento de la gravedad, Einstein plantea la teoría de la relatividad, la cual resuelve todos los problemas que presentaba la gravedad newtoniana. Además de revolucionar el mundo de la física, también logra hacerlo en el mundo del arte, pues los antiguos estándares del entendimiento de la realidad se renuevan. Por ejemplo, Dalí representaba un nuevo entendimiento del espacio tiempo y la distorsión de este mediante los relojes derretidos (Ball, 2008). Como se espera, la arquitectura no estaba exenta de la influencia de este nuevo entendimiento del universo.

Mies Van der Rohe ejemplifica lo anterior mencionado mediante su propuesta de espacio horizontal y la aparente liberación de elementos estructurales: “Ya no se trata de oponerse a la pesantez por medio del aligeramiento real, sino de negarla por medio de una aparente levedad formal” (O. Linares de la Torre, 2015). La Neue Nationalgalerie sustenta la postura de Van der Rohe frente a la gravedad: no es una interacción a la que se deba oponer. El propio espacio arquitectónico no debe dar una impresión de enfrentamiento, sino de conjugación y correlación. Este replanteamiento del espacio arquitectónico traía consigo también una evolución entre la relación entre el espacio interior y el espacio exterior. La arquitectura ya no los trataba con entes enfrentados, sino como entes capaces de mantener un diálogo, correlacionarse estrechamente y eventualmente difuminarse. En este sentido, Le Corbusier presenta un planteamiento similar mediante La Casa Dominó, la cual es gran influencia para el movimiento moderno y posteriores: la arquitectura busca una horizontalidad espacial para expresar una nueva conjunción con la pesantez y la gravedad. Gracias a los avances en las tecnologías constructivas, la arquitectura es capaz de presentar una postura completamente renovada frente al entendimiento de la gravedad.

## **4.2. Espacio Sideral y Arquitectura**

A lo largo de las últimas décadas, esta disciplina ha evolucionado a pasos agigantados. Este hecho no es sorprendente, pues, como se ha mencionado anteriormente, la preocupación por la exploración del espacio y la posibilidad de habitarlo siempre ha sido grande. La idea de la estación espacial fue popularizada por Wernher Von Braun al hacer evolucionar un

concepto anterior en un diseño realizable basado en estudios de la época (Von Braun, 1952). Ese primer avance fue antecedente para otros cuya importancia radicó en que se sentaron bases para diversos proyectos que actualmente se desarrollan por los expertos en esta disciplina. Se elaborará una línea de tiempo de la evolución de hábitats espaciales en base a lo estudiado por Häuplik-Meusburger (2011).

#### **4.2.1. Apollo**

A mediados del S. XX, después de terminada la segunda guerra mundial, se disputaba la llamada Guerra Fría entre los Estados Unidos de América (EUA) y la Unión de Repúblicas Socialistas Soviéticas (URSS). Parte de esta pugna fue la carrera espacial, cuyo principal objetivo era lograr llevar el primer ser humano a la luna. En un principio, la URSS tomó la delantera. Llevó al espacio el primer satélite, el siguiente llevaría al primer animal fuera de la línea de Kármán y, por último, cumplió exitosamente la primera misión espacial tripulada – Sputnik I, Sputnik II y Vostok I respectivamente. Sin embargo, EUA realizó con éxito la misión Apollo XI, cuyo principal objetivo fue llevar un hombre a la Luna y regresarlo a salvo a la superficie terrestre (Kennedy, 1961).

El Apollo, nombre de la nave de aquella misión, estaba compuesta por el Módulo de Comandos, el Módulo de Servicios, el Módulo Lunar y el Vehículo Explorador Lunar, de los cuales solo los 3 primeros se consideran como elementos arquitectónicos (Häuplik-Meusburger, 2011). El primero contaba con dimensiones de 3.9 m de diámetro y 3.65 m de alto, además de la capacidad de albergar a tres astronautas en tres asientos. Se encontraba en la punta de la nave, por lo que su forma era cónica para facilitar la salida de la atmósfera terrestre. Al respecto del Módulo de Servicio, este se encontraba bajo el anterior y servía principalmente de almacén de los consumibles. Contaba con el mismo radio, pero era notablemente más alto – 7.6 m – pues necesitaba almacenar más de 8 días de consumibles para 3 personas. Por último, el Módulo Lunar se encargaba del alunizaje de los astronautas, pues los dos primeros se mantenían en la órbita lunar sin llegar a la superficie lunar. Cabe mencionar que los sistemas que permitían la habitabilidad eran muy primitivos aún y usualmente presentaban fallos, lo cual incomodaba la estadía de los astronautas (Häuplik-Meusburger, 2011). Pese a ello, Apollo es considerado como un hito en la historia de la humanidad porque hizo factible el primer paso del hombre en una superficie que no era la terrestre.

**Figura 6**

*Módulos de Comando y Servicio de Apollo*

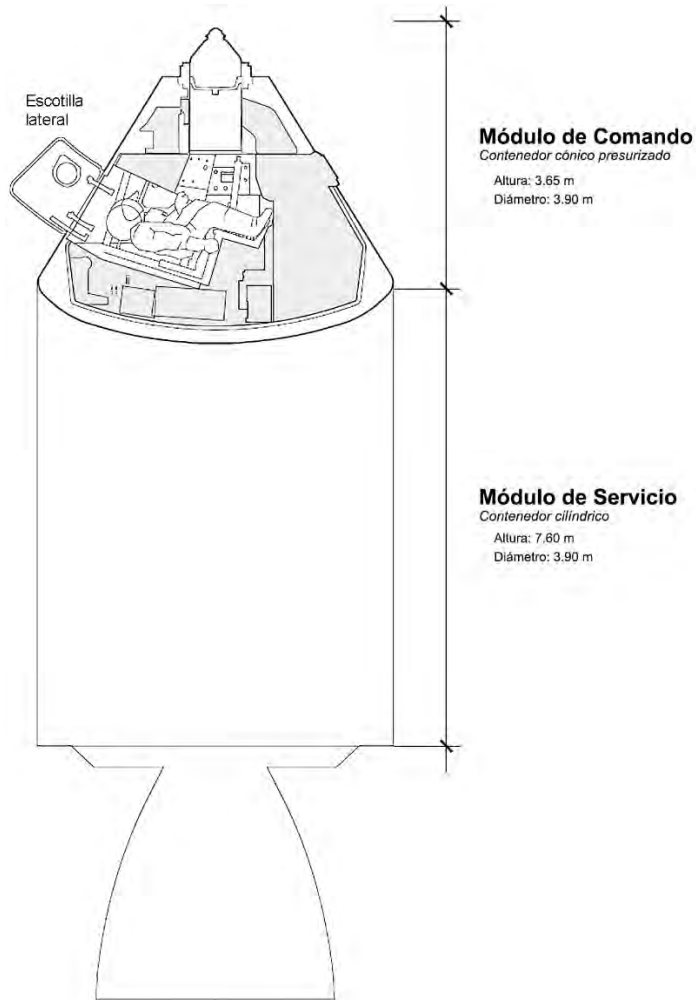


Fuente: Häuplik-Meusburger (2011)



**Figura 7**

*Sección de Módulo de Comando y de Servicio de Apollo*



Adaptado de Häuplik-Meusburger (2011)

#### **4.2.2. Skylab**

Skylab se considera la primera estación espacial, propiamente dicha, diseñada por la NASA y lanzada en el año 1973. Fue diseñada con las dimensiones de 6.6 m de diámetro y 26 m de largo con una división de 5 componentes. Además, reutilizó componentes y tecnología del Apollo y el satélite Saturn V. Se mantuvo en órbita hasta 1979 después de 3 misiones de 3 astronautas cada una de 28, 59 y 84 días. El principal objetivo de esta estación espacial fue crear y examinar un ambiente que permita la vida y trabajo de manera autosuficiente e independiente de constante reaprovisionamiento por un largo periodo (Häuplik-Meusburger,

2011). Naturalmente, esta estación espacial necesitaba resolver los diversos problemas que presentaba el Apollo respecto a temas como la comodidad de los usuarios. Por lo que era necesaria la innovación de los sistemas que permitían la vida diaria de los astronautas frente a las condiciones extremas del espacio exterior. Con este fin, se creó el sistema LSS – *Life Support System*, el cual será el antecedente del *Environmental Control and Life Support System* utilizado para la ISS. El LSS tomaba en cuenta todas las necesidades de la vida diaria del ser humano y creaba sistemas gracias a la tecnología de la época preparados para resolverlas de manera óptima (George C. Marshall Space Flight Center, 1977). Con ello se mejoró de sobremanera la estancia confortable de los astronautas en la estación respecto a las anteriores experiencias en Apollo.

Según Kitmacher (2002), otro aspecto importante para el confort de los astronautas en Skylab fue la inclusión de la verticalidad local. Se menciona que el trabajo era mucho más sencillo si sentían que el cuarto y ellos mismos estaban orientados de la misma manera. Esta verticalidad local les facilitaba el reconocimiento inmediato de la disposición de las herramientas, la cual también era útil como instrumento de configuración de la orientación. De igual manera, la aplicación de esta estrategia les permitía a los usuarios distinguir claramente la división de los ambientes al igual que su uso. Kitmacher (2002) también menciona que una de las más grandes quejas de los astronautas fue el diseño del cambio de verticalidad local en la transición del componente de la Unidad de Instrumento al Módulo de Exclusa. Este ordenamiento los desorientaba, pues la familiarización con un ambiente de trabajo dificulta la misma con otro ambiente.

## Figura 8

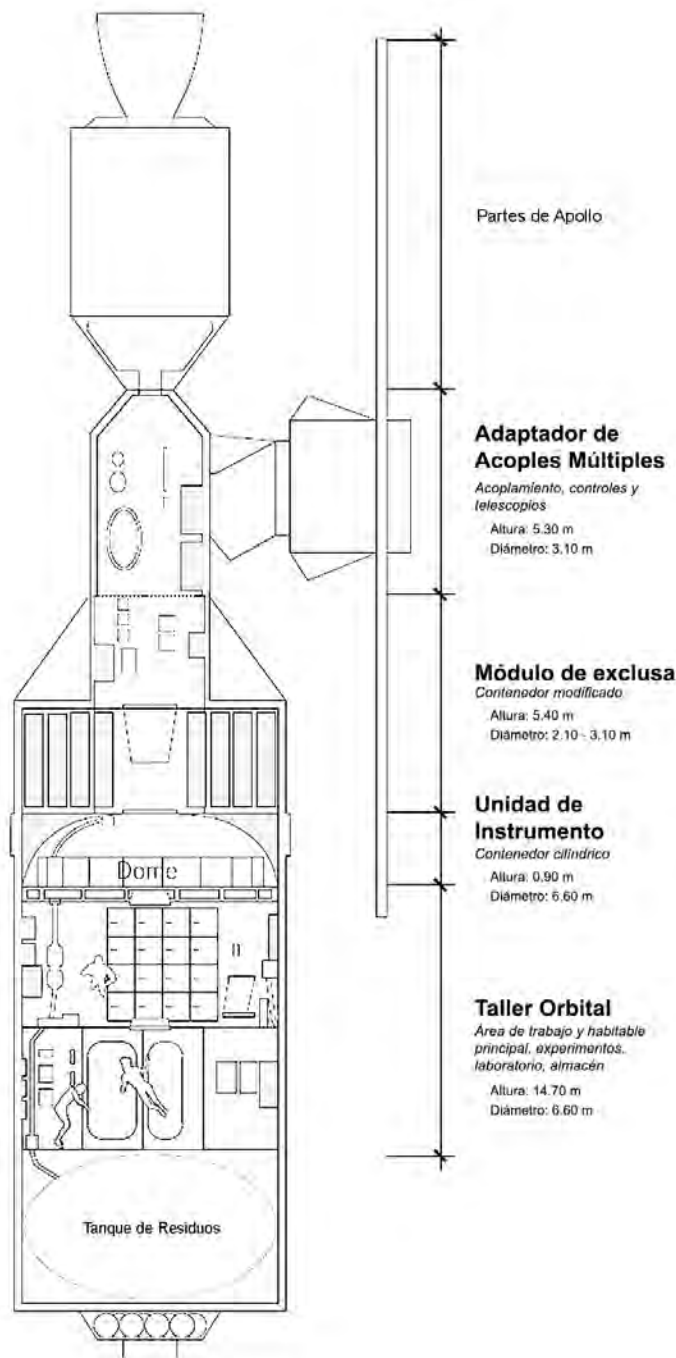
*Skylab en órbita*



Fuente: Häuplik-Meusburger (2011)

**Figura 9**

*Sección de Skylab*



Adaptado de Häuplik-Meusburger (2011)

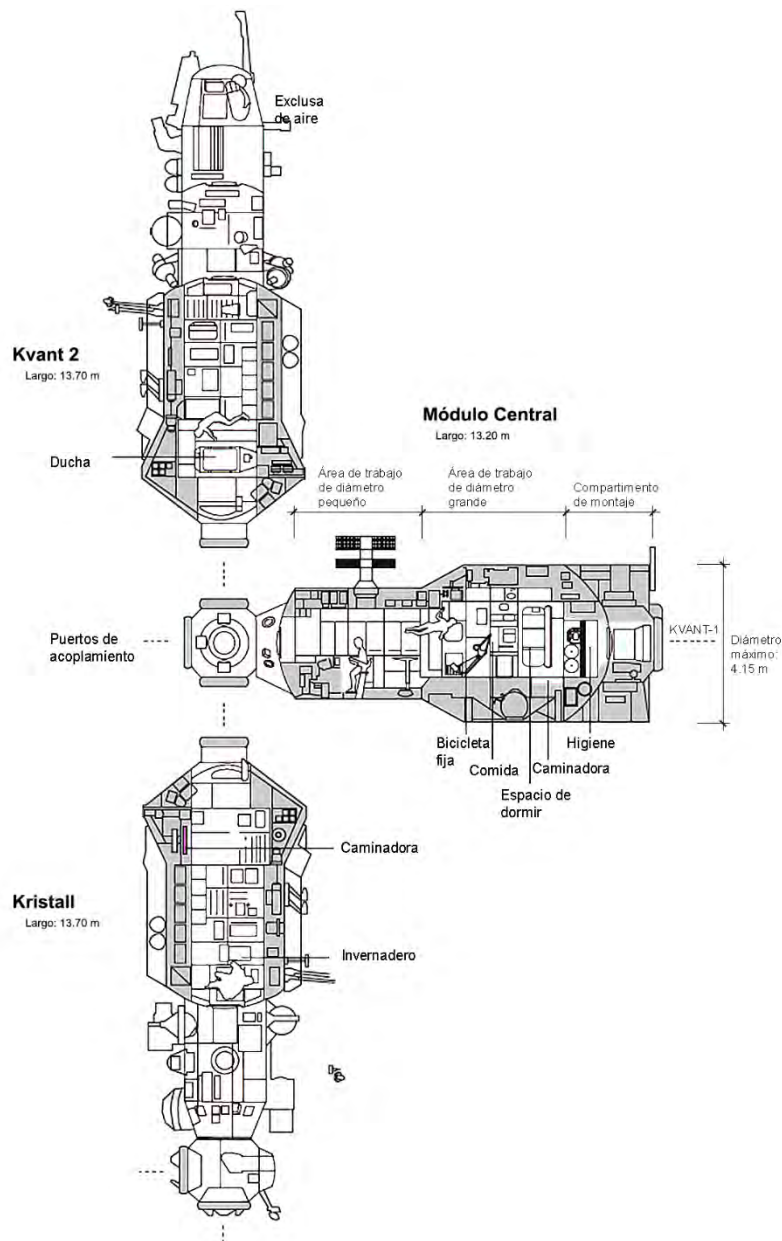
### 4.2.3. *MIR*

La primera estación espacial que incluía el trabajo internacional fue MIR (mundo por su traducción a español), la cual fue diseñada y construida solo por la Unión Soviética. Esta se mantuvo operativa desde 1986 hasta 2001 con 29 distintas tripulaciones en su interior. Contaba principalmente con 3 módulos habitables dispuestos a manera de cruz con un largo máximo de 33 m, el mayor hasta ese entonces. Asimismo, el diseño fue un trabajo en conjunto con los astronautas de estaciones espaciales predecesoras, así como las 7 de las misiones Salyut, las cuales también fueron de autoría de la URSS (Bluth & Helppie, 1986). Por esta razón, los módulos que constituyen a MIR cuentan con un diseño y tecnología que evolucionó en base a las estaciones de Salyut. De esta forma, resultó en un proyecto que se puede reconocer como la primera estación espacial con un concepto verdaderamente modular (Häuplik-Meusburger, 2011).

Su largo tiempo en órbita fue reflejo de la pertinencia de su diseño tanto arquitectónico como de otras disciplinas. Gracias a su diseño modular, fue posible un mayor crecimiento en volumen habitable, lo cual mejoraría el confort de los usuarios. Según Bluth & Helppie (1986), la falta de volumen habitable presentaría efectos negativos física y psicológicamente. Otra característica a resaltar es que, a diferencia de los otros módulos, el Módulo Central intentaba mimetizarse con la orientación terrestre (Häuplik-Meusburger, 2011). Así, el diseño a su interior se asemejaba a la disposición de instrumentos y maquinarias que se propondría en la Tierra. Además, en su interior la superficie presentaba distintos colores, estrategia que facilitaría el reconocimiento claro de la verticalidad local.

**Figura 10**

*Sección de MIR*



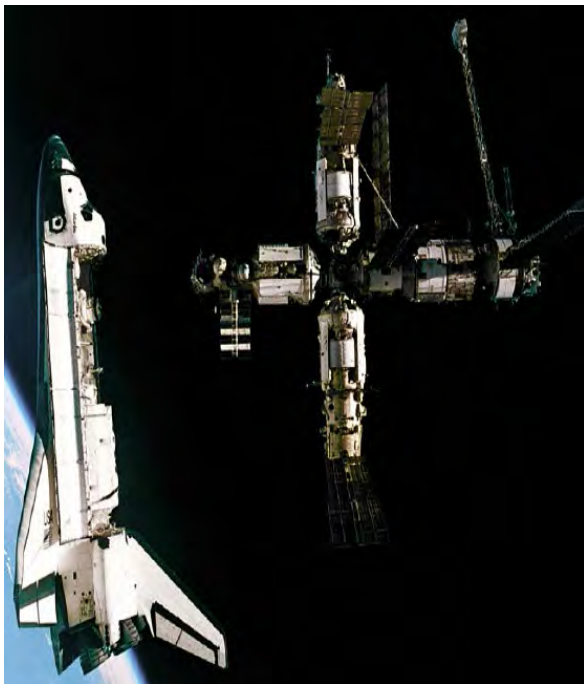
Adaptado de Häuplik-Meusburger (2011)

Después de meses de discusión, los programas soviéticos decidieron aliarse con la NASA para mantener interacciones entre MIR y el *Space Shuttle*, la primera nave reutilizable diseñada por los norteamericanos (Kitmacher, 2002). Desde 1994, MIR dejó de ser una estación exclusivamente soviética y mantuvo conexiones con los colaboradores de la NASA. Este trabajo conjunto fue uno de los principales factores que sentaría las bases de la futura

materialización de la Estación Espacial Internacional. Como menciona Häuplik-Meusburger (2011), el Space Shuttle sirvió para llevar tripulaciones y provisiones tanto a MIR como a la ISS, cuya construcción fue posterior. El perfeccionamiento de todas las variables que implicaba el transporte de la Space Shuttle de ida y vuelta a MIR alentó el proyecto de la ISS, además de alimentar con experiencia astronáutica a la NASA.

### Figura 11

*Space Shuttle y MIR acoplados*



Fuente: Häuplik-Meusburger (2011)

#### **4.2.4. Estación espacial internacional (ISS)**

La Estación Espacial Internacional (ISS) es sucesora de la estación espacial Freedom, la cual fue diseñada durante la década de los 80 y nunca llegó a ser construida. Esto se debe a que las dimensiones de esta eran inmanejables por el gran costo que demandaba en su momento. Por esta razón, el trabajo de los diseñadores durante los primeros 3 años de la década de los 90 fue reducir sus dimensiones para volverla asequible (Launius, 2011). Gracias a este trabajo, la construcción de la ISS se convirtió en una realidad con un largo total de 110 m y 4.5 m de diámetro máximo. Asimismo, Adams & Jones (2014) mencionan que es innegable que la ISS responde a parámetros modernistas principalmente por su modularidad. Esta característica del hábitat le brinda la capacidad de adaptar más módulos a su estructura

incluso después de ser lanzado en órbita. Es decir, le permite crecer modularmente a través del tiempo y el agregado de nuevas tecnologías. La gran cantidad de módulos diseñados por distintos países y ensamblados actualmente en esta estación demuestra las ventajas de esta estrategia, la cual será empleada por futuros proyectos.

Por consiguiente, la ISS es la estación espacial actualmente más reconocida, tanto porque prueba la capacidad del ser humano para construir hábitats espaciales como también porque es resultado del trabajo conjunto de varios países. Ello permite que investigadores de diversos lugares del mundo tengan accesibilidad a realizar investigaciones que solo se podrían realizar bajo las condiciones en las que se encuentra esta estación. Por ello, se ha mantenido los últimos 20 años en la órbita baja terrestre. En efecto, la importancia de la ISS radica en que permite la experimentación de varios fenómenos bajo condiciones que solo se pueden encontrar en el espacio, como la ingravidez. Estos aprendizajes facilitarán la construcción de futuros hábitats que permitan la subsistencia y navegación del ser humano en el espacio, lo cual abrirá una nueva era en la arquitectura espacial (Leach, 2014).

Cabe mencionar que el sistema que genera las condiciones ambientales adecuadas para la comodidad de la vida humana en su interior es el ECLSS (Environmental Control and Life Support System). Este es un sistema regenerativo de soporte de vida que provee agua y aire limpios mediante los dos siguientes sistemas: el Water Recovery System (WRS) y el Oxygen Generation System (OGS). Además, es capaz de extender el tiempo que los astronautas pueden sobrevivir en el espacio y reduce significativamente el costo de operación de la estación (NASA, 2020). El acierto de este sistema es precisamente la efectividad que ha logrado durante los últimos 20 años manteniendo con vida a cada una de las misiones que se han desarrollado durante ese periodo.

**Figura 12**

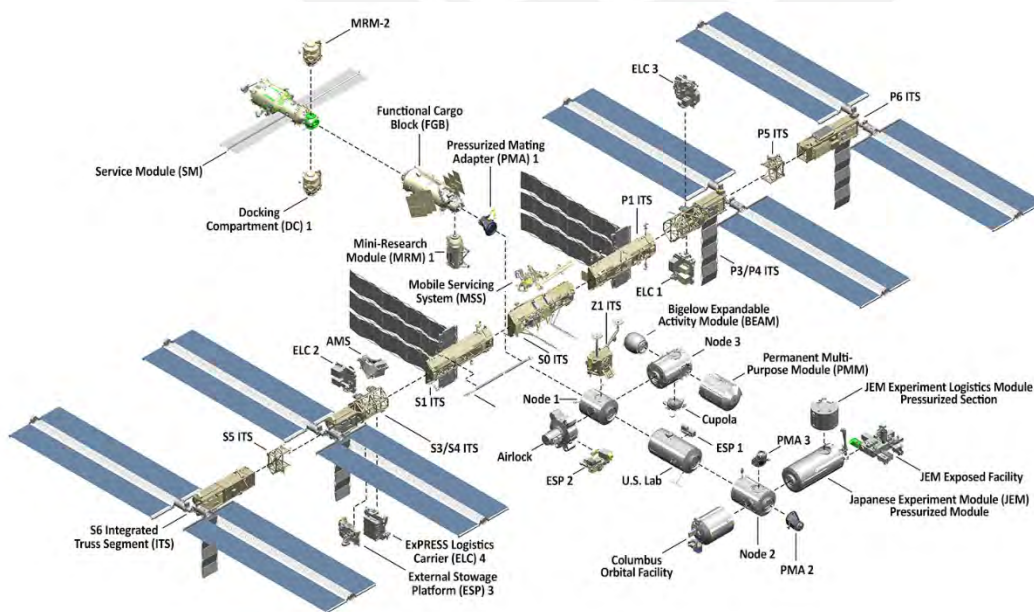
*Fotografía de la ISS desde el exterior*



Fuente: Finckenor & De Groh (2016)

**Figura 13**

*Composición modular de la ISS*



Fuente: NASA (2015)

## **5. Metodología y Criterios**

El punto principal de esta investigación es dar a entender la manera en que la neutralización de la gravedad – ingravidez – repercute en tomas de decisiones arquitectónicas. Por ello, el eje principal de esta investigación será la relación entre la ingravidez y determinadas variables arquitectónicas que se han encontrado revisando textos y referencias descritas en el marco de referencia.

### **5.1. Casos de estudio**

En primer lugar, un criterio de selección es resultado de la teoría de Lockard (2014) respecto a los objetivos y alcances del diseño de hábitats espaciales gracias a la tecnología. Se ha escogido 2 de los niveles presentados en su teoría: desempeño y adaptación. Como menciona, la tecnología posibilita la resolución de distintas variables en cada nivel y es de interés el investigar la manera en la que la ingravidez ha intervenido en esta toma de decisiones. En segundo lugar, los proyectos también se han escogido gracias a los criterios de evaluación descritos anteriormente por Hanford (2004) y NASA (1977). Estos mencionaban que existen distintos criterios para lograr una adecuada habitabilidad en distintas escalas. Ello presenta repercusiones en distintas variables del diseño arquitectónico por las necesidades a resolver.

Por último, se escogerán proyectos posteriores a la ISS con el fin de indagar acerca de los nuevos descubrimientos en el campo de la arquitectura espacial, como menciona Leach (2014). Cabe mencionar que, para estudiar los proyectos, se utilizarán los artículos redactados por sus autores, la planimetría y representaciones encontradas en estos, además de otras representaciones realizadas por terceros. Se optado por ello, puesto que los proyectos aún no han sido construidos y es más conveniente estudiarlos de primera fuente.

#### ***5.1.1. Omicron – Phari Base***

Los proyectos escogidos para este nivel de evaluación cuentan con una capacidad similar a las estaciones espaciales predecesoras. Sin embargo, estos proyectos aún no han sido construidos y se encuentran en el nivel de desempeño según lo mencionado por Lockard (2014). Esto se debe a que responden a la resolución de la comodidad para realizar una misión en concreto y aún no cuentan con sistemas que proporcionen luz diurna, gravedad

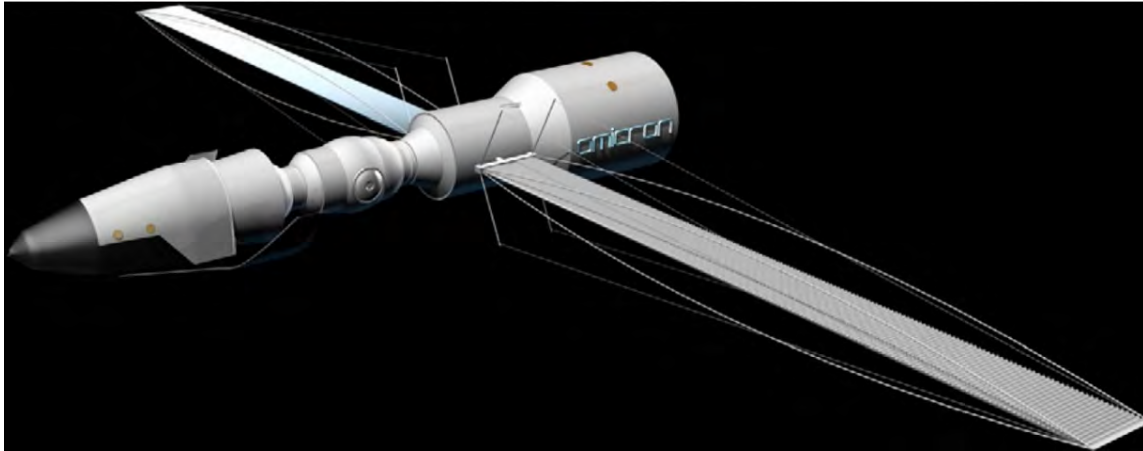
artificial permanente, ni otros requisitos para cumplir con el nivel de habitación. Se evaluarán los sistemas de habitabilidad bajo los definidos Hanford (2004).

Se utilizará lo escrito en el texto *Omicron Space hábitat – research stage II* de Doule et al. (2011) para el análisis de Omicron, además de los planos y representaciones incluidos en este. El proyecto responde a una iniciativa privada más que investigativa. El objetivo del diseño de este proyecto diseñado por Ondrej Doule, Vratislav Saleny, Benoit Hérin y Tomás Rousek es servir como un hotel o un hábitat privado. Para facilitar esta meta, el proyecto se encontrará orbitando en la órbita baja de la Tierra, tal como la ISS. Esto le brindará la protección del cinturón de Van Allen frente a la radiación espacial y también una mayor facilidad para la accesibilidad a la superficie terrestre. Por otro lado, el diseño apunta a brindar experiencias al usuario que solo se pueden encontrar en el espacio sideral, como la condición de ingravidez o la caminata espacial, por lo cual, el diseño se enfoca en explotar las comodidades dentro de este. Los usuarios serán un máximo de tres personas: dos pasajeros y un astronauta. Estos serán capaces de acceder al uso de esta estación mediante Soyuz, vehículo que será lanzado desde la Tierra.

Por último, Omicron se encuentra conformado por 3 módulos principales: la nave Kliper, el módulo EVA – *extravehicular activities* – y el módulo habitable. Entre el módulo EVA y el módulo habitable se encuentra el puerto de anclaje. También cuenta con una parte técnica en la parte posterior de este. Cabe resaltar que la modulación de Omicron permite su crecimiento, por esta razón, este es capaz de crecer en dimensiones y aumentar su capacidad al agregar módulos.

## Figura 14

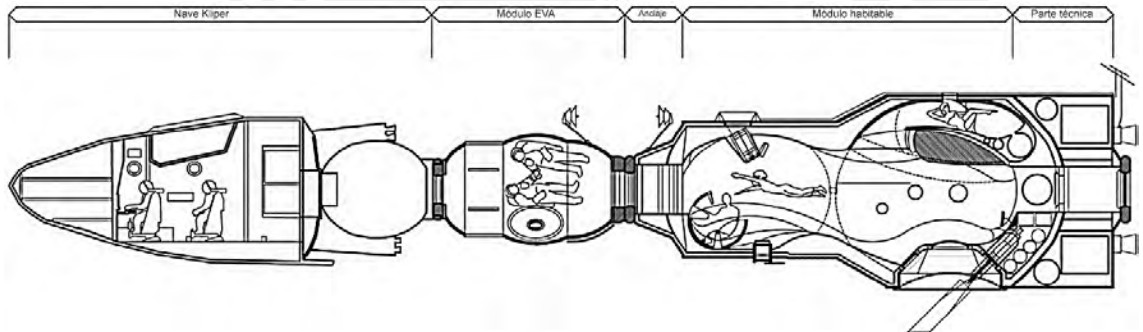
*Omicron Space Habitat en su configuración inicial*



Fuente: Doule et al. (2011)

## Figura 15

*Sección longitudinal de Omicron*



Adaptado de Doule et al. (2011)

Phari Base se estudiará gracias al texto *Human Spaceflight: Phobos Base* de Bishop et al. (2017). Se incluirán las planimetrías e imágenes encontrados en este para el próximo análisis. Phari Base es un habitáculo diseñado para ser construido en Phobos, una de las 2 lunas marcianas. Los autores de este proyecto son Timothy Bishop, Victor Kitmanyen, Thomas Lagarde y Zachary Taylor bajo la tutoría de Olga Bannova, autora de textos que son utilizados de referencia para esta tesis. Su principal objetivo es facilitar la exploración de Marte al brindar una capacidad de albergar permanentemente 12 astronautas. Esto se logrará proporcionando la capacidad de cultivar sus propios alimentos, realizar actividades físicas y

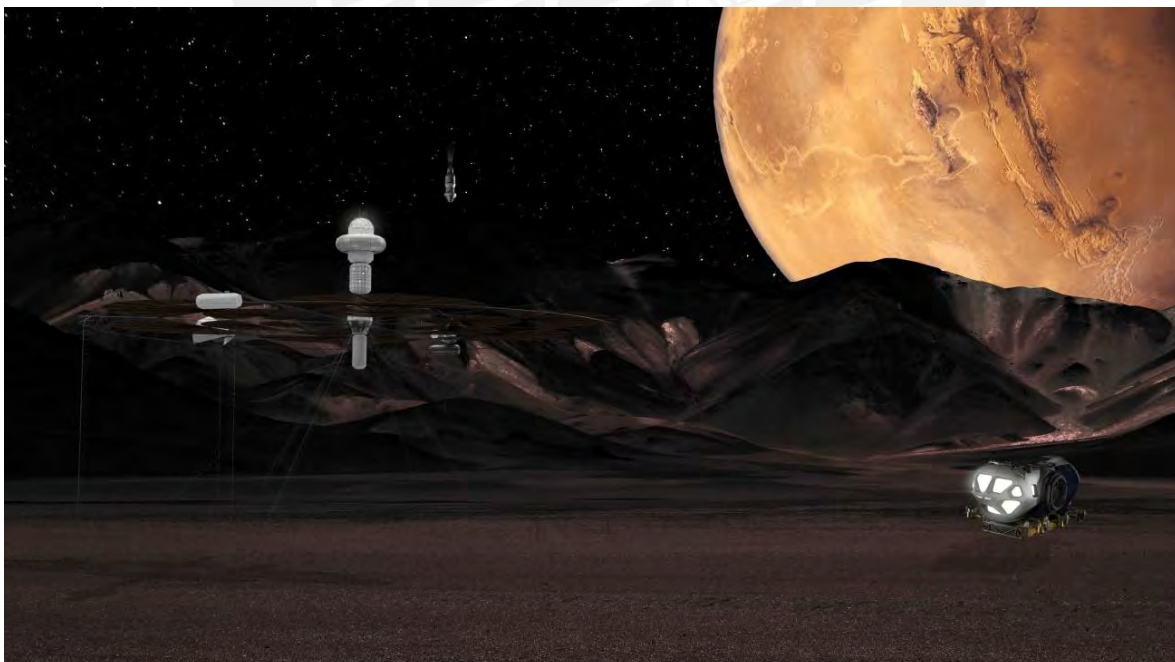
de recreación, comunicación directa a Marte, entre otras facilidades. Evidentemente, estas capacidades serán resueltas de tal manera que se puedan realizar lo más cómodamente posible bajo las condiciones del satélite marciano.

Pese a que Phobos es un cuerpo celeste, las condiciones a las que se encuentra son muy similares a las que se encuentran en el espacio sideral, pues también las dinámicas orbitales son las dinámicas que priman. Por esta razón, Phobos presenta condiciones de ingravidez. Además, la conveniencia de elegir esta luna radica en que la radiación del espacio exterior se reduce en 90% debido a la localización respecto a la atmósfera marciana.

Tanto como Omicron, Phari también prevé su extensión en el futuro. Por esta razón, esta se modula en 5 partes claramente reconocibles y replicables en distintos ejes: el módulo de comando, las habitaciones, el módulo de apoyo, el módulo de poder y la centrífuga. Además, existirá un componente que servirá de anclaje a la superficie de Phari: el *Truss Landing Assembly* – TLA por sus iniciales.

### Figura 16

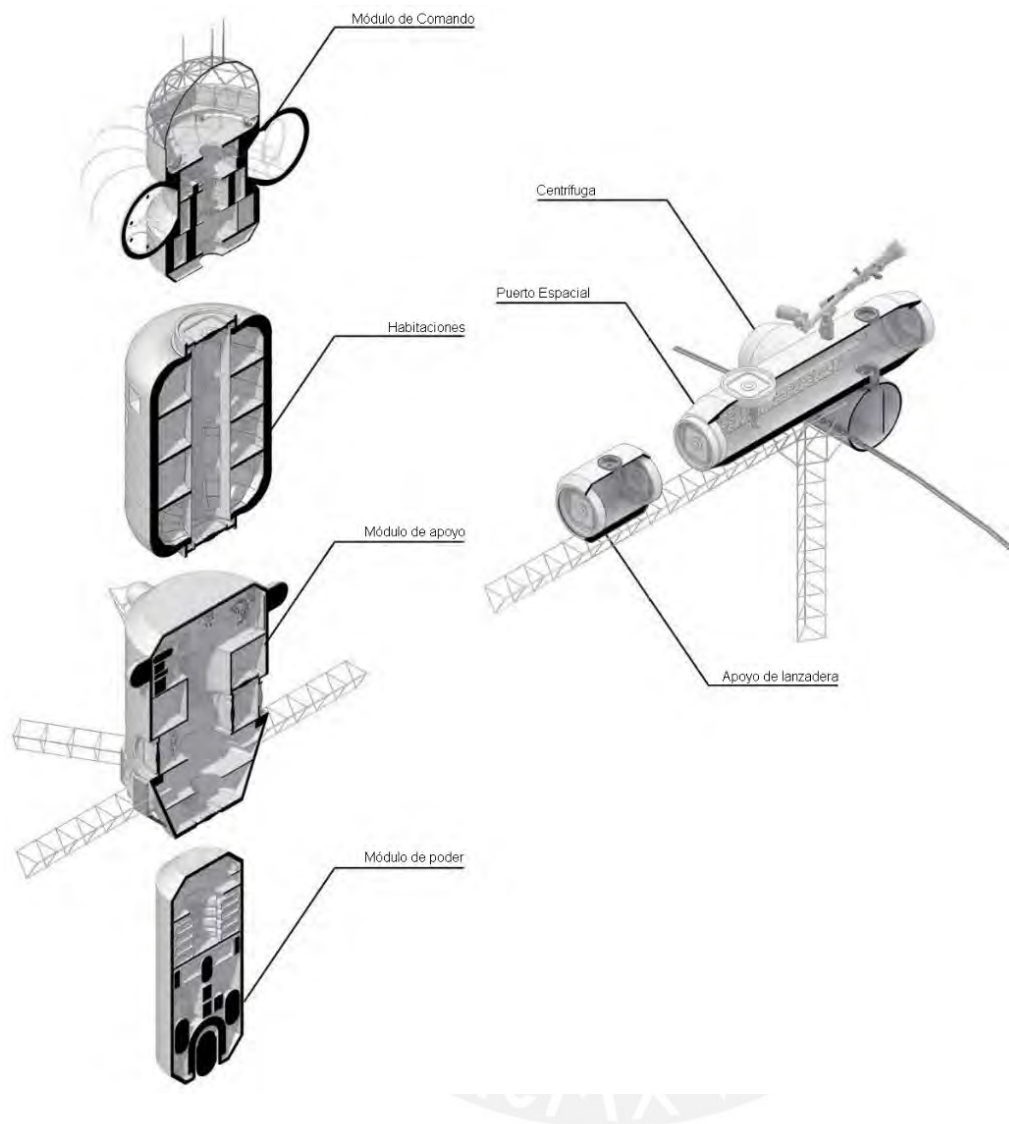
*Phari Base en Phobos*



Fuente: Bishop et al. (2017)

**Figura 17**

*Isometría explotada de Phari Base*



Adaptado de Bishop et al. (2017)

**5.1.2. Kalpana One – Colonized Interstellar Vessel**

En esta propuesta, los criterios a resolver por los proyectos son los determinados por la NASA (1977), los cuales son gravedad artificial, atmósfera, comida y agua, estrés, diseño ambiental y la relación con la vastedad del espacio. Para Lockard (2014), estos proyectos estarían cumpliendo los objetivos del nivel de adaptación. Esto se debe a que estos se han diseñado con el fin de mantener miles de habitantes en el espacio por un tiempo indeterminado y asegurando su comodidad en ese contexto. Evidentemente, en la actualidad no existe el nivel de tecnología ideal actualmente para que estos proyectos sean construidos.

Sin embargo, estos proyectos determinan problemáticas a solucionar para cuando en el futuro la humanidad haya desarrollado la tecnología adecuada.

Tres fueron los textos escritos sobre Kalpana One por Al Globus, Nitin Arora, Ankur Bajoria y Joe Straut (1990, 2010, 2017), los cuales se utilizarán en esta investigación: *Kalpana One, Analysis and Design of Space Colony*, *Kalpana One, A New Orbital Space Colony Design* y *The Kalpana One Orbital Space Settlement Revised*. También se utilizarán las imágenes de Versteeg (2020) como complemento de los textos mencionados. Basándose en las estrategias de proyectos diseñados anteriormente como la esfera de Bernal, el toro de Standford o el Cilindro de O'Neill, Kalpana planea mantener a 3000 habitantes. Por ello, contará con distintos servicios tales como industria, almacenaje, agricultura, recreación, entre otros. Su objetivo es mantenerse en la órbita baja terrestre a aproximadamente 600 km sobre la superficie. Ello facilita su protección frente a la radiación espacial gracias al cinturón de Van Allen. Además, esto le permitirá conectividad fluida con la Tierra, lo cual también servirá como una estación de parada para futuras exploraciones. Otro dato importante a resaltar es que cuenta con mecanismos capaces de generar gravedad artificial, necesario al albergar esa cantidad de personas. Finalmente, este proyecto ha sido diseñado también con el fin de servir como módulo para futuros proyectos que no solamente se encuentren en la órbita baja terrestre, sino también capaces de viajar a través del espacio.

## Figura 18

*Render de Kalpana One en órbita*



Fuente: Versteeg (2020)

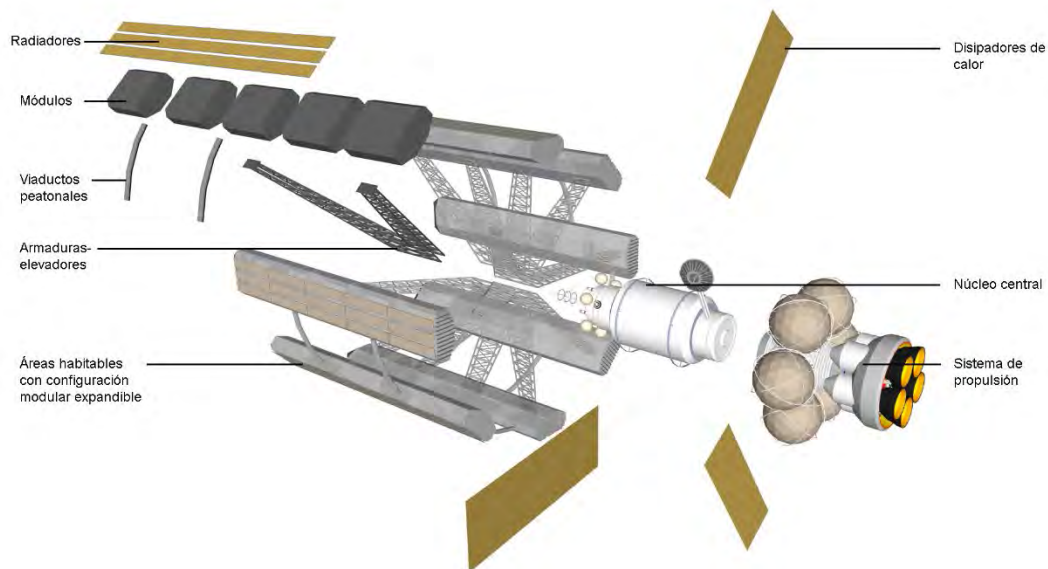
*Colonized Interstellar Vessel* es el artículo a utilizar para analizar el proyecto del mismo nombre. La autoría le pertenece a Summerford (2012) y se recurrirá tanto a lo descrito en el artículo como a la planimetría e imágenes encontradas en él. *Colonized Interstellar Vessel* es un proyecto apto para mantener a más de 10 000 personas y fue diseñado por el Project Hyperion Study Group. Este plantea la resolución de un hábitat capaz de transportar humanos a grandes distancias, inclusive fuera de la galaxia. La idea no se fundamenta en ningún sentido en la ciencia ficción. Al contrario, en base a los conocimientos actuales de ciencias como la física, biología, psicología, entre otras, por lo que es posible resolver los problemas necesarios para llevar a cabo la construcción y mantenimiento de un proyecto de tal magnitud.

Además, este proyecto es capaz de plantear reflexiones arquitectónicas de tal manera que aseguren el confort y bienestar de las personas durante todo el viaje interestelar, el cual no cuenta con un tiempo determinado. En otras palabras, CIV es un proyecto capaz de asegurar un viaje espacial confortable de futuras generaciones humanas. Por esta razón, se encuentra necesario el diseño de estrategias que generen gravedad artificial, lo cual también determina varias otras decisiones del proyecto. Los principales componentes que servirán para su construcción son los siguientes: radiadores, módulos, viaductos peatonales, armaduras-

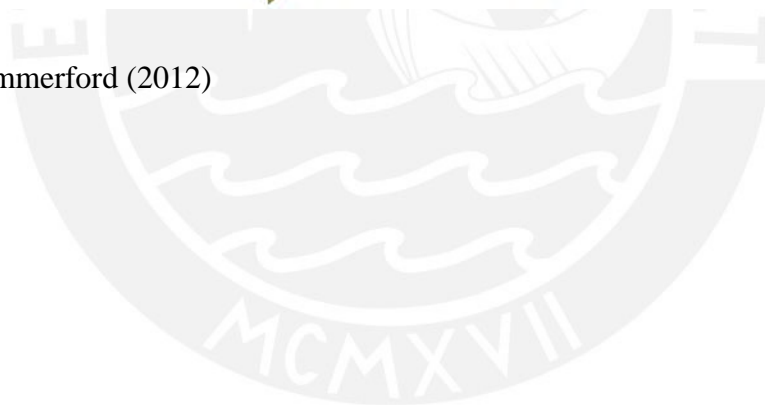
elevadores, áreas habitables con configuración modular expandible, disipadores de calor, núcleo central y el sistema de propulsión (Summerford, 2012).

### Figura 19

#### *Componentes de CIV*

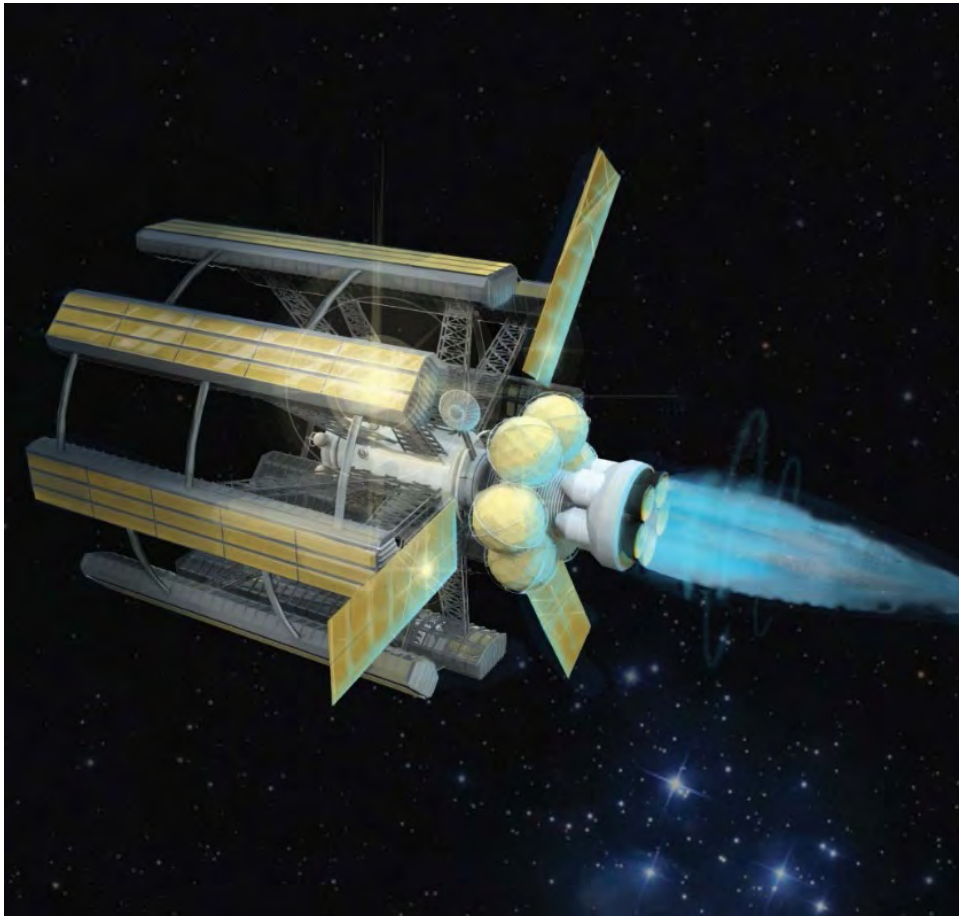


Adaptado de Summerford (2012)



## Figura 20

### *Representación de CIV en viaje interestelar*



Fuente: Summerford (2012)

## **5.2. Variables de estudio de las respuestas arquitectónicas en condiciones de ingravidez**

A partir de las teorías que han sido descritas con anterioridad se explicará las relaciones establecidas entre ellas para determinar una serie de criterios a evaluar en los siguientes párrafos. Para el análisis de estas variables en los casos de estudio, se utilizarán los textos escritos por sus propios autores, además de imágenes propuestas por ellos mismos o por terceros.

### **5.2.1. Orientación, movimiento y recorrido**

Debido a las conclusiones de Fauquet & Okushi (1991) y Kitmacher (2002), se ha encontrado necesario evaluar las respuestas de los casos de estudio a los cambios en el movimiento, el recorrido y la orientación en un contexto de ingravidez. Estas respuestas son

distintas en las dos escalas seleccionadas, principalmente debido a la selección de la estrategia de la gravedad artificial. Como se puede notar en lo descrito por Seedhouse (2013) respecto a la forma de generar gravedad artificial, la rotación de un volumen para generarla presentará repercusiones en la geometría total. Esto presentará repercusiones en la orientación, el movimiento y el recorrido. La teoría a utilizar para afrontar esto será la de Hall (1995), pues habla acerca de las direcciones a considerar al recurrir a la gravedad artificial.

### **5.2.2. *Espacio arquitectónico e ingravidez***

La importancia de esta variable ha sido principalmente resultado de lo encontrado en los textos de Linares de la Torre (2015, 2014). Debido a que la espacialidad en la arquitectura terrestre ha sido influenciada por el entendimiento de la gravedad, resulta de interés para esta investigación la evaluación de la influencia de la ingravidez en el espacio arquitectónico de hábitats espaciales. Por lo entendido de sus textos, se puede deducir que el entendimiento de la gravedad ha afectado a la espacialidad de la arquitectura en la relación de interior-exterior y la geometría. También es posible estudiar esta variable en base a lo que menciona Doule (2014a) sobre la influencia de la ingravidez en la geometría del hábitat. La geometría bajo estas condiciones responde a parámetros que permitan la habitabilidad en su interior. Además, debido a que la gravedad artificial es una respuesta al fenómeno de la ingravidez, se evaluará cómo repercuten las estrategias empleadas para la generación de la gravedad artificial en el espacio arquitectónico.

### **5.2.3. *Sistemas estructurales***

Häuplik-Meusburger & Bannova (2016) describieron que las estructuras necesarias para la construcción de hábitats espaciales deberían cumplir ciertos requerimientos para su factibilidad en condiciones de ingravidez. Los datos acerca de las estructuras<sup>4</sup> que harán posible la construcción y mantenimiento de los casos de estudio serán evaluados a partir de estos requerimientos. Estos incluyen el aspecto de la presurización y también el de integración de sistemas. Además, las arquitectas también evalúan la pertinencia del material para la estructura, por lo que también será una variable a tomar en cuenta. Asimismo, en base a Porter & Bradley (2016) se evaluarán los criterios de ingeniería relacionados a la habitabilidad tomados en cuenta para la elaboración de la estructura de los hábitats espaciales electos.

#### **5.2.4. *Sistemas de habitabilidad***

Para estudiar la habitabilidad es importante conocer los sistemas que resuelven las necesidades básicas. Por un lado, como menciona Hanford (2004), lo que posibilita la habitabilidad en proyectos como la ISS es el sistema ECLSS. Este permite el ideal al acceso a aire, comida, temperatura, desechos, agua y limpieza, los cuales serán variables a analizar respecto a la habitabilidad de los dos primeros casos de estudio. Esto se debe a que, tanto como la ISS, cumplen con el nivel de desempeño según Lockard (2014). Por otro lado, la NASA (1977) evalúa la habitabilidad de construcciones del nivel de adaptación en base a la manera de resolver gravedad artificial, atmósfera, comida y agua, estrés, diseño ambiental y la relación con la vastedad del espacio. Estas serán las variables a tomar en cuenta para los dos siguientes casos de estudio, los cuales cumplen también con el nivel de adaptación.

### **6. Análisis de las Respuestas Arquitectónicas en Condiciones de Ingravidez**

#### **6.1. Omicron – Phari Base**

El interés de analizar ambos casos simultáneamente radica tanto en la similitud en escala como en las diferencias que se pueden encontrar debido a sus distintos emplazamientos. Omicron se mantendrá en órbita alrededor de la Tierra mientras que Phari apunta a establecerse en Phobos, el satélite marciano. Esta diferencia marcará grandes variaciones entre las estrategias proyectuales que respondan al fenómeno de la ingravidez, pues las respuestas a establecerse en órbita terrestre frente a establecerse sobre una superficie son evidentemente distintas. Además, la distancia respecto a la Tierra también repercutirá en el diseño de estos proyectos principalmente en estrategias de habitabilidad, aunque esto no significa que exclusivamente en estas.

##### **6.1.1. *Orientación, movimiento y recorrido***

#### **Omicron**

Uno de los principales postulados que fueron de utilidad para determinar la necesidad de la inclusión de la verticalidad local en Omicron fue que el cuerpo humano se adapta a la microgravedad después de unos días. Después de ese tiempo la necesidad de conceptos como muros, techos o pisos desaparece. Por esta razón, se ve irrelevante la inclusión de una verticalidad local para este proyecto (Doule et al., 2011). Debido a que el objetivo del

proyecto es explotar las experiencias en condiciones de microgravedad, el optar por esta decisión ayudará enormemente a brindar un mayor campo de exploración a la arquitectura en el contexto de ingravidez. Este punto de partida ya determina un distanciamiento frente a la arquitectura terrestre. En esta, la obligatoriedad de contar con por lo menos el piso es innegable, mientras que liberación de esta restricción servirá como punto de partida para detonar próximas decisiones proyectuales. De esta forma, el único módulo en el que se aprovechan estas características es en el módulo habitable. Posiblemente no se consideró esto necesario en los otros 2 módulos porque apuntan más a fines prácticos que a potenciar la experiencia de la ingravidez.

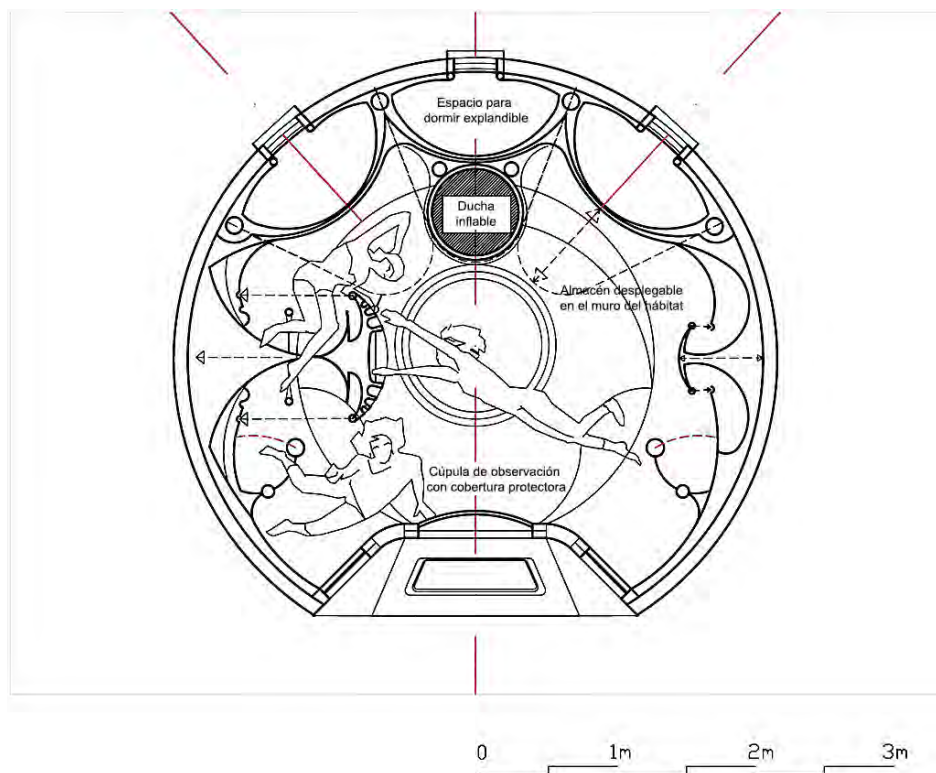
Ya que existe una falta de verticalidad local en el módulo habitable, el arquitecto debe utilizar estrategias que organicen el espacio interior del hábitat con el fin de que pueda ser utilizado sin ningún problema. Por esta razón, la disposición de las herramientas requeridas adquiere importancia. El cuerpo humano, al no encontrar una verticalidad en el diseño arquitectónico, buscará objetos de referencia para desempeñar sus actividades. Omicron entiende esto y lo resuelve adecuadamente: sus espacios están definidos por las actividades y ello organiza el sentido de dirección humano. Por ejemplo, el telescopio servirá como objeto de referencia para la actividad de observar cuerpos del exterior. La posición y dirección del telescopio determinará también una direccionalidad para el usuario al momento de realizar la actividad. El no contar con una direccionalidad global permite que se pueda utilizar más eficientemente un volumen en base a un programa y también provee una textura capaz de alcanzar altos niveles de eficiencia (Fauquet & Okushi, 1991).

Asimismo, es destacable la manera en la que el movimiento dentro de este hábitat se desarrolla. Aprovechando la condición de ingravidez, el interior del módulo habitable es completamente curvo. A diferencia de la ISS, la cual cuenta con interiores de sección cuadrada, Omicron se enfoca plenamente en potenciar la experiencia del movimiento en condiciones de ingravidez mediante la curvatura del espacio. Esto se da gracias a la exploración de un interior más amoldado a los requerimientos programáticos. Además, la liberación de la verticalidad local le permite al diseño del módulo habitable presentar diversas relaciones entre las actividades que suceden dentro de este. El módulo se diseña con las herramientas a utilizar en los bordes curvos y deja el centro totalmente libre para facilitar el movimiento dentro de este. Así, los usuarios serán capaces de experimentar la ingravidez al desplazarse entre actividades a realizar dentro del módulo. Otro punto interesante a resaltar es que el desplazamiento dentro del módulo se generará a partir del impulso generado al

aplicar fuerza sobre alguna superficie. Esta sensación de levitación será insólita e inigualable para el usuario, pues en ninguna circunstancia es posible replicar esta acción en la superficie terrestre – al menos no durante tanto tiempo.

## Figura 21

### *Sección transversal de módulo habitable*



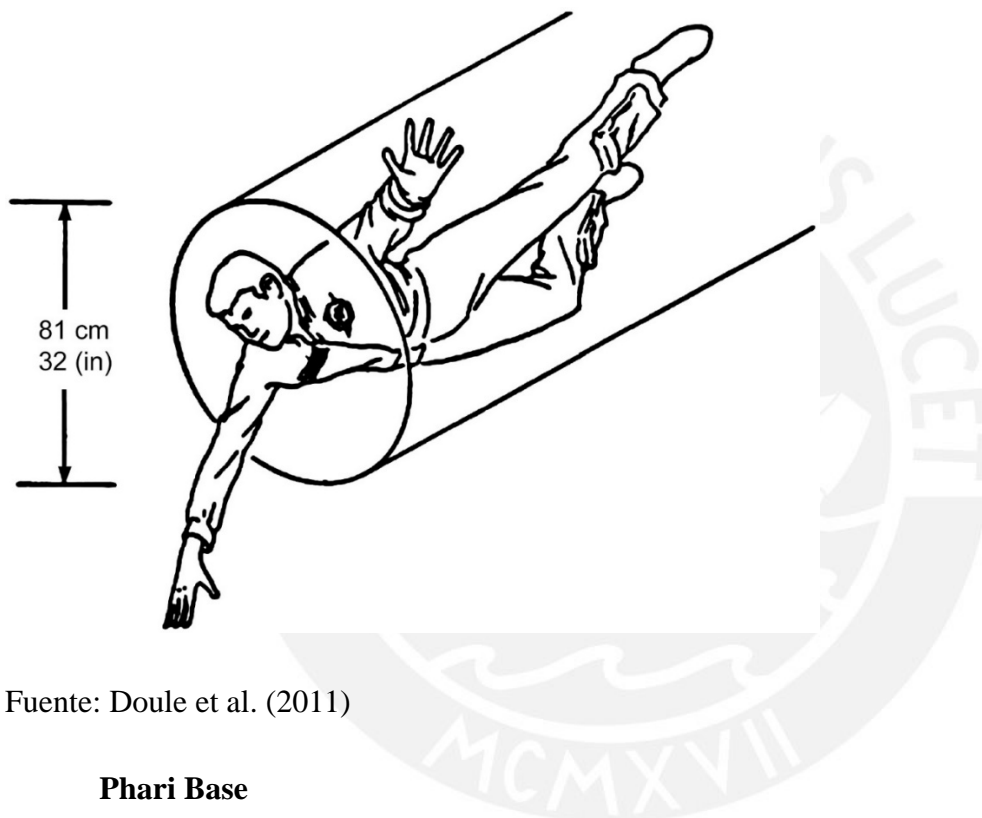
Adaptado de Doule et al. (2011)

Por otro lado, el recorrido entre los módulos de este hábitat se desarrolla longitudinalmente. Esto se debe a que existe un cilindro virtual de vacío que atraviesa el largo de todo el hábitat. Este cilindro virtual enriquece el proyecto al brindar una delimitación virtual entre recorrido y área útil, lo cual es una experiencia única, pues solamente es posible experimentarlo en condiciones de ingravidez. El usuario 'levitará' a través de todo el hábitat para recorrerlo en su totalidad. Así, como se ve, la elección de un cilindro virtual permite que el usuario pueda experimentar y utilizar el espacio en 360°. Para la determinación de las dimensiones de este cilindro, Doule (2011) estudió las dimensiones de paso en condiciones de ingravidez determinadas por la NASA. Asimismo, al mantener este esquema de recorrido lineal, el cambio de verticalidades entre módulos se torna más procesable para el ser humano. A través

de compartimentos que sirven a modo de esclusas, el cambio entre los módulos se reconoce inmediatamente. Esto también ayuda a procesar de mejor manera la diferenciación de funcionalidades entre cada módulo al recorrer el hábitat. Por último, al momento que se vea necesario el agregar más módulos para expandir la capacidad del hábitat, el recorrido dejará de ser solamente longitudinal y también existirán relaciones transversales entre los módulos.

## Figura 22

*Dimensión de paso mínima acorde a los estándares de la NASA*



Fuente: Doule et al. (2011)

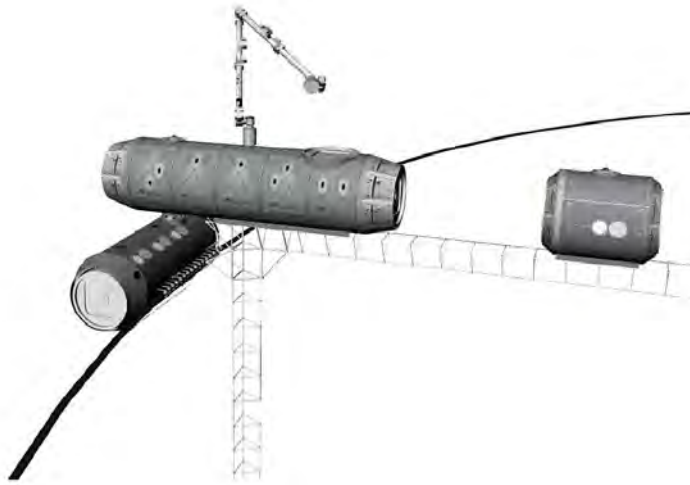
## Phari Base

La situación en Phari es distinta. En primer lugar, al estar sobre la superficie de Phobos, los diseñadores sí encontraron necesaria la inclusión de la verticalidad local. Esta es inherente al emplazarse sobre una superficie, pues esta superficie ya determina un abajo y con ello también un arriba. Sin embargo, esto no significa que se encuentren bajo interacciones gravitatorias. La experiencia de relacionarse con un proyecto con verticalidad local en una superficie fuera de la Tierra y bajo condiciones de ingravidez es naturalmente distinta a cualquier proyecto terrestre o cualquiera que se encuentre alejado de cualquier superficie. Esta verticalidad local también relacionada con el concepto de piso resulta en un proyecto con varios niveles, tal como un edificio terrestre. Los niveles útiles de Phari en su planteamiento inicial pueden llegar hasta 15.

No obstante, la verticalidad local de este proyecto no se limita solamente a la perpendicularidad al suelo, aunque sí en los primeros 4 módulos. Por ejemplo, la centrífuga es un módulo propuesto para facilitar los ejercicios físicos de los astronautas mediante la generación de gravedad artificial. Debido a que esta rota alrededor del eje vertical del hábitat, la verticalidad se trabaja de una manera distinta. La gravedad artificial empuja a los astronautas hacia el borde de la centrífuga. Por esta razón, la verticalidad local, en vez de ser perpendicular al suelo, necesita ser paralela al suelo. Así, los objetos dentro de este módulo, tales como las caminadoras, contarán con la verticalidad orientada paralelamente a la superficie de Phobos. Además, dentro de la centrífuga existirá un sistema de colores que advierte este cambio de verticalidad: para orientarse adecuadamente, una base del cilindro será de color verde para indicar la dirección de rotación del módulo y la otra base será roja. El resto del cilindro mantendrá un color gris oscuro y la iluminación del 'techo' dará una sensación de orientación (Bishop et al., 2017). Otro caso especial también es el toro que rodea al módulo de comando y que cumple la función de invernadero. Puesto que las plantas escogidas para sembrar necesitan de gravedad para crecer adecuadamente, este toro apunta a generar gravedad artificial para asegurar su crecimiento. Las plantas estarán rotando alrededor de la circunferencia directriz del toro con el fin de generar gravedad en la tierra en la que están sembradas. De este modo, el usuario se encontrará en el centro del ambiente y rodeado por plantas rotando entorno a él.

### Figura 23

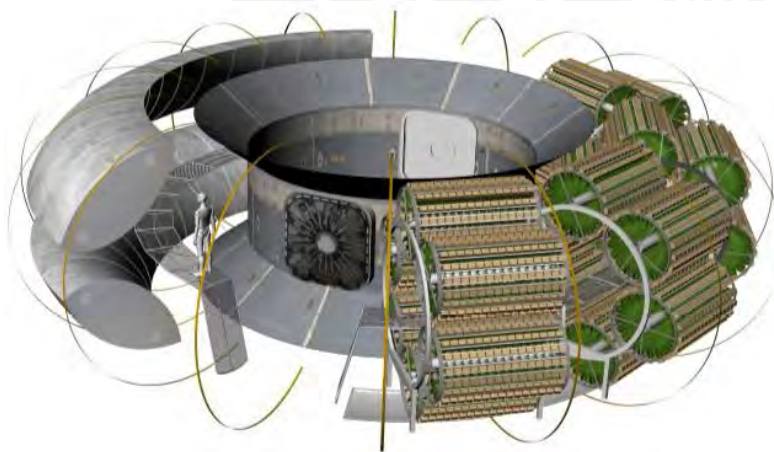
*Centrífuga y puerto espacial acoplados*



Fuente: Bishop et al. (2017)

### Figura 24

*Arquitectura de invernadero toroidal*



Fuente: Bishop et al. (2017)

Todos los módulos de Phari cuentan con una sección circular. El movimiento dentro de los cuatro primeros módulos será primordialmente alrededor de los bordes. Es decir, la distribución del programa y mobiliario en estos es radial. Sin embargo, no pasa lo mismo en la centrífuga, pues la gravedad artificial permite un moverse regularmente como se haría en cualquier superficie en la Tierra. En esta zona, el usuario se podrá desplazar por toda la

longitud del módulo gracias a la gravedad artificial. Por otro lado, en el resto del proyecto, la experiencia de 'levitar' en los bordes de espacios con verticalidad local es de interés. Los usuarios experimentarán el movimiento ingrávigo en un contexto familiar al terrestre. El mobiliario y la arquitectura estarán dispuestos tal como en la Tierra, pero el usuario se verá enfrentado a la ingravidez. Evidentemente, el movimiento en ingravidez seguirá basándose en impulsos que serán apoyados por el propio mobiliario dispuesto en los bordes de los espacios. Sin embargo, en el invernadero, el desplazamiento de los astronautas no puede ser apoyado por las plantas. Para ello, se vio necesaria la inclusión de barras que sirvan de soporte para los impulsos de los astronautas. Así podrán realizar las actividades de mantenimiento y supervisión de los sembríos sin la necesidad de mantener contacto con ellos.

Al igual que en Omicron, el recorrido entre los 4 primeros módulos en Phari cuenta con un eje cilíndrico vertical. Gracias a la ingravidez y a la verticalidad local, el usuario percibirá el recorrido a través de los módulos como uno de ascensión, pero sin la necesidad de escaleras o elevadores, sino solo barras que ayuden a impulsarlos, las cuales estarán distribuidas alrededor del cilindro. Mediante ese cilindro virtual, la arquitectura reparte a los ambientes que se encuentran alrededor de este. Como se puede ir esbozando, el esquema de recorrido a través de Phari es muy simple y claro: un cilindro virtual vertical y circunferencias rodeándolo en cada nivel. Ello facilitará el reconocimiento inmediato de cada uno de los ambientes y el éxito de cada una de las misiones a completar en la superficie de este satélite.

En contraste, para acceder a la centrífuga, el cambio de ambiente necesita ser distinto principalmente debido al procedimiento de pasar de ingravidez a gravedad artificial. Para ingresar a la centrífuga, se necesitan dos unidades de apoyo anteriormente: el apoyo de lanzadera y el puerto espacial. El apoyo de lanzadera iniciará su desplazamiento a partir del eje del hábitat, el cual se realizará a través de una armadura triangular metálica que cumplirá la función de riel hasta acoplarse adecuadamente con el puerto espacial. En este caso, el recorrido para acceder al puerto espacial no será perpendicular a la superficie de Phobos, sino paralelo a esta y mediante un sistema de rieles automatizados. El acceso a la centrífuga sí será perpendicular a la superficie de Phobos y se realizará luego de un procedimiento de adaptación hasta que se alcance la velocidad ideal para la generación de la gravedad artificial.

### 6.1.2. *Espacio arquitectónico e ingravidez*

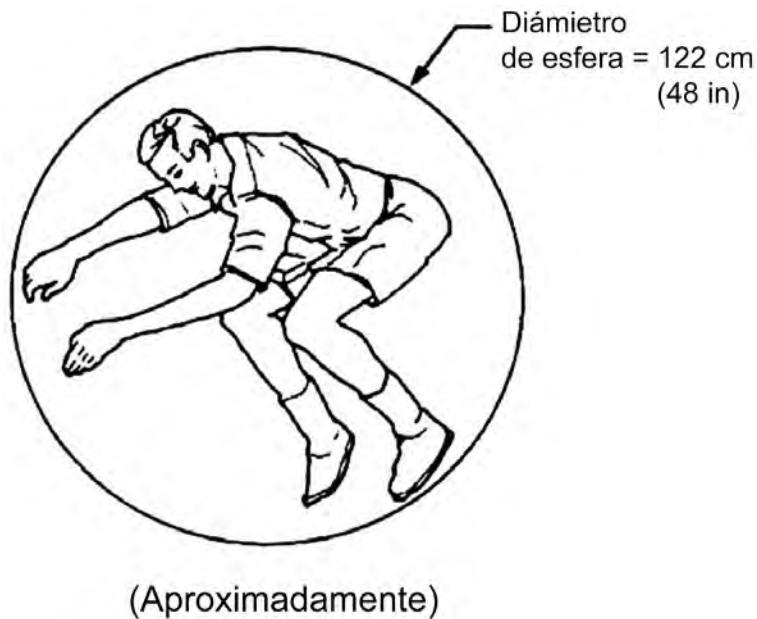
#### **Omicron**

Omicron es un hábitat compuesto de 3 partes distribuidas longitudinalmente en base al cilindro virtual previamente mencionado. La primera parte, la nave Kipler es dedicada netamente a la navegación, por lo que el espacio estará basado en la optimización del manejo del proyecto: cuenta con verticalidad local y ventanas para visualizar la trayectoria. Luego se establece una conexión con el módulo EVA – *extravehicular activities*. Al igual que el anterior, está enfocado a la optimización de la actividad que se realizará en esta. Ahí los habitantes se prepararán para realizar caminatas espaciales. Es decir, vestidos con el traje de astronautas, los usuarios seguirán los protocolos necesarios para salir del hábitat de la manera más segura posible. Este módulo está obligado a cumplir al pie de la letra todas las reglamentaciones impuestas. Por ello, es completamente cerrado y solo contiene la escotilla. El único espacio libre para la especulación de una nueva espacialidad en condiciones de ingravidez es el módulo habitable.

Ahora bien, en la arquitectura terrestre es muy clásica la representación de un espacio arquitectónico mediante el dibujo de un rectángulo. Esto se debe a que ello responde a la representación de las partes que comúnmente construyen el espacio: techo, piso y paredes. En otras palabras, como da a entender Linares de la Torre (2015), la verticalidad y horizontalidad que ha sido resultado del entendimiento de la gravedad. Como se ha mencionado anteriormente, al tomar la decisión de no incluir a la verticalidad local en el módulo habitable de Omicron, estos componentes se tornan prescindibles. Por ello, incluso las primeras percepciones del espacio arquitectónico cambian. Siguiendo los estándares de la NASA, Doule (2011) menciona que el movimiento humano en un entorno ingrávigo define un espacio esférico. En otras palabras, lo óptimo para la comodidad del usuario frente a la microgravedad es partir de un espacio arquitectónico esférico en vez de uno cuadrado.

## Figura 25

*Dimensión mínima para adecuado control de movimiento*



Fuente: Doule et al. (2011)

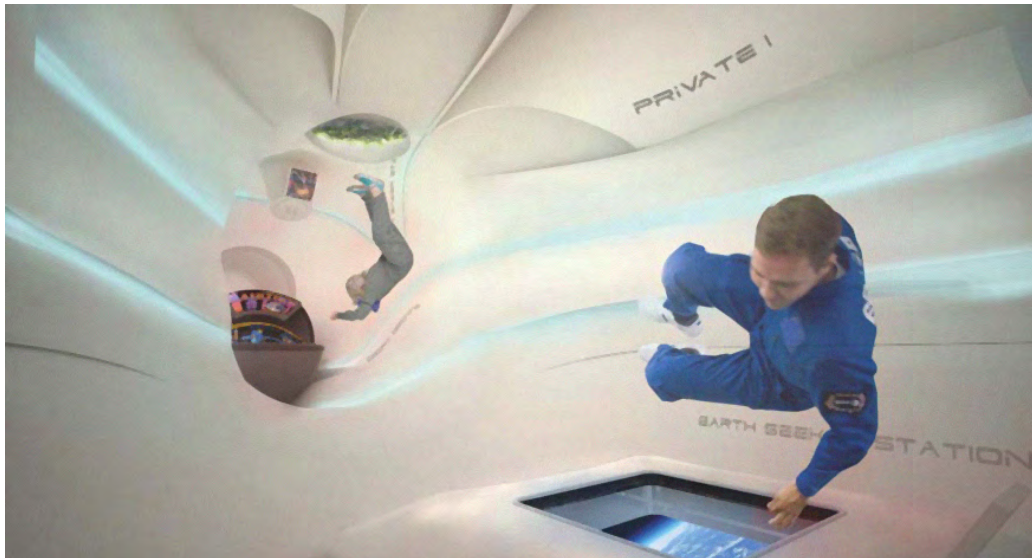
Partiendo de esta premisa, la geometría del módulo habitable responde de distinta forma a las necesidades humanas respecto a cómo lo haría en la arquitectura clásica terrestre. Evidentemente, una esfera no se puede apilar o distribuir tal como se hace con los cuadrados o rectángulos. El proyecto resuelve este problema al deformar la primera idea de la esfera y consolidar un interior 'orgánico'. Esto se realiza en base a lo público y privado dentro de este espacio y el uso efectivo y flexible del interior del espacio, lo cual enfatiza el libre movimiento que solo se puede experimentar en condiciones de ingravidez (Doule et al., 2011).

Entonces, la espacialidad en este caso no es resultado de un enfrentamiento a la gravedad. Solamente en el espacio sideral es posible enfocar una espacialidad que responda primordialmente a las actividades humanas y a su movimiento. De modo que el espacio arquitectónico no se ciñe a el enfrentamiento de lo vertical y lo horizontal. Por el contrario, el espacio es amoldado no por una fuerza inminente, sino por el ser humano. Además, debido a la ausencia de los efectos de la gravedad, las actividades a realizar tampoco requieren estar ligadas al suelo. El usuario será capaz de utilizar el espacio de este hábitat en su totalidad y no restringirse a los límites de la motricidad humana que son definidos por la gravedad. La

relación entre espacio arquitectónico y la actividad del ser humano se vuelve más cercana, pues uno es resultado del otro y viceversa.

**Figura 26**

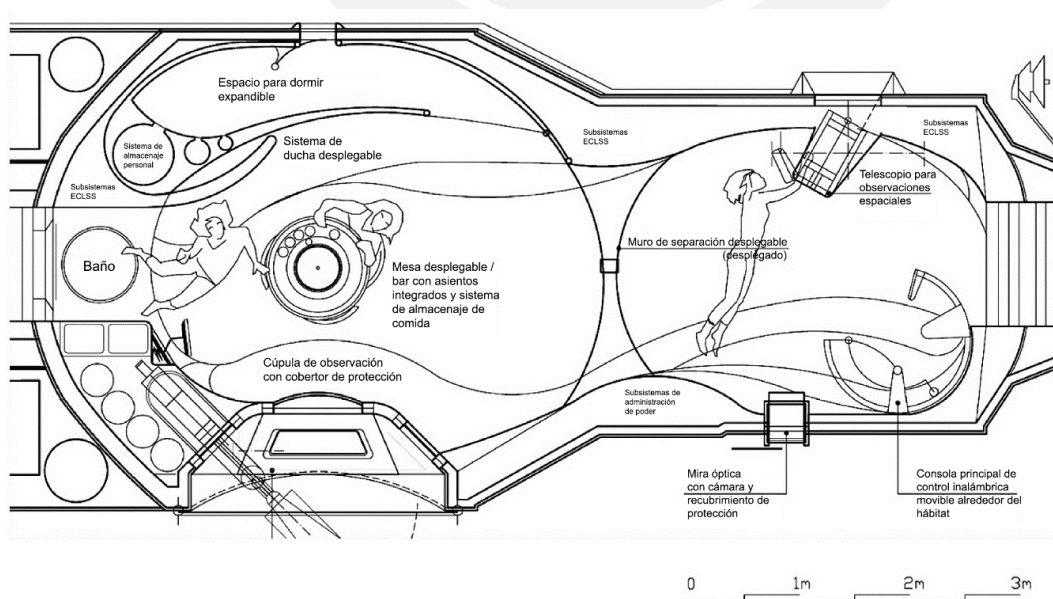
*Espacio interior del módulo habitable de Omicron*



Fuente: Doule (2014)

**Figura 27**

*Sección detallada de interior del módulo habitable*



Adaptado de Doule et al. (2011)

Según Porter & Bradley (2016), las ventanas en la arquitectura espacial son consideradas una estructura débil frente a la presión y peligrosas frente a la radiación, pero necesarias para una adecuada habitabilidad. Por esta razón, en el módulo habitable solo existe la cúpula de observación, una mira y un telescopio como forma de relación con el exterior. En otras palabras, el espacio interior es completamente hermético con el fin de asegurar la habitabilidad. Sin embargo, lo interesante de esta cúpula es que siempre estará orientada hacia la Tierra, pues Omicron viajará alrededor de la órbita terrestre. La relación con el exterior gracias a la cúpula será completamente visual y enlazada al planeta. En la ISS también se ha diseñado una cúpula designada a operaciones exteriores y esta provee vistas espectaculares de la Tierra y otros cuerpos celestes (NASA, 2015). Puesto que las características son similares, las visuales hacia el planeta de origen de los usuarios serán ideales para mejorar la experiencia que el proyecto plantea brindar al usuario.

### **Figura 28**

*Alexander Gerst observando la Tierra desde la cúpula de la ISS*



Fuente: NASA (2015)

### **Phari Base**

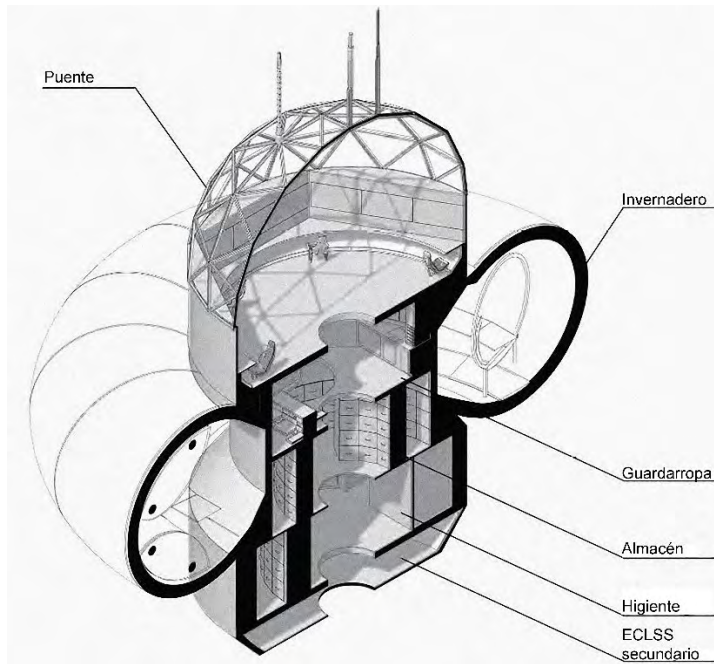
La espacialidad del Phari se define por 4 módulos cilíndricos agrupados verticalmente y la centrífuga alejada de este agrupamiento para que sea posible la generación de gravedad

artificial en este último. Adicionalmente, existirá un cilindro virtual que atravesará estos cuatro módulos y que permitirá un recorrido eficiente a través de todo el hábitat. Como se ha mencionado anteriormente, Phari es un proyecto que ha optado por la estrategia de diseñar en base a una verticalidad local. Esto también generará distintas repercusiones en la proyección de los espacios arquitectónicos.

Una de las principales particularidades a resaltar de los espacios de este proyecto es el generado por el domo geodésico en el módulo de comando. Este está diseñado para observaciones y asistencia de control de vuelo. Por esta razón, en la base del domo se encuentra la cabina de comando y el techo es una semiesfera completamente vidriada y estructurada gracias a barras metálicas. Con ello, el astronauta dentro de este espacio será capaz de poseer un control visual completo de lo que pasa alrededor del proyecto. La experiencia de la espacialidad de una cúpula en condiciones de ingravidez es naturalmente también distinta. En lugar de utilizar solo el círculo de la base de la semiesfera debido a las restricciones de la gravedad, esta se puede experimentar en todo su volumen. El usuario será capaz de realizar distintas actividades en un volumen tridimensional sin ser restringido a una superficie circular por la gravedad. Debido a que esta cúpula es vidriada, la relación con el exterior será mucho más cercana, pues el usuario, al recorrer el volumen de la cúpula, se verá rodeado de una superficie semiesférica transparente como límite de interior y exterior. La experiencia de apreciar la superficie de Phobos, Marte, otros cuerpos celestes y el espacio gracias a esta cúpula será insólita.

## Figura 29

### *Diseño de módulo de comandos*

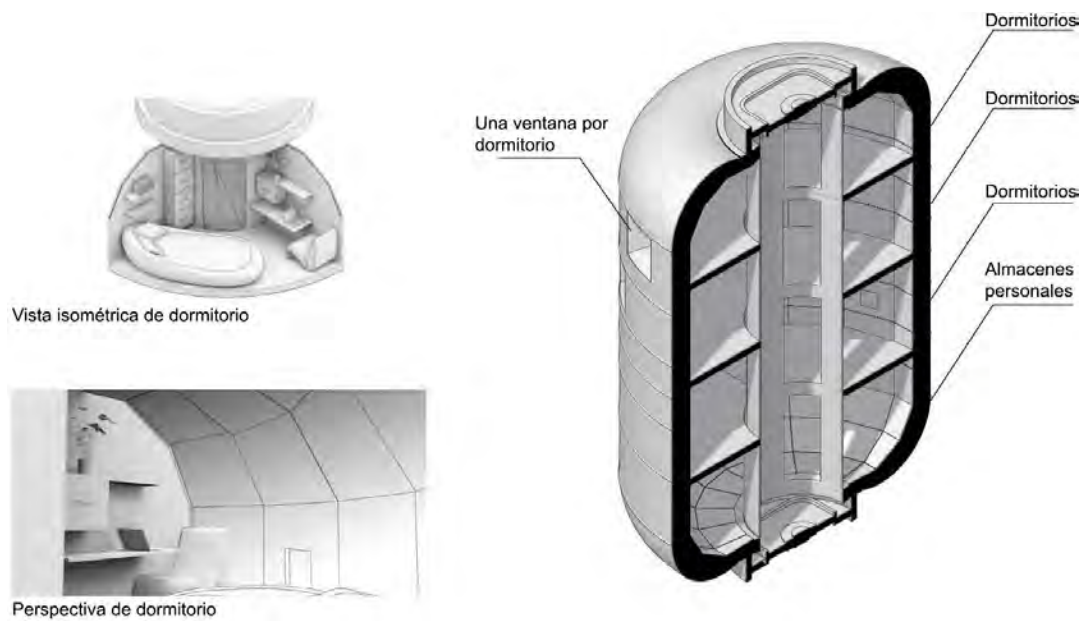


Adaptado de Bishop et al. (2017)

Por otro lado, otro módulo a resaltar es el de las habitaciones. Estos se encontrarán justo bajo el módulo de comando. Serán generados por un módulo inflable llamado Bigelow B330. Además, todo el mobiliario será inflable y pequeño para que sea posible acondicionarlos sin ningún problema (Bishop et al., 2017). Los dormitorios serán dispuestos alrededor del hábitat. Debido a esto y al hecho de que el módulo es un cilindro inflable, los espacios elegidos para cumplir la función de los dormitorios son curvos. Además, en los dormitorios superiores, el techo y la pared se fusionan en un solo elemento, con lo que la percepción del espacio es distinta. Para Porter & Bradley (2016), el diseño basado en líneas curvas sin límites crea una ilusión de un volumen mucho más grande, pues las dimensiones aparentan ser infinitas dentro del espacio. También será beneficioso para zonas con pocos recursos de construcción disponibles. Por último, los espacios curvados brindarán la impresión de dormitorios más grandes de lo que son y ello será beneficioso para los usuarios, pues no se sentirán confinados o hacinados y facilitará su descanso.

### Figura 30

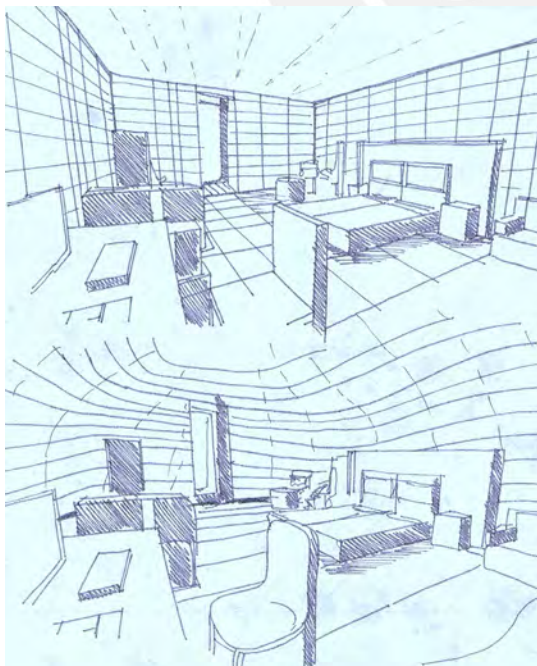
#### *Diseño de módulo de habitaciones*



Adaptado de Bishop et al. (2017)

### Figura 31

#### *Comparativa entre espacio ortogonal y espacio curvado*

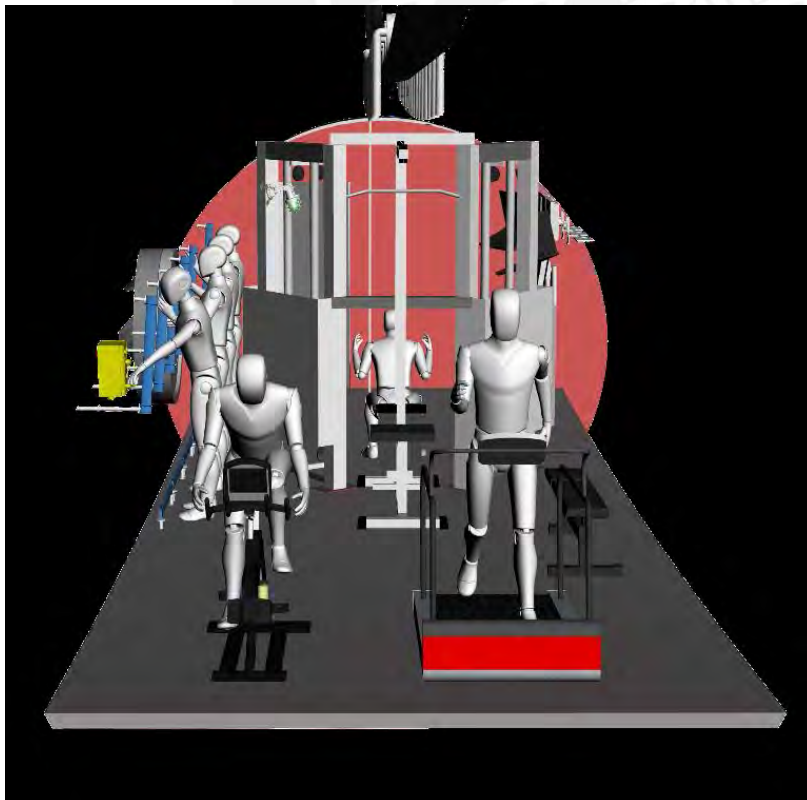


Fuente: Porter & Bradley (2016)

Asimismo, la generación de la gravedad artificial presenta influencias en el cuerpo humano al realizar movimientos. Es posible encontrar respuestas visuales, propioceptivas y perceptivas que causen respuestas simpáticas no deseadas, por lo cual es necesario resolver estos problemas o no será posible la habitabilidad (Newsom, 1972). Por ello, la centrífuga se involucra a resolver esta complicación mediante el diseño de su espacio arquitectónico. Como se ha mencionado anteriormente, la direccionalidad se resolvía mediante colores. Por otro lado, los pisos del módulo serán ligeramente curvados respecto a la curvatura de la base. Esto ayudará a prevenir la percepción de inclinaciones y declinaciones y promover la sensación de un ambiente plano (Bishop et al., 2017). En esta situación, la geometría del espacio responde a la necesidad de adaptar la percepción humana a la deformación geométrica que se genera a partir de las fuerzas inerciales necesarias para la gravedad artificial. Además, el módulo se relaciona con el exterior mediante pequeñas ventanas que ayudan a los astronautas a reconocer el movimiento que están experimentado para así eliminar cualquier respuesta simpática no deseada.

### Figura 32

*Vista interior de centrífuga*



Fuente: Bishop et al. (2017)

### 6.1.3. *Sistemas Estructurales*

#### **Omicron**

El sistema estructural de Omicron se desarrolla en base a cuatro puntos que responden al mantenimiento de la vida humana en un contexto bajo condiciones de ingravidez. En primer lugar, resuelve el soporte de todas las cargas durante el lanzamiento y las operaciones en órbita. En segundo lugar, protege a los tripulantes de los impactos de los micro meteoritos y la radiación cósmica. En tercer lugar, absorbe las fuerzas de la presión interior. Por último, mantiene una temperatura estable y adecuada al interior del hábitat (Doule et al., 2011). Además de hacer posible su adecuado lanzamiento, estos objetivos dan pie al mantenimiento adecuado de este hábitat durante largos periodos y el cumplimiento de su objetivo: la experiencia en condiciones de ingravidez.

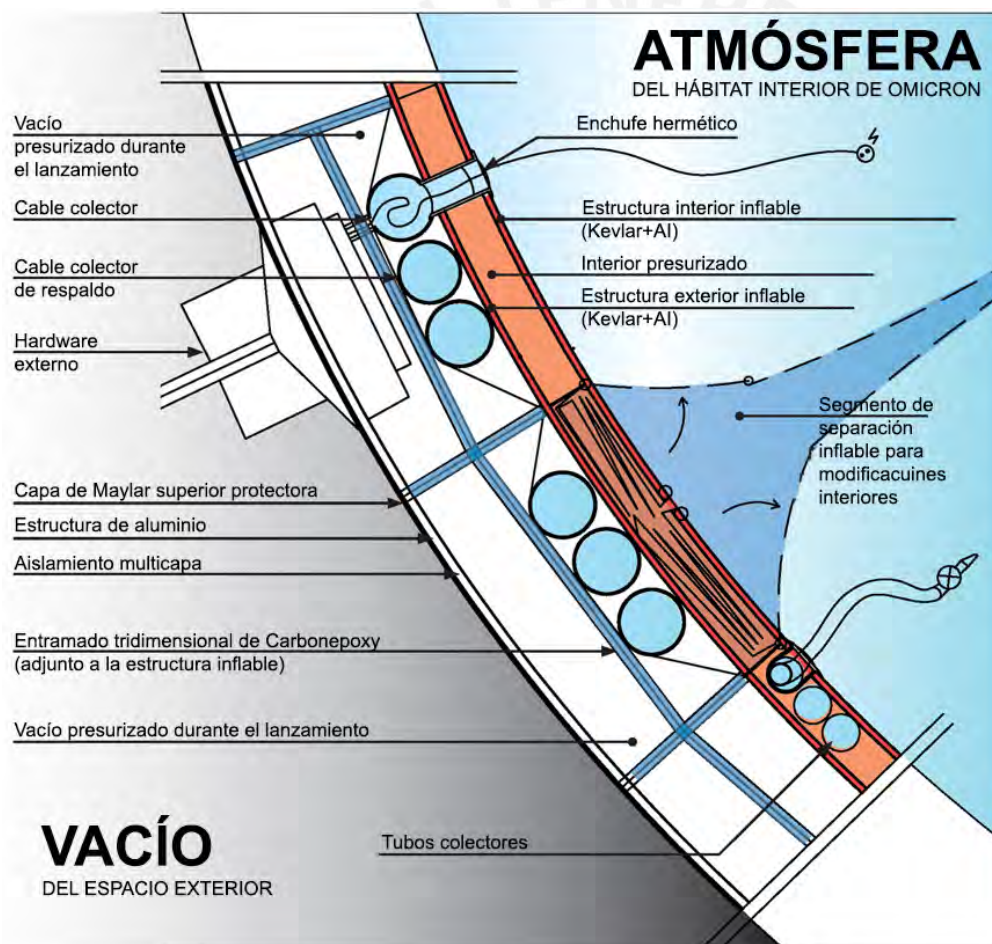
Una de sus bases se encuentra en el sistema estructural prefabricado de aluminio de la estación Salyut, lanzada por la Unión Soviética en 1982. La adaptación de los sistemas de esta estación a Omicron tomará como parámetros los esfuerzos y deformaciones de la estructura tanto en el interior como en el exterior del hábitat. Se determinarán los patrones estructurales óptimos tanto como las geometrías y dimensiones ideales para cumplir estos parámetros. Este análisis se servirá de softwares especializados. Ello garantizará el éxito de la correcta respuesta de la estructura frente a su lanzamiento al espacio sideral al mismo tiempo que su protección frente a situaciones externas, tales como golpes de micro meteoritos.

Por otro lado, Omicron adapta la tecnología de sistemas inflables al sistema estructural de armazón de aluminio del Salyut. Este sistema híbrido hace posible contar tanto con la rigidez que brinda los sistemas de aluminio como con la adaptabilidad a distintos impactos de los sistemas inflables. La adaptación entre el sistema de aluminio y el sistema inflable se definirá de la siguiente manera: el armazón de aluminio será la capa externa, luego existirá una capa de aire que dará la forma a la capa inflable, la cual será la interior. Es necesario mencionar que dentro de esta capa de aire se encontrará un entramado tridimensional de Carbonepoxy que ayudará a estabilizar la forma de la capa inflable. Esta capa ha sido diseñada para cumplir los todos los requerimientos del usuario en el hábitat. Al respecto, Doule et al. (2011) mencionan dos materiales que compondrán esta capa inflable: tereftalato de polietileno y poliparafenileno tereftalamida – membrana de Mylar y Kevlar como se conocen

comúnmente. La principal función del primero es servir como material reflectivo contra la radiación. Es conveniente su uso porque, al ser derivado del plástico, su flexibilidad y capacidad de amoldamiento serán altas. El segundo material es utilizado mayormente a manera de textil. Debido a su capacidad de resistencia a impactos y flexibilidad, se aplicará en Omicron como una capa de unos cuantos milímetros de espesor para soportar las presiones al interior del hábitat. Naturalmente, estos no serán los únicos materiales que compondrán la capa inflable.

### Figura 33

*Detalle en sección de parte del muro del módulo habitable*



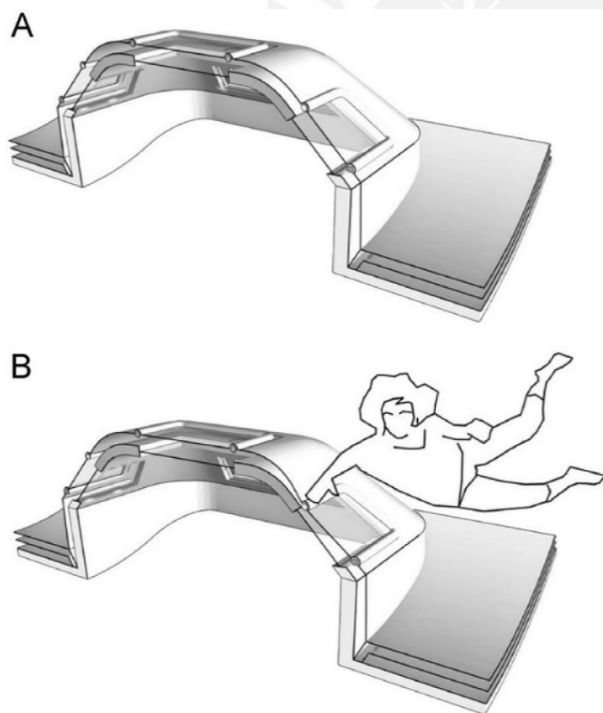
Adaptado de Doule et al. (2011)

Uno de los principales resultados de este diseño estructural es la conservación de una temperatura estable al interior del hábitat. Gracias a este, se pierde poco calor hacia el exterior; es decir, la energía calorífica no sale del hábitat y se mantiene estable. Además,

debido a que las condiciones de ingravidez no permiten la transmisión de calor por convección, el vacío entre la capa de aluminio y la capa inflable ayudarán a la regulación de esta (Doule et al., 2011). Este espacio también permitirá el amortiguamiento de los golpes de los usuarios con el interior del módulo. Asimismo, puesto que el objetivo del proyecto no es con fines investigativos, sino más bien de recreación, los usuarios no serán astronautas experimentados. Por esta razón, es necesario prever que estos no cuentan con un entrenamiento ni experiencia acerca del movimiento en condiciones de ingravidez. Esto hace necesaria la protección frente a cualquier colisión involuntaria del usuario, para lo cual se ha previsto un diseño de junta especial del vidrio con la capa inflable capaz de deformarse adecuadamente en respuesta a los impactos.

### Figura 34

*Respuesta del sistema estructural del hábitat a impacto de usuario*



Fuente: Doule et al. (2011)

### Phari Base

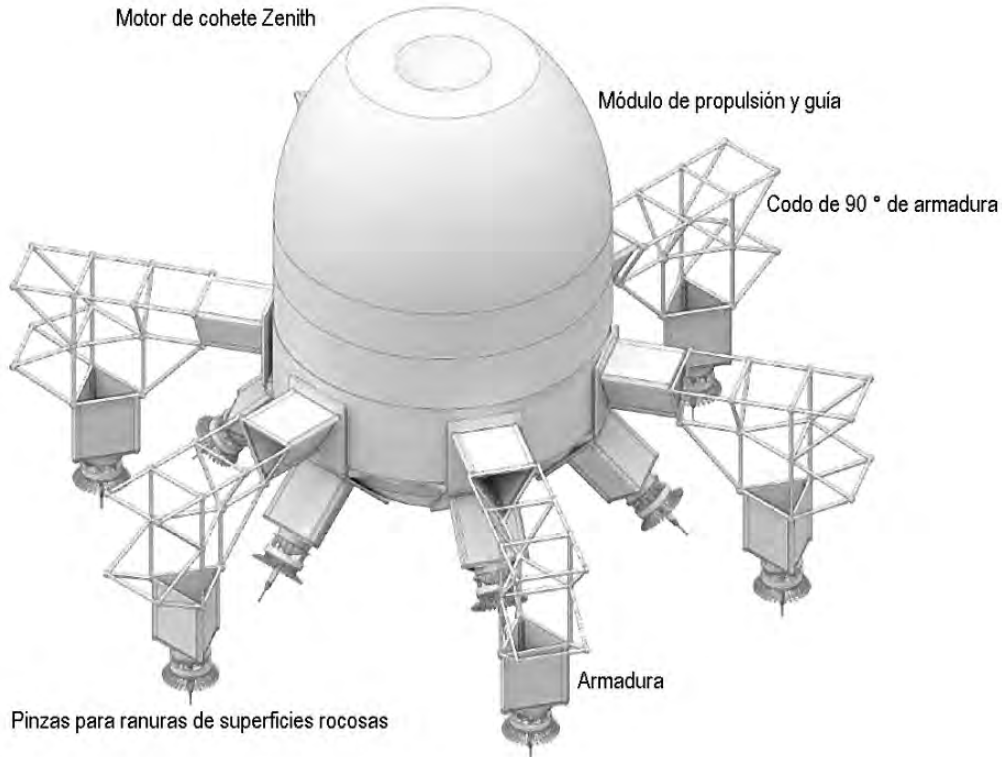
Uno de los principales factores que posibilita la existencia de Phari Base en Phobos es el sistema estructural que se utiliza de anclaje a la superficie de esta luna. El *Truss Landing Assembly* – o TLA por sus siglas – es un componente que se diseñó como respuesta a la

microgravedad de esta luna. Cualquier impacto indeseado en estas condiciones lograría desplazar este hábitat si no se encuentra adecuadamente anclado a la superficie. Este componente será prefabricado y son cuatro los materiales que se consideran para su construcción: aluminio, aleación de magnesio, fibra de carbón y acero maraging. De ellos, solo la fibra de carbono es un no metal. Las variables a considerar para la elección de estos materiales son sus contenidos, resistencia a tensión, densidad, punto de fundición y su módulo de Young (Bishop et al., 2017). La importancia de estas variables radica en su capacidad de determinar el costo y tiempo de llegada a Phobos, su resistencia a la corrosión, calor y radiación, su flexibilidad y otros factores que servirán para optimizar su sistema constructivo y estructural.

De igual manera, en base a las anteriores variables mencionadas y, entre tres opciones, se escogió la de sección triangulada con capacidad plegable. Este análisis permitió el encuentro del sistema estructural con ideal resistencia a tensión y compresión respecto a su peso, lo cual es importante para hacer factible su transporte y mantenimiento en Phobos. Cabe resaltar que este sistema no será exclusivo para este componente. Por el contrario, se replicará para distintas situaciones, como para los rieles de la centrífuga. La versatilidad propuesta será conveniente en caso sea necesario el reemplazo de alguna pieza.

## Figura 35

### *Isometría del Truss Landing Assembly*



Fuente: Bishop et al. (2017)

Los cuatro módulos que componen el hábitat se unirán mediante sistemas de acople utilizados en estaciones espaciales predecesoras, el Common Berthing Mechanism y el International Docking Port. El primero será utilizado en la mayor parte de conexiones debido a que permite mayores diámetros al conectarse, pero el segundo será utilizado solamente en el puerto espacial principalmente por su universalidad, pues es el sistema utilizado en la ISS. Estos también servirán para mantener la presión ideal al interior del hábitat tanto como para evitar fugas de aire en estos encuentros. Además, son evaluados en base a la seguridad frente al desprendimiento de los módulos, así como también serán capaces de mantener el hábitat como una sola unidad y enfrentar cualquier impacto exterior como tal.

Asimismo, los cuatro módulos contarán cada uno con sistemas estructurales particulares debido a la especificidad de sus programas. Por la misma razón, serán diseñados en base a aluminio, pues este permite un diseño más específico a diferencia de los sistemas inflables. La excepción es el módulo de habitaciones: se escogió el fabricado por Bigelow, el B330,

para que cumpla esta función. Según Seedhouse (2015), la protección frente a la radiación y a los impactos de micro meteoritos es superior a los sistemas metálicos predecesores. Cuenta con 330 metros cúbicos al estar completamente inflado y también con sistemas ECLSS de control vital (pp.125,126). Su conveniencia es remarcable por sus mejoras respecto a sistemas anteriores especialmente por la comodidad que se puede brindar a los astronautas en sus propias habitaciones. Es también importante mencionar que los objetos al interior se adherirán a las superficies mediante sistemas de Velcro, ya que su gran capacidad de adherencia impedirá que estos realicen desplazamientos indeseados al interior de las habitaciones

#### **6.1.4. *Sistemas de habitabilidad***

##### **Omicron**

La mayoría de actividades de los turistas se realizarán al interior del módulo habitable de Omicron. Por este motivo, se han diseñado sistemas que permitan mantener el interior de este aislado de las extremas condiciones exteriores. Al mismo tiempo, estos sistemas permitirán la generación y mantenimiento de las condiciones ambientales adecuadas para la comodidad de la vida humana en su interior. Estos tendrán como base el ECLSS, el sistema utilizado por la ISS, el cual se adaptará para mantener a 3 personas durante una misión de 10 días a una altitud de 350 km de la superficie terrestre y se mantendrá una presión ideal para un volumen de 90 m<sup>3</sup>. La inclinación será de 51.6° respecto a la superficie terrestre y se planea mantener el hábitat de 2 a 5 años en órbita (Doule et al., 2011). Esta adaptación será necesaria, pues los parámetros de la ISS son distintos a los planteados por Omicron. La principal diferencia frente a la ISS es la duración de las misiones, pues en la ISS suelen durar alrededor de 6 meses.

Debido a la ingravidez en el la órbita baja terrestre, las moléculas que conforman el aire respirable terrestre se encuentran dispersas aleatoriamente en la infinidad del vacío del espacio. Ello también significa la imposibilidad del mantenimiento de una temperatura habitable estable en esas condiciones, pues esta carencia imposibilita la transmisión de calor por convección. Por este motivo, la temperatura al interior del hábitat será controlada gracias al aire que se generará en su interior y por sistemas de control térmico que obtengan su energía desde dos ejes de paneles solares que son perpendiculares al eje longitudinal del hábitat. El sistema de calefacción será similar a las estaciones Salyut 6 y 7 (Doule et al.,

2011). La principal diferencia se encontrará en el sistema de aislamiento gracias a las capas que conforman el hábitat habitable de Omicron explicado anteriormente. Este sistema contribuirá con la reducción en el uso de energía necesaria para mantener las condiciones térmicas ideales en el interior.

Por otro lado, el aire respirable al interior de Omicron necesita ser administrado adecuadamente por la imposibilidad de encontrarlo en las condiciones del espacio exterior. El  $O_2$  y  $N_2$ , moléculas que conforman el aire terrestre, se encontrarán congeladas en un tanque con el fin de proporcionarlo progresivamente al aplicarles calor. Además, al congelar estas moléculas, el espacio que ocupan será mucho menor. Es conveniente en una misión en la que cada  $cm^3$  tiene un alto precio. El control de humedad del aire se da gracias a una cabina de aire común complementaria, la cual también ayuda con la circulación de esta (Hanford, 2004). Asimismo, el  $CO_2$  resultante de la respiración también será aprovechado gracias al proceso de Sabatier, el cual consta en transformar el  $CO_2$  en agua y metano al agregarle moléculas de hidrógeno. El metano será desechado al exterior y el agua será utilizada para otros fines.

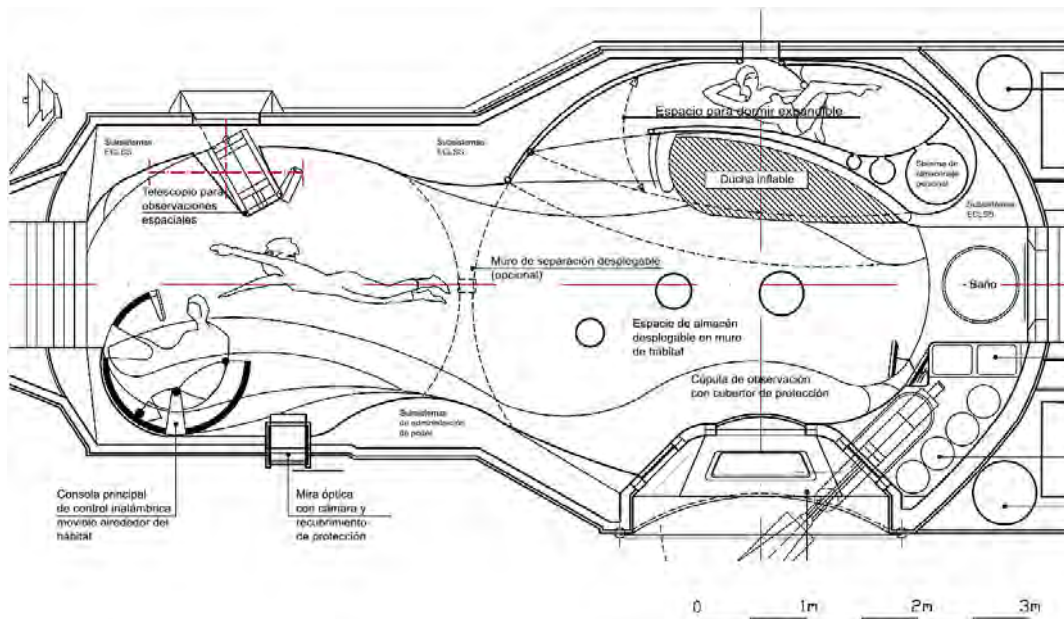
El agua potable y la comida necesarios para la misión serán provistos desde la Tierra y llegarán a la estación junto con los tripulantes. El almacenaje de estos se realizará de diversas maneras en el módulo habitable. Este módulo contará con distintos almacenes desplegados en su interior en distintas ubicaciones que permitan el fácil acceso a los recursos básicos como los alimentos u objetos personales. El almacenamiento del agua se realizará mediante diversos tanques conectados por circuitos capaces de sortear adecuadamente entre agua potable y aguas grises. El agua que no se pueda reutilizar será lanzada al exterior. A diferencia de los residuos sólidos, el agua desechada no genera un gran peligro al ser expulsada al vacío, pues los primeros son capaces de originar grandes daños al colisionar con satélites u otras estaciones espaciales. En el espacio, estas pueden alcanzar velocidades de más de 25 000 km/h. Por ello, los residuos sólidos serán llevados a la Tierra en el vehículo de abastecimiento o en un módulo orbital para ser quemados en la atmósfera terrestre (Doule et al., 2011).

Finalmente, un sistema de almacenamiento de agua no convencional para este contexto es el de la ducha inflable, relacionada al espacio de dormir. Mientras la ducha inflable esté completamente llena, menor será el volumen de este espacio, diseño solamente posible gracias a la ingravidez. Esto se debe a que la ingravidez ocasiona un comportamiento distinto

en los líquidos respecto a lo que sucede en un entorno grávido (NASA, 2015). La tensión superficial del agua ocasiona una tendencia de los líquidos a formas esféricas bajo ingravidez. El líquido no cae, sino busca formar un volumen y ello es lo que dará la forma a la ducha inflable. Cabe mencionar que en todo momento los espacios de dormir seguirán cumpliendo los estándares antropométricos de confort en condiciones de ingravidez.

**Figura 36**

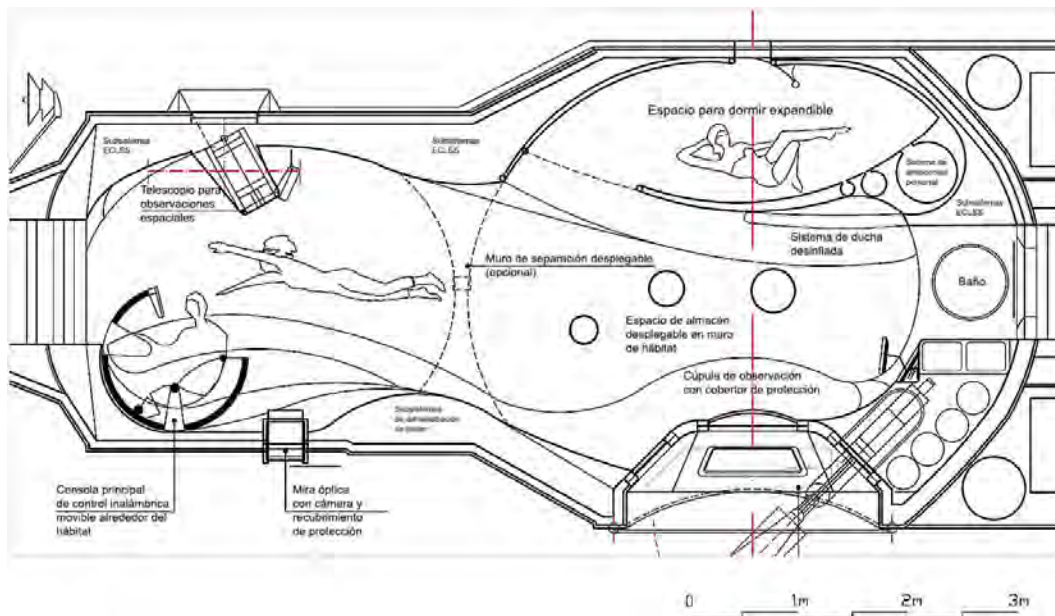
*Sección longitudinal 1 detallada de módulo habitable*



Adaptado de Doule et al. (2011)

**Figura 37**

*Sección longitudinal 2 detallada de módulo habitable*



Adaptado de Doule et al. (2011)

### **Phari Base**

Phari Base igualmente toma como precedente al ECLSS de la ISS. Las diferencias respecto a su antecesora se encuentran tanto como en los objetivos de las misiones como en la distancia a su emplazamiento, Phobos. Las misiones determinan que Phari Base mantenga como mínimo a 12 personas en cualquier momento, tanto a los tripulantes que están desarrollando la misión como al siguiente grupo de astronautas. La distancia desde la Tierra hasta Phobos precisa un viaje de alrededor de 6 meses, por lo que el reabastecimiento se torna complicado y costoso. Por este motivo, Phari plantea el reciclaje del 93% del agua, el crecimiento del 50% de la comida in situ y el reciclaje del 100% del oxígeno (Bishop et al., 2017).

El reciclaje del agua se dará gracias al ECLSS adaptado, que es capaz de administrar tanto las aguas grises como las negras mediante un sistema de tuberías. Además, se complementará con aproximadamente media tonelada de agua potable traída desde la Tierra al momento del cambio de tripulación – aproximadamente cada año. Junto a ello, se proporcionará 15 toneladas de comida y el resto se producirá por medio de la siembra y cosecha de vegetales en el invernadero propuesto. A partir de esta necesidad, se dimensionó

el ambiente toroidal del invernadero con un objetivo de albergar el crecimiento de 210 m<sup>2</sup> de plantas. Además, contará con un mecanismo que generará gravedad artificial para las plantas. La necesidad de la gravedad artificial radica en que para ellas – y para cualquier ser vivo – es imposible el adecuado crecimiento en condiciones de ingravidez (Armstrong, 2016). Como se sabe, la gravedad es importante durante las primeras etapas de la vida, pues el crecimiento de cualquier ser vivo está adaptado a ella. La gravedad forja el fortalecimiento del esqueleto en los humanos como también posibilita que las raíces de las plantas logren absorber los nutrientes de manera óptima.

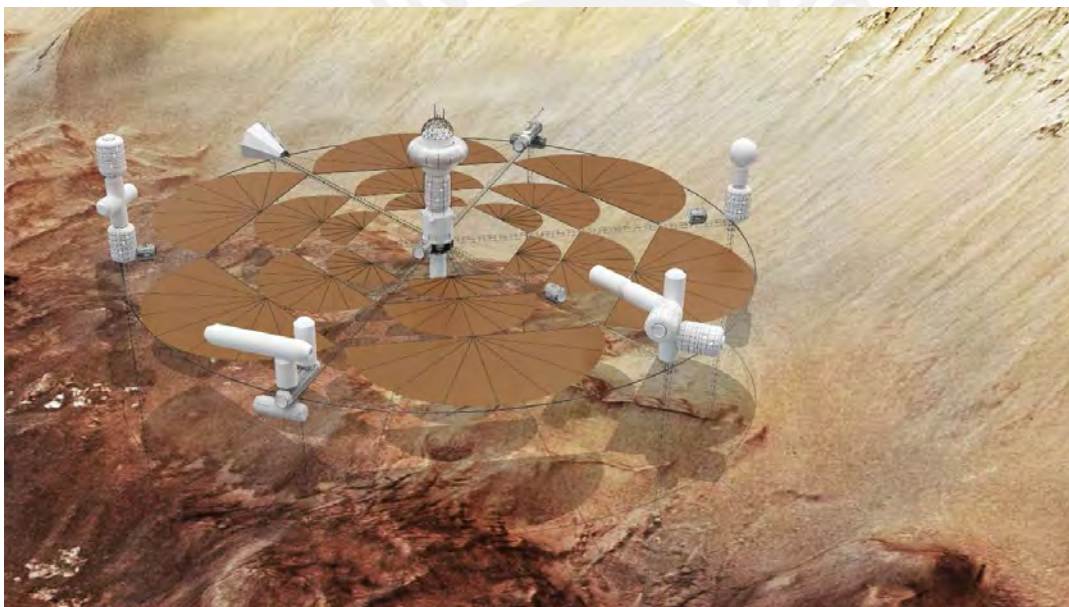
Tanto como en Omicron, el aire se genera gracias a tanques de O<sub>2</sub> y N<sub>2</sub> y el CO<sub>2</sub> producido por la respiración se recicla mediante el proceso de Sabatier para la producción de agua, tal como lo determina el sistema ECLSS. Sin embargo, parte de ese CO<sub>2</sub> resultante será utilizado para acelerar el proceso de crecimiento de las plantas del invernadero, al igual que los desechos orgánicos humano para el abono de las mismas (Bishop et al., 2017). Por estos motivos, el invernadero se vuelve un elemento que contribuye a la sostenibilidad del proyecto y facilita la subsistencia de los humanos frente a las condiciones de Phobos. Además, puesto que el CO<sub>2</sub> es convertido en oxígeno gracias a la fotosíntesis de las plantas, estas también contribuirán al objetivo de reciclar el 100% del oxígeno. Otro beneficio que se adquiere al criar vegetales es la ayuda que estos proveen en el control de humedad del aire. Puesto que solo un pequeño porcentaje del agua en los vegetales es requerido para el proceso fotosintético, el resto se expulsará en el proceso de transpiración vegetal.

Por otro lado, debido a que Phari necesita de múltiples módulos para su adecuado funcionamiento, las circulaciones del aire y del agua requieren un sistema de mayor complejidad. No obstante, debido a la configuración vertical del hábitat es posible simplificar estos circuitos y centralizarlos para evitar cualquier desperfecto. El *Common Berthing Mechanism*, el que será utilizado para el acople entre la mayoría de módulos, permite que las conexiones de los circuitos en los módulos se realicen en el interior del mismo en vez de dejarlas expuestas (McLaughlin & Warr, 2001). La elección de este elemento de acople no solo se relaciona con la capacidad estructural y versatilidad que posee, sino también con la manera en la que provee de mayor seguridad a las conexiones de los circuitos entre los distintos módulos. Cabe mencionar que otra ventaja del Common Berthing Mechanism es que ayuda a mantener la presión ideal al interior de los hábitats tanto como el aire a su interior.

Asimismo, toda la energía necesaria para el funcionamiento adecuado de las maquinarias con las que se realizarán los experimentos como para mantener la temperatura habitable al interior se proporcionará de diversas maneras. La base entera adquirirá su energía gracias a un reactor nuclear localizado con paneles solares y batería que servirán como sistemas de poder de emergencia (Bishop et al., 2017). Por la distancia desde Phobos al Sol, Phari necesitará grandes dimensiones de paneles solares para lograr la energía necesaria. Ellos serán distribuidos horizontalmente en la base del hábitat de manera radial entre el módulo de la centrífuga y el resto de módulos.

### Figura 38

*Posible extensión de Phari con paneles solares distribuidos radialmente*



Fuente: Bishop et al. (2017)

## 6.2. Kalpana One – Colonized Interstellar Vessel

Los proyectos de esta escala son capaces de albergar a más de 3000 personas en el espacio sideral. Debido a esto, en ambos proyectos se vio necesario el diseño de sistemas que permitan generar gravedad artificial como respuesta a la ingravidez del espacio exterior. Además, se podrá marcar un contraste entre las necesidades de un proyecto que se mantendrá en órbita alrededor de la tierra frente a otro que posibilitará el viaje interestelar, a través de las galaxias.

### 6.2.1. *Orientación, movimiento y recorrido*

#### **Kalpana One**

El interior de Kalpana One se describe como un cilindro que contiene varias otras capas en su interior dispuestas en las bases de este. En este sentido, la gravedad artificial provocará que la orientación de los usuarios dependa de la posición en el cilindro o capa en la que estén posicionados. Como da a entender Hall (1995), este, oeste, arriba y abajo van variando respecto a la rotación sobre el eje axial. En otras palabras, las direcciones de orientación de los usuarios siempre variarán alrededor del eje de rotación que genera la gravedad artificial. Cabe notar a partir de lo anterior que la verticalidad local siempre será obligatoria en todo proyecto con gravedad artificial. La gravedad determina una verticalidad y esta siempre será el vector del radio de rotación sobre cualquier punto cáscara exterior de cualquier proyecto. Por esta razón, las capas al interior de Kalpana One serán vistas como niveles dispuestos en las bases del cilindro. Además, todas las edificaciones al interior de Kalpana One se construirán desde el borde de la cáscara hacia el centro de esta y, de esta forma, determinarán la verticalidad local. Lo mismo pasará en las capas interiores de hábitat a pesar de que la gravedad cada vez vaya decreciendo al acercarse al eje de rotación.

#### **Figura 39**

##### *Interior de Kalpana One*



Fuente: Versteeg (2020)

El movimiento de los usuarios, gracias a la gravedad artificial, no será muy distinto respecto al que se realiza en la Tierra. Sin embargo, al acercarse al eje central del proyecto, la gravedad cada vez irá disminuyendo y ello afectará gradualmente la motricidad humana. Al ir recorriendo las capas del proyecto, también cambiará el peso de los objetos y la manera en las que el ser humano se relaciona con ellos. Ante ello, el proyecto propone distintas maneras de afrontar esta transición mediante estrategias de recorrido entre las capas internas. Según Globus et al. (2010), se utilizarán escaleras, rampas y elevadores para la transición entre los cilindros. Estos sistemas también ayudarán al transporte de humanos, industria pesada y productos agrícolas. El recorrido se realizará en las bases del cilindro, donde se ubican las capas que generan los distintos niveles. En ese sentido, gracias a la verticalidad local, el recorrido será de orientación vertical a medida que se va acercando al eje de rotación. Este hecho logrará que el usuario sea capaz de percibir visualmente los niveles inferiores mientras pierde la sensación de gravedad a medida que se acerca al eje de rotación. Esta relación será completamente nueva para todo usuario, pues, mientras levita debido a la ingravidez, podrá apreciar los efectos de la gravedad en la cáscara del cilindro, la cual se dará en el nivel más inferior.

El recorrido en la superficie lateral del cilindro, donde la gravedad será la misma que en la Tierra, presenta un tratamiento distinto. Según Globus et al. (1990) puesto que el 40% de esta superficie será destinada a áreas residenciales, el resto servirá como áreas de recreación y áreas verdes. A través del recorrido en esta superficie, el usuario podrá percibir visualmente la curvatura del espacio debido a la forma cilíndrica del hábitat. Además, este recorrido buscará ser lo más natural y orgánico posible con el fin de brindar comodidad al usuario y evitar la sensación de confinamiento. Así, el usuario podrá disfrutar a través de distintas actividades recreativas y abundante vegetación mediante un sistema de vías que no se ciñen a lo meramente longitudinal o transversal en este cilindro. La organicidad de este recorrido también presentará al usuario la experiencia de percibir el proyecto desde distintas perspectivas, lo cual le ayudará a conocer su entorno de mejor manera y a apropiarse de este más fácilmente.

### **Colonized Interstellar Vessel**

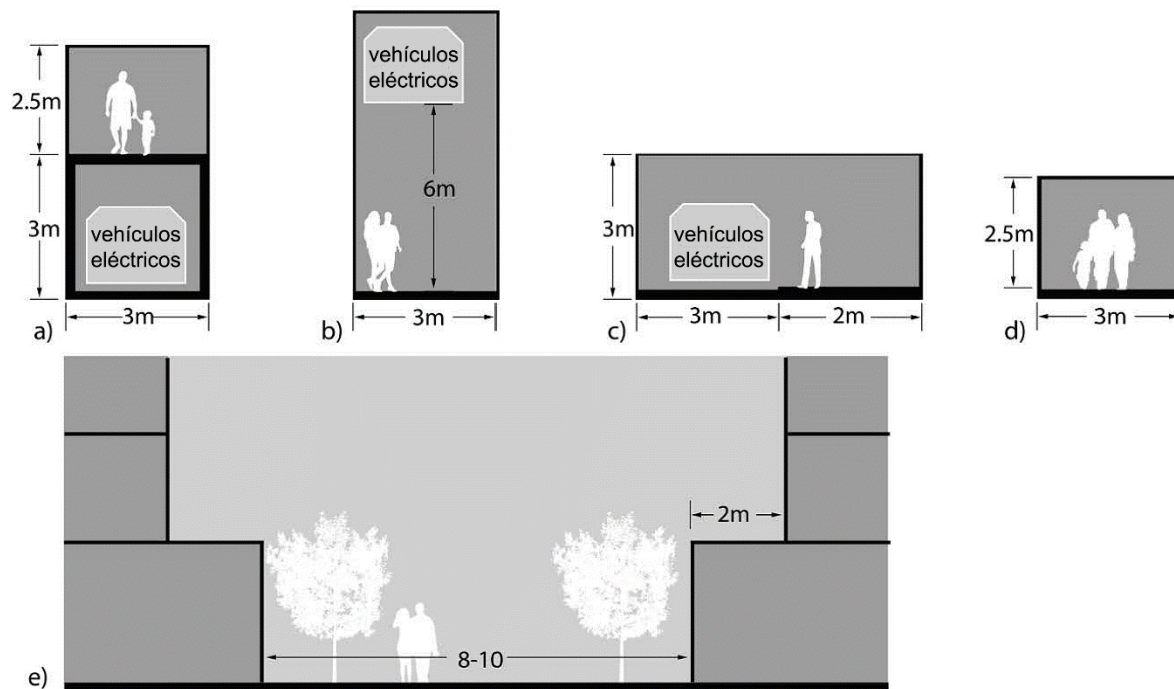
Previamente, se mencionó que la gravedad artificial determina una verticalidad local inherentemente; Colonized Interstellar Vessel no es la excepción. Las áreas habitables son las únicas que se verán afectados por la gravedad artificial y, por ende, por la verticalidad

local que esta determina. Estas áreas serán 8, longitudinales, y de aproximadamente 120m x 755m. Se distribuirán en una formación radial y simétrica para facilitar la generación de gravedad artificial y el recorrido entre sí. La dirección de la verticalidad local en estos estará dirigida perpendicularmente hacia el eje de rotación tal como en Kalpana One. El resto de componentes que son primordialmente el apoyo para mantener la vida en este hábitat serán ubicados a lo largo del eje de rotación de este. Por esta razón, las fuerzas inerciales generadoras de gravedad artificial no los afectarán. En el documento de Summerford, *Colonized Interstellar Vessel: Conceptual Master Planning*, no se describe la verticalidad local en estas áreas. En condiciones de ingravidez, esta elección dependerá del diseñador, tal como en Omicron o en Phari Base. Sin embargo, lo más probable es que sí sea necesaria la inclusión de una verticalidad local en esta zona con la direccionalidad del eje de rotación primordialmente con el fin de facilitar el desplazamiento de los recursos a utilizar. Esto se debe a que en esta zona se manejarán las operaciones de mantenimiento y producción de recursos, por lo cual la optimización del transporte a través de la longitudinalidad de la distribución de estos componentes será prioridad.

Por otro lado, CIV presenta otro tipo de estrategias muy distintas a Kalpana One respecto al recorrido: su composición modular determina uno interno a partir de otros componentes. Los componentes netamente dedicados al recorrido son los viaductos peatonales y las armaduras-elevadores. El tráfico vehicular será inexistente dentro del hábitat y las calles dentro de este serán peatonales y optimizadas con el fin de promover la interacción y circulación peatonal (Summerford, 2012). No obstante, las secciones de las vías brindan la posibilidad del tránsito de pequeños vehículos eléctricos para el transporte de pequeñas cargas. Las dimensiones de estas responden a esta posibilidad. Asimismo, los viaductos peatonales tendrán forma tubular y conectarán todas las áreas habitables, por lo que se ubicarán a lo largo de la circunferencia del CIV. Además, para que sea posible la distribución radial de las áreas habitables alrededor del eje de rotación, estos viaductos serán curvados mientras que las otras tendrán un piso completamente plano. Cabe resaltar que la gravedad artificial en estos viaductos se mantendrá constante en todo su recorrido, pues se distribuyen en base a una misma circunferencia.

**Figura 40**

*Secciones de vía al interior de las áreas habitables de CIV*



Adaptado de Summerford (2012)

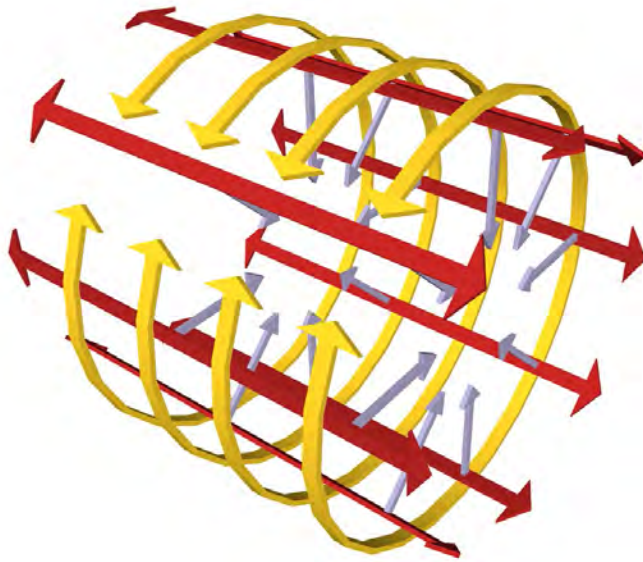
La situación es distinta en las armaduras-elevadores, debido a que estas resuelven el recorrido desde los componentes ubicados en el eje de rotación hasta las áreas de vivienda, por lo que la interacción de la gravedad artificial cada vez va disminuyendo. En otras palabras, al acercarse al eje de rotación mediante las armaduras-elevadores, la gravedad artificial disminuirá gradualmente hasta tornarse nula en el centro. De esto se puede deducir que las armaduras-elevadores han sido diseñadas radialmente desde el eje de rotación hasta las áreas habitables. Por ello, el recorrido entre las que se encuentran en polos opuestos se solucionará mediante estas armaduras-elevadores. Además, puesto que en este lugar se encuentran los componentes de apoyo, en donde se encuentran las industrias, este sistema de recorridos ayudará a distribuir los recursos igualitariamente alrededor de todo el hábitat.

Por último, el recorrido dentro de cada área habitable se ha diseñado en base a los módulos que los componen, los cuales serán 5. Estos módulos cuentan con dimensiones y configuraciones resueltas como manzanas terrestres. Lo que facilita esta resolución es que los componentes diseñados para las áreas habitables cuentan con una base plana, pues toda la curvatura la adquieren los viaductos pedestres. Entonces el recorrido dentro de las áreas

de vivienda no será muy distinto a lo que sucedía en la Tierra. La lotización de estos módulos se ha diseñado en base a una grilla y por ello el recorrido será axial. Asimismo, estas manzanas cuentan con distintos programas, como administrativos, vivienda, comercio, un área verde central, entre otros. Puesto que el recorrido a través de las áreas de vivienda será exclusivamente peatonal, el usuario será capaz de presenciar y participar de distintas actividades al transportarse entre los módulos. Ello se verá enriquecido por el área verde central de cada módulo, pues libera la rigidez de la axialidad del recorrido general.

### Figura 41

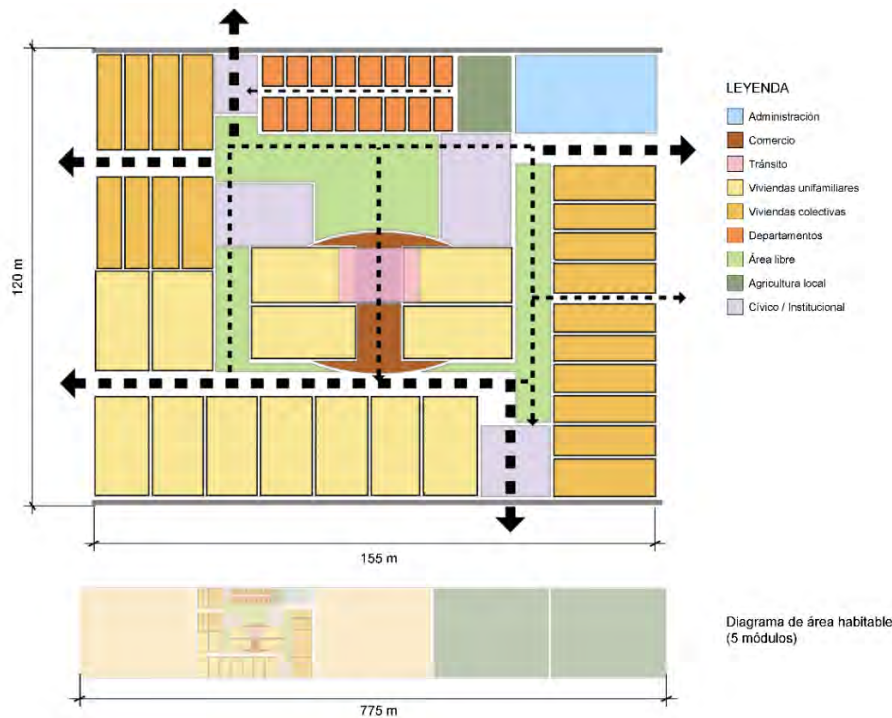
*Esquema de circulación de CIV*



Fuente: Summerford (2012)

**Figura 42**

*Esquema de configuración urbana de módulos de CIV*



Adaptado de Summerford (2012)

### **6.2.2. Espacio arquitectónico e ingravidez**

#### **Kalpana One**

La geometría de Kalpana One responde al análisis que realizaron los proyectistas con el fin de determinar las dimensiones ideales para generar una gravedad artificial que mantenga cómodamente a 3000 personas. Además, esta geometría también resuelve problemas que existían en proyectos utópicos diseñados en el pasado. Por ejemplo, Kalpana One soluciona el problema de inestabilidad rotacional que se encontraba en la Esfera de Bernal y el Cilindro de O'Neill, tanto como la falta de control de tambaleo que estas presentaban. También se enfrenta al problema de la inadecuada relación entre los cascos giratorios y los escudos no rotatorios que mantenían la Esfera de Bernal y el Toro de Stanford (Globus et al., 2010). Bajo estas premisas, Kalpana One se consolida como un cilindro de 250 m de radio y 325 m de longitud. Sus bases serán ligeramente curvadas con el fin de optimizar la iluminación, la cual solo entrará por una parte de estas, pues el hábitat ha sido diseñado para estar completamente cerrado al exterior, es decir, sin ningún tipo de relación visual o corporal.

Inclusive las operaciones a realizar en el exterior de Kalpana One, como las de mantenimiento, serán realizadas por robots, pues podría ser muy peligroso para los humanos.

Al mismo tiempo en estas bases del cilindro se encontrarán varias capas que funcionarán a manera de niveles al interior del hábitat. Evidentemente la gravedad artificial se irá reduciendo gradualmente al subir de nivel debido a que el radio de rotación será menor. Los niveles más cercanos al eje de rotación y de menores dimensiones serán relacionados directamente con menor sensación de gravedad. Puesto que la gravedad determina posturas y movimientos, como mencionan Fauquet & Okushi (1991), la reducción gradual de esta en distintos niveles también tendrá repercusiones en la percepción del espacio en tanto a la relación del ser humano con estos. La manera en la que el humano se enfrenta a este incremento de sensación de ingravidez también mostrará distintas maneras de afrontarse al espacio y, con ello, distintas formas de abordar el diseño del espacio arquitectónico. Por esta razón, los distintos niveles también presentarán distintos diseños dependiendo de su cercanía al eje de rotación. Esto tendrá como resultado que los usuarios que se encuentren en niveles superiores aprecien los niveles inferiores desde distintas perspectivas no solamente por el diseño del espacio arquitectónico, sino también por la influencia de la gravedad artificial en sus cuerpos.

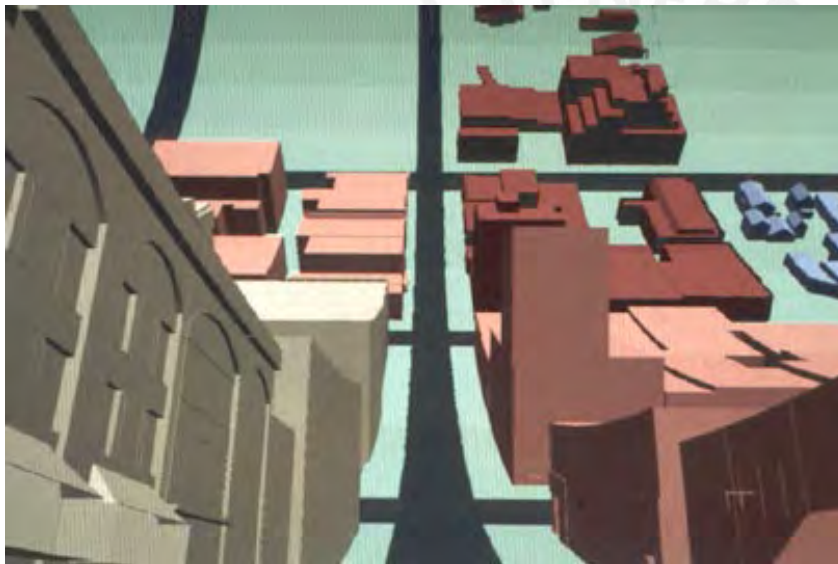
Por otra parte, la espacialidad de la superficie lateral del cilindro, la destinada al área residencial, cuenta con una resolución muy acertada respecto al problema de la curvatura del espacio del espacio inherente de la forma cilíndrica. Hall (1995) comenta que, en una vista peatonal en una ciudad curvada de 250 m mirando hacia el este, la vista aérea de los techos de los edificios dará una impresión similar a mirar hacia abajo desde la cima de una montaña. Esta incongruencia no sería algo nunca antes visto en la Tierra, pero será algo inevitable en esta clase de hábitats cilíndricos. Es posible que esta curvatura genere incomodidad en los usuarios y también problemas de privacidad. Debido a este motivo es útil que se haya optado por solamente proporcionar el 40% del área de esta superficie para vivienda. Así el resto podrá ser utilizado como áreas verdes, áreas recreativas, recorrido, entre otros usos.

Además, como muestra Versteeg (2020), es posible el diseño de viviendas de poca altura, aterrazadas y separadas entre sí. El aterrazamiento ayudará a no percibir la curvatura tan marcada en las viviendas, lo cual también facilitará el tener losas más planas. La separación de las viviendas y su baja altura también será de ayuda, pues, mientras menor sea la densidad urbana, la curvatura de los edificios será menos reconocible. Ello también facilitará la

disposición de áreas verdes en esta zona, lo cual logrará que el espacio sea más familiar respecto a la Tierra y generará una mayor adaptabilidad del ser humano a este nuevo contexto. En otras palabras, la baja densidad de edificaciones en la superficie lateral del cilindro ayudará al usuario a mantener una mejor relación con el espacio interior del hábitat. Esto se debe a que el habitante será capaz de percibir visualmente la curvatura del espacio interior como contenedora de naturaleza y actividades humanas realizadas por sus vecinos sin ser tan disruptivo frente a un paisaje urbano terrestre.

### **Figura 43**

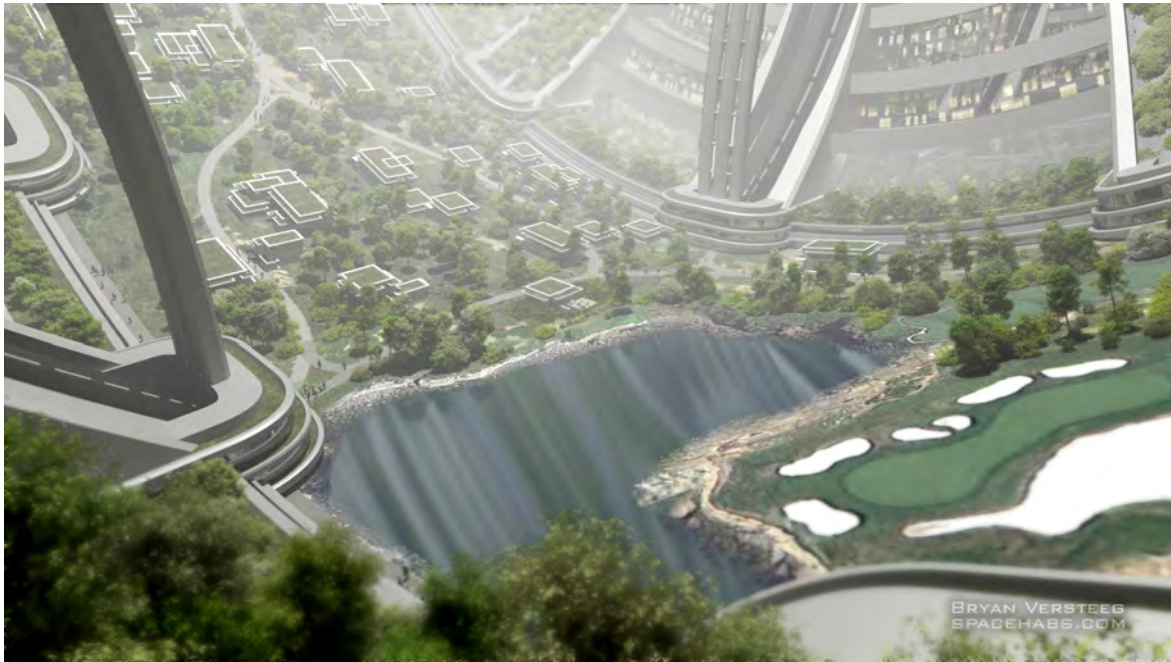
*Vecindario de Michigan si estuviera curvado en base a un radio de 250 m*



Fuente: Hall (1995)

## Figura 44

### *Espacialidad al interior de Kalpana One*



Fuente: Versteeg (2020)

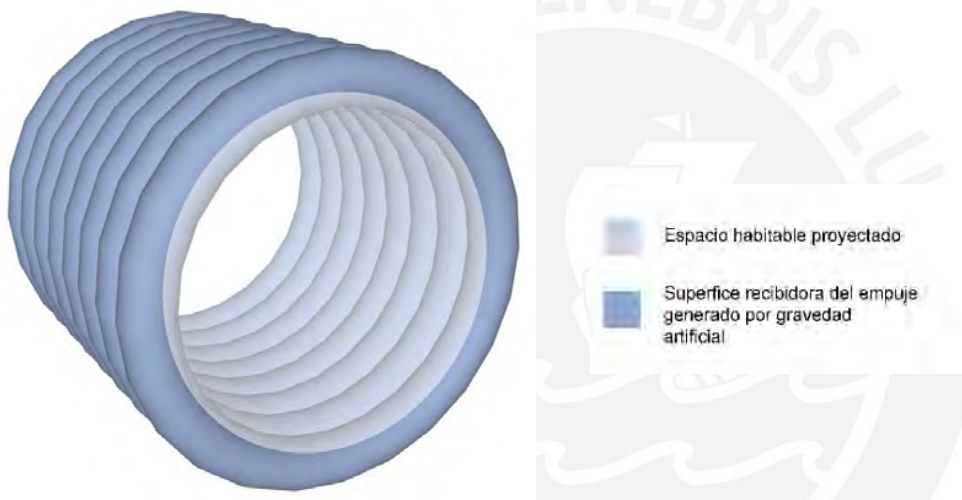
### **Colonized Interstellar Vessel**

Tanto como Kalpana One, Colonized Interstellar Vessel toma de referencia problemas de las utopías espaciales preexistentes y acierta con distintas soluciones. Al analizar las geometrías de la Esfera de Bernal, el Cilindro de O'Neill y el Toro de Stanford, se entiende que la mejor solución no se encuentra en ninguna de ellas. Sin embargo, es importante señalar en qué consistió este análisis geométrico: principalmente, en la búsqueda de la mayor área útil y la mejor circulación posibles en un hábitat que produzca gravedad artificial. El sistema de propulsión y otros sistemas de soporte de vida no se tomaron en cuenta en este primer análisis. Se inició tomando como punto de partida el diseño de una seriación de toros a lo largo de un cilindro y la optimización de esta en base a una circulación ideal que permita el adecuado acceso a todos los componentes de este. Posteriormente, se descubrió que lo mejor sería que, en lugar de desarrollar el hábitat en base a las superficies laterales de los toros, se revierta esta situación y seriar cilindros alrededor de esta seriación de toros. Ello reduciría su costo y otras restricciones inherentes a la primera geometría planteada (Summerford, 2012). Se definen 8 cilindros y, finalmente, se adaptan estos cilindros seriados

aplanando sus capas más externas con el fin de destinarlas a áreas habitables que recibirán el empuje de la gravedad artificial. Las dimensiones aproximadas de esta geometría serán de 400 m de radio y 775 m de largo, el cual resulta de la modulación de los componentes destinados a áreas habitables. Se proyecta que cada uno de estos esté construido en base a 5 módulos de 120 m x 155 m. Los módulos funcionarán a manera de manzanas y contendrán distintas clases de programas. Además, también se prevé una altura de 50 m para estas con el fin de permitir una adecuada contención de edificios en su interior.

### Figura 45

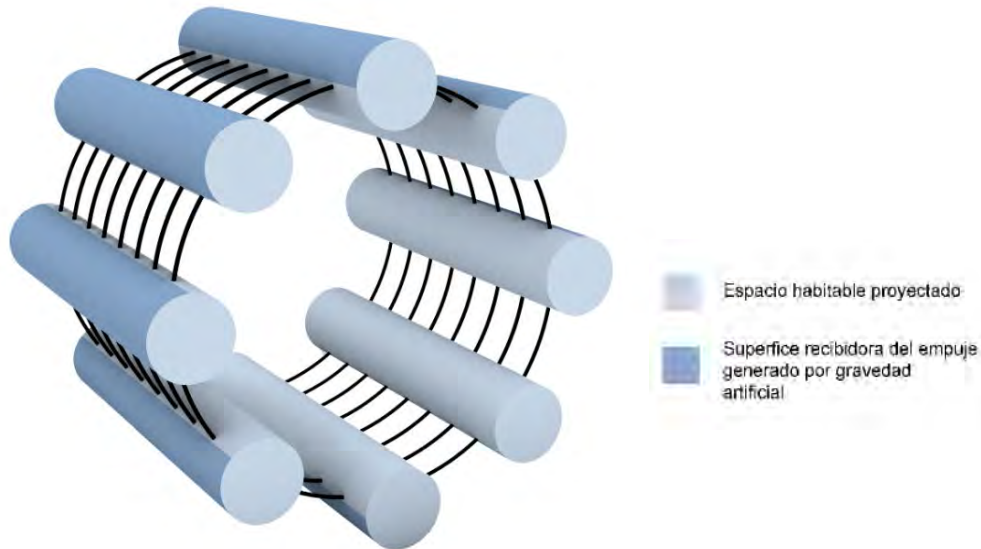
*Volumetría inicial: seriación de toros a lo largo de un cilindro*



Adaptado de Summerford (2012)

**Figura 46**

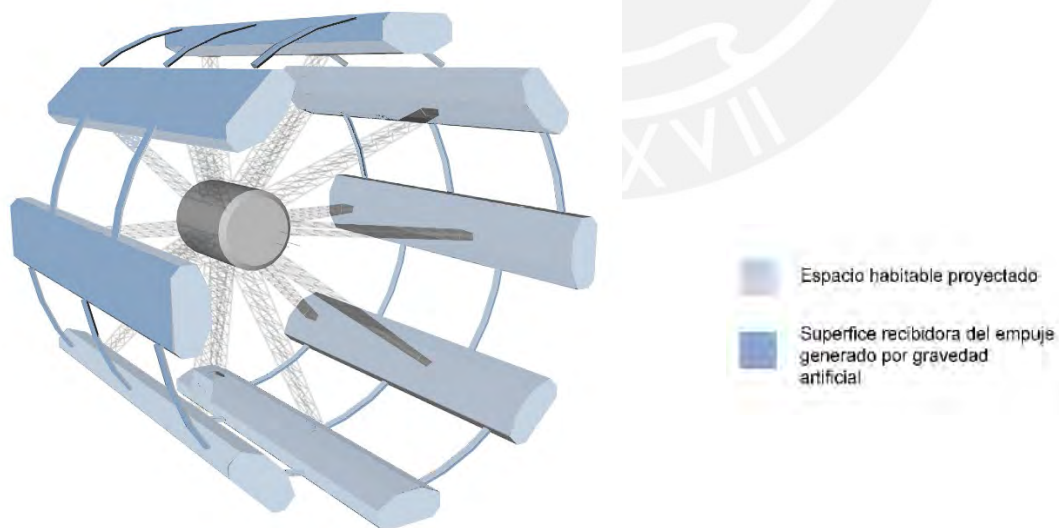
*Segunda geometría: cilindros seriados en toros seriados a lo largo de un cilindro*



Fuente: Elaboración propia

**Figura 47**

*Volumetría final que incluye un volumen central libre de la influencia de la gravedad artificial*



Adaptado de Summerford (2012)

Al respecto de los 8 componentes designados a áreas habitables, estos tendrán configuración longitudinal y base plana. Ello es diferente a Kalpana One, pues gracias a otro tipo de

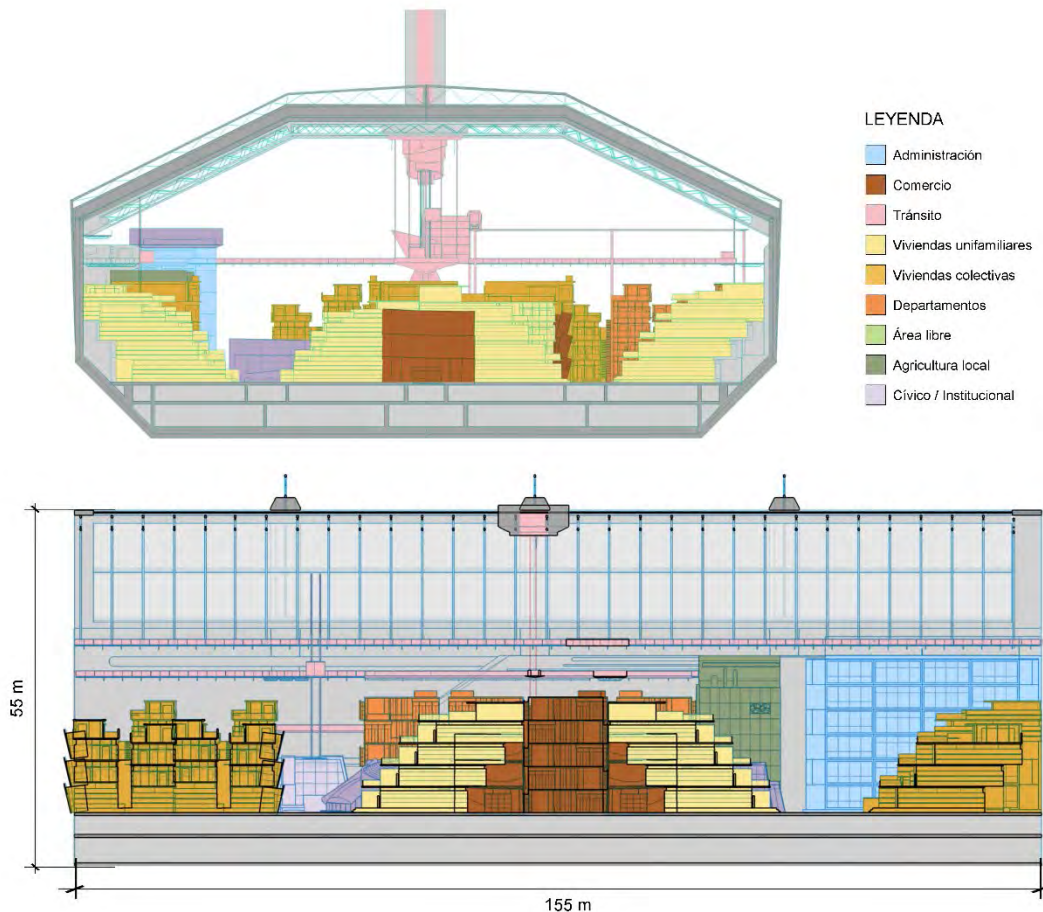
complejidad en el desarrollo geométrico CIV no presentará ninguna clase de curvatura en las superficies de las áreas habitables que reciben el empuje de la gravedad artificial. Por este motivo, las curvaturas serán recibidas por viaductos peatonales, las cuales conectarán las áreas habitables. El único problema que esto puede presentar es la diferencia del efecto de la gravedad artificial al interior de las áreas habitables, pues existirá una diferencia de radio de giro entre los bordes laterales y el centro de estas áreas.

Es posible que este desarrollo geométrico no presente diferencias respecto a hábitats terrestres en varios aspectos. El más evidente es que, debido al aplanamiento de las bases, será más sencillo el diseño y construcción de niveles superiores completamente planos. Debido a esta razón, ha sido posible el diseño de edificaciones aterrazadas que permitan mejores relaciones entre el interior de ellas, las vías de tránsito, las áreas libres y recreativas, entre otros. Ello ayudará a percibir un espacio más abierto y reducirá la sensación de enclaustramiento. Del mismo modo, la permeabilidad diseñada para las manzanas también será un factor clave para estas percepciones, ya que generará mejores relaciones entre los vecindarios al mismo tiempo que mayor flujo de las actividades de los programas. El área verde central será de gran ayuda para lo anterior mencionado y también ayudará a percibir el espacio con más familiaridad respecto a la Tierra.

Por otro lado, la principal particularidad de este hábitat radica en los techos de las áreas habitables. Los techos propuestos serán compuestos de algún material traslúcido y elementos estructurales. También se empleará algún tinte que filtre la luz de las estrellas con el fin de emitir longitudes de ondas azules en el interior (Summerford, 2012). Gracias a ello, la relación con espacio sideral no será excluyente: existirá una relación netamente visual con este dentro de las áreas habitables mediante la translucidez de los techos. Asimismo, los tripulantes podrán presenciar tanto su travesía interestelar como los otros componentes del CIV. El vacío en el que se encuentran las armaduras-elevadores servirá para hacer posible estas relaciones visuales.

**Figura 48**

*Sección transversal y longitudinal de áreas habitables*



Adaptado de Summerford (2012)

### 6.2.3. *Sistemas Estructurales*

#### **Kalpna One**

El sistema estructural de Kalpna One responde al análisis geométrico que se realizó para determinar las adecuadas dimensiones que ayudarían a mantener cómodamente a la cantidad de usuarios escogida – 3000 personas. Con ese fin, la estructura se ha definido como un entramado a manera de esqueleto. Los materiales para construirla se conseguirán de la Luna o de asteroides y cometas cercanos a la Tierra, lo cual será un gran paso para el diseño de hábitats espaciales (Globus et al., 2010). El acceso a ellos será posible gracias a la minería

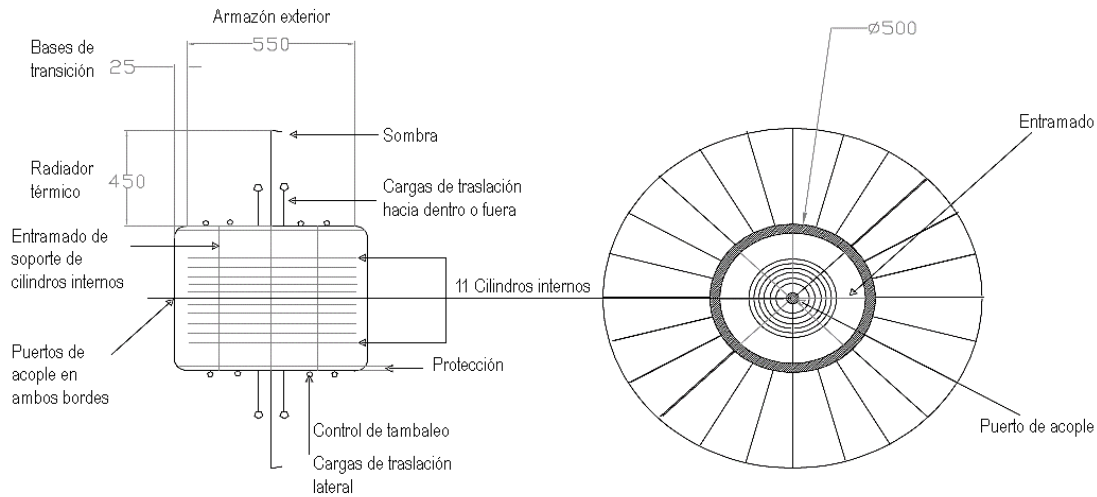
espacial. La selección de esta estrategia se debe a la necesidad de sistemas metálicos para este proyecto. Debido a las grandes dimensiones del hábitat y la especificidad del diseño, es conveniente pensar en la construcción prefabricada mediante metales, lo cual será útil para la construcción de otros componentes. Cabe resaltar que se ha incluido el diseño de puertos de acople para la conexión con otros hábitats de iguales o menores dimensiones.

Por otro lado, este entramado se diseñó bidireccionalmente y cubrirá toda la superficie lateral del cilindro. En las bases del cilindro, el entramado estará dispuesto radialmente. Según NASA (1977), el cálculo de las dimensiones ideales para este entramado dependen de las siguientes variables: presión atmosférica, presión de gravedad artificial equivalente, radio exterior, radio interior y el esfuerzo ejercido (p. 99). La elección de estas variables se ha basado en la elección de la estrategia de la gravedad artificial. Esto es porque esta estructura debe ser capaz de soportar la totalidad de las cargas ejercidas en la superficie lateral como consecuencia del empuje de la gravedad artificial, las cuales serán 10 toneladas por metro cuadrado aproximadamente.

Debido a sus grandes dimensiones y su constante movimiento rotacional, se vio necesaria la inclusión de componentes que controlen la desestabilización de la estructura frente a impactos indeseados, lo cual es muy común en condiciones de ingravidez. Asimismo, estos impactos pueden presentar repercusiones en la rotación y el recorrido orbital de este hábitat al alterarlo de distintas maneras. La asimetría en las cargas interiores del hábitat igualmente será un inconveniente cuando ocurran estas alteraciones. Este problema fue evaluado como variable al determinar la geometría ideal, pues las geometrías más alargadas presentan mayor momento de inercia, lo que significa mayor vulnerabilidad frente a los impactos. Por este motivo, Kalpana One se acerca más a una forma regular y simétrica. Sin embargo, ello no soluciona el problema por completo. Para ello, aquellos componentes funcionarán a manera de cargas para balancear el tambaleo. Estas cargas estarán conectadas por un sistema de cableado y serán monitoreadas por computadoras.

**Figura 49**

*Vista lateral y superior de esquema de componentes de Kalpana One*



Adaptado de Arora et al. (2006)

### **Colonized Interstellar Vessel**

La geometría propuesta por Colonized Interstellar Vessel presentará otra clase de sistema estructural debido a los distintos objetivos que esta plantea alcanzar. Llevar a cabo el viaje interestelar involucra distintas variables a nivel de diseño y estructura. La necesidad de la gravedad artificial en este viaje presentará diversas repercusiones. Puesto que los componentes de las áreas habitables serán excéntricos, estos mantendrán una tendencia a seguir alejándose del centro de rotación debido a la fuerza centrífuga que funcionará como gravedad artificial. Como respuesta a ello, se diseñaron las armaduras-elevadores que, además cumplir su función como elemento de recorrido, estas mantendrán a los componentes de las áreas habitables permanentemente a la misma distancia del eje de rotación. Estas se diseñaron con sección cuadrada y con un sistema de tijerales. Naturalmente, estos componentes serán construidos con metales.

Asimismo, las armaduras-elevadores cumplirán la función de anclar los componentes habitables al sistema de propulsión, el cual se encuentra al centro de CIV. Ello es importante para que el desplazamiento de todo el hábitat se realice de manera estable y uniforme. Por este motivo, las secciones de estas necesitan tener en cuenta esa variable. Además, los viaductos peatonales, cuyas dimensiones pueden estar entre 15 o 25 m de diámetro, serán útiles para este fin. Ellos mantendrán la unidad estructural en el otro sentido,

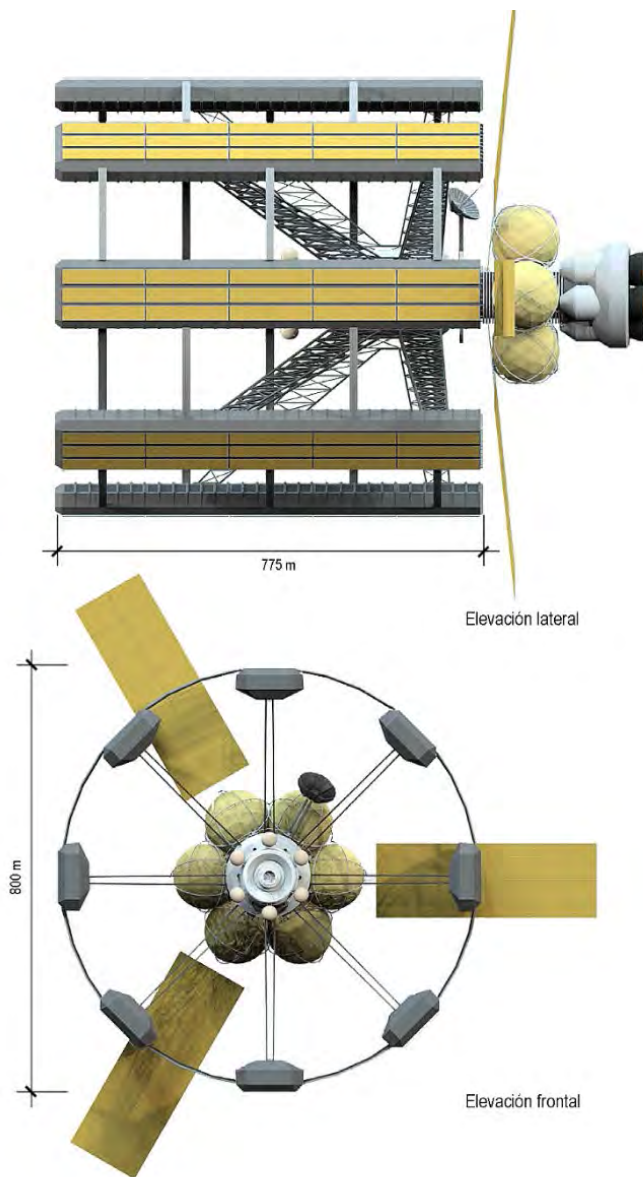
perpendicularmente a las armaduras-elevadores, a manera de circunferencias. Igualmente, los viaductos peatonales evitarán que los 8 componentes de las áreas habitables se desplacen irregularmente y contrarresten las vibraciones o deflexiones originadas por las aceleraciones de los sistemas de propulsión. Todo ello también se ve favorecido por la simetría en el proyecto, tal como en Kalpana One al contrarrestar los tambaleos. Tanto lateral como frontalmente, las dimensiones de CIV son similares.

Por otra parte, el diseño de los componentes de las áreas habitables se ha propuesto con una geometría biselada y reforzada con elementos metálicos. Según Summerford (2012), esta estrategia ayudaría a reducir el daño de los impactos de partículas espaciales, lo cual es una amenaza común en los viajes interestelares. Puesto que los pisos han sido aplanados para el confort del interior, el diseño de una geometría con aristas en  $90^\circ$  sería muy vulnerable a cualquier agrietamiento por impactos. Cabe mencionar que, tanto como en Kalpana One, para el diseño de la estructura afectada por la gravedad artificial es necesaria la consideración de las variables planteadas por la NASA (1977): presión atmosférica, presión de gravedad artificial equivalente, radio exterior, radio interior y esfuerzo ejercido.

Asimismo, se ha decidido que los techos de estas geometrías sean vidriados, lo cual requerirá de una estructuración particular. A diferencia de los pisos, estos necesitan un tratamiento estructural que les permita el aprovechamiento de la traslucidez de este material. También se debe tomar en consideración el soporte de sus cargas y esfuerzos de los propios elementos de vidrio como los que se generarán al mantener la presión atmosférica en el interior del hábitat. Por este motivo, los techos se han diseñado como unos entramados de tijerales metálicos capaces de mantener la presión ideal tanto para mantener los paneles vidriados en su lugar como para evitar la exposición de las condiciones interiores al exterior. Si se dimensiona adecuadamente, este sistema estructural es capaz de aprovechar en gran medida los metales a utilizar, pero determina una gran complejidad en su construcción.

**Figura 50**

*Elevaciones de Colonized Interstellar Vessel*



Adaptado de Summerford (2012)

#### **6.2.4. *Sistemas de habitabilidad***

##### **Kalpana One**

Las dimensiones geométricas de Kalpana One responden principalmente a las necesidades para lograr el confort en un hábitat con gravedad artificial. Estas se resumen en el radio de giro y las rotaciones por minuto. Por ello, este hábitat se dimensionó con 250 m de radio y

se prevén 2 rpm, pues según Hall (2006), estos parámetros cumplen con la zona de confort gravitacional al generar exactamente la misma influencia de la gravedad en los cuerpos que existe en la superficie terrestre. Además, según Globus et al. (2017), la tolerancia del ser humano a la rotación es de máximo 2 rpm con el fin de no generar algún efecto adverso en sus organismos. Frente a un entorno ingrávigo, estas condiciones ayudarán a la salud de los primeros habitantes al igual que a los descendientes de ellos, debido a que la gravedad será importante en los primeros años humanos para el desarrollo y fortalecimiento adecuado de los huesos y músculos. Kalpana One plantea ser un hábitat que albergue colonizadores indefinidamente y por ello requiere de gravedad artificial permanente. Cabe mencionar que igualmente posibilitará la ganadería que servirá para alimentar a los habitantes.

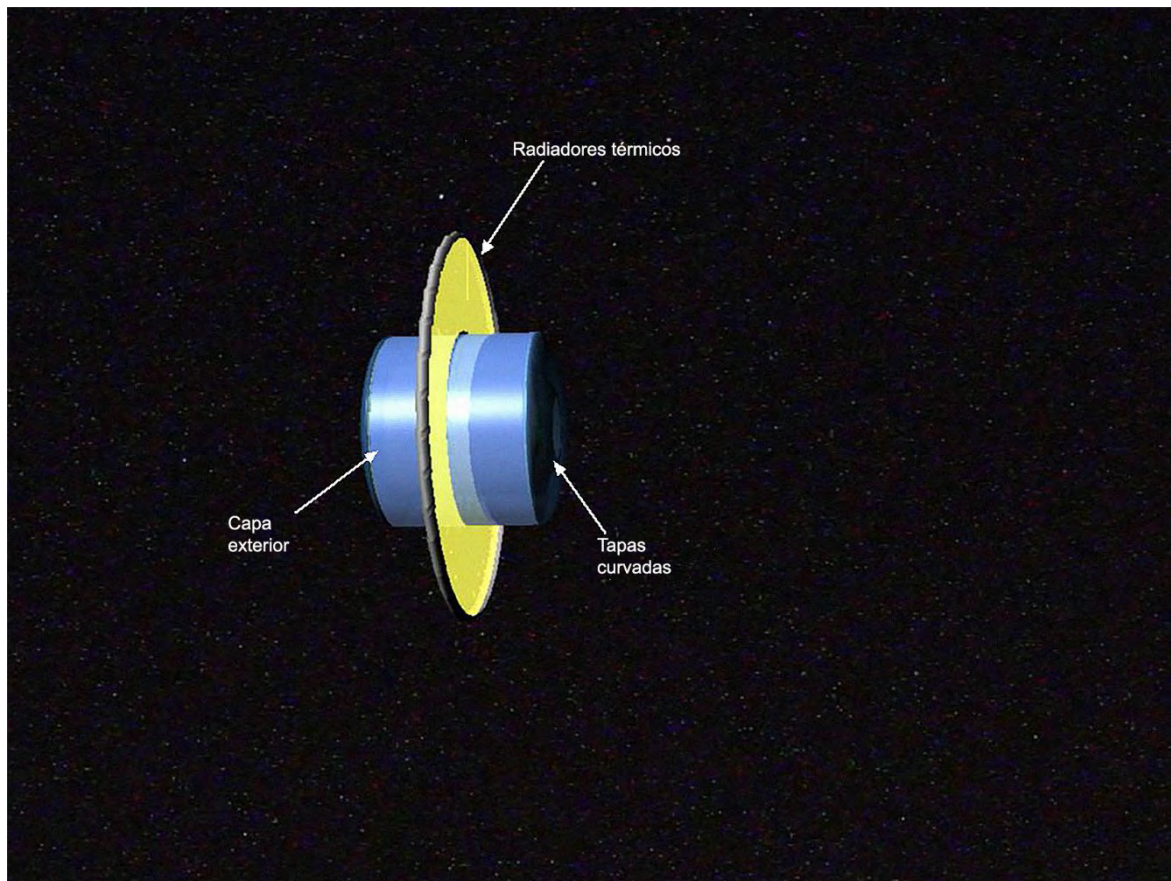
La importancia de la gravedad artificial también radica en la capacidad de esta influencia en posibilitar el crecimiento de las plantas. Tanto como para los humanos, para las plantas es importante el desarrollo en un ambiente con gravedad. Sobre ello, Globus et al. (2010) comentan que se requerirá la siembra de 150 000 m<sup>2</sup> de vegetales que serán distribuidos en distintas salas con distintas influencias gravitatorias. Esto se debe a que existen plantas que aprovechan los recursos de mejor manera en ambientes con menor gravedad a la terrestre. El planteamiento presentado será capaz de alimentar a toda la población al interior del hábitat al mismo tiempo que se logrará la optimización de los recursos para alimentar a las plantas. Ello es imposible en la Tierra, donde la gravedad se evidencia como una constante ineludible. Gracias a la ingravidez, la agricultura podrá optimizar los recursos incluyendo distintas gravedades en las variables de crecimiento de las plantas.

Por otro lado, el desarrollo de la agricultura contribuirá igualmente a mantener la humedad del aire ideal al interior del hábitat. Ello será de ayuda para el desarrollo de adecuadas condiciones atmosféricas en su interior. De igual manera, es necesaria una respuesta frente al mantenimiento de la temperatura al interior para lograr las condiciones ideales. La energía calorífica se generará a partir de energía solar que se adquirirá mediante satélites de poder externos al hábitat. Asimismo, se prevé en el diseño un disco en el medio del hábitat que disipe la radiación solar, pues esta es capaz de ocasionar variaciones de temperatura imprevistas. Este disco será dimensionado con un radio de 560 m y se basará en el sistema de rechazo térmico de la ISS (Globus et al., 2010). Se resalta la conveniencia de esta elección, pues Landi et al. (2017) mencionan que, gracias a la ingravidez, este diseño de sistemas de rechazo térmico funcionan de mejor forma frente a su desempeño en gravedad. Los autores también resaltan que la orientación de estos elementos cuenta con igual

relevancia. Sin embargo, es necesario conocer primero el recorrido orbital del hábitat con el fin de presentar una conclusión frente a esta variable. Ello es de momento imposible, pues no se menciona este recorrido en ninguno de los textos del autor del proyecto.

### Figura 51

*Volumetría de Kalpana One con indicaciones de composición del proyecto*



Adaptado de Globus et al. (2010)

Asimismo, una de las maneras de conseguir el agua para esta colonia espacial es mediante el reabastecimiento desde la Tierra. Ello podría representar grandes costos de viaje y un trabajo enorme tanto para la recolección como para el transporte. No obstante, es posible adquirir este elemento de cuerpos cercanos a la Tierra. Existe una gran cantidad de cuerpos en el espacio que contienen los elementos necesarios para la formación del agua (Rees, 2012). Gracias a la minería espacial, será posible interceptarlos y adquirir estos elementos para posteriormente obtener agua mediante procesos industriales que se verán beneficiados por la ingravidez. La ingravidez facilitará el transporte de carga pesada al igual que la reducción de energía necesaria para ello. En ese sentido, otras industrias también serán

beneficiadas. Además, el agua prevista cumplirá la función de protección contra la radiación, pues dispondrá el agua en piscinas que serán utilizadas tanto para aquella protección como para la recreación de los habitantes. Con la configuración correcta, el agua es potencialmente capaz de funcionar como motor de un sistema pasivo basado en procesos de ósmosis que serán eficaces en misiones de larga duración (M. M. Cohen et al., 2013). El comportamiento del agua bajo el efecto de la gravedad artificial será capaz de amoldarse idealmente al contorno del hábitat y presentar un funcionamiento más eficiente respecto al área de influencia.

Como respuesta al estrés, se plantean diversos espacios para el desarrollo de distintas actividades de ocio al interior de Kalpana One. Estos se distribuirán dependiendo de su cercanía al eje de rotación tomando en cuenta la influencia de la gravedad artificial deseada. Los deportes y danzas encontrarán nuevas maneras de expresión bajo estas condiciones. No se descarta el hecho de que existan también espacios de deporte en la capa más exterior del cilindro, los cuales contarán con la misma gravedad terrestre. Además, se complementará con las grandes cantidades de áreas verdes que serán conjugadas con el diseño del recorrido y la espacialidad propuesta. Todos ellos funcionarán adecuadamente gracias a la entrada de luz solar por las tapas del hábitat. Por la curvatura y la alineación del eje de rotación con el norte-sur del sistema solar, este hábitat contará con luz solar las 24 h sin llegar a ser perjudicial, pues existen sociedades acostumbradas a este ritmo de iluminación (Globus et al., 2010). Este dato también influenciará en la relación con el exterior del hábitat. Al contrario de sentirse confinados, estos serán capaces de percibir su existencia posicionados en un lugar en el universo y bajo el efecto de la rotación generadora de gravedad artificial: se generarán nuevas perspectivas de la relación entre el ser humano y la vastedad del espacio.

### **Colonized Interstellar Vessel**

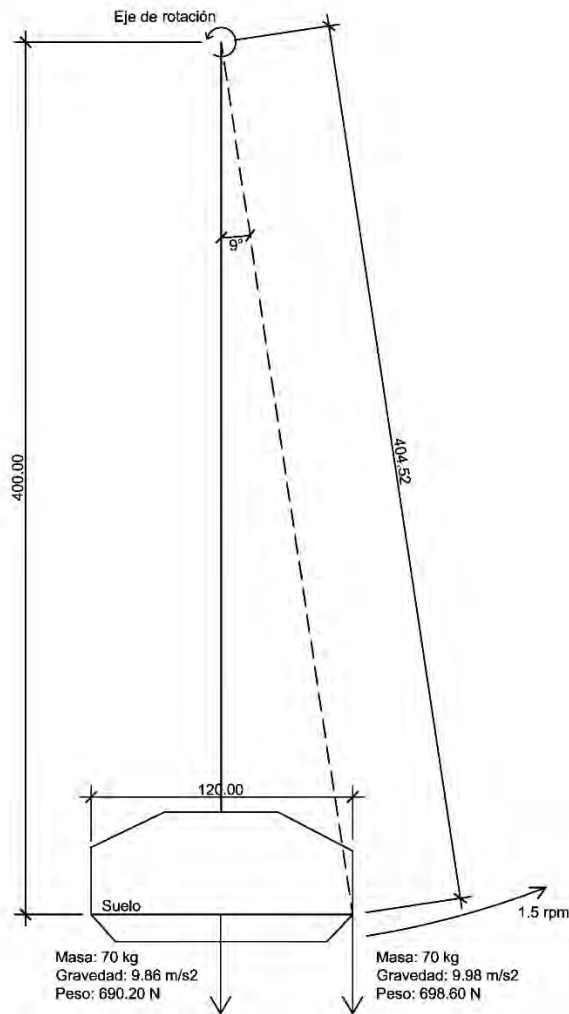
Para un viaje interestelar como el planteado por Colonized Interstellar Vessel, no solamente es necesario resolver los sistemas de habitabilidad en base a el sostenimiento exclusivo de los seres humanos, sino se debe diseñar un sistema bajo el concepto de *worlding*. Según Armstrong (2016), los hábitats interestelares deben recrear un interior capaz de asemejarse a la propia autosostenibilidad del planeta Tierra frente a las condiciones del extremas del espacio exterior. Así, CIV responde a la necesidad de generar estas variables por un tiempo indefinido siguiendo de igual manera la base planteada por la NASA (1977). Esto se debe a

que es imposible depender de los recursos terrestres cuando el hábitat se encuentra a millones de kilómetros lejos de la Tierra.

Para cumplir ese objetivo, en primer lugar, la geometría de este hábitat se generó a partir de los parámetros de confort bajo gravedad artificial de Hall (2006). Con 1.5 rotaciones por minuto y un radio de 400 m, girarán los 8 módulos de las áreas habitables, cuyas bases son planas. Debido a que esta característica de las bases, el radio desde el eje de rotación a estas será distinto en una sección transversal de estos módulos. Por ende, la influencia de la gravedad artificial presentará ligeros cambios dependiendo de la posición en este sentido. En base a las dimensiones del hábitat descritas por Summerford (2012) y a la fórmula para calcular la aceleración centrífuga descrita por Hall (2006), es posible determinar la diferencia de gravedad artificial entre el centro de las bases y un extremo lateral de estas. Esta será de aproximadamente  $0.12 \text{ m/s}^2$ , lo cual no generaría gran diferencia en la sensación de peso en las personas, pero sí una a tener en cuenta. Siguiendo la segunda ley de Newton (fuerza = masa \* aceleración), la diferencia para una persona de 700 N sería de 84 N, aproximadamente 840 g con la gravedad terrestre. Esta disparidad no es minúscula y es necesario considerar la posibilidad de que genere incomodidades en los usuarios, además del desempeño de sus actividades diarias.

**Figura 52**

*Disparidad de pesos al interior de los componentes de áreas habitables por diferencia de radios*



Fuente: Elaboración propia

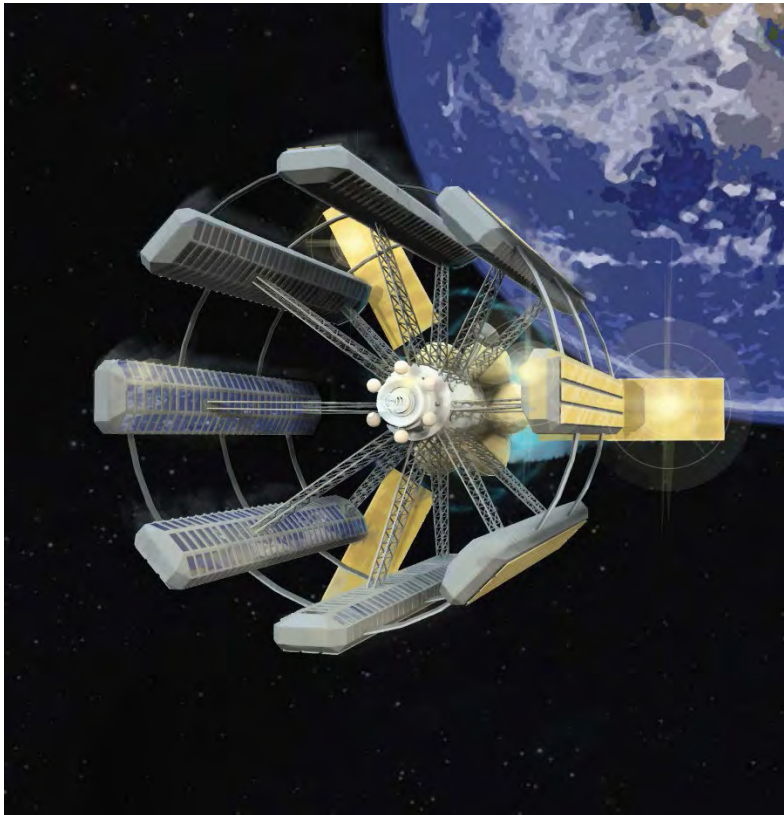
Por otro lado, la agricultura y la jardinería serán fuertemente promovidas en este proyecto, pues la gravedad artificial lo permite. Se dispondrán espacios descentralizados en cada componente de área habitable para destinarlos netamente a la agricultura. Ello asegurará su ideal distribución para cada habitante, además de prevenir que cualquier imprevisto afecte a la totalidad de la cosecha. Debido a ello, esta actividad se desarrollará bajo una única

constante gravitacional a diferencia de Kalpana One. En total, se calculó que más de 200 mil metros cuadrados de área sean provistos para toda esta actividad industrial con el fin de alimentar a todos los usuarios. Asimismo, se dispondrán áreas al interior destinadas tanto a la agricultura como a la jardinería de cada uno de los 5 módulos, los que funcionarán a manera de manzanas que componen las áreas habitables (Summerford, 2012). Ello es con el fin de que los habitantes se sientan más relacionados a esta actividad y a las vegetaciones.

Lo anterior mencionado contribuirá tanto a mantener la humedad del aire al interior del hábitat como al confort de los usuarios. Frente a la vastedad del espacio, no solamente se provee alimento, sino también una correspondencia del consumidor con la producción. Gracias a ello, el ser humano se sentirá parte del ecosistema generado a la lejanía del terrestre y en las condiciones extremas del espacio exterior. El techo vidriado de los componentes de las áreas habitables contribuirá a mejorar esta relación, pues no se excluye al ser humano de su contexto. Además, este techo es capaz de iluminar el ambiente de mejor manera gracias a la luz proveniente de las estrellas. Un hecho importante a mencionar es que la selección del vidrio como material no consolidará un proyecto completamente hermético a la radiación. Ello es importante para mantener el ecosistema en funcionamiento, pues Armstrong (2016) menciona que la Tierra está expuesta a la radiación del espacio sideral y por esa razón es posible la subsistencia de la vida en este planeta. En otras palabras, no puede existir un sistema hermético exento a la radiación, pues fracasaría. Las bases de los componentes habitables servirán para filtrar la radiación y elementos que presenten algún peligro para la vida la interior. La rotación de estos será de ayuda para una respuesta más totalitaria en distintos momentos de giro a estos peligros.

## Figura 52

### *Representación de CIV alejándose de la Tierra*



Fuente: Summerford (2012)

Evidentemente, no solo se someterá a la necesidad de luz estelar, pues esta depende de la distancia a alguna de estas. Esta distancia será variable, porque CIV estará en constante movimiento. Por esta razón, se recurrirá a la iluminación artificial al interior del hábitat. Con el fin de generar la energía suficiente para esta iluminación y otras actividades, se ha dispuesto un componente para reactores nucleares, pues no es posible depende de energía solar por las variaciones de distancias (Summerford, 2012). Así, la energía nuclear es el recurso ideal, ya que es capaz de proveer grandes cantidades de energía para otros fines. Además, es posible encontrar cuerpos celestes en el espacio que contengan los materiales requeridos (Rees, 2012). La ingravidez logrará que el transporte de estos materiales a los reactores consuma menos energía que en gravedad, al igual que en otras actividades industriales.

## **7. Conclusiones**

En el presente trabajo, la identificación de respuestas arquitectónicas al fenómeno de la ingravidez en hábitats diseñados en el espacio sideral ha sido posible. Ello fue gracias al reconocimiento de variables arquitectónicas relacionadas a esta condición al estudiar tanto a la relación entre la gravedad y la arquitectura, como a los factores a considerar al diseñar un hábitat espacial. Se encontró que fue adecuado el trabajo en base a 4 criterios: orientación, movimiento y recorrido, espacio arquitectónico e ingravidez, sistemas estructurales y sistemas de habitabilidad. Además, la identificación de los criterios ideales para la selección de los casos de estudio también fue de importancia en tanto muestra distintas respuestas a este fenómeno para alcanzar las conclusiones, principalmente por la selección de dos grupos de proyectos. Esta se hizo en base a los niveles de resolución tecnológicos, a los objetivos a resolver en base a sus dimensiones y también por su diseño posterior a la ISS.

En el primer par de casos de estudio, Omicron y Phari Base, se notaron diversas similitudes y diferencias en sus respuestas frente a la ingravidez principalmente marcadas por sus fines y su emplazamiento. El diseño de Omicron enfatizaba las estrategias de respuesta a la ingravidez en base a la experiencia del usuario. Fue posible gracias a que se emplazó en la órbita baja terrestre, la cual es facilitó su acceso desde la Tierra. Por otro lado, Phari Base se enfocaba en la funcionalidad del hábitat para la investigación frente al hecho de encontrarse en Phobos, a más de 50 millones de km de la Tierra.

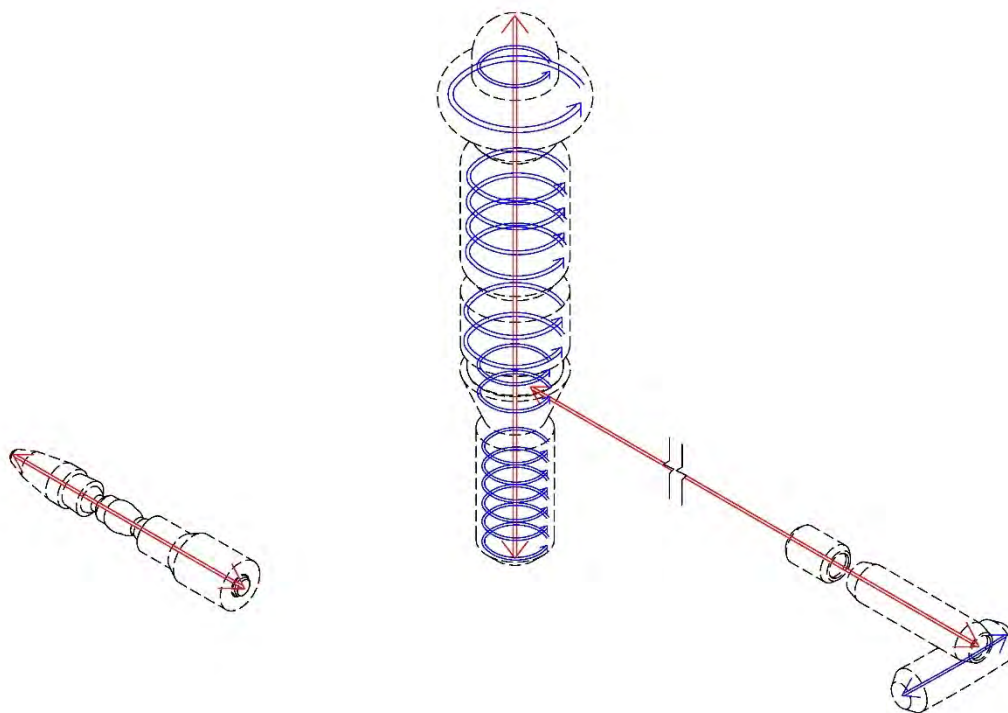
Asimismo, Omicron presentó un desarrollo del espacio arquitectónico interior que responda a una exploración del uso de herramientas en condiciones de ingravidez al liberarse de la verticalidad local. Por otro lado, esta variable le permitió a Phari un diseño interior enfocado en la practicidad de las herramientas. Esta búsqueda concluye en un diseño modular que será más fácil de ensamblar y mantener en aquel emplazamiento. Por ello, se notó que la verticalidad local no solamente presenta consecuencias en la orientación, sino también en el resto de variables escogidas para este trabajo.

Además, en ambos casos, el recorrido se definió de manera axial, lo cual fue conveniente para su practicidad. Los dos hábitats requieren respuestas inmediatas a cualquier inconveniente presentado por las condiciones extremas del exterior. Un recorrido inmediatamente reconocible es de gran ayuda para el acceso a cualquier módulo. Lo interesante es que ambos se dan liberados de cualquier escalera o elevador: se diseñaron

cilindros virtuales con las dimensiones ideales para el paso del ser humano. Solo la ingravidez permite estas definiciones en las que el ser humano, sin estar sujeto a una superficie horizontal, alinea el eje longitudinal de su cuerpo con el eje del recorrido para desplazarse a través de su hábitat.

### Figura 53

*Esquema de recorridos en Omicron (izquierda) y Phari Base (derecha)*



Fuente: Elaboración propia

El espacio arquitectónico de Omicron presenta una sinuosidad imposible de alcanzar en gravedad. Esta resolución expone las restricciones impuestas por la gravedad en el espacio arquitectónico, tales como la obligatoriedad de elementos de carga verticales y elementos de estancia o recorrido horizontales. Ha sido posible liberarse de ellos y lograr que el espacio responda mayormente al confort de la estancia y movimiento humano: una relación más directa entre usuario y espacio arquitectónico. Fue distinto en Phari, donde se recurrió a la practicidad de los espacios diseñándolos como contenedores distribuidos axialmente en vez

de respuestas directas a alguna actividad. Sin embargo, se notó que geometrías prácticas en el diseño en el espacio sideral como el toro o la cúpula son capaces de brindar nuevas experiencias de espacio arquitectónico al usuario que se relacionan a la liberación de la gravedad. Gracias a la ingravidez, el usuario es capaz de utilizar el volumen en su totalidad.

Ambas resoluciones culminaron en propuestas estructurales distintas que responden al mantenimiento de la vida humana en su interior frente a las condiciones extremas del espacio tanto en materiales como en diseño. Los proyectos mantenían la unidad de los componentes frente al riesgo de desplazamientos aleatorios comunes en ingravidez gracias a sistemas de acople que también permitían el mantenimiento de la presión interior. Además, el diseño multicapas permite presentar respuestas tanto al interior como al exterior. En Phari Base, la estructura se enfrentaba a la ingravidez mediante estos sistemas de acople y se diseñó un módulo que se fijó a Phobos gracias a un sistema de armaduras. Se dimensionaron las armaduras en base a la tensión o compresión generadas por colisiones imprevistas y movimientos en el interior.

El ECLSS de la ISS fue fundamental para la resolución de un diseño ideal de los sistemas de habitabilidad. Ello asegura su adecuado funcionamiento en ingravidez gracias a la experiencia de la ISS. Debido a esta condición, se pudieron encontrar problemas en la falta de aire, mantenimiento de temperatura, falta de protección contra la radiación, entre otros. Las soluciones planteadas son acertadas en practicidad de almacenamiento al igual que en eficacia. Además, estas soluciones reciclaban la mayoría de los insumos, lo que los hace autosustentables. Por otro lado, sistemas como el de la ducha inflable de Omicron logran nuevos alcances por el comportamiento del agua en ingravidez. De igual manera, la gravedad artificial ayuda a la producción de insumos al permitir la agricultura en Phari.

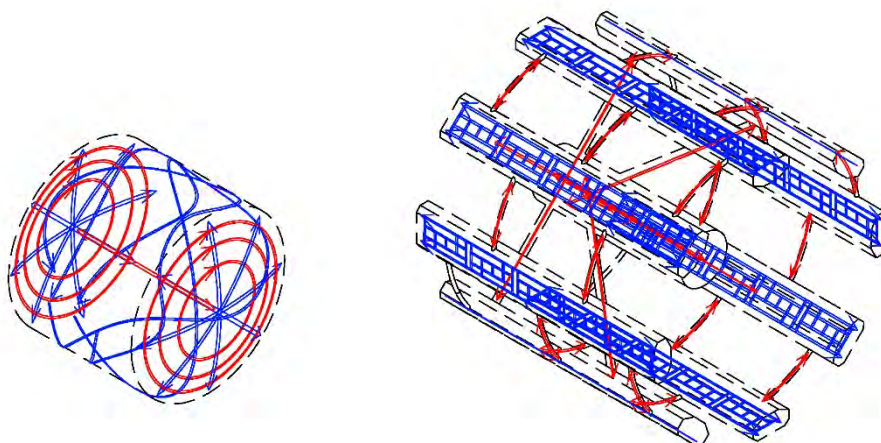
En lo relativo a las resoluciones adecuadas para las dimensiones de Kalpana One y Colonized Interstellar Vessel, la influencia del diseño de la gravedad artificial en su diseño fue remarcable. Como respuesta directa a la ingravidez fue necesario el recurrir a esta estrategia para resolver todos los requerimientos que permitan mantener a la cantidad de habitantes deseada. Al contrario de ser un contratiempo, la gravedad artificial se conjuga de excelente manera con la condición de ingravidez.

En principio, la verticalidad local es inherente bajo la influencia de la gravedad artificial, la cual será siempre perpendicular al eje de rotación. Ambos proyectos utilizan este hecho para

la identificación de los niveles superiores – más cercanos al eje de rotación – como situaciones de menor influencia de gravedad artificial. Se crea una gradiente gravitacional en los distintos niveles de los hábitats que se transitan a través de recorridos en el sentido de la verticalidad. En estos casos, sí es necesaria la disposición de escaleras o elevadores, pero el recorrido en capas de igual influencia de gravedad artificial dependió del diseño del espacio arquitectónico de cada hábitat. Además, los recorridos a sus interiores evidencian nuevas maneras de construir ciudades en el espacio sideral de distintas índoles que determinan estilos de vida y ejecuciones de actividades por sus propias resoluciones.

### Figura 54

*Esquema de recorridos en Kalpana One (izquierda) y Colonized Interstellar Vessel (derecha)*



Fuente: Elaboración propia

Los dos hábitats discernían en la geometría ideal que resuelva el tema de la gravedad artificial. Evidentemente, ambos presentaban un eje de rotación claro, pero por la cantidad de habitantes que proponían las estrategias fueron distintas. Ello con el fin de afrontar de distintas maneras la relación con la vastedad del espacio, el exterior. Además, la gravedad artificial es capaz de requerir una curvatura del espacio para que sea equivalente en todos los puntos. Sin embargo, con un adecuado diseño del interior, esta curvatura puede no incomodar en las actividades.

Las estructuras que son capaces de soportar estos hábitats con gravedad artificial requieren distintos parámetros de evaluación, pero coinciden en que apuntan a enfrentarse a las

condiciones extremas del exterior. Naturalmente, su configuración será axial y radial para ser capaz de cumplir adecuadamente estos parámetros. Además, presentan diseños específicos para el control de cualquier tambaleo, lo cual contribuye al confort interior. Sin embargo, actualmente la construcción de estas estructuras es imposible por el enorme costo, la carencia de tecnología ideal y disponibilidad de materiales actualmente.

Con respecto a los sistemas de habitabilidad, estos se ven potenciados por las condiciones de ingravidez. Distintas actividades se tornan más sencillas y otras alcanzan nuevas maneras de optimizar recursos. El traslado de cargas requerirá de menor energía en condiciones de ingravidez. La obtención de esta energía se puede realizar de diversas maneras obteniendo recursos de materiales encontrados en el espacio o gracias a la energía solar. La actividad de la agricultura destaca por la posibilidad de optimizar los sembríos en distintas gravedades.

Las diferencias entre estos dos grupos presentaron consecuencias en las maneras de afrontar la condición de ingravidez. Una de las más resaltantes fue la obligatoriedad de la gravedad artificial en el segundo grupo. No obstante, en ambos grupos, la geometría del proyecto resultaba basada en un diseño axial sea por el requerimiento de la gravedad artificial o la simplicidad del recorrido y practicidad del diseño. Los espacios arquitectónicos alcanzan nuevas dimensiones en su diseño tanto en geometría como en relaciones con el exterior. Las estructuras se alejan del fenómeno de la caída y se enfocan en mantener al ser humano en comodidad. Por último, los sistemas de habitabilidad presentan nuevas posibilidades en optimización de procesos, administración de desechos y almacenamiento de recursos.

Al contrario de limitar, las condiciones de ingravidez develan nuevas capacidades de estrategias en el diseño arquitectónico. Las respuestas estudiadas reflejan el estado actual de la arquitectura en el espacio sideral como una disciplina que está en constante exploración sobre sus diseños. Además, está lista no solamente para enfrentarse a cualquier condición extrema, sino también para aprovecharla. Estas investigaciones no se ciñen al desarrollo de la propia disciplina, sino que exploran e incentivan la evolución del conocimiento de la raza humana en la exploración de las condiciones que se presentan en el espacio.

## **8. Referencias**

1. Adams, C., & Jones, R. (2014). Alpha: From the International Style to the International Space Station. *Architectural Design*, 84(6), 70–77. <https://doi.org/10.1002/ad.1835>
2. Armstrong, R. (2016). *Star Ark: A Living, Self-Sustaining Spaceship* (Springer (ed.)).

3. Arora, N., Bajoria, A., & Globus, A. . (4 de mayo de 2006). *Kalpna One: Analysis and design of space colony. 47th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference 14th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference 7th*. <https://doi.org/10.2514/6.2006-2183>
4. Ball, P. (2008). Quantum weirdness and surrealism. *Nature*, 453(7198), 983–984. <https://doi.org/10.1038/453983a>
5. Bishop, T., Kitmanyen, V., Legarde, T., Zachary, T., & Bannova, O. (2017). HUMAN SPACEFLIGHT: PHOBOS BASE. *AIAA student journal. American Institute of Aeronautics and Astronautics*.
6. Bluth, B. J., & Helppie, M. (1986). *Soviet Space Stations as Analogs* (2a ed.).
7. Cohen, D. (2007). Earth's natural wealth: an audit. *New Scientist*, 34–41.
8. Cohen, M. M., Flynn, M. T., & Matossian, R. L. (14 de julio de 2013). Water Walls Life Support Architecture. *43rd International Conference on Environmental Systems*. <https://doi.org/10.2514/6.2013-3517>
9. Doule, O. (2008). *Passenger Safety on Personal Spaceflight - Spacecraft Interior Concept Design - Silverbird*. International Space University.
10. Doule, O. (2014a). Ground Control: Space Architecture as Defined by Variable Gravity. *Architectural Design*, 84(6), 90–95. <https://doi.org/10.1002/ad.1838>
11. Doule, O. (2014b). Space Tourism: Waiting for Ignition. *Architectural Design*, 84(6), 64–69. <https://doi.org/10.1002/ad.1834>
12. Doule, O., Šálený, V., Hérin, B., & Rousek, T. (2011). Omicron space habitat—research stage II. *Acta Astronautica*, 70, 139–158. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2011.07.027>
13. Einstein, A. (1999). *Sobre la teoría de la relatividad especial y general* (Altaya (ed.)).
14. Fauquet, R. S., & Okushi, J. (1 de setiembre de 1991). *Architectural Studies Relating to the Nature of Human Body Motion in Microgravity*. <https://doi.org/10.4271/912076>
15. Finckenor, M. M., & De Groh, K. K. (2016). *Space Environmental Effects* (A. Rai (ed.)). NASA ISS Program Science Office.
16. George C. Marshall Space Flight Center. (1977). *Skylab, Our First Space Station* (L. Belew (ed.)). <https://history.nasa.gov/SP-400/ch2.htm>
17. Gilruth, R. R. (1969). *Manned Space Stations - Gateway to our Future in Space* (pp. 1–10). [https://doi.org/10.1007/978-94-010-3420-3\\_1](https://doi.org/10.1007/978-94-010-3420-3_1)
18. Globus, A., Bajoria, A., & Arora, N. (1990). *Kalpna One: A New Orbital Space Colony Design*. American Institute of Aeronautics and Astronautics.

- <https://www.researchgate.net/publication/252233451>
19. Globus, A., Bajoria, A., & Straut, J. (2010). *The Kalpana One Orbital Space Settlement Revised*. American Institute of Aeronautics and Astronautics.  
[https://www.researchgate.net/publication/252086271\\_The\\_Kalpana\\_One\\_Orbital\\_Space\\_Settlement\\_Revised](https://www.researchgate.net/publication/252086271_The_Kalpana_One_Orbital_Space_Settlement_Revised)
20. Globus, A., Covey, S., & Faber, D. (2017). *Space Settlement: An Easier Way*.  
<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.12690.35523>
21. Griffin, B. N. (4 de agosto de 2014). Space Architecture: The Role, Work and Aptitude. *AIAA SPACE 2014 Conference and Exposition*.  
<https://doi.org/10.2514/6.2014-4404>
22. Hall, T. (19 de setiembre de 2006). Artificial Gravity Visualization, Empathy, and Design. *Space 2006*. <https://doi.org/10.2514/6.2006-7321>
23. Hall, T. (1995). The Architecture of Artificial Gravity: Theory, form, and function in the high frontier. En B. Faughnan (Ed.), *Twelfth SSI-Princeton Conference* (pp. 182–192). Space Studies Institute.
24. Hanford, A. (2004). Advanced Life Support Research and Technology Development Metric. *Internal Documents*.
25. Häuplik-Meusburger, S. (2011). *Architecture for Astronauts, An Activity-based Approach* (SpringerWienNewYork (ed.)).
26. Häuplik-Meusburger, S., & Bannova, O. (2016). *Space Architecture Education for Engineers and Architects, Designing and Planning Beyond Earth* (D. A. Vakoch (ed.)). Springer International Publishing.
27. Hayes, H., O'Neil, G. K., & Asimov, I. (1975). *The Roundtable TV Interview*. SSI: Space Studies Institute.
28. Kennedy, J. F. (1961). *Special Message to Congress on Urgent National Needs, 25 May 1961*.
29. Kitmacher, G. (2002). Design of the Space Station Habitable Modules. *53rd International Astronautical Congress The World Space Congress - 2002*.  
<http://www.spacearchitect.org/pubs/IAC-02-IAA.8.2.04.pdf>
30. Landi, J., Filippeschi, S., Mameli, M., Georgoulas, A., & Di Marco, P. (2017). *Numerical analysis of confined two phase flows in passive heat transfer devices: towards validation of a volume of fluid model in space conditions with OpenFOAM*. University of Pisa.
31. Launius, R. D. (2011). Space Stations: Base Camps to the Stars. *History of Rocketry*

- and Astronautics: Proceedings of the Thirty-eighth History Symposium of the International Academy of Astronautics, Vancouver, British Columbia, Canada, 2004*, 421–446.
32. Leach, N. (2014). Space Architecture: The New Frontier for Design Research. *Architectural Design*, 84(6), 8–15. <https://doi.org/10.1002/ad.1826>
  33. Linares de la Torre, O. (2015). La influencia de la comprensión de la gravedad como hecho físico en la configuración del espacio arquitectónico. *AUS*, 18, 52–57. <https://doi.org/10.4206/aus.2015.n18-09>
  34. Linares de la Torre, Ó. (2014). *La estructuración del espacio arquitectónico por la gravedad y la luz*. Universitat Politecnica de Catalunya.
  35. Lockard, E. S. (2014). *Human Migration to Space* (Springer (ed.)). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-05930-3>
  36. Lyndon B. Johnson Space Center. (1997). A History of U.S. Space Stations. *Nasa Facts*. <https://er.jsc.nasa.gov/seh/history.pdf>
  37. McLaughlin, R. J., & Warr, W. H. (2001). *The Common Berthing Mechanism (CBM) for InternationalSpace Station*. [https://spacecraft.ssl.umd.edu/design\\_lib/ICES01-2435.ISS\\_CBM.pdf](https://spacecraft.ssl.umd.edu/design_lib/ICES01-2435.ISS_CBM.pdf)
  38. NASA. (1977). *Space Settlements, A Design Study* (R. D. Johnson & C. Holbrow (eds.)).
  39. NASA. (2015). *Reference Guide to the International Space Station*. <https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/np-2015-05-022-jsc-iss-guide-2015-update-111015-508c.pdf>
  40. NASA. (2020). *ECLSS*. Marshall History. <https://www.nasa.gov/centers/marshall/history/eclss.html>
  41. Newsom, B. D. (1972). Habitability factors in a rotating space station. *Space Life Sciences*, 3(3), 192–197. <https://doi.org/10.1007/BF00928163>
  42. Porter, S., & Bradley, F. (2016). Architectural Design Principles for Extra-Terrestrial Habitat. *Acta Futura*, 10, 23–35.
  43. Rees, M. (2012). *Universe: The Definitive Visual Guide Martin Rees* (J. Chisholm, B. Hoare, & G. Sparrow (eds.)). Smithsonian.
  44. Sebestyen, G., Fujikawa, S., Galassi, N., & Chuchra, A. (2018). *Low Earth Orbit Satellite Design*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-68315-7>
  45. Seedhouse, E. (2013). Artificial Gravity. En *Pulling G* (pp. 169–187). Springer New

- York. [https://doi.org/10.1007/978-1-4614-3030-8\\_9](https://doi.org/10.1007/978-1-4614-3030-8_9)
46. Seedhouse, E. (2015). Bigelow's Space Station. En *Bigelow Aerospace* (pp. 121–139). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-05197-0\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-319-05197-0_7)
47. Summerford, S. (2012). *Colonized Interstellar Vessel: Conceptual Master Planning* (S. Summerford (ed.)).  
[http://www.icarusinterstellar.org/uploads/Colonized\\_Interstellar\\_Vessel.pdf](http://www.icarusinterstellar.org/uploads/Colonized_Interstellar_Vessel.pdf)
48. The Editors of Encyclopaedia Britannica. (2019). *Weightlessness*.  
<https://www.britannica.com/science/weightlessness>
49. Versteeg, B. (2020). *Galleries - Spacehabs*. Spacehabs.  
<https://spacehabs.com/galleries/>
50. Von Braun, W. (1952). Crossing the last frontier. *Collier*, 72(74), 24–29.
51. Yegen, E. (2019). *AN INQUIRY OF SPACE ARCHITECTURE: DESIGN CONSIDERATIONS AND DESIGN PROCESS*. Middle East Technical University.

