

# HABITAR EN LA ÓRBITA TERRESTRE BAJA

UN ESTUDIO DESDE LA ÓPTICA DE LA ARQUITECTURA

# HABITAR EN LA ÓRBITA TERRESTRE BAJA

Un estudio desde la óptica de la arquitectura

## RESUMEN

La tecnología y la arquitectura dan al ser humano la capacidad de habitar en los entornos más hostiles del planeta. A finales del siglo XX, la revolución tecnológica tras las dos guerras mundiales nos dio al fin la capacidad de colonizar la última frontera de nuestro planeta: la órbita terrestre baja.

En este trabajo se analiza, desde un punto de vista interdisciplinar con énfasis en la arquitectura, lo que supone romper esa frontera. Las condiciones, los efectos, y la evolución histórica de los hábitats orbitales, hasta llegar a la Estación Espacial Internacional. Este último y exitoso hábitat, objeto principal del estudio, nos proporciona en su diseño una herramienta analítica para desmenuzar los múltiples estratos que componen este tipo de habitabilidad extrema. Sumando al análisis la inventiva de la arquitectura terrestre, que históricamente ha sabido resolver problemáticas similares, estaremos en condiciones de proponer mejoras y arquitecturas orbitales verdaderamente habitables, más allá de la funcionalidad estricta que históricamente ha dominado el campo de la exploración espacial.

## ÍNDICE

<b>BLOQUE 0: INTRODUCCIÓN</b>	<b>02</b>	<b>3.3 Consideraciones de habitabilidad</b>	<b>26</b>
0.1 Prólogo: Mirar hacia arriba	02	3.3.1 Gestión del espacio	26
0.2 Introducción	02	3.3.2 Movimiento interior	28
0.2.1 Estado de la cuestión	02	- Plano 7: Flujos	29
0.2.2 Estructura del trabajo	03	3.3.3 Necesidades básicas	30
0.2.3 Objetivos	03	3.3.4 Actividades y usos	32
0.2.4 Metodología	03	3.3.5 Estética y bienestar	34
		- Plano 8: Acústica	38
<b>BLOQUE I: ÁMBITO, CONTEXTO Y OBJETO DE ESTUDIO</b>	<b>03</b>	<b>SECCIÓN 4. SITUACIONES SIMILARES Y RESPUESTAS ARQUITECTÓNICAS</b>	
<b>SECCIÓN 1. LA ÓRBITA TERRESTRE BAJA</b>		4.1 Identificación de análogos terrestres	39
1.1 Fundamentos físicos	04	4.1.1 Vivienda mínima	40
1.1.1 Newton, Kepler y la ley de la gravitación universal	04	4.1.2 Vivienda irregular	42
1.1.2 Concepto de órbita e implicaciones	05	4.1.3 Metabolismo	44
1.1.3 Descripción del movimiento orbital	06	4.1.4 Bases antárticas	46
1.1.4 Encuentros orbitales	07	4.2 Análisis de las consideraciones previas en los análogos terrestres	48
1.2 Habitar la OTB: Contexto histórico	08	4.2.1 Gestión del espacio	48
1.2.1 Los primeros pasos	08	4.2.2 Movimiento interior	50
1.2.2 La carrera espacial	09	4.2.3 Necesidades básicas	51
1.2.3 La llegada a la Luna	09	4.2.4 Actividades y usos	53
1.2.4 El programa Almaz y las estaciones Salyut	10	4.2.5 Estética y bienestar	54
1.2.5 Skylab	11	<b>BLOQUE III: PROPUESTA DE MEJORA Y CONCLUSIONES</b>	<b>56</b>
1.2.6 La estación espacial Mir y la colaboración en el espacio	12	<b>SECCIÓN 5. PROPUESTA</b>	
<b>SECCIÓN 2. LA ESTACIÓN ESPACIAL INTERNACIONAL</b>		5.1 Propuesta 1	57
2.1 La misión	13	- Plano 9: Presentación volumétrica	57
2.1.1 Objetivos y parámetros orbitales	13	- Plano 10: Sección horizontal	58
2.1.2 Sistema Rack y acomodación científica	13	- Plano 11: Secciones verticales	59
2.3 Distribución	15	- Plano 12: Despiece y características de la solución	60
- Plano 1: Sección horizontal y sección longitudinal	15	5.2 Propuesta 2	61
- Plano 2: Secciones transversales	16	- Plano 13: Presentación volumétrica	61
- Plano 3: Volumetría explosionada	17	- Plano 14: Integración y planimetría del módulo	62
- Plano 4: <i>Unity, Destiny, Harmony y Tranquility</i>	18	- Plano 15: Vistas interiores de las propuestas	63
- Plano 5: <i>Columbus, Leonardo y Kiba</i>	19	<b>SECCIÓN 6. CONCLUSIONES</b>	
- Plano 6: <i>Quest Joint Airlock, PMA</i> y sección fugada	20	<b>BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS</b>	<b>R01</b>
<b>BLOQUE II: ANÁLISIS DEL DISEÑO</b>	<b>21</b>	<b>ANEXOS</b>	<b>A01</b>
<b>SECCIÓN 3: CRITERIOS Y CONSIDERACIONES DE DISEÑO EN LA ESTACIÓN ESPACIAL INTERNACIONAL</b>		Anexo 1: Acrónimos y abreviaturas	A02
3.1 Criterios de diseño	22	Anexo 2: Condiciones en la órbita terrestre baja y efectos en el cuerpo humano	A03
3.2 Consideraciones de supervivencia	22	Anexo 3: Lanzamiento y ensamblaje de la EEI	A05
3.2.1 Control ambiental	23	Anexo 4: Integración volumétrica de sistemas y consideraciones	A07
3.2.2 Electricidad	24		
3.2.3 Suministros	25		

# HABITAR EN LA ÓRBITA TERRESTRE BAJA

Un estudio desde la óptica de la arquitectura

## BLOQUE 0

### 0.1 PRÓLOGO: MIRAR HACIA ARRIBA

¿Hay mesas en las estaciones espaciales?

La arquitectura es una doctrina estrictamente ligada a la Tierra, como casi todas las actividades humanas, en realidad. Cuando se lanza un objeto al aire, lo normal es que vuelva a bajar a la tierra. Si se construye una estructura, hay que hacerlo sobre una cimentación que transmita las cargas a la tierra. Cuando un avión despegue, tarde o temprano se queda sin combustible y vuelve a aterrizar. En estas condiciones, al margen de la exploración y la investigación científica, es difícil pensar en algo más allá de nuestra atmósfera respirable.

Estamos sometidos a la 'tiranía' de la gravitación universal, la fuerza que hace que los edificios se caigan, y que las galaxias se mantengan unidas. Pero fuera de nuestra doctrina, hay quien ha encontrado formas de burlar a esta vigilante implacable. Lanzándonos rocas los unos a los otros (como tendemos a hacer) llegó un momento en que nos dimos cuenta de que, si se lanzaban con suficiente fuerza, darían la vuelta a la Tierra y nos golpearían en la nuca. Y si se lanzaban todavía con más fuerza, nunca caerían. El concepto de órbita, que conocíamos desde hacía siglos, había dejado de ser una realidad celestial abstracta: de repente, podía aplicarse a objetos construidos por el hombre, siempre que estuviéramos dispuestos a invertir enormes cantidades de energía.

Pero, de vuelta en la Tierra, fueron pocas las cosas que cambiaron. Mientras los científicos y los ingenieros lanzaban sus 'juguetitos' al espacio, los arquitectos construían sobre cimientos aún atados a la superficie. Con la Guerra Fría y la carrera espacial, llegó el concepto de habitar en la órbita terrestre, y más allá. «Habitar», debieron pensar los arquitectos, «ese concepto me suena de algo». Pero ni la mentalidad era aún la apropiada, ni había sitio para el diseño arquitectónico en las estrechas latas en que se lanzaban a astronautas y cosmonautas, más allá de lo estrictamente funcional. Los astronautas podían, literalmente, dormir en armarios para reducir el coste de los lanzamientos.

Después llegaron las estaciones espaciales. Y sí, hay mesas en las estaciones espaciales. En todas, de hecho, desde el programa ruso *Salyut* y sus primeros experimentos con la habitabilidad orbital de larga duración. Pero, ¿por qué? o más bien... ¿para qué? Es de sobra sabido que un cuerpo con cierta masa en órbita está en un estado de ingravidez, no porque la fuerza de la gravedad no actúe sobre él, sino porque se contrarresta con otra fuerza o se mantiene en caída libre sin sentir aparentemente los efectos de la fuerza gravitatoria. Así que, si uno está comiendo en la órbita terrestre y suelta su tenedor, éste no va a ir a ningún sitio. Se quedará ahí flotando. No hace falta una superficie a una altura determinada para evitar que caiga al suelo.

Y, sin embargo, ahí está la mesa. En la estación *Mir* y en la Estación Espacial Internacional (EEI), a pesar de que cada kilogramo puesto en órbita cuesta decenas de miles de dólares. Y es que resulta que cuando comenzamos a diseñar estaciones en la órbita terrestre baja, no teníamos aún ni idea de cómo habitar estos espacios. Los diseñadores, por tanto, pensaron en base a lo que conocían: estancias y estanterías para colocar objetos.

Los ingenieros no tardaron en darse cuenta de lo absurdo de estos diseños, y dieron un giro en la dirección contraria: desprendieron a estos espacios de cualquier tipo de mobiliario o elemento añadido más allá, de nuevo, de lo estrictamente funcional. Las paredes, con un velcro bien colocado, podían servir perfectamente de mesa.

Pero los astronautas se quejaron<sup>[1]</sup>. Algo tan simple como la carencia de una superficie alrededor de la cual congregarse, en la cual comer y beber y criticar al resto de miembros de la tripulación, se hizo verdaderamente insoportable. ¡Somos humanos, al fin y al cabo! Tanto se quejaron que, desde entonces, las estaciones espaciales han habilitado pequeños espacios de comedor, con mesas horizontales donde, mediante velcros, colocar las cosas. Lugares en torno a los cuales sentarse, o más bien flotar, y comer en comunidad.

Eran muy pocos entonces los que se habían dado cuenta de que la arquitectura había llegado, casi a hurtadillas, al espacio. Porque eso es arquitectura. Una cosa tan sencilla como la repetición de un patrón de conducta perteneciente al lugar de origen. Un pequeño gesto con el que los astronautas se apropian del espacio, de un modo ajeno a lo estrictamente funcional. La enorme diferencia entre sobrevivir y habitar.

La arquitectura tiene muchísimo que decir en este campo naciente que es la exploración espacial, el habitar en el espacio exterior. Porque, al igual que los exploradores del siglo XIX, lo primero que hacemos cuando llegamos a un nuevo lugar es protegernos de los elementos. Construirnos un refugio. Y al mismo tiempo, hacerlo nuestro. En todo hábitat que aspire a ser algo más que una simple máquina funcional, la componente humana, el diseño arquitectónico, es casi tan importante como el diseño técnico. La radiación, la microgravedad, la pérdida de masa muscular, son problemas a resolver tanto como lo son el aislamiento, la privacidad y la monotonía. Problemas que se resuelven mediante el diseño de calidad de los hábitats que, tarde o temprano, tendremos que empezar a llamar hogar.

Los arquitectos miramos, al fin, hacia arriba. El vínculo con la Tierra se va resquebrajando poco a poco, y eso es positivo tanto para la profesión como para el avance de la sociedad en general. Porque mientras descansaba sobre el pilar monolítico de la supervivencia, nuestra expansión más allá de los confines de nuestro planeta mantenía un equilibrio precario dependiente de la voluntad investigadora y del apoyo estatal. La arquitectura propone una nueva base, un pilar gemelo, que estabiliza el sistema y abre esta expansión a nuevas fronteras.

Y así, de la órbita terrestre baja al viaje interestelar, de la Luna a Marte y a las lunas de los gigantes gaseosos, se nos abre una nueva posibilidad de hacer nuestros los espacios que exploramos. De llevar nuestros patrones del habitar a lugares nunca vistos. Y en los tiempos que corren, con la población humana alcanzando su tope ecológico, con el cambio climático y el agotamiento de los recursos naturales a escala global, simplemente no podemos permitirnos seguir mirando hacia abajo.

Ese es el interés y el objetivo de esta doctrina naciente, intrínsecamente interdisciplinaria, que es la arquitectura espacial. Puede ser tan sencillo como diseñar una mesa sobre la que no floten los cubiertos. O tan complejo como imprimir una ciudad partiendo del regolito lunar. Es un mundo nuevo, en el que todo está por definir.

### 0.2 INTRODUCCIÓN

#### 0.2.1 ESTADO DE LA CUESTIÓN

La arquitectura espacial es un campo prácticamente recién nacido, si bien sus antecedentes históricos se remontan casi a los primeros años de la Guerra Fría. Desde el momento en que surgió la cuestión de enviar seres humanos al espacio, empezó a estudiarse la habitabilidad de este entorno. Con algunas décadas de experiencias pasadas a nuestras espaldas, el diseño de hábitats espaciales se ha ido adentrando poco a poco en una nueva época, muy distinta de aquella en que las cápsulas espaciales debían responder estrictamente a una lista de las necesidades fisiológicas de un único tripulante. Esta nueva época ha sido el resultado de dos factores.

En primer lugar, la singularidad del entorno en que se lleva a cabo la actividad. El espacio viene siendo, desde los inicios de la carrera espacial, un lugar de confluencia para los esfuerzos innovadores de diferentes disciplinas, desde la exploración y la astronomía, a las ciencias planetarias y la ingeniería, cada una con sus intereses particulares. En los últimos tiempos, a estas disciplinas se ha sumado también la arquitectura.

Esta situación ha generado el caldo de cultivo perfecto para el segundo factor: la interdisciplinariedad. Más reciente de lo que pueda parecer, especialmente en las ciencias (ver introducción al bloque II). Las conexiones que se han ido dando entre las diferentes actividades y disciplinas, fundamentales para resolver los problemas enormemente complejos que plantea la estancia de larga duración en el espacio, han dado origen a líneas de investigación completamente nuevas e interdisciplinares desde su concepción. La arquitectura espacial es una de ellas, cada día con más reconocimiento dentro del sector aeroespacial.

A estos dos factores hay que sumar la revolución tecnológica que está teniendo lugar en paralelo. Las empresas privadas están dando un nuevo impulso a una exploración espacial estrangulada por la falta de presupuesto, mediante el uso de cohetes reutilizables que han reducido a un tercio el precio de poner una carga en órbita. Esto nos deja entrever un panorama en el que, conforme la caída de los precios vaya reduciendo la prioridad, de momento absoluta, de la función sobre la forma, el papel de la arquitectura espacial va a ser más protagonista que nunca. Las estancias prolongadas en órbita requieren confort, diseño de interiores, y diseño arquitectónico. Eso es algo que estas compañías ya han asumido, y que podemos ver en la nueva generación de vehículos orbitales, como la cápsula *Crew Dragon* de la empresa norteamericana *Space Exploration Technologies* (Space X).

No solo eso, sino que por primera vez nos encontramos en una situación en que la habitabilidad en órbita es una realidad continua en el tiempo, y las infraestructuras allí creadas empiezan a generar un tremendo bagaje de experiencias que nos pueden ayudar a plantear un proceso evolutivo de diseño similar al de cualquier otra arquitectura terrestre. Conforme hábitats como la EEI empiezan a envejecer (su vida útil está proyectada hasta 2024, extensible quizá hasta 2030 dependiendo de la financiación), surge la cuestión de aplicar estos procesos y experiencias a un ámbito existente, adaptándolos tanto a los requerimientos actuales como a la creciente flexibilidad en los lanzamientos orbitales. Podemos empezar a hablar de 'rehabilitar' estaciones orbitales de forma similar a como rehabilitamos nuestros edificios en la superficie, con el ahorro de recursos que ello implica.

Estamos por tanto ante un campo naciente, pero con una inmensa e indudable proyección de futuro. Un campo por explorar y definir, y sobre el que convendría, por tanto, empezar a volcar esfuerzos.

# HABITAR EN LA ÓRBITA TERRESTRE BAJA

Un estudio desde la óptica de la arquitectura

## 0.2.2 ESTRUCTURA DEL TRABAJO

Este trabajo está estructurado en torno a la interdisciplinariedad que caracteriza la arquitectura espacial y, en consecuencia, abarca diversos ámbitos que nos permiten comprender el dónde, el cómo y el porqué de la EEI y de su proceso de diseño. Queda dividido, según los objetivos, en tres bloques:

En el **bloque I** se introduce el objeto de estudio de este trabajo, la EEI, desde varios ámbitos relevantes para su comprensión. El bloque se divide en dos secciones. La sección 1 nos adentra en los ámbitos físico e histórico, empezando con un análisis del entorno en que se encuentra la EEI, la órbita terrestre baja (OTB), que incluye las nociones básicas, las realidades físicas que implica el concepto de 'órbita' y las maniobras que se pueden realizar, y aportando seguidamente un breve contexto histórico focalizado en la habitabilidad. La sección 2 introduce la EEI desde la perspectiva de la ingeniería aeroespacial, con un breve análisis de la misión. Asimismo, se define arquitectónicamente, mediante planimetrías, el estado actual del objeto de estudio.

En el **bloque II** entramos en el proceso de diseño desde la perspectiva interdisciplinar de la arquitectura espacial, a medio camino entre la arquitectura y la ingeniería aeroespacial. Para el análisis recurrimos a dos secciones. La sección 3 analiza los criterios y consideraciones más importantes que se han tenido en cuenta durante el diseño de la EEI, desde una perspectiva más cercana a la ingeniería aeroespacial que a la arquitectura, aunque sin perder de vista la incidencia de esta última. Esta sección queda además dividida en cinco grupos de consideraciones que generan una estructura de 'consulta' a la que recurriremos en futuras secciones. La sección 4 adopta una visión más próxima a la arquitectura, identificando y estudiando los distintos 'análogos terrestres' a la EEI desde la estructura de consideraciones de la sección anterior. Este proceso de ida y vuelta nos permite extraer conclusiones fundamentadas en el ámbito interdisciplinar de la arquitectura espacial.

En el **bloque III** se utilizan las conclusiones extraídas del bloque II para llevar a cabo una propuesta de mejora, o 'rehabilitación' de la EEI de cara a la que puede ser su última década. La propuesta se desarrolla en la sección 5.

En el **bloque IV**, por último, se recopilan las conclusiones, en la sección 6, y las referencias del trabajo.

## 0.2.3 OBJETIVOS

El objetivo de este trabajo es aportar una visión arquitectónica al desafío interdisciplinar de habitar más allá de la atmósfera terrestre, en concreto, en la órbita terrestre baja. Esto se conseguirá mediante el estudio del precedente notable que es la Estación Espacial Internacional, habitada de forma continua durante los últimos veinte años, muestra vigente de la viabilidad de este tipo de instalaciones orbitales.

Los objetivos específicos (OE) planteados para conseguir esto son:

OE 1: Conocer el hábitat y el entorno en el que se encuentra a un nivel que permita analizarlo.

OE2: Basándonos en este conocimiento, llevar a cabo un análisis de los criterios y consideraciones que se han tenido en cuenta a la hora de diseñar la estación, y ayudados por un repertorio de situaciones análogas en la arquitectura terrestre, valorar tanto sus logros como sus carencias.

OE3: Abordar una propuesta de mejora desde la visión interdisciplinar de la arquitectura espacial.

## 0.2.4 METODOLOGÍA

Para la realización de este trabajo se han consultado diversas fuentes bibliográficas vinculadas con las temáticas de trabajo, aunando en el bloque I información de ámbito físico, histórico e ingenieril sobre el proyecto de la EEI y los diferentes sistemas que lo componen. La información se ve reflejada a nivel tanto textual como gráfico, culminando con la elaboración propia, mediante software Autodesk, de una planimetría a diversas escalas de la estación. Esta planimetría, en la sección 2 del trabajo, se basa a su vez en diversas fuentes gráficas que se citarán en los propios planos (ver nota a pie de página 15).

El análisis, correspondiente con la sección 3, se ha estructurado entorno a los criterios de diseño y su influencia en el proyecto, así como a varias consideraciones (designadas como consideraciones de supervivencia y consideraciones de habitabilidad) extraídas tanto de las fuentes bibliográficas disponibles sobre la EEI como del propio criterio arquitectónico del autor. Las consideraciones de habitabilidad, con una mayor componente arquitectónica, se han dividido en cinco grupos para transformarlas en una herramienta analítica de cara a la siguiente sección del trabajo. En la sección 4, los análogos terrestres (seleccionados en base a su similitud con la EEI en cuatro aspectos clave: tamaño reducido, modularidad, hostilidad del entorno y aislamiento) se han analizado textual y gráficamente recurriendo a la herramienta analítica anteriormente mencionada.

Finalmente, el proceso de diseño para la propuesta del bloque III se ha llevado a cabo a partir de las planimetrías elaboradas en el bloque I y de las conclusiones extraídas del bloque II. El resultado se ha planteado gráficamente, como una propuesta dual para la NASA, utilizando los programas AutoCad, Photoshop y Lumion.

Fondo: La Tierra vista desde Saturno (Imagen 01).

## BLOQUE I: ÁMBITO, CONTEXTO Y OBJETO DE ESTUDIO

En este bloque buscamos la realización del objetivo específico OE1: conocer el hábitat y el entorno en el que se encuentra a un nivel que permita analizarlo. Para ello, es necesario tratar diversas materias sin cuya visión resulta difícil comprender cómo hemos llegado a diseñar y construir una estación capaz de mantenerse en la órbita de nuestro planeta, y en las condiciones extremas que ello implica, durante veinte años.

En el estado actual de la temática hablábamos de dos factores que han moldeado esta nueva etapa de la exploración espacial basada en la habitabilidad a largo plazo. El primero de ellos, si lo recordamos, era la singularidad del espacio como lugar de encuentro de la innovación en diversas disciplinas. Pues bien, este primer bloque trata sobre física, sobre historia, sobre ingeniería, sobre biología y salud, e incluso empezaremos a esbozar los espacios que esconde la estación y a discutir su realidad arquitectónica. La visión unitaria que nos formaremos en el proceso sobre esta maravilla de la ingeniería moderna ilustra perfectamente cómo el encuentro de lo mejor de todas estas disciplinas da como resultado una resolución para un problema extremadamente complejo, que ninguna de ellas podría haber abarcado por sí misma. Y si bien el análisis es aún 'sectorial', sienta las bases para continuar el trabajo desde una perspectiva diferente.

La Tierra.

## SECCIÓN 1. LA ÓRBITA TERRESTRE BAJA

### 1.1 FUNDAMENTOS FÍSICOS

La EEI orbita la Tierra a una altitud máxima de 410 km sobre el nivel medio del mar. Eso son 310 km por encima de la altura teórica que define el tope de la atmósfera<sup>[2]</sup>, pero aún sorprendentemente cerca de la superficie de nuestro planeta en comparación a otras distancias orbitales como la de la Luna, cuya distancia media a la Tierra es de 384402 km.

La órbita terrestre baja (OTB) se define generalmente como la región esférica del espacio que se extiende desde la superficie de la Tierra hasta una altura de 2000km<sup>[3]</sup> y está considerada como el umbral de la exploración espacial y un campo de entrenamiento para la supervivencia en el espacio profundo. En palabras del ingeniero de vuelo de la expedición 30/31 a la EEI, «The giant leap for mankind it's not in the first step on the Moon, but in attaining Earth's orbit».<sup>[4]</sup>

Es necesario, antes de comenzar a analizar la habitabilidad humana en este entorno extremo, introducir una serie de conceptos previos que nos ayudarán a entender mejor esas condiciones y su origen.

#### 1.1.1 NEWTON, KEPLER Y LA LEY DE LA GRAVITACIÓN UNIVERSAL

La idea de una fuerza atrayendo a los objetos hacia la Tierra puede parecer muy intuitiva, pero lo cierto es que tiene que ver con un cambio de paradigma en nuestra comprensión del movimiento, uno que empezó a gestarse en el siglo XVII.

Hasta el renacimiento, la naturaleza del movimiento había sido una cuestión tratada, principalmente, por filósofos. Sin embargo, tras la aparición del modelo copernicano con la Tierra en movimiento constante alrededor del Sol, Galileo Galilei comenzó a cuestionarse algunos de los principios aristotélicos del movimiento, dando origen a un primer germen de lo que posteriormente se conocería como movimiento inercial<sup>[5]</sup>. Isaac Newton recogería el testigo de este cambio de paradigma en 1687, con la publicación de «*Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*», obra en la que daría a conocer sus tres leyes de la dinámica. Éstas son, enunciadas, las que siguen:

**La primera ley o ley de la inercia:**

«Todo cuerpo continúa en su estado de reposo o de movimiento uniforme en línea recta, no muy lejos de las fuerzas impresas a cambiar su posición»<sup>[6]</sup>.

Esto es, un cuerpo no puede cambiar por sí solo su estado dinámico inicial sin la intervención de una fuerza externa.

**La segunda ley o ley fundamental de la dinámica:**

«El cambio de movimiento es directamente proporcional a la fuerza motriz impresa y ocurre según la línea recta a lo largo de la cual aquella fuerza se imprime»<sup>[6]</sup>.

Es decir, la aceleración que experimenta un cuerpo es una magnitud vectorial, cuantificable y proporcional a la fuerza aplicada sobre el mismo, siendo su masa la constante de proporcionalidad:

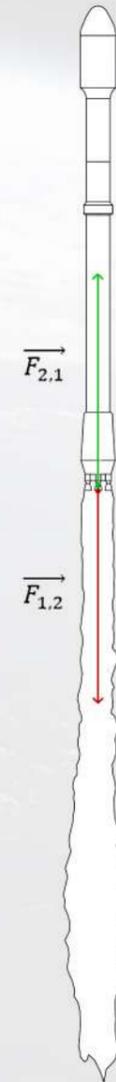
$$\vec{F} = m\vec{a} \quad \text{(Ecuación 01)}$$

**La tercera ley o principio de acción-reacción:**

«Con toda acción ocurre siempre una reacción igual y contraria: quiere decir que las acciones mutuas de dos cuerpos siempre son iguales y dirigidas en sentido opuesto»<sup>[6]</sup>.

Esto es, para una fuerza  $\vec{F}_{1,2}$  de un cuerpo 1 sobre otro 2, existe otra fuerza  $\vec{F}_{2,1}$  del cuerpo 2 sobre el 1, de igual módulo, pero dirección y sentido contrario, como se muestra en el ejemplo de la Figura 1.01.

$$\vec{F}_{1,2} = -\vec{F}_{2,1} \quad \text{(Ecuación 02)}$$



Con estas tres leyes, el movimiento de los objetos quedó descrito, aunque no totalmente explicado. Para ello habría que esperar al siglo XX y a la relatividad especial de Albert Einstein.

Ahora consideremos dos ejemplos de movimientos de cuerpos, en apariencia muy diferentes entre sí: una manzana dejada caer al suelo, y la Luna en su órbita alrededor de la Tierra.

Si dejamos caer la manzana, ésta experimentará un movimiento rectilíneo uniformemente acelerado (MRUA) con dirección vertical y sentido hacia el suelo. Puesto que parte del reposo, según la primera ley de Newton, esto significa que debe estar actuando sobre la manzana una fuerza de algún tipo, dirigida verticalmente hacia el suelo. Y esta fuerza queda definida, a partir de la segunda ley, como una masa por una aceleración.

Pero Galileo ya se había percatado, a finales del siglo XVI, de algo muy curioso con respecto a los objetos en caída libre. En un controvertido experimento (podría haber sido simplemente un ejercicio mental o haber ocurrido como una demostración para sus estudiantes, hay discrepancias al respecto<sup>[5]</sup>), el astrónomo italiano dejó caer dos esferas de distinta masa desde el famoso *campanile* de la catedral de Pisa, demostrando que el tiempo que tardaban en caer era el mismo. Es decir, la aceleración experimentada era independiente de sus masas.

Esto no es nada intuitivo, porque difiere de la experiencia que tenemos al dejar caer, por ejemplo, una pluma y un martillo. Pero como demostró el astronauta David R. Scott en 1971, durante su estancia en la Luna con motivo del Apolo 15, en el vacío (sin aire que ejerza rozamiento) una pluma y un martillo golpean el regolito lunar exactamente al mismo tiempo<sup>[7]</sup>.

Para entender el fenómeno emplearemos el ejemplo de la Luna, siendo necesario retroceder unos cuantos años más, hasta las observaciones astronómicas de Tycho Brahe. Observaciones que fueron recogidas tras su muerte por Johannes Kepler, quien descubriría en ellas los elegantes principios que regían la dinámica planetaria. Estos principios, que Kepler formuló (al igual que Newton) en forma de leyes, pueden resumirse como sigue:

**La primera ley de Kepler** describe la trayectoria de los planetas como una elipse con el Sol en uno de sus focos (Figura 1.02). Esta elipse es el lugar geométrico de los puntos de un plano cuya suma de distancias a dos puntos fijos (los focos) es constante, una curva cónica, resultado de seccionar un cono mediante un plano de pendiente inferior a su directriz.

**La segunda ley de Kepler** describe la velocidad de los planetas en distintos puntos de su trayectoria (Figura 1.03). No es uniforme, sino que es mayor en puntos más cercanos al Sol, de tal forma que, para un tiempo  $t$ , el área comprendida entre los vectores de posición que unen el Sol y las posiciones inicial y final en los instantes  $t_0$  y  $t_1$  del planeta en la órbita será igual en cualquier punto de la curva para ese mismo periodo de tiempo.

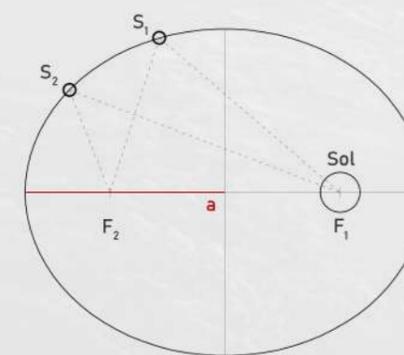
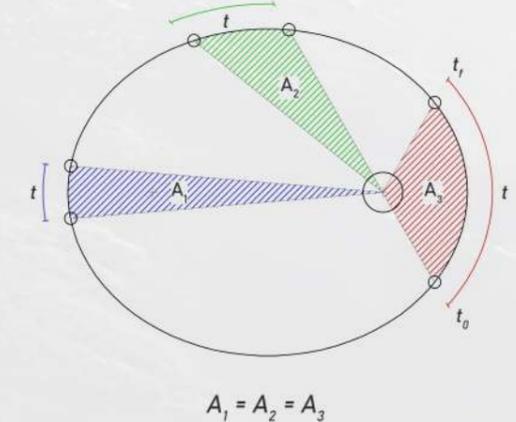


Figura 1.01 (arriba): Tercera ley de Newton. Elaboración propia.

Figura 1.02 (izq.): Órbita elíptica. Elaboración propia.

Figura 1.03 (dcha.): Segunda ley de Kepler. Elaboración propia.



$$\vec{F}_1\vec{S}_1 + \vec{F}_2\vec{S}_1 = \vec{F}_1\vec{S}_2 + \vec{F}_2\vec{S}_2$$

$$A_1 = A_2 = A_3$$

<sup>[2]</sup> Von Kármán, T. (1967). *The wind and beyond: Theodore von kármán, pioneer in aviation and pathfinder in space*. Editorial Little Brown, Boston.

<sup>[3]</sup> Inter-Agency Space Debris Coordination comitee. *IADC space debris mitigation guidelines*, Informe. 2008

<sup>[4]</sup> Pettit, Donald R. (2012). *The tyranny of the rocket equation*. [https://www.nasa.gov/mision\\_pages/station/expeditions/expedition30/tryanny.html](https://www.nasa.gov/mision_pages/station/expeditions/expedition30/tryanny.html). NASA.

<sup>[5]</sup> Gillispie, C. C. & Porter, T. M. (2016). *The edge of objectivity: An essay in the history of scientific ideas*, Editorial Princeton University Press, Princeton.

<sup>[6]</sup> Newton, Isaac (2011). *Principios matemáticos de la filosofía natural* (traducción de Rada, E.) Ed. Alianza Editorial.

<sup>[7]</sup> David scott does the feather hammer experiment on the moon. <https://www.youtube.com/watch?v=Oo8TaPVsn9Y>. Youtube

La **tercera ley de Kepler** es posterior a las otras dos, y relaciona el periodo orbital ( $T$ ) y el semieje mayor de la elipse ( $a$ ) que define la órbita de un objeto mediante una proporción. Esta proporción es igual para todos los objetos orbitando alrededor del Sol:

$$T \propto \sqrt{a^3} \quad \text{(Ecuación 03)}$$

Kepler, a partir de las observaciones de Brahe, fue capaz de describir los movimientos de los planetas, aunque no explicarlos. Pero Newton se dio cuenta de que podía explicar estos movimientos a través de sus propias leyes de la dinámica. Era lógico que los planetas se movieran más despacio a distancias más lejanas al Sol, si la fuerza ejercida por éste tenía que ver, además de la *masa*, con la *distancia* (Figura 1.04). Y podía explicar también la desviación en su trayectoria rectilínea natural, si consideraba al mismo tiempo una fuerza de atracción hacia el Sol que desviara su trayectoria hasta convertirla en una elipse. Una fuerza sorprendentemente parecida a la que tiraba de la manzana hacia el suelo. Una fuerza, en definitiva, dirigida hacia el centro de la Tierra y definida como una masa por una aceleración, en la que dicha masa no era otra que la del propio planeta.

Pero recordemos la tercera ley de Newton (Ecuación 02). La misma fuerza de la gravedad que atrae la Luna hacia la Tierra, atrae también la Tierra hacia la Luna. ¿Por qué no es entonces la Tierra la que orbita a la Luna? Por lo mismo que la Tierra no 'cae' sobre una manzana cuando la lanzamos. Aunque, en realidad, sí lo hace.

La masa es una propiedad intrínseca de los cuerpos. Puede considerarse como la cantidad de materia que tiene un objeto, pero es más útil entenderla como una medida de la inercia del objeto: a mayor inercia (mayor masa), más difícil resulta cambiar el movimiento de dicho objeto, acelerarlo o decelerarlo.

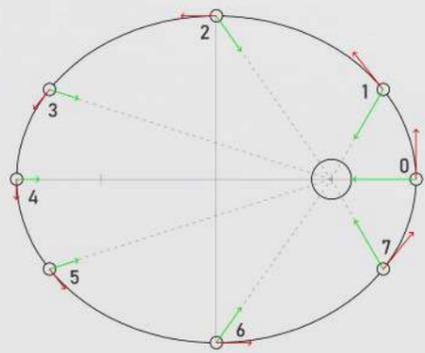


Figura 1.04: Sistema de fuerzas actuando en un satélite en distintos puntos de su órbita, elaboración propia. Nótese que en las posiciones 1, 2 y 3 la fuerza de la gravedad se opone al movimiento, decelerando por tanto el satélite, mientras que en las posiciones 5, 6 y 7 actúa a su favor, acelerándolo.

La fuerza ( $\vec{F}$ ) queda descrita como una atracción entre centros de gravedad (una simplificación puntual del conjunto de la masa), de valor igual al producto de las masas de los objetos ( $M$  y  $m$ ) dividido entre el cuadrado de la distancia ( $r$ ) entre ellos, por una constante llamada constante gravitatoria ( $G$ ). Esta constante no se precisó hasta mucho después, aunque Newton aventuró que debía ser muy pequeña. Y en efecto, las mediciones más precisas hasta la fecha fijan ese valor, en unidades del sistema internacional, en:

$$G = 6.6738480 \cdot 10^{-11} \text{ Nm}^2\text{kg}^{-2}$$

Es decir, la misma fuerza de la gravedad actúa sobre la Tierra y sobre la manzana, pero puesto que la Tierra tiene muchísima masa, y por tanto es muy resistente a los cambios en su movimiento, esta fuerza atrae la Tierra hacia la manzana una distancia despreciable, mientras que la manzana, con su masa diminuta comparada con la del planeta, se mueve fácilmente. ¡La ley que rige el movimiento de los planetas es la misma que rige el de todos los cuerpos con masa! Lo único que diferencia al Sol, y en menor medida a los planetas, de una manzana, es que su masa es enorme.

Éste es el enorme cambio de paradigma que trajo Newton, la noción revolucionaria de que las mismas fuerzas que gobiernan el movimiento de los cuerpos en la Tierra rigen también el de los cuerpos celestes. Y de ahí surge la ley de la gravitación universal, que describe la atracción mutua entre dos cuerpos cualesquiera:

$$\vec{F} = \frac{Mm}{r^2} G \hat{r} \quad \text{(Ecuación 04)}$$

## 1.1.2 CONCEPTO DE ÓRBITA E IMPLICACIONES

Hasta aquí se ha descrito cómo los objetos se atraen entre sí por su masa, y cómo esta atracción explica el movimiento orbital de los planetas descrito por Kepler. Pero si vamos a subir a la OTB, hay que aclarar también una serie de conceptos relativos a las órbitas. Para esto vamos a recurrir a la exposición de Feynman<sup>[8]</sup>, aplicándola a nuestro ejemplo de la manzana.

Si dejamos caer una manzana desde un estado de reposo, caerá con un MRUA que le hará recorrer una distancia vertical en dirección al suelo, unos 5 m en un segundo. Pero, ¿y si en lugar de dejarla caer, la lanzamos? Es decir, si le damos un componente de fuerza inicial en horizontal, que llamaremos  $\vec{F}_H$ . En este caso, ocurre lo representado en la Figura 1.05. La manzana sigue una trayectoria 'semiparabólica' descendente en lugar de rectilínea, es decir, seguirá recorriendo esos mismos 5 m en un segundo, pero se habrá desplazado, además, una cierta distancia en horizontal ( $x$ ) una distancia que dependerá del módulo de esa fuerza horizontal  $\vec{F}_H$ .

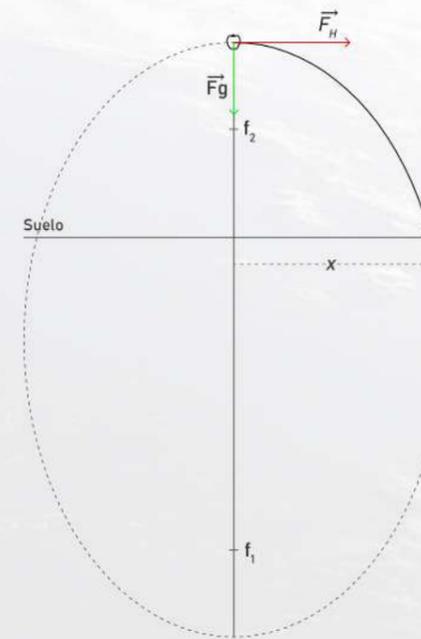


Figura 1.05: Tiro parabólico, elaboración propia. Una parábola describe con bastante precisión la caída de un objeto, pero la verdadera trayectoria, al igual que en las órbitas de los satélites, es el segmento de una elipse en la que el foco más alejado,  $f_1$ , es el centro de masas de la Tierra.

¿Qué ocurre si aumentamos más y más el módulo de la velocidad horizontal? Ocurrirá que la curvatura de la superficie terrestre empezará a entrar en el juego (Figura 1.06). Si lanzamos la manzana con la suficiente fuerza, puede darse el caso de que, cuando recorra esos 5 m, se encuentre a la misma altura sobre la superficie a la que estaba al principio, porque, aunque sigue cayendo, la superficie de la Tierra se ha curvado 5 m hacia abajo, de forma que la manzana cae 'alrededor' de la Tierra<sup>[8]</sup>.

Esto es lo que le ocurre a la Luna, y es lo que define, en esencia, el concepto de órbita: un lanzamiento en que la fuerza horizontal es tal que contrarresta, en pleno movimiento, la atracción de la gravedad. Al margen de los factores físicos de la altitud, que exploraremos más adelante, esto implica varias cosas que afectan enormemente a la estancia en la OTB.

Primero. Un objeto en órbita está en una situación continua de caída libre. El término ingravidez es, en realidad, muy inadecuado para describir esta situación. Apliquemos la ley de la gravitación universal (Ecuación 04) para un astronauta de, digamos, 70 kg, en superficie y en una órbita a 410 km de la superficie terrestre. Asumiremos la masa y el radio de la Tierra como  $5.972 \cdot 10^{24}$  kg y  $6.371 \cdot 10^6$  m respectivamente:

$$|\vec{F}_{SUP}| = \frac{M \cdot m}{r^2} G; \quad |\vec{F}_{SUP}| = \frac{5.972 \cdot 10^{24} \text{ kg} \cdot 70 \text{ kg}}{(6.371 \cdot 10^6 \text{ m})^2} \cdot 6.67 \cdot 10^{-11}; \quad |\vec{F}_{SUP}| = 687.35 \text{ N}$$

$$|\vec{F}_{ORB}| = \frac{M \cdot m}{r^2} G; \quad |\vec{F}_{ORB}| = \frac{5.972 \cdot 10^{24} \text{ kg} \cdot 70 \text{ kg}}{(6.371 \cdot 10^6 \text{ m} + 4.1 \cdot 10^5 \text{ m})^2} \cdot 6.67 \cdot 10^{-11}; \quad |\vec{F}_{ORB}| = 606.74 \text{ N}$$

El astronauta en órbita experimenta un 88% de la fuerza de la gravedad que experimentaría en la superficie. ¿Por qué, entonces, un astronauta flota dentro de la EEI? Porque toda la estación está cayendo con él. El suelo no es firme, no es la superficie de la Tierra que, en circunstancias normales, detiene nuestra caída y nos hace experimentar nuestro peso mediante la resistencia. James Oberg lo explica en su artículo «Space myths and misconceptions»<sup>[9]</sup>: El uso de la expresión "gravedad cero" perpetúa el mito de que los satélites permanecen en órbita porque han escapado a la gravedad terrestre, cuando es precisamente esta gravedad la que impide que continúen su trayectoria en una línea recta hacia el vacío interestelar. Lo que falta en órbita es el peso aparente, no la atracción gravitatoria.

[8] Feynman, R. P. et al. (2011) *The Feynman lectures on physics, the new millenium edition. Volume 1: Mainly mechanics, radiation and heat.* Capítulo 7: 'The theory of gravitation'. Basic Books.

[9] Oberg, J. (1993). *Space myths and misconceptions.* Revista OMNI, Vol. 15, No.7, p. 38. General Media, Nueva York.

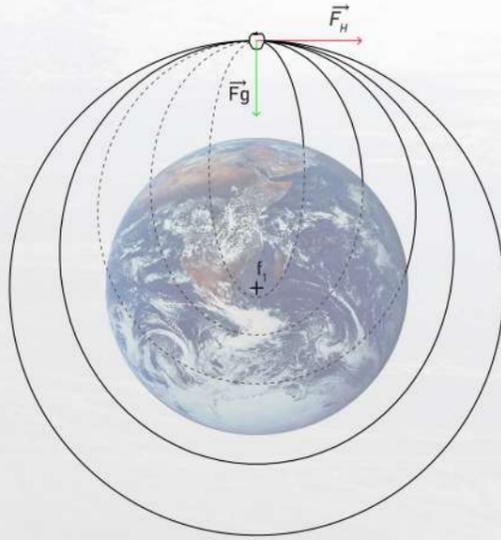


Figura 1.06: Concepto de órbita. Elaboración propia.

Segundo. Como hemos visto, el movimiento orbital es producto (de forma simplificada) de un sistema equilibrado entre una fuerza vertical, la de la gravedad, y otra horizontal, la del movimiento (Figura 1.06). Puesto que la gravedad está siempre presente, el factor con el que se puede jugar a la hora de plantear una órbita es, principalmente, la velocidad horizontal: si disminuimos esta velocidad, el sistema queda desequilibrado y caemos a la Tierra; si la aumentamos lo suficiente, desequilibramos igualmente el sistema hasta el punto de escapar, ahora sí, de la gravedad terrestre.

El hecho de que los lanzamientos orbitales despeguen en vertical da lugar a equívoco. Un cohete no se lanza en vertical para escapar de la gravedad de la Tierra, sino para escapar lo antes posible del rozamiento atmosférico. De no añadir una componente horizontal a este lanzamiento en vertical, eventualmente el combustible se agotaría y el cohete volvería a caer. La trayectoria real de un lanzamiento orbital es vertical al principio, y va ganando horizontalidad conforme se gana altura. Esta maniobra, llamada *gravity turn*, se lleva a cabo para optimizar el combustible invertido en vencer la fricción con la atmósfera y ayudarse de la fuerza de la propia gravedad para girar el cohete hacia una orientación horizontal<sup>[10]</sup>.

Tercero. Alcanzar esta situación de equilibrio requiere una enorme velocidad horizontal, y esto requiere una gran cantidad de combustible. Pero el combustible tiene su propio peso, y hay que añadirlo al del cohete en sí, y al de la carga. Cuanto más combustible, más peso hay que desplazar, y mayor es, en consecuencia, el gasto de combustible. La gravedad de la Tierra es suficientemente pequeña como para que esta paradoja no sea un callejón sin salida, pero suficientemente grande como para que el coste de poner un cuerpo en órbita, simplemente en combustible, sea enormemente caro. Es lo que coloquialmente se conoce como "la tiranía de la ecuación de la coherencia"<sup>[11]</sup>. Esta ecuación, formulada por Konstantín Tsiolkovsky en 1903, se expresa de la siguiente forma:

$$\Delta_v = v_e \ln \frac{m_0}{m_f} = I_{sp} g_0 \ln \frac{m_0}{m_f} \quad (\text{Ecuación 05})$$

donde  $\Delta_v$ , en m/s, es una medida del impulso necesario para llevar a cabo una maniobra de despegue, de aterrizaje, u orbital (en el contexto de las dinámicas de vuelo espacial, no se corresponde con el cambio físico de velocidad del vehículo);  $m_0$  es la masa inicial total (incluyendo el combustible);  $m_f$  es la masa final total (sin incluir el combustible que se ha agotado) y  $v_e$  es la velocidad específica de salida, en m/s.

Esta velocidad específica se puede expresar como el producto de dos factores:

$$v_e = I_{sp} g_0 \quad (\text{Ecuación 06})$$

donde  $I_{sp}$  es el impulso específico medido en segundos (se trata de un impulso que se da en relación a la masa de combustible implicada, y un impulso por unidad de masa es una unidad de tiempo), y  $g_0$  es la aceleración estándar de la gravedad, 9.81 m/s<sup>2</sup>.

Es conveniente aclarar que la velocidad específica de salida es una forma simplificada de expresar el impulso específico de un cohete. Este impulso puede expresarse en términos de empuje por unidad de flujo de combustible (masa), o simplemente como una velocidad específica relativa al cohete  $v_e$  uniforme y axial con respecto al centro de gravedad del vehículo. Esta velocidad representa una media de la velocidad a la que la masa del combustible está siendo eyectada del cohete<sup>[12]</sup>. La relación de esta velocidad con el empuje ( $F_{Thrust}$ ) se da mediante esta ecuación:

$$F_{Thrust} = v_e \dot{m} \quad (\text{Ecuación 07})$$

donde  $\dot{m}$  es el ratio de flujo de la masa de combustible, o lo que es lo mismo, el ratio al que decrece la masa del vehículo. Esta ecuación (Ec. 05) limita mucho la carga que se puede mandar a la órbita y el coste de la misión.

### 1.1.3 DESCRIPCIÓN DEL MOVIMIENTO ORBITAL.

Las leyes de Kepler y de la dinámica de Newton nos permiten, al fin, describir el movimiento de un satélite alrededor de la Tierra. De estas leyes se desprende, en primer lugar, que el movimiento del satélite describe la ecuación de un plano, con su origen de coordenadas en el centro de masas de la Tierra<sup>[13]</sup>. El ángulo que se forma entre este plano, llamado el **plano orbital**, y el plano ecuatorial de la Tierra se conoce como la **inclinación de la órbita (i)**. Como vemos en la Figura 1.07, este plano orbital corta al plano ecuatorial en una recta, y por tanto, a la circunferencia del ecuador en dos puntos, que reciben el nombre de **nodo ascendente** y **nodo descendente**. El ángulo del nodo ascendente con respecto a una dirección de referencia en el plano ecuatorial, el equinoccio vernal, se conoce como **longitud del nodo ascendente (Ω)**. Estos dos parámetros, Ω e i, definen el plano orbital, y se llaman por tanto parámetros orbitales.

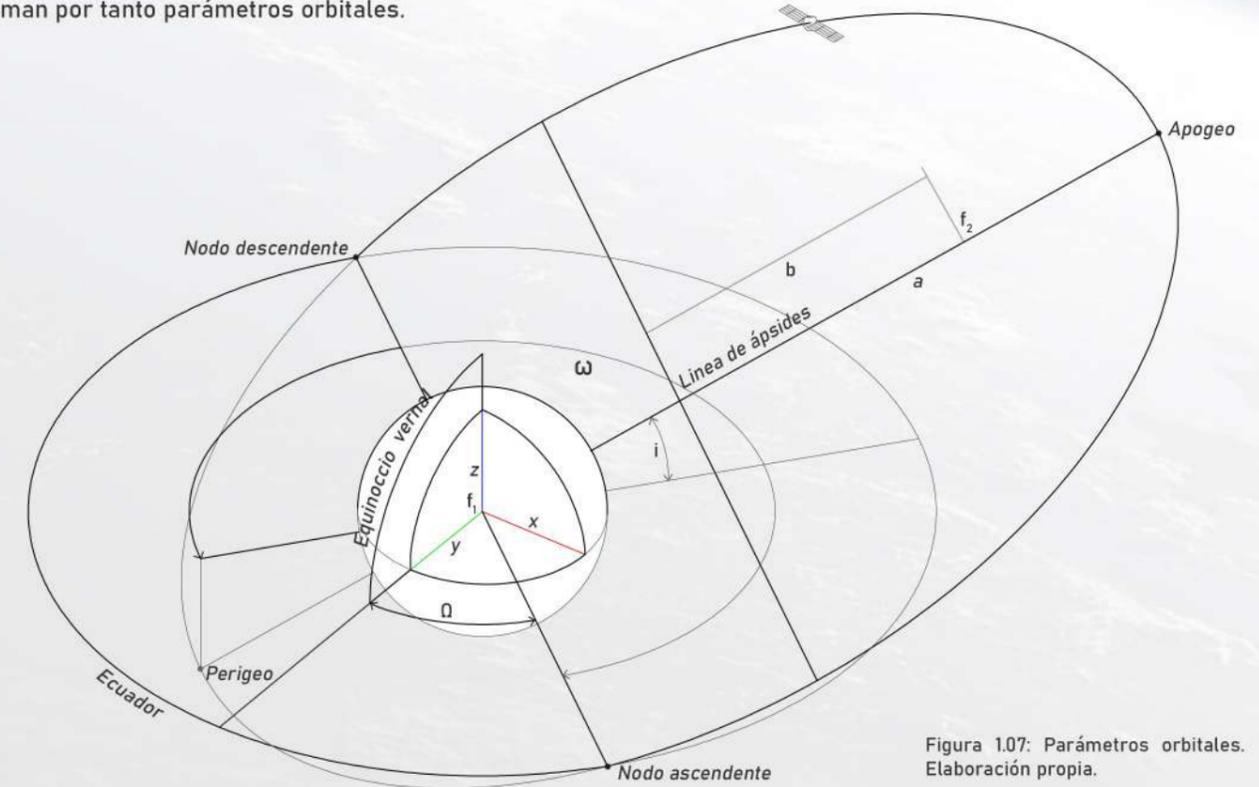


Figura 1.07: Parámetros orbitales. Elaboración propia.

El siguiente paso es describir el movimiento de un satélite dentro de este plano. También desde la ley de la gravitación universal (Ecuación 04) y con estos dos parámetros, puede llegarse a una ecuación de movimiento para el satélite que responde a la siguiente estructura genérica:

$$r = \frac{a(1 - e^2)}{1 - e \cos \phi} \quad (\text{Ecuación 08})$$

Que corresponde a la ecuación polar de una curva cónica de **semieje mayor a** y **excentricidad e**, siendo  $\phi$  el ángulo polar hasta la posición del satélite y r la distancia del mismo al foco orbitado. Para excentricidades  $e=0$ ,  $e<1$ ,  $e=1$  y  $e>1$ , la cónica será un círculo, una elipse, una parábola o una hipérbola. Para un satélite en una órbita estable alrededor de la Tierra, la excentricidad toma los valores  $e<1$  o  $e=0$ . Esta excentricidad, en el caso de una órbita elíptica, se calcula dividiendo la longitud del semieje mayor por la semidistancia focal, b.

Los extremos del eje mayor de esta elipse son puntos de especial importancia dentro de la órbita. El de mayor altura con respecto al cuerpo orbitado, en este caso la Tierra, se denomina **apogeo** (apohelio o afelio en el caso del Sol y apoápside para otros cuerpos). El de menor altura se denomina **perigeo** (perihelio en el caso del Sol y periápside para otros cuerpos). La línea que une el apogeo y el perigeo es la **línea de ápsides**, y coincide, en órbitas elípticas, con el eje mayor de la elipse.

Los parámetros  $a$  y  $e$  definen, por tanto, la forma de la elipse de la trayectoria del satélite. Esto nos deja un último parámetro con respecto a estos dos puntos, el apogeo y el perigeo. El ángulo desde el nodo ascendente hasta la recta del perigeo se conoce como **argumento de periápside ( $\omega$ )**.

Estos cinco parámetros, junto con la velocidad media orbital, nos permiten conocer la posición del satélite en un determinado instante de tiempo, así como sus vectores de estado (vector de posición y vector velocidad). De igual forma, conocidos los vectores de estado, es posible inferir los parámetros orbitales. Perturbaciones al margen, como puede ser la influencia de la atmósfera a determinadas alturas, estas ecuaciones keplerianas definen, de forma simplificada pero muy precisa, una órbita estable.

## 1.1.4 ENCUENTROS ORBITALES

Un satélite que ha alcanzado una órbita estable entorno a nuestro planeta, o a cualquier otro cuerpo celeste, se mantendrá en esa misma trayectoria que hemos descrito, de forma permanente. Pero puede darse el caso, y es de hecho bastante común, que la órbita obtenida tras el lanzamiento no sea la deseada o la final, o que simplemente, orbitar la Tierra no sea la finalidad de la misión.

Un buen ejemplo de esto es la exploración espacial. Enviar sondas o misiones tripuladas a otros cuerpos de nuestro sistema solar requiere de un proceso que puede asemejarse a una escalada por etapas, en la que el primer paso, el ascenso al primer campamento base, es colocar el satélite en una órbita estable, preferentemente circular, alrededor de la Tierra. Una vez en esa órbita, continúa el ascenso, con una modificación de la misma de forma que su trayectoria intercepta el destino deseado. Y si una vez llegado al destino se quiere establecer otra órbita estable entorno a ese nuevo cuerpo, hay que volver a llevar a cabo una modificación orbital.

De igual forma, y no siempre de forma más simple, el ensamblaje de una estación espacial requiere encuentros en órbita de módulos que se han lanzado en tiempos distintos y, por tanto, en órbitas distintas. Esto hace necesario modificaciones orbitales en uno de los dos objetos que se van a encontrar para que coincidan en espacio y tiempo alrededor del planeta.

Una maniobra orbital se define como una transferencia de un satélite de una órbita a otra<sup>[14]</sup>. Esto puede incluir desde las etapas finales de un encuentro orbital a los dramáticos cambios necesarios para intersecciones desde la órbita terrestre con otros cuerpos celestes. Una maniobra orbital suele requerir del impulso de un cohete (maniobra impulsiva) aunque también pueden aprovecharse circunstancias naturales como el rozamiento de la atmósfera en el caso de un aerofrenado, o la gravedad de un cuerpo masivo en una asistencia gravitatoria (maniobra no impulsiva). El impulso del cohete resulta en un cambio de velocidad ( $\Delta v$ ) ya sea en el módulo o la dirección del vector, y que puede entenderse como el 'coste' de dicha maniobra.

Podemos relacionar el combustible empleado con la  $\Delta v$  obtenida, simplemente despejando la relación de masas iniciales y finales en la ecuación de la coherencia de Tsiolkovsky (Ecuación 05):

$$\frac{m_o}{m_f} = 1 - e^{-\frac{\Delta v}{I_{SP}g_0}}$$

(Ecuación 09)

Durante el tiempo que dura la maniobra, y de forma quizá poco intuitiva, la posición del satélite se considera fija. Sólo cambia la velocidad y, por tanto, la trayectoria orbital. Esto es una simplificación que supone que el impulso (la quema de combustible) se realiza de forma instantánea, pero para las velocidades orbitales habituales, es una aproximación válida<sup>14</sup>.

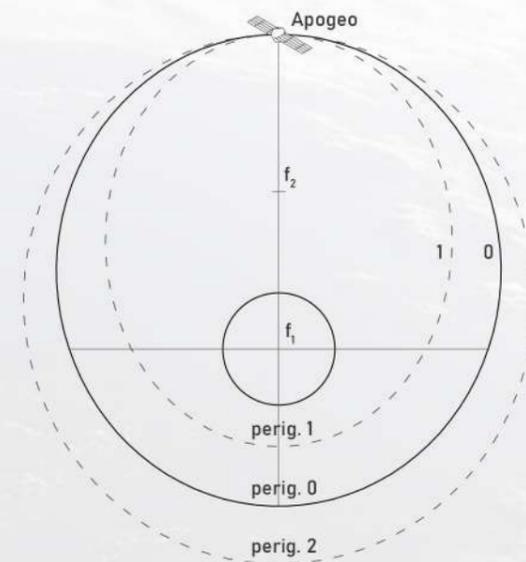


Figura 1.09: Órbitas de transferencia para una maniobra de fase. Elaboración propia.

Las maniobras orbitales impulsivas pueden llevarse a cabo en cualquier punto de una órbita, obteniendo diferentes resultados. Sin embargo, existen una serie de maniobras, ejecutadas en puntos muy concretos, que resultan ser mucho más eficientes en cuanto a gasto energético a la hora de cambiar la trayectoria de un satélite. Quizá la más importante de estas maniobras es la que recibe el nombre de Transferencia de Hohmann, ejecutada mediante dos impulsos en el apogeo o el perigeo de órbitas coplanarias, y usada para la inmensa mayoría de modificaciones orbitales tanto en órbita terrestre como para la exploración espacial. La maniobra de transferencia de Hohmann, así como otras maniobras relevantes, se desarrollan con más profundidad en Curtis, H.<sup>[14]</sup>

Las **maniobras de fase** son un tipo particular de transferencia de Hohmann, usadas para llevar a cabo los encuentros orbitales necesarios para el proceso de ensamblaje de las estaciones espaciales modernas. Estas maniobras, representadas en la Figura 1.09, se llevan a cabo mediante dos impulsos que modifican la trayectoria de un objeto desde una órbita 0, pasando por una órbita de transferencia 1 o 2, y tras un determinado número de ciclos, vuelven a la órbita 0 inicial. Aunque pueda parecer redundante, esta maniobra permite que un objeto alcance a otro jugando con las diferentes velocidades implicadas en esas órbitas de transferencia.

Ilustrémoslo con la Figura 1.10. En la primera fase del encuentro tenemos dos objetos, A y B, compartiendo una misma órbita 0 y en puntos opuestos de la misma, uno en el apogeo y otro en el perigeo. Resulta evidente que, compartiendo parámetros orbitales, ambos objetos no pueden encontrarse, ya que se mantendrán siempre a la misma distancia. Pero imaginemos que se trata de dos módulos de una futura estación espacial, teniendo el objeto A un pequeño motor que le da la capacidad de realizar maniobras orbitales. El proceso es el siguiente:

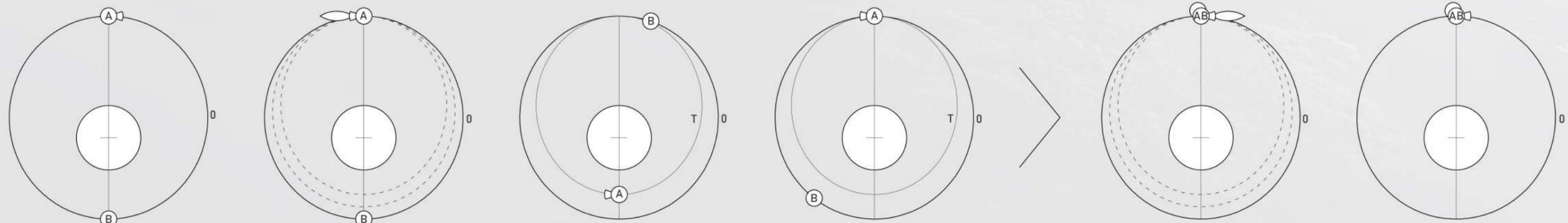
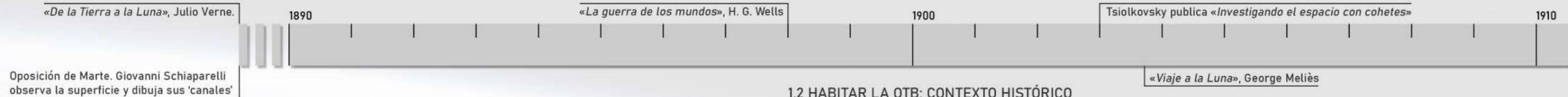


Figura 1.10: Encuentro orbital mediante una maniobra de fase, elaboración propia. Las maniobras de fase requieren de poco impulso y de un consumo muy reducido de combustible. A cambio, para obtener resultados considerables, la órbita de transferencia debe mantenerse durante un tiempo prolongado.

Un estudio desde la óptica de la arquitectura



Oposición de Marte. Giovanni Schiaparelli observa la superficie y dibuja sus 'canales'

El objeto A inicia una maniobra de fase mediante un impulso en el apogeo de la órbita. Esto tiene el efecto de 'desfasar' la órbita del objeto A con respecto a la del B, entrando en una nueva órbita de transferencia T con el perigeo en un punto, en este caso, más bajo que el de su compañero orbital.

Aquí me voy a permitir una analogía muy imprecisa pero muy intuitiva. Tras recorrer la órbita de transferencia y volver al apogeo, el objeto A habrá 'ganado terreno' al objeto B. Y esto ocurre por la misma razón por la que, en el automovilismo, los pilotos tratan siempre de coger el interior de una curva: es una trayectoria más rápida. Recordemos que, a alturas orbitales más bajas, la velocidad orbital es mayor, con lo que el desfase ha conseguido que el objeto A tarde menos tiempo en recorrer su órbita que el objeto B. Si se mantiene en esta trayectoria durante varios ciclos, finalmente ambos objetos acabarán por encontrarse.

El encuentro se llevará a cabo en el apogeo compartido de ambas órbitas, y será entonces cuando el objeto A lleve a cabo el segundo impulso, modificando su órbita hasta volver a la original, compartida con B. Ahora, estos dos módulos podrán acoplarse, y tendremos nuestra estación espacial.

Algo muy llamativo de estas maniobras de fase es que se ejecutan también para salvar distancias pequeñas entre satélites. Los primeros pilotos que experimentaron con los encuentros orbitales, como es el caso del astronauta Jim McDivitt en la misión *Gemini 4*, tendían a cometer el mismo error. Frente a un objeto delante de ellos con el que debían encontrarse, ejecutaban, como es lógico, un pequeño impulso en su dirección. Pero la realidad desafiaba completamente a su intuición, y esta aceleración en el sentido de la órbita tenía el efecto de aumentar la altura orbital, colocándoles en una trayectoria más lenta y consiguiendo, por tanto, que la distancia entre los dos objetos aumentara<sup>[15]</sup>. Si querían encontrarse con ese objeto delante suya, debían acelerar... ¡En sentido contrario!

Más allá de lo anecdótico, estos pequeños detalles son importantes para entender el lugar en el que pretendemos habitar. Nos enfrentamos a un entorno no sólo marcadamente hostil (ver anexo 2 para más información), sino uno en que, además, la gran mayoría de las normas que rigen la vida en la Tierra se distorsionan hasta un punto irreconocible, o directamente, no se aplican. Habitar la OTB supone una lucha constante con los condicionantes físicos y psicológicos ligados a nacer en nuestro planeta.



## 1.2 HABITAR LA OTB: CONTEXTO HISTÓRICO

### 1.2.1 LOS PRIMEROS PASOS

La historia de los primeros pasos de la humanidad más allá de la atmósfera de nuestro planeta suele relatarse empezando por la Segunda Guerra Mundial, pero habría que hacer al menos una mención breve a los últimos años del siglo XIX y los primeros del XX, que vieron los primeros experimentos significativos en las tecnologías sin las cuales la exploración espacial contemporánea no sería posible.

La fascinación con la exploración del espacio exterior ya existía mucho antes de estos experimentos teóricos. Los pioneros del cine y la ciencia ficción habían despertado este interés en obras como «*De la Tierra a la Luna*», escrita por Julio Verne en una fecha tan temprana como 1865, o «*La guerra de los mundos*», de Herbert George Wells, publicada en 1898. Es célebre también el trabajo del ilusionista y pionero del cine, el francés George Meliès, en su película de 13 minutos de duración «*Viaje a la Luna*», donde un grupo de viajeros llega al satélite de nuestro planeta en una bala de cañón, en la que quizás sea una de las escenas más representativas del cine mudo.

Y si estos escritores y cineastas se habían inspirado en el trabajo de una comunidad científica que observaba nuestro vecindario cósmico con instrumentos cada vez más precisos, sus trabajos sirvieron a su vez para inspirar a toda una nueva generación de investigadores que, influenciados por esta creciente cultura entorno a la exploración espacial, perseguían por primera vez la realización de un objetivo que trascendía las fronteras de nuestra atmósfera.

La ecuación de la coherencia de Tsiolkovsky apareció por primera vez en un artículo titulado «*Investigando el espacio con cohetes*» escrito en el año 1898, aunque la visión adelantada a su tiempo que proponía el teórico ruso obstaculizó su publicación en las revistas hasta el año 1903<sup>[16]</sup>. El trabajo de Tsiolkovsky, junto con el de Robert Goddard en EEUU y el de Hermann Oberth y su «*Sociedad para el viaje espacial*» en la Alemania de entreguerras, supuso la punta de lanza de la investigación más temprana en coherencia. Aparecieron así los primeros cohetes de combustible líquido, capaces de elevarse apenas unos cientos de metros pero también de despertar el interés de los mandos militares, que habían visto como sus tácticas anticuadas se estrellaban contra la realidad de la guerra de trincheras en la Primera Guerra Mundial y buscaban nuevas armas tecnológicas para superarla.

Fue dos décadas más tarde, en la Segunda Guerra mundial, cuando la investigación en coherencia comenzó realmente a despegar. Los trabajos de la primera generación de investigadores en coherencia se convirtieron en una cuestión de seguridad estatal, y pronto las agrupaciones que habían ido surgiendo entorno a los pioneros de la tecnología fueron reclutadas para el esfuerzo bélico. Con un objetivo definido y una financiación casi inagotable, la visión inicial de Tsiolkovsky fue quedando en un segundo plano para dejar paso a la artillería de cohetes, las armas antitanque y antiaéreas, y en la última fase de la contienda, la coherencia aplicada a la aviación y los cohetes de trayectoria balística de largo alcance.

La necesidad agudiza el ingenio, y la Alemania del III Reich fue el país que más se centró en el desarrollo de armas que pudieran dar la vuelta a un conflicto que les escapaba entre los dedos. A pesar de la fuga de cerebros a otros países con regímenes democráticos, miles de brillantes investigadores, liderados por uno de los miembros de aquella primera «*Sociedad para el viaje espacial*» de Oberth, Wernher Von Braun, se dedicaron al desarrollo de estos nuevos cohetes armamentísticos, llevando la tecnología hasta un punto de refinación que permitía el bombardeo remoto a más de 300 km de distancia.

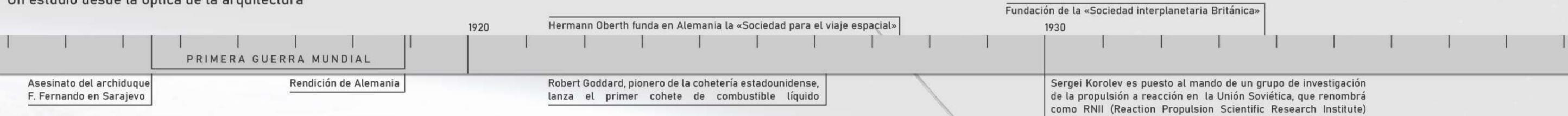


Arriba: Escena de «*Viaje a la Luna*», de George Meliès (Imagen 04).

Izquierda: Ed White en la primera EVA americana, durante la misión *Gemini IV* (Imagen 03).

<sup>[15]</sup> Hacker, B. C. & Grimwood, J. M. (1977). *On the shoulders of titans: A history of project gemini*. NASA history series. Scientific and Technical Information Office, NASA, Washington D. C.

<sup>[16]</sup> Launius, Roger D. (2018). *The Smithsonian history of space exploration*. Smithsonian Books. Washington D. C.



La cumbre de este desarrollo armamentístico, el cohete A-4 (más conocido en adelante como V-2) aterrizó las capitales de Francia y Reino Unido durante los últimos dos años de la guerra, pero a pesar de su terrible historia<sup>[17]</sup>, no consiguió cambiar significativamente el rumbo de la contienda. En mayo de 1945, la caída de Berlín y la capitulación del III Reich pusieron fin a la guerra en Europa y, tres meses después, los bombardeos atómicos de Hiroshima y Nagasaki hicieron lo propio con Japón. La guerra había terminado y, entre las ruinas de lo que quedaba de las principales ciudades alemanas, los principales países aliados y la Unión Soviética se apresuraron a asegurar lo que pudieron de aquellas *wunderwaffen*, armas milagrosas, y de la tecnología que las había hecho posibles.

### 1.2.2 LA CARRERA ESPACIAL

Tan pronto como se hizo evidente la rivalidad de los dos bloques emergentes en la contienda europea, el bloque de los aliados al oeste y el bloque soviético al este, comenzó una nueva escalada tecnológica, sucesora de los programas de desarrollo armamentístico que nunca habían llegado verdaderamente a detenerse. El desarrollo de armas nucleares por parte de los EEUU y, más adelante, de la Unión Soviética, hizo necesario un mecanismo de entrega rápido y preciso en caso de que estallara una nueva contienda. Ambos bloques volvieron la vista a esos V-2 alemanes que habían bombardeado Londres desde 300 km, e inmediatamente vieron el potencial. Así, al mismo tiempo que películas como «*The day the Earth stood still*» (1951) daban inicio a la primera edad de oro de la ciencia ficción y al fenómeno OVNI en EEUU, comenzó el periodo de tiempo conocido como la Guerra Fría.

Aunque el desarrollo de los cohetes balísticos fue de gran importancia durante este periodo, a diferencia de lo que ocurrió en la Segunda Guerra Mundial, la paz tensa dejó lugar para los usos civiles de esta nueva tecnología. Muchos de aquellos V-2 reconstruidos se convirtieron en herramientas científicas que permitieron realizar mediciones en las capas altas de la atmósfera durante los primeros vuelos suborbitales, en uno y otro bando. Y en 1957, sin mucha atención por parte de los gobiernos sumidos en esta nueva contienda no declarada, se celebró el Año Geofísico Internacional<sup>[18]</sup>, coincidiendo con el inicio de un nuevo ciclo solar.

El propósito de este evento internacional era crear una serie de grupos de trabajo que permitieran recopilar información sobre nuestro planeta. Durante el evento, se sugirió por primera vez la posibilidad de utilizar las nuevas capacidades de la cohería para poner en órbita un satélite artificial que nos ayudara a comprender mejor las condiciones fuera de la atmósfera terrestre. Tanto los EEUU como la Unión Soviética recogieron el guante, si bien no con demasiado entusiasmo, y colocaron al frente del proceso al Laboratorio de Investigación Naval de EEUU y al grupo de investigación dirigido por el científico ruso Sergei Korolev, respectivamente.

Para ambas organizaciones, el reto científico ocupó, al principio, un segundo plano. Mientras que el grupo de Korolev estaba centrado en el desarrollo de su cohete balístico intercontinental (ICBM) R-7, los investigadores estadounidenses tenían mucho más apoyo por parte tanto de la administración como del público, pero también mucha más confianza en la superioridad de su tecnología. Esto cambió radicalmente en otoño de 1957, cuando la Unión Soviética lanzó al espacio el primer satélite artificial, *Sputnik I*. Sin evaluar la trascendencia militar de este evento e incluso restándole importancia al asunto, el país anunció los detalles orbitales del satélite y emitió desde él una transmisión repetida en frecuencia de radio, para que cualquiera pudiera seguirlo en su órbita<sup>[19]</sup>.

*Sputnik I* sobrevoló dos veces el espacio aéreo de los EEUU antes de que nadie en el ejército supiera siquiera que había sido lanzado, y cuando finalmente fueron conscientes de lo que aquello implicaba, cundió el pánico. Por lo que sabían, aquella pequeña esfera de metal del tamaño de una pelota de playa podía tener una cámara espía desde la que estuvieran fotografiando sus principales instalaciones militares.

Cuando los periódicos y revistas estadounidenses, críticos con su comunidad científica, llegaron a la Unión Soviética, el gobierno de Nikita Khrushchev se dio cuenta de la importancia propagandística que había tenido el evento, y de la que podrían tener eventos similares en el futuro. En ambos países, las prioridades cambiaron, las financiaciones se dispararon y, de la noche a la mañana, una iniciativa científica sin demasiada importancia militar como era la exploración del espacio se convirtió en uno de los ejes en torno a los que pivotaría todo el conflicto de la Guerra Fría a nivel propagandístico. Había comenzado la carrera espacial.

A *Sputnik I* le siguió *Sputnik II*, con la célebre perra Laika en su interior, el primer animal en orbitar el planeta. Aquellos 'récorde' de la exploración espacial se convirtieron en el objetivo de los grupos de trabajo para ambos bandos, con una ventaja inicial abrumadora para la Unión Soviética. En EEUU, en respuesta a estos primeros lanzamientos, se fundó en 1958 la National Aeronautics and Space Administration (NASA), y se dio el pistoletazo de salida al proyecto *Mercury* para poner al primer ser humano en órbita.

Pero de nuevo, la Unión Soviética se adelantó. Apenas unas semanas después de la selección de los candidatos para el proyecto *Mercury* (los primeros astronautas) el cosmonauta ruso Yuri Gagarin se convirtió, en abril de 1961, en el primer ser humano en orbitar la Tierra, lanzado a bordo de la pequeña cápsula esférica *Vostok-1*. Los americanos tardaron un año en alcanzar a sus homólogos rusos con el lanzamiento de John Glenn en febrero de 1962. Tras este fracaso propagandístico, la Nasa dio un giro de 180 grados en la estrategia estadounidense. En lugar de tratar de seguir el ritmo de la Unión Soviética en una serie de pasos incrementales en los que era obvio que estaban por detrás, se embarcaron en una nueva dirección tan exigente que tanto sus científicos como los rusos tuvieran que empezar de cero: enviar a un ser humano a la Luna.

### 1.2.3. LA LLEGADA A LA LUNA

Cuando J. F. Kennedy dio, en septiembre de 1962, su discurso «*We choose to go to the Moon*»<sup>[20]</sup>, tanto los EEUU como la Unión Soviética habían lanzado ya misiones a nuestro satélite en forma de sondas. Y como de costumbre, la Unión Soviética se había impuesto al 'aterrizar' su sonda *Luna 2* en la superficie lunar en diciembre de 1959, siendo éste el primer ingenio humano en estrellarse contra otro cuerpo celeste. Las equivalentes estadounidenses a las *Luna*, las sondas del proyecto *Ranger*, no tuvieron éxito hasta 1964, cuando la *Ranger 7* logró orbitar la Luna y enviar imágenes de su superficie.

Pero enviar a un ser humano era un asunto muy distinto. La capacidad de aterrizar en la Luna (en lugar de estrellarse) no llegaría hasta los últimos años de la década de los 60, y las configuraciones de misión requerían no solo un aterrizaje suave, sino también un despegue y un encuentro orbital con un módulo en órbita que pudiera volver a la Tierra, además de la capacidad para llevar a cabo la actividad extra-vehicular (EVA) necesaria para dar aquellos primeros pasos en el regolito lunar<sup>[21]</sup>. Para llevar a cabo esta misión, por tanto, serían necesarios una serie de misiones previas y pruebas de tecnología.

El primer paso fue crear cápsulas capaces de transportar a más de una persona. Las primeras en lograr esto fueron las rusas *Voskhod*, sucesoras de las *Vostok* que habían llevado a los primeros cosmonautas al espacio. Lanzadas en un R-7 modificado para soportar el peso extra, la *Voskhod-1* lanzó en 1964 a tres cosmonautas al espacio en el primer vuelo espacial con varios pasajeros, y la *Voskhod-2* vio en 1965 el primer paseo espacial con traje presurizado. Conseguidos estos récords, Korolev redirigió los fondos del programa al desarrollo de las versátiles cápsulas *Soyuz*, como parte del esfuerzo para ir a la Luna.

Mientras tanto, el proyecto *Gemini* estadounidense se presentó en escena con el objetivo principal de demostrar la viabilidad del encuentro orbital, además de probar la tecnología EVA de la NASA y reunir información sobre los efectos fisiológicos del vuelo espacial<sup>[19]</sup>. A pesar de algunos problemas, las diez misiones *Gemini* lograron sus objetivos y probaron, en noviembre de 1966, que una misión tripulada a la Luna era viable.

Ambas naciones diseñaron en paralelo los componentes de sus misiones de alunizaje, desde los cohetes necesarios para el trayecto hasta los trajes. Sin embargo, y a pesar de la tragedia con la que abrió el programa *Apollo* en enero de 1967, en la que tres astronautas murieron debido a un incendio durante una simulación de vuelo, en ese punto la carrera espacial había empezado, por primera vez, a decantarse del lado estadounidense.

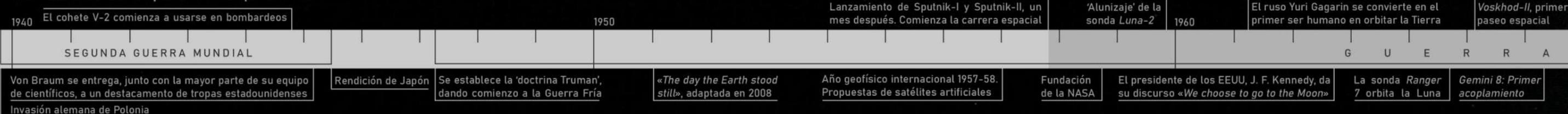
Derecha: Réplica de *Sputnik I*, el primer satélite artificial, en el Smithsonian National Air and Space Museum de Washington D. C (Imagen 06).

Logotipo del año geofísico internacional 1957-1958 (imagen 05).



[17] Se estima que al menos 9000 personas murieron en ataques con misiles balísticos V-2 durante la Segunda Guerra Mundial.  
 [18] Nicolet, M. (2013). *The International Geophysical Year 1957/58*, p. 222-231. Organización Meteorológica Mundial.  
 [19] Launius, Roger D. (2018). *The Smithsonian history of space exploration*. Smithsonian Books, Washington D. C.  
 [20] John F. Kennedy moon speech - Rice stadium. <https://er.jsc.nasa.gov/seh/ricetalk.htm>. NASA.  
 [21] Riché, L. J. Et al. (1969). *Final apollo 11 flight plan*. Archivo histórico de la NASA, Manned Spacecraft Center.

Un estudio desde la óptica de la arquitectura



Los mayores problemas del programa *Apolo* estuvieron desde el principio en el módulo lunar, continuamente atrasado y fuera de presupuesto. Pero su contrapartida rusa, el módulo LK, nunca llegó a tener la capacidad de carga suficiente para elevar a un cosmonauta de la superficie de la Luna. A eso hubo que sumar el hecho de que el N-1, el cohete que debía propulsar las misiones rusas hasta nuestro satélite, se había convertido en una pesadilla logística de 30 motores que debían funcionar en paralelo y sin fallos en su primera fase, algo que nunca se consiguió. Por el contrario, el diseño más sencillo del *Saturn V*, con sólo cinco motores F-1, llevó a cabo su trabajo a la perfección.

Así, en diciembre de 1968, la misión *Apolo 8* puso en la órbita de la Luna, por primera vez, a tres astronautas estadounidenses de forma simultánea. Durante el trayecto, el astronauta William Anders tomó la icónica foto conocida como «*Earthrise*», que no tardó en capturar la imaginación del público alrededor del mundo. Por primera vez veíamos nuestro planeta como lo que era, una diminuta balsa azul y blanca flotando sola en la oscura inmensidad del espacio.

Las misiones *Apolo 9* y *Apolo 10* llevaron a cabo las pruebas de acoplamiento del módulo lunar en las órbitas terrestre y lunar, respectivamente. Finalmente, en diciembre de 1969, el programa lunar llegaba a su culminación con *Apolo 11*, la misión que llevó a Neil Armstrong, Buzz Aldrin y Michael Collins a la Luna. Mientras que el último permanecía en el módulo de comando, Aldrin y Armstrong descendieron en el módulo lunar, denominado *Eagle*, hasta posarse en el Mar de la Tranquilidad. Tras el alunizaje, ambos astronautas debían dormir durante 5 horas pero, por razones obvias, decidieron que podían saltarse ese paso. Armstrong primero, y Aldrin después, llevaron a cabo una EVA en la que Armstrong pronunciaría su frase: «*Es un pequeño paso para (un) hombre, pero un gran salto para la humanidad*».

Podríamos estar tentados de afirmar que este tremendo acontecimiento, y las siguientes misiones de la 12 a la 17 con cinco alunizajes más, pusieron fin a la carrera espacial con una aplastante victoria de los EEUU. Pero eso supondría restar mérito a los increíbles logros del programa espacial soviético y a las aportaciones científicas de aquellas primeras misiones, y de todas las que aún estaban por llegar. Al final, lo cierto es que, si hubo un verdadero ganador en esta carrera por expandir las fronteras de la exploración humana en el espacio, no fue otro que el conjunto de la humanidad, que en apenas una década presencié un desarrollo tecnológico sin parangón que nos llevó a pisar nuestro satélite natural, así como un torrente incesante de descubrimientos científicos que sentaron las bases de la era espacial.



### 1.2.4. EL PROGRAMA ALMAZ Y LAS ESTACIONES SALYUT

A pesar de esta 'derrota' propagandística, el programa espacial soviético no perdió fuelle. Tras una felicitación formal a sus rivales y una negativa de que hubieran estado participando en ninguna carrera<sup>[22]</sup>, los esfuerzos rusos se centraron en los diseños de estaciones orbitales tripuladas en los que habían estado trabajando desde principios de aquella década.

#### Concepción y primera generación

El programa *Almaz* fue concebido por la organización de Korolev entre 1964 y 1967, pero pronto adquirió una componente militar que hizo que la tarea de llevarla a cabo recayera en otro departamento. Aunque la idea inicial era desarrollar tanto la estación como un vehículo que llevara a sus tripulantes hasta ella en un mismo cohete, además de varios componentes entre los que se incluía un arma antiáerea para derribar a otros satélites estadounidenses<sup>[23]</sup>, todos estos componentes se quedaron en la fase de desarrollo, y el programa *Almaz* se devolvió a Korolev para que su equipo desarrollara estos componentes en base a los utilizados para el programa lunar ruso.

Así, la primera generación de estaciones *Almaz* fue complementada con los componentes del programa *Soyuz*, entre los que se incluía la cápsula del mismo nombre, que sería la encargada de llevar a los tripulantes hasta la estación. La primera de estas estaciones fue llamada *Salyut-1*<sup>[24]</sup> (Figura 1.11), y aunque el lanzamiento fue un éxito, los intentos por parte de la tripulación de la misión *Soyuz 10* de acoplarse a la misma fracasaron por un problema en el puerto de acoplamiento. Sería la tripulación de *Soyuz 11* la que arreglaría este problema y se convertiría en la primera en habitar una estación orbital, durante tres semanas en 1971. Tras ello, por desgracia, la cápsula *Soyuz* en la que descendían a la Tierra perdió presión debido a un fallo mecánico, asfixiando a los tres cosmonautas.

Tras *Salyut-1* se lanzaron tres nuevas estaciones orbitales siguiendo su diseño, llamadas estaciones de tipo DOS (Acronimo ruso para estación orbital de larga duración). DOS-2 no llegó a alcanzar la órbita y se despresurizó, por lo que no recibió nombre oficial. Ocurrió lo mismo con DOS-3 (*Cosmos 557*) y sólo DOS-4 (*Salyut-4*) llegó a albergar una tripulación.

Posteriormente el diseño se modificó y se lanzaron otras tres estaciones denominadas *Salyut 2, 3 y 5* (*Almaz 1, 2 y 3*), de las cuales sólo las dos últimas fueron un éxito. El programa sería cancelado a finales de los 70.

Las estaciones *Almaz* de primera generación tenían una vida muy limitada, ya que su diseño no les permitía ser reabastecidas. Contaban con un único puerto de acoplamiento, lo que significaba que la tripulación sólo podía permanecer en ellas tanto tiempo como duraran las provisiones que llevaban en la cápsula *Soyuz* de ascenso, que permanecería acoplada como balsa salvavidas mientras durara la misión. Y una vez que la tripulación la abandonara, la estación no duraría mucho más: no contaba con controles de altitud, lo que significaba que su órbita decaía rápidamente y se precipitaba a la atmósfera.

Fondo: «*Earthrise*», 1968 (Imagen 07)

<sup>[22]</sup> Launius, Roger D. (2018). *The Smithsonian history of space exploration*. Smithsonian Books, Washington D. C.

<sup>[23]</sup> Portree, David S. F. (1995). *Mir hardware heritage*. Informe, Nasa Technical Reports Server (NTRS), NASA-RP-1357. Johnson Space Center.

<sup>[24]</sup> El nombre original iba a ser *Zarya*, con el que posteriormente se denominaría al primer módulo de la EEI, pero en aquel momento se descartó porque podía confundirse con el nombre en clave usado para un programa de desarrollo armamentístico.



En cuanto a la organización interior, los diseñadores contaban con las opiniones de las sucesivas tripulaciones entre estación y estación. Las estaciones DOS contaban con dos espacios, uno de ellos junto al acoplamiento y destinado a actuar como escotilla para EVAs, y el segundo en la parte trasera como espacio de estancia y trabajo, con los diferentes instrumentos en cuatro 'paredes' alrededor del cilindro. *Salyut-1* utilizaba códigos de colores en las paredes de los espacios presurizados para ayudar a la orientación, y las sucesivas estaciones DOS añadieron velcros en las paredes para facilitar el movimiento, así como estaciones de higiene personal<sup>[26]</sup>. Las estaciones *Almaz* modificaron ligeramente el diseño, aumentando el volumen del espacio de estancia y trabajo, dando como resultado dos diámetros diferentes en el mismo módulo presurizado.

## Segunda generación

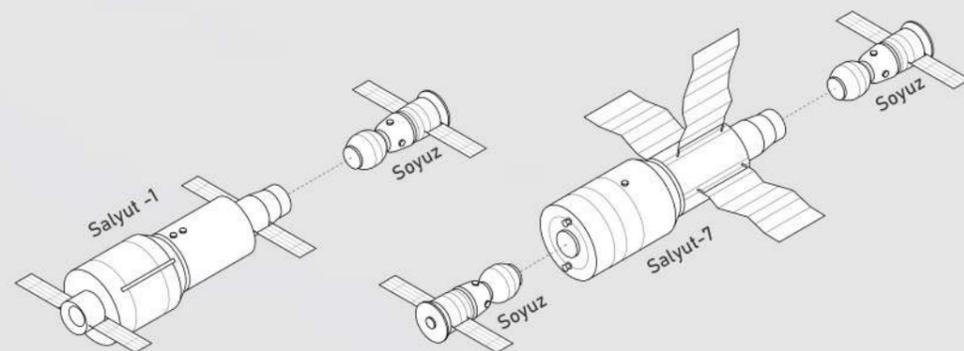
La segunda generación de estaciones espaciales rusas estuvo compuesta por *Salyut-6* y *Salyut-7*, la última antes de la estación *Mir*. Estas nuevas estaciones, lanzadas entre 1977 y 1986, presentaban importantes modificaciones en su diseño, siendo quizá la más importante la incorporación de un segundo puerto de acoplamiento que aumentaba enormemente la capacidad logística de la estación, permitiendo el reabastecimiento por parte de nuevas cápsulas *Soyuz* y *Progress*, además de la visita de nuevos cosmonautas o el relevo de la tripulación existente. La *Soyuz* inicial, de esta forma, se usaría como vehículo de vuelta para la tripulación saliente, mientras que la que se quedara tendría a su disposición el nuevo vehículo en el que habían llegado. A esto hubo que sumarle también el control de altitud, y una capacidad aumentada de generación eléctrica con tres paneles solares diferenciados<sup>[25]</sup>.

La organización interior de estas nuevas estaciones de segunda generación difiere también de las *Salyut* originales. Mientras que las primeras contaban únicamente con dos espacios diferenciados, en estas se aumentaría a tres, todos ellos con capacidad de sellarse independientemente: el compartimento de transferencia, el compartimento de trabajo y el compartimento intermedio<sup>[26]</sup>.

El compartimento de transferencia, de menor diámetro y situado junto al puerto de acoplamiento delantero, se utilizaba para el almacenamiento de los trajes espaciales y contenía la escotilla para EVAs. El compartimento de trabajo se subdividía a su vez en dos áreas: una de trabajo, incluyendo el equipamiento científico presurizado y el control de vuelo, y una de estancia, en la que se encontraba la 'mesa' exigida por los cosmonautas y los equipamientos de higiene personal, ejercicio, y descanso. El compartimento intermedio estaba situado en la parte trasera del módulo presurizado, junto al segundo puerto de acoplamiento. Se trataba de un espacio de menor diámetro en torno al cual se localizaba el equipamiento de navegación y soporte vital, así como algunas de las ventanas que daban al exterior.

*Salyut-7* se convirtió en un hito para la habitabilidad en el espacio, la estación más cómoda hasta aquella fecha. Contaba con un total de 20 ventanas para iluminación y observación, y las mejoras progresivas de las ayudas al movimiento, del soporte vital, de la orientación interior, y del diámetro de los espacios permanecieron vigentes en la estación *Mir* y en la actualidad, en la parte rusa de la EEI.

Figura 1.11: Estaciones tipo Almaz, primera y segunda generación. Elaboración propia.



## 1.2.5 SKYLAB

A principios de los 70, la 'resaca' del *Apolo* empezaba a dejarse ver en el programa espacial estadounidense. La participación en la costosa guerra de Vietnam, sumada al hecho de que los éxitos propagandísticos del *Apolo 11* y de las sucesivas misiones a la Luna tuvieron poco impacto en el desarrollo de la guerra fría, más allá de lo propagandístico y científico, hicieron que las últimas dos misiones del programa, *Apolo 18* y *19*, fueran canceladas, y que el gobierno presionara a la NASA para buscar nuevas aplicaciones al hardware de exploración lunar.

Ese fue, en esencia, el origen de *Skylab*: una reutilización de las tecnologías desarrolladas en el programa *Apolo* para su aplicación a la habitabilidad de la OTB, un campo en el que los soviéticos empezaban a adelantarse con sus estaciones *Salyut*. La estación espacial consistía en dos partes diferenciadas: un adaptador de acoplamiento múltiple (MDA) cilíndrico, al que debería acoplarse el módulo de comando del programa *Apolo* (que actuaba como vehículo orbital al modo de las cápsulas *Soyuz* rusas), todo ello montado sobre el tanque de hidrógeno del cohete *Saturn-V*, reacondicionado como espacio de trabajo y estancia, y el tanque de oxígeno bajo él, reutilizado como compartimento para el almacenamiento de residuos.

Durante el lanzamiento en mayo de 1973, la estación experimentó una serie de problemas que la llevaron a perder el escudo de micro-meteoritos, una cobertura diseñada tanto para proteger de los daños en órbita como para reducir el impacto térmico en las horas de insolación directa. Junto con este componente fundamental, se perdió uno de los dos paneles solares. Sin embargo, a pesar de estos inconvenientes, la estación llegó a su órbita prevista, y dos semanas más tarde, la misión *Skylab 2* lanzó a su primera tripulación.

Los planes para hacer habitable la maltrecha estación habían sido apurados, pero efectivos. En primer lugar, se modificó la orientación de la estación para compensar el panel solar perdido, pero en esta nueva orientación, y sin el escudo térmico, las temperaturas en el interior llegaban a los 52°C en las horas de máxima exposición. Por suerte, los ingenieros de la NASA también habían previsto esto, e incluyeron en el vuelo de *Skylab 2* un sofisticado parasol mediante una tela extendida que, situada en el exterior de la estación, protegería el módulo principal de la insolación directa<sup>[27]</sup>. Efectivamente: cubrieron su estación espacial con un toldo.

Con estas modificaciones, la estación consiguió salir a flote, y acogió a otras dos tripulaciones en estancias progresivamente más largas, hasta que la última, con 83 días, completó un total de 170 días de estancia en órbita. Una vez que la tercera tripulación abandonó *Skylab*, la estación se elevó a una órbita provisional en la que permanecería hasta que el desarrollo del programa del transbordador espacial permitiera a nuevas tripulaciones acceder a ella. Sin embargo, el programa se retrasó y, finalmente, la estación reentró en la atmósfera en 1979.

La distribución interior de esta estación es radicalmente diferente a las *Salyut* rusas, y a todo lo que se intentaría en diseños posteriores. Como puede verse en la Figura 1.12, en lugar de organizar el espacio a lo largo del eje longitudinal del módulo, los distintos espacios estaban organizados en horizontal, con una orientación definida, como si se tratara de una torre de tres plantas.

El Taller Orbital, como se llamó a la sección del tanque de hidrógeno reconvertido, se dividió en dos plantas diferenciadas. La 'planta baja' albergaba los compartimentos personales de cada tripulante, el inodoro y la zona de aseo, la sala de estancia y esparcimiento y un área pequeña de ejercicio y trabajo. En la 'planta superior', denominada la Cúpula, se encontraba la mayor parte del laboratorio orbital, con los experimentos científicos distribuidos en las paredes de la estancia. Sobre la Cúpula se encontraba el MDA, que podía aislarse y que actuaba tanto de puerto de acoplamiento para el módulo de comando como de escotilla para EVAs.

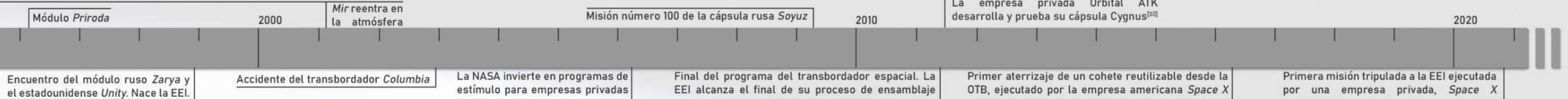
Cuando se puso en órbita en 1973, esta estación contaba con el entorno habitable más espacioso hasta la fecha, con un diámetro de 6 m. Para facilitar el movimiento en este entorno, el espacio estaba dividido mediante mallas metálicas triangulares de ayuda al movimiento, y los zapatos de los astronautas tenían una puntera metálica, también triangular, que encajaba en los huecos de la malla<sup>[26]</sup>. Sin embargo, aunque la malla era útil sobre todo para colgar cosas en ella, las distintas tripulaciones pronto prescindieron de los zapatos, ya que una vez que aprendieron a moverse en las condiciones de ingravidez, los encontraron innecesarios e incluso peligrosos en caso de golpear a un compañero. Junto con ellos, desecharon también la barra vertical que recorría el Taller Orbital de arriba abajo para facilitar el desplazamiento.

<sup>[25]</sup> Portree, David S. F. (1995). *Mir hardware heritage*. Informe, Nasa Technical Reports Server (NTRS), NASA-RP-1357. Johnson Space Center.

<sup>[26]</sup> Häuplik-Meusburger, Sandra (2011). *Architecture for astronauts*. Springer Wien, Viena.

<sup>[27]</sup> Launius, Roger D. (2018). *The Smithsonian history of space exploration*. Smithsonian Books, Washington D. C.

Un estudio desde la óptica de la arquitectura



*Skylab* fue el primer experimento orbital de larga duración de la NASA, y de él se extrajeron varias lecciones sobre la habitabilidad en la órbita terrestre que se aplicarían en la futura EEI. Entre las más destacadas se encuentra todo lo referente a las ayudas de movimiento en el interior de los módulos presurizados, las posturas neutras en gravedad cero y su impacto en el diseño, la operación de sistemas, las ayudas a la realización de tareas básicas como la alimentación, la higiene personal y el sueño, y las interacciones entre astronautas y sistemas de vuelo<sup>[28]</sup>.

### 1.2.6. LA ESTACIÓN ESPACIAL *MIR* Y LA COLABORACIÓN EN EL ESPACIO

La estación *Mir* fue la sucesora directa de las *Salyut*, y la primera pensada para acoplar distintos módulos entre sí para ampliar el espacio. Actuó también, en los últimos años de su estancia en órbita, como la primera estación espacial internacional, y en ella se cimentaron los programas de investigación de componentes, de mecanismos de acoplamiento y sistemas que harían posible la futura EEI. Fue también, tras la caída del muro de Berlín en 1989, la primera colaboración espacial entre la agencia Roscosmos rusa y la NASA estadounidense, y simbolizó el final de las rivalidades de la Guerra Fría.

El objetivo inicial de la estación fue establecer una presencia soviética permanente en el espacio. En febrero de 1986, se puso en órbita el módulo del núcleo de la estación, muy similar en cuanto a su composición a la estación *Salyut-7* que ya hemos tratado, pero con una diferencia fundamental: en lugar de dos puertos de acoplamiento, contaba con seis. Esto se logró mediante el uso de un compartimento de transferencia esférico, acoplado al puerto delantero de la estación, que contaba a su vez con otros cinco puertos, uno delantero y cuatro radiales a babor, estribor, cénit y nadir. Sería en estos cuatro puertos en los se acoplarían los siguientes módulos de la estación. Como veremos más adelante, el módulo *Zvezda* de la EEI tiene el mismo diseño.

En 1987 se lanzó *Kvant*, el segundo módulo de la estación. Este pequeño módulo de 6 m de largo y 4 m de diámetro contenía instrumentos de astrofísica y sistemas de soporte vital, junto con los controles de altitud de la estación. Quedó acoplado permanentemente al puerto de acoplamiento trasero del módulo núcleo.

*Kvant 2*, o el módulo de extensión, se lanzó en 1989 y se acopló en el puerto cénit del compartimento de transferencia, en la parte delantera del módulo núcleo. Contaba con la escotilla presurizada para EVAs, nuevos paneles solares para aumentar la producción y el almacenamiento de electricidad, y nuevos sistemas de reciclaje de líquidos. Estaba basado en el vehículo de transferencia original planificado para las estaciones *Almaz*, antes de que fuera sustituido por las cápsulas *Soyuz*. El módulo *Zarya* de la EEI sigue ese mismo diseño.

El siguiente módulo en lanzarse fue el módulo *Kristall*, en 1990. Similar a *Kvant 2*, contaba con paneles solares retráctiles según necesidad, equipamiento científico, y sistemas de acoplamiento compatibles con otros vehículos a nivel internacional: la estación se abrió, por primera vez, a la colaboración internacional, aunque no sería hasta las misiones del programa *Shuttle-Mir*, en 1998, que los primeros astronautas estadounidenses accederían a ella. *Kristall* se acopló en el puerto nadir del compartimento de transferencia.

Por último, llegaron *Spektr* y *Priroda* en 1995 y 1996, respectivamente, y quedaron acoplados en los puertos de babor y estribor del compartimento de transferencia. Estos dos módulos llegaron algo más tarde, tras el colapso de la Unión Soviética, y contaban con equipamiento para la observación y monitorización de la Tierra. El primero de ellos contaba también con un nuevo conjunto de paneles solares retráctiles.

En su fase final, ilustrada en la Figura 1.13, la estación estaba conformada por seis módulos, y un volumen habitable total de 368 m<sup>3</sup>. En este punto, la EEI ya estaba en construcción, a partir de las lecciones aprendidas en la *Mir*. La estación permaneció ocupada de forma continua, a excepción de dos breves periodos en 1986 y 1989. En su interior, el cosmonauta Valery Polyakov batió el récord de estancia prolongada en órbita, un récord que mantiene a día de hoy con 439 días<sup>[29]</sup>.

En cuanto a diseño interior, el módulo más confortable, y el que los cosmonautas utilizaban como espacio de esparcimiento y relajación, de descanso, ejercicio y alimentación, era el módulo núcleo, que seguía el mismo diseño que hemos descrito en la estación *Salyut-7*: espacios diferenciados mediante sus diámetros, numerosas ventanas al exterior, y orientación mediante colores suaves en las paredes. Los demás módulos seguían diseños algo más utilitarios, con espacios más comprimidos y longitudinales como los que pueden verse hoy en el módulo *Zarya* de la EEI, en los que la mayor parte del volumen presurizado está ocupado por instrumentos salvo un estrecho pasillo central. Estos 'muros' podían también retirarse para generar espacios de almacenamiento.

La estación espacial *Mir* dejó de estar habitada en 1999. A pesar de su enorme importancia, mantenerla en órbita suponía un gasto importante para la administración rusa, así que se acabó tomando la decisión de dejarla caer. Esto ocurrió finalmente en marzo del año 2001, cuando la estación se desintegró en la atmósfera en algún lugar sobre el Pacífico Sur. Ese mismo mes, se producía el primer relevo de tripulaciones en la EEI, tras los 140 días de estancia de la expedición 1. La nueva estación había tomado con éxito el testigo de la *Mir*, y desde entonces, no ha pasado un solo día en que la OTB esté desprovista de presencia humana.

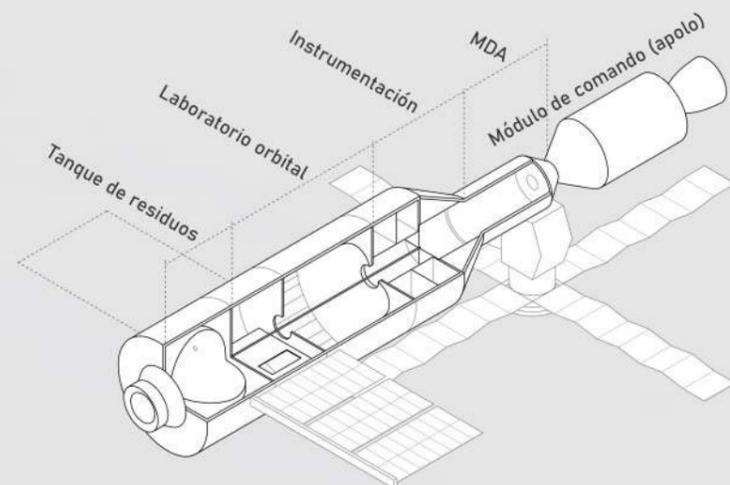


Figura 1.12: Laboratorio orbital *Skylab*. Elaboración propia.

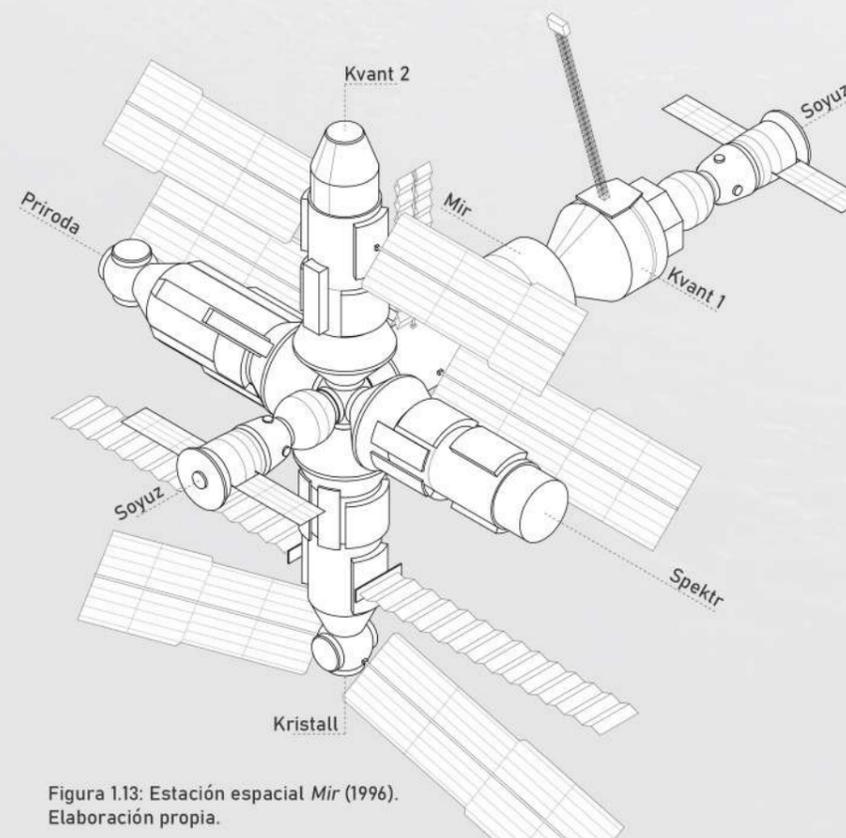


Figura 1.13: Estación espacial *Mir* (1996). Elaboración propia.

<sup>[28]</sup> Lyndon B. Johnson Space Center (1974). *Skylab Bulletin no. 1-27*. NTRS, NASA.

<sup>[29]</sup> Launius, Roger D. (2018). *The Smithsonian history of space exploration*. Smithsonian Books, Washington D. C.

<sup>[30]</sup> NASA and the private sector. <https://ukdiss.com/examples/nasa-and-the-private-sector.php>. UKdiss.com.

## SECCIÓN 2. LA ESTACIÓN ESPACIAL INTERNACIONAL

### 2.1 LA MISIÓN

#### 2.1.1 OBJETIVOS Y PARÁMETROS ORBITALES

La Estación Espacial Internacional (EEI) nace como concepto de misión en 1984, fruto de un esfuerzo conjunto entre las agencias espaciales estadounidense (NASA) y rusa (Roscosmos) con el objetivo de establecer una presencia humana permanente en la OTB. A este esfuerzo se sumarían también las agencias espaciales de Europa, Japón y Canadá (ESA, JAXA y CSA, respectivamente) de tal forma que el resultado sería un laboratorio orbital conjunto del que pudieran beneficiarse todos los países participantes.

En el memorándum de entendimiento entre la NASA y Roscosmos, artículo 2,<sup>[31]</sup> se exponen de forma más detallada los objetivos originales de la misión. Estos objetivos, como suele ocurrir en la fase temprana de desarrollo de las misiones espaciales, eran más ambiciosos de lo que refleja la realidad actual de la misión, y si bien el tiempo y el presupuesto disponible acabaron por acotarlos, nos permiten entender la enorme utilidad que pueden llegar a tener los hábitats orbitales.

«La Estación Espacial permitirá a sus usuarios beneficiarse del ingenio humano en conexión con el entorno de baja gravedad y de vacío casi total del espacio, así como de un punto de observación privilegiado sobre la Tierra y el resto del Universo. Específicamente, la Estación Espacial y sus futuras evoluciones aditivas pueden proveer de una gran variedad de capacidades, por ejemplo:

- un laboratorio en el espacio, para la conducción de experimentos científicos aplicados y el desarrollo de nuevas tecnologías;
- un observatorio permanente en una órbita de gran inclinación, desde el que observar la Tierra, el Sistema Solar y el resto del Universo;
- un nodo de transporte donde estacionar cargas y vehículos, donde construirlos, procesarlos y desplegarlos a sus destinos;
- una capacidad de servicio desde la cual cargas y vehículos pueden ser mantenidos, reparados, reabastecidos y renovados;
- una capacidad de montaje desde la cual ensamblar y verificar grandes estructuras espaciales;
- una capacidad de investigación y tecnología donde las condiciones únicas del entorno favorecen las oportunidades comerciales y fomentan la inversión comercial en el espacio;
- un depósito de almacenaje para consumibles, cargas y repuestos;
- una base de operaciones para futuras misiones, como una base lunar permanente, una misión tripulada a Marte, sondas robóticas planetarias, misiones tripuladas para estudiar asteroides, o una estación científica y de comunicaciones en órbita geosíncrona.»

Para la consecución de estos objetivos, una serie de módulos presurizados y estructuras abiertas construidas en tierra por los distintos participantes en el proyecto serían lanzadas a la OTB, encontrados en un punto y ensamblados in-situ hasta formar el volumen presurizado final. El espacio destinado al uso de estos módulos para las distintas naciones sería proporcional a su participación en el proyecto, y todos los participantes tendrían acceso al conjunto de la misma y a sus beneficios.

La órbita en la que se sitúa la EEI (Figura 2.01) presenta, como afirma el memorandum, una gran inclinación del plano orbital, de tal forma que la estación es capaz de barrer la práctica totalidad de la superficie del globo terráqueo en su rotación. Este plano orbital queda definido por los parámetros que podemos ver en la Tabla 2.1.

#### 2.1.2 SISTEMA RACK Y ACOMODACIÓN CIENTÍFICA

A día de hoy, la EEI sigue siendo el principal laboratorio para estudiar las condiciones en el espacio y sus efectos en el cuerpo humano. Dejando por el momento al margen la parte rusa de la estación, que veremos más adelante y obedece a otros criterios tanto de diseño como de funcionamiento, es fundamental entender la organización espacial básica dentro de los módulos para poder comprender cómo se acomodan los distintos experimentos científicos a bordo, y en el exterior, de la EEI. Comenzaremos por tanto con una introducción al sistema *International Standard Payload Rack* (ISPR) de organización espacial.

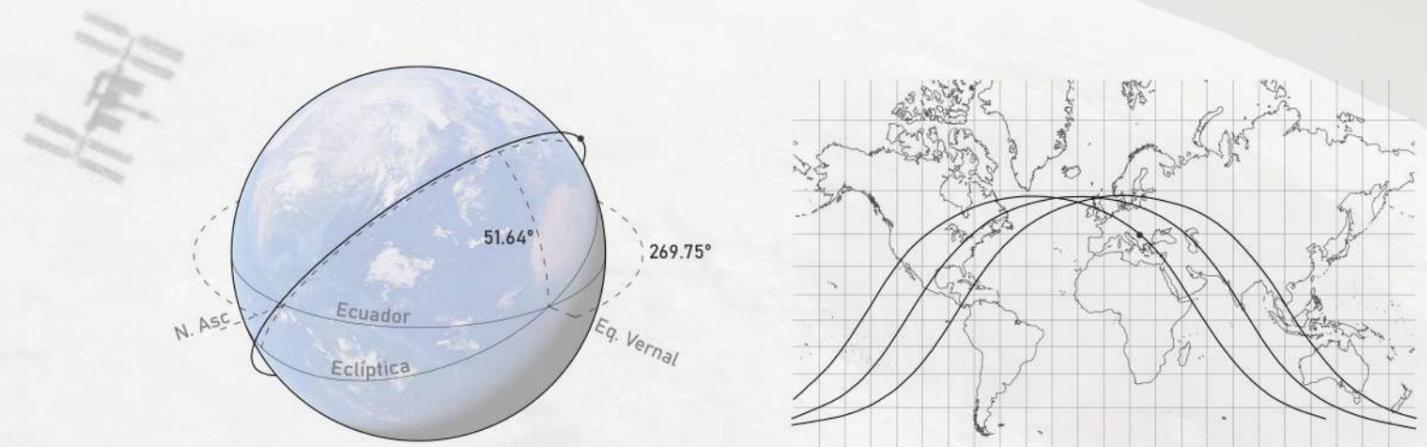


Figura 2.01: Representación volumétrica de la órbita de la EEI (izquierda) y protección de la trayectoria orbital sobre la superficie de la Tierra a lo largo de tres periodos orbitales (derecha). La altura orbital en la representación volumétrica está a escala. Elaboración propia.

Parámetro	Valor	Referencia
Inclinación orbital	51.64°	Ecuador celeste
Longitud del nodo ascendente	269.75°	Equinoccio Vernal
Excentricidad	0.00019	
Altura de perigeo	418 km	Nivel del mar
Altura de apogeo	421 km	Nivel del mar
Argumento de perigeo	72.39°	Equinoccio Vernal
Periodo orbital	92 min 57 s	

Tabla 2.1: Parámetros orbitales de la EEI, a fecha de 25 de noviembre de 2020<sup>[32]</sup>. La órbita decae constantemente por la influencia de la atmósfera y otros factores, haciendo necesarios impulsos periódicos para elevar su altura. De igual forma, la órbita puede modificarse para evitar amenazas potenciales en forma de desechos orbitales, algo que ocurrió recientemente.

#### Sistema Rack

El sistema Rack, o ISPR por sus siglas en inglés, es un sistema de módulos huecos, extraíbles y anclados al armazón estructural de los distintos módulos presurizados, con cuyas medidas deben diseñarse los distintos experimentos, componentes y espacios de almacenamiento de la estación de tal forma que la sección resultante quede organizado con claridad. En la Figura 2.02 se presenta esa sección resultante y la forma en la que encajan los distintos módulos del sistema ISPR.

Como puede verse, alrededor de la circunferencia definida por el módulo presurizado quedarían dispuestos cuatro de estos módulos, de tal forma que las esquinas resultantes, accesibles desde el espacio central de 7 pies de lado (2.13 m), acogen las distintas instalaciones y sistemas de soporte vital de la estación. Cada ISPR facilita 1.571 m<sup>3</sup> de volumen interno, con las medidas que pueden verse en la Figura 2.03<sup>[33]</sup>. Aunque el sistema base está muy estandarizado volumétricamente, en su interior permite una gran libertad para acoger distintos sistemas, tanto científicos como operativos, almacenamiento, aviónica, etc. En total, la EEI cuenta con 111 espacios ISPR.

Existe también una serie de ISPR denominados Racks EXPRESS<sup>[34]</sup>, que funciona con una corriente diferente a los demás y puede operarse remotamente desde la Tierra. Suelen estar situados en la orientación cénit.

<sup>[31]</sup> NASA & Roscosmos. (1998). *Memorandum of understanding between the national aeronautics and space administration of the United States of America and the Russian space agency concerning cooperation on the civil international space station*. Washington D. C.

<sup>[32]</sup> Estación espacial internacional (ISS) - órbita. <https://www.heavens-above.com/orbit.aspx?satid=25544>. Heavens Above.

<sup>[33]</sup> Sabbatini et al. (2014). *ESA user guide to low gravity platforms*. Capítulo 7: *International Space Station - ISS*. European Space Agency.

<sup>[34]</sup> EXPRESS Racks 1 and 2. <https://www.nasa.gov/centers/marshall/news/background/facts/expressrack.html>. Marshall Space Flight Center.

## Acomodación científica interior

La parte estadounidense de la EEI cuenta con tres módulos de laboratorio, llamados *Destiny*, *Columbus* y *Kibo*, pertenecientes a la NASA, la ESA y a JAXA, respectivamente. En los dos últimos, la mitad de los módulos ISPR son de participación estadounidense. En la Figura 2.04 podemos ver los distintos módulos ISPR destinados a investigación científica<sup>[35]</sup>.

## Acomodación científica exterior

La EEI cuenta también con varios instrumentos y laboratorios exteriores no presurizados, desde los que se pueden estudiar las condiciones de vacío del espacio y la propia Tierra. Estos laboratorios son el CEPF, en el módulo Europeo *Columbus*, el módulo ruso de servicio, el módulo japonés de experimentos expuestos JEM-EF, y cuatro contenedores logísticos EXPRESS (ELC). El módulo *Kibo* cuenta además con una cabina de despresurización para poder mover experimentos y muestras entre el interior y el exterior. Entre los instrumentos expuestos podemos encontrar varios espectrómetros, como el espectrómetro magnético alfa (AMS) o el observatorio orbital de carbono (OCO-3)<sup>[36]</sup>, e instrumentos de tecnología lidar, como el sistema CATS para la monitorización de partículas de aerosol y nubes (actualmente retirado)<sup>[37]</sup> y la herramienta topográfica GEDI<sup>[38]</sup>.

Junto con estos laboratorios, la EEI cuenta con espacios de carga exteriores situados en los armazones estructurales S3 y P3. Estas cargas exteriores se manejan mediante el brazo robótico de la EEI.

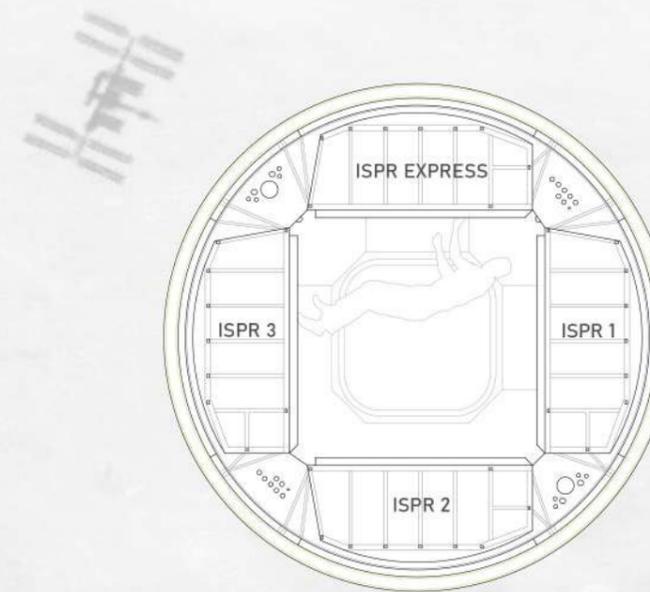


Figura 2.02: Módulo de la EEI, sección genérica. Elaboración propia.

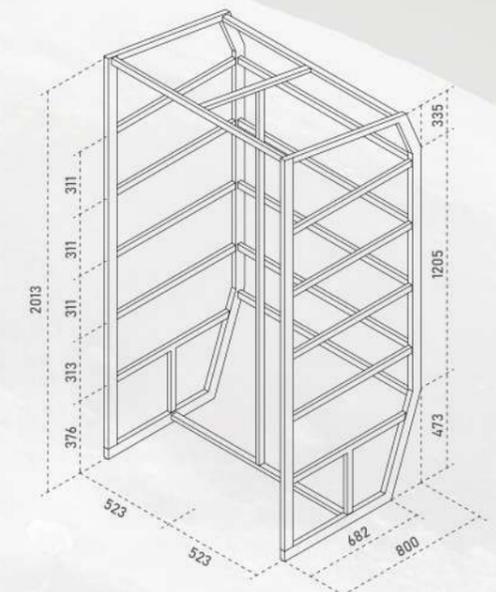


Figura 2.03: Dimensiones de un rack ISPR estándar, en milímetros. Elaboración propia.

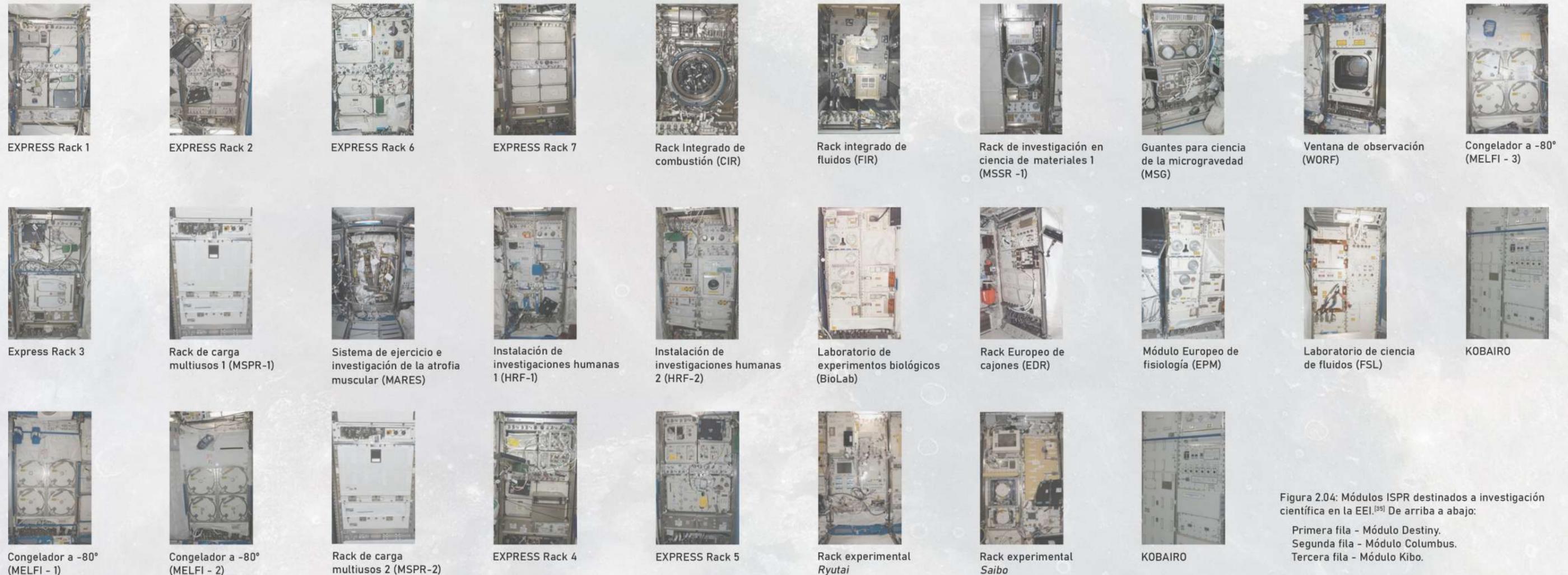


Figura 2.04: Módulos ISPR destinados a investigación científica en la EEI.<sup>[35]</sup> De arriba a abajo:

Primera fila - Módulo *Destiny*.  
Segunda fila - Módulo *Columbus*.  
Tercera fila - Módulo *Kibo*.

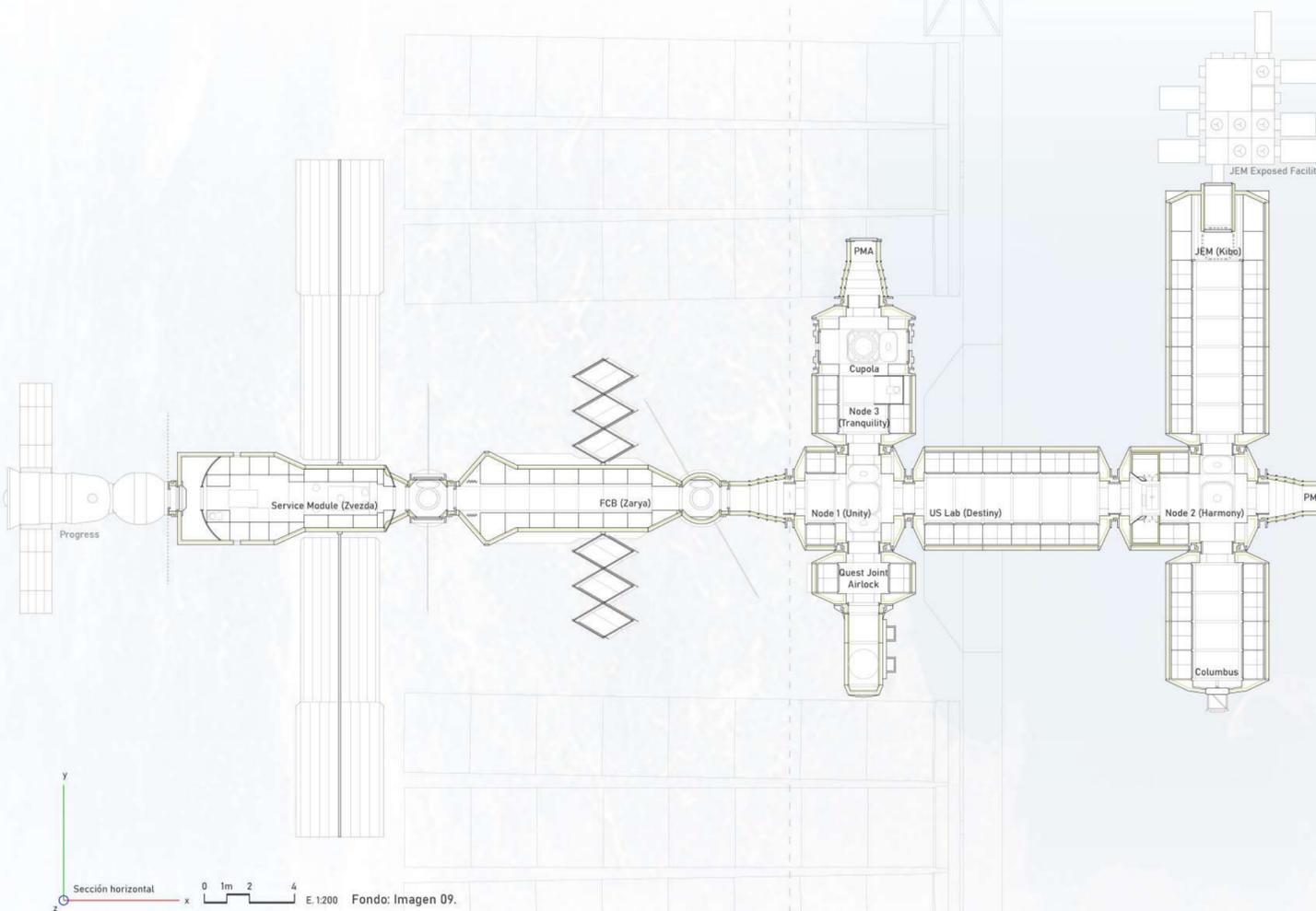
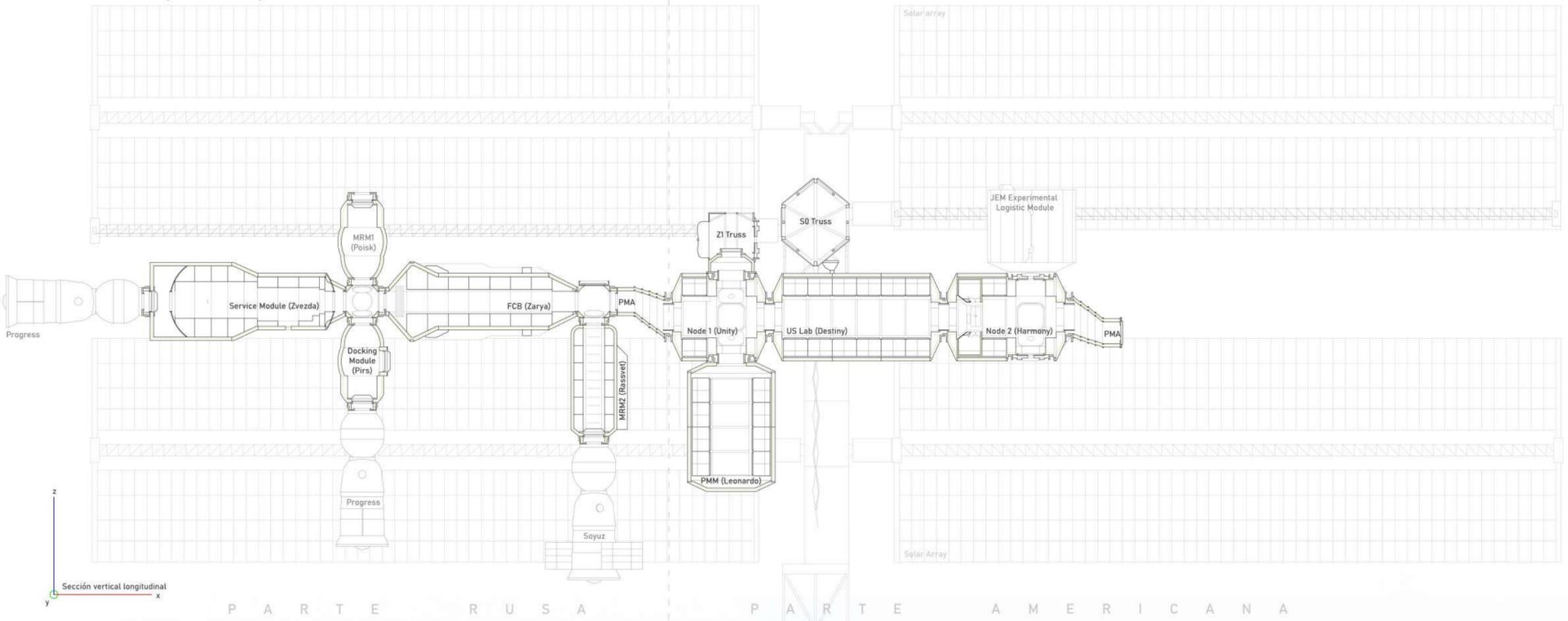
<sup>[35]</sup> Kitmacher, Gary H. (2015). *Reference guide to the international space station, utilization edition*. Johnson Space Center. NASA, Houston.

<sup>[36]</sup> Eldering, A. Et al. (2018). *The OCO-3 mission; measurement objectives and expected performance based on one year of simulated data*. Atmospheric Measurement Techniques, v. 12, n°4. p. 2341-2370.

<sup>[37]</sup> Rodier, S. Et al. (2015). *Laser Remote Sensing from ISS: CATS Cloud and Aerosol Level 2 Data Products*. Proceedings of the ILRC. New York.

<sup>[38]</sup> GEDI. Instrument overview. <https://gedi.umd.edu/instrument/instrument-overview/>. GEDI Ecosystem Lidar.

Un estudio desde la óptica de la arquitectura



2.3 DISTRIBUCIÓN

MÓDULOS PRESURIZADOS

La EEI<sup>[39]</sup> se divide en dos partes bien diferenciadas, el Segmento Orbital Americano (USOS) y el segmento orbital ruso (ROS). Ambas partes están separadas por un adaptador de acoplamiento presurizado (PMA) y utilizan diferentes estándares en cuanto a dimensiones, modularidad y organización espacial.

El segmento orbital ruso ocupa toda la parte trasera de la EEI, y está compuesto a día de hoy por cinco módulos: el *Functional Cargo Block (Zarya)*, el *Service Module (Zvezda)*, la cámara *Pirs*, y los laboratorios MRM1 y MRM2, llamados *Poisk* y *Rassvet*, respectivamente. Tanto *Zvezda* como *Pirs*, *Poisk* y *Rassvet* tienen puertos para el acoplamiento de vehículos orbitales del tipo *Soyuz* o *Progress*, de los que siempre hay al menos dos, para poder ser utilizados como lanchas salvavidas en caso de emergencia.

*Zarya* es el componente más antiguo de la EEI, puesto en órbita en noviembre de 1998. Tiene una longitud de 13 m y un diámetro máximo de 4.1 m, con un volumen presurizado total de 71.5 m<sup>3</sup>. Cuenta con sus propios paneles solares, actualmente plegados.

*Zvezda* es el tercer módulo presurizado de la estación. Con su propio sistema de propulsión, es el encargado de empujar la EEI cuando la fricción de la atmósfera reduce demasiado la altura de su órbita. Cuenta con 13.1 m de largo y 4.2 m de diámetro máximo. En su interior se encuentran los dormitorios de la tripulación rusa y un inodoro, así como varias ventanas de observación orientadas hacia la Tierra.

*Pirs* fue el primer compartimento estanco para EVAs de la estación, acogiendo los trajes *Orlan* rusos. En la orientación nadir tiene un puerto APAS-95 para el acoplamiento de vehículos *Soyuz* y *Progress*, y mide 4.9 m de largo, con un diámetro de 2.55 m y un volumen presurizado de 13 m<sup>3</sup>.

*Poisk* y *Rassvet* actúan como laboratorios en la parte rusa de la estación. *Poisk* complementa las capacidades EVA de *Pirs*, mientras que *Rassvet* cuenta con más espacio para experimentos. Ambos tienen puertos (*Poisk* en cénit y *Rassvet* en nadir) para *Soyuz* y *Progress*.

El segmento orbital americano ocupa la parte delantera de la EEI. Está compuesto por seis módulos americanos, dos japoneses y uno europeo, sobre los cuales está apoyada la estructura de armazón de la estación, no presurizada, que alberga las instalaciones solares principales, las juntas rotatorias y varias instalaciones expuestas al vacío. Asimismo, cuenta con dos adaptadores de acoplamiento presurizados, dedicados al acoplamiento de cápsulas comerciales como la *Crew Dragon* de Space X.

Los módulos de la estación americana (páginas 18-20) son los siguientes:

Módulos estadounidenses

*Node 1*, en adelante *Unity*. Lanzado en 1998 y acoplado a *Zarya* mediante un PMA, cuenta con 6 puertos CBM y 4 módulos ISPR.

*US Lab*, en adelante *Destiny*. Acoplado en el puerto delantero de *Unity*, cuenta con 2 puertos CBM y 24 módulos ISPR, de los cuales 10 están destinados a investigación científica.

*Quest Joint airlock*, en adelante *Quest*. Acoplado en el puerto estribor de *Unity*, cuenta con 4 módulos ISPR y una escotilla para EVA.

*Node 2*, en adelante *Harmony*. Acoplado en el puerto delantero de *Destiny*, cuenta con 6 puertos CBM y 8 módulos ISPR.

*Node 3*, en adelante *Tranquility*. Acoplado en el puerto babor de *Unity*, cuenta con 6 puertos CBM y 8 módulos ISPR. La cúpula europea está acoplada al puerto nadir de este módulo.

Módulos europeos

*Permanent multipurpose module*, en adelante *Leonardo* o *PMM*. Acoplado en el puerto nadir de *Unity*, aunque su posición varía frecuentemente. Cuenta con 16 módulos ISPR.

*EU Lab*, en adelante *Columbus*. Acoplado en el puerto estribor de *Harmony*, cuenta con 16 módulos ISPR, de los cuales 10 están destinados a investigación científica, y con una instalación no presurizada.

Módulos japoneses

*Japanese experimental module*, en adelante *Kibo* o *JEM*. Acoplado en el puerto babor de *Harmony*, cuenta con 23 módulos ISPR, de los cuales 8 están destinados a investigación científica, así como con una instalación no presurizada, una escotilla para experimentos y un brazo robótico. Cuenta también con un dos puertos CBM.

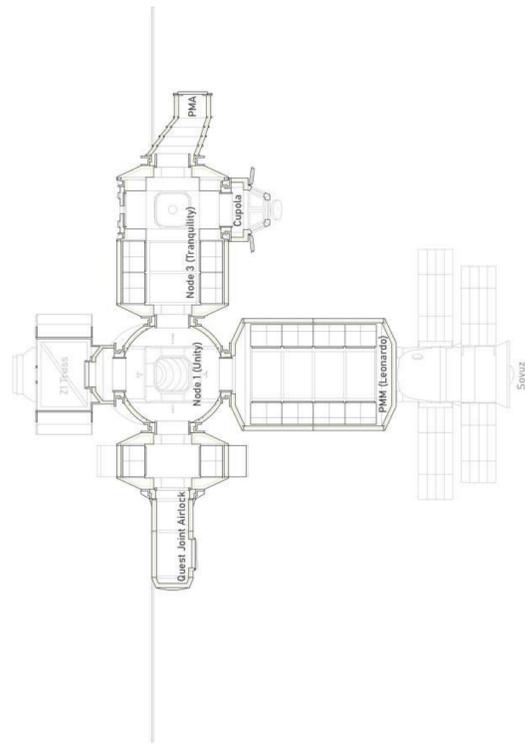
*Experimental logistic module*, en adelante *ELM*. Acoplado en el puerto cénit de *Kibo*, cuenta con 8 módulos ISPR.



## INSTALACIONES SOLARES Y DE CONTROL TÉRMICO

Los paneles solares de la EEI son quizá su rasgo más característico. Con una superficie comparable a la de un campo de fútbol y visibles desde la superficie de la Tierra con binoculares, las cuatro instalaciones, cada una compuesta a su vez de cuatro 'mantas' solares de 33,7 x 4,7 m extendidas mediante una pequeña estructura metálica intermedia, pueden generar de 84 a 120 kW al día<sup>[40]</sup>, más que suficiente para cubrir las necesidades de la estación con un margen de seguridad. Cuando la estación está iluminada, el 60% de la energía generada se almacena en baterías, para ser utilizada en los cerca de 45 min que dura la 'noche' orbital.

Junto a las instalaciones solares, en las estructuras de armazón se alojan las placas metálicas que actúan como radiadores, para deshacerse del exceso de calor en la estación durante el tiempo que está iluminada. La estación cuenta con 10 de estos conjuntos de placas, agrupados en dos grupos de tres que se sitúan en las cerchas S1 y P1, y otros cuatro conjuntos individuales situados S3/4, S6, P3/4 y P6. Estas cuatro últimas pueden verse en la sección transversal por el módulo *Harmony* en esta página, y las otras seis pueden verse en la sección horizontal en el plano P1.



## MÓDULOS NO PRESURIZADOS

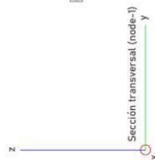
Las estructuras de armazón de la EEI (truss structures) son la espina dorsal no presurizada de la estación. A lo largo de esta gran cercha de metal, con una longitud total de 96 m, se sitúan diversas estaciones de carga e investigación exterior. El brazo robótico *Canadarm2* se desplaza por raíles en toda su longitud, y en ella se sustentan las cuatro enormes instalaciones solares de la estación.

La primera de estas estructuras en instalarse fue el armazón Z1, que cuenta con una pequeña bóveda presurizada desde la que se puede acceder al exterior para realizar tareas de mantenimiento. Se sitúa en el puerto CBM nadir de *Unity*, y en su momento sería la base en la que se instalaría la primera instalación solar, P6.

La siguiente parte del armazón en unirse a la EEI fue la cercha S0. Al contrario que la Z1, que contaba con un puerto CBM para su acoplamiento, esta cercha es exterior en todo su volumen, con lo cual se fijó a la parte alta del módulo *Destiny* mediante barras estructurales. A S0 se acoplaron S1 y P1 (Starboard 1 y Port 1), que prolongaron el armazón inicial a ambos lados de S0 hasta alcanzar los 40 m.

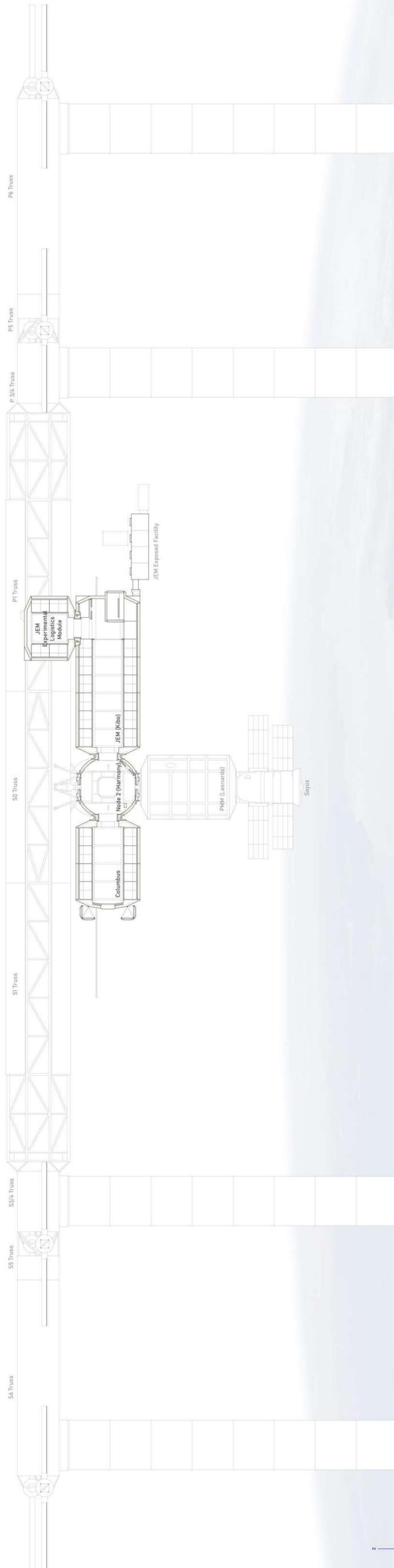
Tras un parón de cuatro años en el ensamblaje, se envía la cercha P3/4, instalada junto a P1. Esta cercha contiene, al igual que P6, una junta solar rotatoria (Solar Alpha Rotary Joint, o SARJ) tras la que se sitúa la segunda instalación solar de la EEI. Después llega P5, una pieza de 3.37 m que actúa de separador, y P6 se traslada de Z1 a P5, completando el lado babor de la estructura de armazón.

El siguiente paso es la cercha S3/4, con su junta SARJ y la tercera instalación solar. Llega también el separador S5. En último lugar, llega la cercha S6, la última de estribor, que se instala en el separador S5 y contiene la cuarta y última instalación solar.

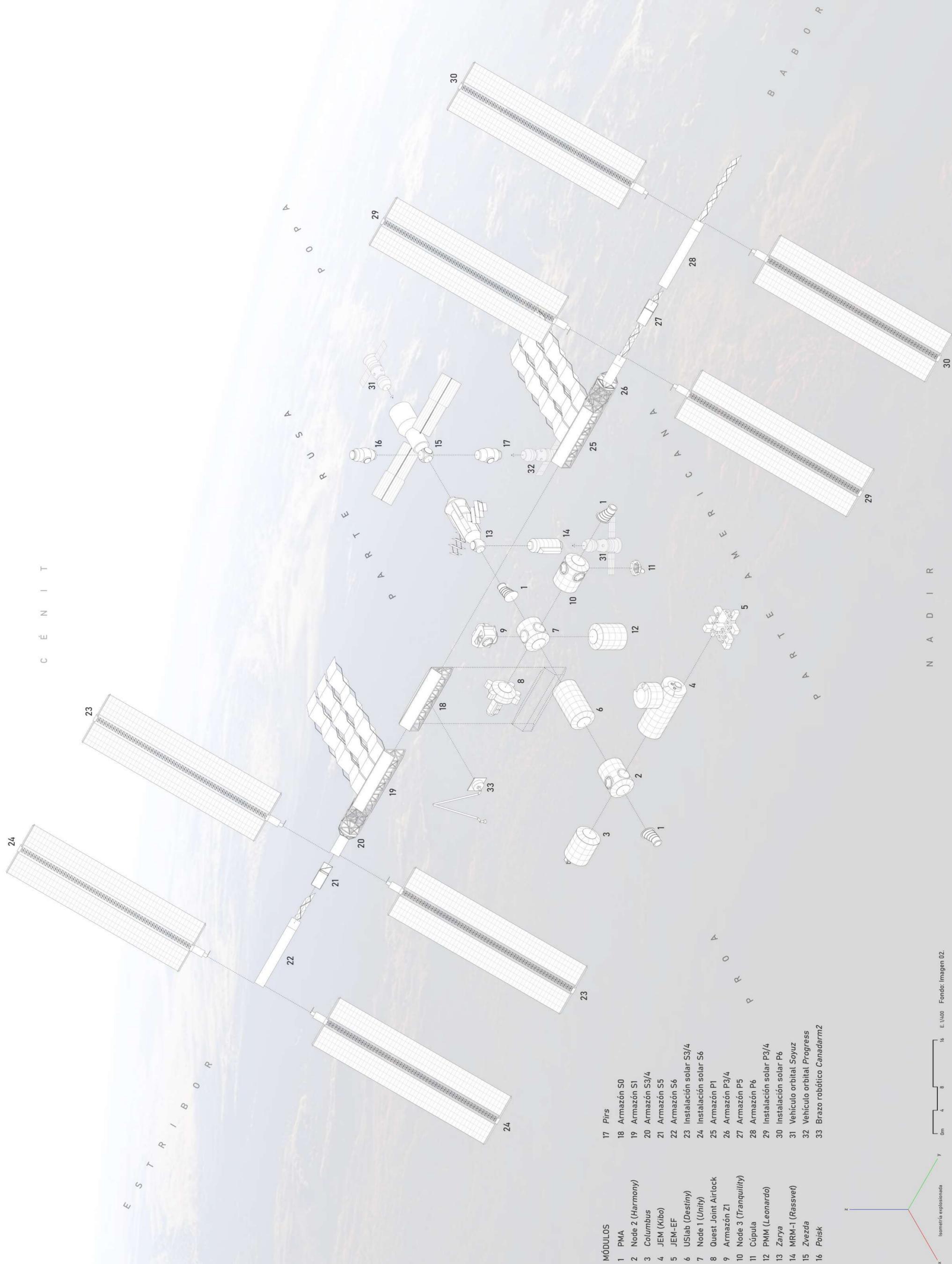


E S T R I B O R

B A B O R

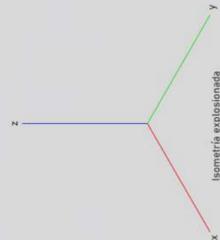


0 Im 2 4 E: 1:200 Fondo: Imagen 10

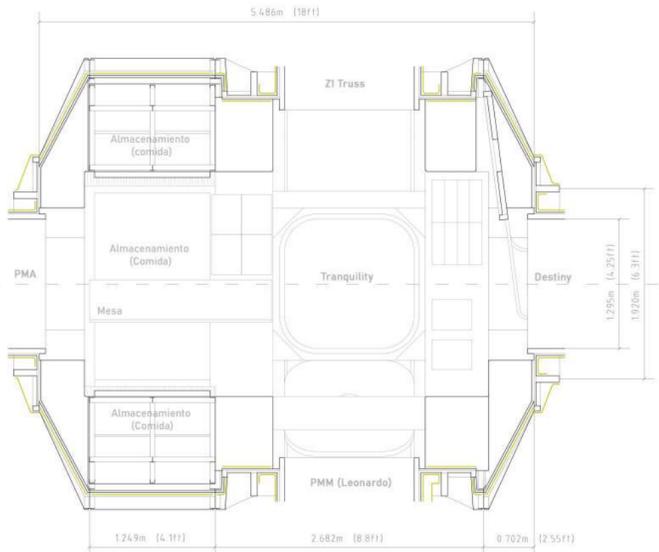


### MÓDULOS

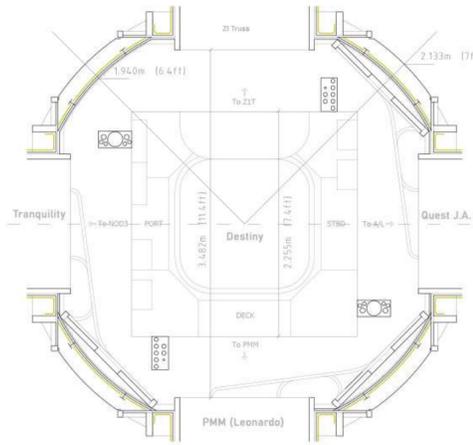
- 1 PMA
- 2 Node 2 (Harmony)
- 3 Columbus
- 4 JEM (Kibo)
- 5 JEM-EF
- 6 USLab (Destiny)
- 7 Node 1 (Unity)
- 8 Quest Joint Airlock
- 9 Armazón Z1
- 10 Node 3 (Tranquility)
- 11 Cúpula
- 12 PMM (Leonardo)
- 13 Zarya
- 14 MRM-1 (Rassvet)
- 15 Zvezda
- 16 Poisk
- 17 Pirs
- 18 Armazón S0
- 19 Armazón S1
- 20 Armazón S3/4
- 21 Armazón S5
- 22 Armazón S6
- 23 Instalación solar S3/4
- 24 Instalación solar S6
- 25 Armazón P1
- 26 Armazón P3/4
- 27 Armazón P5
- 28 Armazón P6
- 29 Instalación solar P3/4
- 30 Instalación solar P6
- 31 Vehículo orbital Soyuz
- 32 Vehículo orbital Progress
- 33 Brazo robótico Canadarm2



0m 4 8 16 E. 1/400 Fondo: Imagen 02.



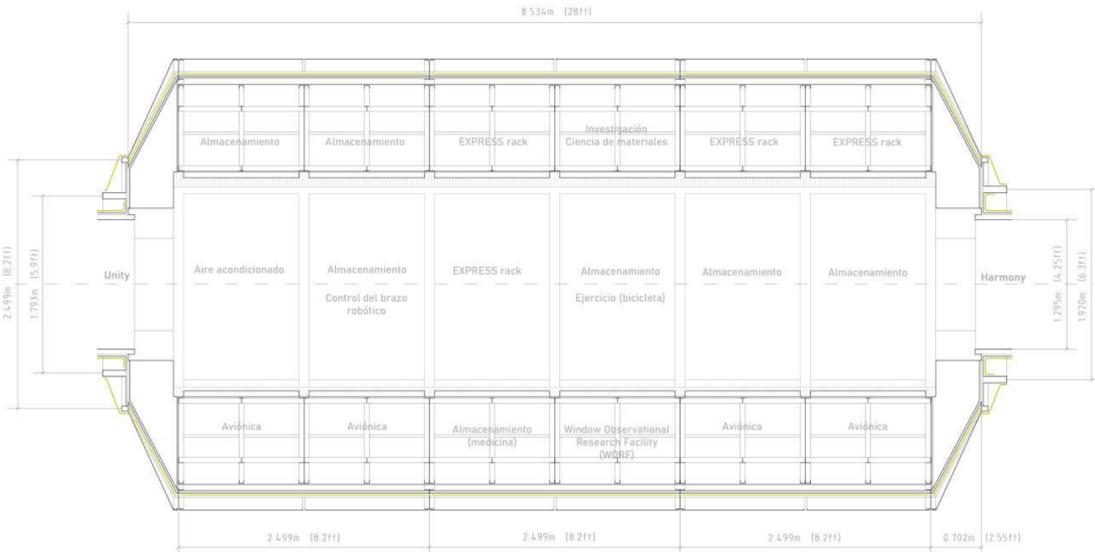
**Node 1, Unity.**  
5.5 m x Ø 4.3 m, 11895 kg, 21 años y 11 meses en órbita.



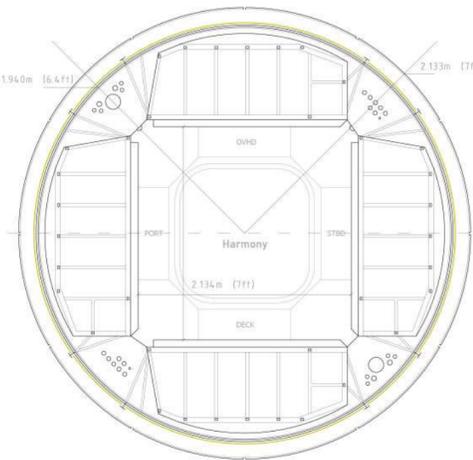
**UNITY, EL NODO-COMEDOR**  
El módulo *Unity* tiene seis puertos del tipo Common Berthing Mechanism activos (ACMB). En el puerto delantero conecta con *Destiny*, en el trasero con un PMA y la parte rusa de la estación, en nadir con el módulo *Leonardo*, en cénit con el armazón Z1, en babor con el nodo *Tranquility*, y en estribor con el *Joint Airlock* (*Quest*).

Se trata mayoritariamente de un espacio de almacenamiento que actúa como comedor de la parte americana de la estación, con una mesa entorno a la cual los tripulantes se reúnen y flotan mientras comen. Cuenta con cuatro espacios ISPR destinados al almacenamiento de suministros, principalmente comida y utensilios varios.

Siendo el más antiguo de los módulos de esta parte de la estación, está algo más deteriorado que los otros dos nodos, y su diseño es ligeramente diferente. La comida suele estar almacenada en pequeñas bolsas que se abren ejerciendo presión, lo cual hace que en ocasiones escapen pequeñas gotas de líquidos y otros restos que, con el tiempo, han manchado la cubierta blanca de los módulos ISPR, que presenta ahora una tonalidad anaranjada.



**US Lab, Destiny.**  
8.5 m x Ø4.3 m, 14515 kg, 19 años y 9 meses en órbita.



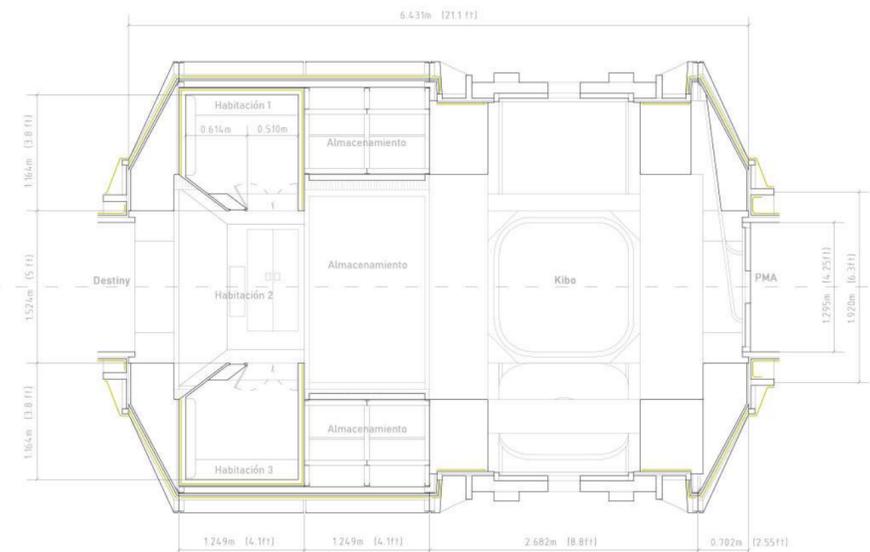
**DESTINY, EL LABORATORIO AMERICANO**

El módulo *Destiny* tiene un puerto delantero del tipo Common Berthing Mechanism activo (ACBM), y un puerto trasero Common Berthing Mechanism pasivo (PCBM). Está conectado a *Unity* en el puerto trasero y a *Harmony* en el delantero.

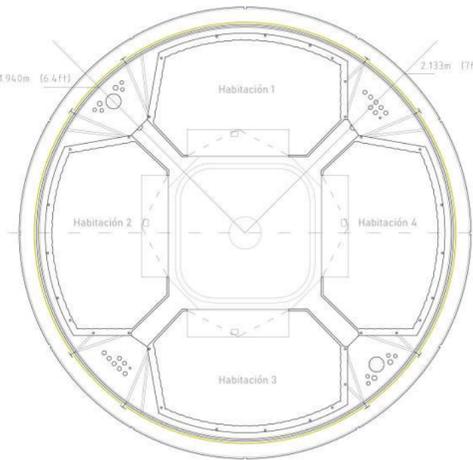
Es un espacio de investigación, almacenamiento y control de la estación. Muchos de los ordenadores que controlan los sistemas de soporte vital están aquí. Cuenta con 24 módulos ISPR, de los cuales diez están destinados a investigación científica (más información en la sección 2.1.2), ocho a almacenamiento, cuatro a aviónica y control de la estación, y dos a circulación de aire acondicionado.

En este módulo están también los controladores del brazo robótico de la estación *Cadarm2*, instalados sobre un rack de almacenamiento, junto con un simulador de control del brazo, justo enfrente. También está instalada una bicicleta para hacer ejercicio y estudiar el impacto de la microgravedad en órbita.

En la sección aparecen representados de forma abstracta los sistemas que recorren la estación a lo largo de los módulos en las esquinas que dejan libres los racks ISPR.



**Node 2, Harmony**  
6.4 m x Ø4.3 m, 14787 kg, 13 años y 2 meses en órbita.



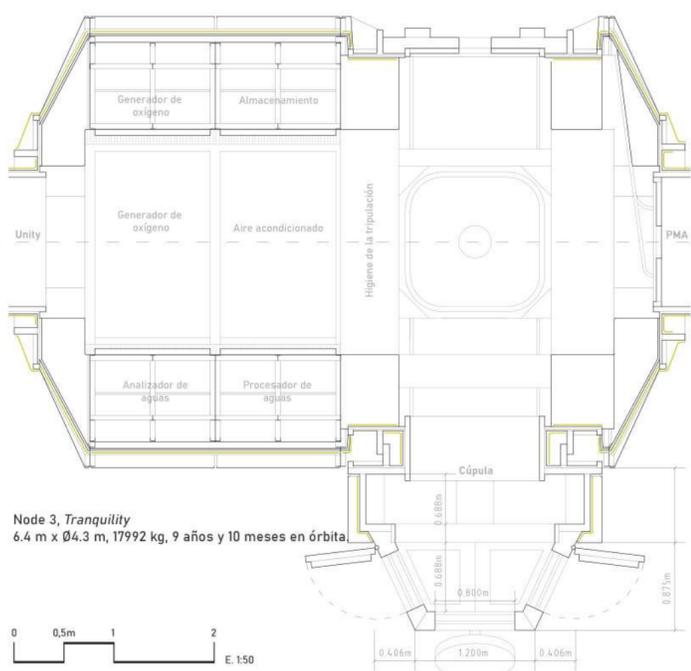
**HARMONY, EL ÁREA DE DESCANSO**

El nodo *Harmony* tiene seis puertos ACMB. En el puerto trasero conecta con *Destiny*, en el babor con *Kibo*, en el estribor con el laboratorio europeo *Columbus*, y en el delantero con un PMA en el que se acoplaban, hasta la cancelación del programa, los transbordadores espaciales, y hoy en día se usa para el acoplamiento de vehículos orbitales de empresas privadas. Los puertos nadir y cénit no están habilitados.

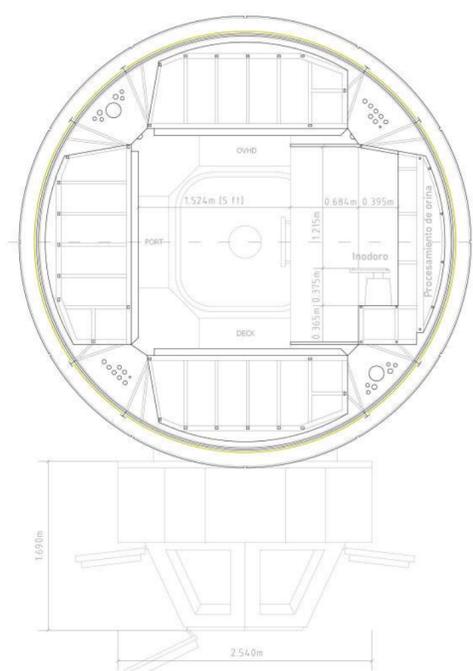
Es un espacio de transición entre la parte delantera de la estación americana, con los laboratorios europeo y japonés, y la parte trasera. Cuatro de sus ocho módulos ISPR están destinados a almacenamiento, mientras que los otros cuatro, junto al puerto trasero, albergan los *crew quarters*, las habitaciones personales de la tripulación.

Los *crew quarters* están diseñados para aprovechar al máximo el espacio disponible de los módulos ISPR, combinándolo con el espacio central mediante un pequeño vestíbulo saliente que deja siempre un espacio mínimo de 1.524 m, cinco pies. El saco de dormir se sitúa en la pared trasera, mientras que en la delantera se coloca una estación de trabajo personal.

La vertical local de los *crew quarters* suele generar desorientación en los astronautas al abandonarlas y cambiar a la vertical del módulo.



**Node 3, Tranquility**  
6.4 m x Ø4.3 m, 17992 kg, 9 años y 10 meses en órbita.



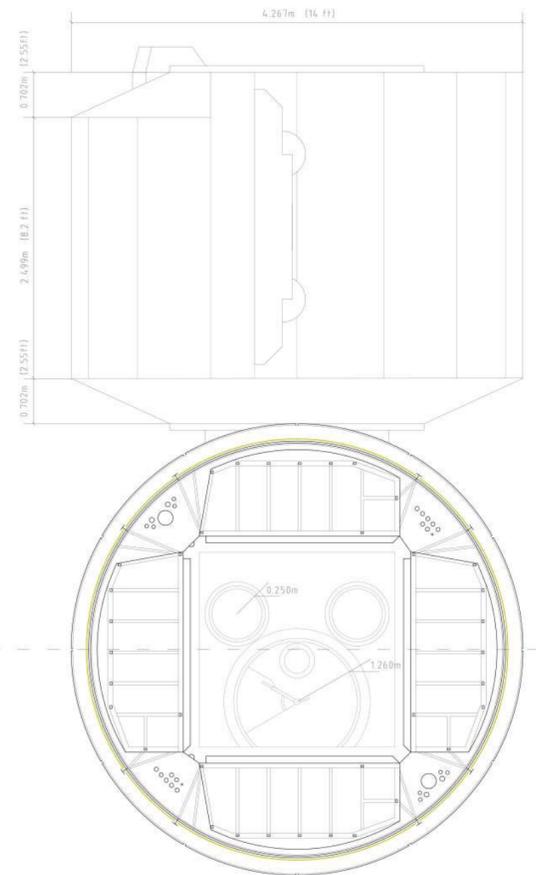
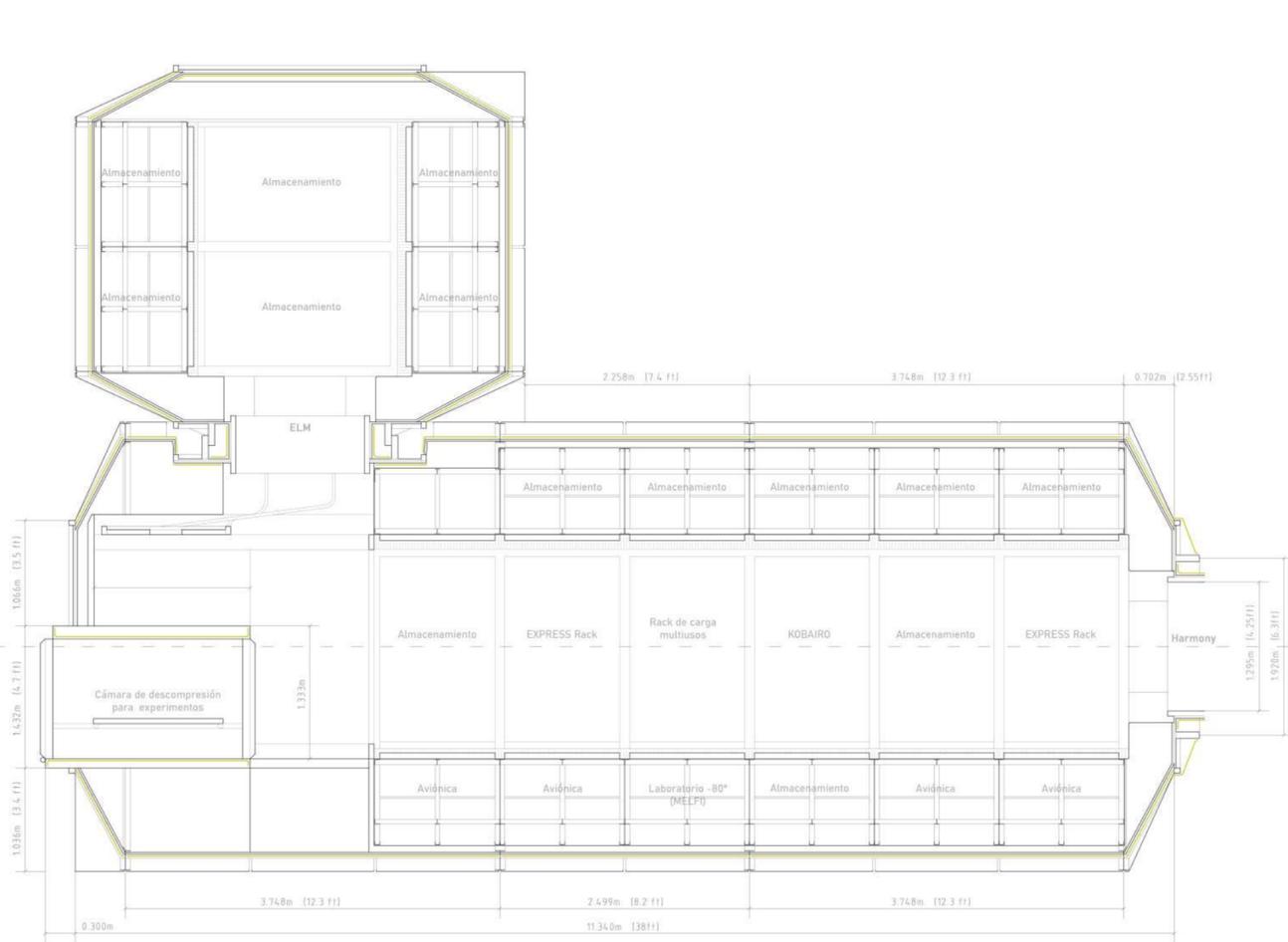
**TRANQUILITY Y LA CÚPULA EUROPEA**

*Tranquility* es el más moderno de los nodos, y tiene también seis puertos ACBM. Está conectado a *Unity* en el puerto trasero, en su puerto delantero está conectado a un PMA, y en el puerto nadir, orientada a la Tierra, está instalada la Cúpula europea de observación. El puerto estribor también está acondicionado, ya que en ocasiones se instala ahí el módulo multiusos *Leonardo*.

*Tranquility* es un espacio que recibe bastantes usos. En cuatro de sus módulos ISPR están instalados los generadores de oxígeno de la estación, los procesadores de agua y el reciclaje de líquidos. Es también un espacio de ejercicio, con una cinta de correr, y de higiene personal, con uno de los dos inodoros de la estación. Los dos módulos restantes se ocupan de la circulación de aire y del almacenamiento de material relacionado con estos usos.

En el espacio intermedio entre los módulos ISPR y los cuatro puertos radiales acoge las estaciones de higiene personal de la tripulación, pequeños estuches desplegables con espejos y otros utensilios. El espacio cuenta también con una aspiradora para limpiar cualquier residuo fruto de estas actividades.

La cúpula es el espacio predilecto de la estación. Diseñada para el estudio visual y fotográfico de la superficie terrestre, se ha convertido en un lugar de relajación en el que los astronautas pasan la mayor parte de su tiempo libre en órbita. Además de quedar en una posición bastante aislada del ruido de los sistemas de la estación, sus siete ventanas, la inferior de ellas con un diámetro de 80 cm, proporcionan unas vistas inigualables hacia nuestro planeta. También es un espacio de trabajo, desde el que los miembros de la tripulación pueden guiar a sus compañeros durante las EVAs.



**Japanese Experimental Module (JEM), Kibo**  
11.34 m x Ø4.3 m, 15900 kg, 12 años y 6 meses en órbita.  
**Experimental logistic module (ELM)**  
3.9 m x Ø4.4 m, 4287 kg, 12 años y 7 meses en órbita.

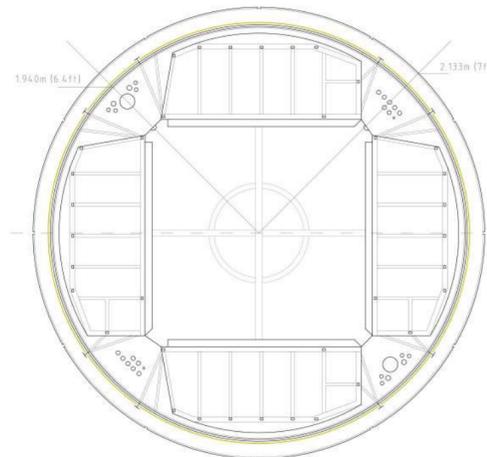
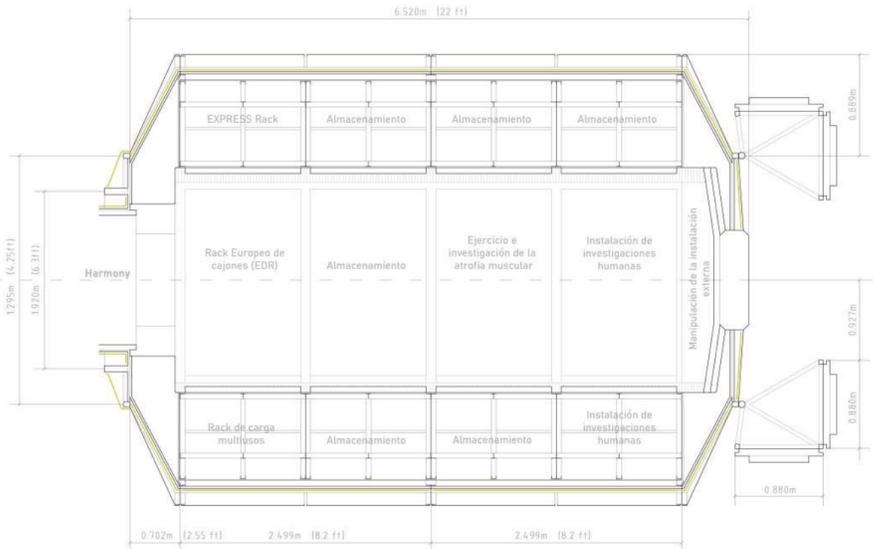
### KIBO, EL LABORATORIO JAPONÉS

Kibo cuenta con un puerto ACBM y un puerto PCBM, este último conectado al nodo *Harmony* en su puerto de babor. El pequeño módulo ELM es parte del laboratorio japonés, y está conectado al puerto ACBM en la parte superior de Kibo.

Al igual que los otros dos laboratorios de la estación americana, Kibo es un espacio de investigación, con varios módulos ISPR destinados a albergar experimentos de diversos campos. De sus 23 módulos ISPR, 8 están destinados a este propósito (sección 2.1.2), mientras que los demás quedan mayoritariamente para almacenamiento de cargas (diez módulos) y para aviónica (cuatro módulos). El último de los módulos ISPR disponibles tiene instalado el control del brazo robótico japonés, que opera la instalación expuesta JEM-EF. Por último, el laboratorio japonés cuenta con una pequeña cámara de descompresión, que permite el intercambio ágil de cargas entre la instalación expuesta y el interior de módulo, sin necesidad de llevar a cabo una EVA. Sobre esta cámara se encuentran dos pequeñas ventanas de medio metro de diámetro desde las que se pueden observar los experimentos en el exterior.

En el puerto cénit de Kibo se encuentra el módulo logístico, ELM. Este módulo expande la capacidad de almacenamiento del laboratorio japonés, y aunque está destinado mayoritariamente a esta función, se trata además de uno de los espacios más agradables para la estancia, tanto por contar con un espacio intermedio ligeramente mayor como por situarse en la parte más silenciosa de la estación.

El módulo Kibo tiene la reputación de ser el más limpio y ordenado, y por tanto espacioso, de la estación. Gracias a esto ha adquirido también una nueva función secundaria como lugar de 'comunicación' y divulgación científica. La mayoría de eventos en la EEI se retransmiten desde Kibo.

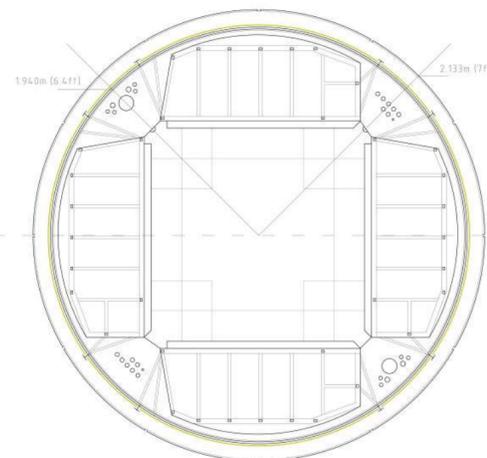
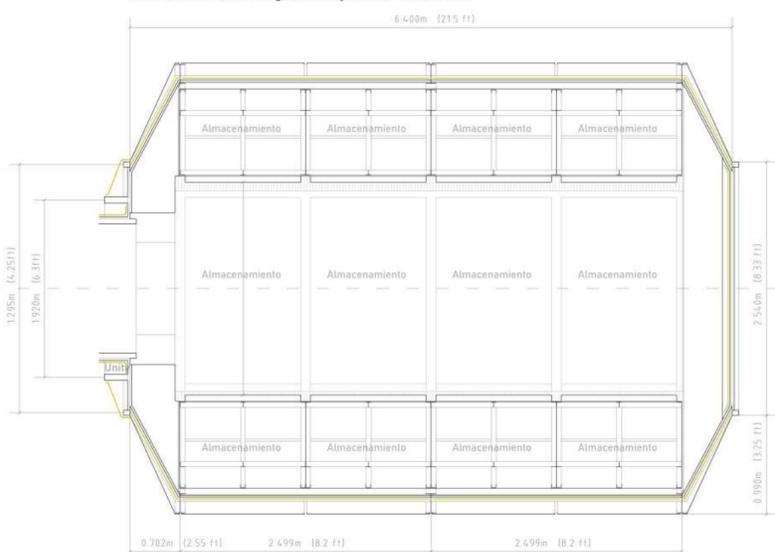


### COLUMBUS, EL LABORATORIO EUROPEO

El laboratorio europeo *Columbus* cuenta con un único puerto PCBM, mediante el que está conectado al nodo 2, *Harmony*. Es un módulo de investigación, especialmente en biología y fisiología humana y en el efecto de la microgravedad en el cuerpo humano. Cuenta con 16 módulos ISPR, con diez de ellos destinados a la investigación científica (sección 2.1.2) y el resto de ellos al almacenamiento de cargas. Al igual que Kibo, cuenta con una instalación expuesta, más pequeña y operable desde el interior presurizado del módulo.

*Columbus* es, además de un lugar de investigación, un espacio de trabajo y de ejercicio, con la instalación de investigación de la atrofia muscular y su cinta de correr.

**Columbus**  
6.5 m x Ø4.3 m, 10300 kg, 12 años y 10 meses en órbita.



### LEONARDO, EL MÓDULO MULTIUSOS

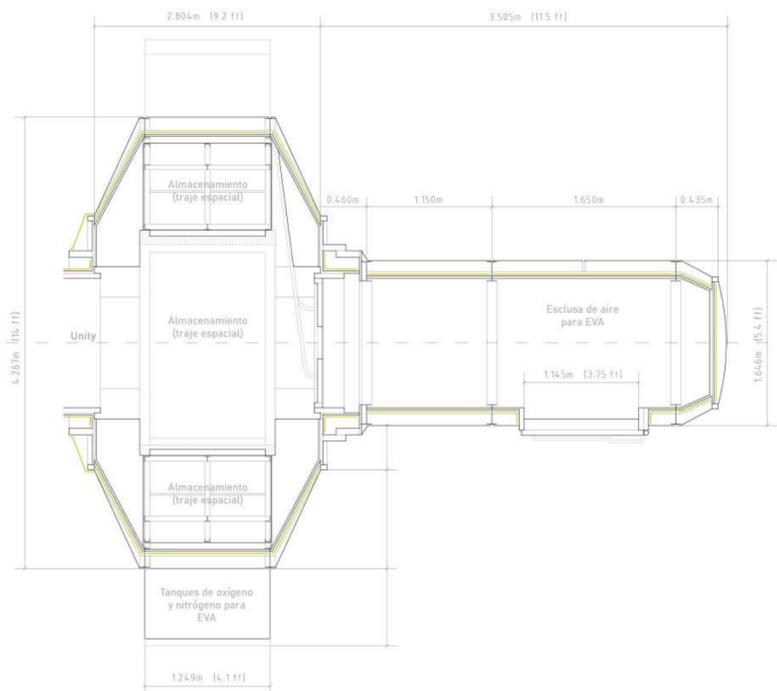
El PMM es el último módulo al uso que se añadió a la EEI antes de alcanzar la fase *Assembly Complete*. Pero a pesar de ello, no es el más reciente. De hecho, *Leonardo* forma parte de una serie de módulos multiusos utilizados durante el ensamblaje de la estación para trasladar carga y módulos ISPR a la estación. Los racks ISPR son demasiado grandes para pasar a través de los puertos de acoplamiento APAS usados por los vehículos orbitales, así que los nuevos racks se enviaban a la estación a bordo de los módulos multiusos, que ascendían a la órbita terrestre en el compartimento de carga de los transbordadores espaciales. Una vez en órbita, los módulos multiusos se acoplaban brevemente a cualquiera de los puertos CBM de la estación, por los que sí podían pasar los racks.

*Leonardo* participó en varias misiones antes de pasar a formar parte de la estación de forma definitiva en febrero de 2011. Hoy en día, la función de envío de nuevos ISPR a la estación se ha trasladado a los vehículos orbitales de la clase HTV (ver sección 3.2.3), quedando el módulo *Leonardo* como espacio permanente de almacenamiento. Su único puerto PCBM le permite acoplarse en una posición variable según las necesidades de la estación, aunque por lo general se sitúa en el puerto nadir del nodo *Unity*.

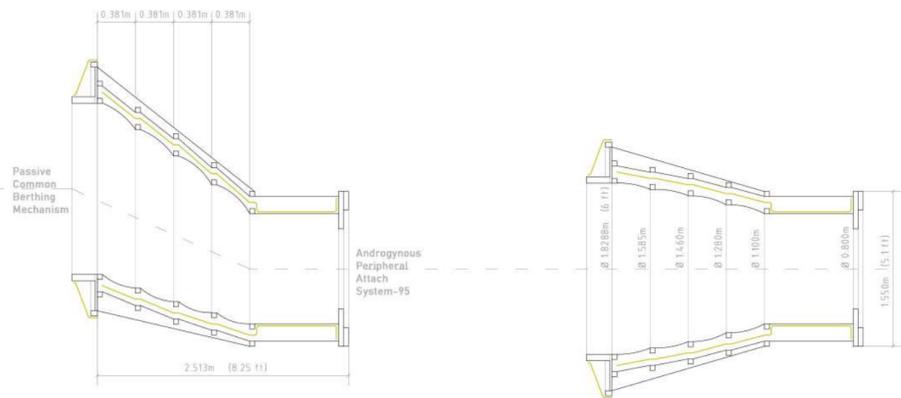
**Permanent Multipurpose Module (PMM) Leonardo**  
6.4 m x Ø4.3 m, 4428 kg.



*Joint Airlock Module, Quest*  
6.3 m x 4.3 m, 9923 kg, 19 años y 5 meses en órbita.



Adaptador de acoplamiento presurizado (PMA)



### QUEST, LA ESCUSA PARA EVAs

El módulo *Quest* cuenta con un único puerto PCBM pasivo, y con una escotilla para llevar a cabo actividades extravehiculares. Cuenta con dos partes diferenciadas.

El Equipment lock, o área de equipamiento, tiene el diámetro del resto de la estación y una modulación con cuatro ISPR, en los cuales se albergan los trajes espaciales. El espacio central presenta una estructura en la que se montan los trajes, de forma que los astronautas sólo tienen que deslizarse al interior y colocarse el casco, y la parte baja, a lo que les ayuda otro miembro de la tripulación.

El Crew lock, o área de la tripulación, es la escusa de aire en sí. Este espacio puede independizarse del resto del volumen presurizado de la estación, y es donde se localiza la escotilla por la que se sale al exterior. El diámetro de este espacio es algo menor.

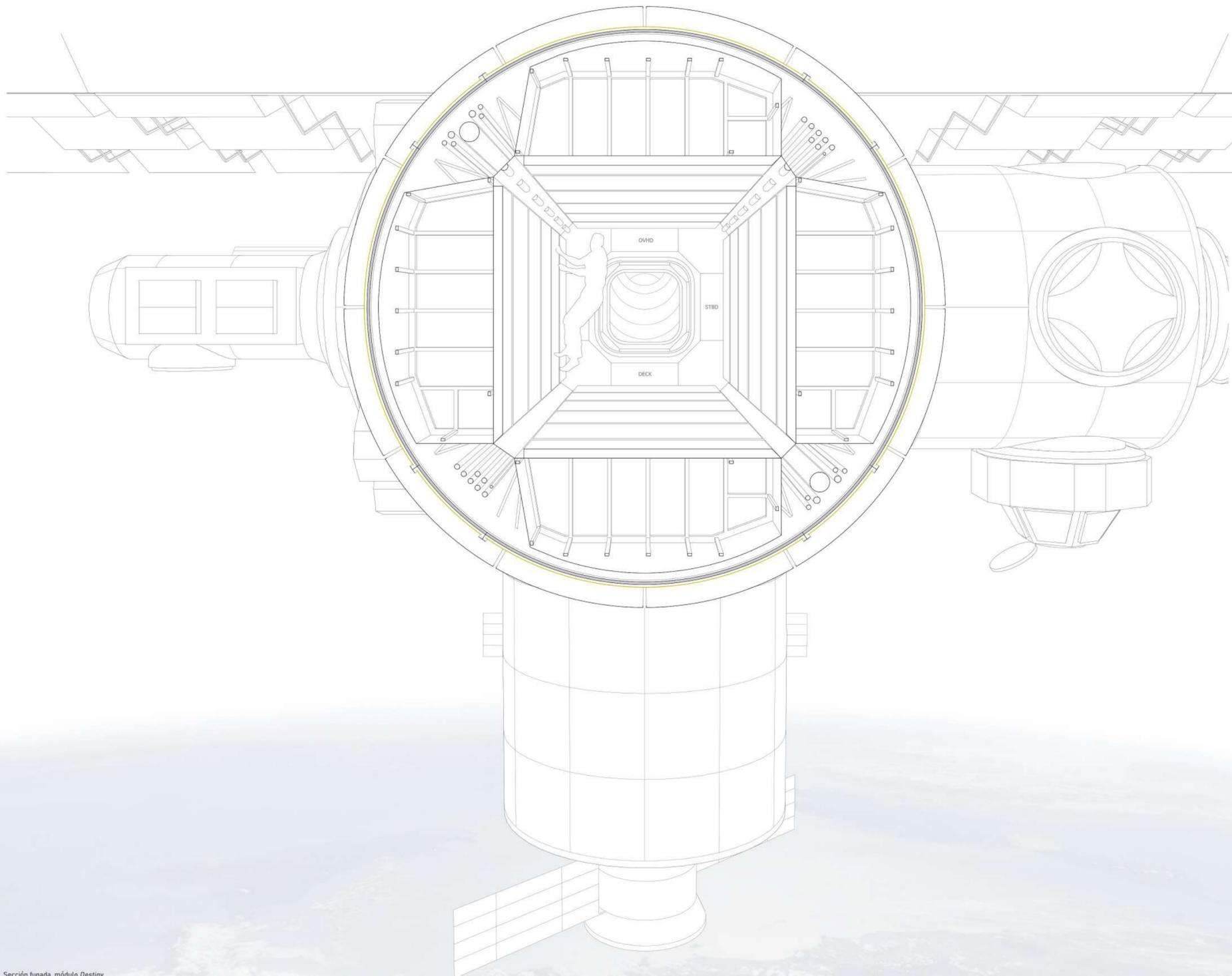
Junto con estos dos volúmenes de diámetros diferenciados, el módulo *Quest* presenta una serie de pequeños compartimentos radiales, en los que se localizan los tanques de oxígeno y nitrógeno desde los que se recarga la atmósfera artificial de los trajes presurizados, que actúan como pequeñas naves individuales.

### ADAPTADORES DE ACOPLAMIENTO PRESURIZADO (PMA)

Estos pequeños componentes juegan un papel fundamental en la EEI. Se encargan de actuar de mediadores entre los puertos de acoplamiento APAS-95, que son los que utilizan los vehículos orbitales, y los puertos CBM, que son los que utilizan los módulos de la estación.

En la actualidad, la estación cuenta con tres de estos PMA, siendo quizá el más importante, y el más antiguo, el que conecta la parte americana de la estación con la parte rusa. Este PMA fue el que utilizó el módulo *Unity* para acoplarse a *Zarya* en 1998, y ha estado cumpliendo esa función desde entonces. Los otros dos PMA se localizan en la parte frontal del módulo *Harmony*, donde se acoplaba el transbordador espacial y donde se acoplan ahora los vehículos orbitales de empresas privadas, y en el puerto delantero de *Tranquility*.

En 2016 y 2019, estos dos últimos PMA fueron actualizados al nuevo sistema de acoplamiento internacional. Para ello, se les añadió un pequeño adaptador de conversión del puerto APAS-95 a IDA.



Sección fugada, módulo *Destiny*  
E. 1:25

# HABITAR EN LA ÓRBITA TERRESTRE BAJA

Un estudio desde la óptica de la arquitectura

Fondo: Interior del módulo *Destiny*, con el astronauta Steve Swanson en primer plano (Imagen 11).

## BLOQUE II: ANÁLISIS DEL DISEÑO

Hoy en día, la práctica profesional de la arquitectura está experimentando, cada vez con mayor intensidad, un proceso de especialización que presenta ciertos paralelismos, en mi opinión muy interesantes, con la investigación científica. Conforme la complejidad de los edificios aumenta, es cada vez más común dedicarse a un aspecto concreto de la edificación (por ejemplo: escaleras, instalaciones, estructura, proyecto...) y abordar la práctica a través de la creación de equipos de varios profesionales, muy conocedores cada uno de las peculiaridades de su ámbito particular. Esta aproximación tiene algunas ventajas, pero también muchos inconvenientes, siendo quizá el principal la pérdida de la visión unificada del proyecto de edificación por parte de los diversos profesionales implicados. Si no se ejecuta con cuidado, esto puede ocasionar problemas a la hora de interconectar los diferentes sistemas para que un edificio funcione de forma unificada, lo que se traduce en inconvenientes para el usuario. Quizá los estudiantes de la magnífica facultad de arquitectura de López Cotelo seamos especialmente conscientes de este problema cuando nos toca encender las luces de un aula de taller.

En el siglo XVIII ocurrió algo muy parecido con la investigación científica. La creciente complejidad del saber y el método científico dieron como resultado las distintas disciplinas que hoy en día configuran el conocimiento académico, con sus límites más o menos definidos. Esta especialización ha tenido un valor incalculable a la hora de hacer avanzar nuestro conocimiento de la realidad, pero en las últimas décadas se ha criticado el hecho de que estos límites estrictos pueden ocasionar problemas a la hora de entender sistemas tan complejos como son las sociedades, las estructuras biológicas o el propio universo.

La interdisciplinariedad apareció, como concepto y como movimiento rupturista con las doctrinas establecidas, en 1972<sup>[41]</sup> y es fundamental para entender la visión que se trata de reflejar en este trabajo. Recordemos, una vez más, los dos factores a los que se hacía mención en el estado de la cuestión (sección 0.2.1). El segundo era, precisamente, esa interdisciplinariedad que surgía de la unión de las distintas visiones entorno a un problema común (y complejo) como era la habitabilidad en el espacio. La arquitectura espacial nace de esta interdisciplinariedad, y cualquier intento de estudiar la habitabilidad en la OTB desde esta óptica debe llevar a cabo un esfuerzo unificador, principalmente, entre arquitectura e ingeniería aeroespacial.

Las dos secciones que siguen son mi intento de llevar a cabo esta unificación, para responder al objetivo específico OE2 de este trabajo: llevar a cabo un análisis de los criterios y consideraciones que se han tenido en cuenta a la hora de diseñar la estación, así como la elaboración de un repertorio de situaciones análogas en la arquitectura terrestre para valorar tanto sus logros como sus carencias. En este punto pasamos de la visión sectorizada del bloque I a formarnos una visión unitaria de la EEI, que analizaremos desde la interdisciplinariedad. El proceso y las conclusiones que extraigamos de él sentarán las bases para presentar una propuesta en el bloque III.

## SECCIÓN 3. CRITERIOS Y CONSIDERACIONES DE DISEÑO EN LA ESTACIÓN ESPACIAL INTERNACIONAL

### 3.1 CRITERIOS DE DISEÑO

El proceso de diseño de la EEI fue, desde sus primeras fases, un proceso multidisciplinar y muy descentralizado, llevado a cabo a petición de un organismo gubernamental, la NASA, por parte de diversos contratistas de la industria aeroespacial, tanto a nivel nacional en EEUU como a nivel internacional<sup>[42]</sup>. Por esta razón, es difícil establecer unos criterios comunes más allá del que se convertiría en el principal motor de las modificaciones en el proyecto a partir de 1983, cuando los contratistas respondieron a la NASA con sus propuestas: su coste.

El limitado presupuesto de la agencia convierte el coste de diseño, construcción y lanzamiento en el factor más importante para su diseño (hecho reflejado una y otra vez a lo largo de la misión en diversos módulos especializados que nunca llegaron a ponerse en órbita). Pueden extraerse otra serie de criterios, quizá menos relevantes a nivel estrictamente político, pero muchísimo más interesantes de cara al análisis arquitectónico.

Para entender estos criterios, hay que examinar brevemente la situación en que quedó la carrera espacial tras el éxito del *Apolo 11*:

«[...] Nuestros horizontes y nuestras competencias se han expandido hasta el punto de que podemos considerar bases tripuladas en la órbita de la Tierra, en la órbita de la Luna o en la superficie de la Luna, misiones a Marte o sistemas de transporte espacial que puedan poner cargas en órbita para después volver y aterrizar como los aviones comerciales convencionales»<sup>[43]</sup>.

Aunque la visión científica de aquella época en cuanto a la exploración espacial era ambiciosa, en el panorama político la situación era diferente. El alunizaje supuso la culminación de un esfuerzo titánico, tanto a nivel científico como industrial y presupuestario, que exprimió a los EEUU durante toda una década. Finalmente, con una victoria propagandística bajo el brazo, esto supuso que cualquier objetivo posterior del programa espacial estadounidense tendría que centrarse en reducir los costes de lanzamiento y facilitar así el acceso a la OTB. Un sistema de lanzamiento reutilizable capaz de operar, como afirma el informe citado, de forma similar a los aviones comerciales, se consideraba un paso fundamental en la 'conquista' del espacio, uno que permitiría alcanzar objetivos más ambiciosos de cara al futuro, al mismo tiempo que prometía una jugosa reducción de costes. Por esta razón, el programa del transbordador espacial, en fase conceptual ya en 1968, se convirtió en la prioridad de la NASA, y acabó por marcar el *tempo* de todos los demás proyectos de la agencia durante los siguientes treinta años, incluida la estación espacial *Freedom*, el embrión de la EEI.

Cuando la NASA, a principios ya de los 80, financió a sus contratistas para el desarrollo de una estación espacial viable, el transbordador ya estaba operativo. Las compañías renunciaron a los diseños que habían estado en fase conceptual desde hacía al menos 20 años, algunas de ellas basadas en las propuestas de gravedad artificial mediante hábitats rotatorios que pueden trazarse hasta Von Braun<sup>[44]</sup> en favor de uno nuevo que se adaptara a las capacidades del transbordador y a su prometida reducción de costes. Era evidente que, para que esto fuera posible, habría que lanzar la estación en partes y ensamblarla en órbita.

Fue entonces cuando apareció la siguiente serie de criterios, que marcarían el resto del proceso y que darían como resultado la EEI que conocemos hoy en día: modularidad, reconfigurabilidad, simplicidad, facilidad de mantenimiento y habitabilidad.

#### Modularidad



La principal conclusión de todas las partes implicadas en el proceso fue que, para facilitar el ensamblaje en órbita y el transporte, la estación debía estar compuesta por una serie de módulos estandarizados ajustados a las medidas del compartimento de carga del transbordador espacial. Esto debía aplicarse tanto a la forma de los hábitats presurizados como a la estructura de armazón que acompañaba el diseño y a la configuración interior.

#### Reconfigurabilidad



El objetivo de la EEI, en aquellas primeras fases conocida aún como *Freedom*, era superar a la estación *Mir* en todos los aspectos. Eso suponía que debía permanecer en órbita de forma permanente y adaptarse a los cambios que pudieran surgir a lo largo del tiempo. Esta capacidad de ser reconfigurable, en lugar de estática, jugó un papel fundamental en el diseño de los módulos, que debían tener la capacidad de, una vez ensamblados y presurizados, volver a sellarse herméticamente para poder ser colocados en otro lugar según las necesidades.

#### Simplicidad



Si algo aprendió la NASA del programa del transbordador espacial es que cuanto más complejo es un sistema, más posibilidades hay de fallos catastróficos. El transbordador nunca llegó a superar este problema, y en consecuencia, no llegó a alcanzar las ambiciones originales de convertir el acceso a la OTB en un trámite rutinario. La EEI, sin embargo, aprendería de la experiencia del proceso de desarrollo del transbordador, y priorizaría la simplicidad en el diseño de los hábitats presurizados.

#### Facilidad de mantenimiento



La experiencia de *Skylab* también jugó un papel fundamental en el diseño de la EEI, no sólo en cuanto a habitabilidad, como veremos en la sección 3.3. Una estación de larga duración está sometida a todo tipo de problemas tanto en el interior de los módulos presurizados como en el exterior, problemas que deben ser resueltos in-situ por la tripulación. Los sistemas de la estación, especialmente los de soporte vital, deben ser por tanto fácilmente accesibles y fácilmente reparables con los medios y los suministros que pueden enviarse a bordo de los vehículos orbitales.

#### Habitabilidad



Este criterio fue el último en incorporarse al proceso de diseño, a raíz de las sugerencias de los astronautas y la creciente interdisciplinariedad del proceso. La división Man-Systems, creada por la NASA en 1983, fue la encargada de tratar el aspecto de la habitabilidad de los módulos, factor que hasta el momento había quedado relegado a un segundo plano. Esta división se encargó de la componente arquitectónica del diseño, con el objetivo de «mejorar la productividad humana y reducir la necesidad de cambios posteriores»<sup>[42]</sup>. Man-Systems abordó este trabajo mediante la creación de tres subdivisiones para satisfacer requerimientos particulares del proceso:

- *Space Station Habitability Requirements*, encargada de documentar las consideraciones en cuanto al entorno habitable en base a las experiencias previas, críticas y sugerencias de los astronautas, para materializarlas en soluciones concretas.<sup>[45]</sup>

- *Man-Systems Architectural Control*, encargada de la arquitectura y de la integración de los sistemas y subsistemas necesarios.

- *Man-System Integration Standard*, encargada de aportar soluciones de diseño en base a factores humanos.

Conocidos estos cinco criterios (seis si incluimos el coste) podemos iniciar el estudio de las consideraciones de diseño, y evaluar las soluciones que configuraron la EEI. Los iconos correspondientes a cada criterio se utilizarán en las integraciones volumétricas del anexo 4 para indicar los que han tenido una influencia remarcable para cada consideración.

### 3.2 CONSIDERACIONES DE SUPERVIVENCIA

El espacio tiene la irrisoria tendencia de acabar con las vidas de quienes lo visitan sin la protección adecuada, así que es lógico que la principal prioridad de la NASA y demás agencias espaciales esté en estos sistemas de protección que, al final del día, son los que mantienen a sus tripulaciones con vida. Este apartado puede resultar un tanto técnico, pero hay que recordar una vez más que la visión arquitectónica no puede, por sí misma, dar solución a todos los problemas de este ámbito extremo, y es quizá en el soporte vital y en los subsistemas que mantienen viva a la estación donde más se inclina la balanza del lado de la ingeniería aeroespacial, reduciendo el habitar a una lista de requerimientos biológicos que satisfacer. No obstante, es interesante, y no puede perderse de vista, analizar cómo interactúan estos sistemas con el espacio y la configuración arquitectónica de la EEI.

Podríamos entender estas primeras consideraciones como una respuesta a las problemáticas ambientales expuestas en el anexo 2, y de la misma forma que no todas estas problemáticas son igualmente letales, existe una jerarquía dentro de las consideraciones a la hora de diseñar una estación orbital viable, que se presenta a continuación.

<sup>[42]</sup> Kitmacher, Gary H. (2002). *Design of the Space Station Habitable Modules*. Parte de la conferencia: *The Architecture of Space: A Multi-Disciplined Approach*, 53rd International Astronautical Congress, Houston.

<sup>[43]</sup> NASA (1969). *America's next decades in space: A report for the Space Task Group*. Memorandum. NTRS.

<sup>[44]</sup> Harland, David M. & Catchpole, John E. (2002). *Creating the International Space Station*. Springer, Berlín.

<sup>[45]</sup> Lyndon B. Johnson Space Center (1974). *Skylab bulletin No. 1-27*. NTRS, NASA.

### 3.2.1 CONTROL AMBIENTAL

El control ambiental es el aspecto más importante de la supervivencia en el espacio. El ser humano ha evolucionado en la Tierra, con unos parámetros relativamente estables a lo largo del tiempo. Por desgracia, esos parámetros no son la norma en el universo, y dado que nuestra capacidad biológica para habitar un entorno está estrictamente ligada a ellos, nuestro 'espacio habitable' queda reducido únicamente a la superficie sólida de nuestra planeta, y ni siquiera en toda su extensión.

Por suerte, la tecnología nos ayuda a ampliar este espacio habitable. Esa es, de hecho, la función de los hábitats orbitales, y el control ambiental es el mecanismo por el cual imitamos, en volúmenes cerrados de diversa extensión, las condiciones de nuestro hábitat natural. En la EEI, son dos los sistemas que llevan a cabo esta tarea: el sistema de control ambiental y soporte vital (ECLSS) y el sistema de control térmico (TCS)<sup>[46]</sup>. Ambos sistemas funcionan en conjunto, (Figura 3.01) para monitorizar y regular los parámetros que definen los tres pilares de la supervivencia: la atmósfera, la temperatura, y la humedad.

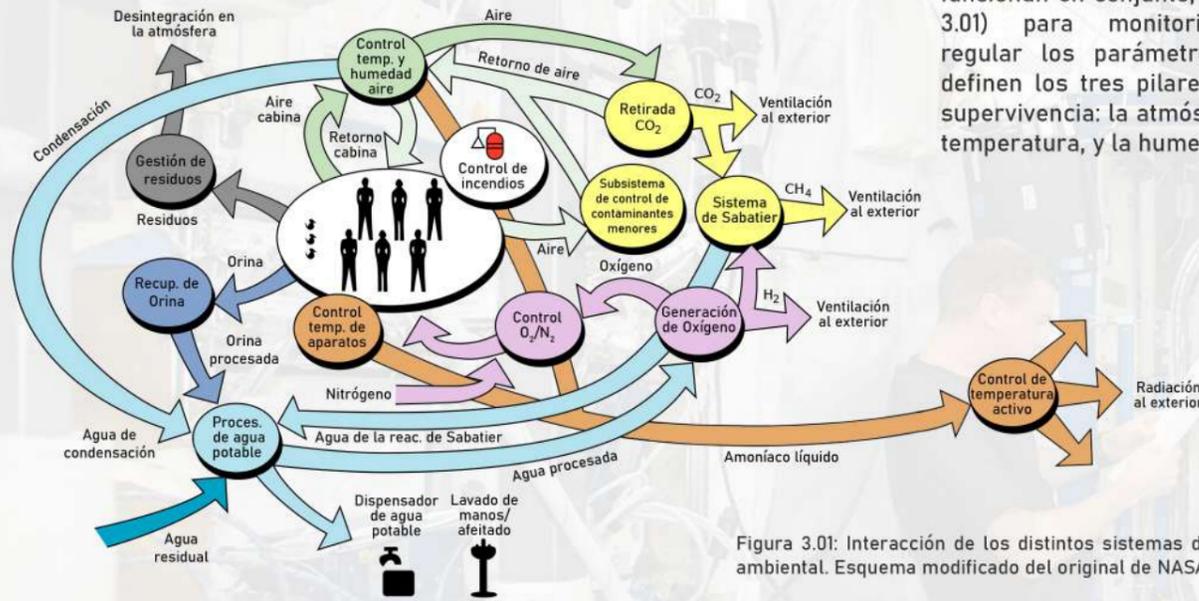


Figura 3.01: Interacción de los distintos sistemas de control ambiental. Esquema modificado del original de NASA.<sup>[53]</sup>

#### Atmósfera

El ser humano puede resistir condiciones atmosféricas bastante extremas, y la cuestión del límite de la supervivencia está relacionada tanto con la presión atmosférica como con la composición química de la propia atmósfera. En cuanto al límite superior, para composiciones similares a la de la Tierra [78.08% de nitrógeno molecular (N<sub>2</sub>) y 20.95% de oxígeno molecular (O<sub>2</sub>) en volumen]<sup>[47]</sup> la toxicidad del O<sub>2</sub> empieza a ser un problema a las 3-4 atmósferas de presión, pero con la composición adecuada, tanto este problema como la narcosis de N<sub>2</sub> pueden evitarse, y superados estos problemas, no está del todo claro cuál es la presión máxima que puede soportar el cuerpo humano. Probablemente el límite lo imponga la propia actividad de la respiración<sup>[48]</sup>. El límite inferior queda bastante más definido: el vacío casi total de la OTB es letal a partir de unos 90 segundos.

Además de ser un factor vital para la supervivencia, la composición de la atmósfera tiene un efecto también en el rendimiento de las personas. El estudio de Vadas et al.<sup>[49]</sup> Ha relacionado los ambientes ricos en O<sub>2</sub> con una mayor actividad cerebral y capacidad para llevar a cabo múltiples tareas. Asimismo, niveles bajos de O<sub>2</sub> están asociados con un menor rendimiento e incapacidad para llevar a cabo tareas complejas<sup>[50]</sup>.

Una estación orbital, o cualquier otro tipo de hábitat presurizado, debe ser capaz de controlar al mismo tiempo la presión y la composición atmosférica para llevarlas a niveles similares a las de la superficie de la Tierra, o a niveles determinados en función de los requerimientos de la situación. Además, su estructura debe soportar, sin brechas, una diferencia de presión de al menos 101.325 kPa (1 atm), una tarea, por suerte, no demasiado exigente para los materiales actuales.

En la EEI, el primer encargado del control atmosférico es un subsistema del ECLSS, el denominado sistema de generación de O<sub>2</sub> (OGS). Este subsistema está compuesto por cuatro oxigenadores, uno americano y tres *Elektron* rusos, que generan oxígeno a partir del agua mediante un proceso denominado electrólisis<sup>[51]</sup>, por el cual parejas de moléculas de agua (H<sub>2</sub>O) se separan en sus componentes (2H<sub>2</sub> + O<sub>2</sub>). El O<sub>2</sub> resultante se va liberando a los módulos conforme los tripulantes lo van consumiendo, mientras que el H<sub>2</sub> se almacena para otros usos. Como el resto de subsistemas del ECLSS, los generadores de oxígeno están pensados para operar con una tripulación de seis personas, y pueden operar de forma continua o cíclica. El OGS americano genera 3-9 kg de O<sub>2</sub> al día en el primer caso, y unos 5.5 kg en el segundo.

El segundo aspecto fundamental del control atmosférico es la retirada del dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). La instalación de reducción de carbono (CRCA), otro de los subsistemas del ECLSS, filtra el CO<sub>2</sub> de la atmósfera y lo transforma en agua (H<sub>2</sub>O) y metano (CH<sub>4</sub>) mediante la reacción de Sabatier<sup>[52]</sup>, para lo cual utiliza el hidrógeno almacenado de los oxigenadores. Esta instalación actúa también, por tanto, como un complemento a los recuperadores de agua.

#### Temperatura

De nuevo, el rango de temperaturas que puede soportar el cuerpo humano es sorprendentemente amplio, en especial durante breves periodos de tiempo. Para habitabilidad a largo plazo y sin protección, los valores son algo más restrictivos. Una persona podría vivir indefinidamente en entornos entre los 4 y los 35°C. Con la protección adecuada, aclimatación y valorando el tiempo de exposición, ese rango aumenta de los -40°C a los 50°C. La temperatura ambiente óptima para el cuerpo humano, o zona de confort térmico, varía entre los 18°C y los 27°C, dependiendo de la actividad que se esté realizando<sup>[53]</sup>.

En la EEI, el sistema de control térmico (TCS) controla la temperatura en los módulos presurizados de la estación y la refrigeración del equipamiento electrónico. Actúa de forma similar al sistema cardiovascular humano, transportando el calor en lugar de nutrientes y utilizando para ello amoníaco en lugar de sangre. El TCS está dividido en dos subsistemas, el control térmico pasivo (PTCS) y el control térmico activo (ATCS).

En la atmósfera de la Tierra, el calor se transmite predominantemente por radiación y convección a través de un medio material, que es el propio aire. Por el contrario, en el vacío casi absoluto de la OTB baja, el único medio de transmisión es la radiación, por lo que para lidiar con el calor extremo durante las horas de insolación directa, o para evitar que las temperaturas confortables escapen al frío vacío espacial durante la 'noche', los módulos utilizan un tipo de aislante especialmente diseñado para combatir este tipo de transmisión del calor. El aislante multicapa o MLI (Figura 3.02) es por tanto el primer componente del sistema de control térmico pasivo.

El MLI consiste en un delgado panel sándwich con dos láminas de poliéster aluminizado Mylar rigidizadas con un polímero llamado Kapton, envolviendo varias capas de tela aislante de poliéster tipo Dacron. Su espesor varía entre 3.2 y 6.4 mm, y como terminación se le añade una lámina exterior de aluminio con acabado en pintura blanca en las zonas que buscan reflejar la radiación para refrigerar, y negra donde el objetivo es absorber la radiación. Esta lámina exterior actúa también de protección contra impacto de micrometeoritos, apoyada por una capa inferior de kevlar.<sup>[54]</sup> Bajo el MLI circulan las tuberías pasivas, el segundo componente del PTCS. A diferencia de las del ATCS, estas tuberías no requieren de una bomba para funcionar, aunque utilizan igualmente amoníaco líquido.

La decisión de usar amoníaco como refrigerante se tomó en base a su gran capacidad de transmisión térmica, su baja temperatura de fusión (-78°C), su reducida viscosidad, y su baja densidad (que permite poner grandes cantidades en órbita a bajo coste). Como contrapartida, el amoníaco tiene el inconveniente de ser tóxico para los seres humanos, por lo cual los protocolos de seguridad entorno a posibles fugas son muy estrictos<sup>[55]</sup>.

El sistema de control térmico activo entra en funcionamiento cuando las cargas térmicas superan la capacidad del sistema pasivo. Está compuesto por varios circuitos cerrados de tuberías de amoníaco, que lidian con el exceso de calor de una forma más contundente: lo transportan mediante bombas a una serie de paneles radiadores en el exterior de la estación, en los que la gran superficie radiante actúa como un intercambiador de calor. La estación cuenta con diez grupos de paneles radiadores, cuatro de ellos montados en los armazones P3/4, S3/4, P6 y S6, actuando como refrigeración para los sistemas eléctricos de las instalaciones solares. Los seis restantes están montados en grupos de tres en P1 y S1, y refrigeran los módulos y el resto de sistemas de la estación.

<sup>[53]</sup> En [Allen, Christopher et al. (2014). *Human Integration Design Handbook* (rev. 1), p. 355-364. NASA.] se discuten los factores que relacionan la temperatura ambiente y el rendimiento en diversas actividades (sueño, trabajo, ejercicio). Puesto que los valores metabólicos varían para cada tripulante y según la intensidad de la actividad, se llega a la conclusión de que la temperatura debe regularse, dentro del rango de confort, por parte de los propios tripulantes y siguiendo recomendaciones de control de misión.

<sup>[54]</sup> NASA Science - Staying cool on the ISS. [https://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2001/ast21mar\\_1](https://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2001/ast21mar_1). NASA.

<sup>[55]</sup> Dempsey, Robert (2017). *The International Space Station: Operating an Outpost in the New Frontier*. NASA SP series, Johnson Space Center.

<sup>[46]</sup> *International Space Station: Environmental Control and Life Support System*. Marshall Space Center, NASA. Huntsville, 2008.

<sup>[47]</sup> Wallace, J. M. & Hobbs, P. V. (2006). *Atmospheric science: an introductory survey* (2ª ed). Academic Press.

<sup>[48]</sup> Parker, J. F. & West, V. R. (1973). *Bioastronautics data book* (2. ed). NASA, Washington D.C.

<sup>[49]</sup> Vadas, D. Et al. (2017). *Hyperbaric Oxygen Environment Can Enhance Brain Activity and Multitasking Performance*. *Frontiers in integrative neuroscience*, Vol. 11. Frontiers Research Foundation, Suiza.

<sup>[50]</sup> Zauner, A. Et al. (2002). *Brain oxygenation and energy metabolism: part I - Biological function and pathophysiology*. *Neurosurgery*, Vol. 51, p. 289-302.

<sup>[51]</sup> Gerhard, F. Et al. (2000). *Oxygenation*. En *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, p. 1-103. Wiley-VCH, Weinheim, Alemania.

<sup>[52]</sup> Fujita, S. Et al. (1993). *Mechanisms of methanation of carbon dioxide and carbon monoxide over nickel/alumina catalysts*. *Applied Catalysis*, p. 87-100.

## Humedad

La humedad relativa ambiental es un indicador relacionado tanto con la atmósfera como con la temperatura, y si bien no es un problema para la supervivencia de las personas (a corto plazo, ninguno de los dos extremos es mortal) sí que lo es para el correcto funcionamiento de la maquinaria. La electrónica puede verse afectada por unas condiciones de humedad relativa excesivas, así que un módulo presurizado debe mantener el control sobre la humedad del ambiente y el efecto que tienen en ella los tripulantes y sus actividades.

Quizá más importante que la humedad atmosférica es el agua para el consumo humano. Sólo para beber, un ser humano necesita un mínimo de 2.5 l de agua al día<sup>[56]</sup>, a los que hay que sumar la higiene personal y la limpieza de la estación para poder hablar de confort. Dada la ausencia de fuentes de las que extraer agua en la OTB, todos estos requerimientos en una estación orbital deben aportarse, en principio, mediante misiones de reabastecimiento, que veremos con más detalle en el la sección 3.1.3.

Este problema queda en parte mitigado gracias al sistema de recuperación de agua (WRS), otro de los subsistemas de ECLSS. El WRS gestiona el agua residual, el exceso de humedad del ambiente, la orina de la tripulación y el agua resultante de la reacción de Sabatier en el CRaA, para procesarlas y generar agua potable tanto para la tripulación como para los experimentos y los generadores de O<sub>2</sub> de la estación. La noción de la reutilización de la orina y la humedad ambiente suele generar rechazo, pero el agua generada mediante estos sistemas debe cumplir unos criterios de pureza muy estrictos. El tratamiento queda al cargo del procesador de aguas y el procesador de orina (WPA y UPA, respectivamente). La primera utiliza múltiples filtros y catalizadores de alta temperatura para eliminar cualquier tipo de residuo sólido o microorganismo, y la segunda utiliza una centrifugadora para simular la gravedad, permitiendo un proceso de destilación antes de hacerla pasar por los filtros del WPA. El resultado es un agua más pura y saludable que la de la mayoría de las ciudades.

El reciclaje de agua es uno de los ámbitos en los que la EEI ha sido más revolucionaria como campo de pruebas. A día de hoy, la estación recicla cerca del 90% del agua que utiliza, con el 10% restante perdido sobre todo a través del procesamiento de orina, que cuenta con una eficacia del 70%.<sup>[57]</sup> Esto supone un importante ahorro en cuanto a masa que poner en órbita, y aporta al hábitat un razonable grado de autosuficiencia.

En el anexo 4 (integración volumétrica IV1) puede verse gráficamente la relación de los distintos componentes de control ambiental con la arquitectura de la estación.

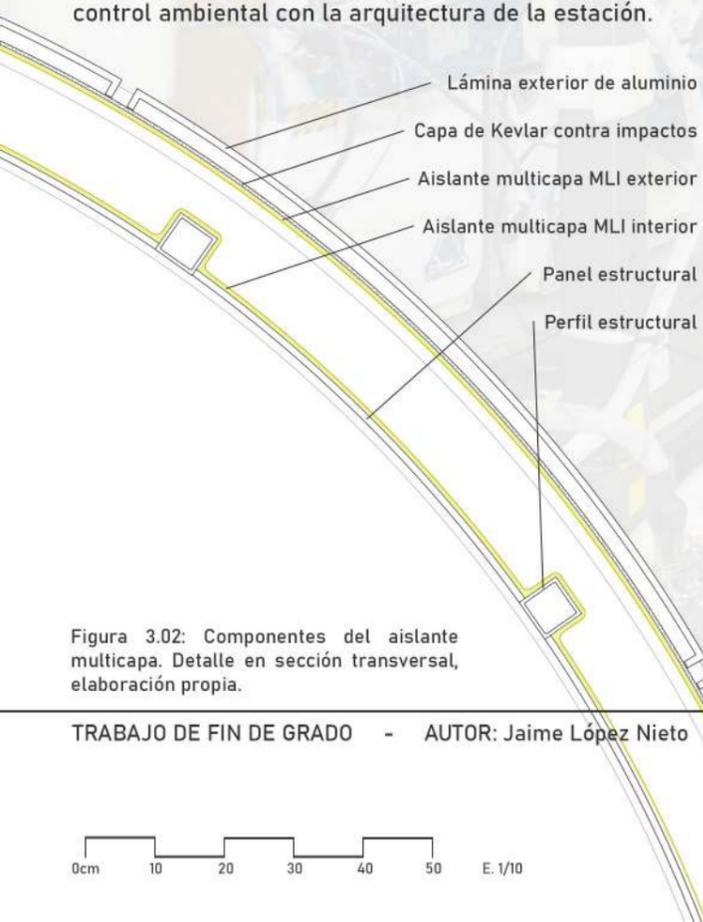


Figura 3.02: Componentes del aislante multicapa. Detalle en sección transversal, elaboración propia.

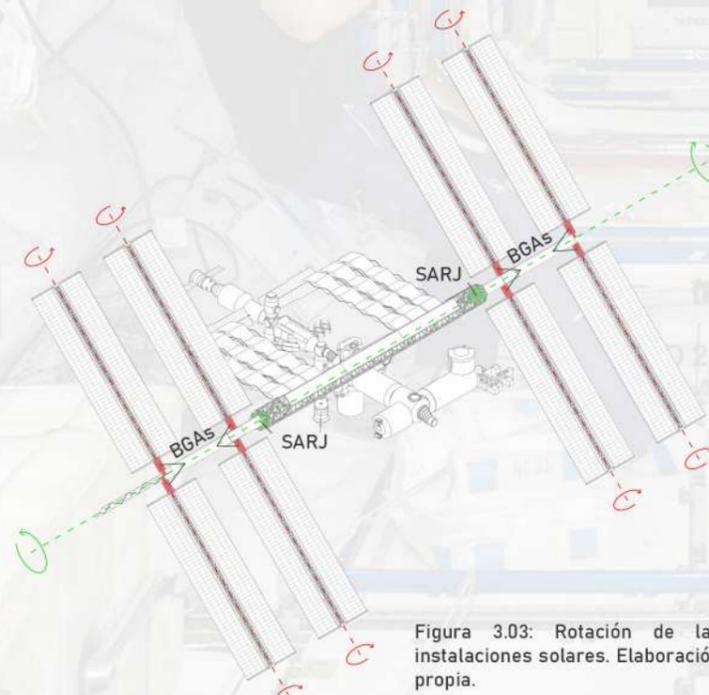


Figura 3.03: Rotación de las instalaciones solares. Elaboración propia.

## 3.2.2 ELECTRICIDAD

Prácticamente todo a bordo de la EEI requiere de un flujo constante de electricidad para operar con normalidad, desde la miríada de experimentos científicos en el interior de los módulos, a los sistemas de iluminación y los múltiples sistemas de soporte vital que mantienen con vida a la tripulación. En la EEI, el sistema encargado de la generación, el almacenamiento y la distribución de energía eléctrica es el EPS. Este sistema funciona de forma diferente en la parte rusa de la estación, heredera de los diseños de la *Mir*, y en la americana, aunque ambos segmentos pueden compartir la producción.

En la parte rusa, se usa un diseño de energía no distribuida. Esto significa que cada módulo incluye sus propios paneles solares, baterías y sistemas de control térmico: uno de ellos, actualmente plegado, en *Zarya*, y otro extendido, en *Zvezda*. Este diseño surge de las primeras etapas de la habitabilidad en órbita, cuando los componentes se lanzaban a la OTB y tenían que encontrarse por sus propios medios, lo que significaba que cada módulo debía de ser una pequeña nave espacial en sí mismo. Este diseño generaba (y genera) varios problemas. La complejidad añadida de unas instalaciones solares individuales para cada módulo crea más situaciones en las que puede haber fallos, además de peso extra en los lanzamientos. En la estación *Mir* se dio el problema, conforme empezaron a acoplarse nuevos módulos, de que unos paneles solares eclipsaban a otros en distintos momentos, perdiendo energía (Figura 1.14). En la EEI, los paneles solares del módulo *Zarya* tuvieron que plegarse con la llegada de la estructura de armazón, porque interferían con el funcionamiento de los radiadores<sup>[58]</sup>.

La parte americana se lanzó en el compartimento de carga del transbordador espacial, que tenía la capacidad de encontrarse con la estación y usar su brazo robótico para ensamblar los módulos. Esto significó que los módulos podían prescindir de tener sus propios sistemas y depender de los ya existentes en la estación, lo que dio lugar a un diseño de energía distribuida, con la electricidad producida y almacenada en otro punto de la estación, y distribuida después a los distintos módulos. El sistema tiene su propia problemática, ya que un fallo en la conexión entre módulos puede dejar al resto sin electricidad, pero éste problema termina resolviéndose con redundancia en las conexiones, y compensa con creces en eficiencia.

La EEI cuenta con ocho grandes instalaciones, o 'alas' solares, situadas a lo largo de la estructura de armazón. Cada ala está formada por dos telas con 16400 células solares cada una, distribuidas en 160 m<sup>2</sup>. Las instalaciones solares se entregan plegadas en órbita, y una vez que la sección correspondiente de la estructura de armazón queda instalada, una cercha-mástil central las extiende de dos en dos. La orientación al Sol se lleva a cabo mediante la rotación en dos ejes (Figura 3.03). El eje paralelo a la estructura de armazón queda a cargo de una gran junta rotatoria llamada Solar Alpha Rotary Joint (SARJ), situada en el punto de unión entre un segmento de la estructura de armazón y el siguiente. La rotación en el eje normal a la estructura de armazón se da en el propio brazo individual de cada instalación, llamado Beta Gimbal Assembly (BGA).

En conjunto, las cuatro instalaciones solares proveen a la estación de 84-120 kW al día. Junto con los paneles solares de *Zvezda* y los de los vehículos orbitales acoplados, se genera energía más que suficiente para las necesidades de la estación, incluso en el peor de los escenarios de consumo. De hecho, sólo el 40% de esa energía se usa durante el día orbital, el resto almacenándose en baterías para usarse durante la noche.

La posición de estas enormes instalaciones solares fue el principal motor para el diseño de la estructura de armazón. En las primeras fases del proceso se consideró una única estructura común para los módulos habitables y las instalaciones solares, un diseño conocido como 'power tower' en el que los componentes habitables y los de generación de energía/control de temperatura estarían en extremos opuestos de la misma. Sin embargo, la preocupación de que los movimientos de la tripulación indujera importantes vibraciones en el otro extremo llevó a una revisión del diseño que derivó en la configuración dual que conocemos hoy en día. Los módulos presurizados estarían en un eje propio cerca del centro de masas, mientras que los paneles solares quedarían distribuidos de forma simétrica en ambos extremos de la estructura de armazón<sup>[59]</sup>.

El almacenamiento de la energía generada está localizado igualmente en la estructura de armazón, en concreto en varias baterías situadas en los módulos de armazón P4, P6, S4 y S6. Toda esta relación entre el sistema energético y la estructura de armazón puede verse en el anexo 4 (integración volumétrica IV2).

<sup>[56]</sup> Armstrong, L. Et al. (2018). *Water intake, water balance, and the elusive daily water requirement*. *Nutrients*, Vol 10. MDPI AG, Suiza.  
<sup>[57]</sup> Carter, Donald L. (2010). *Status of the Regenerative ECLS Water Recovery System*. International Conference on Environmental Systems, AIAA.  
<sup>[58]</sup> Dempsey, Robert (2017). *The International Space Station: Operating an Outpost in the New Frontier*. NASA SP series, Johnson Space Center.  
<sup>[59]</sup> Kitmacher, Gary H. (2002). *Design of the Space Station Habitable Modules*. Parte de la conferencia *The Architecture of Space: A Multi-Disciplined Approach*. 53rd International Astronautical Congress, Houston.

## 3.2.2 SUMINISTROS

Aunque la EEI ha conseguido el hito de mantener una presencia humana continua en el espacio durante los últimos 20 años, la estación está aún lejos de ser autosuficiente. Los astronautas a bordo no sólo necesitan vehículos orbitales para acceder a ella, sino que requieren además de misiones de reabastecimiento cada pocos meses, en las que se envían desde la superficie agua, alimentos, gases, electrónica, repuestos y nuevos experimentos. Por lo general, a lo largo de un año se envían a la estación hasta seis misiones no tripuladas, que pueden adelantarse o retrasarse según necesidad. Son varios los vehículos orbitales tripulados y no tripulados que han mantenido abastecida la EEI durante estos años. Algunos, como el transbordador espacial (1981-2011) y el vehículo de transferencia automático europeo (2008-2015) ya han sido retirados. Los principales vehículos orbitales en servicio actualmente, cuya localización en la volumetría de la EEI puede verse en el anexo 4 (integración volumétrica IV3), son los que siguen<sup>[60]</sup>:

### Soyuz

Las cápsulas tripuladas *Soyuz* son quizá el mejor ejemplo de un viejo dicho en inglés: 'If it ain't broke, don't fix it'. El primer vuelo tripulado de una *Soyuz* tuvo lugar en 1967, y sus variantes siguen activas aún activas a día de hoy sin cambios sustanciales en el diseño, que es con una amplia diferencia el más longevo de todos los vehículos espaciales hasta la fecha. Aunque las cápsulas más modernas de las compañías comerciales han superado a la *Soyuz* en cuanto a precio de lanzamiento, la cápsula y el cohete del mismo nombre siguen siendo el vehículo más utilizado en la industria aeroespacial tripulada por su merecida reputación de seguridad, resistencia y fiabilidad.

El diseño de las *Soyuz* (Figura 3.04) cuenta con tres partes diferenciadas: El módulo servicio, el módulo de descenso y el módulo orbital. El módulo de servicio alberga los sistemas de propulsión, comunicación y generación de energía. En el módulo de descenso se sitúa la cabina, con espacio para tres tripulantes. Por último, el módulo orbital, al frente de la cápsula, cuenta con un puerto de acoplamiento APAS-95 que le permite acoplarse a la estación, y tiene espacio para 170 a 230 kg de carga. En la EEI siempre debe haber acopladas, como mínimo, dos *Soyuz*, que actúan de lanchas salvavidas para la tripulación en caso de emergencia.

### Progress

Las cápsulas *Progress* (figura 3.05) son una variante no tripulada de las *Soyuz*, sin la capacidad de reentrada en la atmósfera. Si entendemos las *Soyuz* como el 'autobús' que mueve a los pasajeros entre la Tierra y la estación, las *Progress* podrían definirse como el 'camión de basura'.

Estas cápsulas tienen una vida útil bastante breve. En una misión habitual, la *Progress* lleva hasta 2250 kg de carga científica y suministros a la estación, tras lo cual queda acoplada en un puerto APAS-95 del segmento ruso. Tres meses después, llega una segunda, y antes del lanzamiento de la tercera, otros tres meses más tarde, la primera *Progress*, que durante 6 meses ha actuado de espacio de almacenamiento de los residuos de la estación, se desacopla y se deja caer en una trayectoria de reentrada controlada. Al final de su vida, la cápsula se desintegra en la atmósfera, junto con los residuos de los tripulantes.

Las *Progress* son también las encargadas de impulsar a la estación cuando su órbita decae demasiado. Para ello, se lanzan misiones especiales con un porcentaje de la carga destinado a combustible, en función de la altura que se busque obtener. Tras el acoplamiento, la cápsula usa sus propulsores para empujar toda la estación.

### JAXA H-II (HTV)

Este vehículo orbital de la agencia espacial nipona (figura 3.06) tiene un diseño distinto a las *Soyuz* y a las *Progress*. Está planteado como un módulo más de la estación, cilíndrico y con un puerto CBM en un extremo, que le permite acoplarse directamente a los módulos de la estación. Puede transportar hasta 5500 kg de carga en su interior presurizado, y su modularidad le permite también cumplir la función que tenía asignada el módulo *Leonardo* durante el programa del transbordador, es decir, transportar nuevos racks ISPR con instrumentación científica.

Al igual que las *Progress*, el HTV no tiene capacidad de reentrada, por lo cual se usa también como almacenamiento de residuos, con un final de su vida útil similar al de las *Progress*. Por lo general, cuando un HTV llega a la estación, se sitúa en el puerto nadir de *Unity*. El módulo *Leonardo* se desplaza en esas ocasiones a uno de los dos puertos laterales de *Tranquility*.

### Cygnus

A diferencia de las anteriores, la cápsula *Cygnus* (figura 3.07) pertenece a una compañía privada, Orbital ATK, a la que se le asignan un cierto número de misiones de reabastecimiento como parte de un programa llamado Commercial Resupply. Se trata de una cápsula no tripulada lanzada a bordo de un cohete *Antares*, con capacidad para 3500 kg de carga. El diseño es parecido al de la HTV, cilíndrico con el diámetro de los módulos de la estación para permitir el transporte de módulos ISPR, y con capacidad de acoplamiento a un puerto CBM. Se desintegra en la reentrada.

### Dragon

La cápsula *Dragon*, de la compañía privada Space X (figura 3.08), participa también en el programa Commercial Resupply. Tiene capacidad para 3300 kg de carga, presurizados. El puerto de acoplamiento, en el cono frontal, es del tipo NDS, con lo cual sólo puede acoplarse en uno de los dos PMA con adaptadores de acoplamiento IDA. Por lo general, el elegido para esta función es el que se sitúa en el puerto frontal de *Harmony*, entre el laboratorio japonés y el europeo, el mismo en el que se acoplaba en su momento el transbordador espacial.

La *Crew Dragon* es una variante tripulada de la *Dragon* con capacidad para cuatro tripulantes, diseñada y probada en los últimos años. En noviembre de 2020 llevó a cabo su primera misión tripulada a la EEI, ocasión que fue muy celebrada como una recuperación de la capacidad estadounidense para poner astronautas en órbita. Desde la cancelación del programa del transbordador, habían dependido exclusivamente de las cápsulas *Soyuz*.

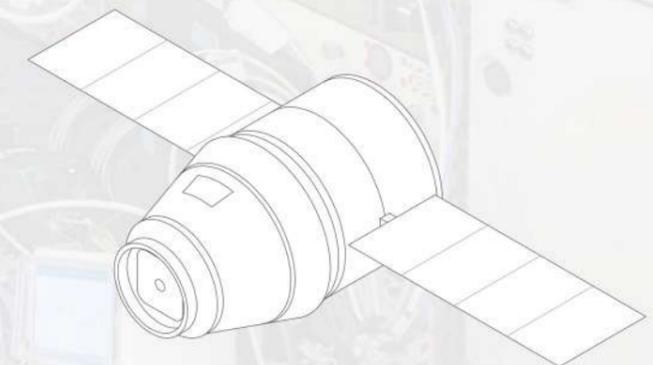
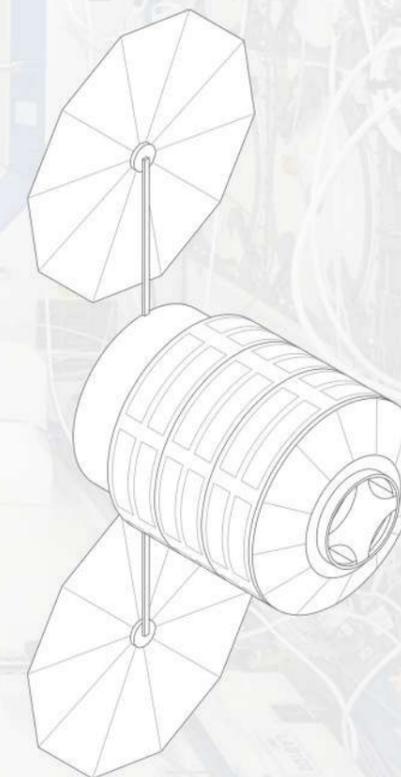
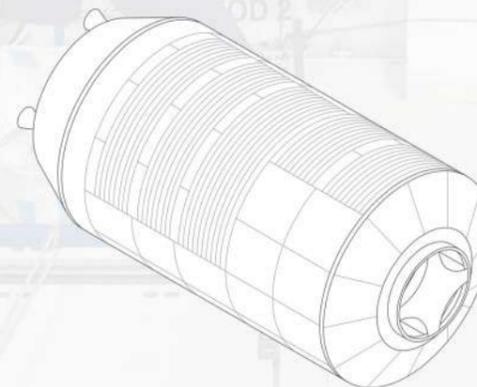
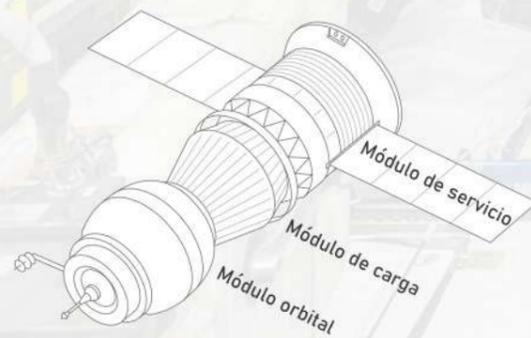
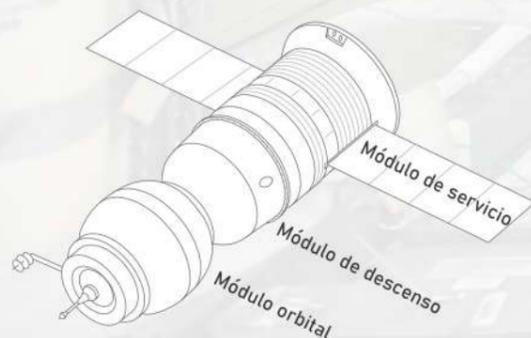


Figura 3.04: Cápsula *Soyuz*. Esquema simplificado<sup>[61]</sup>.

Figura 3.05: Cápsula *Progress*. Esquema simplificado<sup>[61]</sup>.

Figura 3.06: Cápsula JAXA H-II (HTV). El. Propia.

Figura 3.07: Cápsula *Cygnus*, Orbital ATK. El. Propia.

Figura 3.08: Cápsula *Dragon*, Space X. El. Propia.

## 3.3 CONSIDERACIONES DE HABITABILIDAD

Más allá de la estricta supervivencia, las consideraciones sobre la habitabilidad se implementan en el diseño desde un punto de vista cercano a la arquitectura, para mitigar los efectos negativos de la estancia a largo plazo en un hábitat confinado como es la EEI. Para facilitar el análisis, se han dividido las diversas consideraciones en cinco grupos, que se identificarán con un código de color:



La intención es que estos cinco grupos sirvan como herramienta analítica para abordar un estudio de habitabilidad aplicable tanto a la EEI como a otros casos de estudio o arquitecturas dentro y fuera de la OTB. Esto nos permitirá establecer comparativas y territorios comunes entre casos a priori muy diferentes, desde los que proponer mejoras ligadas a la habitabilidad. En la sección 4 del trabajo volveremos sobre estas consideraciones.

### 3.3.1 GESTIÓN DEL ESPACIO

Lo único que diferencia un hábitat moderno de una máquina, en especial en entornos en los que esa frontera se difumina (como es el caso que nos ocupa), es la gestión del espacio. El módulo de comando del *Apolo*, por ejemplo, no era un hábitat, sino una máquina en la que la persona que la operaba actuaba como un engranaje más dentro del mecanismo. Si había espacio habitable dentro de esa máquina era porque las personas necesitan del espacio como un engranaje necesita de un eje, es decir, por una cuestión estrictamente funcional.

En la EEI, la situación es diferente. Sea por confort de la tripulación o porque la habitabilidad a largo plazo requiere de algo más que el espacio justo y necesario para mover el brazo y presionar botones, la cuestión es que los espacios interiores de los módulos de la EEI han sido gestionados arquitectónicamente y diseñados, con buen criterio, para habitar. Y si bien existe aún una enorme componente funcional, podemos afirmar con seguridad que con la EEI, y con sus predecesoras desde las *Salyut* rusas, se dio el paso definitivo de 'máquina' a 'hábitat'. Veamos las consideraciones que, en el caso particular de la EEI, llevaron a ese resultado.

#### Distribución geométrica

Como hemos visto, los espacios en la EEI, y en la habitabilidad orbital en general, están definidos por cuestiones de funcionalidad más que de confort o estética. En este caso, los espacios deben adaptarse a un tamaño de módulo predefinido dictado por las capacidades de lanzamiento del transbordador espacial (Figura 3.09), o del cohete *Proton* en caso del segmento orbital ruso.

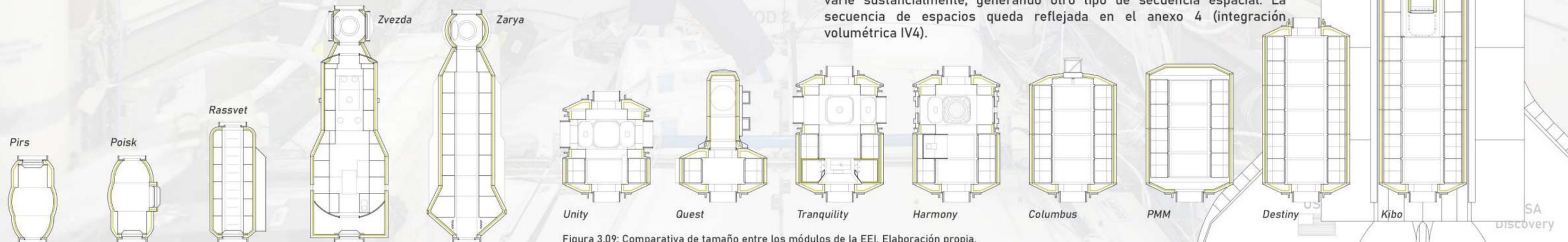


Figura 3.09: Comparativa de tamaño entre los módulos de la EEI. Elaboración propia.

Pero empezando por lo más básico, ¿por qué son cilíndricos los módulos? ¿por qué no son más parecidos a las construcciones en la superficie de nuestro planeta? La respuesta es que un módulo orbital es, en esencia, un depósito a presión. Esto significa que contiene gas en su interior a una presión mayor que la del entorno (en este caso, una atmósfera frente al vacío del espacio). Para un recipiente a presión, las formas más eficientes en cuanto a cargas soportadas por las paredes son las que más superficie tienen, es decir, cilindros y esferas<sup>[62]</sup>. Estas formas no tienen, además, puntos de encuentro entre superficies donde se concentren las cargas, propensos a fallar. Sumando esto a la forma del compartimento de carga del transbordador, el cilindro es en la opción más eficiente, la que nos genera un mayor espacio presurizado a un menor coste de lanzamiento.

Además de la forma, y centrándonos en la parte americana, las capacidades del transbordador limitan también el tamaño de los módulos a un diámetro estandarizado de 4.26 m (14 ft) y una longitud que varía en función de las necesidades, entre los 3.9 m (13.3 ft) del pequeño ELM de *Kibo*, y los 11.34 m (38 ft) del propio laboratorio japonés.

El siguiente aspecto es la distribución interior. En el espacio presurizado de los módulos deben convivir las personas y la carga, esta última en forma de estaciones de trabajo, contenedores para experimentos, sistemas de soporte vital y aviónica, y demás componentes, utensilios y piezas. En *Skylab*, la distribución interior de los espacios se organizó de forma 'vertical', como en un edificio de varias plantas en la Tierra. Hubo varias propuestas<sup>[63]</sup> que pretendían algo similar para los módulos de la EEI, pero el menor diámetro de los módulos habría acabado por generar espacios extraños para nuestra experiencia, además de un uso menos eficiente del espacio. En este sentido, parecía bastante claro que el diseño horizontal resolvería mejor las problemáticas, pero aún quedaba estudiar cómo distribuir, en sección, el espacio destinado a la carga y el destinado a la habitabilidad.

Es aquí donde vuelve a entrar en juego el inteligente diseño en sección que vimos en la sección 2.1.2, cuando discutíamos la acomodación científica. En las fases iniciales de diseño, había otras configuraciones propuestas que sugerían una ordenación del espacio tipo 'núcleo central de servicio', en las que los módulos para experimentos y el almacenamiento estarían situados en el centro de los módulos, mientras que el espacio de paso quedaría a su alrededor. Como vemos en la Figura 3.10, sin embargo, este tipo de diseño deja muy poco espacio de almacenamiento, o alternativamente, un espacio residual de estancia. Finalmente, y tras varias pruebas<sup>[63]</sup>, se alcanzó la configuración óptima final, con el espacio libre en el centro y cuatro módulos ISPR en los laterales, dejando espacio en las esquinas para las instalaciones.

Con esta distribución espacial, se genera en la parte americana de la estación una secuencia de espacios rítmica y constante, bien definida, lo que ayuda no sólo a la reducción de costes sino también a la orientación y al uso. La parte rusa de la estación funciona de forma similar, aunque los requerimientos particulares de cada módulo, que como hemos visto actúan casi como naves espaciales singulares, hacen que el diseño en sección varíe sustancialmente, generando otro tipo de secuencia espacial. La secuencia de espacios queda reflejada en el anexo 4 (integración volumétrica IV4).



Figura 3.10: Diferentes configuraciones de sección en la fase de diseño. Áreas de servicio, almacenamiento y habitable. Elaboración propia.

## Orientación espacial

Si bien la distribución espacial es un campo en el que se pueden encontrar múltiples similitudes con la arquitectura en la Tierra, la orientación dentro del mismo es un problema a parte, exclusivo del entorno orbital. En la Tierra, estamos acostumbrados a trabajar con un sistema de coordenadas definido por una atracción constante hacia 'abajo' que nos mantiene de forma continua en una posición concreta desde la cual interaccionamos con nuestro entorno y, a raíz de esta posición (sea de pie o sentado, con los pies hacia 'abajo'), diseñamos los espacios y nos movemos por ellos.

En la OTB esto no es así. Como ya vimos en la sección 1, la 'ausencia de gravedad' en el entorno nos permite adoptar cualquier posición que deseemos, y trabajar con un sistema de coordenadas particular. Esto no sólo es extraño y confuso para los astronautas, sino que influye directamente en la percepción de los espacios.

*Skylab* fue de nuevo una experiencia tremendamente valiosa en este sentido. Dado que su diseño, similar a un edificio de varias plantas, tenía una direccionalidad clara (un 'abajo' definido arquitectónicamente) los astronautas se veían forzados a adoptar este sistema de referencia para trabajar y vivir en concordancia con su entorno<sup>[64]</sup>. El problema era que no toda la estación orbital compartía la misma orientación.

Para este autor, que siempre ha habitado con un sistema de coordenadas bien definido, este aspecto resulta fascinante. Imaginemos que estamos en una torre de varias plantas con un atrio central vacío, como puede ser el edificio de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad de Granada (Figura 3.11). Ahora imaginemos que, mirando al atrio, levantamos la vista hacia arriba... Pero lo que vemos no es el techo del edificio, sino el suelo, varias plantas más abajo. Con todo el mobiliario del revés, y el péndulo balanceándose de un lado a otro.

Dejaré que sea Gerry Carr, comandante de la última tripulación de *Skylab*, quien le ponga palabras a esa sensación tan extraña. Traduciendo del inglés original<sup>[64]</sup>:

«Cuando por fin tengo una vertical local fijada en mi mente, bajo por el túnel al módulo de comando y... ¡zas! De repente estoy boca abajo. [...] Lo único que puedo decir sobre esto es que, si lo que están buscando es un buen ejemplo de cómo no diseñar y distribuir un compartimento, el adaptador de acoplamiento es el mejor. Cada vez que pienso en lo estúpido que es el diseño ahí, me llevan los demonios.»

Esto muestra la importancia de una orientación constante para la habitabilidad en órbita. Forzar a los astronautas a cambiar sus coordenadas mentales cada vez que se desplazaban de un espacio a otro resultó una auténtica tortura a la que llevaba meses acostumbrarse, y gran parte de las sugerencias que la división Man-Systems recibió de los astronautas tenía que ver con este aspecto.

En la EEI, el problema se enfoca desde dos vertientes. Por un lado, la vertical local no está definida de una forma tan evidente como en el laboratorio orbital de *Skylab*. En el espacio central longitudinal, las cuatro paredes son iguales y puede trabajarse en ellas, de forma que los astronautas pueden adaptar mejor su sistema de coordenadas particular a los requerimientos del momento. Por otro lado, la estación comparte una misma orientación laxa en toda su extensión, con la Tierra definiendo el 'abajo'. Esta orientación no se define arquitectónicamente, sino que se define mediante texto en las paredes, lo que ayuda a la localización de los espacios sin impedir que los astronautas trabajen con sus propios sistemas de coordenadas si la situación lo requiere. Y en cualquier caso, los módulos ISPR están localizados de tal modo que es muy extraño que un astronauta tenga que trabajar 'cabeza abajo'.

Esta orientación unitaria, y al mismo tiempo flexible, supone un paso adelante con respecto a las problemáticas de *Skylab*. Pero aun así, hay ciertos puntos de la estación en que los astronautas se ven obligados a cambiar el sistema de referencia. Los más notables son la cúpula, que por su propio diseño está en la parte inferior de la estación (es una ventana a la Tierra), y los *crew quarters*, en las cuatro paredes del nodo *Tranquility*.

En el caso de la cúpula, el diseño exige que los astronautas entren cabeza abajo, de forma que la Tierra queda sobre ellos. Esto puede resultar confuso pero, por suerte, el espacio es suficiente para que los tripulantes puedan hacer uso de él en su tiempo libre sin necesidad de cambiar el sistema de referencia. En cuanto a los *crew quarters*, la situación es parecida, aunque algo más atenuada. Como en la Tierra, los astronautas duermen 'tumbados' en una posición neutral, y los sacos de dormir están situados en uno de los laterales del pequeño *crew quarter*, lo que significa que al despertar y salir al módulo *Tranquility*, da la impresión de estar 'saltando a un pozo' (figura 3.11).

## Privacidad

La privacidad es una cuestión que se trató en las primeras fases del proceso de diseño, cuando aún estaba previsto un módulo específico para las habitaciones privadas de los tripulantes<sup>[64]</sup>. Además de eso, el *Habitation Module* debía proporcionar un espacio de cocina y comedor, una ducha y un aseo, pero los recortes presupuestarios tras el accidente del *Columbia* acabaron con el proyecto antes de que se pusiera en órbita.

En la actualidad hay tan sólo seis espacios verdaderamente privados en la estación, dos en la parte rusa, y los cuatro *crew quarters* en *Tranquility*, que veremos con más detalle posteriormente. Todos ellos cuentan con un saco de dormir, pequeños espacios de almacenamiento para utensilios personales, un ordenador portátil y la capacidad para aislarse del resto de la estación mediante una puerta. En las ocasiones en que la tripulación excede las seis personas, o en los años previos a la instalación de los *crew quarters*, el resto de tripulantes instalaban sus sacos de dormir en distintos puntos de la estación<sup>[65]</sup>:

Figura 3.11: Problemas de orientación en la cúpula y en los *crew quarters*. Elaboración propia.



«Coloqué mi saco de dormir en la pared estribor de *Destiny*, fijándolo en paralelo a la cubierta. Roman y Beamer pronto se unieron [...], dejándonos en el tenue brillo del FGB (*Zarya*) a un par de docenas de pies de distancia. Unas cuantas horas después me desperté con frío. El eficiente aire acondicionado del laboratorio era demasiado para mi suéter y mi saco de dormir. Todavía dentro, solté la parte superior [...] me impulsé entre mis compañeros dormidos [...] hasta llegar a la cubierta del transbordador. Allí se estaba más caliente, y pronto me volví a dormir.»

La privacidad parece ser, para la mayoría de tripulantes, una cuestión superflua, y de hecho, muchos astronautas lo consideran así en sus declaraciones<sup>[66]</sup>. Sin embargo, la forma en que se refieren a la experiencia nos está dando claves sobre la importancia de lo ocurre, de cara al largo plazo:

«[...] Era un poco estrecho, teníamos que dormir en sitios pequeños. Algo así como una acampada, pero por supuesto, durante ocho días a bordo de la EEI puedes pasar con eso.»

Una acampada. Es decir, una situación provisional, temporal. Muchos de los visitantes a la estación lo experimentan de esta forma, pero para los tripulantes que permanecen en ella a más largo plazo, como el físico de la ESA Hans Schlegel, los *crew quarters* son el mínimo deseable de espacio privado y, en ese sentido, «Más sería mejor».

Los lugares en los que los que los astronautas sin espacios privados sitúan sus sacos de dormir nos habla también sobre la importancia de la privacidad a la hora de elegir un espacio en el que habitar. Por lo general, las elegidas para este propósito son las cápsulas orbitales, ya sean las *Soyuz* convencionales, la cubierta de la tripulación del transbordador cuando estaba operativo o, más recientemente, la cápsula *Crew Dragon*<sup>[67]</sup>. Estos espacios son, dentro de los módulos disponibles, los que ofrecen una mayor privacidad. En el anexo (integración volumétrica IV5) localizamos estos espacios en la volumetría general.

El diseño de la EEI mediante módulos interconectados en un eje central, y que únicamente pueden independizarse para desplazarlos, genera una única línea de visión continua y elimina completamente la privacidad, más allá de los *crew quarters*, que por sus reducidas dimensiones supone un paso atrás con respecto a *Skylab*, estación en la cual cada miembro tenía un espacio propio de dimensiones considerables dentro de la cubierta habitable.

### 3.3.2 MOVIMIENTO INTERIOR

Hasta ahora hemos examinado los módulos desde un punto de vista estático. En esta sección pasaremos a ver algunas de las consideraciones de diseño 'dinámicas' de la estación, en cuanto a movimiento de la tripulación en el interior de esos módulos. Estos estudios suelen ser especialmente relevantes en la Tierra, en edificios en los que se espera una afluencia masiva de personas. Y si bien no es el caso de la EEI, nuestro hábitat orbital tiene ciertas características que hacen interesante un estudio de la movilidad. En primer lugar, el espacio es reducido y está estrictamente limitado por el volumen presurizado. En segundo lugar, el rendimiento de la tripulación está vinculado al movimiento y a la velocidad con la que se puede llevar a cabo.

#### Flujos de movimiento

El espacio libre central de los módulos de la EEI oscila entre los 2.13 m (7 pies) de lado y un mínimo reglado de 1.52 m (5 pies) en ciertos puntos. En los vestíbulos de la parte americana de la estación, el espacio de paso se reduce a 1.29 m (4.25 pies), suficiente para permitir el tránsito de dos personas al mismo tiempo, en posición horizontal con respecto al eje longitudinal de los módulos. Con esta configuración y una tripulación, por lo general, de apenas seis personas, los conflictos de movilidad no deberían ser un problema. Sin embargo, hay partes de la estación en que diversos factores se suman para obstaculizar la circulación fluida.

El primero de los factores es la densidad de flujo de personas en el espacio presurizado. Para estudiar este factor en una tripulación de seis personas, se han establecido rutinas ficticias basadas en la distribución de horarios indicada por Häuplik-Meusburger<sup>[66]</sup> (Figura 3.12). Representando estas rutinas en el plano de la página siguiente, podemos ver los lugares con más flujos de personas en la estación, que corresponden claramente con el eje central (nodo *Unity* y laboratorio *Destiny*) y el eje perpendicular del nodo *Harmony*, tanto en número de tripulantes como en intensidad de flujo (número de veces al día que pasan por esa zona). Esto tiene mucho que ver con los usos a los que se destinan los espacios: mientras que los módulos a partir del nodo *Tranquility* están destinados casi exclusivamente al trabajo, el nodo *Unity* está habilitado como comedor, lo que significa que todos los tripulantes van al menos tres veces al día. Junto a él está el nodo *Harmony*, con la codiciada cúpula y uno de los inodoros de la estación, a lo que hay que sumar el hecho de que es el centro de ejercicio del segmento americano. En cuanto al laboratorio *Destiny*, su condición de conector entre la parte de trabajo y de descanso, con los *crew quarters*, y la parte de comedor, ejercicio e higiene, hace que se convierta igualmente en un espacio muy transitado.

El segundo factor, la amplitud del espacio, lo estudiamos en la secuencia espacial del anexo 4 (integración volumétrica IV4). Por suerte, los espacios de menor amplitud no coinciden con los de mayor flujo, aunque deben destacarse los flujos de los astronautas rusos hacia y desde el nodo *Unity*, que ocurren múltiples veces al día y en un espacio más reducido de lo habitual. Es bastante común, por tanto, que se den conflictos en esta zona cuando dos astronautas circulan en direcciones opuestas del eje central de la estación.

El tercer factor es el uso del espacio en sección. Aquí es donde se dan los mayores conflictos, porque el lugar de mayor flujo de la estación (la parte trasera del nodo *Harmony*) coincide con la localización de la cinta de correr. El uso de esta cinta es una actividad que se da en perpendicular al espacio, por lo que ocupa gran parte del mismo y genera conflictos de paso de forma continua.

#### Americano 1:

- Despierta en *Crew Quarter 1*.
- Higiene personal en *Harmony*.
- Desayuno con la tripulación.
- Inspección: *Unity*, *Harmony* y *PMA*.
- Ejercicio: cinta de correr en *Harmony*.
- Análisis de ejercicio en *Columbus*.
- Tiempo libre: Cúpula.
- Almuerzo con la tripulación.
- Operaciones: Brazo robótico EEI.
- Trabajo: ISPR de *Destiny*.
- Cena con la tripulación.
- Higiene personal en *Harmony*.
- Se acuesta en *Crew Quarter 1*.



#### Americano 2:

- Despierta en *Crew Quarter 3*.
- Higiene personal en *Harmony*.
- Desayuno con la tripulación.
- Inspección: *Kibo*, *JEM* y *ELM*.
- Ejercicio: bicicleta en *Destiny* y levantamiento de pesos en *Harmony*.
- Análisis de ejercicio en *Columbus*.
- Tiempo libre: *Crew Quarter 3*.
- Almuerzo con la tripulación.
- Trabajo: ISPR de *Destiny* y de *Columbus*.
- Cena con la tripulación.
- Higiene personal en *Harmony*.
- Se acuesta en *Crew Quarter 3*.



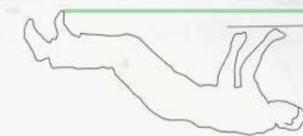
#### Europea:

- Despierta en *Crew Quarter 4*.
- Higiene personal en *Harmony*.
- Desayuno con la tripulación.
- Inspección: *Tranquility* y *Columbus*.
- Ejercicio: Cinta de correr en *Harmony*.
- Análisis de ejercicio en *Columbus*.
- Tiempo libre: *JEM-ELM* y cúpula.
- Almuerzo con la tripulación.
- Videoconferencia en *Kibo*.
- Trabajo: ISPR de *Columbus*.
- Cena con la tripulación.
- Higiene personal en *Harmony*.
- Se acuesta en *Crew Quarter 4*.



#### Japonés:

- Despierta en *Crew Quarter 2*.
- Higiene personal en *Harmony*.
- Desayuno con la tripulación.
- Inspección: *Quest* y *Destiny*.
- Ejercicio: Bicicleta en *Destiny* y levantamiento de pesos en *Harmony*.
- Análisis de ejercicio en *Columbus*.
- Tiempo libre: *Crew Quarter 2* y cúpula.
- Almuerzo con la tripulación.
- Operaciones: Brazo robótico *Kibo*.
- Trabajo: ISPR de *Kibo* y *JEM-EF*.
- Reparaciones.
- Cena con la tripulación.
- Higiene personal en *Zvezda*.
- Se acuesta en *Crew Quarter 4*.



#### Rusa 1:

- Despierta en *Kayutka 1*.
- Higiene personal en *Zarya*.
- Desayuno con la tripulación.
- Inspección: *Zvezda*.
- Ejercicio: Cinta de correr en *Zvezda*.
- Tiempo libre: cúpula.
- Fotografía de la Tierra en *Zvezda*.
- Almuerzo con la tripulación.
- Trabajo: Experimentos *MRM-1*.
- Cena con la tripulación.
- Higiene personal en *Zarya*.
- Se acuesta en *Kayutka 1*.

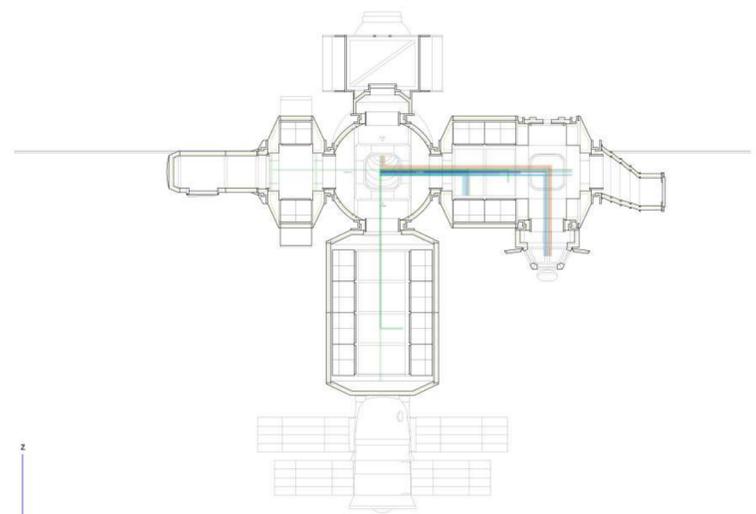
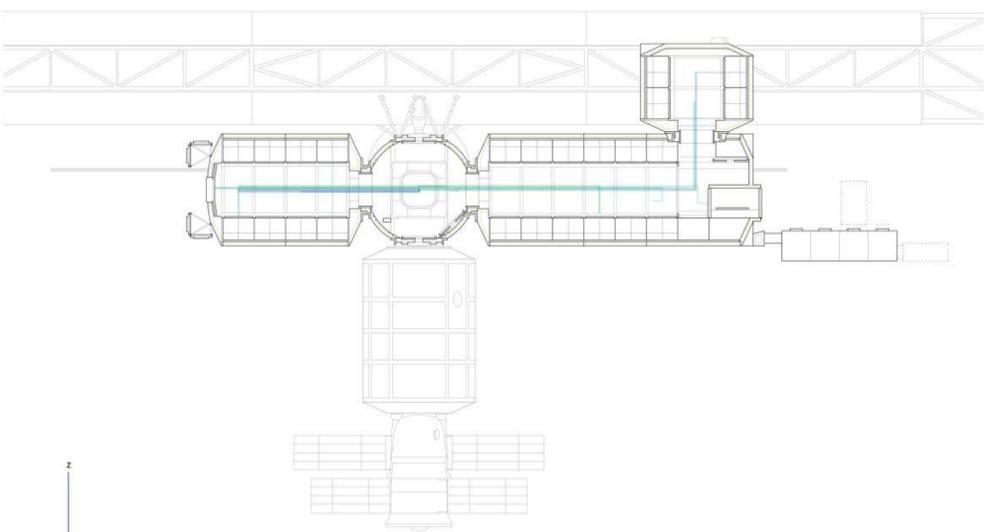
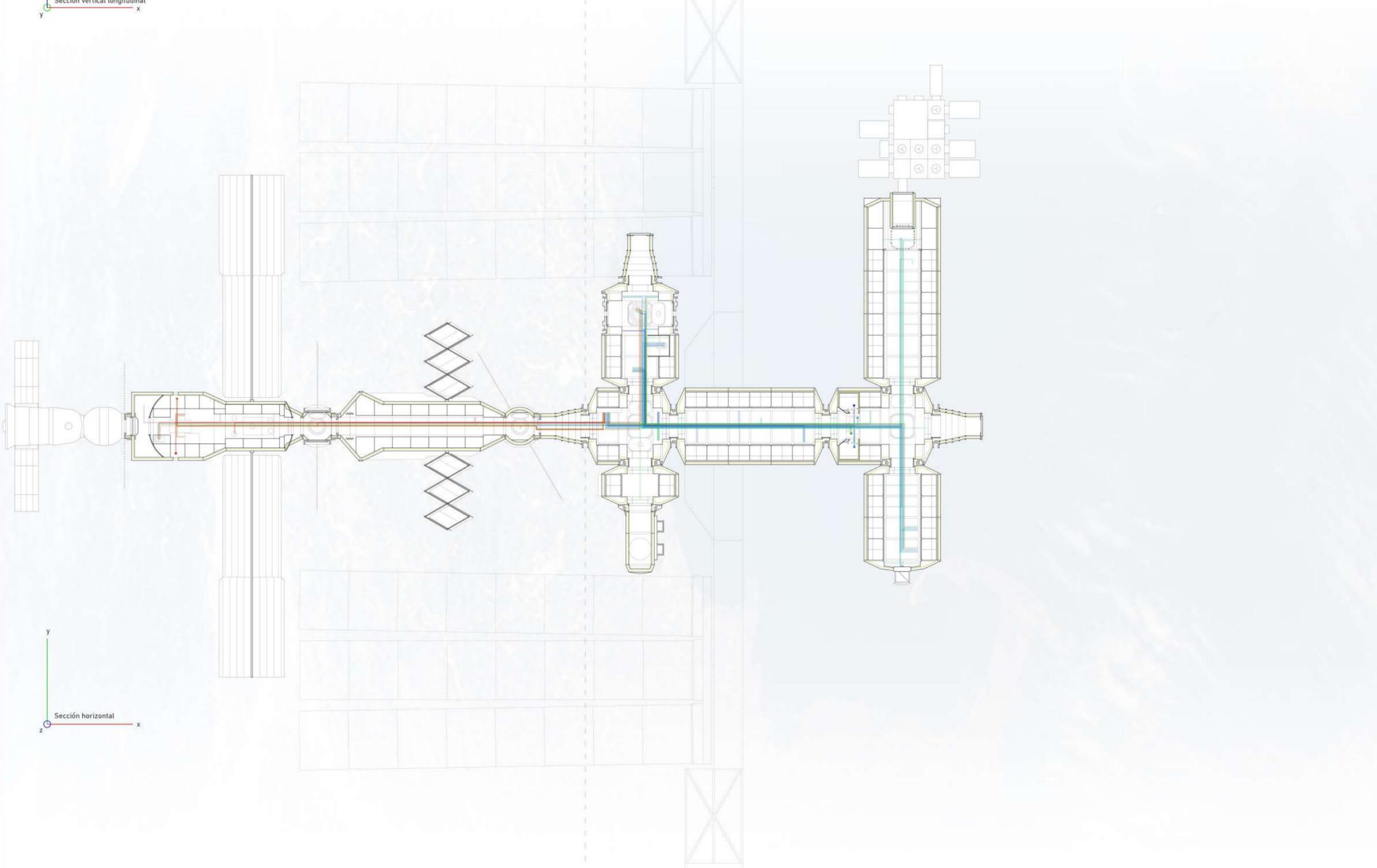
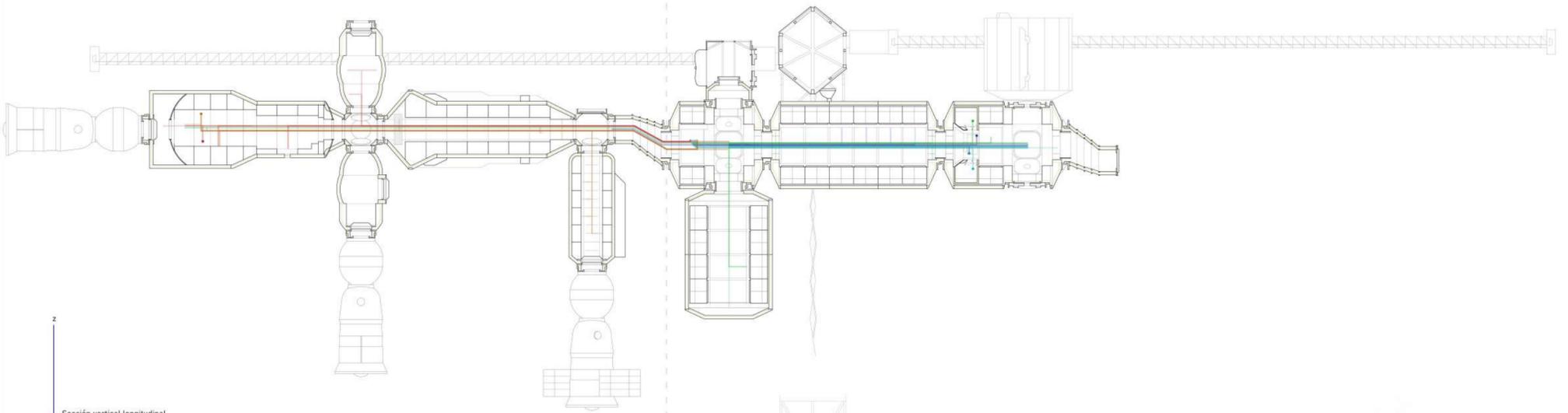


#### Ruso 2:

- Despierta en *Kayutka 2*.
- Higiene personal en *Zarya*.
- Desayuno con la tripulación.
- Inspección: *Zarya*.
- Ejercicio: Cinta de correr en *Zvezda*.
- Tiempo libre: cúpula y *Kayutka 2*.
- Almuerzo con la tripulación.
- Trabajo: Experimentos *MRM-2*.
- Cena con la tripulación.
- Higiene personal en *Zarya*.
- Se acuesta en *Kayutka 2*.



Figura 3.12: Rutinas de 6 astronautas ficticios en la EEI. El color de la línea actúa de leyenda para el plano de la página 30.



## Ayudas y restricciones a la movilidad en gravedad cero

La situación gravitatoria de la estación afecta enormemente al movimiento. En la Tierra dependemos de las fuerzas del peso y la fricción para movernos por un plano concreto, pero en la EEI, la ausencia de peso hace imposible este proceso. Además, en un entorno sin el efecto de la gravedad resulta casi imposible que un objeto permanezca en reposo: un ligero impulso en cualquier dirección, gracias a la primera ley de Newton, hará que entre en un estado de movimiento constante en cualquier dirección hasta que se tope con una pared. Esto significa que el movimiento en órbita es, paradójicamente, problemático tanto por su dificultad como por su facilidad.

Las ayudas y restricciones al movimiento abordan este problema, y ambas son tan antiguas como la exploración espacial tripulada. En las primeras estaciones orbitales *Salyut* y *Skylab*, en la *Mir* y en la EEI, diversos sistemas más o menos complejos se han puesto a prueba y se han ido mejorando con el tiempo: arneses flexibles, asideros, suelas especializadas para los zapatos...

Las más complejas se pusieron a prueba en *Skylab*. El laboratorio orbital contaba con un mástil central similar al presente en las estaciones de bomberos para facilitar el movimiento entre las cubiertas, y el amplio espacio bajo la cúpula estaba sectorizado mediante rejillas con una forma adaptada a la suela metálica de los zapatos de los tripulantes<sup>[68]</sup>. Ambas medidas fueron descritas como «útiles» por los astronautas, si bien posteriormente se abandonaron por su excesiva e innecesaria complejidad.

En la EEI, podemos distinguir varios mecanismos de restricción, y uno de ayuda al movimiento (Figura 3.13)<sup>[69]</sup>:

### Restricción de movimiento

-Soportes flexibles, compuestos de varias partes rotatorias interconectadas entre sí. Se conectan a las paredes de los módulos mediante pinzas ajustables en un extremo, y en el otro tienen un soporte en el que se colocan cámaras, ordenadores portátiles, luces, y cualquier elemento que no sea fijo. Están recubiertos de goma de un azul intenso, un código de color que se mantiene en todas las ayudas y restricciones de movimiento de construcción americana.

-Apoyos de pies de corta duración, que se enganchan a los asideros en vertical u horizontal mediante un cierre deslizante en la parte inferior de la suela. Se utiliza para trabajar temporalmente con los experimentos de los laboratorios. La suela está pintada en azul.

-Apoyos de pies de larga duración, encajados en la parte delantera de un módulo ISPR y compuestos por un armazón metálico en el que se ajustan dos suelas del mismo material con arneses elásticos para los pies. La estructura puede rotar, de forma que aporta múltiples ángulos de trabajo. Se usan para trabajos de mayor duración, en los que son más confortables que los apoyos de corta duración.

-Cuerdas elásticas y correas, utilizadas para mantener en posición de almacenamiento diversos objetos que quedan fuera de los módulos ISPR. Las cuerdas elásticas y las correas varían en color y material según el momento en el que fueron puestas en órbita. La mayoría de ellas subieron con los módulos rusos y son doradas, pero también hay algunas blancas utilizadas en los módulos estadounidenses.

-Arneses flexibles, utilizados por la tripulación cuando necesitan simular los efectos de la gravedad. Hay arneses fijos en todas las máquinas de ejercicio.

-Velcro, utilizado como adherente para colocar objetos en superficies especiales y para mantener cerrados la mayoría de contenedores de almacenamiento de tamaño sub-rack.

### Ayuda al movimiento

La principal ayuda al movimiento son los asideros, pintados en azul en los módulos estadounidenses. Se pueden montar y desmontar según necesidad, colocándose en los bordes de los ISPR que conforman las paredes interiores de los módulos presurizados. Están representados en el anexo 4 (integración volumétrica IV6).

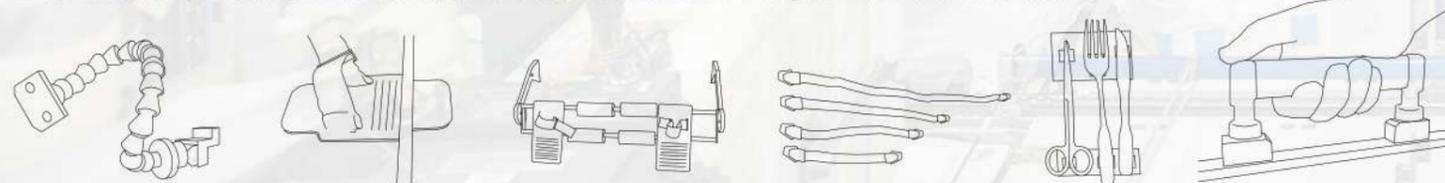


Figura 3.13: Restricciones y ayudas al movimiento. Elaboración propia a partir de las imágenes de la referencia [69].

## 3.3.3 NECESIDADES BÁSICAS

En este trabajo entenderemos por necesidades básicas aquellas que, sin estar ligadas estrictamente a la supervivencia (al menos a corto y medio plazo, sin alcanzar escenarios extremos), resultan esenciales para una estancia confortable y prolongada en la OTB. Prácticamente todas las estaciones espaciales con las que se ha experimentado en las últimas décadas han tenido que considerar y satisfacer, en mayor o menor medida, estas necesidades. Si bien parte de aquella problemática a la que hacíamos referencia con las consideraciones de supervivencia (el habitar como una simple lista de requerimientos biológicos que satisfacer) sigue presente en este aspecto, lo hace de forma más laxa, con protocolos menos estrictos y que dejan más lugar al diseño arquitectónico. Las soluciones que veremos a continuación pueden entenderse como engranajes de esa 'máquina de habitar' que es la EEI, pero son engranajes menos ligados a la supervivencia y más vinculados al espacio y los factores humanos.

### Higiene

Para estudiar este aspecto nos basaremos en la división de la actividad que propone Häuplik-Meusburger<sup>[68]</sup>, considerando la higiene personal, el inodoro y las tareas de limpieza de la estación.

La higiene personal es una de las cuestiones más complicadas de llevar a cabo en órbita siguiendo los estándares de la habitabilidad en la Tierra. Además de la escasez de agua líquida en la OTB, hay que tener en cuenta que los mecanismos que utilizamos para asearnos requieren de la presencia de la gravedad para deshacernos del agua residual resultante del proceso. En los sucesivos hábitats orbitales, estos problemas se han ido resolviendo de diversas formas.

Tanto las *Salyut* (a partir de la 5) como la *Mir* y el laboratorio *Skylab* contaban con una 'ducha' para el aseo de cuerpo completo de los miembros de la tripulación, un dispositivo que solucionaba el problema de la ausencia de la gravedad, de forma aparentemente sencilla, con el flujo de aire. Sin embargo, esto no resolvía del todo la tendencia del agua a adherirse a las superficies, con lo que los tripulantes de estas estaciones debían operar con precaución, ya que corrían un importante riesgo de ahogarse, y además debían llevar a cabo un complejo proceso de preparación previa y limpieza posterior. Traduciendo de las declaraciones de Valery Ryumin (*Salyut 6*)<sup>[70]</sup>:

«Cuando piensas en todas las operaciones preparatorias que tienes que hacer, y después en cuántas operaciones post-ducha hay que llevar a cabo, se te quitan las ganas de ducharte. Hay que calentar el agua, en tandas ni más ni menos, hay que montar la cámara de la ducha, instalar los colectores de agua, los aspiradores [...] una sola ducha te lleva el día entero.»

En la estación *Mir* se mejoró este aspecto con una cámara fija (Figura 3.14), pero aun así el proceso de limpieza posterior seguía siendo demasiado complejo. Así, Valery Poliakov pasó 14 meses en órbita sin ducharse una sola vez, aseándose únicamente con toallas húmedas, e informó posteriormente de que su piel estaba incluso mejor que el día que empezó la misión. La ducha de *Mir* se reconfiguró como una sauna y acabó por desmantelarse, y, a día de hoy, en la EEI, los tripulantes se asean una vez al día sin necesidad de ducha, mediante baños con esponja, jabones y champú sin espuma. Si bien el sistema parece funcionar a medio e incluso largo plazo sin necesidad de una ducha, la mayoría de los astronautas disfrutaban de la capacidad de aseo de cuerpo completo, siendo el principal problema el proceso posterior de limpieza del agua residual.

Al igual que la ausencia de espacios privados, la carencia de mecanismos ágiles para el aseo de cuerpo completo parece ser uno de los factores que convierten la estancia en órbita en una situación 'temporal' similar a una acampada. En una entrevista en 2003, Ed Lu afirmó<sup>[68]</sup>:

«No tenemos una ducha aquí arriba, así que usamos jabón y champú sin agua, y una toalla [...] y funciona muy bien. Dicho eso, ¡tengo muchas ganas de llegar a casa y darme una larga ducha caliente!».

Otros aspectos de la higiene personal en órbita no requieren agua, como el afeitado o corte de pelo. Estos tienen soluciones más sencillas: basta un aspirador, un proceso cuidadoso y una limpieza concienzuda.

El tratamiento de los residuos corporales en el inodoro es algo que por lo general también damos por hecho en la habitabilidad en la Tierra, pero que en la OTB se complica. Y de nuevo, la principal culpable es la ausencia de gravedad. Seguramente podemos imaginarnos lo que supone sin entrar en detalles escabrosos, pero lo cierto es que, al contrario de lo ocurrido con la ducha (y quizá por la ausencia de alternativas) el sistema del inodoro se ha resuelto de una forma eficiente mediante la succión, en procesos suficientemente ágiles para que utilizarlo no suponga un problema.

<sup>[68]</sup> Häuplik-Meusburger, Sandra (2011). *Architecture for Astronauts*. Springer Wien, Springer Praxis Books. Viena.

<sup>[69]</sup> Behrendsen, Robert R. (2013). *Ergonomics and Human Factors for the Restraints and Mobility Aids on the International Space Station*. Presentación. NTRS, NASA.

<sup>[70]</sup> Portree, David S. F. (1995). *Mir hardware heritage*. Informe, Nasa Technical Reports Server (NTRS), NASA-RP-1357. Johnson Space Center.

En la EEI, el inodoro (Figura 3.14) está localizado en una cabina llamada Compartimento de Higiene y Residuos (WHC, por sus siglas en inglés), que además de inodoro actúa de lugar privado para la higiene personal. Hay dos en la estación, uno en el módulo ruso *Zvezda* y otra en el nodo 3 *Tranquility*. Quizá sólo por el nombre ya sea el mejor lugar para una instalación de estas características, pero hay razones mucho menos superfluas.

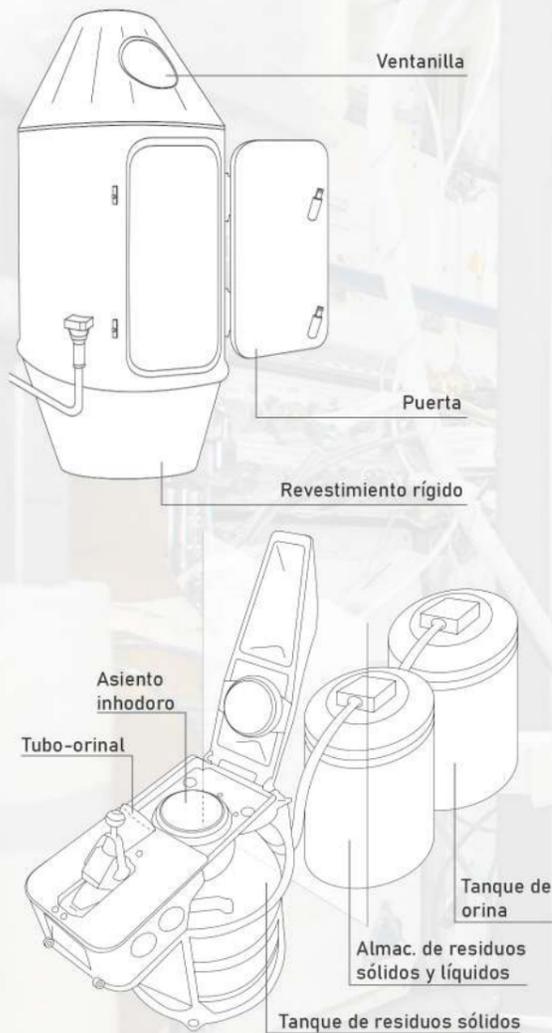


Figura 3.14: Ducha de la estación Mir e inodoro de la EEI. Esquemas de Häuplik Meusburger<sup>[71]</sup>.

Los WHC suponen una evolución a sistemas anteriores en muchos aspectos, y uno de ellos es el tratamiento de la orina. El subsistema WRS, encargado del procesamiento de aguas, se sitúa en módulos ISPR del nodo *Tranquility*, y los WHC están conectados a él. El WHC americano tiene sus sistemas de tratamiento de orina organizados en tamaño rack, con lo que a su vez encaja en un módulo ISPR anexo a los de tratamiento de aguas, quedando la parte de la cabina en el espacio central. Se trata además de un lugar, en teoría, visual y sonoramente aislado, ya que se sitúa en un eje perpendicular al principal eje de tránsito de la estación.

En cuanto a operatividad, el WHC cumple su función de forma relativamente ágil, pero los tripulantes sugieren algunas mejoras, sobre todo en cuanto a la succión en la aspiradora de residuos sólidos. Las siguientes declaraciones son traducidas de Richard Garriott (turista espacial) y del astronauta Clayton Anderson<sup>[71]</sup>:

«La recogida de líquidos no es realmente un problema, es básicamente un tubo con una aspiradora en el que se orina. El único desafío es mantener el tubo delante de ti mientras flotas. Algo desafiante técnicamente, pero no demasiado. [...] Por otro lado, lidiar con los residuos sólidos es más complejo».

«La operación es bastante interesante. Se hace como lo harías en tierra, pero sobre una aspiradora. Tu habilidad para apuntar y el subsecuente nivel de limpieza están directamente relacionados en todos los aspectos, ¡y la cantidad de succión es crítica! Te haces a la idea, ¿verdad? Por supuesto, no quieres dejarlo todo sucio para la próxima persona. Eso no funcionaría nada bien».

El último aspecto es la limpieza de la estación. Los tripulantes de la EEI llevan a cabo tareas concienzudas de limpieza de forma semanal, que incluyen la desinfección de superficies y la aspiración de los entornos presurizados. Para ello se utilizan, de nuevo, aspiradoras, en este caso de forma más similar a como se usan en la Tierra. Aunque pueda parecer

algo superfluo, se trata de una rutina y un componente muy importante para los astronautas, ya que, de no usarse con frecuencia, la atmósfera cerrada de la estación no tardaría en ensuciarse por el uso habitual, saturando los filtros y poniendo en peligro la correcta circulación del aire. En la NASA tienen en alta estima sus aspiradoras, refiriéndose a menudo a ellas como «the only piece of equipment that doesn't suck on the ISS».

En conjunto, la higiene es una consideración histórica y bastante desarrollada en los hábitats orbitales, pero con varios aspectos aún por mejorar, tanto en el ámbito técnico como arquitectónico. Los espacios dedicados a estas funciones en la EEI están situados en una zona de tránsito y esparcimiento como es el Nodo 3. Esta problemática debería haberse resuelto con el Habitation Module, pero, de momento, los conflictos relativos a esta integración, que podemos ver en el anexo 4 (integración volumétrica IV7), siguen estando presentes.

## Sueño

Como tantos otros aspectos, la actividad de dormir en la OTB está influenciada por la ausencia de gravedad. En la superficie, tendemos a dormir más cómodos en posición horizontal, en reposo sobre una superficie. En órbita, nuestro cuerpo adopta la conocida como postura corporal neutral<sup>[72]</sup>, a partir de la cual se diseñan los sacos de dormir, que deben proporcionar un cierto grado de restricción de movimiento para impedir que el tripulante flote mientras duerme. Los sacos de dormir, desplazables, se instalan por lo general en las pequeñas cabinas de tamaño rack conocidas como *crew quarters*.

Los *crew quarters*<sup>[73]</sup> (Figura 3.15) surgen como un componente modular para dar respuesta tanto a los requerimientos de privacidad de la tripulación como a la actividad del sueño de forma especializada. Suponen una evolución a partir de las cabinas homólogas de diseño ruso, las *kayutkas*, en aspectos como la protección contra la radiación, el aislamiento acústico y la ventilación interior. Los *crew quarters* se construyen con placas de 6.5 cm de espesor de polietileno de peso molecular ultra-elevado, con un buen comportamiento acústico y capaces de aislar a los tripulantes de las radiaciones cósmicas, incluso durante un evento solar. Las luces interiores pueden apagarse para conseguir oscuridad casi total frente al resto de ambientes interiores de la EEI, siempre ligeramente iluminados.

El espacio interior toma en consideración las diferencias de las cuatro paredes del módulo:

- la pared trasera, pensada para actuar como superficie de descanso, alberga los enganches para el saco de dormir. Es en la que se 'tumban' los usuarios.
- la pared delantera alberga una estación de trabajo y comunicaciones, con terminales eléctricos para la iluminación personalizada, para un ordenador portátil y otros medios de entretenimiento y comunicaciones para uso individual del tripulante.
- la pared derecha, curva, se adapta a la forma del módulo presurizado e incluye espacios de almacenamiento para objetos personales y superficies para la colocación con velcro de más objetos.
- la pared izquierda, la entrada a la habitación, está configurada como un saliente que se adentra 40 cm en el espacio libre interior del módulo. Alberga los sistemas de ventilación, que succionan el aire del módulo a través de filtros de aire y sonido, y lo conducen por el interior mediante ventiladores de velocidad ajustable.

En conjunto, estos módulos (pueden verse, junto a las *Kayutkas*, en el anexo 4, integración volumétrica IV8) aportan el espacio suficiente para el sueño y la privacidad de los tripulantes, con 2.1 m<sup>3</sup> de volumen disponible en unas medidas aproximadas de 1.4 x 0.8 x 1.9 m. Puede parecer un espacio confinado, pero lo cierto es que los tripulantes han manifestado en reiteradas ocasiones que no necesitan un espacio mayor a corto plazo<sup>[71]</sup>.

Gran parte de esto tiene que ver con patrones de habitabilidad que ya estaban presentes en *Skylab*. Cuando al astronauta Gerald Carr, de la misión *Skylab 4*, le pidieron su opinión sobre el diseño de futuros compartimentos para la tripulación en base a su experiencia con los de *Skylab*, respondió lo siguiente:

«Tiene que ser un lugar que pueda modificarse de cualquier forma que uno desee.»

Lo que estaba pidiendo era flexibilidad para la personalización del espacio privado del sueño, algo que los *crew quarters* de la EEI tuvieron en cuenta de una forma simple pero eficaz: las superficies interiores y su capacidad para albergar objetos personales, fotografías u otros utensilios que, al fin y al cabo, personalizaran el espacio. De aquí podemos extraer la lección de que, cuando el espacio disponible no es demasiado, pequeñas decisiones de diseño interior que permiten la personalización y una percepción ampliada del volumen habitable pueden marcar la diferencia.

### USOS *crew quarters* (ver figura 3.15)

Volumen total	2.10 m <sup>3</sup>
Acceso	0.26 m <sup>3</sup>
Almacenamiento	0.07 m <sup>3</sup>
Volumen habitable	1.77 m <sup>3</sup>

Tabla 3.1: Volúmenes interiores de los *crew quarters*. Mediciones a partir de las planimetrías de AutoCad.

<sup>[71]</sup> Häuplik-Meusburger, Sandra (2011). *Architecture for Astronauts*. Springer Wien, Springer Praxis Books. Viena.

<sup>[72]</sup> Mount, Frances E. Et al. (2003). *Evaluation of Neutral Body Posture on Shuttle Mission STS-57 (SPACEHAB-1)*. Memorandum técnico. NTRS, NASA.

<sup>[73]</sup> Broyan, James L. Et al. (2009). *International Space Station USOS Crew Quarters Development*. SAE International Journal of Aerospace, p. 92-106. SAE International.

## Ejercicio

En la sección 1.1.5 discutimos brevemente los efectos que tiene en la salud una estancia prolongada en la OTB, especialmente a raíz de la ausencia de gravedad. Algunos de estos problemas pueden tratarse con medicación o ejercicio, pero sobre otros es necesario llevar a cabo más investigación antes de que se les pueda dar una solución al margen de la gravedad artificial.

Las cintas de correr fueron los primeros dispositivos de ejercicio que se introdujeron en la EEI. Para combatir la falta de gravedad, se usa un arnés atado a los hombros y de presión ajustable en función de la intensidad del ejercicio. Además, un sistema de aislamiento protege la estación de las vibraciones generadas durante la actividad, que pueden alterar algunos de los experimentos a bordo. Actualmente hay dos de estas cintas de correr en la estación: la primera es una cinta con aislamiento de vibración denominada TVIS, situada desde 2013 en el módulo ruso *Zvezda*, y la segunda es la más reciente T2, 'Colbert'<sup>[75]</sup>. A estas cintas se suman dos bicicletas estáticas, una de ellas en *Zvezda* y otra en *Destiny*, ambas funcionando también con arneses, y una estación de levantamiento de pesos nombrada Advance Resistive Exercise Device (ARED). El diseño de esta última estación compensa la ausencia de gravedad con cilindros de vacío de resistencia ajustable y constante, y simula incluso la inercia del levantamiento de pesos<sup>[76]</sup>.

Los equipamientos de ejercicio están complementados con espacios de almacenamiento particulares para esta actividad, en los que se guardan los componentes y respuestos de las máquinas y la ropa de entrenamiento. Para la parte americana, el espacio de almacenamiento complementario se sitúa en el PMM, que como recordamos se acopla, por lo general, en el puerto Nadir del Nodo 1.

Las rutinas de ejercicio en la EEI cumplen una doble función. Aparte de ayudar al bienestar físico y psicológico de la tripulación, el control exhaustivo de la respuesta fisiológica, que se lleva a cabo tras cada actividad en los módulos ISPR especializados del laboratorio *Columbus*, genera una importante base de datos sobre la respuesta de distintos astronautas (con sus diferentes fisiologías) a la estancia en un entorno de microgravedad y la contramedida que aporta la actividad física. Actualmente, el ejercicio es una parte fundamental de la estancia en órbita y, como tal, debe considerarse como parte de una organización espacial que tenga en cuenta las actividades que se realizan y dónde tienen lugar en relación a las circulaciones del resto de la tripulación. En el anexo 4 (integración volumétrica IV9) podemos ver las diferentes máquinas de ejercicio y su localización.

## 3.3.4 ACTIVIDADES Y USOS

El tiempo en órbita de un astronauta está, lógicamente, planificado prácticamente al minuto. La jornada en la EEI es de 16 horas con 8 horas de sueño, y desde que se levanta hasta que se acuesta la rutina de un astronauta procede transcurriendo de la siguiente forma<sup>[77]</sup>:

- 1.5 horas de post-sueño (higiene, desayuno e inspección de la estación).
- 0.5 horas de planificación (informe de estado y planificación de tareas).
- 2.5 horas de ejercicio y tiempo libre.
- 1 hora de almuerzo.
- 1.5 horas de operación de sistemas.
- 6.5 horas de trabajo (control de experimentos e investigación, operaciones médicas, mantenimiento y montaje).
- 2 horas de pre-sueño (cena, higiene).

Dentro de este horario, distinguimos tres consideraciones principales que tienen que ver con las actividades y los usos en órbita: trabajo, tiempo libre y almacenamiento/gestión de residuos.

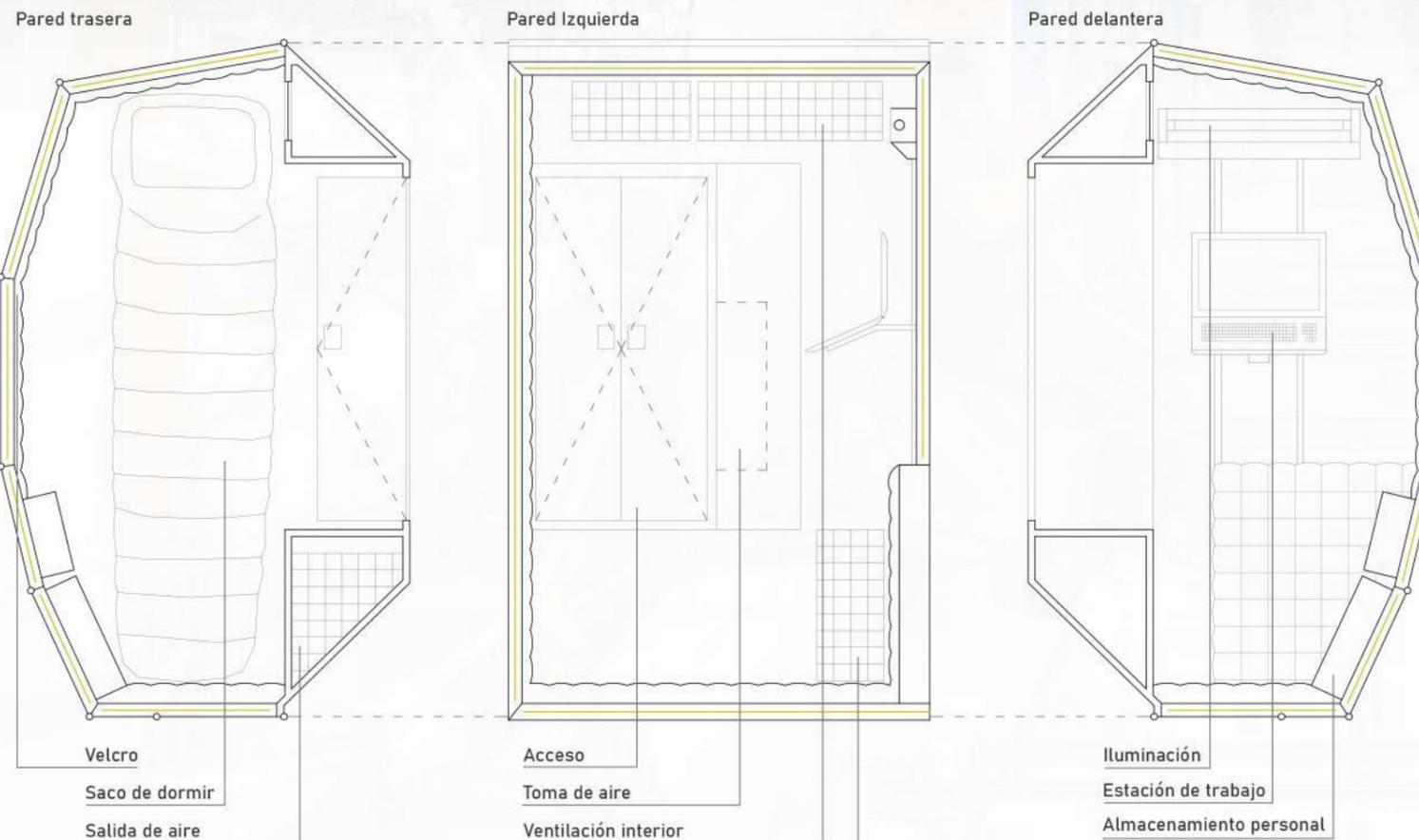
### Trabajo

El trabajo que llevan a cabo los astronautas en la EEI puede entenderse desde cuatro vertientes:

La primera es la operación de sistemas. La estación es un mecanismo complejo de habitabilidad controlado por múltiples sistemas autónomos, de los cuales hemos discutido los principales en la sección 3.2. Una parte importante de la estancia en órbita consiste en monitorizar estos sistemas, llevar a cabo el mantenimiento y la limpieza de sus componentes y asegurarse de que funcionan a pleno rendimiento. La operación de sistemas incluye también el control de las partes de la estación que no funcionan de forma autónoma, sino controladas por los propios tripulantes, como es el caso del brazo robótico. Este está en funcionamiento constante, desplazando cargas, contenedores logísticos y experimentos de un lado a otro en el exterior de los módulos presurizados o de la estructura de almacén, y los astronautas deben invertir parte de su tiempo en utilizarlo, y en entrenarse para utilizarlo correctamente en el simulador, montado junto a los controles principales en el laboratorio *Destiny*.

La segunda es el control de experimentos e investigación. La mayoría de los tripulantes y visitantes puntuales de la EEI tienen preparación científica en materias específicas sobre las que se experimenta en órbita, e información sobre al menos una parte de los experimentos e investigaciones que tienen lugar en los diversos campos trabajados: biología celular y molecular, biología animal y vegetal, biología humana, física de fluidos, ciencia de materiales, combustión, estudios de física fundamental, observación de la Tierra, y demostraciones de diversas tecnologías<sup>[78]</sup>. Son los tripulantes, por tanto, los encargados de controlar el correcto desarrollo de los experimentos y de informar sobre sus resultados, así como de instalar y verificar las condiciones de los experimentos que se llevan a cabo de forma remota mediante los racks EXPRESS. Los astronautas deben operar, además, las diversas estaciones de trabajo y herramientas con las que cuenta la estación.

Figura 3.15: Esquema de los *crew quarters*. Elaboración propia a partir de la información en: Broyan et al (2009)<sup>[74]</sup>.



<sup>[74]</sup> Broyan, James L. Et al. (2009). *International Space Station USOS Crew Quarters Development*. SAE International Journal of Aerospace, p. 92-106. SAE International.

<sup>[75]</sup> *Do tread on me* (2009). [nasa.gov/mission\\_pages/station/behindscenes/colbert\\_feature.html](https://nasa.gov/mission_pages/station/behindscenes/colbert_feature.html). NASA - International Space Station.

<sup>[76]</sup> Lamoreaux, Christopher D. & Landeck, Mark E. (2006). *Mechanism Development, Testing, and Lessons Learned for the Advanced Resistive Exercise Device*. Publicación de conferencia. NTRS, Johnson Space Center, NASA.

<sup>[77]</sup> *Living in space* (2016). <https://www.asc-csa.gc.ca/eng/astronauts/living-in-space/default.asp>. Canadian Space Agency.

<sup>[78]</sup> Kitmacher, Gary H. (2015). *Reference guide to the international space station, utilization edition*. Johnson Space Center. NASA, Houston.

La tercera son las operaciones médicas. Para entender los efectos de la microgravedad en el cuerpo humano no basta con realizar pruebas a los astronautas que vuelven a un entorno de gravedad normal. Hay que llevar también a cabo pruebas en órbita durante toda la estancia, y dado que los médicos son un recurso tan escaso en la OTB como todos los demás, son los propios tripulantes los encargados de llevarlas a cabo, monitorizando su salud y la de sus compañeros en reposo y tras la actividad física.

La cuarta es el mantenimiento y el montaje de nuevos componentes. Estas tareas tienen lugar de forma ocasional, cuando falla alguno de los componentes de la estación o cuando llega un nuevo componente para instalar. A menudo requieren EVAs, un proceso que en sí mismo consume mucho tiempo y energías de los tripulantes, y que cuenta con un protocolo particular muy exigente<sup>[79]</sup>.

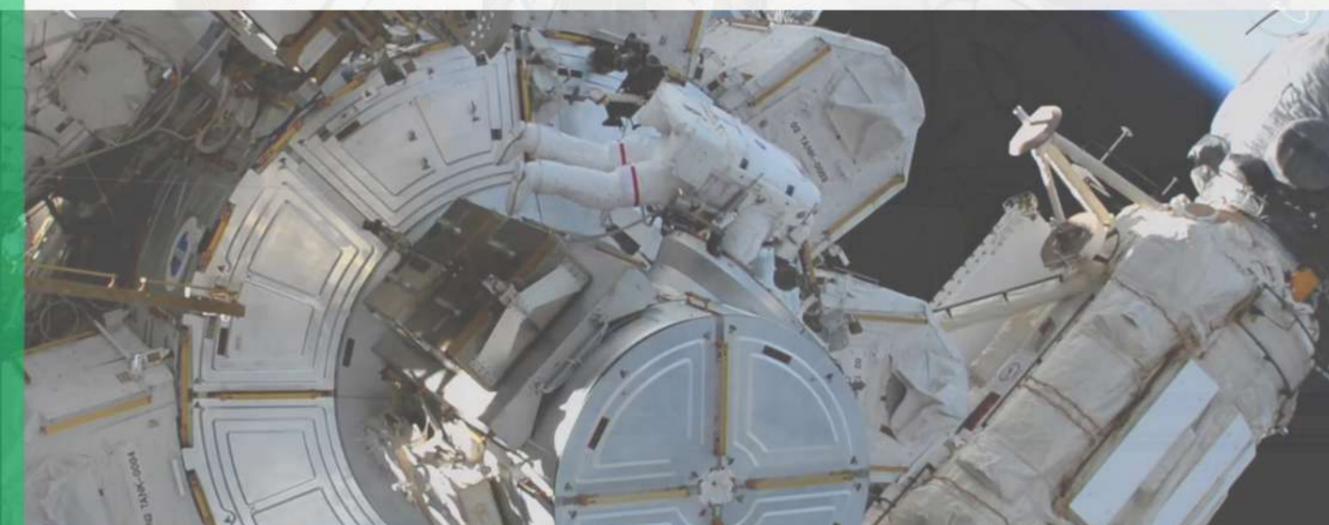
Todos estos trabajos son, lógicamente, la prioridad de cualquier misión a la OTB, y consumen por tanto 8 de las 16 horas que tiene la jornada de un miembro de la tripulación de la EEI. En las primeras misiones del programa *Apolo*, el tiempo dedicado al trabajo ocupaba 18 horas completas, dejando apenas 4 horas para el sueño y 2 para otras actividades. A largo plazo, horarios de este tipo son insostenibles, y las misiones de larga duración en estaciones orbitales han tendido con el tiempo a moderar la jornada y permitir más tiempo libre.

La actitud de los astronautas frente a las exigentes (si bien no tanto como en el pasado) jornadas de trabajo es, por lo general, positiva, conscientes de la importancia de las tareas que llevan a cabo. Aquí tenemos la opinión, traducida, de Jerry Linenger<sup>[79]</sup>:

*«Quería completar todos los objetivos de misión, sin excepciones, e ir más allá de los objetivos siempre que fuera posible. La gente dependía de mí, enormes sumas de dinero se habían invertido para llevarme allí arriba, y si me tenía que convertir en una especie de robot, pues pensé: que así sea.»*

Para que este entusiasmo no caiga en saco roto, la planificación de los espacios destinados al trabajo minuciosa. Actualmente la estación hace uso de su modularidad y reconfigurabilidad para separar los distintos usos, de forma que los ambientes de trabajo queden en lugares concretos y separados del resto de actividades de la tripulación. Estos lugares concretos de trabajo, que podemos apreciar en el anexo 4 (integración volumétrica IV10), son los laboratorios, donde tiene lugar la mayor parte de la labor de investigación de la misión. Ambas partes de la estación cuentan además con mesas de trabajo desmontables, que son en esencia estaciones de trabajo personalizadas que pueden desplazarse entre los distintos racks de la estación y colocarse según las necesidades. Por ejemplo, si uno de los experimentos en un ISPR requiere de trabajo en una mesa, ésta puede montarse sobre él, o si uno de los ISPR no está llevando a cabo ninguna función que requiera su uso y se necesita de un espacio para llevar a cabo tareas de mantenimiento, la mesa puede instalarse ahí.

Abajo: Victor Glover durante la EVA del 13 de marzo de 2021, trabajando en la sustitución del rigidizador de cobertura térmica de la escotilla del módulo *Quest* (Imagen 12).



## Tiempo libre

El hecho de que las misiones en órbita sean desorbitadamente caras puede llevarnos a pensar que el tripulante de una estación orbital no puede permitirse el lujo de darse tiempo libre. Para desechar esta idea, quizá debamos empezar a analizar esta consideración desde esta apreciación, o quizá advertencia, del geólogo y astronauta Harrison Schmitt, en referencia a las últimas misiones del programa *Apolo*<sup>[79]</sup>:

*«Las misiones estaban planificadas, pero había mucho tiempo libre. Hicimos muchas cosas que no estaban planificadas [...] porque no sabíamos realmente para qué planificar. Tuvimos mucho tiempo para la observación y el descubrimiento espontáneo. Eso es lo que significa explorar. Hay que tener cuidado de no planificar demasiado.»*

Si bien hemos podido ver que los astronautas tienden a ser conscientes de la importancia de su trabajo en la OTB, así como entusiastas hacia el mismo, los encargados de planificar los horarios de las tripulaciones en las primeras estaciones orbitales cometieron el error, en un principio, de dar una prioridad excesiva al trabajo frente al tiempo libre. Y esta situación, llevada al largo plazo, acabó por minar el entusiasmo de las tripulaciones y resultando enormemente contraproducente, como vemos reflejado en ciertas ocasiones curiosas e interesantes de analizar.

Según Jones & Benson<sup>[80]</sup>, la tercera tripulación de *Skylab* llevó a cabo la primera 'huelga espacial' cuando apagaron el radio durante un día entero como protesta a la intensa carga de trabajo. Ellos lo llamaron 'día libre no planificado'. También el programa *Salyut* tuvo su grado de decisiones 'no planificadas'. En el diario del cosmonauta ruso Valentin Levedev<sup>[81]</sup>, encontramos una divertida anécdota: llegó un momento en que tenían que llevar a cabo un experimento biológico con un cultivo de cebollas. Pero en lugar de plantarlas, la tripulación decidió comérselas ese mismo día («estaban deliciosas») y decirle al control de misión que las habían plantado. Llegaron incluso a inventarse informes en los que hablaban de la germinación de las cebollas, pero debido al enorme entusiasmo de los biólogos (las cebollas nunca antes habían germinado en el espacio) tuvieron que acabar diciendo la verdad.

A raíz de estos acontecimientos, y seguramente de otros muchos, el tiempo libre o tiempo 'no planificado' de las tripulaciones orbitales ha ido aumentando, con el resultado de un aumento de la productividad y creatividad de los astronautas<sup>[82]</sup>. En la EEI el tiempo libre llega, si se considera como tal el tiempo no destinado al trabajo, a las 8 horas al día. La mayor parte de esas horas están destinadas al ejercicio, a la alimentación y a la higiene (tanto personal como de la estación), pero estas actividades dejan margen a un tiempo 'no planificado' que los tripulantes pueden utilizar para leer, comunicarse con sus familiares, observar la Tierra, ver películas y series en sus ordenadores personales, o, en definitiva, lo que consideren oportuno.

Los espacios de la EEI también se prestan a estas actividades, en especial entre ellos la cúpula, el lugar predilecto de los astronautas para pasar el tiempo libre. Jeff Williams afirma en una entrevista para la NASA<sup>[79]</sup>:

*«Uno nunca se cansa de observar la parte de la creación de Dios que es la Tierra. Viajar alrededor del globo cada 90 minutos nos da muchas oportunidades para observar la geografía, los océanos, las formaciones de nubes, salidas y puestas de sol, tormentas, luces de las ciudades, y muchas otras cosas en gran detalle.»*

Incluso cuando la actividad elegida no es la observación de la Tierra, que puede mantener a los astronautas absortos durante horas, las vistas sin duda acompañan a cualquier otra actividad.

Junto con las vistas de la cúpula, otros recursos muy solicitados para el tiempo libre son el silencio y la intimidad. Esto se da sobre todo en los *crew quarters*, que como ya hemos visto pueden aislarse tanto acústicamente como a nivel de privacidad, y en el módulo logístico del laboratorio japonés Kibo que, si bien es simplemente un lugar de almacenamiento cercano al trabajo de laboratorio, tiene la característica de ser el espacio 'abierto' más silencioso de la estación.

A pesar de estar planificado, monitorizado y vinculado de alguna forma con el trabajo, muchos tripulantes consideran también el ejercicio como parte fundamental de ese tiempo libre. Peggy Whitson lo ilustra<sup>[83]</sup>:

*«Siempre me encuentro más relajada después de hacer ejercicio. Nunca he creído mucho en eso de las endorfinas, pero es cierto que consigo una sensación de satisfacción del ejercicio que levanta mi actitud. Así que para mí, el ejercicio no es simplemente un componente fisiológico crítico de la vida aquí arriba, tiene también una importante componente psicológica.»*

En el anexo 4 (integración volumétrica IV11) tenemos los espacios destinados al tiempo libre.

<sup>[79]</sup> Häuplik-Meusburger, Sandra (2011). *Architecture for Astronauts*. Springer Praxis Books, Springer Wien. Viena.

<sup>[80]</sup> Jones, Thomas D. & Benson, Michael (2002). *The complete idiot's guide to NASA*. Alpha Books, Indianapolis.

<sup>[81]</sup> Levedev, Valentin V. (1998). *Diary of a cosmonaut*. Phytoresearch. College Station, Texas.

<sup>[82]</sup> Chris Hadfield - *Space Oddity (David Bowie)* (2014). <https://www.youtube.com/watch?v=vEzKxoY2d5I>. Youtube.

<sup>[83]</sup> Peggy Whitson's Journal - Exercise in Space. [https://www.nasa.gov/mission-pages/station/expeditions/expedition16/journal\\_peggy\\_whitson\\_6.html](https://www.nasa.gov/mission-pages/station/expeditions/expedition16/journal_peggy_whitson_6.html). NASA, 2008).

## Almacenamiento y gestión de residuos

En la EEI todo tiene una función, y los espacios que no se usan para el trabajo, el tiempo libre o el control de la estación cumplen la fundamental función del almacenamiento. Esta función que, a priori, puede parecer mucho menos importante que otras, resulta bajo análisis ser uno de los pilares de la exploración espacial, con reputación de suponer un importante desafío en hábitats espaciales en los que la gestión de objetos es clave, ya que no puedes simplemente 'salir a sacar la basura' o comprar lo que necesitas para reparaciones en una ferretería cercana. Absolutamente todo en una estación espacial debe estar catalogado y minuciosamente almacenado en un lugar accesible y fácilmente localizable para los astronautas, especialmente en los tiempos en que las comunicaciones con la Tierra eran más limitadas y los tripulantes debían valerse por sí solos para encontrar el lugar en que algún controlador de misión había decidido almacenar un componente. Harrison Schmitt<sup>[84]</sup> afirma:

«Teníamos un manifiesto de dónde estaba todo. Podíamos mirarlo en un índice y encontrarlo. [...] La gente en tierra sabía mucho mejor que nosotros dónde estaba cada cosa. Si no podíamos encontrar algo, les preguntábamos y ellos nos sabían decir exactamente dónde estaba.»

La carencia de espacio de almacenamiento o de planificación en el inventario ha sido históricamente un problema en el diseño de los hábitats orbitales. Especialmente las *Salyut*, y posteriormente la estación *Mir*, se ganaron la reputación de ser estaciones desordenadas, en las que a pesar de que el almacenamiento tenía un gran espacio dedicado en las paredes de los módulos, era difícil encontrar las cosas<sup>[85]</sup> <sup>[86]</sup>. En las primeras, el principal método de almacenamiento eran bolsas, en cuyo interior, según Lebedev, «Las cosas flotaban como en una pecera». En la estación *Mir* se priorizó algo más el velcro como sistema para mantener las cosas en un sitio fijo.

Para la EEI se diseñó un sistema de almacenamiento más complejo y jerarquizado basado en la modularidad de los espacios ISPR. Las diferentes modalidades de almacenamiento incluyen módulos ISPR completos o espacios de almacenamiento tamaño sub-rack, como taquillas, cajones, bandejas, contenedores con velcro en los pasillos, plataformas externas de almacenamiento y bolsas de carga blandas<sup>[87]</sup>. Todo ello está organizado mediante códigos de color en un sistema denominado 'Sistema de gestión de inventario' (IMS), un catálogo electrónico minucioso de objetos y localizaciones.

A este sistema hay que añadir el uso 'improvisado' que la tripulación le puede dar a medios quizá no tan sofisticadas como la cinta adhesiva para colocar objetos en las paredes. Como afirma Mark Watney en la novela 'The Martian' de Andy Weir, «resulta que ni siquiera la NASA puede mejorar la cinta adhesiva».

En cuanto a espacio dedicado, llama la atención a simple vista la enorme cantidad destinada exclusivamente al almacenamiento. Podemos verlo gráficamente en el anexo 4 (integración volumétrica 12). A primera vista quizá pueda parecer incluso excesivo, pero como hemos visto, está justificado. Módulos enteros, como el ELM o el PMM, cumplen la única función de aumentar la capacidad de almacenamiento de la estación. E incluso espacios que no habían sido originalmente diseñados para ello, como las escotillas, los PMA o el espacio presurizado del armazón Z1, han sido reacondicionados como espacios de almacenamiento a lo largo del tiempo.

Dentro de la consideración del almacenamiento, hay que hacer mención aparte a la gestión de residuos. Como hemos visto, no es sencillo en un ambiente presurizado el deshacerse de los residuos que, con el tiempo, va generando el uso de la estación y las propias actividades de sustento de la tripulación.

Los residuos en la EEI se separan en primer lugar en biológicamente activos o inactivos, y una vez clasificados, se almacenan temporalmente en los vehículos orbitales *Progress* utilizados para el reabastecimiento de la estación. Dado que estos vehículos no tienen capacidad de reentrada, se desintegran de forma controlada en la atmósfera, lo que los convierte en los candidatos perfectos para actuar de 'camiones de basura' asegurándose de que los residuos de la EEI son destruidos. Esto es importante dado el creciente problema de la basura espacial en la OTB: si estos residuos no fueran desorbitados y simplemente se lanzaran al exterior de la estación, podrían permanecer durante años en la OTB, a unas velocidades en las que un simple fragmento de apenas unos milímetros tiene la energía suficiente para destruir un satélite de telecomunicaciones al impactar contra él.

## 3.3.5 ESTÉTICA Y BIENESTAR

Hasta este punto, hemos analizado consideraciones de habitabilidad relacionadas con la fisiología humana, así como los componentes físicos de la habitabilidad, más o menos importantes en cuanto a supervivencia, salud o efectividad de la misión, y su relación con la tripulación y los espacios de la estación. Ahora vamos a dar un paso más y a estudiar consideraciones menos prioritarias, pero igualmente estudiadas en el proceso de diseño de la EEI, consideraciones que tienen que ver con los efectos psicológicos del confinamiento de larga duración en entornos reducidos y los mecanismos por los que se combaten sus efectos en el rendimiento de las tripulaciones.

Es en este apartado en el que la ingeniería aeroespacial se encuentra de una forma más evidente con la arquitectura. Las consideraciones que trataremos son algunos de los temas que llevan siglos estudiándose en la arquitectura de la Tierra, en contextos diferentes, pero respondiendo al fin y al cabo a un habitar definido fundamentalmente por los factores humanos, que son relativamente independientes del tiempo y el lugar.

### Iluminación

Numerosos estudios desde la división man-systems de la NASA<sup>[88]</sup> <sup>[89]</sup> <sup>[90]</sup> <sup>[91]</sup> han investigado los efectos de la iluminación en el rendimiento humano a través de su influencia en los ciclos circadianos, así como sus efectos fisiológicos y psicológicos, llegando a conclusiones similares. Caballero-Arce<sup>[89]</sup> afirma que el diseño de los hábitats espaciales, especialmente para estancias de larga duración, tiene que poner un énfasis especial en la arquitectura espacial y la psicología ambiental, complementando la ingeniería aeroespacial, para reducir la enfermedad y el estrés en la tripulación. El papel de la iluminación se considera esencial en este trabajo.

Este concepto de la iluminación dinámica, aplicada a la EEI a partir de la instalación, en 2016, del sistema SSLA (Solid-State Light Assemblies) hace uso de las propiedades de la luz en sus diferentes longitudes de onda y sus efectos en el ciclo circadiano humano (influyendo directamente en la producción de hormonas como la melatonina) para generar un ambiente de luz variable, de intensidad automatizada o regulable según necesidad, que optimice el rendimiento de la tripulación. El sistema reemplaza la iluminación GLA (General Luminaire Assembly) consistente hasta ese punto en lámparas fluorescentes de un único color, por luminarias LED de menor consumo (Figura 3.16) y que adaptan su producción lumínica a lo largo del 'día', de la siguiente forma (Figura 3.17)<sup>[92]</sup>:

- el modo 'general' aporta una iluminación neutral, de amplio espectro, con picos de intensidad en el azul para suprimir la producción de melatonina y aumentar el estado de alerta, y picos en las longitudes de onda rojas y amarillas para compensar las longitudes de onda azules.
- el modo 'pre-sueño' reduce el espectro y emite picos más pronunciados en las longitudes de onda rojas y el amarillos, una luz más cálida que favorece la producción de melatonina e incita al sueño.
- el modo 'cambio de fase' reduce el espectro hacia las longitudes de onda azules, suprimiendo drásticamente la producción de melatonina y aumentando la concentración por encima del modo 'general'. Se usa para momentos particulares en los que los astronautas requieren un cambio en su ciclo circadiano.

Cada módulo tiene una cantidad determinada de luminarias SSLA en función del espacio a iluminar y de los componentes que puedan bloquear la iluminación directa. Dentro de la sección del módulo, las luminarias se instalan como parte de los paneles desmontables en las esquinas entre los espacios ISPR. En concreto, dado que en la Tierra la luz incide predominantemente desde arriba (debido a que la componente directa de la irradiancia solar, mayoritaria en condiciones de cielo despejado y con baja carga de partículas de aerosol, depende del ángulo cenital solar<sup>[93]</sup>), las luminarias se sitúan en las esquinas cénit del módulo, favoreciendo de esta forma la orientación de la tripulación. Éste es uno de los mecanismos 'blandos' para definir arquitectónicamente la orientación que discutimos cuando analizamos la consideración de orientación espacial, en la sección 3.3.1.

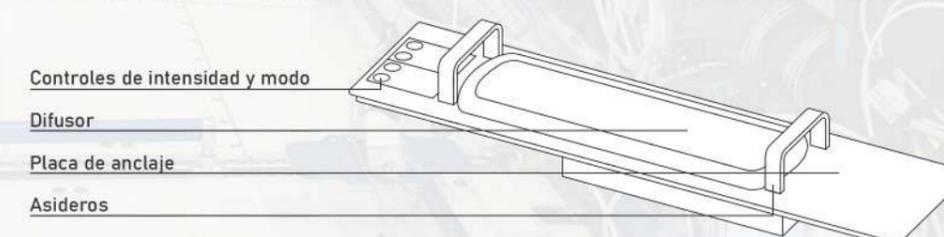


Figura 3.16: Luminaria SSLA. Elaboración propia a partir de la información en Maida, 2014<sup>[90]</sup>.

<sup>[91]</sup> Tibbits, Ted W. (1994). *International Lighting in Controlled Environments Workshop*. Resumen de la conferencia. NTRS, NASA.

<sup>[92]</sup> Maida, James C. (2014). *Introduction to the Solid State Based Interior Lighting System for ISS*. NASA Center for AeroSpace Information (CASI), NASA/Langley Research Center, Hampton.

<sup>[93]</sup> El ángulo cenital solar es el ángulo formado por la dirección de los rayos solares con el cénit del observador.

<sup>[84]</sup> Häuplik-Meusburger, Sandra (2011). *Architecture for astronauts*. Springer Wien, Springer Praxis Books. Viena.

<sup>[85]</sup> Lebedev, Valentin V. (1998). *Diary of a cosmonaut*. Phytoresource Research. College Station, Texas.

<sup>[86]</sup> Portree, David S. F. (1995). *Mir hardware heritage*. Informe, Nasa Technical Reports Server (NTRS), NASA-RP-1357. Johnson Space Center.

<sup>[87]</sup> Kitmacher, Gary H. (2015). *Reference guide to the international space station, utilization edition*. Johnson Space Center. NASA, Houston.

<sup>[88]</sup> Brainard, G. C. (1994). *Effects of light on brain and behavior*. Resumen de la conferencia (No. CONF-9403214-). Wisconsin Univ., Madison, EEUU.

<sup>[89]</sup> Caballero-Arce, C. (2012). *Lighting of space habitats: Influence of color temperature on a crew's physical and mental health*. AIAA Conference Papers. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Reston.

<sup>[90]</sup> Sloney, D. H. (1994). *Ocular hazards of light*. Resumen de la conferencia. *International Lighting in Controlled Environments Workshop*. NTRS, NASA.

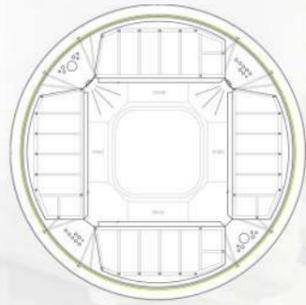
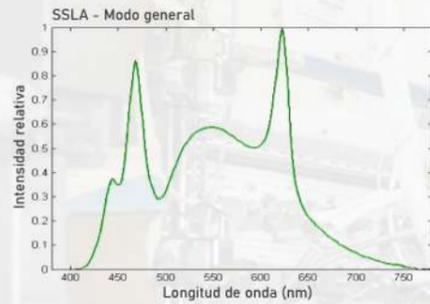


Figura 3.17: Especificaciones y localización de las luminarias SSLA. Información extraída de James C. Maida (2014)<sup>[94]</sup>.

La luz que ilumina un espacio no sólo tiene influencias fisiológicas en las personas que lo habitan. El tipo de iluminación influye directamente en la propia percepción del espacio mediante factores como el color, que veremos con más detalle en la siguiente consideración, y las sombras arrojadas. En este punto es destacable el trabajo arquitectónico de Louis Kahn, que actúa casi como un muestrario en el que la luz y las sombras arrojadas se utilizan para dar mayor o menor presencia a soluciones constructivas, geometrías u objetos dentro de los espacios<sup>[95]</sup>. Como ejemplo casi paradigmático de esto tenemos el Kimbell Museum o la galería de arte de la Universidad de Yale, ambos en EEUU.

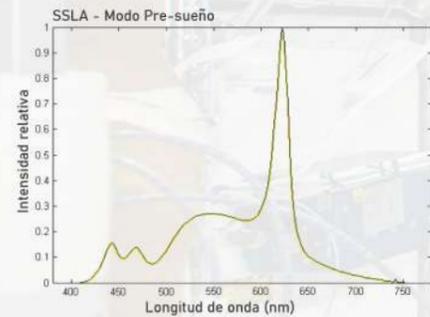
Esto tiene importantes lecturas de cara a los ambientes interiores de la EEI y su iluminación. Una mayor o menor intensidad de la luz, especialmente en ambientes con una gran carga de objetos como son los módulos de laboratorio y sus racks ISPR, afecta a la percepción del espacio a través de las sombras. Bajo luces más intensas, el contraste en las sombras es mayor y los objetos aparecen más presentes en el espacio. Con luces más tenues y sombras menos marcadas, los objetos pasan a un segundo plano y los límites entre ellos se difuminan. El efecto directo en la percepción del 'orden' dentro de los módulos por este fenómeno es sutil, pero evidente.

Si bien Kahn manifestó siempre su preferencia por la luz natural frente a la luz artificial, en base a su variabilidad y a los casi infinitos matices que podían adquirir los materiales de los edificios bajo ella, en el sistema SSLA de la EEI podemos encontrar un pequeño avance en este aspecto. La luz en la estación es variable por motivos completamente distintos, pero este hecho nos permite jugar con factores como la intensidad lumínica y con sus efectos en el espacio. La localización de las luminarias en la volumetría general puede encontrarse en el anexo 4 (integración volumétrica 13).



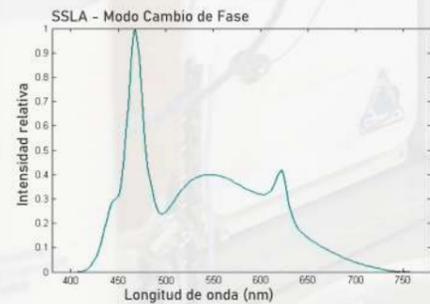
Intensidad lumínica (candelas):

Normal	210 cd
Máximo	340 cd
Mínimo	119 cd



Intensidad lumínica (candelas):

Normal	90 cd
Máximo	130 cd
Mínimo	43 cd



Intensidad lumínica (candelas):

Normal	420 cd
Máximo	420 cd
Mínimo	147 cd

## Color

El color es una consideración contradictoria en cuanto a su importancia en el proceso de diseño de la EEI. Por un lado, juega un papel indudablemente relevante como herramienta de clasificación: ya hemos visto que el sistema de inventario de la estación utiliza códigos de color para la localización de los distintos objetos, y a esto hay que sumar el hecho de que los útiles personales de los astronautas (como las bolsas con utensilios de higiene personal) están igualmente marcadas con un código de colores. Por otro lado, la EEI supone un paso hacia atrás con respecto a la *Mir*, e incluso a las *Salyut*, en cuanto a uso del color como herramienta vinculada al espacio, ya que ambas estaciones utilizaron códigos de color para definir la orientación de los espacios.

En el módulo central de *Mir* se tomó la decisión de utilizar colores ligeros que imitaran los terrestres (verde oscuro en el 'suelo', verde claro en las 'paredes' y blanco azulado en el 'techo') esperando que ello facilitara la orientación de los cosmonautas. Aunque este mecanismo funcionaba bien, en el diario de Levedev<sup>[96]</sup> se nos da una visión más contextualizada al respecto. Si bien afirma que los colores de las paredes «le ayudaban», la principal referencia que usaba para orientarse eran los objetos en las paredes y las ayudas de movimiento.

«En el futuro, los asideros deberían estar marcados con colores según los planos de la estación, de esa forma sería mucho más fácil orientarse. [...] Pasaba una cantidad ridícula de tiempo solamente mirando alrededor para averiguar dónde estaba.»

A este respecto, la EEI utiliza el color azul intenso como ayuda visual para localizar los asideros y demás ayudas al movimiento. Pero más allá de esta utilidad como herramienta de organización u orientación, la presencia del color en el diseño de los módulos es prácticamente nula, siendo las paredes o bien de un blanco neutro o bien del color propio de los materiales utilizados.



Abajo: Estructura del techo en la galería de arte de la Universidad de Yale (Imagen 13).

Arriba: Kimbell Museum, Galería (Imagen 14).

<sup>[94]</sup> Maida, James C. (2014). *Introduction to the Solid State Based Interior Lighting System for ISS*. NASA Center for AeroSpace Information (CASI), NASA/Langley Research Center, Hampton, 2014.

<sup>[95]</sup> Juárez Chicote, Antonio (1998). *Continuidad y discontinuidad en Louis I. Kahn: material, estructura y espacio*. Tesis. ETS de arquitectura, Universidad Politécnica de Madrid.

<sup>[96]</sup> Levedev, Valentin V. (1998). *Diary of a cosmonaut*. Phytoresearch Research. College Station, Texas.

El fenómeno del color, muy complejo y objeto de estudio científico particular<sup>[97]</sup>, ha dado lugar a todo un álgebra del color, con el estudio exhaustivo de sus atributos. Estos atributos son varios: claridad, tono, saturación, forma, localización, duración, fluctuación, textura, brillo, etc. Cabe destacar, entre todos ellos, los tres primeros, por su influencia en la componente psicológica de la percepción del color. Del estudio de estos atributos han surgido además diversas clasificaciones más rigurosas que las líneas arbitrarias mediante las que definimos los distintos colores, y leyes como las de Grassmann que rigen las mezclas aditivas de colores.

Pero junto a esta naturaleza más reglada de la psicofísica del color, existe también una importante componente sociológica y cultural, una dimensión subjetiva más vinculada quizá a las artes que a la ciencia. Un buen ejemplo podría ser el distinto significado de la luz verde en 'El gran Gatsby', de Scott Fitzgerald, que representa los sueños de futuro del protagonista, o el complejo mundo de la simbología del verde en el 'Romancero gitano' de García Lorca, que puede representar varias cosas en función del contexto, desde la muerte al instinto sexual o la frustración amorosa. Estas interpretaciones culturales dan mucho más 'color' (nunca mejor dicho) a una interpretación meramente física.

Esta complejidad del fenómeno del color explica en parte su ausencia como mecanismo regulador de la espacialidad en la EEI, campo en el que sí se ha adentrado, por su componente más artística, la arquitectura en la Tierra. Como ejemplo propongo dos imágenes, ambas del mismo edificio, la casa Gilardi de Luis Barragán, el maestro mexicano del color en la arquitectura. Es evidente que el espacio varía sustancialmente en cuanto a impresiones generadas en el espectador, y que el factor clave en esta variación es el color, en mayor medida incluso que las dimensiones del espacio<sup>[98]</sup>.

El hecho mismo de que Barragán, inmerso en la colorida cultura mexicana, utilice el color en su arquitectura de la forma en que lo hace, es indicativo de que este elemento en particular, y las impresiones que produce, están muy vinculadas a la cultura. Y aunque sería conveniente investigar más en profundidad las variaciones regionales en cuanto a la influencia del color en la percepción de la espacialidad, a nivel local puede afirmarse que dichos efectos perceptivos han podido ser localizados por parte de diversos estudios recientes<sup>[99] [100] [101]</sup>.

Así que, existiendo como factor definitorio, a un nivel empírico, de las dimensiones de espacios interiores, y con la amplia base experimental de la que se dispone en la arquitectura en la Tierra, resulta sorprendente que las agencias espaciales no hayan tenido en cuenta el color, en su componente espacial, a la hora de diseñar la próxima generación de hábitats orbitales. En la EEI en concreto se trata, sin duda, de una consideración infravalorada, a explotar.

## Vistas

¿A quién no le gusta que su lugar de trabajo o residencia tenga vistas al paisaje? Al fin y al cabo, los seres humanos somos criaturas muy visuales y para nosotros las vistas suponen un aliciente, un estímulo extra que puede cualificar enormemente un espacio desde su relación con el exterior. Y desde luego, en ningún lugar son más impresionantes las vistas que a 400 km de altura, en la OTB.

Las ventanas en las estaciones espaciales no son algo reciente. Las *Salyut* las tenían, y también *Skylab* y los módulos de la estación *Mir*. De hecho, los módulos rusos de los que desciende el módulo *Zvezda* de la EEI contaban con varias ventanas, algunas de ellas para uso personal de los tripulantes en sus cabinas individuales, esto es, con un uso más recreativo que estrictamente funcional. ¡Ni más ni menos! Esto es algo que, como hemos visto a lo largo de este trabajo, es muy extraño en el diseño de hábitats orbitales.

La EEI cuenta con dieciocho ventanas, cuyas localizaciones están reflejadas en el anexo 4 (integración volumétrica IV14). La mayoría de ellas, catorce, están en *Zvezda*, y el resto están situadas en el módulo *Kibo*, con sus dos ventanillas para el control de la plataforma exterior, en *Destiny*, que cuenta con una amplia ventana de observación en uno de los módulos ISPR, y en puerto nadir del Nodo 3 *Tranquility*, que tiene instalada la famosa cúpula de diseño europeo, que cumple funciones vitales tanto a la hora de guiar actividades extravehiculares, de acoplar vehículos orbitales y de usar el brazo robótico, como en el ámbito científico en la observación de la Tierra.

Pero más allá de lo estrictamente funcional, este emocionante espacio supone un antes y un después para la estancia en la EEI y su relación visual con nuestro planeta. Más que un puerto de observación convencional, se trata de un espacio de observación. Y esto es importante, porque permite que los tripulantes permanezcan en su interior. Es un lugar de estancia para tiempos prolongados, en el que la vista sobre la Tierra lo es todo. En su libro de fotografías<sup>[102]</sup>, el astronauta Terry Virts nos relata cómo vivió una llamarada solar en 2015 y las impresionantes auroras que dejó en la Tierra, que podemos ver en la imagen de la derecha:

«Estaba flotando en la cúpula, en medio de una nube verde de radiación. [...] Fue surrealista, sobrenatural incluso, una de las experiencias más inverosímiles de mi vida... Siempre estaré agradecido por los golpes de suerte que hicieron esa experiencia posible.»

Derecha: Aurora sobre el Reino Unido, fotografiada desde la cúpula por Terry Virts. (Imagen 17)<sup>[102]</sup>.



Arriba: Casa Gilardi, pasillo (Imagen 15).

Abajo: Casa Gilardi, piscina (Imagen 16).



[97] Casas Peláez, J. (1994). *Óptica* (7ª edición). p. 535-550. Librería Pons, Zaragoza.

[98] Abellanas Panigua, C. (2015). *La plástica del color en la obra de Luis Barragán: una aproximación experimental*. Tesis. UPV.

[99] Küller, R. Et al. (2009). *Color, arousal, and performance - A comparison of three experiments*. En *Color, research and application*, Vol. 34. Wiley.

[100] Oberfeld, D. Et al. (2010). *Surface lightness influences perceived room height*. En *Quarterly journal of experimental psychology*, vol 63, nº10. Londres.

[101] Odabaşioğlu, S, & Olguntürk, N. (2015). *Effects of coloured lighting on the perception of interior spaces*. En *Perceptual and motor skills*, v. 120, nº1, p. 183-201. SAGE Publications, Los Ángeles.

[102] Virts, Terry (2017). *View from Above: An Astronaut Photographs the World*. National Geographic.

Scott Kelly, en una entrevista en 2018<sup>[103]</sup>, habla sobre las vistas de la Tierra desde la OTB, y su importante efecto en su propia experiencia:

«El planeta es increíblemente bello. Te deja sin aliento. Pero habiendo dicho eso, partes de él están contaminadas, con niveles constantes de contaminación en ciertas partes de Asia. Puedes ver cómo de frágil parece la atmósfera; es muy delgada, [...] casi como una lente de contacto en el ojo de alguien, y cuando te das cuenta de que todos los contaminantes que emitimos están contenidos en esa delgada capa sobre la superficie... Da miedo verlo, de hecho. [...] Miras al planeta sin fronteras políticas, sobre todo durante el día [...] y todo parece parte de una nave. La nave Tierra. Todos estamos volando a través del espacio, en el mismo equipo. Esto te da ésta perspectiva (la gente la ha descrito como una perspectiva orbital), sobre la humanidad, y te llevas esa impresión de que tenemos que trabajar mejor, mucho mejor, para resolver nuestros problemas comunes.»

Así que las vistas sobre la Tierra, la fotografía de la superficie, el mirar las formaciones geológicas y atmosféricas, las luces de las ciudades... No es sólo un pasatiempo, sino que ayuda psicológicamente a los tripulantes durante su estancia en órbita e incluso modifica su perspectiva. E igual que ocurría con *Earthrise*, como vimos en la sección 1.2.3, las imágenes tomadas desde esta ventana al mundo tienen la capacidad de afectar a nuestra propia visión sobre nuestro planeta, algo que ocurre especialmente con las que reflejan la actividad humana en su superficie.

## Acústica

El confort acústico es una consideración importante a tener en cuenta, sobre todo en un espacio cerrado en el que el ruido debe disiparse en una atmósfera presurizada muy limitada. Los distintos módulos tienen equipamiento ruidoso como ventiladores, bombas, compresores, aviónica, y sistemas de soporte vital que tienen que estar activos todo el tiempo. Los racks de carga y experimentos, además, tienen sus propios ruidos que varían en intensidad en función del experimento que se esté llevando a cabo<sup>[104]</sup>. En las mediciones llevadas a cabo en el estudio sonoro de Limardo-Rodríguez et al.<sup>[105]</sup> en diversas localizaciones del segmento americano, se detectaron niveles de ruido, en las zonas más conflictivas (módulo *Destiny*), de entre 52.5 y 59.1 dB.

La OMS recomienda no superar los 85 dB en el lugar de trabajo en exposiciones de más de una hora, para evitar daños permanentes en el oído. Sin embargo, este límite tiene que ver con la salud, siendo los límites de confort, por lo general, más estrictos. La misma organización califica de 'molestia seria, para el día o para la noche' cualquier ruido prolongado de más de 55 dB. En España el Real Decreto 1367/2012, que desarrolla la Ley de Ruido, es algo más laxo. La norma distingue tres periodos, día (7:00-19:00), tarde (19:00-23:00) y noche (23:00-7:00). Para esos tres periodos, se establecen una serie de límites de calidad acústica por periodo ( $L_{d}$ ,  $L_e$  y  $L_n$ , respectivamente) y tipo de área acústica. Para el uso sanitario, docente y cultural, el más restrictivo, se establecen los límites de  $L_{d}$ ,  $L_e$  y  $L_n$  en 60, 60 y 50 dBA.

Así pues, el impacto de las fuentes de ruido en la EEI, que como hemos visto pueden llegar a resultar molestos según el criterio de la normativa española, debe controlarse para evitar efectos adversos en la salud física o psicológica de los astronautas, en su rendimiento como tripulación, o en la configuración de un espacio habitable confortable. El control de misión de la EEI tomó medidas en su momento para reducir la carga sonora de alguno de los espacios más conflictivos de la estación, mediante la creación de un grupo de trabajo especializado sobre acústica que aportara soluciones técnicas. El grupo identificó los siguientes lugares conflictivos:

- Módulo *Destiny*, en especial la parte trasera y los componentes de la bomba de refrigeración, el extractor de CO<sub>2</sub>, y el registrador de cortes.
- Adaptador de acoplamiento presurizado 1.
- Módulo *Zarya*, en especial en la parte cercana al adaptador de acoplamiento presurizado.
- Módulo *Zvezda*, en especial en la parte trasera.
- Cápsulas *Soyuz* y *Progress*, con la ventilación activada.

Desde que se tomaron estas mediciones, se han llevado a cabo muchos esfuerzos para reducir el ruido en las zonas y componentes afectados, con reemplazos y modificaciones de equipamiento. Sin embargo, estudios recientes<sup>[105]</sup> <sup>[106]</sup> han mostrado que sigue habiendo problemas de exposición por encima de los niveles recomendados a la hora de usar algunos equipamientos como la cinta de correr. Frente a esto, los tripulantes utilizan protección auditiva.

El contrapunto a estos lugares problemáticos está en los lugares silenciosos de la estación, que ya hemos introducido anteriormente y que podemos ver en el mapa de ruido en la página 38. Son espacios con poco o ningún equipamiento, apartados de los centros de producción de ruidos como el caso del módulo *Kibo*, o activamente insonorizados como el caso de los *crew quarters*, cuya efectividad podemos ver en las mediciones durante el periodo de sueño<sup>[105]</sup>.

## Personalización y decoración

En este trabajo hemos hablado en múltiples ocasiones de la necesidad de apropiarse de los espacios para que estos pasen de ser una 'máquina de habitar' a ser un 'hábitat'. Los esfuerzos en este sentido los llevan a cabo, en su mayor parte, los propios tripulantes de la estación, que llevan a bordo útiles personales con los que personalizan los espacios que habitan.

La personalización como método para mejorar la habitabilidad de los espacios era algo que ya estaba presente en el diseño de *Skylab*, en concreto en las cabinas privadas de la tripulación. El diseño de Raymond Loewy para cada una de estas cabinas era ligeramente diferente, con el objetivo de crear una sensación de identidad<sup>[107]</sup>. Asimismo, se permitió la colocación en las superficies 'verticales' de los útiles personales de los tripulantes.

Esto es algo que se ha repetido, en parte, en los *crew quarters* de la EEI. Una pared entera de estos espacios (la pared derecha, que se adapta a la forma del módulo) está recubierta de una tela que permite el uso del velcro para colocar utensilios, imágenes personales, y regalos que se hacen llegar a los astronautas desde la superficie.

La relación con la superficie es otro aspecto en el que aparece la decoración. El uso del módulo *Kibo* como escenario para conferencias, comunicaciones audiovisuales con la Tierra y eventos educativos, ha llevado a su decoración con diversos elementos de personalización que impactan de forma indirecta en su uso. Esta función improvisada, surgida del mayor 'orden' del módulo japonés con respecto a los demás, es un buen ejemplo de apropiación de los espacios más allá del uso establecido.



Derecha: Interior del *crew quarter* de Karen Nyberg (Imagen 18).

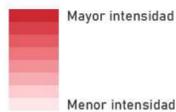
<sup>[103]</sup> Feloni & Richards (2018). <https://www.businessinsider.com/nasa-astronaut-scott-kelly-year-in-space-relationship-with-twin-2018-3>.

<sup>[104]</sup> Goodman, J. R. (2003). International space station acoustics. In INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings v. 2003, n.º. 1, p. 712-722. Institute of Noise Control Engineering.

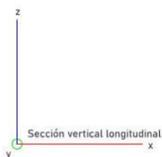
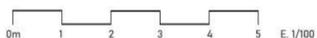
<sup>[105]</sup> Limardo-Rodríguez, J. G. et al. (2015). *Status: Crewmember Noise Exposures on the International Space Station*. NASA/Langley Research Center, Hampton.

<sup>[106]</sup> Limardo-Rodríguez, J. G. et al. (2017). *International Space Station (ISS) Crewmember's Noise Exposures from 2015 to Present*. 47th International Conference on Environmental Systems.

<sup>[107]</sup> Häuplik-Meusburger, Sandra (2011). *Architecture for Astronauts*. Editorial Springer Praxis Books. Springer Wien, Viena, 2011.



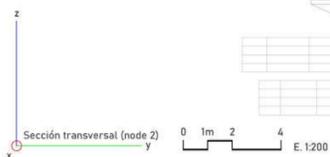
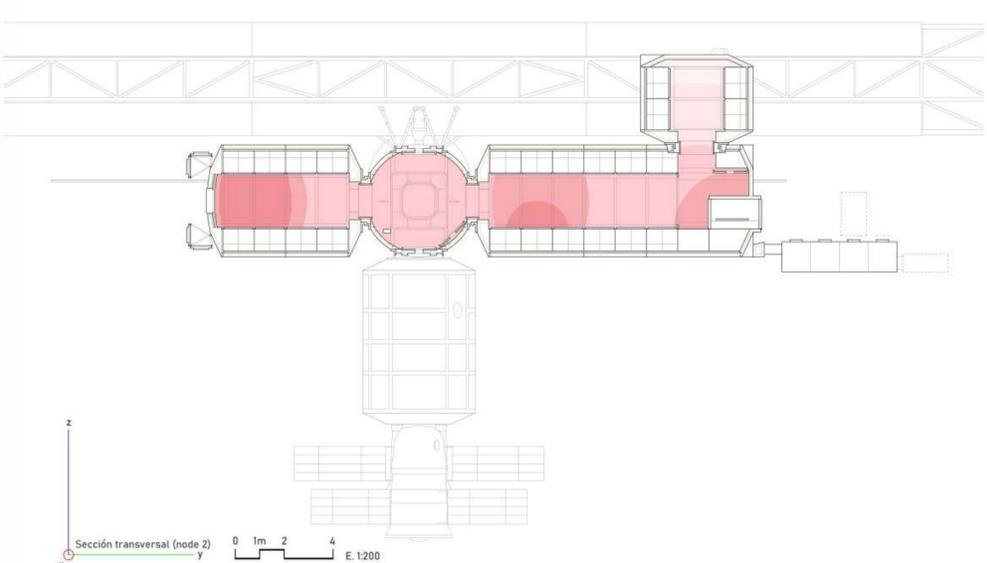
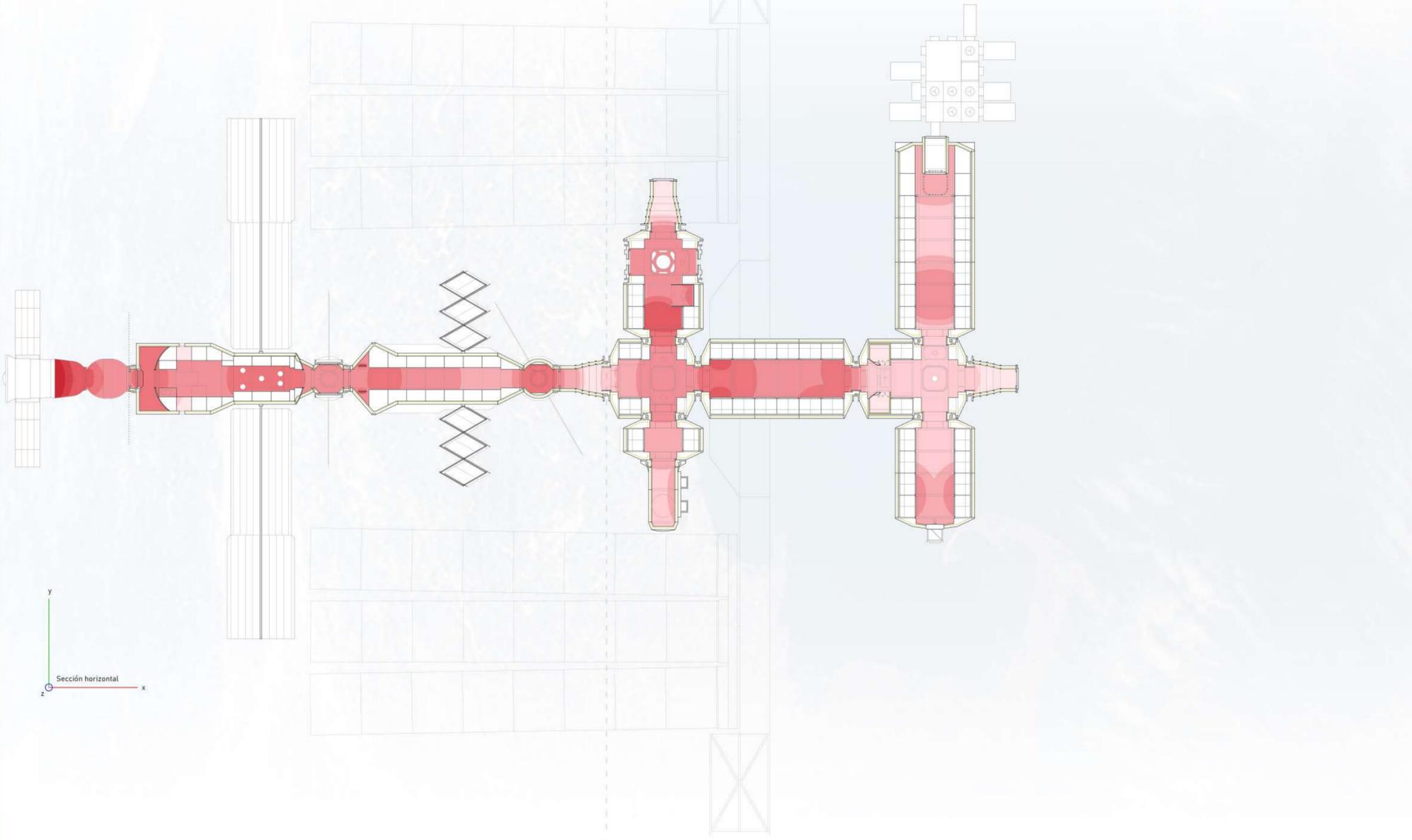
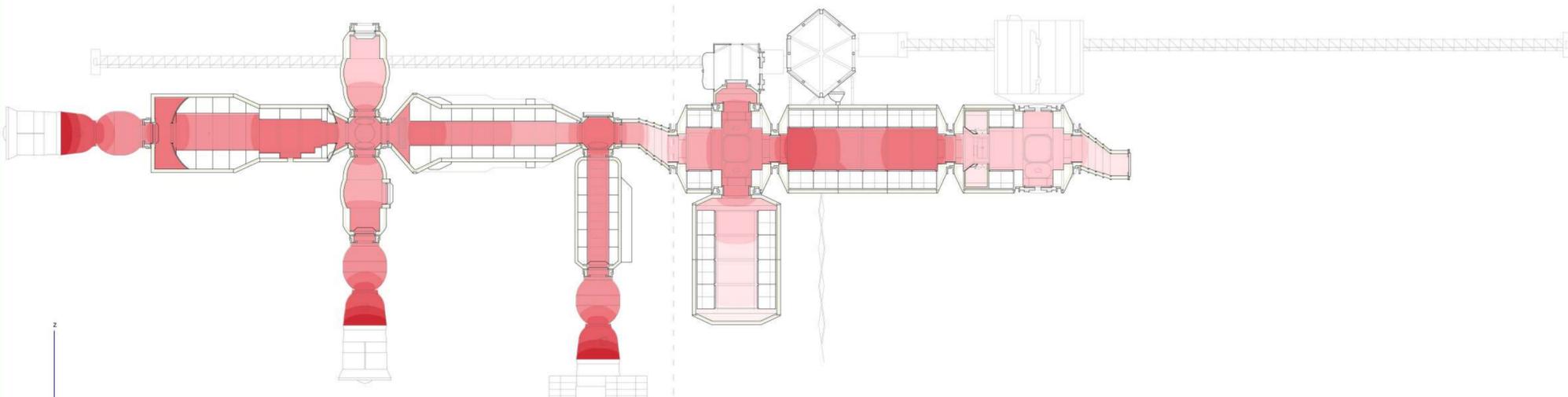
Intensidad del ruido en el espacio presurizado de la EEI<sup>RP</sup>.



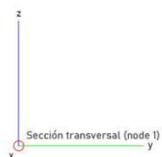
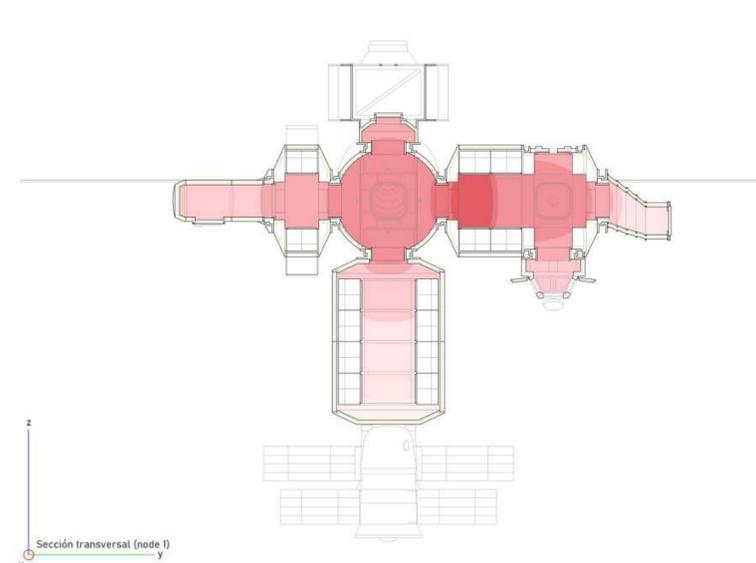
Sección vertical longitudinal



Sección horizontal



Sección transversal (node 2) E. 1/200



Sección transversal (node 1)

Un estudio desde la óptica de la arquitectura

### SECCIÓN 4: SITUACIONES SIMILARES Y RESPUESTAS ARQUITECTÓNICAS

Esta sección busca cumplir la primera parte del objetivo OE2, es decir, obtener una visión intermedia entre la arquitectura y la ingeniería aeroespacial mediante el análisis de situaciones análogas en la superficie de la Tierra. La sección se divide en dos partes: una primera de identificación y análisis breve de los análogos terrestres, y una segunda de estudio de estos análogos desde los criterios y consideraciones analizados en el apartado 3.

#### 4.1 IDENTIFICACIÓN DE ANÁLOGOS TERRESTRES

Conocidos los criterios y consideraciones y el papel que jugaron durante el diseño de la EEI, estamos en condiciones de empezar a construir esa visión intermedia entre la arquitectura y la ingeniería aeroespacial. En este proceso entran en juego los análogos en la Tierra.

Un análogo en la Tierra queda definido como una solución arquitectónica en la superficie terrestre a problemáticas similares a las que se pueden dar en órbita, tanto en el ámbito constructivo como en la habitabilidad o en los factores humanos de los residentes en estas estructuras. Para la identificación de análogos en la Tierra se tienen en cuenta, en sus diversas combinaciones, el tamaño reducido del espacio habitable, la modularidad y prefabricación del sistema constructivo, la hostilidad del entorno en que se sitúan, y el aislamiento al que puedan estar sometidos los residentes o tripulantes. En base a esto, se han identificado cuatro situaciones y soluciones arquitectónicas que cumplen uno o más de estos criterios:

- vivienda mínima (tamaño reducido)
- vivienda irregular (tamaño reducido)
- metabolismo japonés (tamaño reducido, modularidad y prefabricación)
- bases árticas (tamaño reducido, hostilidad del entorno, aislamiento)

Quizá el hecho de que soluciones tan diversas y estudiadas desde hace décadas tengan aplicabilidad alguna a una maravilla tecnológica contemporánea como es la EEI puede generar algo de escepticismo. Es conveniente recordar, sin embargo, que nos enfrentamos a la cuestión del habitar; una práctica que, más allá de lo paramétrico y funcional, está muy ligada a la condición humana y altamente influida y adaptada al entorno. Las personas tienen las mismas necesidades y las mismas tendencias en cuanto a los espacios ya estén en la Antártida o en un barrio de vivienda irregular, así que el estudio de cómo varían estas soluciones arquitectónicas en función del entorno y los condicionantes particulares, y cómo se han ido adaptando a lo largo del tiempo en mayor o menor medida al confort de sus habitantes, puede ser de gran ayuda a la hora de proponer evoluciones similares en los hábitats orbitales futuros o existentes, conforme a la dimensión propositiva que abordamos de cara a la consecución del objetivo OE3 de este trabajo.

## 4.1.1 VIVIENDA MÍNIMA

El concepto de vivienda mínima apareció en escena durante las primeras décadas del siglo XX, en un contexto de entreguerras y con unas ciudades que experimentaban un crecimiento demográfico sin precedentes debido a las migraciones masivas del entorno agrícola al urbano y al boom de población propiciado por la segunda revolución industrial. La vivienda comenzaba a escasear, y mientras las familias alemanas de trabajadores se hacían como podían en las infames *Mietzkaserne*<sup>[108]</sup> de Berlín, los arquitectos de la época empezaban a pensar en el saneamiento de la vivienda en todas las grandes urbes, que experimentaban problemas similares.

En el Segundo Congreso Internacional de Arquitectura Moderna (CIAM) de 1929-30<sup>[109]</sup>, se trabajó con la idea del *existenzminimum*, o espacio mínimo vital, como solución para el problema de la vivienda. Surgió así la vivienda mínima, basada en el principio de satisfacer, en el mínimo espacio posible, las necesidades biológicas y psicológicas de una familia (para el caso de estudio de este trabajo, bien podríamos sustituir familia por tripulación y poner la solución directamente en órbita). Aunque en los CIAM no se llegó a ninguna solución definitiva u optimizada para este concepto de *existenzminimum*, sí se sentaron las bases teóricas para diversos experimentos que tendrían lugar en las décadas posteriores, especialmente durante la reconstrucción de Europa tras la Segunda Guerra Mundial.

La vivienda mínima sigue siendo relevante a día de hoy en una sociedad que busca la máxima eficiencia en el uso de sus recursos. Tenemos múltiples ejemplos recientes de este tipo de arquitecturas de optimización del espacio, como pueden ser las viviendas *Keetwonen* de Tempohousing (2002), la casa en Shinjuku de Junpei Nousaku (2005) o la villa *Mokum* de Kampman Architecten (2014), todos ellos analizados por Narváez<sup>[110]</sup>. Nos basaremos en estos tres ejemplos para establecer una serie de características comunes.

### Villa *Mokum* (módulo)

Residencia/vivienda para estudiantes con habitaciones individuales

Kampman Architecten, 2014

Ámsterdam, Países Bajos

### Casa en Shinjuku

Pequeña vivienda de tres plantas en el barrio de Shinjuku, en el centro de Tokyo

Junpei Nousaku Architects, 2005

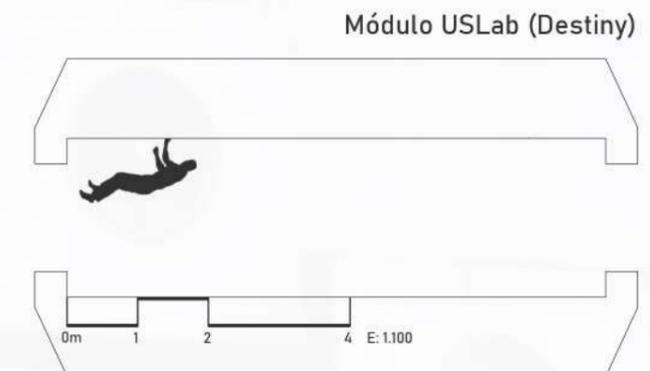
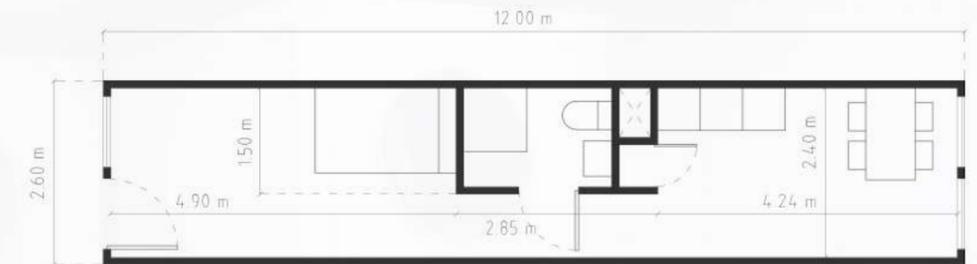
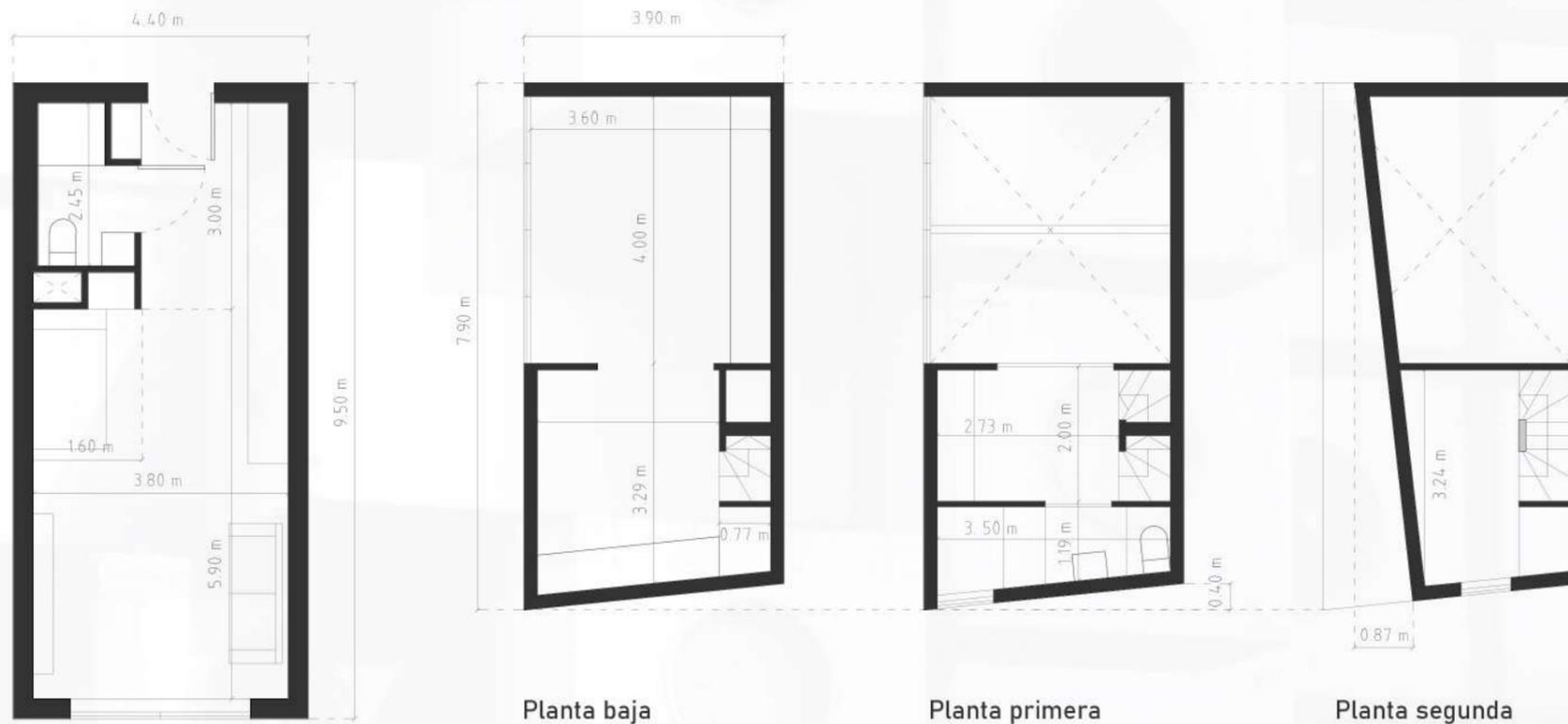
Tokyo, Japón

### Viviendas *Keetwonen* (módulo)

Campus residencial para estudiantes a las afueras de Ámsterdam, con conjuntos de habitaciones individuales a partir de contenedores de carga

Tempohousing, 2002

Ámsterdam, Países Bajos



<sup>[108]</sup> *Mietzkaserne* es el nombre dado a los conjuntos de viviendas de gran densidad y baja calidad generadas por colmatación del interior de manzana.

<sup>[109]</sup> Del Pozo y Barajas, A. (2011). *Carlo Aymonino (ed): La vivienda racional. Ponencias de los congresos CIAM 1929-1930*. En 'Proyecto, progreso, arquitectura', v. 5, nº9. Universidad de Sevilla.

<sup>[110]</sup> Narváez, Rocío (2018). *Vivienda mínima del siglo XXI: soluciones en Holanda y Japón*. Trabajo de fin de grado, ETS de arquitectura de la UPM.

<sup>[RP]</sup> Planimetría de elaboración propia a partir de los esquemas de la referencia <sup>[107]</sup>.

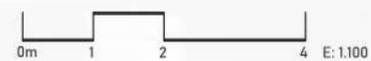
## Dimensión de los espacios

Comparando estas tres viviendas mínimas con el laboratorio *Destiny* como referencia, podemos ver que la escala del espacio es similar, aunque la superficie y el volumen habitable varían. En la Tabla 4.1 se recogen estas mediciones.

Pueden apreciarse unas dimensiones bastante similares, tanto en superficie como en volumen, entre el módulo *Keetwonen* y el módulo *Villa Mokum*, ambos diseñados como viviendas modulares para estudiantes. La casa en Shinjuku tiene unas dimensiones más pequeñas en planta, pero cuenta con tres alturas y un espacio de estancia en varias alturas, lo que genera un volumen 'habitabile' (al menos perceptible) mucho mayor. Si las comparamos con el espacio disponible en el módulo *Destiny*, podemos ver que estos estudios de vivienda mínima trabajan con espacios mayores en cuanto a volumen, si bien la mayor parte de este volumen se limita a la percepción espacial y no a su uso, al contrario de lo que ocurre en la OTB en la que la ausencia de gravedad permite la circulación por todo el espacio.

Ejemplo	Superficie (m <sup>2</sup> )	Volumen (m <sup>3</sup> )	VME (m <sup>3</sup> )
V. Mokum	33.40	101.40	40.76 (2 est.)
Shinjuku	44.27	195.60	33.79 (5 est.)
Keetwonen	28.78	83.35	22.76 (3 est.)
USLab	17.15 (x4)	38.58	38.58 (1 est.)

Tabla 4.1: Comparación de la dimensión de los espacios en tres ejemplos de vivienda mínima. Volumen total sin tener en cuenta tabiques de separación. VME (volumen medio por estancia) medido a interior de tabiques.



- Descanso
- Estancia
- Trabajo
- Aseo
- Recorrido principal
- Recorrido secundario

## Organización y usos

En los tres casos estudiados podemos ver que, con la excepción notable del aseo (independizado por razones obvias), se trabaja en todo caso con espacios unitarios, sin separaciones físicas totales mediante tabiques y conectados visualmente, de forma que el escaso espacio disponible pueda percibirse en su totalidad.

En cuanto a la separación funcional, los tres ejemplos actúan de forma diferente. La *Villa Mokum* ejerce el tipo arquitectónico 'habitación de hotel', en el que el baño, cercano a la entrada, genera un pequeño vestíbulo previo, mientras que el resto de los usos se agrupan en un único espacio continuo. En el contenedor *Keetwonen*, el aseo actúa de límite entre dos espacios conectados entre sí pero diferenciados, el espacio del habitar (sala de estar, cocina) y el espacio de descanso. En cuanto a la casa en Shinjuku, su separación en tres plantas propicia una separación funcional siguiendo ese mismo esquema: la planta baja acoge las funciones de habitar (sala de estar, cocina), la primera planta el descanso, y la segunda planta el trabajo (estudio).

## Recorridos

En este aspecto, y como resultado de la propia organización, se puede establecer una distinción entre la *Villa Mokum* y los otros dos ejemplos. Mientras que la primera lleva a cabo toda la circulación en un mismo espacio que comparte usos, con lo que este se convierte en un módulo estático en que la única circulación se da para ir al baño, en las otras dos existe un flujo entre espacios diferenciados con distintos usos, lo que genera volúmenes específicos de tránsito o núcleos de comunicación. En el caso del contenedor *Keetwonen* es el pasillo del aseo, y el caso de la casa en Shinjuku, la escalera. Uno horizontal y otro vertical, pero al final, expresiones de la misma función.



En conclusión, en los tres ejemplos podemos ver una gestión del espacio reducido de forma unitaria en lugar de fraccionaria, aumentando sus dimensiones aparentes, así como una separación de usos mediante claves constructivas (forjados) o espaciales (estrechamientos). El espacio puntual que necesita ser independizado, el aseo, aprovecha esta separación constructiva de tabiques para pautar el espacio interior. En cuanto a los volúmenes manejados, que en adelante se usarán como indicador de tratamiento espacial al discutir la gestión del espacio reducido, encontramos un rango por vivienda de 80 a 200 m<sup>3</sup>, o un volumen medio por estancia (más útil de cara a futuras comparaciones) que varía entre los 23 y los 40 m<sup>3</sup>.

## 4.1.2 VIVIENDA IRREGULAR

La vivienda irregular surge de unas condiciones similares a las de la vivienda mínima, pero sin la componente de planificación que pudo verse en los CIAM y en un contexto socioeconómico diferente. Tanto las *Mietzkaserne* alemanas como los asentamientos precarios tienen que ver con la desigualdad económica, la pobreza y la segregación. Pero mientras que en el Berlín de principios del siglo XX se produjo un proceso de colmatación de una ciudad de baja densidad con vivienda de baja calidad, en la actualidad lo que se produce es una expansión irregular de un centro urbano ya colmatado hacia el exterior, de forma no planificada y con viviendas extensivas, por lo general unifamiliares, de muy baja calidad constructiva y sin acceso a infraestructuras básicas. Este fenómeno se da en muchas grandes urbes de todo el mundo, pero es particularmente común en el suroeste asiático, en África y en América del Sur.

Por lo general, los barrios que resultan de este proceso son muy invasivos en el paisaje, y están situados lejos de los centros de las ciudades en zonas menos deseables del territorio en las que, debido a la topografía u otros factores, no se ha llevado a cabo ningún tipo de plan de actuación. Como ejemplo de esta situación tenemos la ya demolida ciudad amurallada de Kowloon en Hong Kong<sup>[111]</sup> (más próxima quizá a las *mietzkaserne* alemanas que a los barrios irregulares extensivos), las conocidas *favelas* de Rio de Janeiro, los extensos barrios conocidos como Pueblos Jóvenes en Lima, el barrio de Kibera en Nairobi (colindante con un campo de golf) o el de Orangi Town en Karachi, el mayor del mundo, con una población hacinada de dos millones y medio de personas.

El interés de los barrios de vivienda irregular para este trabajo radica en un modelo de vivienda que, debido a los escasos medios de los habitantes más que a la planificación, se ve abocado a hacer un uso intensivo de espacios muy reducidos, en ocasiones de una sola estancia para una o varias familias. En este sentido es equiparable a una vivienda mínima surgida de forma natural y, muy a menudo, con partes recicladas y materiales ligeros. Si bien existe en los últimos años una creciente fascinación por parte de los arquitectos con la vivienda irregular y, en general, con el dibujo de situaciones constructivas que surgen de forma no planificada<sup>[112]</sup>, no son muchos los ejemplos de estudios gráficos sobre las condiciones de la vivienda en estos barrios. Destaca en este sentido el trabajo de Chagas Cavalcanti<sup>[113]</sup> sobre la adaptación de los barrios de vivienda irregular en Latinoamérica entorno a la oferta de trabajo, y el estudio del 'equipo de exploración de la ciudad amurallada de Kowloon'<sup>[114]</sup> que llevó a cabo un exhaustivo análisis sobre ese peculiar lugar antes de su demolición. A continuación se comparará, en lo referente a espacios, esta última referencia con la información disponible sobre otro pequeño barrio de vivienda irregular mucho menos importante, pero no menos interesante: el Sacromonte de Granada.



Izquierda: Pueblos Jóvenes, Lima (Imagen 20).

M3 HABITACIONES vivienda irregular			
ÁREA PLANTA (x2,5m)	ÁREA SECCIÓN (x3m)		
	SACROMONTE	KOWLOON ED1	KOWLOON ED2
	11,24	10,92	48,324
	28,2	25,38	29,184
CUEVA 1	23,336	37,104	37,944
	29,96	42,54	27,264
	12,84	P05 24,48	22,404
	34,84	16,14	P04 7,74
	24,64	20,16	45,684
	18,24	38,64	12,504
	21,24	P06 25,44	32,76
CUEVA 2	14,72	15,9	19,44
CUEVA 3	64,416	19,464	12,684
	13,776	38,64	12,84
	17,016	P07 24	P05 32,82
	12,616	10,644	47,364
CUEVA 4	10,376	25,524	29,16
	18,44	27,84	37,404
	26,2	P08 24,12	12,24
CUEVA 5	18,8	36,804	14,34
	25,72	38,82	31,344
	18,44	24,12	P06 9,6
CUEVA 6	9,296	P09 9,504	47,364
	18,776	37,164	29,16
	41,88	27,84	37,404
CUEVA 7	62,12	P10 24,12	12,24
	14,296	23,844	14,34
	18,16	11,52	31,344
	18,88	38,82	P07 9,6
	19,736	P11 24,12	35,064
CUEVA 8	12,616	19,32	10,62
	48,408	17,664	29,16
	8,016	38,82	37,404
	30,096	P12 33,624	12,24
CUEVA 9	13,616	19,32	14,34
	25,04	17,664	31,344
	36,376	38,82	P08 9,18
CUEVA 10	18,456	P13 24,12	47,364
CUEVA 11	58,896	19,32	29,16
	52,16	17,664	37,404
CUEVA 12	13,256	38,82	29,184
	41,176	P14 24,12	17,04
CUEVA 13	24,04		P09 13,644
	56,32		47,364
	77,856		29,16
	14,456		37,404
CUEVA 14	56,656		29,184
	45,936		31,74
	48,12		P10 8,484
CUEVA 15	22,696		47,364
	42,656		29,16
CUEVA 16	98,96		37,404
	39,04		29,184
	42,776		P11 31,74
	20,48		18,204
CUEVA 17	12,936		10,14
CUEVA 18	56,016		17,76
	47,136		29,16
	15,8		37,404
	18,4		36,924
CUEVA 19	16,4		P12 22,92
	34,056		28,74
	21,88		18,024
CUEVA 20	19,72		29,16
			P13 37,404
			75,12
			P14 37,524

Tabla 4.2: Volúmenes por estancia en Kowloon y en el Sacromonte. La superficie medida en el plano se ha multiplicado por 2.5 en el caso de la sección, y por 3 en el caso de la planta para hallar un volumen equivalente.

[111] Terasawa, H. Et al. (1997). 大國解九龍城 (Kowloon Walled City Grand Schematics). Iwanami Shoten.

[112] Occupygezi Architecture. <https://occupygeziarchitecture.tumblr.com/>. Tumblr.

[113] Chagas Cavalcanti, A. R. (2018). *Housing shaped by labour*. Jovis, Berlín.

[114] Chagas Cavalcanti, A. R. (2019). *Urban informality shaped by labour: Addressing the spatial logics of favelas*. Delft University of Technology.

## Dimensión de los espacios

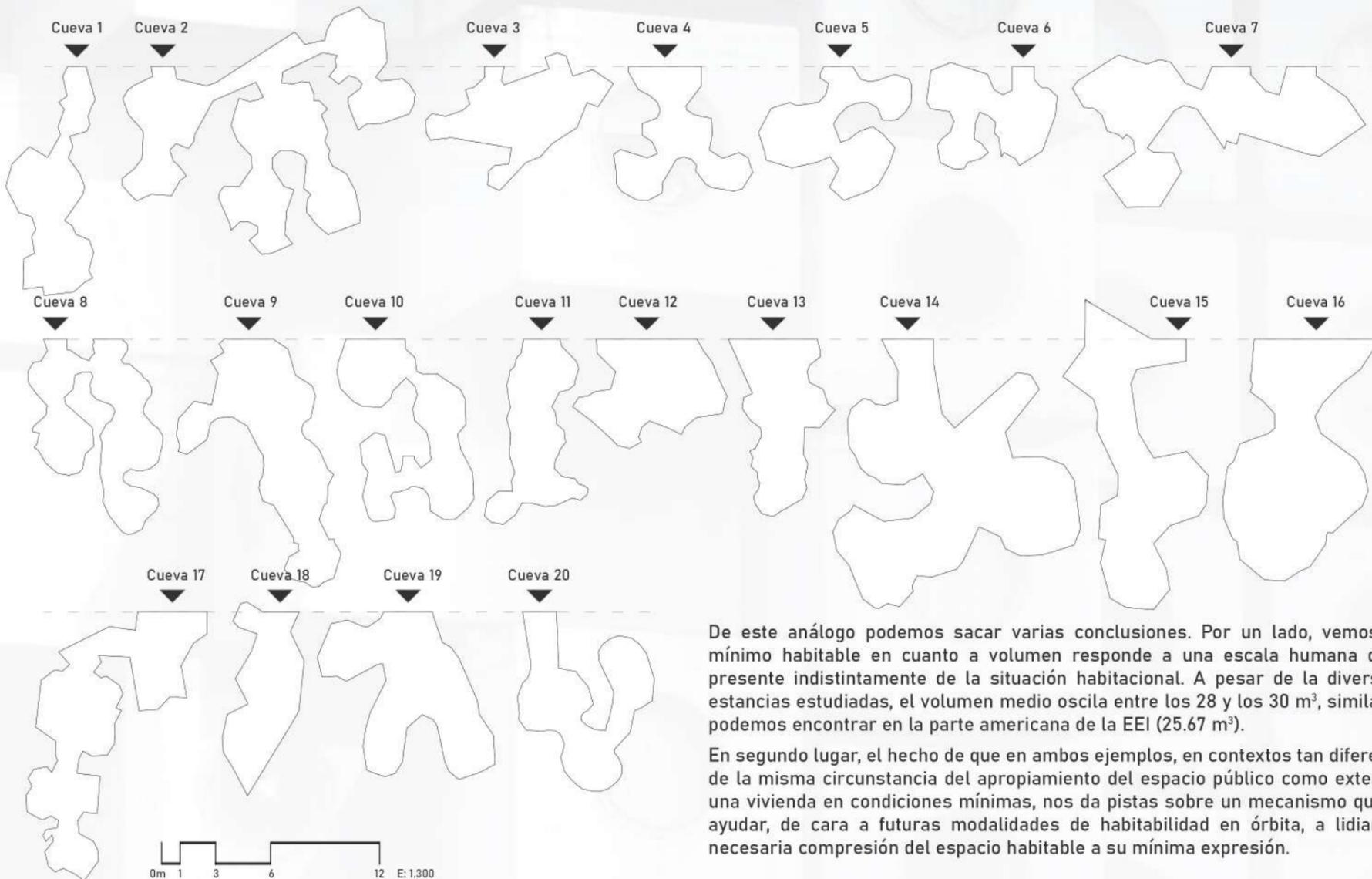
Las dispersas casas-cueva del Sacromonte y las infraviviendas colmatadas e hiperdensas de Kowloon son dos modelos constructivos muy diferentes situados en entornos muy distintos, pero aun así puede detectarse que existe una relación en cuanto a la dimensión de los espacios. La Tabla 4.2 recopila los volúmenes habitables con los que cuentan las estancias de dos de los edificios de Kowloon en sección y de 20 de las casas-cueva del Sacromonte en el entorno del barranco de Valparaíso<sup>[RP]</sup>, y nos arroja resultados sorprendentemente similares, con un VME de 29.65 m<sup>3</sup> para las cuevas y de 27.91 m<sup>3</sup> para las viviendas de Kowloon. Es similar también a los VME que se dan en los ejemplos de vivienda mínima tratada anteriormente (22.76 y 33.79 m<sup>3</sup>, dejando fuera el caso del módulo de la Villa Mokum, que por agrupar todo el espacio en una única estancia genera un mayor volumen).

De nuevo, como referencia, el módulo laboratorio *Destiny* cuenta con un volumen habitable de 38.58 m<sup>3</sup>.

## Usos y colectividad

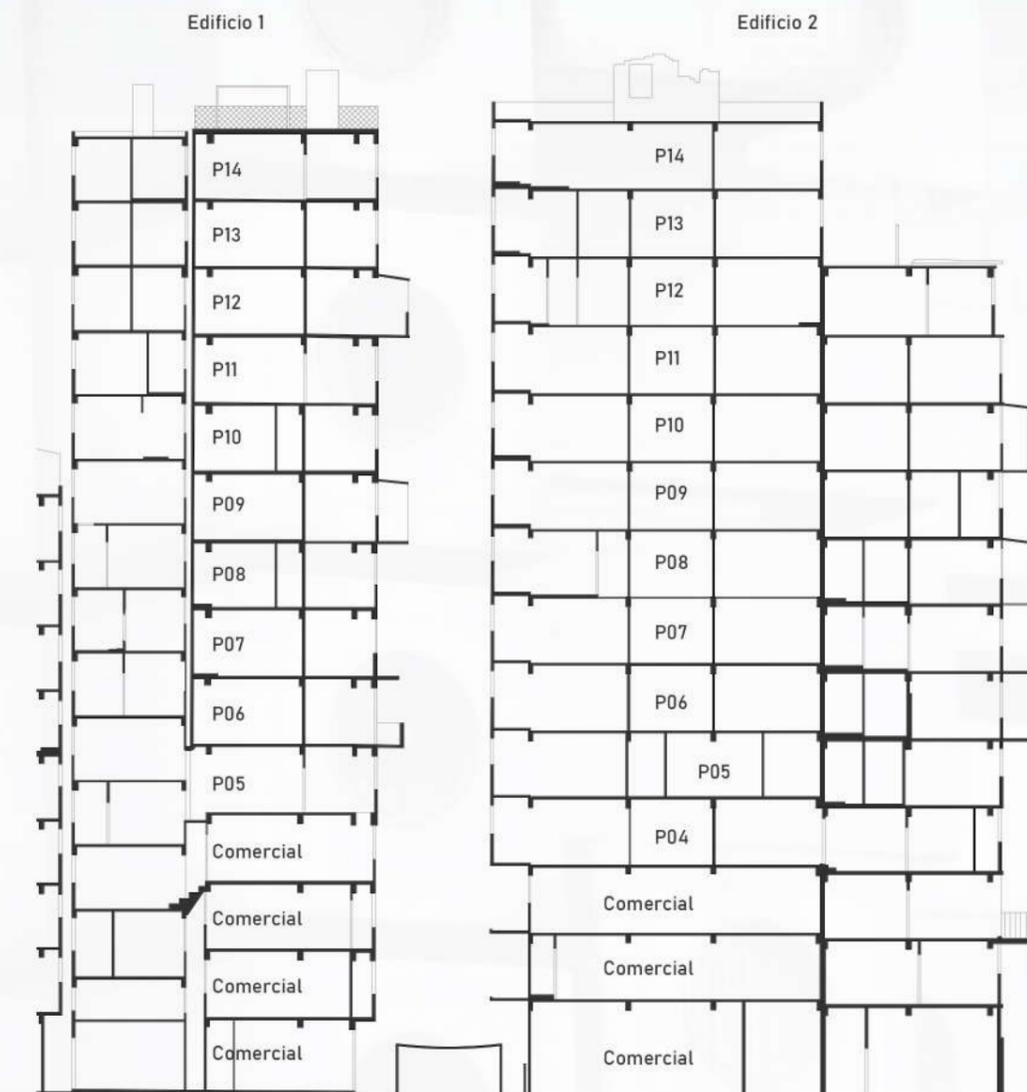
En estos dos ejemplos tratados, y en el caso de la vivienda irregular en general, es muy importante el tema de la colectividad, de cómo funcionan estos barrios cuando las diferentes familias y sus espacios privados se relacionan entre sí y con el espacio común.

En ambos ejemplos la frontera entre lo privado y lo público, tan bien definida en la ciudad planificada, resulta difusa. Muchas casas-cueva se apropian, mediante mobiliario o simplemente ropa tendida, de la vía pública inmediatamente delantera a su entrada, convirtiendo estos lugares en espacios ambiguos a medio camino entre lo público y lo privado. En el caso de Kowloon podemos ver una diferenciación más definida debido a la organización en plantas, con los comercios y espacios comunes situados en las cuatro primeras alturas de los densos edificios interconectados. Sin embargo, cuando llegamos a la parte más alta de la ciudad amurallada, vuelve a producirse el mismo fenómeno: los espacios de la terraza, y en ocasiones la planta que queda por debajo, se convierten en lugares públicos de los que los habitantes se apropian mediante mobiliario o ropa tendida, siendo por tanto espacios ambiguos.



De este análogo podemos sacar varias conclusiones. Por un lado, vemos que el mínimo habitable en cuanto a volumen responde a una escala humana que está presente indistintamente de la situación habitacional. A pesar de la diversidad de estancias estudiadas, el volumen medio oscila entre los 28 y los 30 m<sup>3</sup>, similar al que podemos encontrar en la parte americana de la EEI (25.67 m<sup>3</sup>).

En segundo lugar, el hecho de que en ambos ejemplos, en contextos tan diferentes, se de la misma circunstancia del apropiamiento del espacio público como extensión de una vivienda en condiciones mínimas, nos da pistas sobre un mecanismo que podría ayudar, de cara a futuras modalidades de habitabilidad en órbita, a lidiar con la necesaria compresión del espacio habitable a su mínima expresión.



## 4.1.3 METABOLISMO

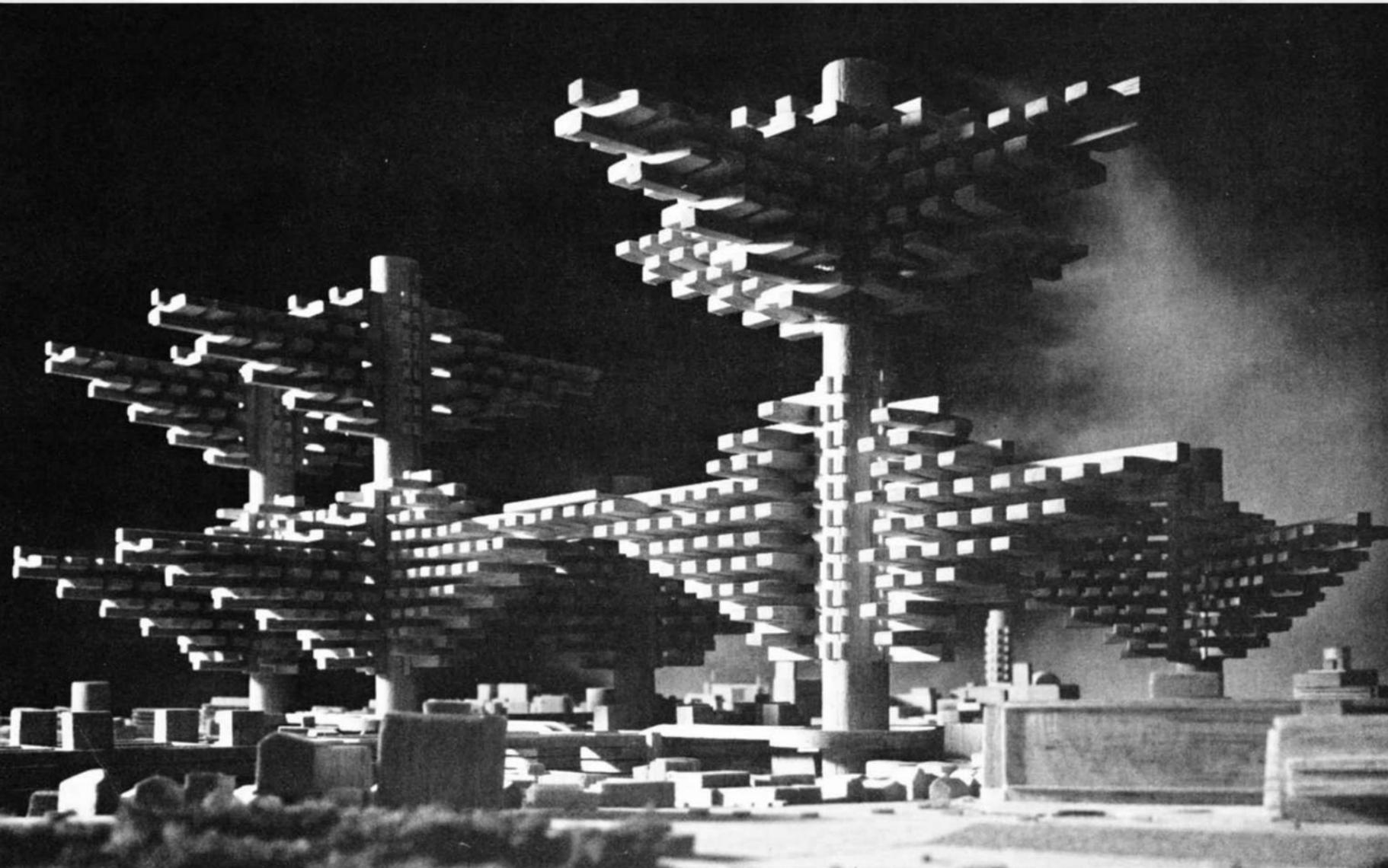
El metabolismo japonés es un movimiento arquitectónico surgido en el país asiático en las décadas posteriores a la Segunda Guerra Mundial, de manos de una generación de arquitectos formados en un mundo de post-guerra y en un país que había superado la arquitectura tradicional de principios del siglo XX y la ultranacionalista de 1930-40. Si bien Kenzo Tange fue uno de los padres de la arquitectura moderna en Japón e introdujo las ideas de los CIAM en su país, los arquitectos más jóvenes pronto reaccionaron con su propia visión adaptada a su cultura y a lo que percibían como una sociedad natural en un proceso de evolución tecnológica, una suerte de fusión de la biología y el ingenio humano.

«Entendemos la sociedad humana como un proceso vital, un desarrollo continuo del átomo a las nebulosas. La razón por la que usamos el término biológico 'metabolismo' es porque creemos que el diseño y la tecnología deberían marcar la vitalidad humana. No creemos que el metabolismo indique únicamente la aceptación de un proceso natural e histórico, sino que intentamos promover también el desarrollo metabólico activo de nuestra sociedad mediante nuestras propuestas»<sup>[115]</sup>.

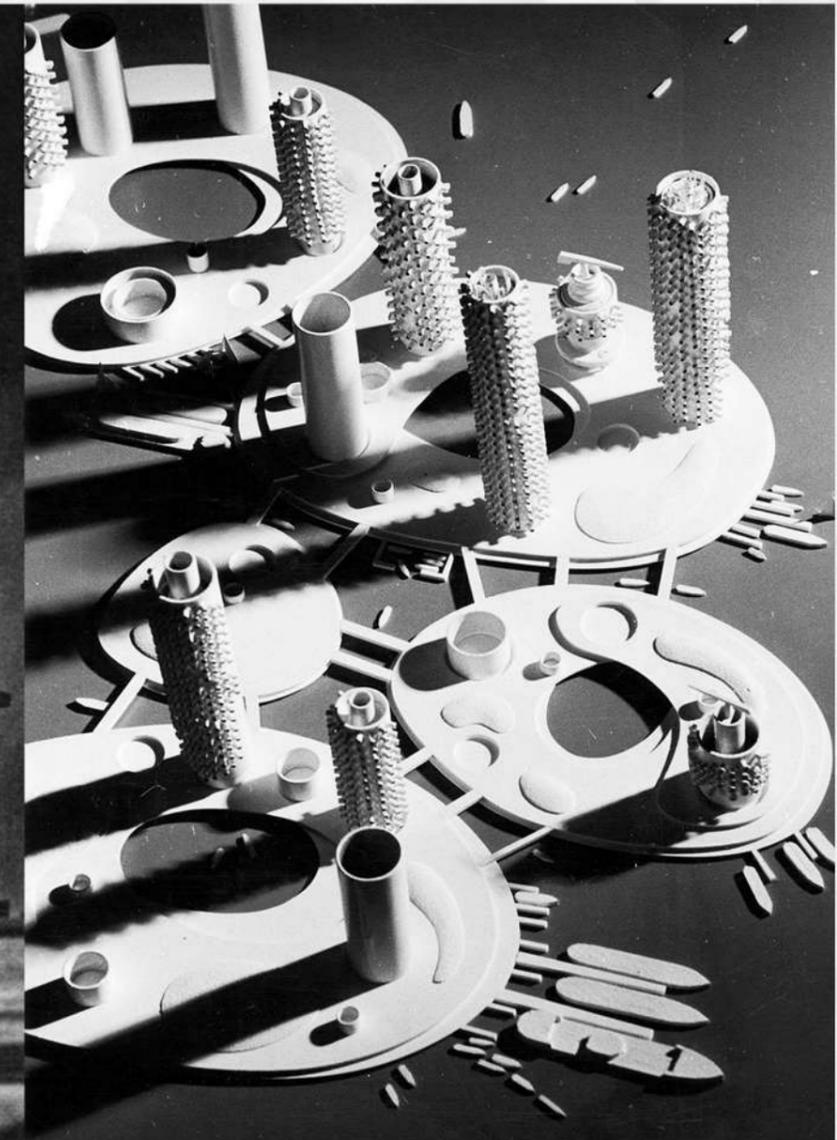
El resultado de esta visión es una arquitectura fundamentalmente teórica (pero llevada también a la práctica en casos concretos) que buscaba interpretar tecnológicamente procesos biológicos, casi celulares, para dar respuesta a la reconstrucción de la sociedad y la ampliación de las crecientes megalópolis humanas reflejadas en el área metropolitana de Tokyo, un tema recurrente que ya debería resultarnos familiar. Una de las propuestas de esta peculiar arquitectura trabajaba también con los espacios mínimos, pero dando un paso más y aplicando la modularidad y la prefabricación al diseño: un mástil central, núcleo de comunicaciones del edificio, actuaría como el tallo de una planta, mientras que una serie de módulos se 'enchufarían' a su alrededor como si fueran las hojas, unos módulos mínimos en los que residirían los habitantes de un macro-complejo modular que podría extenderse de forma indefinida, ocupando todo el territorio, o incluso el mar.

Los hoteles cápsula son una aplicación práctica, más humilde, de este concepto. En ellos, las 'viviendas mínimas' entorno al mástil se convierten en habitaciones individuales para estancias temporales, habitaciones que buscan satisfacer las necesidades del visitante en un espacio mínimo. Aunque este modelo ha degenerado en una oferta barata de alojamiento en condiciones cuestionables, ocasionalmente en espacios ocupados únicamente por una cama, tenemos un ejemplo disponible de un edificio cápsula que buscaba realmente generar espacios de calidad para el habitar: la *Nagakin Capsule Tower*, de Kisho Kurokawa<sup>[115]</sup>.

'Clusters in the air', maqueta del proyecto de Arata Isozaki, 1962 (Imagen 21).

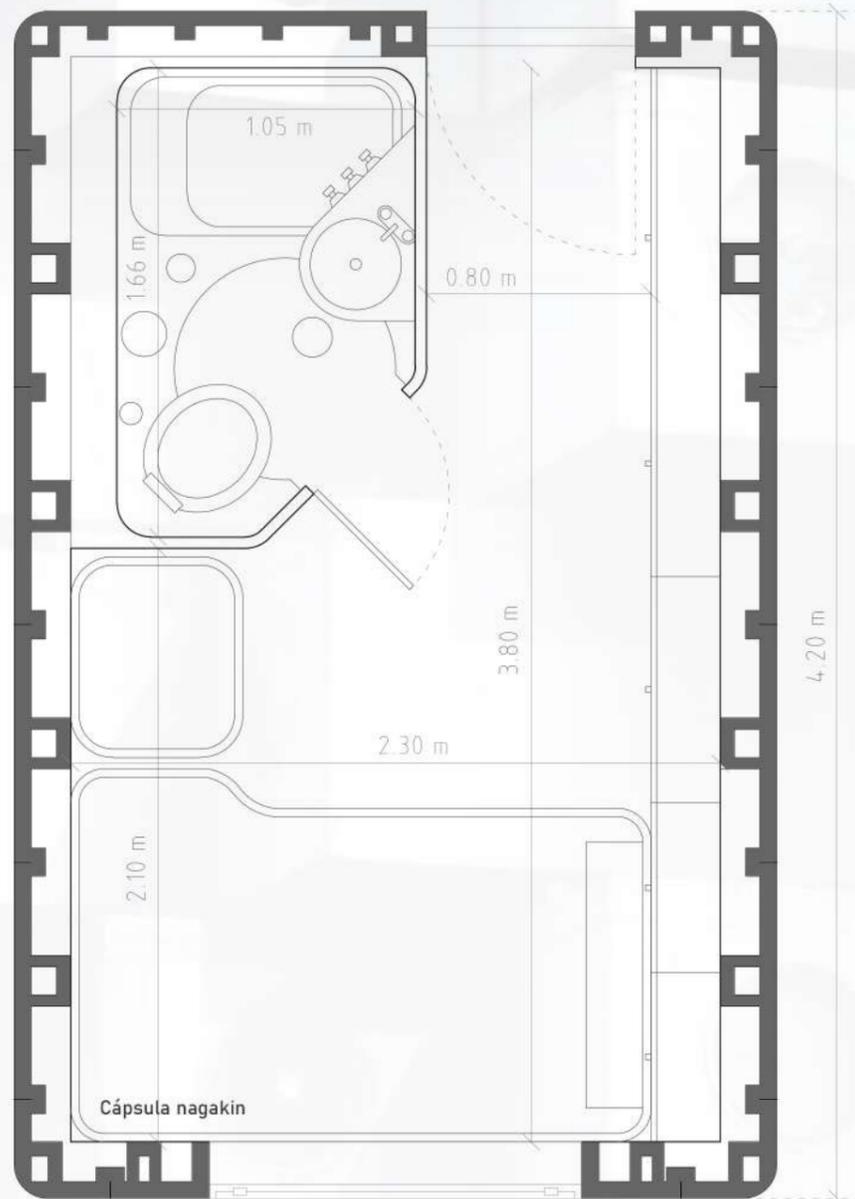


'Marine city', maqueta del proyecto de Kiyonori Kikutake, 1958 (Imagen 22).



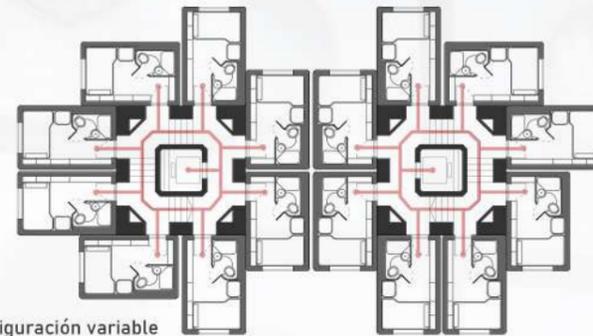
## Dimensión de los espacios

La cápsula Nagakin tiene una superficie útil de 8.5 m<sup>2</sup>, que en una altura libre de 2.3 m se traduce en un volumen habitable de 19.55 m<sup>3</sup>. Si tenemos en cuenta que parte de ese volumen corresponde al baño (3.65 m<sup>3</sup>), eso nos deja un volumen habitable máximo de apenas 15.9 m<sup>3</sup>, menor que la media por estancias de Kowloon o el Sacromonte. Es un diseño de mínimos llevado al extremo, que con el paso de los años ha llevado a los habitantes de las cápsulas a quejarse por las condiciones estrechas y agobiantes del espacio hasta el punto de sugerir la demolición de la torre para dejar paso a un edificio de apartamentos 'más moderno'.



## Modularidad y reconfigurabilidad

La Nagakin Capsule Tower tiene capacidad para albergar, alrededor de sus dos mástiles centrales, un total de 150 cápsulas en distintas configuraciones. Y si bien la capacidad resistente de los materiales limita la altura, la modularidad del diseño permitiría, en teoría, un desarrollo ilimitado. El mástil puede extenderse a cualquier altura deseada, aumentando el número de cápsulas en 16 por planta. Igualmente, el módulo de la torre podría extenderse en horizontal para llenar el territorio, como si se tratara de uno de los diseños de Kenzo Tange para colmar la bahía de Tokyo. Y si bien esta extensibilidad infinita está limitada por la resistencia del material y el urbanismo, en un ambiente ideal sin condicionantes urbanos y sin gravedad (digamos, por ejemplo, la OTB) la longitud del mástil o la extensión horizontal del módulo podrían prolongarse de forma ilimitada.



Planta tipo, configuración variable

La cápsula Nagakin es un ejercicio de diseño de mínimos muy interesante. Las similitudes con la EEI son sorprendentes, teniendo en cuenta que ésta se diseñó 30 años después. Su volumen habitable es la mitad que el del laboratorio *Destiny* y menor incluso que los espacios del segmento orbital ruso. Y aunque la cápsula resuelve magistralmente todas las necesidades de una persona, desde descanso a estancia, cocina y aseo, las quejas que ha ido generando entre sus usuarios a lo largo de los años nos muestran que el espacio de la cápsula queda por debajo de esa escala humana confortable a largo plazo que hemos visto surgir de forma natural tanto en ejemplos planificados como irregulares.

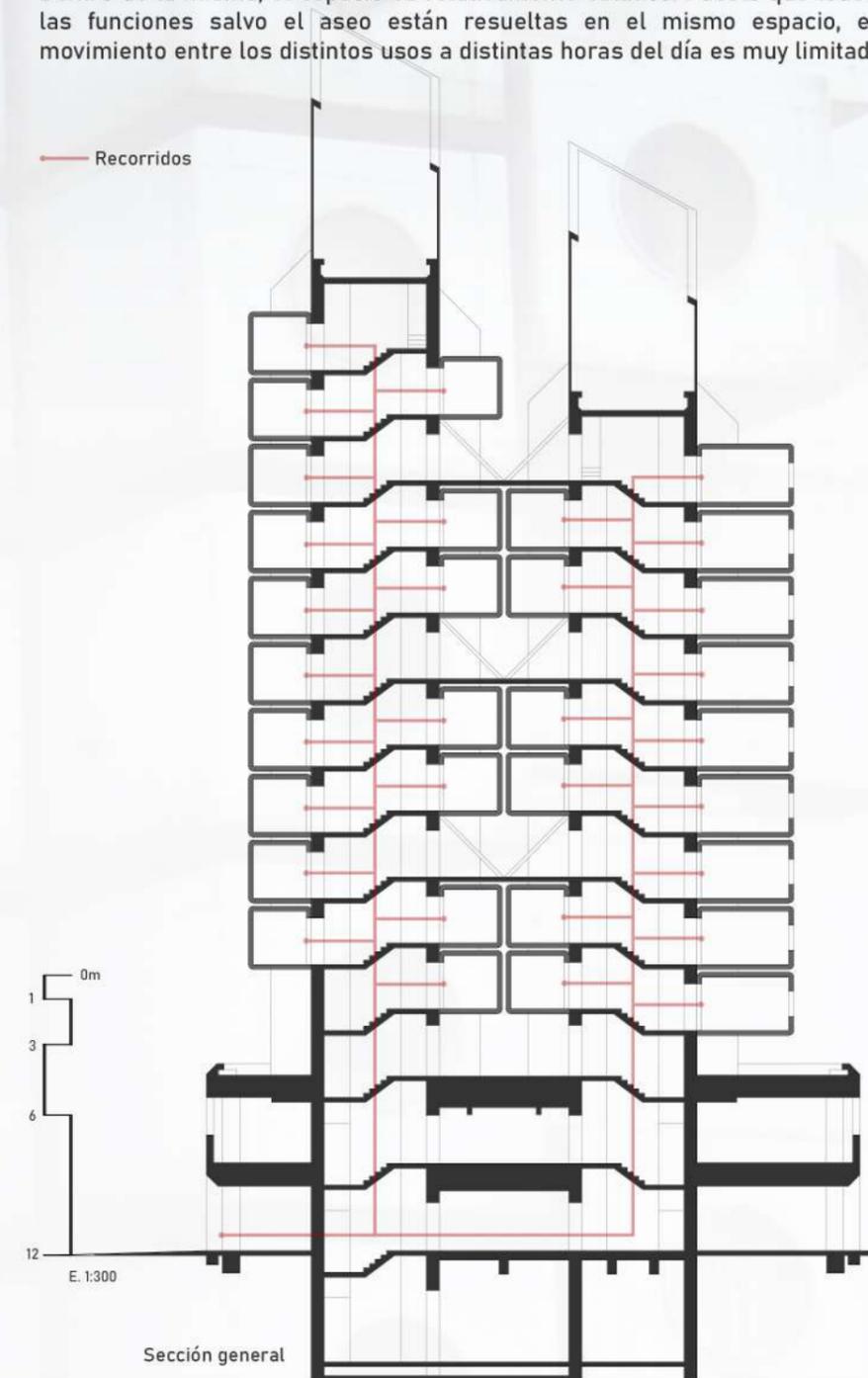
Pero es en la modularidad, y en esa intención de diseño de la 'extensibilidad ilimitada', donde esta obra brilla con luz propia. La *Nagakin Capsule Tower* es un edificio reconfigurable, modular, simple desde el punto de vista constructivo y habitable de forma confortable al menos a medio plazo. Es decir, se cumplen cuatro de los cinco criterios presentados en la sección 3, que monitorizaban el proceso de diseño de la EEI. Incluso el concepto de 'enchufar' una serie de módulos a un mástil central es algo que ya estaba presente en algunos de los diseños conceptuales de las primeras estaciones orbitales, y aún a día de hoy tiene una enorme aplicabilidad.

## Recorridos

El recorrido dentro de la torre es muy sencillo, equiparable al de cualquier edificio de oficinas moderno: de un vestíbulo inferior inicial, el núcleo de comunicaciones permite un desplazamiento en vertical hasta la altura deseada, y en la planta se produce un movimiento en vertical hasta la cápsula concreta.

Dentro de la misma, el espacio es relativamente estático. Puesto que todas las funciones salvo el aseo están resueltas en el mismo espacio, el movimiento entre los distintos usos a distintas horas del día es muy limitado.

— Recorridos



## 4.1.4 BASES ANTÁRTICAS

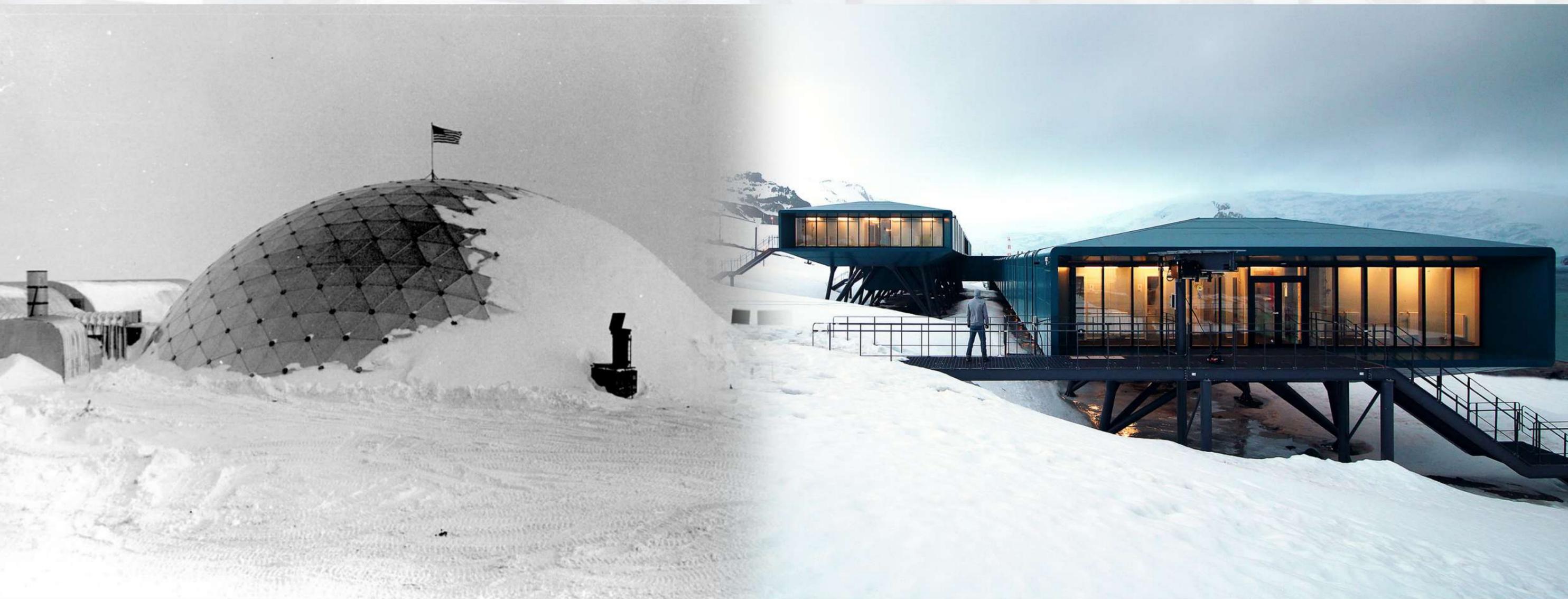
La Antártida es uno de los entornos más extremos y menos confortables para la habitabilidad de nuestro planeta. No en vano ha sido el único continente sin presencia humana duradera hasta el siglo XIX, cuando la base Omond (hoy parte de la base Orcadas argentina) se convirtió en el primer asentamiento antártico permanente<sup>[116]</sup>. En el Año Geofísico Internacional 1957-58, del que ya se ha hablado antes en este trabajo, se firmó el tratado antártico que declaró el continente como una zona pacífica y desmilitarizada, regida por la ley marítima y libre para la investigación científica, algo que disparó finalmente la construcción de bases en el continente helado. El diseño de estas bases es muy diverso, y por lo general, compuesto de varios edificios organizados entorno a centros de mando. La base McMurdo, que es la más grande hasta la fecha, es un auténtico 'pueblo' de 1200 habitantes en verano, con varias estructuras repartidas sobre el hielo y energía generada mediante un reactor nuclear.

Si bien estas primeras bases cumplían su importante función investigadora, no aportaban demasiado desde el punto de vista arquitectónico. A partir de la década de los 70<sup>[117]</sup> se comenzó a dar un mayor énfasis al diseño, comenzando con la estación Amundsen-Scott y su impresionante cúpula geodésica, que cubre algunas de las estructuras centrales de la base formando una 'plaza' independiente de las condiciones hostiles del entorno.

En los últimos años, la arquitectura se ha desarrollado aún más para adaptarse a los estrictos requerimientos del lugar. Una de estas nuevas soluciones, ahora muy extendida en bases de diversas nacionalidades, tiene que ver con la acumulación de nieve, que tiende a enterrar las estructuras con el paso del tiempo. Para evitar esto, las nuevas bases antárticas se levantan sobre pilotes anclados en el hielo, generando estancias elevadas en uno o varios volúmenes bajo los cuales circula el viento y la nieve que arrastra. Algunos ejemplos de esta tipología son la base brasileña Comandante Ferraz, la belga Princesa Elisabeth, o la surcoreana Jang Bogo, pero el más interesante para nuestro estudio es sin duda la base británica Halley VI, diseñada por Hugh Broughton Architects, que analizaremos a continuación.

Cúpula geodésica de la base Amundsen-Scott, 1974 (Imagen 23).

Base comandante Ferraz, 2014 (Imagen 24).



## Condicionantes del entorno

Éste es el primer análogo terrestre en el que las condiciones hostiles del entorno juegan un papel fundamental en el diseño. Nielsen<sup>[18]</sup> clasifica estos condicionantes de la siguiente forma:

Desafíos climáticos, incluyendo bajas temperaturas, fuertes vientos y ventiscas, inestabilidad, movimiento y fusión del hielo, arenas abrasivas, baja humedad y disipación del calor.

Problemas logísticos, incluyendo lo remoto de la localización, la comunicación, el acceso, la barrera del hielo, la complejidad de las instalaciones y la población transitoria.

Problemas psicológicos derivados del aislamiento.

Nos encontramos por tanto en un entorno notablemente similar a la OTB, quizá el más parecido que pueda encontrarse en la superficie terrestre. En ambos casos la exposición directa al ambiente, sin la protección adecuada, puede resultar mortal. La forma en que la base Halley VI se adapta a los condicionantes meteorológicos es curiosa: además de la arquitectura de pilotes que ya hemos visto en otras bases, todo el conjunto está suspendido, literalmente, sobre esquíes. Estos esquíes permiten el desplazamiento de la base a una posición fija conforme el hielo bajo ella se desplaza.

## Dimensión de los espacios

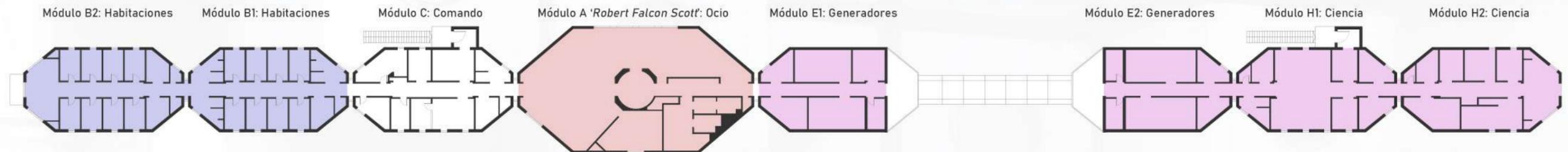
En cuanto a los espacios, nos encontramos un diseño que, de nuevo, nos recuerda mucho a la EEI, pero a mayor escala. El módulo tipo de la base Halley VI es un módulo rectangular truncado de 19 x 10 m, con una altura interior de 3 m. Esto nos deja un volumen por módulo de 570 m<sup>3</sup>, espacio dividido estancias como si cada uno fuera un edificio individual. Los módulos están conectados longitudinalmente en una secuencia que puede expandirse de forma indefinida, tal y como ocurría con el diseño modular de la Nagakin Capsule Tower. Las estancias en que se divide el espacio interior del módulo son en este caso menos interesantes. No se trata de un diseño de mínimos sino de un dimensionado convencional que varía según el uso del espacio.

La base cuenta también con un módulo de mayores dimensiones, el espacio central de ocio y esparcimiento. Este módulo tiene el mismo diseño de rectángulo truncado que los demás, pero las dimensiones son de 28 x 15 m, y 6 m de altura. El espacio es conjunto y trabaja en doble altura, aunque cuenta con una segunda planta conectada con el 'salón' central. Este volumen cuenta por tanto con un volumen más o menos unitario de 2520 m<sup>3</sup>.

## Usos y recorridos

La separación en módulos permite también una diferenciación de funciones por módulo. En la configuración actual, la base cuenta con dos módulos laboratorio para investigación científica, dos módulos generador con instalaciones varias para la climatización de los espacios, un módulo de comando, y dos módulos de habitaciones para los habitantes, así como el módulo central de ocio. La diferenciación por funciones genera flujos a lo largo del día en el eje transversal del edificio, entre los espacios de ocio, trabajo y descanso que quedan en localizaciones distanciadas.

- Descanso
- Ocio
- Trabajo



Proceso de ensamblaje de la base Halley IV (Imagen 25).

La base Halley VI se enfrenta al problema del aislamiento de sus habitantes en el entorno hostil de la Antártida proporcionando espacios interesantes de ocio y esparcimiento, así como diferenciando volumétricamente el trabajo, el ocio y el descanso. Esta solución arquitectónica modular es muy similar a la que proporciona la EEI, a una escala permitida por el hecho de estar situada en la Tierra. Además de su construcción adaptada al entorno, la principal aportación de este análogo está en esa dedicación de espacios al ocio que no podemos ver en órbita más allá de un uso secundario de espacios como la cúpula. En la base Halley VI, al contrario, el ocio y la relajación de los habitantes es protagonista, en cuanto a diseño, volumen dedicado y en cuanto a situación dentro de la misma (actúa como rótula entre los espacios de descanso y los de trabajo). Esto tiene un impacto positivo en los habitantes, que dejan de percibir la base como un lugar de trabajo a corto plazo y más como un pequeño asentamiento de estancia a largo plazo, algo más parecido a un pequeño pueblo.

## 4.2 ANÁLISIS DE LAS CONSIDERACIONES PREVIAS EN LOS ANÁLOGOS TERRESTRES

En esta sección volveremos a hacer uso de nuestra herramienta de análisis de habitabilidad, aplicándola a los análogos terrestres que hemos introducido. Aunque ya hemos podido detectar algunas similitudes a nivel superficial entre estos análogos y la EEI, el análisis desde los cinco grupos de consideraciones de habitabilidad (gestión del espacio, movimiento interior, necesidades básicas, actividades y usos, y estética y bienestar) nos permitirá establecer en firme esas similitudes y detectar algunas nuevas en áreas en las que se comparten características de diseño.

No hay que olvidar, conforme profundicemos en el análisis, que la OTB es un entorno mucho más extremo que el más hostil de los introducidos. Incluso en el gélido desierto de la Antártida hay una presión normal y una atmósfera respirable, y a excepción de ésta por las temperaturas bajo cero y de algunos días de especial acumulación de partículas contaminantes en Tokyo, ninguna de las localizaciones de la sección 4.1 es perjudicial para la salud. En todos los análogos, la gravedad actúa de la forma a la que todos estamos acostumbrados, con la enorme diferencia que esto supone.

Es importante remarcar estas diferencias y partir de la comprensión de que la resolución de un problema particular rara vez se reduce a la aplicación de soluciones que han funcionado anteriormente para otros problemas con otras particularidades. Gran parte del trabajo de una visión interdisciplinar consiste precisamente en tener presentes estas diferencias, no como obstáculos que impiden la aplicabilidad o el aprendizaje mutuo sino como condicionantes que enriquecen el proceso de búsqueda de una solución común, guiándolo, por necesidad, por caminos inexplorados.

### 4.2.1 GESTIÓN DEL ESPACIO

En lo referente a gestión del espacio, analizaremos las consideraciones de distribución geométrica y privacidad. Con la gravedad convencional, la orientación de los espacios es inalterable, y resulta por tanto anecdótica.

#### Vivienda mínima

Sin más restricciones que las constructivas y administrativas dadas, respectivamente, por la resistencia de los materiales y la parcela disponible, la forma y tamaño de los espacios interiores en los tres ejemplos de vivienda mínima considerados varía sustancialmente, aunque lo hace dentro de unos valores volumétricos reconocibles impuestos por la escala humana, que es invariable. Como veíamos en la Tabla 4.1, el volumen medio por estancia oscila entre los 22 y los 40 m<sup>3</sup>, con una altura mucho más acotada (2.5 m) y ancho y largo variables. Los módulos de Keetwonen y de la Villa Mokum tienen una distribución marcadamente longitudinal, mientras que la casa en Shinjuku se distribuye en transversal en tres plantas organizadas verticalmente.

En cuanto a privacidad, hay que tener en cuenta que en los tres ejemplos tratamos con espacios de vivienda intrínsecamente privados, aunque dentro de ellos puedan existir zonas con mayor o menor grado de privacidad vinculadas de forma clara al uso. El aseo, por ejemplo, queda aislado por cerramientos opacos en los tres ejemplos, incluso en el caso de los módulos Keetwonen y Mokum en los que se trabaja con espacios unitarios. Si recordamos, esto es algo que ocurre también en la EEI con el WHS, el equivalente orbital a un aseo. También existe una relación de la privacidad con el uso del descanso, contando tanto el módulo Keetwonen como la casa en Shinjuku con espacios delimitados, mediante técnicas diferentes, para este uso, privados en un grado menor que el aseo. De nuevo, podemos ver un reflejo de esto en la EEI, en la que algunos de los pocos espacios privados disponibles coinciden con los *crew quarters*, módulos vinculados al descanso.

Existen también relaciones entre lo privado y lo público, aunque escasas en comparación con otros análogos. Los módulos Keetwonen y Mokum forman parte de complejos estudiantiles, y el acceso a ellos se da a través de grandes espacios comunes en los que se reúnen los estudiantes. La relación con el espacio público es por tanto funcional, siendo necesario transitar por esos espacios comunes para acceder a los módulos. En cuanto a la casa en Shinjuku, la relación es más indirecta, a través de la visión: el mayor ventanal de la casa, de dos plantas de altura, se sitúa en la sala de estar, vinculada visualmente con el espacio exterior y la vía pública.

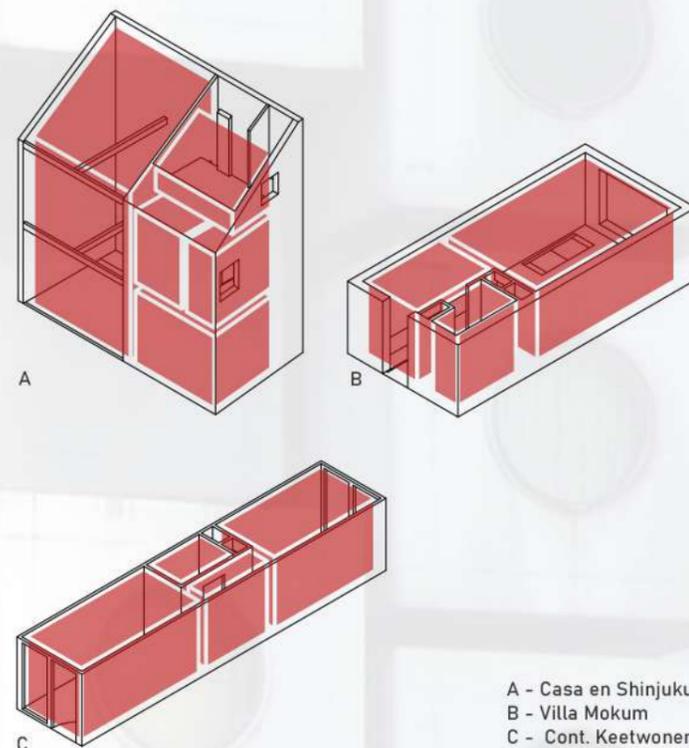


Figura 4.01: Volúmenes interiores en las tres viviendas mínimas. Elab. Propia.

#### Vivienda irregular

La escala humana está más presente, en este análogo que en el de la vivienda mínima, ya que la escasez de medios de los habitantes obliga a hacer un uso intensivo del poco espacio disponible. En el ejemplo del Sacromonte, la forma y tamaño de los espacios varía sustancialmente de manera similar a lo que ocurría en la vivienda mínima, porque existe una cierta libertad en la ausencia de planificación urbana y la excavación en ladera en un entorno muy extenso. En Kowloon, sin embargo, esa hay menos libertad por cuestiones de modularidad estructural e hipercolmatación del espacio, lo que tiende a unificar las dimensiones de las estancias entorno a un mínimo habitable que, recordemos, identificamos en la Tabla 4.2 y que podríamos fijar en 30 m<sup>3</sup>. La distribución tiene más que ver con el modo de ocupación del espacio que con la escala humana, siendo en el caso de Kowloon una distribución vertical estratificada y en el caso del Sacromonte una eminentemente horizontal.

La privacidad actúa de forma similar al resto de análogos en cuanto a lo que podríamos calificar de 'usos privados'. El aseo es el espacio privado por excelencia, y como tal está siempre independizado. En la siguiente sección veremos que, para este análogo en concreto, no es el caso de los dormitorios. En el Sacromonte podemos ver una interesante sucesión de distintos niveles de privacidad dentro de las cuevas, en la que los espacios prácticamente públicos, como los tablaos de flamenco, se sitúan en la parte más exterior de la excavación (junto a la vía pública) y las habitaciones y demás estancias privadas quedan situadas en la parte posterior de la cueva.

Además, en el caso de la vivienda irregular ocurre algo curioso y muy interesante con respecto a la relación entre espacio privado y vía pública. Esta separación, muy evidente en circunstancias normales, se difumina de forma constante en estos ejemplos mediante ocupaciones puntuales o permanentes a través del mobiliario o simplemente del uso. Los habitantes de estos entornos juegan con esta ambigüedad para ampliar sus viviendas, apropiándose de la vía pública en el caso del Sacromonte (con el ejemplo claro de la calle Vereda de Enmedio) o de las terrazas, igualmente públicas, en el caso de Kowloon.

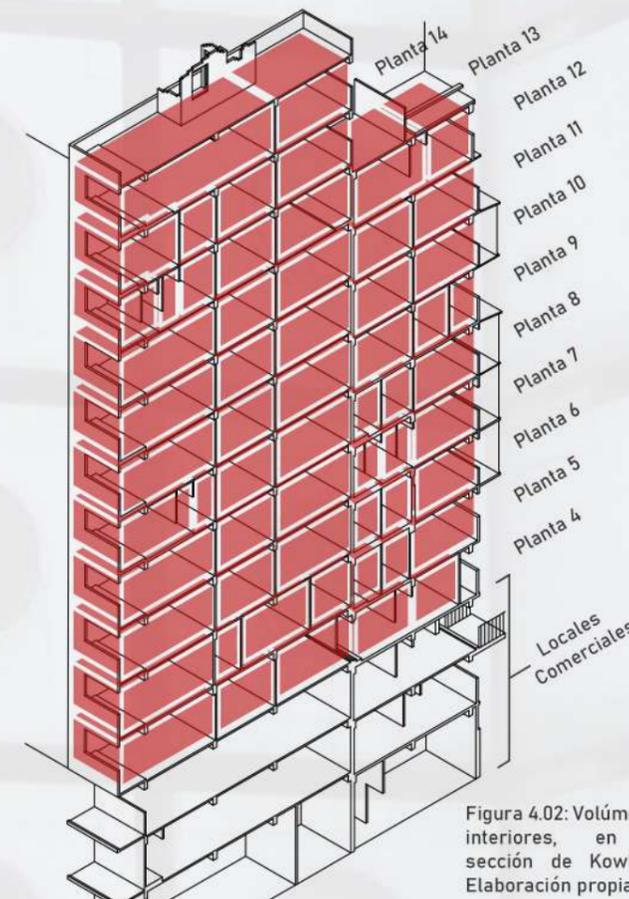


Figura 4.02: Volúmenes interiores, en la sección de Kowloon. Elaboración propia.

## Metabolismo

En la puesta en práctica del ejercicio teórico de arquitectura del metabolismo japonés que es la *Nagakin Capsule Tower* podemos ver unos espacios que se adaptan a restricciones sorprendentemente similares a las que se dan en el lanzamiento de módulos a la OTB. Aunque finalmente el proceso de sustitución o recolocación de las cápsulas nunca se llevó a cabo por ser prohibitivamente caro para los residentes del edificio, la idea de que este proceso pudiera ejecutarse llevó a un diseño de cápsulas con unas dimensiones específicas vinculadas a la maquinaria que debía moverlas, una adaptación similar a la de los módulos de EEI al compartimento de carga del transbordador espacial. Pero a pesar de la complejidad de poner un módulo en órbita, una vez ahí arriba, es mucho más sencillo mover un módulo de grandes dimensiones que desplazar incluso una cápsula pequeña en la gravedad terrestre. En consecuencia, las medidas de las cápsulas de la *Nagakin Capsule Tower* son más pequeñas que un módulo de la EEI, con unas medidas interiores de 2.3 x 2.3 x 3.8 m y un volumen, descontando el aseo, de 15.9 m<sup>3</sup>, casi la mitad del mínimo establecido anteriormente. Los espacios quedan organizados verticalmente, 'enchufados' al mástil central del núcleo de comunicaciones de la torre.

En cuanto a privacidad, cada cápsula es un espacio privado en sí mismo. En ella sólo puede vivir una persona, con lo que actúan como unidades independientes vinculadas a unos espacios comunes que quedan en las dos primeras plantas del edificio. Aun así, y en previsión a posibles visitas, el aseo está compartimentado, separado del espacio unitario de la cápsula.

Esta individualidad del espacio es un reflejo de la concepción metabolista de la sociedad futura, mucho más fragmentaria, modular y con un funcionamiento a distancia. Se trata de un experimento social que no funcionó (quizá por adelantado a su tiempo), y que abordó una dirección contraria a la de comportamientos humanos que hemos visto surgir de forma natural en entornos irregulares como Kowloon, en los que la frontera entre lo público y lo privado, la familia o el individuo y la comunidad, se desdibujan. A pesar de lo fallido del experimento, el ejemplo de la cápsula Nagakin nos abre una ventana a problemas que podemos encontrar también en órbita, como el aislamiento o la claustrofobia, fruto de habitar durante largos periodos de tiempo en espacios que no se ajustan a los mínimos habitables.

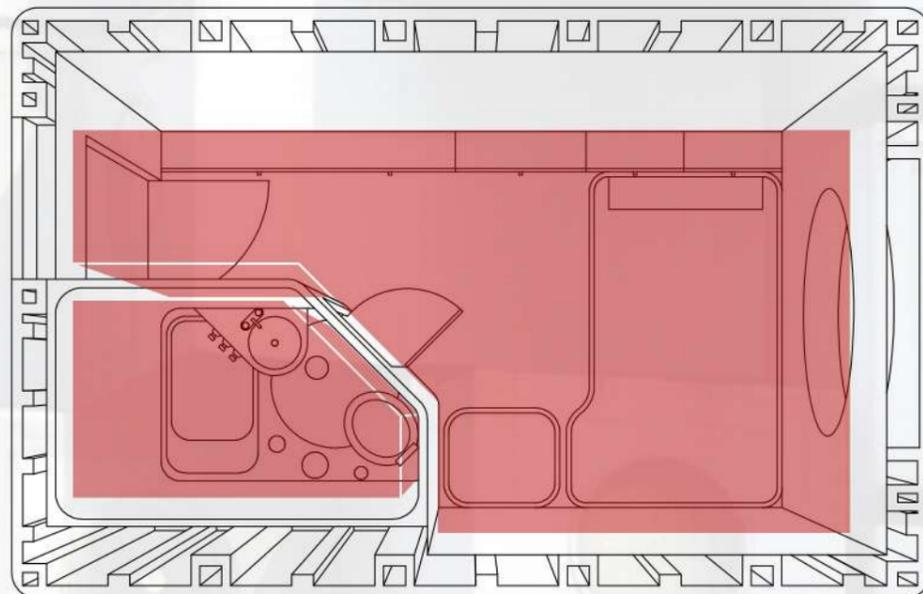


Figura 4.03: Volúmenes interiores de la cápsula Nagakin. Elaboración propia.

## Bases antárticas

Discutiendo la geometría de los espacios, bastante convencional en este análogo en el que no se está llevando a cabo un diseño de mínimos, es más interesante preguntarnos, más allá de las dimensiones de los módulos o los volúmenes interiores, en qué medida afecta a los espacios el entorno en el que se encuentran. A nivel de distribución, la respuesta es evidente en un primer vistazo: la base Halley VI es una secuencia de módulos conectados longitudinalmente y que se habitan, igualmente, de forma longitudinal, a lo largo de un gran eje de comunicaciones. Esto es un requerimiento del diseño expansivo de la base, pensado específicamente para entornos hostiles en los que la construcción con técnicas y materiales tradicionales está muy limitada, y a cada módulo se le exige un funcionamiento independiente en caso de fallo. La diferencia extrema de temperaturas entre el interior y el exterior hace necesaria, además, una distribución muy específica en los puntos de contacto con el entorno, como las salidas y entradas. Al igual que en la EEI existen varios módulos específicos para las EVAs, en la base Halley VI los módulos que se abren al exterior siguen un diseño de vestíbulos de independencia, una suerte de compartimentos estancos que permiten mantener la temperatura de los espacios interiores. Una vez más, esto es un requerimiento específico del entorno hostil.

La privacidad sigue los patrones que ya conocemos, vinculados a los usos. Se produce de nuevo una independencia de los dormitorios, en este caso agrupados en módulos que cumplen esa función de descanso, y de los aseos dentro de ellos. La relación público-privado responde también a los usos, con uno de los módulos específicamente diseñado como un espacio público de encuentro de los habitantes, de ocio y esparcimiento, y de comida en comunidad. De esta forma, la relación entre la parte 'privada' y la parte 'pública' de la estación tiene lugar a lo largo del eje longitudinal mencionado anteriormente, que al quedar funcionalmente cortado por el módulo central comunitario, divide la base en dos de forma muy clara a nivel de privacidad.

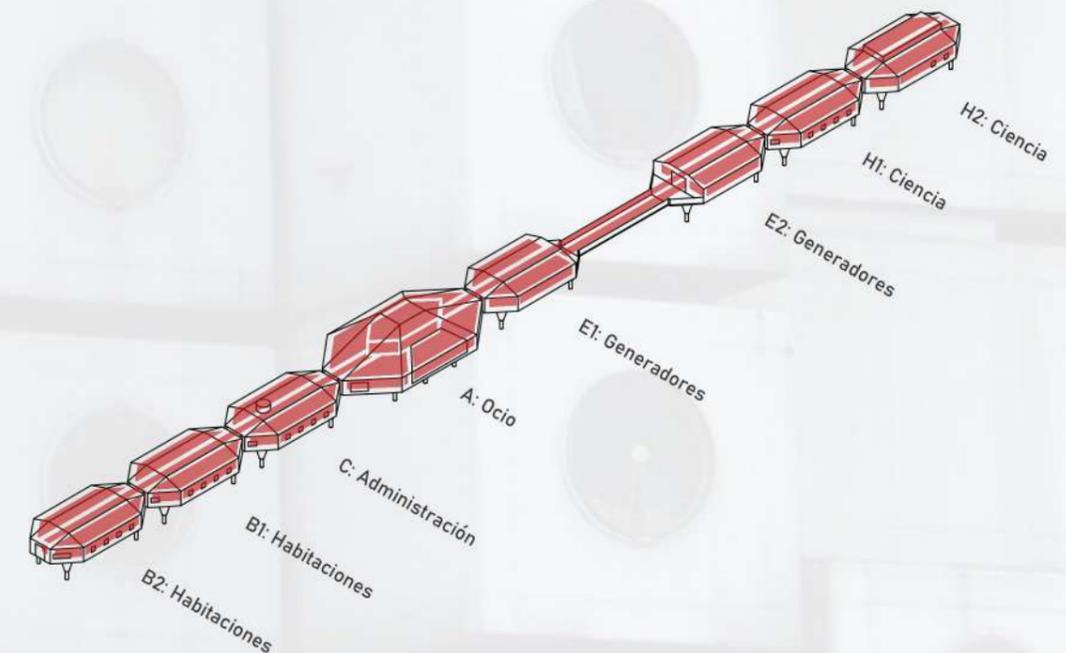


Figura 4.04: Volúmenes interiores de la base Halley VI. Elaboración propia.

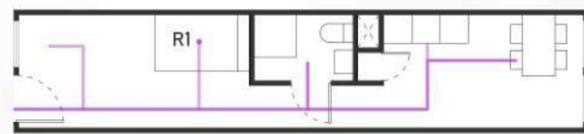
## 4.2.2 MOVIMIENTO INTERIOR

El análisis del movimiento interior en la OTB consideraba los flujos de movimiento dentro de los espacios y las ayudas y restricciones al movimiento. Esta última consideración surge, de nuevo, de la ausencia de gravedad, con lo cual no tiene sentido analizarla para los análogos en Tierra. Quizá podrían considerarse como ayudas al movimiento los elementos de comunicación vertical (ascensores), pero además de no estar presentes en todos los análogos, las conclusiones extraídas tendrían una aplicabilidad muy limitada para nuestro caso de estudio.

### Vivienda mínima

Los recorridos que se producen dentro de las viviendas mínimas son reducidos, debido a lo compacto del espacio y la unificación de usos. La mayoría de ellos se concentran precisamente en los espacios que, por ambigüedad de uso o planificación, están destinados a ello. En el contenedor Keetwonen, por ejemplo, se puede apreciar una concentración del recorrido de su único habitante en el pasillo entre la zona de dormitorio y la zona de estancia, delimitadas por el aseo. En la casa en Shinjuku, esta concentración de recorridos ocurre en vertical, en el núcleo de la escalera que es el que articula las diferentes plantas, y también en la planta baja, la zona de estancia y la cocina. Para la Villa Mokum, se puede identificar el espacio mixto de estancia y descanso por la escasez de recorridos, que de nuevo se concentran en el espacio ambiguo entre la entrada y el aseo.

Estos núcleos de comunicación y pasillos quedan en todo caso relegados a un papel secundario en cuanto a protagonismo en el volumen general. De hecho, la optimización del espacio habitable en vivienda mínima pasa por la reducción de estos espacios a su mínima expresión.



Rutina R1:

- Despierta
- Aseo
- Desayuno
- Va a clase
- Vuelve, aseo
- Almuerzo
- Estudia
- Sale a la calle
- Vuelve, cena
- Se acuesta



Rutina R2:

- Despierta
- Aseo
- Desayuno
- Tiempo libre: sala de estar
- Almuerzo
- Trabajo en el estudio
- Aseo
- Cena
- Tiempo libre: sala de estar
- Se acuesta



Rutina R3:

- Despierta
- Aseo
- Desayuno
- Va a clase
- Vuelve, aseo
- Almuerzo
- Estudia
- Tiempo libre: sala de estar
- Sale a la calle
- Vuelve, se acuesta

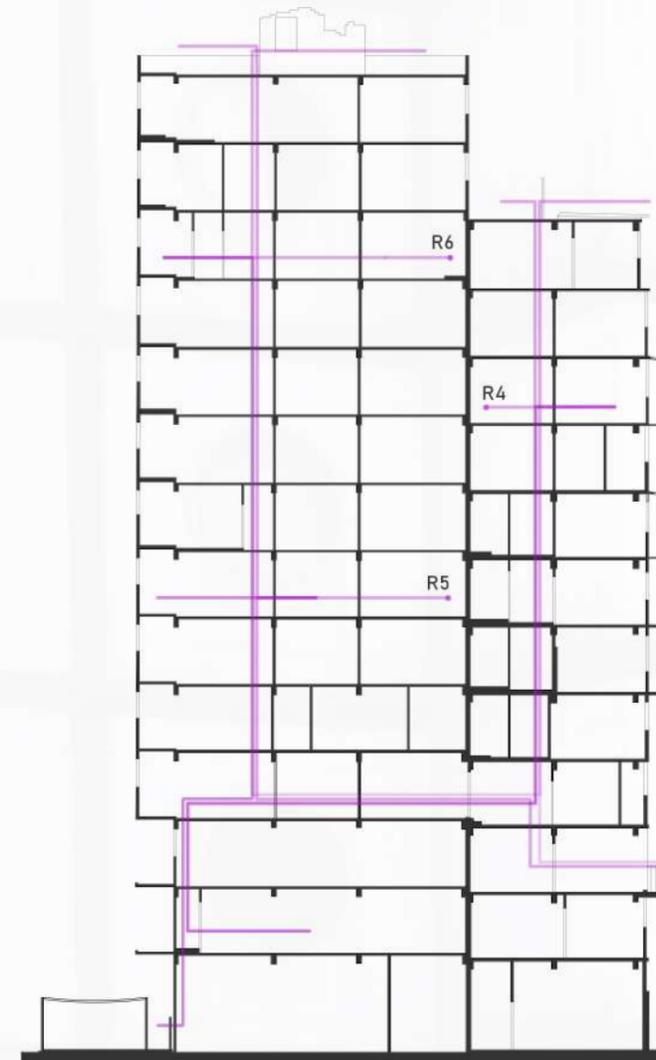
Figura 4.05: Plano de flujos para las viviendas mínimas, rutinas ficticias para un usuario estándar de cada vivienda. Elaboración propia.

### Vivienda irregular

Para este análogo es más complicado establecer los flujos interiores de la vivienda, puesto que no disponemos de una planta general del edificio escogido y que, en cualquier caso, las viviendas varían en distribución entre las distintas plantas. Sin embargo, nos interesan los flujos que se establecen entre estas viviendas (asumiendo una vivienda por planta) y las zonas comunes del edificio, para estudiar el funcionamiento en conjunto y cómo este modelo de apropiación de espacios comunes afecta a los recorridos.

Lo primero que podemos apreciar es la concentración de recorridos, de nuevo, en los núcleos de comunicación verticales (escaleras) y horizontales (pasillos), que establecen relaciones no sólo entre el edificio y la calle, sino además entre los diferentes edificios que colmatan el barrio. Estos núcleos comunican además las viviendas con las zonas comunes, tanto con las terrazas superiores como con los locales comerciales en las tres primeras plantas. De esta forma, los núcleos de comunicación presentan más intensidad de recorrido (se recorren más

veces a lo largo del día por una única persona) y mayor número de recorridos (más personas recorriéndolos). Algo curioso que ocurre en algunos edificios de Kowloon con respecto a los núcleos de comunicación es que no siempre coinciden en vertical a lo largo de todo el edificio, como ocurre en las construcciones de varias plantas convencionales. Dado que los edificios de Kowloon se construyeron aumentando la altura de edificios preexistentes, las ampliaciones a menudo cuentan con núcleos verticales diferentes a las de las plantas en la base, lo que hace necesarios recorridos en horizontal que generan una especie de 'núcleos de comunicación quebrados'.



Rutina R4:

- Despierta (P10, Ed.2)
- Aseo
- Desayuno
- Trabajo (loc. comercial P2)
- Vuelve, almuerzo
- Trabajo (loc. comercial P2)
- Vuelve, aseo
- Tiempo libre (terrace Ed.2)
- Cena
- Se acuesta

Rutina R5:

- Despierta (P7, Ed.1)
- Aseo
- Desayuno
- Trabajo (vivienda)
- Tiempo libre (terrace Ed.1)
- Trabajo (vivienda)
- Vuelve, cena
- Se acuesta

Rutina R6:

- Despierta (P12, Ed.1)
- Aseo
- Desayuno
- Va a clase
- Vuelve, almuerzo
- Tiempo libre (terrace Ed.1)
- Tiempo libre (terrace Ed.2)
- Sale a la calle
- Vuelve, cena
- Se acuesta

Figura 4.06: Plano de flujos para dos edificios conectados de Kowloon, rutinas ficticias para tres habitantes de tres familias, dos adultos y un niño. Elaboración propia.

Figura 4.08: Plano de flujos de la base Halley VI. Rutinas ficticias para tres personas, dos científicos y un operario. Elaboración propia.

## Metabolismo

En la cápsula Nagakin ocurre algo parecido a lo que vimos en los recorridos de las viviendas mínimas. El espacio unitario hace que la cápsula sea bastante estática, con la mayoría de recorridos concentrándose en el espacio entre el aseo, los armarios de la cocina y la cama. También hay una concentración importante en la entrada, dado que la cápsula fue diseñada como un espacio de estancia muy limitado en el que el habitante se relacionaría más tiempo con el exterior que con la propia cápsula.

## Bases antárticas

La base Halley VI tiene una distribución modular muy similar a la de la EEI, y esto se refleja claramente en los recorridos. Al igual que en la estación la mayoría de recorridos se concentraban en el eje longitudinal que unía los *crew quarters* con el Nodo 1, aquí podemos ver que ocurre exactamente lo mismo y que, tanto en intensidad como en número de personas, la zona con más recorridos es la que une los módulos dormitorio con el módulo cantina/ocio. La importancia del eje que une los distintos módulos es evidente también en su segunda mitad, del módulo cantina/ocio a los módulos de laboratorio.

Así, podemos ver cómo, a nivel de recorridos, el módulo central de ocio está dividiendo la base en dos, una zona con más concentración de recorridos (que podríamos calificar como la parte 'residencial' de la base, incluyendo los dos módulos dormitorio y el módulo de administración) y una zona con menor concentración o concentración a determinadas horas del día (la parte de 'trabajo', que incluye los módulos de generación de energía y los laboratorios). El uso está, por tanto, cualificando los espacios en cuanto a intensidad de recorridos, y la localización de los distintos módulos tiene en cuenta esta circunstancia. Los dormitorios están situados en la parte más silenciosa del conjunto, que coincide con uno de los extremos, pero esto hace que aumente la longitud de los recorridos más comunes, en la zona 'residencial'. Por esa razón sólo hay un módulo que se sitúe entre la zona central de ocio y de descanso.

Por último, cabe destacar también la localización de las salidas al exterior. En la base Halley hay dos de estas salidas, una de ellas situada en la zona de administración (la de más intensidad de recorridos) y otra situada en los laboratorios, para agilizar las salidas de los científicos.

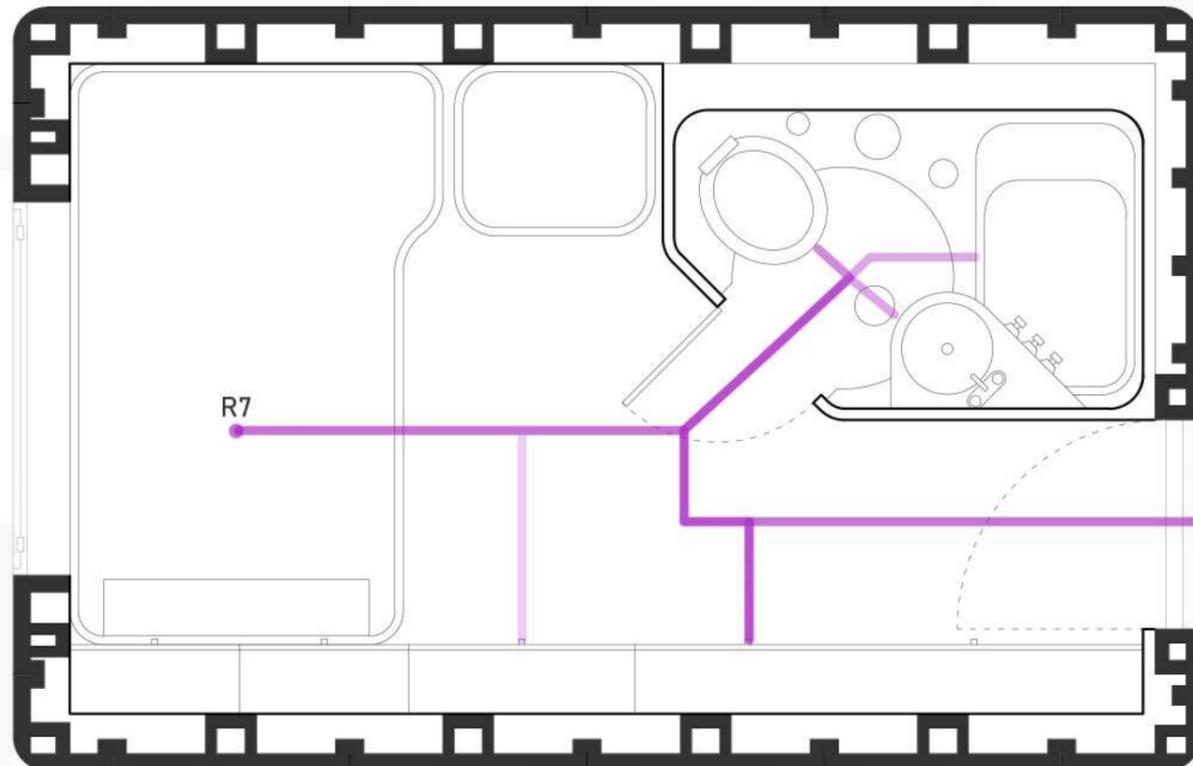
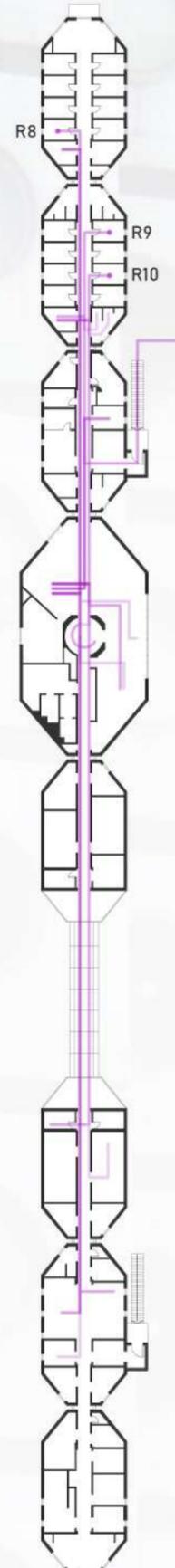


Figura 4.07: Plano de flujos de la cápsula Nagakin. Rutina ficticia para el caso de diseño de la cápsula: Un ejecutivo que trabaja en el centro de Tokyo. Elaboración propia.



### Rutina R7

- Despierta
- Aseo. Labavo e inodoro
- Desayuno
- Sale a la calle (trabajo)
- Vuelve, almuerzo
- Sale a la calle (ejercicio)
- Vuelve, aseo. Ducha
- Tiempo libre, ve la tele en la cama
- Cena

### Rutina R8

- Despierta
- Aseo
- Desayuno
- Trabajo en el laboratorio
- Almuerzo
- Tiempo libre (módulo ocio)
- Aseo
- Cena
- Se acuesta

### Rutina R9

- Despierta
- Aseo
- Desayuno
- Expedición
- Vuelve, cena
- Se acuesta

### Rutina R10

- Despierta
- Aseo
- Desayuno
- Trabajo en energía 1
- Almuerzo
- Tiempo libre (módulo ocio)
- Cena

## 4.2.3 NECESIDADES BÁSICAS

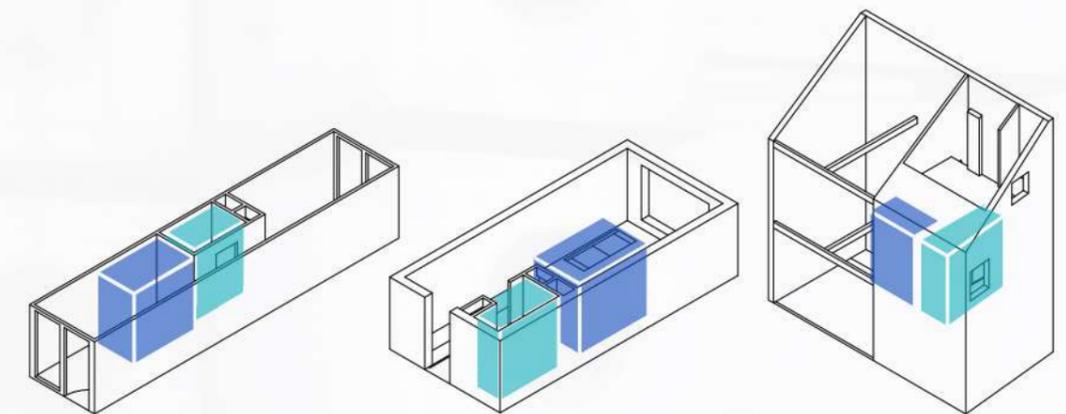
En la sección 3 analizamos tres necesidades básicas para la EEI: sueño, higiene y ejercicio. Todas ellas son igualmente importantes en la superficie, pero el ejercicio tiene unas implicaciones distintas. En primer lugar, no es estrictamente necesario para la supervivencia o el confort a corto plazo, a pesar de sus beneficios para la salud. En segundo lugar, la disponibilidad de espacios y equipamiento especializado para el ejercicio es independiente a los análogos analizados, al contrario de lo que ocurre en la EEI donde el equipamiento está integrado en el hábitat. Por tanto, sólo analizaremos lo referente a las consideraciones de sueño e higiene.

### Vivienda mínima

Volviendo a nuestros tres ejemplos de vivienda mínima, nos encontramos con espacios dedicados al descanso que están integrados, en mayor o menor medida, dentro de una volumetría unitaria. Estos espacios, que como ya hemos visto tanto en la OTB como en la Tierra tienen mucho que ver con la privacidad, cumplen una función específica en un volumen acotado, ya sea por plantas, por tabiques o simplemente mediante el mobiliario. En la casa en Shinjuku encontramos un único dormitorio que ocupa gran parte de la segunda planta, compartida con el aseo, y que queda conectado con la sala de estar a través de una doble altura. En el contenedor Keetwonen el dormitorio queda separado de la sala de estar por los tabiques del aseo, situado en medio del contenedor. Y en el caso del módulo de la Villa Mokum, quizá el más interesante por ser menos convencional, el dormitorio y la sala de estar son un único espacio, con lo que la zona de descanso queda definida únicamente por la cama y su entorno inmediato.

Este elemento de mobiliario, la cama, juega un papel fundamental en este análisis. Resulta que es precisamente la ausencia de una cama, localizada en un punto estable del espacio de descanso, la que confiere a la estancia en la EEI ese carácter de 'acampada' al que tantos tripulantes hacen referencia. Los *crew quarters* son un lugar de descanso bastante estable y localizado, pero dentro de ellos el saco de dormir es mucho más dinámico y puede desplazarse, colocarse en distintas posiciones o incluso moverse a otros puntos de la estación. Eso sumado a que, en ocasiones, no todos los miembros de la tripulación cuentan con el espacio personal del *crew quarter*, acaba por afectar a la experiencia del sueño en el hábitat orbital. En contraposición a esto tenemos los tres ejemplos de vivienda mínima, todos ellos con ese elemento como protagonista indiscutible y estático del espacio de descanso.

En cuanto a la higiene, parece que en la arquitectura en la Tierra esta consideración está irrevocablemente ligada a un espacio concreto, el aseo, en el que están localizadas las instalaciones correspondientes. Ocurre en los tres ejemplos de vivienda mínima, y ocurrirá en todos los demás análogos.



■ Espacios de descanso  
■ Espacios de higiene

Figura 4.09: Localización de los espacios de descanso e higiene en los tres ejemplos de vivienda mínima. Elaboración propia.

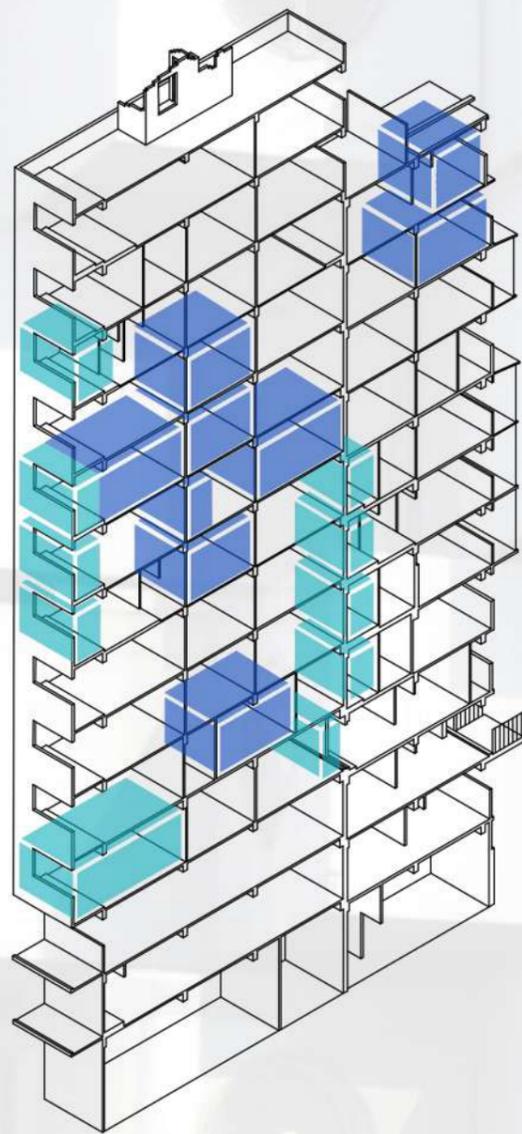
## Vivienda irregular

A pesar de la falta de medios de los habitantes en nuestros ejemplos de vivienda irregular, en ninguno de ellos faltan los espacios dedicados al descanso. Sin embargo, al contrario de lo que ocurre con la vivienda mínima (y entrando en el ejemplo menos convencional de Kowloon y otras agrupaciones de vivienda irregular de alta densidad) los espacios de descanso rara vez son privados. Algunos dormitorios pueden estar ocupados por familias completas, hacinadas en literas en espacios pequeños. Incluso en estas situaciones extremas, no obstante, es común que las personas utilicen siempre la misma cama o litera como espacio más personal, definiendo así, dentro de una estancia compartida, un espacio privado particular.

Esto nos da algunas claves sobre el tratamiento de los espacios de descanso en circunstancias extremas de hacinamiento. El hecho de que los habitantes de Kowloon y otras barriadas de vivienda irregular puedan vivir durante largos periodos de tiempo en estas condiciones nos indica que la ausencia de privacidad en el espacio de descanso o su tamaño reducido son factores que se pueden sobrellevar, aunque no por ello debemos asumir que son condiciones deseables. Es probable además, a la luz del análisis conjunto, que exista una relación entre la escasa calidad de estos espacios privados de descanso y la apropiación de espacios públicos, sacrificando de esa forma la individualidad por la colectividad en busca de unas condiciones menos extremas de hacinamiento.

La privacidad y el descanso están muy relacionados, tanto en la Tierra como en la OTB. Si algo nos muestran estos dos primeros análogos es que tendemos a buscar, de forma casi automática, un equilibrio entre estos dos mundos. Cuando se dispone de espacios privados y de descanso de calidad, la distinción entre lo privado y lo público queda claramente definida y la individualidad prima sobre la colectividad. Cuando el espacio de descanso es más reducido, se busca compensar esta deficiencia en el ámbito público, ya sea pasando más tiempo en el exterior o apropiándose de éstos espacios y difuminando la frontera.

La privacidad en lo concerniente a la higiene sigue aún estando presente, además por una razón constructiva: la agrupación de instalaciones en núcleos verticales para edificios en altura. La ausencia, en los casos de vivienda irregular, de agua corriente o saneamiento no impide la independización de estos espacios, aunque de nuevo, puede ocurrir en los casos más extremos que exista una única letrina para varias familias.



■ Espacios de descanso  
■ Espacios de higiene

Figura 4.10: Localización de los espacios de descanso e higiene en la sección de Kowloon. Elaboración propia.

## Metabolismo

En el caso de la cápsula Nagakin, la diferenciación del espacio de descanso se da de la misma forma que en el módulo de la Villa Mokum o en una habitación de hotel, porque la concepción del espacio es similar para los tres casos. Es la cama, como elemento de mobiliario, la encargada de esta diferenciación. Esto tiene una implicación directa, que es la individualidad del espacio (en cuanto a persona o a núcleo marital) por la ausencia de elementos de separación que permitan la privatización. Nuestros tres ejemplos anteriores son estancias para una única persona, aunque a diferencia de la habitación de hotel, el módulo de la Villa Mokum y la cápsula Nagakin resuelven todas las necesidades de habitabilidad en el mismo espacio, incluidos el trabajo y la alimentación.

Volviendo al descanso, resulta interesante en el ejercicio de diseño de mínimos de la cápsula Nagakin el estudiar las dimensiones del espacio de descanso que aporta la cama, hasta dónde se extienden en su entorno y las medidas de las que se dispone. La totalidad del espacio posterior de la cápsula (2.3 x 2.3 x 1.9 m) está destinado al descanso, un espacio que supone un volumen de 10 m<sup>3</sup>. de los 18 totales. El descanso es por tanto el protagonista, dentro de la cápsula, debido también al espacio que ocupa, en horizontal, la cama.

La higiene está localizada en un espacio separado dentro de la cápsula, como ocurre en todos los análogos. El aseo cuenta con una bañera, un lavabo, un inodoro y un espejo, todos cuidadosamente diseñados y solapándose en altura allí donde es posible, para un aprovechamiento óptimo del espacio.

## Bases antárticas

Como ya hemos comentado anteriormente, la base Halley VI dedica dos de sus módulos exclusivamente al descanso y la higiene, agrupándolos en uno de los extremos del eje longitudinal. En este caso no se aprecia una gran influencia del entorno hostil en el diseño de las habitaciones, que son compartimentaciones convencionales dentro de estos módulos destinados, al igual que los aseos comunes, dos por módulo. En la siguiente sección se analizará más detenidamente esta separación de usos y su influencia en la habitabilidad.

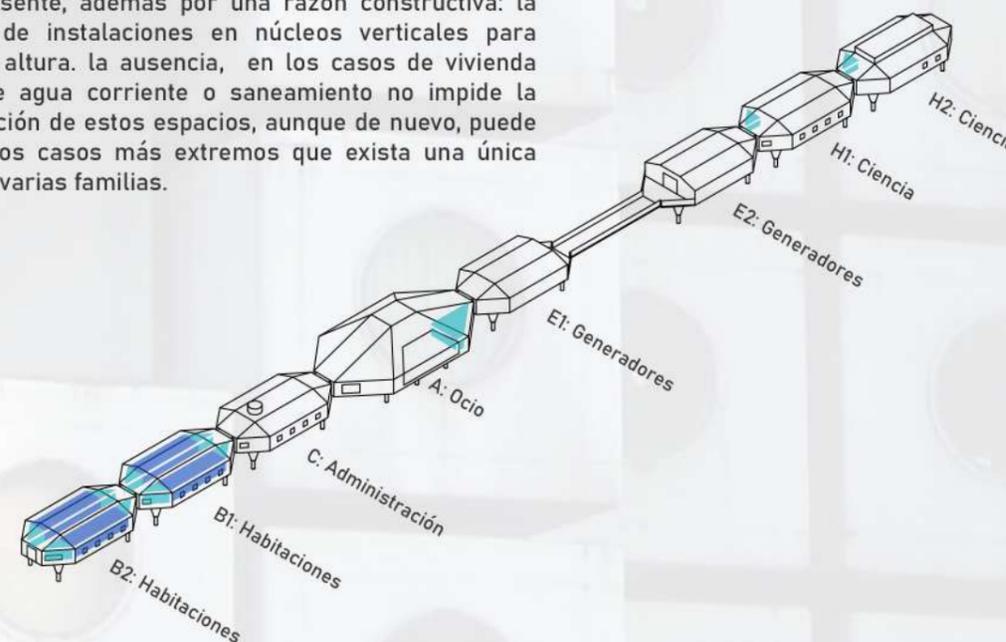


Figura 4.11: Localización de los espacios de descanso e higiene en la base Halley VI. Elaboración propia.

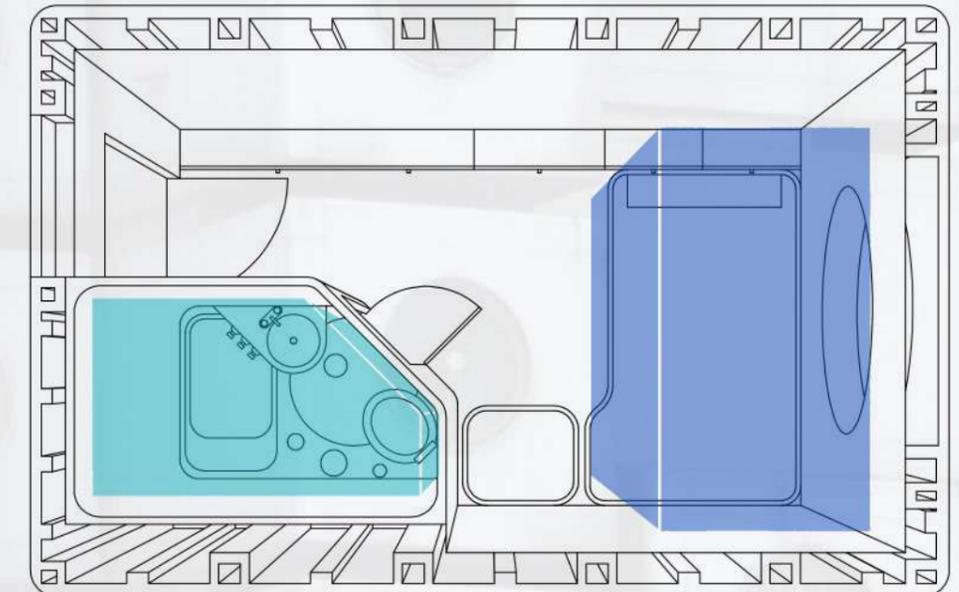


Figura 4.12: Localización de los espacios de descanso e higiene en la cápsula Nagakin. Elaboración propia.

## 4.2.4 ACTIVIDADES Y USOS

En el apartado de actividades y usos estudiábamos la distribución de espacios destinados directa o indirectamente al tiempo libre, al trabajo y al almacenamiento. En este caso, las tres consideraciones son de aplicación a los análogos.

### Vivienda mínima

El trabajo y el tiempo libre funcionan de manera distinta en la Tierra y en la OTB, ya que mientras que en la segunda las dos actividades deben llevarse a cabo en el interior del espacio presurizado del hábitat (el único disponible) esto no tiene por qué ser así en la primera. A pesar de ello, en los tres ejemplos de vivienda mínima analizados podemos detectar espacios dedicados a estos usos, así como a almacenamiento.

En el módulo Keetwonen, que recordemos está pensado como residencia para estudiantes, podemos encontrar un espacio de trabajo dedicado junto al espacio de descanso, en la entrada. Mientras que esta primera mitad superior del módulo queda por tanto dedicada al descanso y al trabajo, la mitad inferior, separada por el aseo, queda dedicada a la estancia y al ocio. El almacenamiento se resuelve mayoritariamente mediante el propio mobiliario, aunque también existe un pequeño espacio dedicado vinculado a la cocina.

En el módulo Villa Mokum, los usos de trabajo y tiempo libre están resueltos en un mismo espacio unitario, sin separaciones funcionales aparentes. El almacenamiento queda resuelto a través del mobiliario en distintos puntos del módulo, y al igual que en Keetwonen, se dispone de un pequeño espacio de almacenamiento en la cocina.

En la casa en Shinjuku podemos apreciar una vez más como la separación por plantas influye en la distribución de usos. El espacio destinado al tiempo libre es la sala de estar, el volumen a doble altura en la planta baja que queda vinculado visualmente con el exterior. La tercera planta acoge el estudio, que es el espacio destinado específicamente al trabajo dentro de la vivienda. El almacenamiento tiene cabida en todas las plantas, de nuevo, como parte del mobiliario.

Podemos extraer por tanto dos conclusiones. Primero, allí donde es posible al no ser el espacio unitario, se produce una separación marcada entre los espacios destinados al tiempo libre y al trabajo. Segundo, el almacenamiento se distribuye de forma laxa en distintos puntos de las estancias, y queda resuelto en un espacio mucho menor en relación al conjunto que en nuestro caso de estudio orbital.

### Vivienda irregular

En el caso particular de la vivienda irregular, la distribución de estas tres consideraciones resulta más difícil de analizar. Los usos varían enormemente dentro de las múltiples viviendas, y en la mayoría de los casos no están documentados. La sección de Kowloon, como excepción, nos da una visión gráfica muy interesante sobre estos usos del espacio en el ya desaparecido barrio, y aunque cumple una función más ilustrativa que rigurosa, pone de manifiesto algunas circunstancias muy curiosas.

Podemos detectar en primer lugar un denominador común para la gran mayoría de estancias representadas, que es el uso de la pared como lugar de almacenamiento en su práctica totalidad. Las paredes de las estancias de Kowloon están repletas de objetos, que abarrotan el espacio. Dado que la distinción entre trabajo y tiempo libre en el interior de las propias estancias resulta mucho más esquiva, visible tan sólo en algunos puntos, podemos concluir que este uso del espacio para almacenamiento con una componente desorganizada es protagonista frente a las otras dos consideraciones.

- Trabajo
- Tiempo libre
- Almacenamiento

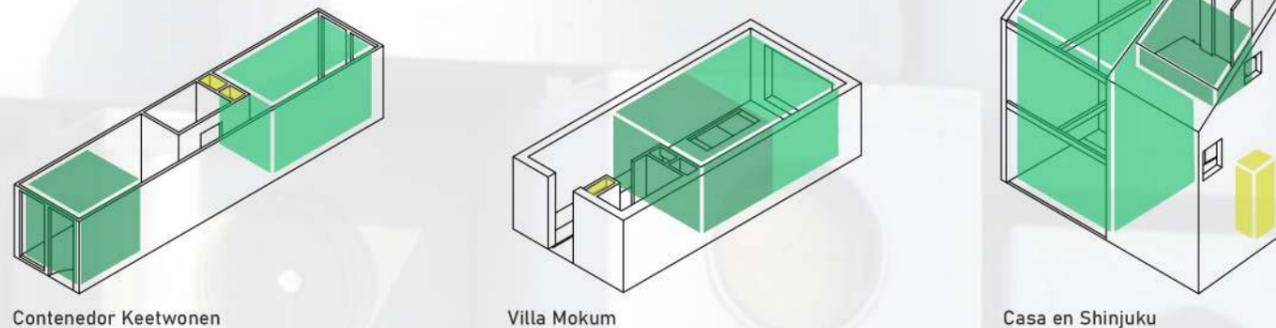


Figura 4.13: Localización de los espacios destinados a trabajo, tiempo libre y almacenamiento en los ejemplos de viviendas mínimas. Elaboración propia.

También es ilustrador el análisis conjunto de los edificios, más allá de las viviendas o estancias particulares. En la organización estratificada del barrio, se produce esta distinción que hemos visto de forma planificada en los ejemplos de vivienda mínima entre los espacios de trabajo y ocio, representados en este caso por las primeras cuatro plantas de los edificios y por las terrazas, respectivamente. En estos dos puntos, la dicotomía resulta evidente, tanto en uso como en el propio ambiente en que se dan las actividades. El trabajo se lleva a cabo en las plantas bajas de los edificios, de cara a la calle y en los entornos menos deseables, mientras que los más deseables, las terrazas con luz directa y ventilación, se destinan al ocio, a la estancia y al tiempo libre.

Recordemos la importancia que adquieren, en este tipo de barrios, las zonas comunes como extensión de la vivienda. Lo que está ocurriendo es una separación de usos privados (higiene, descanso y almacenamiento), que se resevan para el interior de las pequeñas viviendas, y un traslado de las actividades menos privadas (trabajo y ocio) a las zonas comunes. De esta forma, el conjunto del edificio actúa como una sola entidad multifamiliar.

### Metabolismo

La cápsula Nagakin está diseñada como un espacio unitario, lo que significa que los tres usos analizados se resuelven en el mismo espacio, sin separaciones. En lugar de ser las estancias las que delimitan los usos, es el mobiliario el que se encarga de ello.

En la cápsula original, el mismo espacio destinado para el descanso, la cama, está pensado para el tiempo libre. Junto a la cabecera de la misma hay una radio como única oferta de entretenimiento. Obviamente, una oferta tan limitada, junto al reducido espacio habitable, implica que el habitante de la cápsula pasará la mayor parte de su tiempo libre fuera de la misma, con lo que este uso queda en un segundo plano. En cuanto al trabajo, está resuelto también en la parte posterior de la cápsula, mediante una mesita desplegable que puede situarse delante de la cama de forma que ésta actúa también de silla de trabajo. Es decir, en lugar de distribuir los distintos usos y actividades en el espacio, se distribuyen en el tiempo: cuando no está sirviendo de lugar de descanso, la cápsula sirve de oficina o lugar de trabajo, de comedor, de estancia... El mobiliario desplegable favorece esta superposición de usos en el mismo espacio unitario.

El almacenamiento en el interior de la cápsula es reducido, y queda confinado a la pared opuesta al aseo. En ella se sitúan los armarios que albergan además los diferentes muebles desplegables (ver Figura 4.15, página 54).

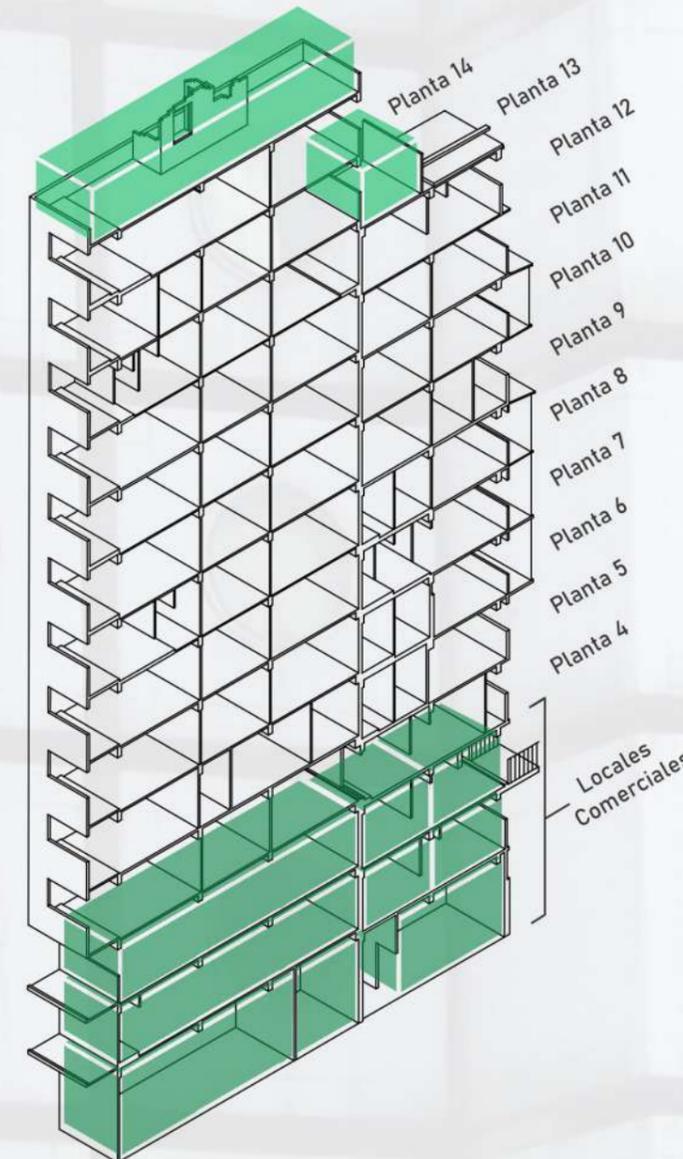


Figura 4.14: Localización de los espacios destinados a trabajo y tiempo libre en la sección de Kowloon. Puede apreciarse la diferenciación de uso entre los bajos comerciales y las terrazas. Elaboración propia.

## Bases antárticas

La división de los distintos usos en el ejemplo considerado de base antártica, la base Halley VI, surge como consecuencia de su propia concepción modular. Los espacios de los distintos módulos a lo largo del eje central de la estación tienen unas dimensiones estandarizadas, pero el uso que recibe cada uno de ellos condiciona su compartimentación interior.

Como ya hemos visto antes, podemos dividir la estación en tres zonas: descanso, ocio y trabajo. La primera, correspondiente a los dos primeros módulos, ya ha sido analizada. La zona destinada al ocio se encuentra en el centro de la estación, y debido a las condiciones hostiles del entorno, toda la oferta para el tiempo libre tiene que resolverse en el interior de un único módulo, el más grande de la estación, distribuido en dos plantas separadas por una escalera de caracol. El módulo funciona como cantina además de como espacio de esparcimiento.

Separados de la zona de descanso por el módulo de ocio están los cuatro módulos destinados al trabajo. Dos de ellos actúan como generadores, resolviendo las necesidades energéticas de la estación, mientras que los otros dos sirven de laboratorio.

La relación módulo-uso es muy inmediata, pero tiene sus ventajas y sus inconvenientes. La principal ventaja es que, al contrario de lo que ocurre en espacios unitarios, la separación entre el trabajo y el tiempo libre está bien definida y ayuda a diferenciar estos dos aspectos de la actividad humana, que generan problemas cuando se desarrollan en el mismo espacio<sup>[119]</sup>. Como inconveniente tendríamos un escaso aprovechamiento del espacio

disponible, que debido a la propia diferenciación genera zonas 'vacías' a distintas horas del día, frente a un uso más optimizado del espacio como podría ser el de la cápsula Nagakin, en el que las actividades se superponen en el tiempo en un mismo lugar.

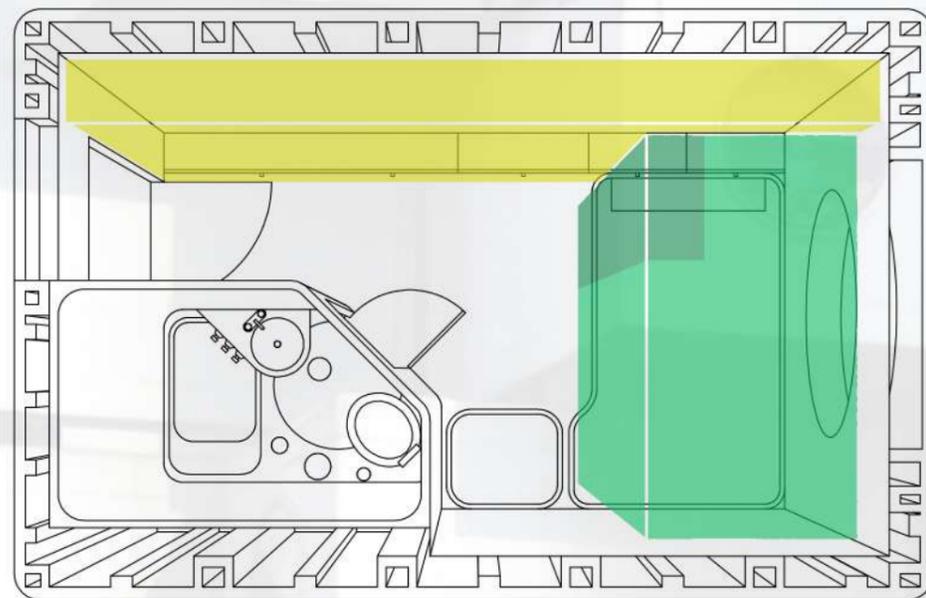


Figura 4.15: Localización de los espacios destinados a trabajo, tiempo libre y almacenamiento en la cápsula Nagakin. Elaboración propia.



Figura 4.16: Localización de los espacios destinados a trabajo y tiempo libre en la base Halley VI. Elaboración propia.

- Trabajo
- Tiempo libre
- Almacenamiento

## 4.2.5 ESTÉTICA Y BIENESTAR

En esta sección trabajamos diversas consideraciones: luz, color, vistas y apropiación de los espacios. Todas ellas son de aplicación en los análogos, pero no en igual medida en todos ellos. Dado que la acústica presenta especiales dificultades por la ausencia de mediciones en los ejemplos estudiados, no se estudiará en esta sección.

### Vivienda mínima

Para el caso de nuestro análogo de vivienda mínima, resulta interesante el análisis de la iluminación natural y el papel que juega en los espacios de los distintos ejemplos. En los tres casos nos encontramos con viviendas o módulos con acceso a luz natural en al menos una de sus fachadas, lo cual se utiliza para cualificar los espacios vinculados a esa entrada de luz.

El módulo Keetwonen es quizá el más conflictivo en este aspecto. Debido a que está diseñado a partir de un contenedor de transporte de mercancías, el espacio es eminentemente longitudinal, y dado que la superposición de módulos se da de la misma forma que en un barco, con los contenedores agrupados con el lado largo en contacto, la entrada de luz natural está limitada a los dos lados cortos del contenedor, con un área de 6.24 m<sup>2</sup> cada uno. Para aprovechar estas entradas de luz relativamente pequeñas, las estancias de descanso, trabajo y estar se sitúan en los extremos, junto a la luz y ventilación natural, mientras que el aseo, que divide en dos el espacio, está situado en el centro con ventilación forzada.

En el módulo de la Villa Mokum la entrada de luz se da por una única fachada, a través de una ventana de 2.7 m de ancho en la que se localiza el lugar de estancia-trabajo. Al no existir la doble entrada de luz del módulo Keetwonen, no se produce la división en dos de los espacios sino que toda la actividad se aglutina en un único lugar.

En cuanto a la casa en Shinjuku, la entrada de luz se produce por sus cuatro fachadas y su cubierta, a través de varias ventanas y lucernarios. La principal de estas entradas de luz natural se localiza en la sala de estar, donde un gran ventanal se desarrolla en vertical en toda la doble altura.

Al final, estas distribuciones responden a una máxima de la arquitectura: los espacios vivideros, los más deseables, deben estar fuertemente vinculados a la luz natural y la ventilación, en contacto con el exterior. Es una cualificación que está presente en todos los análogos que analizamos.



Figura 4.17: Análisis de Iluminación en planta en las viviendas mínimas, estudio original de Narváez, (2018)<sup>[120]</sup>.

<sup>[119]</sup> Ciolfi, Luigina Et al. (2012). *Social Aspects of Place Experience in Mobile Work/Life Practices. Research to Practice in the Design of Cooperative Systems: Results and Open Challenges*, p. 183-196. Springer.

<sup>[120]</sup> Narváez, Rocío (2018). La vivienda mínima del siglo XXI: Soluciones en Holanda y Japón. Trabajo de fin de Grado. ETS de arquitectura de la Universidad Politécnica de Madrid.

## Vivienda irregular

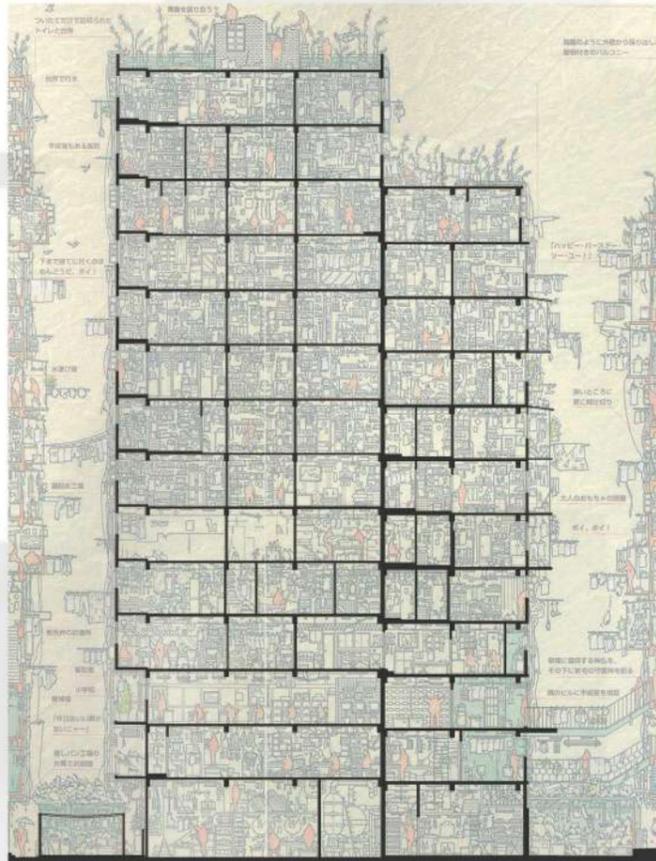
En el caso particular de Kowloon, dentro de la vivienda irregular, juegan un papel protagonista tanto la iluminación y ventilación natural como la apropiación de los espacios.

La luz en la ciudad amurallada era un recurso como cualquier otro, con los espacios más cotizados coincidiendo con los que más iluminación natural tenían. En este sentido, podemos apreciar marcados contrastes entre las estancias interiores y exteriores. Las primeras, situadas en el corazón de la amalgama de edificios agrupados, carecen por completo de luz y de ventilación, hasta unos extremos difícilmente repetibles en cualquier otra agrupación de viviendas. En algunos casos vemos que es necesario cruzar varias estancias hasta llegar a un exterior, que en ocasiones coincide con un pequeño callejón o un ventanuco hacia un patio de luces. Las estancias exteriores no son mucho mejores, precisamente porque la agrupación de los edificios de hasta catorce plantas entorno a callejones estrechos genera una anomalía urbana que evita la entrada de cualquier tipo de luz natural incluso en las estancias exteriores, salvo en aquellas que tienen la suerte de abrirse por encima de las cubiertas de edificios de menor altura. En consecuencia, la ciudad amurallada de Kowloon tenía la reputación de ser un lugar oscuro hasta unos extremos distópicos.

Cabe destacar también la personalización de los espacios interiores que llevan a cabo los habitantes mediante la acumulación de objetos en las paredes. No es una decoración propiamente dicha, sino algo más funcional, una apropiación de espacios mínimos casi estandarizados ajustándolos a las particularidades de sus residentes y de un estilo de vida que, como hemos visto antes, expande la vivienda hacia las áreas comunes de los edificios en su parte más alta.

## Metabolismo

Un componente fundamental en la cápsula Nagakin es la ventana redonda de 1.3 m de diámetro. Permite la iluminación y ventilación natural de la agrupación de cápsulas, y cualifica el espacio unitario interior en la parte posterior, en la que se agrupan los distintos usos. Como hemos visto en la OTB, en un espacio confinado, las vistas pueden definir un lugar de estancia, y algo parecido es lo que ocurre en la *Nagakin Capsule Tower*, donde la altura dota a las cápsulas de unas vistas interesantes sobre la calle que no hemos visto en análogos anteriores.



Es interesante también la elección del color en el espacio interior. El metabolismo es una variante regional del movimiento moderno, un movimiento arquitectónico que tiende a dejar de lado (salvo en notables excepciones como la de Alberto Barragán) el color de los espacios, más allá del que aporta el propio material. Esta honestidad constructiva se aplica en la cápsula Nagakin, cuyo interior, de forma similar a la EEI, no se compromete con ningún color como herramienta de ampliación del espacio y limita su paleta a blancos y tonos de grises.

Por último, la modularidad de las cápsulas y su gran número han generado una situación que, con el paso del tiempo, ha derivado en varios tipos de personalización de los espacios interiores y de sus características, hasta el punto de que son pocas las cápsulas que conservan su distribución original. Muchas han sido acondicionadas como oficinas, o el mobiliario interior sustituido según las necesidades particulares de cada habitante. Este repertorio de soluciones son un gran ejemplo de cómo la apropiación del espacio por parte de los usuarios mediante la personalización lleva, partiendo de soluciones exactamente iguales, a resultados muy diferentes, y es testimonio de su importancia de cara a la habitabilidad.

Figura 4.18: Apropiación de los espacios en la sección de Kowloon. Mayor detalle en la planimetría original de Terasawa, H. Et al<sup>[20]</sup>.

## Bases antárticas

En la base Halley VI es destacable el uso del color como elemento cualificador de los espacios e incluso definidor de su uso. Esto es algo que se da tanto en el interior como en el exterior, por razones muy distintas. Una vez más, el entorno hostil en que se encuentra la base condiciona su respuesta arquitectónica, y el color es una más de las múltiples adaptaciones técnicas a las condiciones climáticas y meteorológicas de la Antártida.

Durante una tormenta de nieve, la visibilidad se reduce hasta un punto que puede resultar peligroso para los habitantes de la base que se encuentren en el exterior. Por esta razón, los módulos están pintados de colores vivos, azul intenso en el caso de los módulos de descanso y rojo intenso en el módulo de ocio, el de mayor tamaño. De esta forma, de cara al exterior, los módulos destacan sobre el paisaje blanco y actúan como un faro en condiciones de escasa visibilidad. En el interior, el patrón de colores se repite, en este caso como uno más de los elementos diferenciadores de uso que, como hemos visto, están vinculados a la separación del espacio en módulos.

Figura 4.19: Análisis de iluminación en la cápsula Nagakin. Elaboración propia.

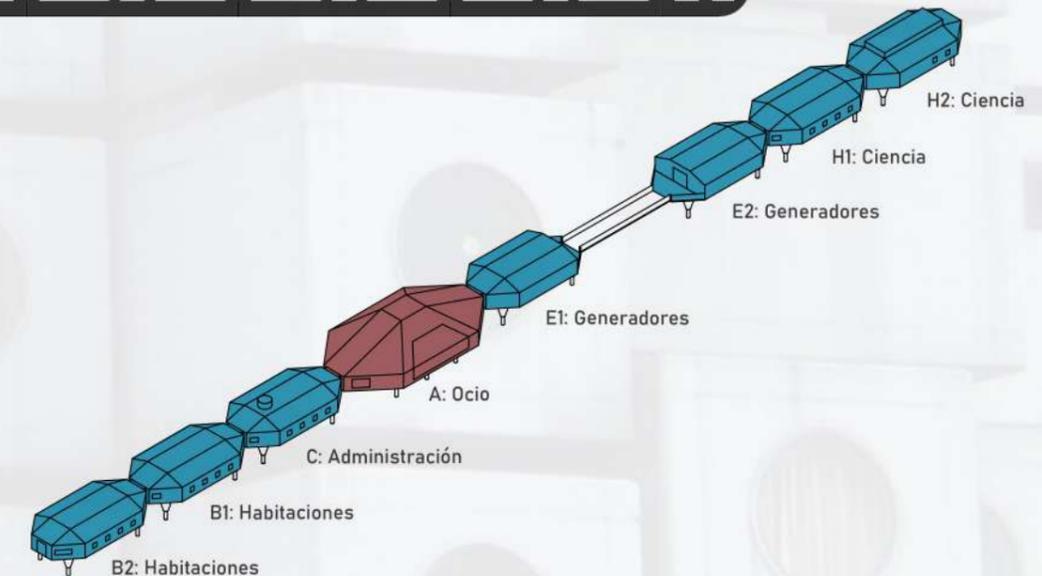
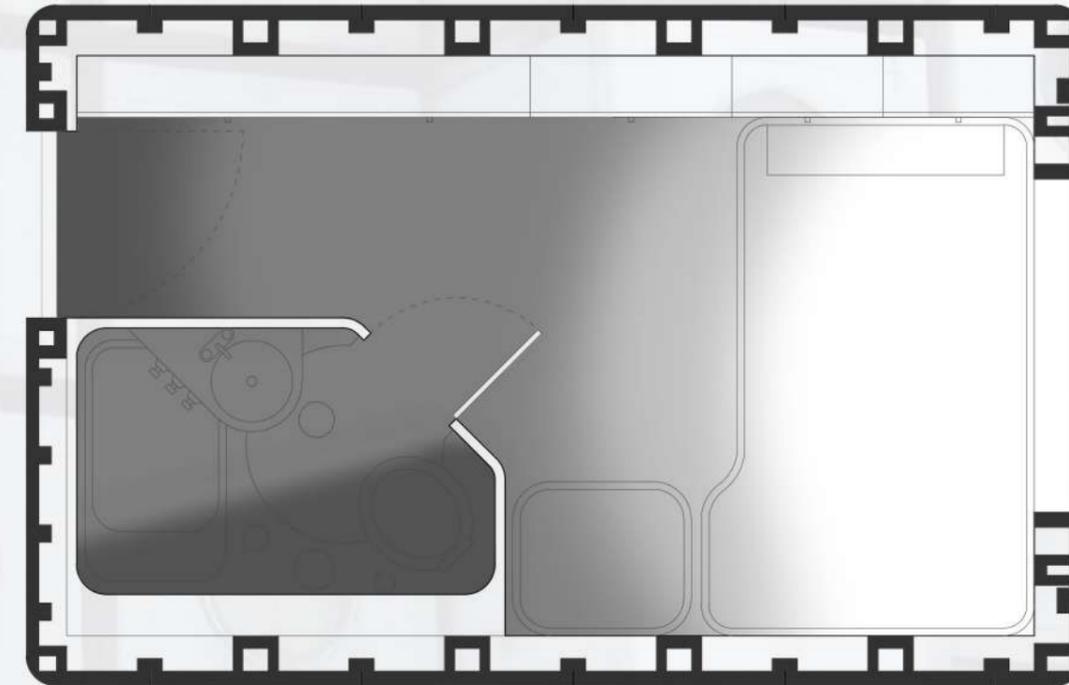


Figura 4.20: Uso del color en la base Halley VI, color real. Elaboración propia.

# HABITAR EN LA ÓRBITA TERRESTRE BAJA

Un estudio desde la óptica de la arquitectura

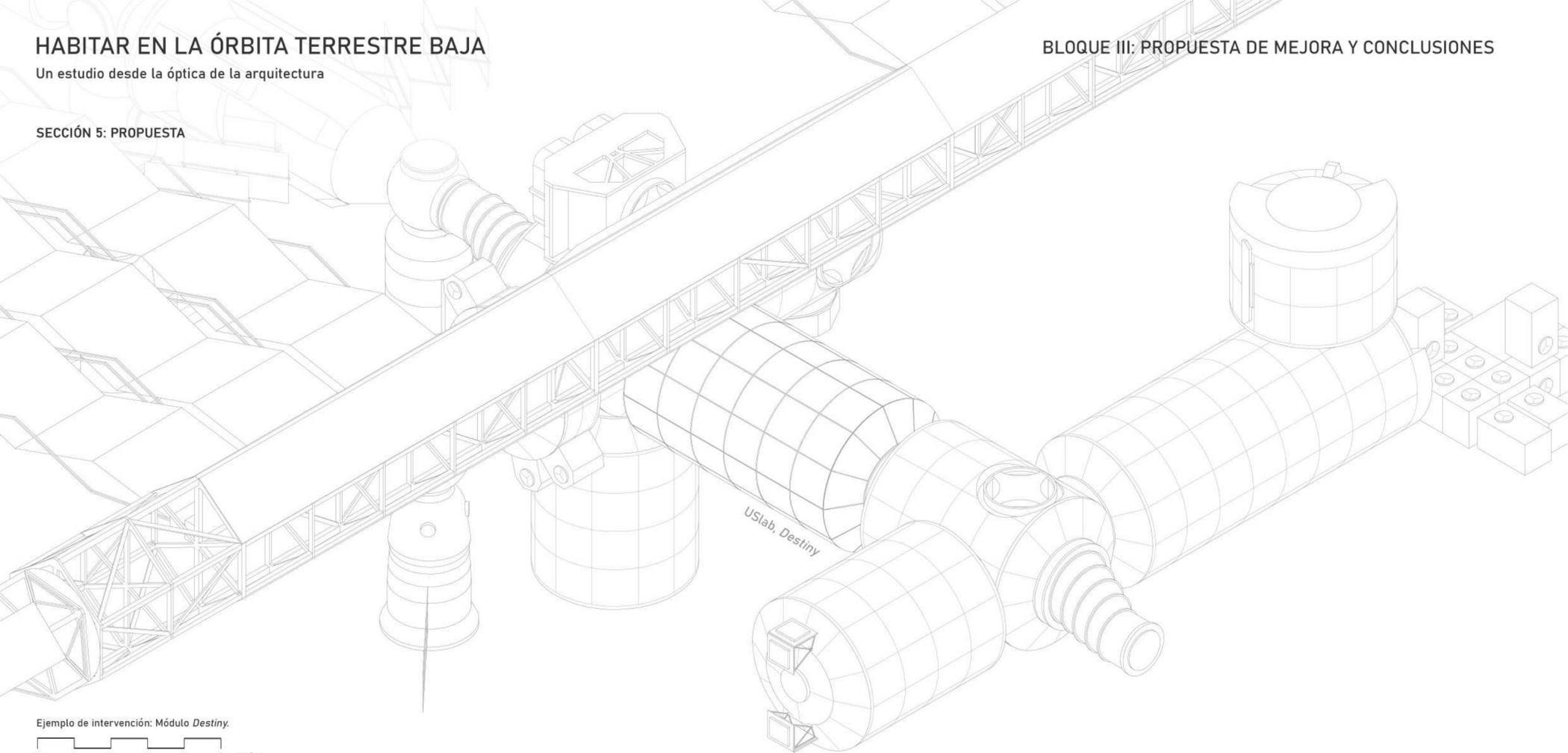
Fondo: Vista interior del módulo *Destiny*, modificado.

## BLOQUE III: PROPUESTA DE MEJORA Y CONCLUSIONES

El desarrollo del trabajo hasta este punto nos ha llevado a examinar minuciosamente la EEI y su proceso de diseño desde un punto de vista interdisciplinar, valorando los logros que ha supuesto en cuanto a habitabilidad orbital y las carencias que aún presenta en relación a situaciones similares en la arquitectura terrestre. Este análisis nos ha dotado de una herramienta metodológica con la que ahora podemos, al fin, extraer conclusiones de cara a posibles restauraciones del hábitat en los últimos años de su vida útil, o incluso al diseño de futuros hábitats orbitales. Junto a estas conclusiones, se procederá a plantear un posible proyecto de mejora para la EEI en base a las problemáticas detectadas y las posibles soluciones que hemos ido introduciendo a lo largo del Bloque II.

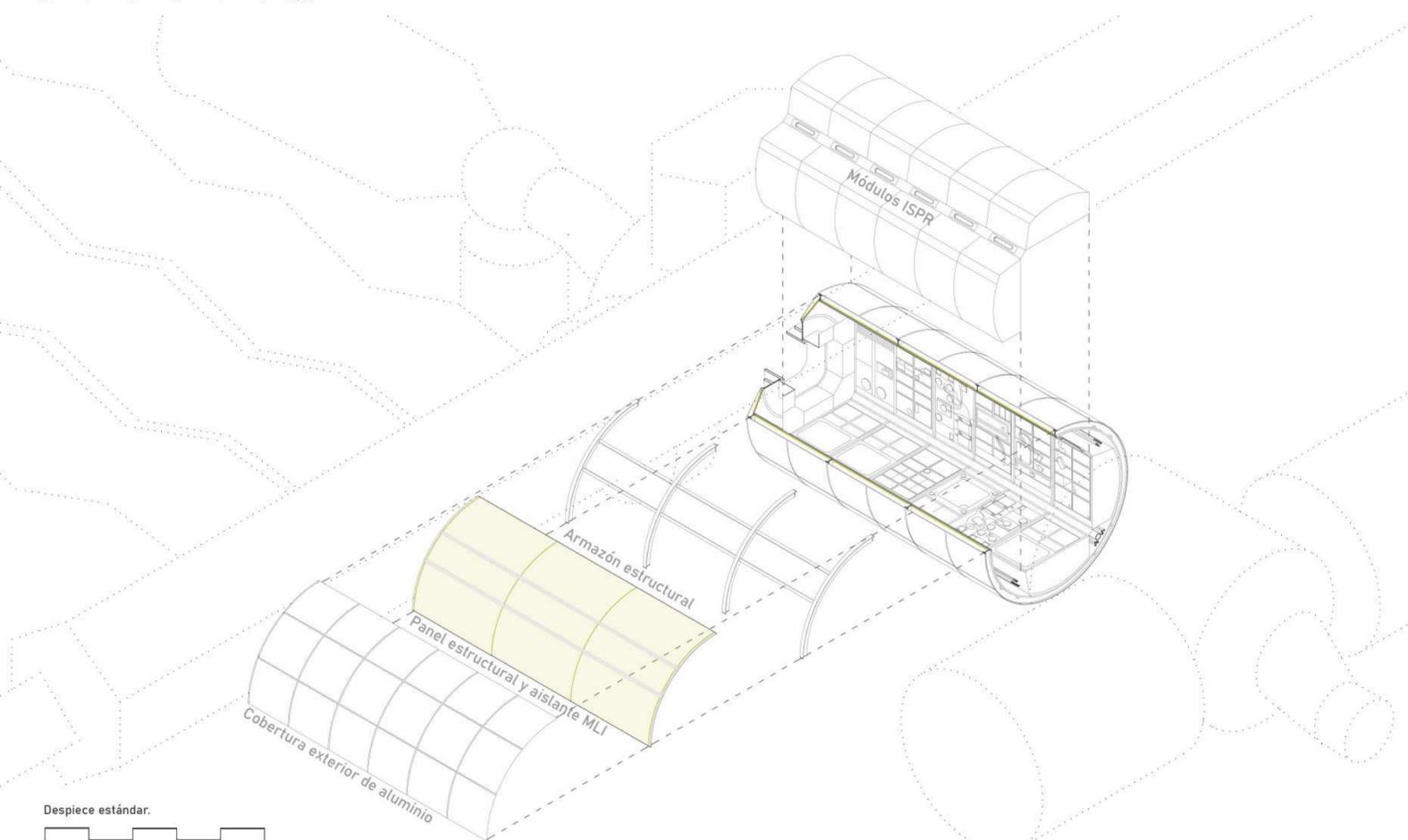
Este último bloque pretende por tanto alcanzar el objetivo específico OE3, desde un enfoque principalmente propositivo. El ejercicio académico que sigue (y que cuenta, por supuesto, con las ventajas e inconvenientes de esta visión a medio camino entre la arquitectura y la ingeniería aeroespacial) se plantea como una propuesta dual para la NASA con dos alternativas, en principio, excluyentes: una intervención 'ligera', de escasa entidad material y focalización en la economía de medios, y una intervención 'pesada', que recurre a un nuevo módulo presurizado denominado 'Módulo de Habitabilidad' para resolver algunas de las problemáticas detectadas anteriormente. Las dos propuestas, junto con las conclusiones extraídas del proceso y de los análisis del bloque II, cerrarán finalmente este trabajo.

SECCIÓN 5: PROPUESTA



Ejemplo de intervención: Módulo Destiny.

0m 1 2 3 4 5 E: 1/100



Despiece estándar.

0m 1 2 3 4 5 E: 1/100

5.1 PROPUESTA 1

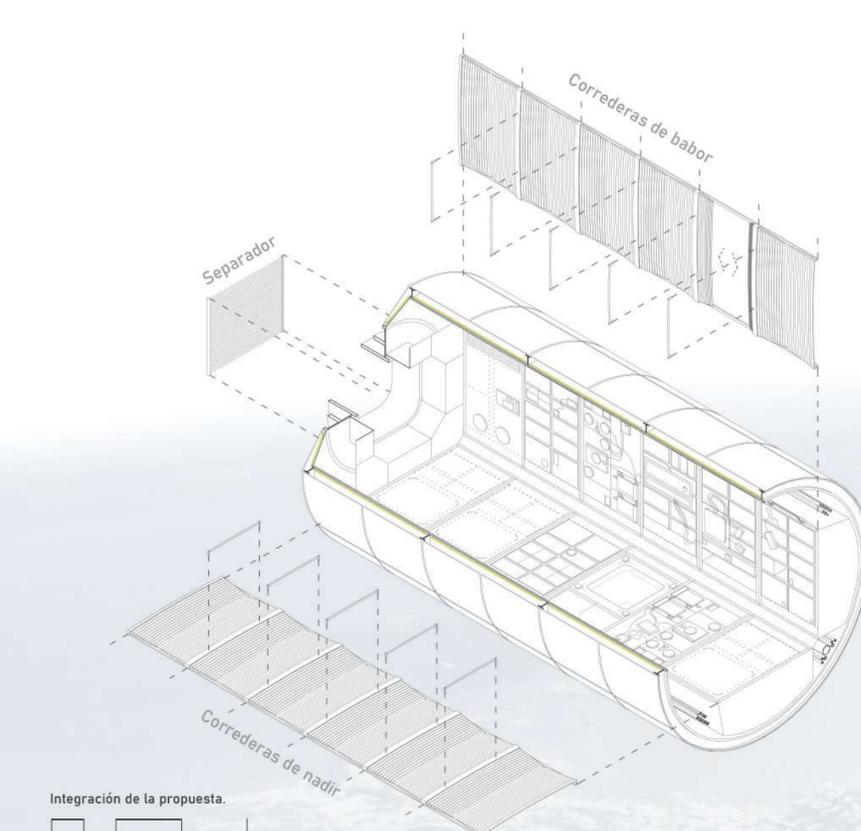
INTERVENCIÓN LIGERA

La primera propuesta se desarrolla en dos vertientes, actuando ambas sobre los módulos ISPR y los espacios existentes.

En primer lugar, se plantea una reorganización de los ISPR más conflictivos (por su interacción con el espacio habitable o las actividades de la tripulación) en nuevas ubicaciones que permiten un mejor aprovechamiento de las cualidades de ciertos espacios ya existentes.

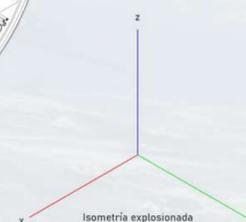
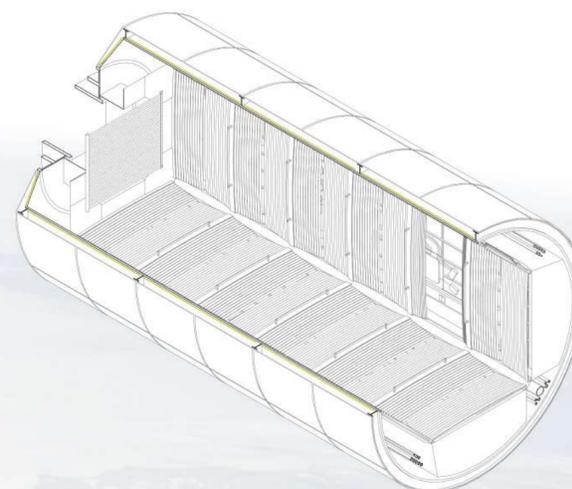
En segundo lugar, se plantea una intervención sobre la totalidad de los ISPR de la estación y algunos de los vestíbulos de conexión entre módulos. La piel retráctil que se propone, superpuesta sobre los ISPR, actúa como elemento unificador y cualificador del espacio a la par que protege los equipamientos de la estación contra impactos, minimiza mediante sus características materiales las problemáticas acústicas de la estación, y genera un sustrato para el aprovechamiento de factores previamente inexplorados o infrautilizados, como el color y su influencia en la percepción de los espacios.

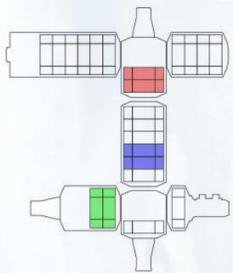
El objetivo de esta primera propuesta es abordar las problemáticas más inmediatas de la estación en el ámbito de la habitabilidad, el bienestar y la estética arquitectónica con una inversión material ligera tanto en masa como en impacto sobre el espacio, aprovechando el diseño modular que venimos analizando desde la Sección 2.



Integración de la propuesta.

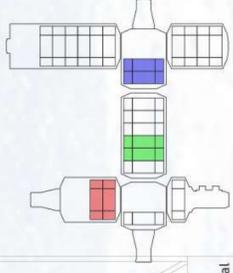
0m 0.5 1 2 3 E: 1/75





Posición inicial

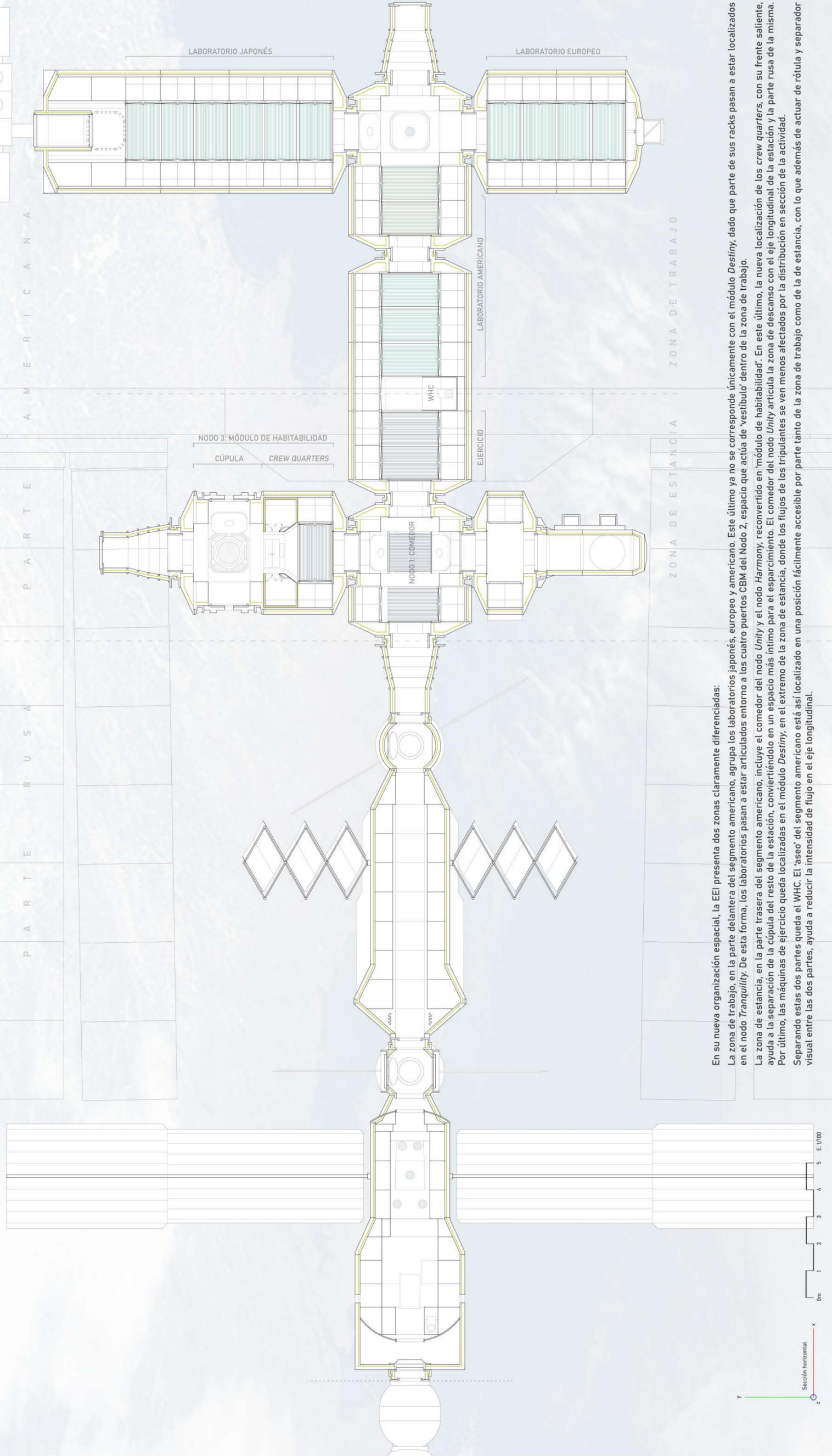
La reorganización espacial afecta a la localización de un total de 24 módulos ISPR, en tres grupos de ocho. El primer grupo, en verde, lo conforman el WHC y los ISPR anexos, dedicados al tratamiento de agua. El segundo, en rojo, lo conforman los *crew quarters* y los módulos de almacenamiento vinculados a ellos. El tercero, en azul, representa algunos de los módulos del laboratorio *Destiny*, dedicados a almacenamiento, aviónica y a racks de investigación *EXPRESS*. Desplazar los módulos de estas localizaciones clave nos permite resolver muchas de las problemáticas espaciales y de uso de la estación.



Posición final

El segundo cambio desplaza el WHC y los ISPR de tratamiento de agua a su ubicación final, en los espacios 2 y 3 del laboratorio *Destiny*. El WHC se coloca así en una ubicación que le permite actuar de separador entre usos, de forma similar al análogo terrestre del contenedor *Keetwomen*, sin afectar demasiado a la localización de los módulos de tratamiento de agua dentro del segmento americano de la estación.

En el primer cambio, los *crew quarters* quedan localizados en el Nodo 3. Esto nos permite resolver la problemática arquitectónica del WHC y las máquinas de ejercicio localizadas junto a la cúpula, espacio de ocio protagonista en la estación, y al mismo tiempo cualifica el Nodo 3 como un 'módulo de habitabilidad', un lugar de relajación, entretenimiento y descanso en su totalidad. Este nuevo uso queda localizado en un eje perpendicular, diferenciado del flujo principal de la estación entre las dos zonas que se pretenden diferenciar, la de 'estancia' y la de 'trabajo'.

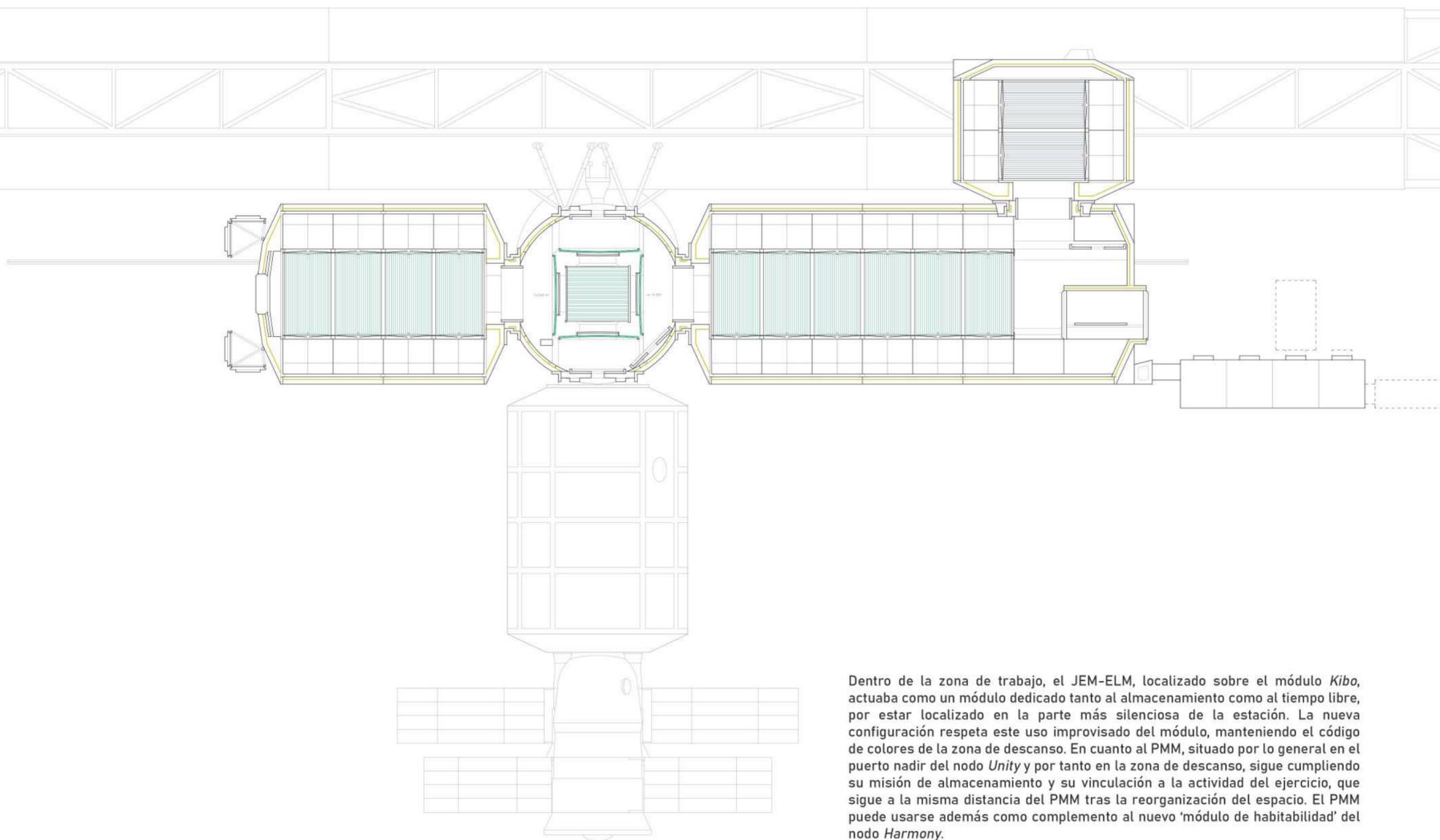


En su nueva organización espacial, la EEI presenta dos zonas claramente diferenciadas:

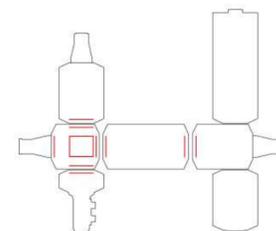
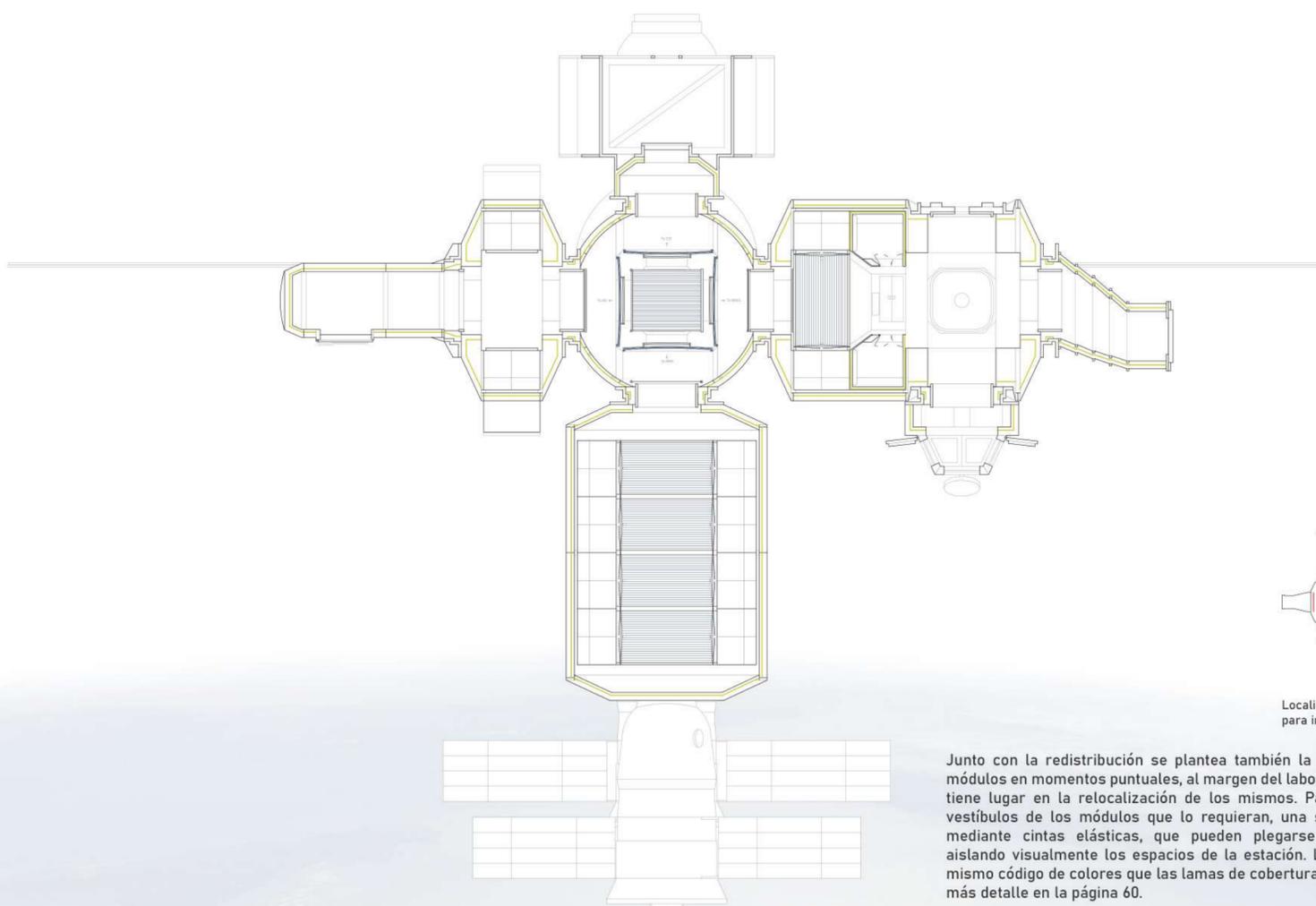
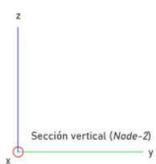
La zona de trabajo, en la parte delantera del segmento americano, agrupa los laboratorios japonés, europeo y americano. Este último ya no se corresponde únicamente con el módulo *Destiny*, dado que parte de sus racks pasan a estar localizados en el nodo *Tranquility*. De esta forma, los laboratorios pasan a estar articulados entorno a los cuatro puertos CBM del Nodo 2, espacio que actúa de 'vestíbulo' dentro de la zona de trabajo.

La zona de estancia, en la parte trasera del segmento americano, incluye el comedor del nodo *Unity* y el nodo *Harmony*, reconvertido en 'módulo de habitabilidad'. En este último, la nueva localización de los *crew quarters*, con su frente saliente, ayuda a la separación de la cúpula del resto de la estación, convirtiéndolo en un espacio más íntimo para el esparcimiento. El comedor del nodo *Unity* articula la zona de descanso con el eje longitudinal de la estación y la parte rusa de la misma. Por último, las máquinas de ejercicio queda localizadas en el módulo *Destiny*, en el extremo de la zona de estancia, donde los flujos de los tripulantes se ven menos afectados por la distribución en sección de la actividad. Separando estas dos partes queda el WHC. El 'aseo' del segmento americano está así localizado en una posición fácilmente accesible por parte tanto de la zona de trabajo como de la de estancia, con lo que además de actuar de rótula y separador visual entre las dos partes, ayuda a reducir la intensidad de flujo en el eje longitudinal.





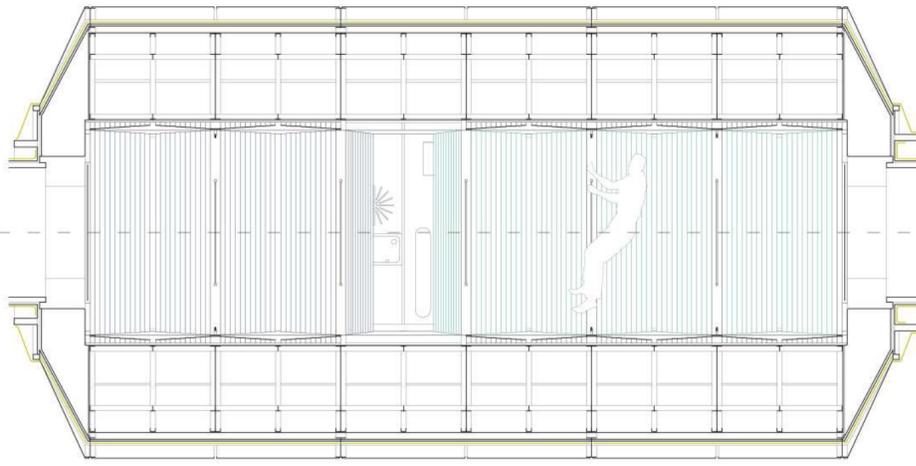
Dentro de la zona de trabajo, el JEM-ELM, localizado sobre el módulo *Kibo*, actuaba como un módulo dedicado tanto al almacenamiento como al tiempo libre, por estar localizado en la parte más silenciosa de la estación. La nueva configuración respeta este uso improvisado del módulo, manteniendo el código de colores de la zona de descanso. En cuanto al PMM, situado por lo general en el puerto nadir del nodo *Unity* y por tanto en la zona de descanso, sigue cumpliendo su misión de almacenamiento y su vinculación a la actividad del ejercicio, que sigue a la misma distancia del PMM tras la reorganización del espacio. El PMM puede usarse además como complemento al nuevo 'módulo de habitabilidad' del nodo *Harmony*.



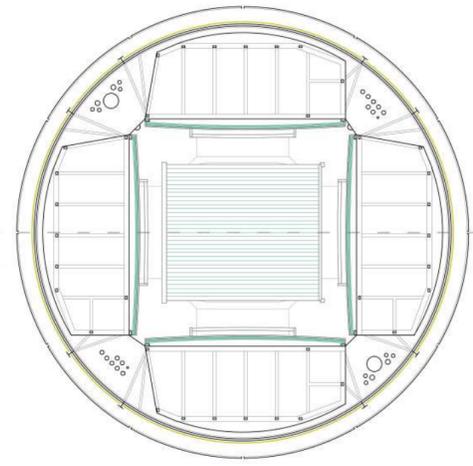
Localización de las puertas retráctiles para independización de módulos

Junto con la redistribución se plantea también la posibilidad de independizar módulos en momentos puntuales, al margen del laborioso proceso de sellado que tiene lugar en la relocalización de los mismos. Para ello se instalan, en los vestíbulos de los módulos que lo requieran, una serie de puertas retráctiles mediante cintas elásticas, que pueden plegarse y desplegarse fácilmente aislando visualmente los espacios de la estación. Las cintas elásticas usan el mismo código de colores que las lamas de cobertura de los ISPR, que vemos con más detalle en la página 60.





Ejemplo de instalación: módulo *Destiny*.  
0m 0,5 1 1,5 2 2,5  
Escala 1:50



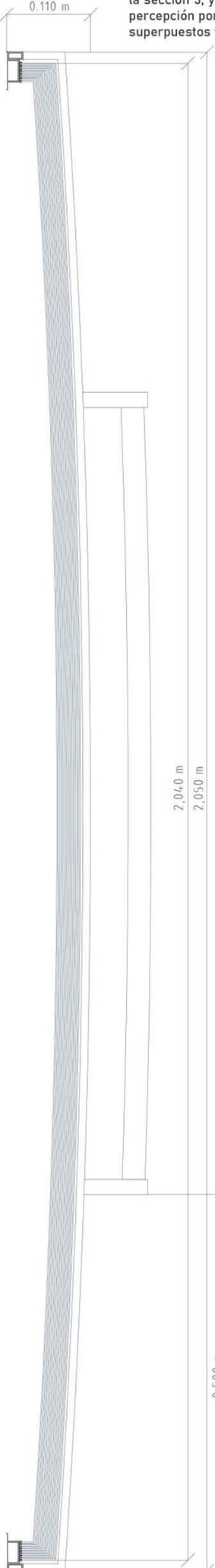
La segunda parte de esta primera propuesta es la piel retráctil, un sistema modular superpuesto a los racks ISPR que cumple la función de unificar los espacios interiores de los módulos, reduciendo la apariencia de desorden fruto de las diferentes características de cada uno de los racks. Además de la cualificación estética del espacio, la piel retráctil aporta una amplia superficie de absorción acústica para reducir los problemas sonoros que estudiamos en la sección 3, y aporta un campo de pruebas sobre la influencia del color en la habitabilidad orbital, no sólo como elemento de orientación y definición de usos, sino también como elemento amplificador del espacio a un nivel de percepción por parte de la tripulación. El sistema puede compatibilizarse con las ayudas y restricciones al movimiento montadas sobre los racks ISPR mediante raíles, de forma que no interfiere con el funcionamiento de elementos superpuestos y externos a las lamas como ordenadores portátiles, luminarias desplazables, mesas de trabajo, máquinas de ejercicio o los controles del brazo robótico de la estación.

La geometría de las lamas, tanto en sección como en alzado, busca evitar la interferencia con el sistema de iluminación de los módulos, localizado en las esquinas, y al mismo tiempo generar un espacio lo suficientemente amplio frente a los racks ISPR, de forma que los componentes y el cableado no supongan un obstáculo para el plegado de las lamas.

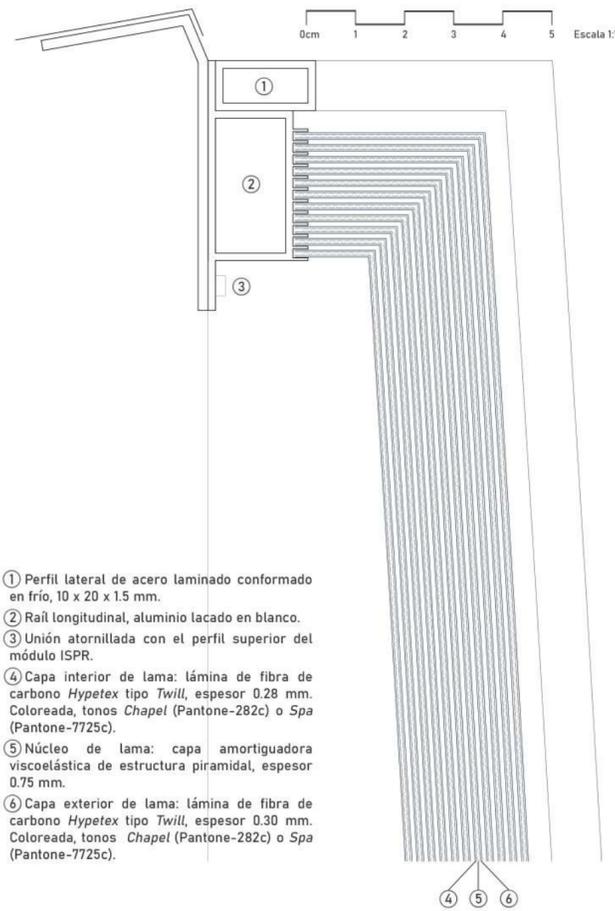
El volumen habitable original del módulo *Destiny*, representado en el ejemplo, es de 39,14 m<sup>3</sup>. Tras la instalación del sistema, ese volumen queda reducido a 35,14 m<sup>3</sup>, una reducción total significativa del 10%. A pesar de ello, su distribución lateral y convexa minimiza este factor, lo que sumado al efecto de ampliación espacial del color y la uniformidad podría llegar a generar la percepción de un espacio más amplio que el original.

El sistema se instala sobre los módulos ISPR mediante un raíl longitudinal atornillado a los travesaños superior e inferior del rack. En el travesaño se instalan a su vez los perfiles laterales de sujeción, adaptados como hemos dicho a los diferentes sistemas de uso externo, y las lamas plegables, que se retraen hasta quedar debajo de los perfiles laterales. Tanto los raíles superior e inferior como los perfiles laterales están situados sobre los travesaños del ISPR, de forma que, una vez plegado, el sistema no interfiere con la extracción de componentes del rack o con la apertura de los almacenamientos de tamaño sub-rack.

Finalmente, los colores dados a la lama, Pantone-282c o Pantone-7725c (ambos proporcionados por el fabricante) corresponden con la separación de usos, el primer tono para la zona de estancia y el segundo para la zona de trabajo.



2,040 m  
2,050 m



- ① Perfil lateral de acero laminado conformado en frío, 10 x 20 x 1,5 mm.
- ② Raíl longitudinal, aluminio lacado en blanco.
- ③ Unión atornillada con el perfil superior del módulo ISPR.
- ④ Capa interior de lama: lámina de fibra de carbono Hypetex tipo Twill, espesor 0,28 mm. Coloreada, tonos Chapel (Pantone-282c) o Spa (Pantone-7725c).
- ⑤ Núcleo de lama: capa amortiguadora viscoelástica de estructura piramidal, espesor 0,75 mm.
- ⑥ Capa exterior de lama: lámina de fibra de carbono Hypetex tipo Twill, espesor 0,30 mm. Coloreada, tonos Chapel (Pantone-282c) o Spa (Pantone-7725c).

Las lamas están diseñadas para maximizar la absorción acústica, aportando al mismo tiempo una importante durabilidad y resistencia al impacto. Dada la importancia, además, de la masa de cara al lanzamiento orbital de estos nuevos componentes, se toma la decisión de usar como material la fibra de carbono, que reúne todas las características exigidas.

Cada lama está conformada como un panel sándwich con dos láminas de fibra de carbono Hypetex<sup>[122]</sup> coloreada, una exterior y una interior de diferente grosor, y un núcleo viscoelástico de estructura piramidal que actúa de amortiguador de vibraciones, aumentando significativamente las ya razonables propiedades acústicas de la fibra de carbono<sup>[123]</sup>.

En la Figura 5.01, elaborada a partir de la figura 21 del estudio de Jinshui Yang et al.<sup>[123]</sup>, se pueden ver las frecuencias naturales del panel sándwich con una capa viscoelástica de espesor de 0,75 mm, el de mejor comportamiento acústico:

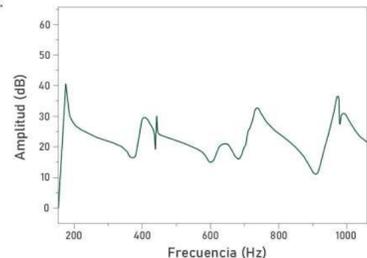
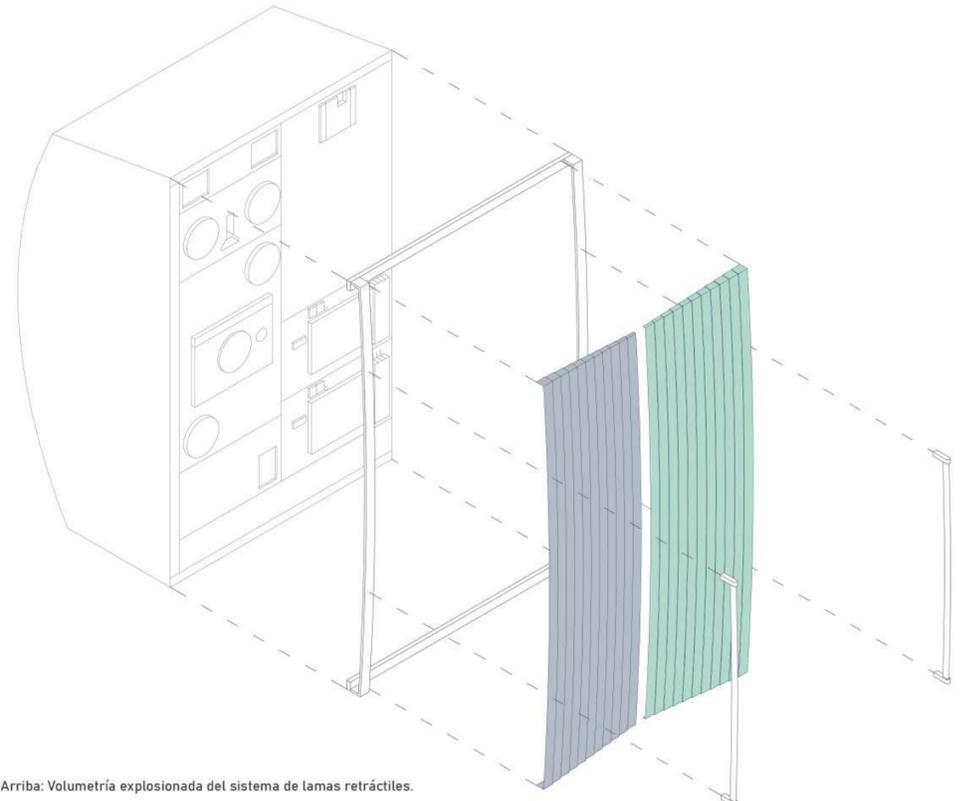


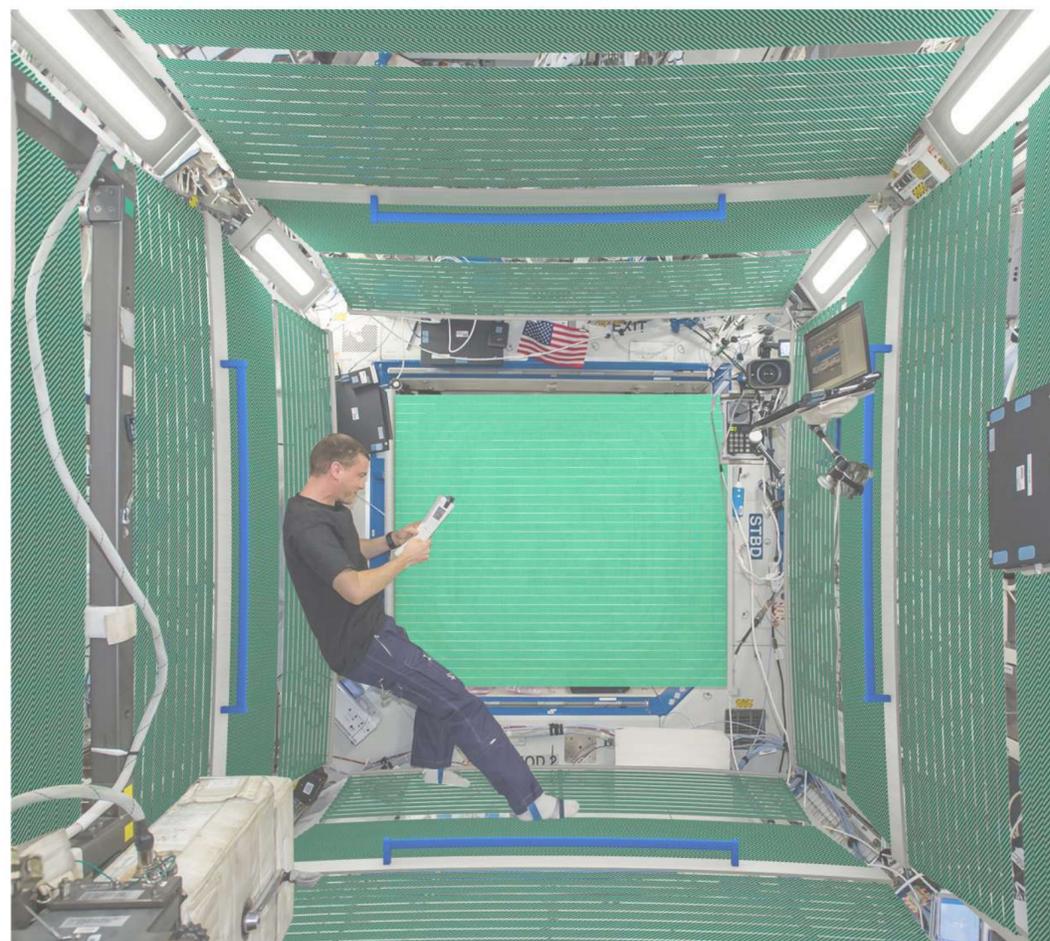
Figura 5.01: Análisis de respuesta frecuencial para las lamas. Puede observarse una reducción de la amplitud de vibración en las frecuencias naturales de 400, 600, 700 y 900 Hz.

Al tratarse de un elemento multicapa, y para minimizar las caídas de amortiguamiento acústico de la fibra de carbono como resultado de estas frecuencias de resonancia, se decide utilizar diferentes espesores en la capa exterior y la interior (0,3 y 0,28 mm respectivamente), de forma que las frecuencias no coincidan<sup>[124]</sup>. El resultado es un espesor de lama de 1,33 mm, de los cuales 0,58 mm son resistentes. En cuanto a resistencia, eso es equivalente, de forma aproximada, a un perfil de acero de 3 mm de espesor, suficiente para hacer frente a los esfuerzos de impacto en la máxima longitud de lama (2,04 m).



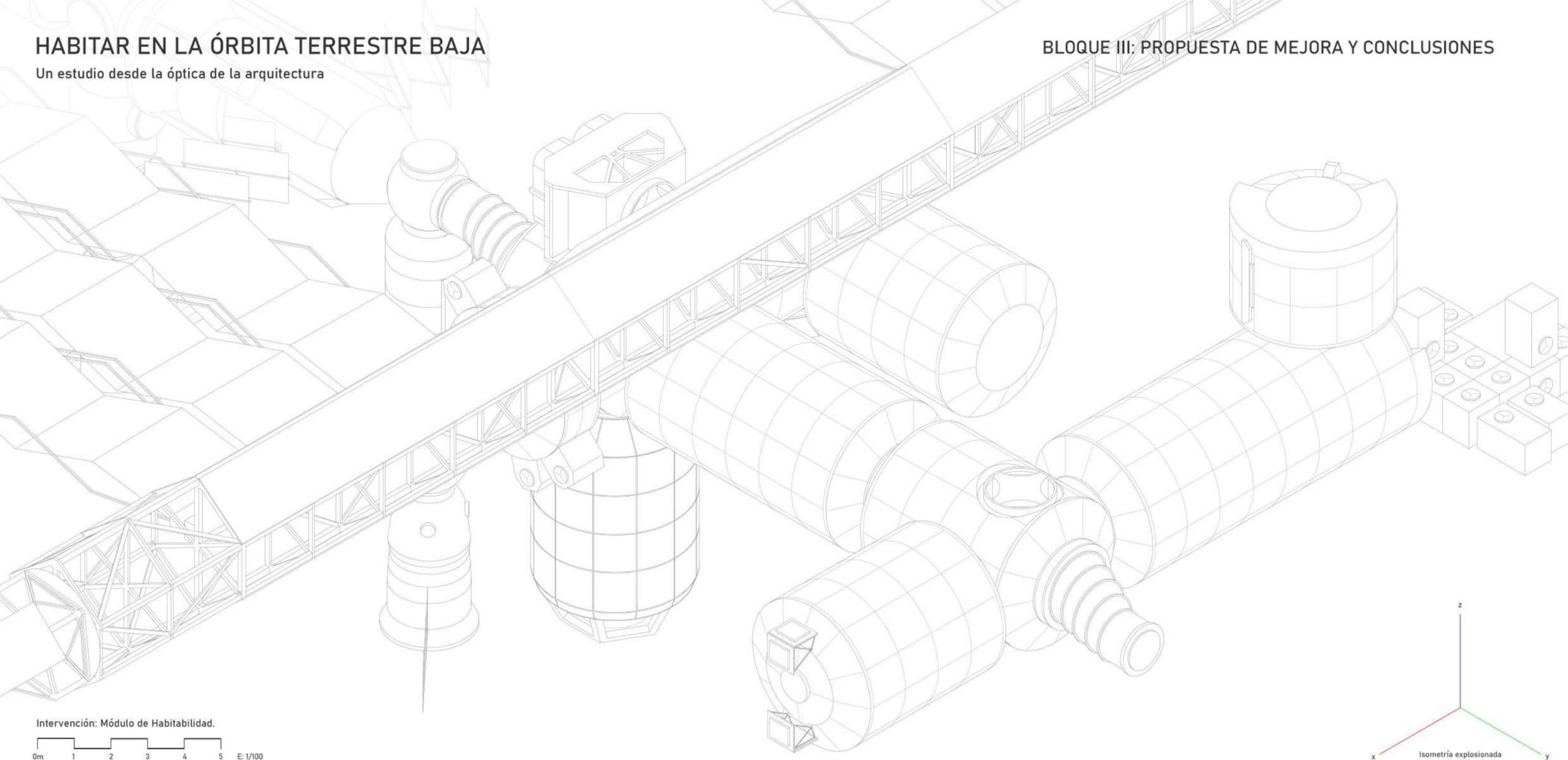
Arriba: Volumetría explosionada del sistema de lamas retráctiles.

Abajo: Perspectiva interior del módulo *Destiny*, con la propuesta integrada.



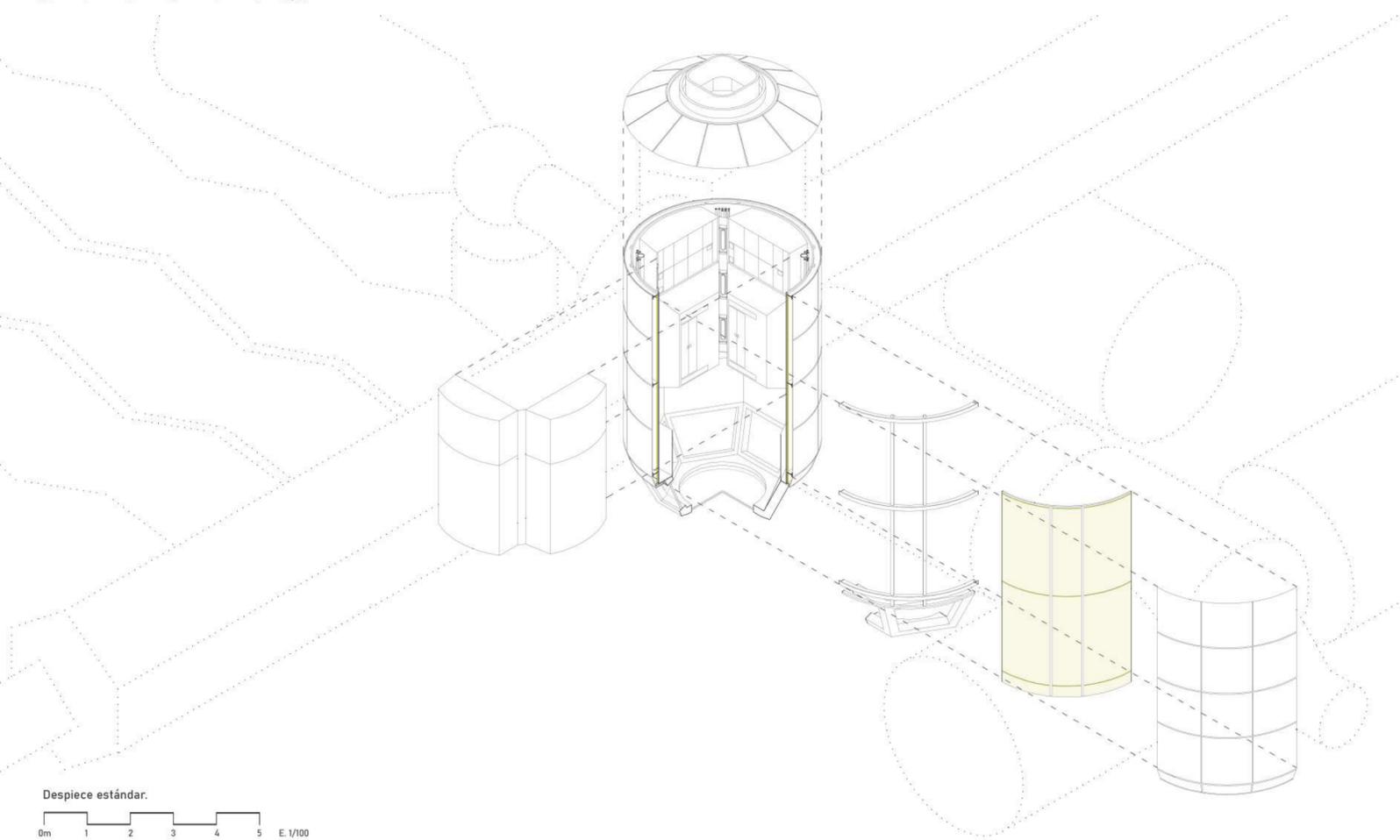
0cm 5 10 15 20 25 Escala 1:5

<sup>[122]</sup> Hypetex colored carbon fibre: <https://www.hypetex.com/>. Hypetex.  
<sup>[123]</sup> Yang, Jinshui et al. (2013) *Vibration and damping characteristics of hybrid carbon fiber composite pyramidal truss sandwich panels with viscoelastic layers*. En *Composite Structures*, volumen 106. Editorial Elsevier Ltd.  
<sup>[124]</sup> Llinares Galiana, J. Et al. (2011). *Acústica Arquitectónica y Urbanística*, p. 279-296. Universidad Politécnica de Valencia.  
<sup>[125]</sup> Vista interior realizada a modo de fotomontaje, a partir de un modelo 3D de elaboración propia en los programas Sketchup y Lumion.



Intervención: Módulo de Habitabilidad.  
0m 1 2 3 4 5 E: 1/100

z  
x y  
Isometría explosionada



5.2 PROPUESTA 2

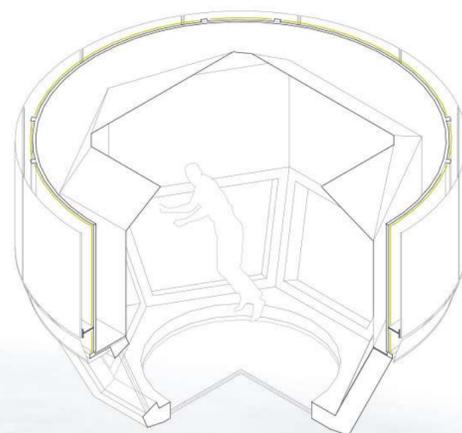
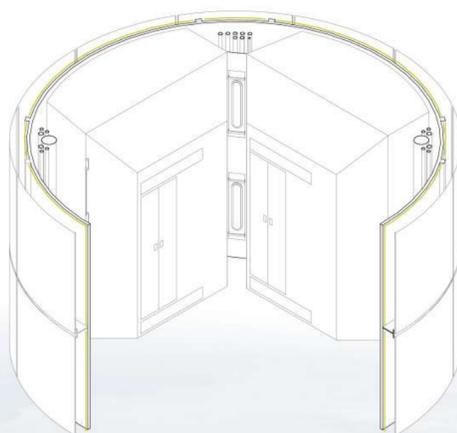
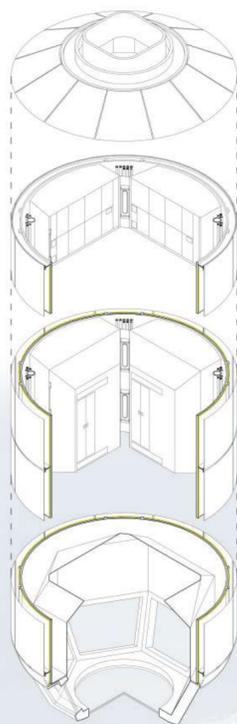
INTERVENCIÓN PESADA

La segunda propuesta plantea la reorganización de los módulos ISPR más conflictivos de la misma forma que en la primera propuesta, pero difiere en la adición de una nueva solución. En lugar de la piel retráctil, esta segunda propuesta plantea un módulo completo, denominado 'Módulo de Habitabilidad', que queda acoplado al puerto nadir del nodo *Unity*, lugar que hoy ocupa el PMM. Este nuevo módulo busca resolver unas problemáticas diferentes a las de la primera propuesta, vinculadas sobre todo con la escasez de espacios privados de sueño para la tripulación y espacios dedicados de forma exclusiva al tiempo libre.

Para ello, el módulo, de configuración vertical y coherente con la orientación del resto de la estación, cuenta con doce módulos ISPR de los cuales cuatro se destinan a almacenamiento y ocho se destinan a unos *crew quarters* mejorados, con el doble de volumen habitable que los originales.

Esta propuesta requeriría de un presupuesto más ambicioso que la propuesta 1, y asume una capacidad de lanzamiento orbital futura similar a la del transbordador espacial, adoptando por tanto el módulo las mismas dimensiones y configuración estructural que los ya existentes en la EEI.

Despiece estándar.  
0m 1 2 3 4 5 E: 1/100



SECCIÓN 1

La sección 1, o sección de almacenamiento, cuenta con cuatro módulos ISPR en la configuración convencional para los módulos presurizados de la EEI, y queda destinada principalmente a almacenamiento personal para los usuarios de los cuatro *crew quarters* ampliados, así como apoyo al ejercicio en sustitución del PMM, que cambia de localización al puerto estribor de *Harmony*.

SECCIÓN 2

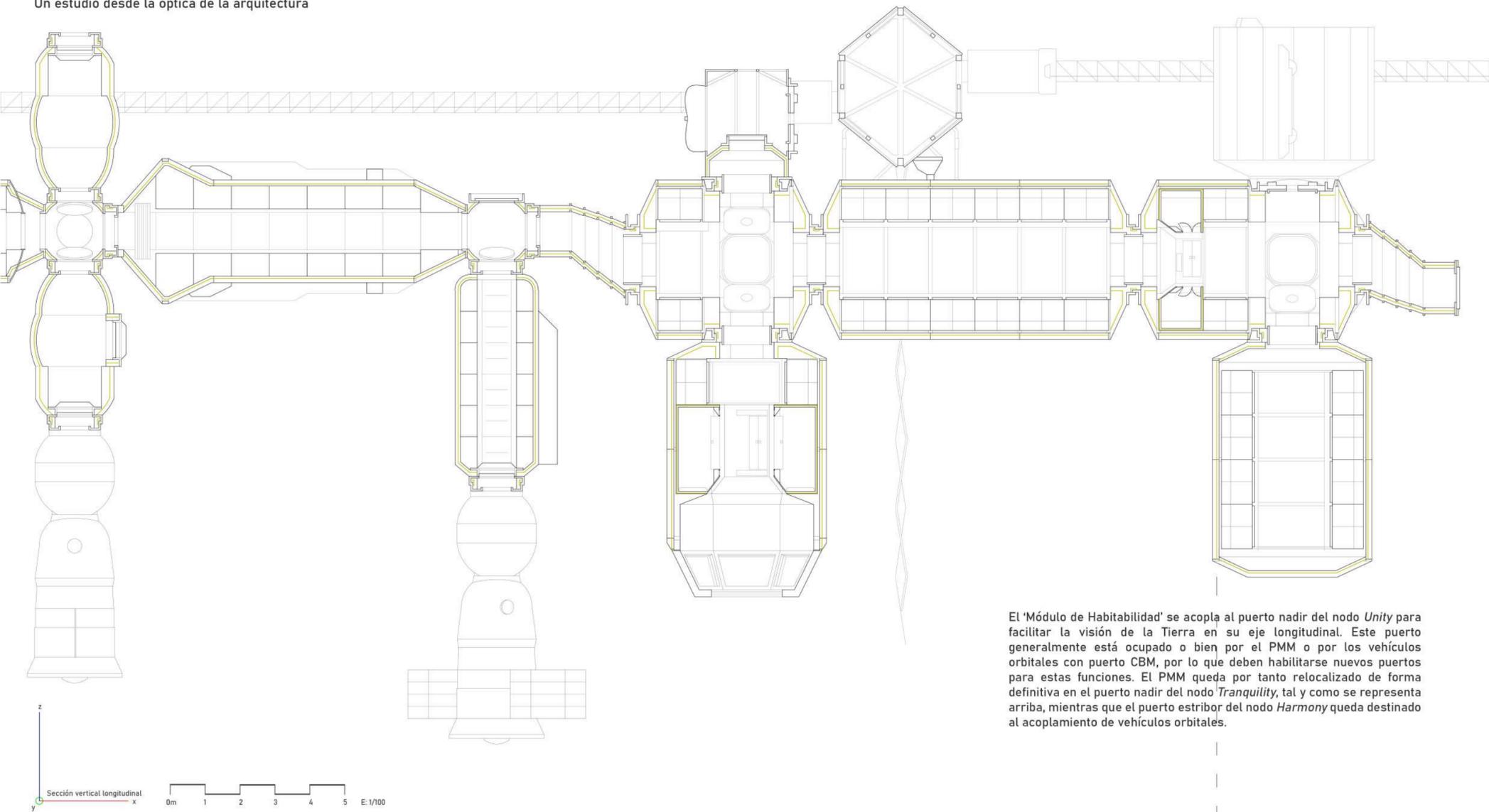
La sección 2, o sección de descanso, ocupa el equivalente a ocho módulos ISPR, que son sustituidos por los cuatro *crew quarters* ampliados. Estos nuevos *crew quarters*, que veremos con más detalle a continuación, sustituyen a los originales, con lo cual el nodo *Harmony*, con la cúpula europea, pierde la función de espacio de descanso asignada en la redistribución para pasar a estar dedicado al almacenamiento y al tiempo libre.

SECCIÓN 3

La sección 3, o sección de la cúpula, se destina principalmente al tiempo libre, aunque al igual que la cúpula europea puede servir para la orientación durante las EVA o como ayuda visual al acoplamiento de vehículos. Supone una evolución con respecto a la cúpula europea en dimensiones, aunque mantiene la idea fundamental del espacio cualificado por las vistas.

Secciones del Módulo de Habitabilidad.

Escala 1/50 0m 0,5 1 1,5 2 2,5



El 'Módulo de Habitabilidad' se acopla al puerto nadir del nodo *Unity* para facilitar la visión de la Tierra en su eje longitudinal. Este puerto generalmente está ocupado o bien por el PMM o por los vehículos orbitales con puerto CBM, por lo que deben habilitarse nuevos puertos para estas funciones. El PMM queda por tanto relocalizado de forma definitiva en el puerto nadir del nodo *Tranquility*, tal y como se representa arriba, mientras que el puerto estribor del nodo *Harmony* queda destinado al acoplamiento de vehículos orbitales.

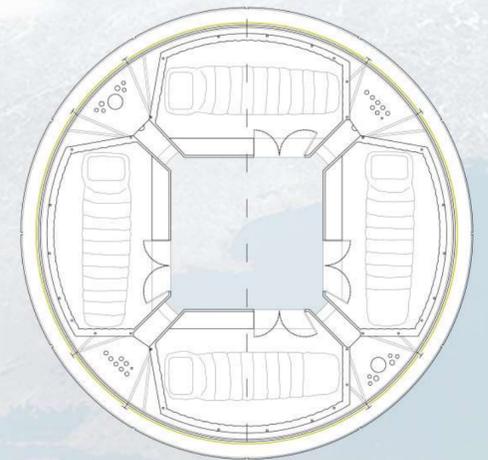
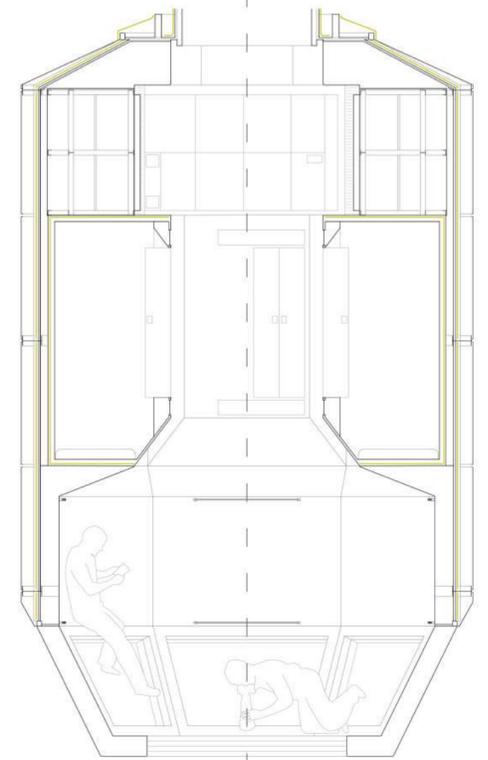
Los nuevos *crew quarters* ampliados suponen un avance con respecto a los anteriores en cuanto a espacio destinado al descanso y la privacidad. El volumen habitable es el doble, alcanzando los 3.54 m<sup>3</sup>, y su orientación es diferente a la de los originales, quedando el saco de dormir siempre en la pared inferior según las coordenadas de la estación. De esta forma se evitan los problemas discutidos en la sección 3.3.1, y se amplía considerablemente la superficie de trabajo.

Aún sería posible lograr un aumento mayor del volumen habitable sin renunciar a la modularidad de los ISPR, pero ello generaría un espacio excesivamente vertical. En cualquier caso, la solución puede estudiarse desde el enfoque de unas habitaciones privadas de 'varias plantas', ocupando en ese caso un mínimo de cuatro módulos ISPR por cada *crew quarter*. Estas posibilidades de ampliación, así como la definición precisa de los *crew quarters* ampliados en cuanto a ventilación, iluminación y almacenamiento, quedan propuestos para futuras investigaciones.

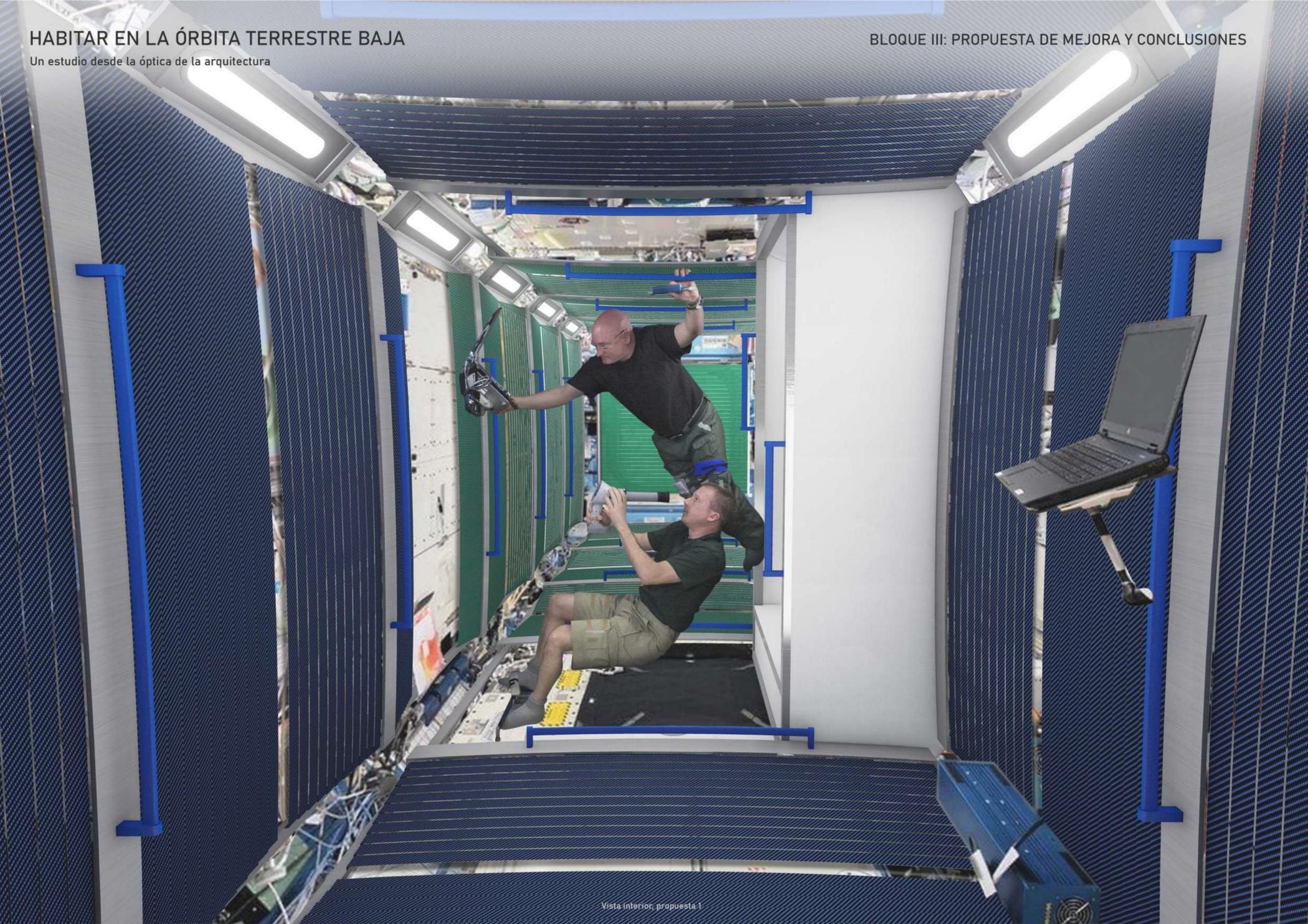


A diferencia de la cúpula europea, que sólo puede utilizarse de forma confortable por un tripulante, el espacio de cúpula del 'Módulo de Habitabilidad' se plantea como una estancia, con dimensiones suficientes para acoger a toda la tripulación de seis personas al mismo tiempo. Se convierte en el espacio más amplio de la EEI, con lo que habría que estudiar con más detalle la movilidad en su interior y considerar, de ser necesario, algún tipo de ayuda al movimiento en el centro del espacio, similar al mástil central de *Skylab*.

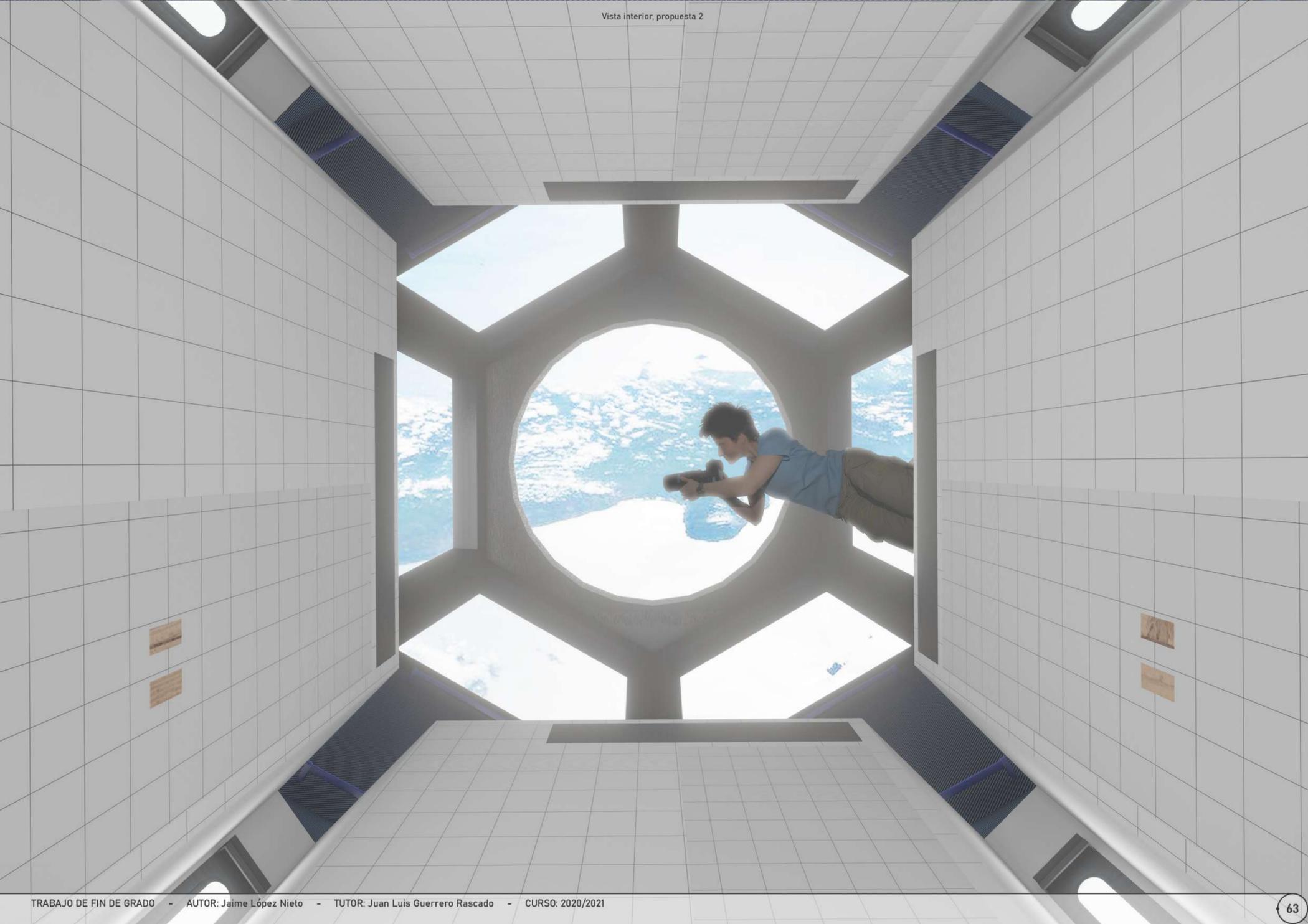
Siguiendo el ejemplo del resto de la estación, la orientación de este espacio no está definida arquitectónicamente, con lo que hay cierta libertad al respecto. Sin embargo, la orientación más natural es la que mantiene las coordenadas del resto de la estación, es decir, con la Tierra abajo. Este es otro punto en el que la cúpula del 'Módulo de Habitabilidad' difiere de la cúpula europea, ya que mientras que la primera está concebida como una 'escotilla' en la que la orientación se invierte y la Tierra queda arriba, este nuevo espacio estaría concebido a la inversa. En última instancia, no obstante, será la propia tripulación, en función de su experiencia, la que terminará decidiendo si se trata de una estancia con 'suelo de vidrio' (lo que podría presentar problemáticas de vértigo, poco probables en una tripulación entrenada) o de una estancia con una 'techo de vidrio', en cuyo caso el nombre 'cúpula' sería más apropiado.



Izquierda: Vista interior del módulo de habitabilidad.



Vista interior, propuesta 1



Vista interior, propuesta 2

### SECCIÓN 6. CONCLUSIONES

No cabe duda de que la EEI es un éxito en cuanto a habitabilidad orbital, simplemente por sus 20 años de operaciones ininterrumpidas. Más allá del éxito funcional de la misión, el análisis conjunto de las secciones 3 y 4 nos ha dejado ver un diseño completamente adaptado a su entorno, excelente en cuanto a supervivencia y razonablemente bien resuelto en cuanto a habitabilidad a largo plazo, pero con margen de mejora en diversos aspectos. Muchos de estos aspectos surgen a raíz de la contraposición con los análogos terrestres, que abren además diversos temas de interés de cara a una posible mejora de los espacios orbitales en el futuro. Abordemos todos estos aspectos desde el esquema de cinco consideraciones con el que hemos organizado estas dos secciones:

#### ESPACIOS INTERIORES: MODULARIDAD Y HABITABILIDAD DE MÍNIMOS

Existe una marcada diferencia entre los segmentos orbitales ruso y americano en cuanto a espacios interiores. En los análogos de vivienda mínima y vivienda irregular pudimos detectar un volumen por estancia (para este caso, módulo) de 30 m<sup>3</sup> como mínimo habitable, algo que casi llega a cumplirse en la estación americana, pero no en la rusa, cuya media, de 18 m<sup>3</sup> es muy inferior.

Centrándonos en la parte americana, la organización espacial modular ayuda a la operatividad y genera espacios limpios, bien organizados, relativamente fáciles de construir y montar, y con capacidades ilimitadas de ampliación y combinación. Esta modularidad, aunque ayuda enormemente a la estación, también genera alguna problemática al propiciar una individualidad entre los distintos módulos ISPR (fruto del uso de componentes diferenciados en múltiples sistemas y experimentos) que fragmenta el espacio unitario interior del módulo y genera una sensación de desorden que puede resultar confusa durante los primeros días de estancia. La orientación es bastante unitaria, tal y como pidieron muchos astronautas tras *Skylab*, pero aún existen algunos conflictos (si bien de escasa entidad) en zonas concretas como la Cúpula y los *crew quarters*. Este problema está algo más marcado en los módulos rusos, que por su composición espacial y componentes pueden llegar a interpretarse localmente como 'pozos descendentes'.

Los análogos terrestres nos proponen algunas soluciones interesantes en cuanto a espacio. El diseño de mínimos de la cápsula Nagakin, por ejemplo, nos da claves sobre la gestión de volúmenes habitables muy reducidos mediante el mobiliario desplegable y los dobles usos, claves que pueden aplicarse al diseño de espacios privados para la tripulación algo más grandes que los *crew quarters* actuales. La forma en la que las cápsulas se conectan a un único espacio central de comunicaciones podría aplicarse también a futuras estaciones con un único núcleo central de grandes dimensiones entorno al cual se agrupan el resto de módulos, aunque el tamaño de este 'módulo núcleo' seguiría estando limitado tanto por las restricciones de lanzamiento como por la dificultad de movimiento a través de grandes espacios en gravedad cero.

Por último, la comparación de la estructura modular de la EEI y de análogos como la base Halley VI con soluciones de espacio unitario como la cápsula Nagakin o algunas de las viviendas mínimas, nos abre el debate sobre la compartimentación del espacio. Por un lado, tenemos la estructura modular que por su funcionamiento tiende a fragmentar los espacios en módulos 'autónomos', lo cual que resulta positivo no sólo de cara a la organización y el coste sino también a la separación de usos y la posibilidad de privatización, algo que como hemos visto es fundamental para fomentar la apropiación de los espacios personales de cara al largo plazo. Por otro lado, la estructura unitaria de los espacios, usada de forma correcta (como en el caso de la cápsula Nagakin o la Villa Mokum) puede aumentar las dimensiones percibidas del espacio, lo que es igualmente deseable en hábitats de dimensiones reducidas. Compatibilizar una estructura modular con espacios unitarios, alcanzando una solución intermedia en el espectro privacidad-dimensiones, o que aglutine lo mejor de ambas partes, puede mejorar sustancialmente la experiencia de habitar en la OTB.

#### MOVILIDAD: SUPERPOSICIÓN DE USOS Y REEVALUACIÓN DEL TRÁNSITO EN SECCIÓN

Existen en la EEI algunas problemáticas vinculadas a los movimientos de los tripulantes durante sus actividades rutinarias, localizadas en especial en los nodos *Unity* y *Harmony*. Estas problemáticas tienen que ver tanto con la densidad de flujo como con el uso en sección de los espacios, que mezcla el tránsito con actividades como el trabajo en los módulos ISPR y el ejercicio, todo ello en el mismo espacio. En la Tierra, como hemos podido comprobar al analizar los flujos en nuestros análogos, este problema se ha resuelto tradicionalmente con la separación de 'espacios de estancia' y 'espacios de tránsito' que permiten llegar a ellos (pasillo-habitación).

Sin embargo, esta dualidad no puede ejecutarse en un hábitat de dimensiones tan limitadas como es la EEI, en la que destinar cualquier mínimo espacio exclusivamente al tránsito supone un desperdicio de recursos. La solución a este problema puede encontrarse, de nuevo, en la Tierra, concretamente en el diseño de mínimos. Cuando el espacio es muy reducido, como ocurre en la cápsula Nagakin o la Villa Mokum, no se puede desperdiciar un solo metro cuadrado en espacios de tránsito o pasillos. La solución pasa, de nuevo, por unificar el espacio, de forma que los usos se resuelven en un mismo lugar y la circulación queda enormemente limitada. Módulos que aglutinen diferentes usos, siempre que la privacidad no requiera de la fragmentación o los usos no sean incompatibles entre sí, pueden reducir el movimiento de los tripulantes y optimizar el aprovechamiento del espacio en sección al liberarlo del tránsito. Esto requiere de una gran planificación en cuanto a superposición de usos, y habría que valorar si la corrección de las reducidas problemáticas de movilidad que pueden darse con una tripulación de apenas seis personas compensa una redistribución de esas características. La solución queda en todo caso planteada.

#### NECESIDADES BÁSICAS: MÁS ALLÁ DE LA 'MÁQUINA DE HABITAR'

Las respuestas dadas a las necesidades básicas de la tripulación son muy satisfactorias desde el punto de vista técnico. Los espacios destinados al sueño, a la higiene personal y al ejercicio, así como su maquinaria asociada, responden muy bien a las exigentes condiciones del entorno, y simplemente la facilitación de estas rutinas de la vida en la superficie, que por lo general requerirían de la gravedad, ya supone un importante paso para la normalización de la habitabilidad orbital. Pero más allá del apartado técnico, las soluciones aportadas caen demasiado a menudo en aquella 'máquina de habitar', que hemos criticado anteriormente en este trabajo y que reduce la estancia en órbita al cumplimiento de una serie de parámetros o rutinas. El mejor ejemplo son quizá los *crew quarters*, que con su magnífico aislamiento sonoro, su eficiente ventilación y su control lumínico, facilitan al tripulante un sueño tan confortable como permite la ausencia de gravedad. Pero eso sí, lo hacen en un volumen de 1.7 m<sup>3</sup>.

Al margen de esto, existen también problemas que tienen que ver con la distribución espacial de estas necesidades básicas. A entender del autor, no se entiende que, por una simple cuestión de proximidad de módulos ISPR relacionados funcionalmente, el espacio por excelencia de la EEI, la Cúpula, esté justo al lado del WHC, el equivalente al aseo. Más allá de esta incongruencia arquitectónica, recordemos que el *Harmony* es también el módulo que alberga las máquinas de ejercicio, con lo cual muchas de las problemáticas de flujos vienen derivadas de esta extraña localización del WHC, que por lo demás, resuelve perfectamente todas las necesidades derivadas de la higiene personal.

Por suerte, la modularidad de la EEI permite mucha flexibilidad en este aspecto, con lo cual el problema (reducido a esta cuestión arquitectónica y dejando de lado otros aspectos más técnicos) tiene fácil solución. Además, volviendo a los análogos, recordemos la forma en que en contenedor *Keetwonen* trata el aseo no como un inconveniente, sino como un elemento separador de espacios y de usos. Aplicando esto al WHC, podrían llegarse a soluciones muy interesantes de división funcional de módulos, sin mayor inversión que la energía requerida para instalar los módulos ISPR correspondientes en su nueva ubicación.

Otra aplicación de las lecciones aprendidas en los análogos terrestres es la importancia de la cama como elemento estático en la habitación-módulo, no sólo entendiéndola desde el punto de vista estrictamente funcional, como parte del mobiliario, sino como elemento cualificador del espacio privado y como un elemento que puede adquirir varios usos de forma simultánea. La cama en la cápsula Nagakin es un ejemplo sobresaliente en este aspecto, y si bien llevar algo parecido a la OTB requeriría de un espacio dedicado al descanso de mayores dimensiones que los *crew quarters* actuales, ésta es al fin y al cabo una de las conclusiones en las que hemos convergido partiendo de distintos puntos del análisis: tanto a nivel de privacidad, como de apropiación de los espacios y de satisfacción de las necesidades básicas de los tripulantes, es necesario un espacio de mayores dimensiones que las de un armario convencional.

#### USOS: COLECTIVIDAD DEL ESPACIO, EQUILIBRIO ENTRE SUPERPOSICIÓN Y DISGREGACIÓN

La situación de la EEI con respecto a los usos es compleja. Existe una separación funcional a raíz de la modularidad del diseño que permite mantener cierta diferenciación entre el trabajo y el tiempo libre, algo que por supuesto es deseable de cara al bienestar psicológico.

Pero como ya hemos discutido, esta separación funcional puede entrar en conflicto con la noción de unificación de usos en el mismo espacio para la reducción de conflictos de flujo y de percepción espacial, por lo que es necesario, de nuevo, conseguir un equilibrio entre separación y unificación de usos.

Al respecto de este equilibrio, resulta interesante el análogo de la vivienda irregular. Quizá la aportación más importante de este análogo tenga que ver con la distribución de usos, y en concreto con la curiosa forma en que las actividades que no requieren privacidad, como las vinculadas al tiempo libre, se trasladan a las zonas comunes en lugar de ocurrir en el limitado espacio de las viviendas privadas. Esta apropiación del espacio público, que se da tanto en el Sacromonte como en Kowloon, tiene el efecto de ampliar virtualmente el espacio habitable de las viviendas, añadiendo las zonas públicas como si fueran una habitación más, compartida con la comunidad. Además, fomenta la sensación de pertenencia a dicha comunidad al actuar las zonas comunes como una gran estancia de una vivienda multifamiliar de la escala de un barrio o un edificio.

Esto es algo que ocurre de forma natural en la EEI, no ya por la disponibilidad de zonas comunes para el ocio y el tiempo libre (que como hemos visto es limitada), sino por la condición colectiva del conjunto de la estación y la escasez del espacio privado de cada tripulante. El tamaño reducido de los *crew quarters* limita enormemente las actividades que pueden realizarse en su interior, con lo cual espacios como la cúpula, con su cualificación a través de las vistas, o el JEM-ELM, cualificado a través del silencio, se convierten en lugares 'públicos' de ocio dentro de la estación, en los que se llevan a cabo las actividades durante el tiempo libre. Probablemente, esto seguirá ocurriendo al margen de una hipotética ampliación de espacios privados.

Pero en el caso de la EEI, a diferencia de los análogos terrestres, la planificación y optimización del espacio lleva a que estos espacios apropiados por la tripulación para el ocio cumplan siempre una doble función vinculada al trabajo o al almacenamiento. Y si bien esto es algo positivo de cara a la optimización de recursos, sería deseable que existiera en la estación, como ocurre en la Halley VI, un lugar vinculado de forma exclusiva al tiempo libre, que favorezca la separación entre la vida personal de la tripulación y la realidad laboral de la estancia en órbita. Es necesario, de nuevo, buscar el equilibrio entre superposición y disgregación de usos de cara al bienestar de los tripulantes.

En cuanto al almacenamiento, magistralmente resuelto dentro de la modularidad de la estación, hay que señalar algunas carencias de espacio dedicado que llevan al uso temporal de otros módulos como espacios provisionales de almacenamiento. Éste, sin embargo, es un problema logístico, más que tecnológico o arquitectónico: a mayor disponibilidad de espacio de almacenamiento, menor es la optimización de lo que es necesario o no almacenar, con lo cual el almacenamiento tiende siempre a ocupar el 100% del espacio disponible para tal fin.

## ESTÉTICA Y BIENESTAR: BÚSQUEDA DE UNA HABITABILIDAD ORBITAL MÁS AGRADABLE

Éste es el aspecto más infravalorado dentro del proceso de diseño de la EEI, tratado únicamente en su dimensión funcional. Por lo tanto, existe un amplio margen de mejora en las diversas consideraciones tratadas, desde la iluminación a la apropiación de los espacios.

En cuanto a iluminación, el sistema SSLA es un muy buen punto de partida para cualquier mejora, al ser razonablemente flexible y adaptable, con mucho potencial para impactar positivamente en la percepción de los espacios. Ya mencionamos durante el análisis la influencia de la intensidad lumínica en las sombras dentro del espacio y en la percepción del mismo, y cómo una reducción de la intensidad en puntos concretos podía ayudar a corregir esa percepción de desorden que surge de la individualidad de los módulos ISPR. Sumando el análisis de los análogos terrestres, aparece también la importancia de la iluminación natural, difícil de conseguir en la OTB, pero capaz de cualificar enormemente los espacios cuando se consigue, como en el caso de la cúpula. El trabajo de la sección de los módulos, con los ISPR rodeando el espacio central, no permite la apertura de ventanas y la participación de la luz natural en los espacios salvo en puntos muy concretos.

Esto es algo que puede abordarse, como se hizo con el ISPR 'WOLF', mediante el planteamiento de espacios ISPR adaptados. Este tipo de instalaciones ayudarían a cualificar espacios concretos dentro de los módulos, no sólo mediante la iluminación, sino también a través de las vistas. Para lograr esto, es importante que estos puntos de observación e iluminación natural se planteen como espacios habitables, más próximos a miradores que a simples aperturas. Esto es algo muy bien ejecutado en la cúpula, siendo como consecuencia uno de los espacios más codiciados de la estación. No estaría de más aplicar este tipo de diseños a otros puntos de la misma, como el puerto nadir de *Tranquility*, y ampliar así además la oferta de lugares para la estancia y el tiempo libre.

El color es otro elemento de diseño infrautilizado. Como en la base Halley VI en la Tierra, o incluso de una forma parecida a las estaciones rusas, podría utilizarse para ayudar a la identificación de los espacios y a la orientación. Aplicar los estudios más recientes sobre la influencia del color en la percepción espacial puede servir también para aumentar las dimensiones percibidas de los espacios, algo muy útil de cara al bienestar psicológico de los tripulantes y al alivio del sentimiento de claustrofobia a menudo vinculado con las estancias prolongadas. El estudio del color en las superficies debe ir de la mano del estudio de la iluminación para generar distintas atmósferas diferenciadas, particularizadas a cada uno de los módulos de la estación y a los usos y actividades que tienen lugar en su interior.

Existen también, como hemos visto, bastantes problemas acústicos en la EEI. Y las soluciones a estos problemas, que a priori podrían parecer limitadas a mejoras tecnológicas, están también muy vinculadas con los espacios y la forma en que el sonido se propaga por ellos. Esto es algo que la arquitectura en la superficie tiene muy claro, especialmente en ciertos usos, y que resuelve mediante la geometría de los espacios o los materiales en las superficies. Estudios de este tipo, sobre el material de las superficies en el interior de los módulos, pueden tener un gran impacto en el bienestar acústico de la tripulación.

Por último, hay que destacar el papel de la personalización de los espacios como mecanismo de apropiación en circunstancias de diseño similares a las de la EEI. Esto es algo que el tiempo ha hecho evidente en la *Nagakin Capsule Tower*, donde los distintos usuarios han ido apropiándose de espacios idénticos de formas muy distintas, adaptándolos a sus particularidades y volviéndolos, de esta forma, un poco más habitables. El control de misión de la EEI permite esto hasta cierto punto, pero el carácter temporal de las tripulaciones evita que, como en la *Nagakin Capsule Tower*, los cambios surgidos de la apropiación de los espacios se perpetúen en el tiempo, al menos en los espacios personales de los tripulantes. En los espacios comunes, sin embargo, podemos observar una cierta acumulación de distintas decoraciones con el paso del tiempo, aportaciones que ayudan a relajar la formalidad de la estación y a convertir la estancia en órbita en una experiencia más amable para los tripulantes. Éste es un fenómeno, en definitiva, que debería estudiarse con más profundidad para potenciar sus efectos positivos.

Las dos propuestas planteadas en este bloque han tratado de dar respuesta, en mayor o menor grado, a lo expuesto en estas conclusiones. Y si bien muchas de las problemáticas detectadas requieren de una investigación dedicada para alcanzar soluciones satisfactorias, la propuesta 1 muestra una primera aproximación asequible a la mejora de los condicionantes arquitectónicos de habitabilidad en la EEI mediante una solución sistemática, modular, compacta y ligera que no requeriría de una inversión prohibitiva para salir adelante.

La cuestión de la aplicabilidad tiene que tener en cuenta, no obstante, el destino de la EEI a medio plazo, que a partir del año 2024 empezará a ser incierto. La posibilidad de una ampliación de la misión hasta 2030 está encima de la mesa, pendiente de financiación, y si tomamos como referencia otras misiones exitosas de vida útil limitada, como algunos rovers marcianos, nos encontramos con la sorpresa de que lo que pretendía ser una misión de 90 días (la vida útil del rover *Opportunity*) acabó por estudiar el planeta vecino durante quince años. Algo así es improbable para una misión en la que entran en juego vidas humanas, pero a diferencia de Marte, en la órbita terrestre baja resulta relativamente sencillo enviar 'repuestos'.

Al principio del trabajo, en la sección 0.2.1, hablábamos de la interesante posibilidad de 'rehabilitar' hábitats orbitales como se hace en la Tierra con los edificios convencionales. Esto es, en parte, lo que se introduce con estas propuestas del bloque III, y aunque la 'rehabilitación' en órbita está a día de hoy muy limitada por el envejecimiento de los componentes y los sistemas de soporte vital, soluciones de este tipo pueden seguir planteándose en un panorama cambiante en el que los estándares de habitabilidad orbital se adaptan a tecnologías en evolución acelerada que tienden a dejar obsoletas las misiones pocos años después de su lanzamiento.

Quizá el 'hardware' de la EEI no pueda rehabilitarse más allá de su vida útil, e intentarlo haciendo frente a una posibilidad creciente de fallo crítico es sin duda intolerable para una misión tripulada. Pero el 'software', entendiendo como tal la dimensión más arquitectónica de la habitabilidad orbital, los componentes psicológicos y de bienestar, y otras consideraciones que no suponen una cuestión de vida o muerte para la tripulación, son más libres de recibir 'actualizaciones' periódicas mediante intervenciones ligeras que permitan 'rehabilitar' ciertos componentes o añadir nuevos sistemas acordes con los estándares más recientes en la materia. Es en este sentido en el que propuestas como las que se han elaborado en este trabajo, y visiones interdisciplinares como las que nos hemos formado durante el desarrollo del mismo, pueden resultar verdaderamente útiles y tener una aplicabilidad real.

# HABITAR EN LA ÓRBITA TERRESTRE BAJA

Un estudio desde la óptica de la arquitectura

## REFERENCIAS

### Libros:

- Allen, Christopher et al. (2014). *Human Integration Design Handbook* (rev. 1), p. 355-364. NASA.
- Casas Peláez, J. (1994). *Óptica* (7ª edición). p. 535-550. Librería Pons, Zaragoza.
- Chagas Cavalcanti, A. R. (2018) *Housing shaped by labour*. Jovis, Berlín.
- Chagas Cavalcanti, A. R. (2019). *Urban informality shaped by labour: Addressing the spatial logics of favelas*. Delft University of Technology.
- Cioffi, Luigina et al. (2012). *Social Aspects of Place Experience in Mobile Work/Life Practices. Research to Practice in the Design of Cooperative Systems: Results and Open Challenges*, p. 183-196. Springer.
- Curtis, Howard. (2009). *Orbital mechanics for engineering students*. Editorial Elsevier Science & Technology, San Diego.
- Dempsey, Robert (2017). *The International Space Station: Operating an Outpost in the New Frontier*. NASA SP series, Johnson Space Center.
- Feynmann, R. P. Et al. (2011). *The Feynmann lectures on physics, the new millenium edition. Volume 1: Mainly mechanics, radiation and heat*. Capítulo 7: 'The theory of gravitation'. Basic Books.
- Finckenor, M. M. & De Groh, K. K. (2015). *A researcher's guide to international space station: Space enviromental effects. ISS Researcher's Guide Series*, NASA, Washington D. C.
- Fujita, S. Et al. (1993). *Mechanisms of methanation of carbon dioxide and carbon monoxide over nickel/alumina catalysts*. En *Applied Catalysis A: General*, p. 87-100.
- Gehrad, F. Et al. (2000). *Oxigenation*. En *Ullmann's Encyclopedia of industrial Chemistry*, p. 1-103. Wiley-VCH, Weinheim, Alemania.
- Gillispie, C. C. & Porter, T. M. (2016). *The edge of objectivity: An essay in the history of scientific ideas*, Princeton University Press, Princeton.
- Haüplik-Meusburger, Sandra (2011). *Architecture for astronauts*. Springer Wien, Springer Praxis Books, Viena.
- Hacker, B. C. & Grimwood, J. M. (1977). *On the shoulders of titans: A history of project gemini*. NASA history series. Scientific and Technical Information Office, NASA, Washington D. C.
- Harland, David M. & Catchpole, John E. (2002). *Creating the International Space Station*. Springer, Berlín.
- Hearn, E. (2013). *Mechanics of Materials: An Introduction to the Mechanics of Elastic and Plastic Deformation of Solids and Structural Components*. Vol. 2. Butterworth-Heinemann.
- Jones, Thomas D. (2006). *Skywalking: an astronaut's memoir*. Harper Collins.
- Jones, Thomas D. & Benson, Michael (2002). *The complete idiot's guide to NASA*. Alpha Books, Indianapolis.
- Keystone, J. S. (2019). *Travel medicine* (4 ed). Elsevier, Edinburgo.
- Kitmacher, Gary H. (2015). *Reference guide to the international space station, utilization edition*. Johnson Space Center. NASA, Houston.
- Kurokawa, K. (1977). Kisho Kurokawa. *Metabolism in architecture* (1ª ed). Littlehampton Book Services.
- Launius, Roger D. (2018). *The Smithsonian history of space exploration*. Smithsonian Books. Washington D. C.
- Levedev, Valentin V. (1998). *Diary of a cosmonaut*. Phytoresource Research. College Station, Texas.
- Llinares Galiana, J. Et al. (2011). *Acústica arquitectónica y urbanística*. P. 279-296, Universidad Politécnica de Valencia.
- Miller, R. C. (2010). *Interdisciplinarity: Its Meaning and Consequences*. En *Oxford Research Encyclopedia of International Studies*, Oxford University Press.
- Newton, Isaac (2011). *Principios matemáticos de la filosofía natural* (traducción de Rada, E.) Alianza Editorial.
- Nicolet, M. (2013). *The international geophysical year 1957/58*, p. 222-231. Organización Meteorológica Mundial.
- Parker, J. F. & West, V. R. (1973). *Bioastronautics data book* (2. ed). NASA, Washington D.C.

- Roach, Mary (2015). *Packing for Mars: The curious science of life in the void*, p. 257-258. W. W. Norton, Nueva York.
- Rousek, T. (2010). *AG-SYS, Artificial Gravity System concepts*. NASA Jet Propulsion Laboratory. Pasadena.
- Sabbatini et al. (2014). *ESA user guide to low gravity platforms*. Capítulo 7: *International Space Station - ISS*. European Space Agency.
- Sutton, G. P. & Biblarz, O. (2010). *Rocket propulsion elements* (8. ed). Wiley. Hoboken, New Jersey.
- Terasawa, H. Et al. (1997). *大図解九龍城 (Kowloon Walled City Grand Schematics)*. Iwanami Shoten.
- Virts, Terry (2017). *View from Above: An Astronaut Photographs the World*. National Geographic.
- Von Kármán, T. (1967). *The Wind and beyond: Theodore von Kármán, pioneer in aviation and pathfinder in space*. Little, Brown & Company, Boston.
- Wallace, J. M & Hobbs, P. V. (2006). *Atmospheric Science: an introductory survey* (2ª ed). Academic Press.
- Xu, Guochang & Xu, Jia (2013). *Orbits* (2 ed.). Springer, Berlín.

### Artículos:

- Armstrong, L. Et al. (2018). *Water intake, water balance, and the elusive daily water requirement*. En *Nutrients*, Vol 10. MDPI AG, Suiza.
- Broyan, J. L. Et al. (2009). *International Space Station USOS Crew Quarters Development*. En *SAE International Journal of Aerospace*, p. 92-106. SAE International.
- Crucian, B. E. Et al. (2018) *Immune system dysregulation during spaceflight: Potential countermeasures for deep space exploration missions*. En *Frontiers in Immunology*, Vol. 9, p. 14-37. Frontiers Media SA.
- Del Pozo y Barajas, A. (2011). Carlo Aymonino (ed): *La vivienda racional. Ponencias de los congresos CIAM 1929-1930*. En *Proyecto, progreso, arquitectura*, v.5, nº9. Universidad de Sevilla.
- Eldering, A. Et al. (2018). *The OCO-3 mission; measurement objectives and expected performance based on one year of simulated data*. En *Atmospheric Measurement Techniques*, v. 12 nº4, p. 2341-2370.
- Iwase, S. Et al. (2020). *Effects of Microgravity on Human Physiology*. En *Beyond LEO-Human Health Issues for Deep Space Exploration*. IntechOpen.
- Küller, R. Et al. (2009). *Color, arousal, and performance - a comparison of three experiments*. En *Color, research and application*, vol. 34. Wiley.
- Nielsen, Hanne (2014). *From Shelter to Showpiece: The Evolution of Antarctic Stations*. University of Canterbury, COMNAP.
- Odabaşioğlu, S. & Olguntürk, N. (2015). *Effects of coloured lighting on the perception of interior spaces*. En *Perceptual and motor skills*, v. 120, nº1, p. 183-201. SAGE Publications, Los Angeles.
- Oberfield, D. Et al. (2010). *Surface lightness influences perceived room height*. En *Quarterly journal of experimental psychology*, vol. 63, nº10. Londres.
- Oberg, J. (1993). *Space myths and misconceptions*. En *OMNI magazine*, Vol. 15, No.7, p. 38. General Media, Nueva York.
- Rodier, S. Et al. (2015). *Laser Remote Sensing from ISS: CATS Cloud and Aerosol Level 2 Data Products*. En *Proceedings of the ILRC*. New York.
- Vadas, D. et al. (2017). *Hyperbaric Oxygen Environment Can Enhance Brain Activity and Multitasking Performance*. En *Frontiers in integrative neuroscience*, Vol. 11. Frontiers Research Foundation, Suiza.
- Yang, Jinshui et al. (2013) *Vibration and damping characteristics of hybrid carbon fiber composite pyramidal truss sandwich panels with viscoelastic layers*. En *Composite Structures*, volumen 106. Editorial Elsevier Ltd.
- Zauner, A. Et al. (2002). *Brain oxygenation and energy metabolism: part I - Biological function and pathophysiology*. En *Neurosurgery*, Vol. 51, p. 289-302.

# HABITAR EN LA ÓRBITA TERRESTRE BAJA

Un estudio desde la óptica de la arquitectura

## Tesis:

- Abellanas Panigua, C. (2015). La plástica del color en la obra de Luis Barragán: una aproximación experimental. Tesis. Universidad Politécnica de Valencia.
- Callaway, D. W. (2004). *Coplanar air launch with gravity-turn launch trajectories*. Tesis. Airforce Institute of Technology, Air University.
- Juárez-Chicote, Antonio (1998). Continuidad y discontinuidad en Louis I. Kahn: material, estructura y espacio. Tesis. ETS de arquitectura, Universidad Politécnica de Madrid.
- Narváez, Rocío (2018). La vivienda mínima del siglo XXI: Soluciones en Holanda y Japón. Trabajo de fin de Grado. ETS de arquitectura de la Universidad Politécnica de Madrid.

## Informes, memorandums:

- ATV-ICC Team (2004). *ATV Cargo Accommodation Handbook*. ATV-HB-AI-0001 Issue 07, ESA.
- Behrendsen, Robert R. (2013). Ergonomics and human factors for the restraints and mobility aids on the International Space Station. Presentación. NTRS, NASA.
- Inter-agency Space Debris Coordination Comitee (2008). *IADC space debris mitigation guidelines*. IADC Action Item nº22.4.
- Limardo-Rodríguez, J. G. Et al. (2015). *Status: Crewmember Noise Exposures on the International Space Station*. NASA/Langley Research Center, Hampton.
- Lyndon B. Johnson Space Center (1974). *Skylab Bulletin no. 1-27*. NTRS, NASA.
- NASA (1969). *America's next decades in space: A report for the space task group*. NTRS.
- NASA & Roscosmos. (1998). *Memorandum of understanding between the national aeronautics and space administration of the United States of America and the Russian space agency concerning cooperation on the civil international space station*. Washington D. C.
- Maida, James C. (2014). *Introduction to the Solid State Based Interior Lighting System for ISS*. NASA Center for AeroSpace Information (CASI), NASA/Langley Research Center, Hampton.
- McLaughlin, R. J. & Warr, W. H. (2001) *The Common Berthing Mechanism (CBM) for the International Space Station*. SAE Technical Paper Series, SAE International, 2001.
- Mission Operations Directorate - Operations Division. *International Space Station Assembly Operations Book*. Johnson Space Center, NASA, 2000.
- Mount, Frances E. Et al. (2003). *Evaluation of neutral body posture on Shuttle mission STS-57 (SPACEHAB-1)*. Memorandum técnico. NTRS, NASA.
- Portree, David S. F. (1995). *Mir hardware heritage*. Informe, Nasa Technical Reports Server (NTRS), NASA-RP-1357. Johnson Space Center.
- Riché, L. J. Et al. (1969). *Final apollo 11 flight plan*. Archivo histórico de la NASA, Manned Spacecraft Center.

## Resúmenes de conferencia:

- Brainard, G. C. (1994). *Effects of light on brain and behavior*. Resumen de la conferencia (No. CONF-9403214-). Wisconsin Univ., Madison, EEUU.
- Caballero-Arce, C. (2012). *Lighting of space habitats: Influence of color temperature on a crew's physical and mental health*. AIAA Conference Papers. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Reston.
- Carter, Donald L. (2010). *Status of the Regenerative ECLS Water Recovery System*. International Conference on Environmental Systems, AIAA.
- Goodman, J. R. (2003). International space station acoustics. INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings, v. 2003, nº 1, p. 712-722. Institute of Noise Control Engineering.
- Kitmacher, Gary H. (2002). *Design of the Space Station Habitable Modules*. Parte de la conferencia: *The Architecture of Space: A Multi-Disciplined Approach*, 53rd International Astronautical Congress, Houston.
- Lamoreaux, Christopher D. & Landeck, Mark E. (2006). Mechanism development, testing, and lessons learned for the advanced resistive exercise device. Publicación de conferencia. NTRS, Johnson Space Center, NASA.

Limardo-Rodríguez, J. G. Et al. (2017). *International Space Station (ISS) crewmember's noise exposure from 2015 to present*. 47th conference on environmental systems.

Sloney, D. H. (1994). *Ocular hazards of light*. Resumen de la conferencia. *International Lighting in Controlled Environments Workshop*. NTRS, NASA.

Tibbits, Ted W. (1994). *International Lighting in Controlled Environments Workshop*. Resumen de la conferencia. NTRS, NASA.

Zipay, John J. Et al. (2012). *Structural Verification of the First Orbital Wonder of the World - The Structural Testing and Analysis of the ISS*. NTRS. AIAA conference papers, American Institute of Aeronautics and Astronautics.

## Otras publicaciones:

*International Space Station: Environmental Control and Life Support System*. Marshal Space Center, NASA. Huntsville, 2008

## Páginas Web:

- Chris Hadfield - *Space Oddity (David Bowie)* (2014). <https://www.youtube.com/watch?v=vEzKxoY2d5I>. Youtube.
- Do tread on me* (2009). [nasa.gov/mission\\_pages/station/behindscenes/colbert\\_feature.html](https://nasa.gov/mission_pages/station/behindscenes/colbert_feature.html). NASA - International Space Station.
- Estación espacial internacional (ISS) - órbita. <https://www.heavens-above.com/orbit.aspx?satid=25544>. Heavens Above.
- EXPRESS Racks 1 and 2*. <https://www.nasa.gov/centers/marshall/news/background/facts/expressrack.html>. Marshall Space Flight Center.
- Feloni & Richards (2018). <https://www.businessinsider.com/nasa-astronaut-scott-kelly-year-in-space-relationship-with-twin-2018-3>.
- GEDI. Instrument overview*. <https://gedi.umd.edu/instrument/instrument-overview/>. GEDI Ecosystem Lidar.
- Halley VI british antarctic research station*. <https://hbarchitects.co.uk/halley-vi-british-antarctic-research-station>. Hugh Broughton Architects.
- How antartic bases went from wooden huts to sci-fi chic (2017)*. <https://www.bbc.com/news/magazine-38574003>. BBC News.
- Hypetex colored carbon fibre: <https://www.hypetex.com/>. Hypetex.
- International Space Station*. [https://www.nasa.gov/mission\\_pages/station/main/index.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/station/main/index.html). NASA.
- ISS Integrated Truss Structure*. <https://spacecraftearth.com/portfolio/iss-integrated-truss-structure/>. Spacecraft Earth.
- John F. Kennedy moon speech - Rice stadium*. <https://er.jsc.nasa.gov/seh/ricetalk.htm>. NASA.
- Living in space* (2016). <https://www.asc-csa.gc.ca/eng/astronauts/living-in-space/default.asp>. Canadian Space Agency.
- Peggy Whitson's journal - exercise in space (2008). [https://www.nasa.gov/mission\\_pages/station/expeditions/expedition16/journal\\_peggy\\_whitson\\_6.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/station/expeditions/expedition16/journal_peggy_whitson_6.html). NASA.
- NASA and the private sector*. <https://ukdiss.com/examples/nasa-and-the-private-sector.php>. UKdiss.com.
- NASA Science - Staying cool on the ISS*. [https://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2001/ast21mar\\_1](https://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2001/ast21mar_1). NASA.
- Occupygezi Architecture. <https://occupygeziarchitecture.tumblr.com/>. Tumblr.
- Pettit, Donald R. (2012). *The tyranny of the rocket equation*. [https://www.nasa.gov/mission\\_pages/station/expeditions/expedition30/tyranny.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/station/expeditions/expedition30/tyranny.html). NASA.
- Streaming de la NASA. <https://www.twitch.tv/nasa>. Twitch.tv
- UPI. [https://www.upi.com/Science\\_News/2020/11/09/Astronauts-prepare-for-most-crowded-space-station-in-years/4741604932537/](https://www.upi.com/Science_News/2020/11/09/Astronauts-prepare-for-most-crowded-space-station-in-years/4741604932537/)

# HABITAR EN LA ÓRBITA TERRESTRE BAJA

Un estudio desde la óptica de la arquitectura

## Imágenes:

Imagen 01 - «Cassini's Pale blue dot». NASA, Sonda Cassini (2013). Recuperada de:

<https://www.jpl.nasa.gov/images/the-day-the-earth-smiled-sneak-preview>

Imagen 02 - «Earth from space». Recuperada de: <https://jooinn.com/img/get>

Imagen 03 - «S65-30430\_G04-H». NASA (1965). Recuperada de:

<http://tothemoon.ser.asu.edu/gallery/Gemini/4/Hasselblad%20500C%2070%20mm>

Imagen 04 - «Le Voyage dans la Lune», frame. Meliès, George (1902). Recuperada de:

<https://e00-lab-elmundo.uecdn.es/hombre-en-la-luna/images/article/julio-verne-melies.jpg>

Imagen 05 - Logotipo del año geofísico internacional 1957-58. Entre 1957 y 1958. Recuperada de:

<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/63/Igylogo.jpg>

Imagen 06 - «Sputnik model». Recuperada de:

<https://airandspace.si.edu/exhibitions/out-of-this-world/online/1957/Sputnik.cfm>

Imagen 07 - «Earthrise». Anders, William (1968). Recuperada de:

[https://www.nasa.gov/multimedia/imagegallery/image\\_feature\\_1249.html](https://www.nasa.gov/multimedia/imagegallery/image_feature_1249.html)

Imagen 08 - Tránsito de la EEI. McCarthy, Andrew (2020). Recuperada de:

<https://spacestationguys.com/iss-transits/>

Imagen 09 - Stream de la EEI, frame. NASA (2021). Recuperada de:

<https://video.ibm.com/channel/iss-hdev-payload>

Imagen 10 - La Tierra desde la OTB, NASA. Recuperada de:

<https://www.axios.com/crowdsourcing-tracking-satellites-space-2c3614e1-eb4f-44ab-8b1a-28da88592123.html>

Imagen 11 - Interior del módulo Destiny, NASA (2017). Recuperada de:

[https://www.nasa.gov/mission\\_pages/station/expeditions/expedition39/gallery.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/station/expeditions/expedition39/gallery.html)

Imagen 12 - Victor Glover durante la EVA del 13 de marzo, frame. NASA (2021). Recuperada de:

<https://www.twitch.tv/nasa>

Imagen 13 - «The Tetrahedral Ceiling». Freedman, Lionel (1953). Recuperada de:

<https://lionelfreedmanarchives.com/architectural-photography/>

Imagen 14 - Galería del Kimbell Museum. Barera, Michael (2017). Recuperada de:

[https://commons.wikimedia.org/wiki/User:Michael\\_Barera/gallery/2017/January#Kimbell\\_Art\\_Museum](https://commons.wikimedia.org/wiki/User:Michael_Barera/gallery/2017/January#Kimbell_Art_Museum)

Imagen 15 - Casa Gilardi 1. Recuperada de: <https://www.emarq.net/blog/casa-gilardi-barragan>

Imagen 16 - Casa Gilardi 2. Petite (2012). Recuperada de:

<https://notes-from-neverland.tumblr.com/post/38282369194/piscina-en-la-casa-gilardi-de-luis-barragán>

Imagen 17 - Aurora boreal desde la EEI. Virts, Terry (2014). Recuperada de:

<https://spaceadventures.com/iss-cupola-room-with-extraordinary-view-2/>

Imagen 18 - Crew quarter de Karen Nyberg. Recuperado de: <https://www.pinterest.es/pin/466544842621451895/>

Imagen 19 - Nagakin capsule tower. Recuperada de:

<https://sgustokdesign.com/kisho-kurokawa-nakagin-capsule-tower>

Imagen 20 - Pueblos Jóvenes, Lima. Google Street View (2015). Editada, elaboración propia.

Imagen 21 - «Clusters in the air». Isozaki, Arata (1960-1962). Recuperada de:

<https://images.lib.ncsu.edu/luna/servlet/view/search?q=arata%20isozaki&os=500>

Imagen 22 - «Marine City». Kikutake, Kiyonori. Recuperada de:

<http://thetemplesofconsumption.blogspot.com/2012/03/kiyonori-kikutake-1928-2011.html>

Imagen 23 - Estación Amundsen-Scott. Beaudet, Richard (1974). Recuperada de:

<https://photolibrary.usap.gov/#19-3>

Imagen 24 - Estación Comandante Ferraz. Costin, Eron (2014). Recuperada de:

<https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/946069/estacion-antartica-comandante-ferraz-estudio-41>

Imagen 25 - Montaje de los módulos de la base Halley VI. Bradley, Adam (2017). Recuperada de:

<https://www.scientias.nl/britten-ronden-verhuizing-onderzoekstation-op-antarctica-af/>

Portada y contraportada - Elaboración propia.

# HABITAR EN LA ÓRBITA TERRESTRE BAJA

Un estudio desde la óptica de la arquitectura

## ANEXOS

ANEXO 1: Acrónimos y abreviaturas . . . . .	A02
ANEXO 2: Condiciones en la órbita terrestre baja y efectos en el cuerpo humano . . . . .	A03
ANEXO 3: Lanzamiento y ensamblaje de la EEI . . . . .	A05
ANEXO 4: Integración volumétrica de sistemas y consideraciones . . . . .	A07

# HABITAR EN LA ÓRBITA TERRESTRE BAJA

Un estudio desde la óptica de la arquitectura

## ANEXO 1: ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

ACBM	Puerto activo de acoplamiento estandarizado para módulos (Active Common Berthing Mechanism)	JEM-EF	Instalación externa del módulo experimental japonés (Japanese Experimental Module – Exposed Facility)
AMS	Espectrómetro magnético alfa (Alpha Magnetic Spectrometer)	MDA	Adaptador de acoplamiento múltiple (Multiple Docking Adapter)
APAS	Puerto de acoplamiento estandarizado para vehículos orbitales (Androgynous Peripheral Attach System)	MRM (1,2)	Mini módulo de investigación 1 y 2 (mini-research module 1 and 2)
ARED	Dispositivo de ejercicio resistivo avanzado (Advance Resistive Exercise Device)	MRUA	Movimiento rectilíneo uniformemente acelerado
ATCS	Sistema de control térmico activo (Active Thermal Control System)	NASA	Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (National Aeronautics and Space Administration)
BEAM	Módulo de actividad ampliable de Bigelow (Bigelow Expandable Activity Module)	NTRS	Servidor de informes técnicos de la NASA (NASA Technical Report Server)
BGA	Junta rotatoria solar Beta (Beta Gimball Assembly)	OGS	Sistema de generación de oxígeno (Oxygen Generation System)
CBM	Puerto de acoplamiento estandarizado para módulos (Common Berthing Mechanism)	OTB	Órbita Terrestre Baja
CRaA	Instalación de reducción de carbono (Carbon Reduction Assembly)	PCBM	Puerto pasivo de acoplamiento estandarizado para módulos (Passive Common Berthing Mechanism)
CSA	Agencia espacial canadiense (Canadian Space Agency)	PMA	Adaptador de acoplamiento presurizado (Presurized Mating Adapter)
CEPF	Instalación externa de carga del módulo <i>Columbus</i> ( <i>Columbus</i> External Payload Facility)	PMM	Módulo permanente multiusos (Permanent Multipurpose Module)
ECLSS	Sistema de soporte vital y control ambiental (Environmental Control and Life Support System)	PTCS	Sistema de control térmico pasivo (Passive Thermal Control System)
EEl	Estación Espacial Internacional	ROS	Segmento orbital ruso (Russian Orbital Segment)
ELC	Contenedor logístico EXPRESS (EXPRESS Logistic Container)	SARJ	Junta rotatoria solar Alfa (Solar Alpha Rotary Joint)
ESA	Agencia Espacial Europea (European Space Agency)	SSLA	Instalaciones de luz de estado sólido (Solid-State Light Assemblies)
EVA	Actividad Extra-vehicular (Extra-Vehicular Activity)	STS	Sistema de transporte espacial (Space Transport System)
EXPRESS	Procesamiento rápido de experimentos (EXpedite PRocessing of Experiments to the Space Station)	TCS	Sistema de control térmico (Thermal Control System)
GLA	Instalación general de luminarias (General Luminaire Assembly)	TVIS	Cinta de correr con estabilización del aislamiento de vibración (Treadmill with Vibration Isolation Stabilization)
ICBM	Misil balístico intercontinental (Inter-Continental Ballistic Missile)	UPA	Procesador de orina (Urine Processor Assembly)
IDA	Adaptador de acoplamiento internacional (International Docking Adapter)	USOS	Segmento orbital estadounidense ( US Operational Segment)
IMS	Sistema de gestión de inventario (Inventory Management System)	VME	Volumen medio por estancia
ISPR	Rack de carga estándar internacional (International Standard Payload Rack)	WHC	Compartimiento de residuos e higiene (Waste and Hygiene Compartment)
IV1,2,3	Integración volumétrica 1, 2, 3...	WORF	Ventana de investigación observacional (Window Observational Research Facility)
JAXA	Agencia Espacial Japonesa (Japan Aerospace Exploration Administration)	WPA	Procesador de aguas (Water Processor Assembly)
JEM	Módulo experimental japonés (Japanese Experimental Module)	WRS	Sistema de recuperación de agua (Water Reclaimer System)

## ANEXO 2: CONDICIONES EN LA ÓRBITA TERRESTRE BAJA Y EFECTOS EN EL CUERPO HUMANO

La OTB es la franja orbital a una altura entre 200 y 2000 km por encima del nivel del mar, a inclinaciones bajas, cercanas al ecuador<sup>[A1]</sup>. No es un límite claramente definido, pero está delimitado por condiciones específicas. Por debajo de los 200 km, la fricción de la atmósfera hace que los satélites pierdan velocidad y convierte a estas órbitas en inestables. Por encima de los 2000 km, la radiación y su efecto en los equipos electrónicos empieza a ser tal que es necesaria protección.

Los principales condicionantes de habitabilidad en esa órbita, al margen de los derivados del sustento de la tripulación, son la ausencia de atmósfera, las temperaturas extremas, la radiación y la ingravidez, aspectos que trataremos en esta sección.

### Ausencia de atmósfera

A una altura de 400 km, la atmósfera es prácticamente inexistente. Aunque la EEL necesita impulsos periódicos para contrarrestar la pérdida de altura por influencia de la atmósfera, se encuentra en la capa conocida como termosfera o ionosfera, en la que los constituyentes atmosféricos, si bien existen<sup>[A2]</sup>, están presentes en unas concentraciones tan pequeñas que las condiciones son similares a las de un vacío absoluto. Según Finckenor & De Groh<sup>[A3]</sup> la presión en esta región varía entre  $10^{-6}$  y  $10^{-9}$  Torr, lo que conlleva la pérdida inmediata de los componentes volátiles de cualquier superficie expuesta en ella.

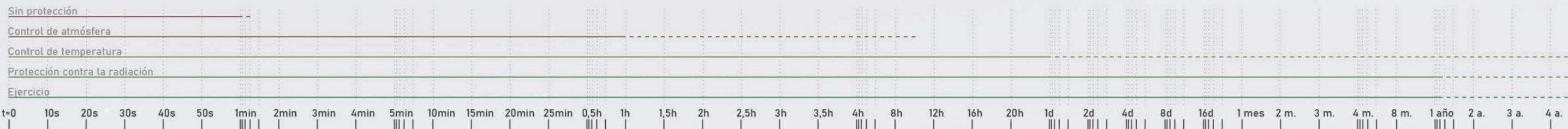
Al margen de la ausencia de los componentes atmosféricos necesarios para respirar, los efectos de esta ausencia de presión que experimenta un cuerpo humano en este entorno no son agradables. Según la descripción que hacen Parker & West<sup>[A4]</sup> de estos efectos, la consciencia puede mantenerse durante 9 a 11 s, tras lo cual el cuerpo empieza a convulsionar y queda paralizado. Se forma vapor de agua en los tejidos blandos y en la sangre intravenosa, vapor que causa una marcada hinchazón en todo el cuerpo, hasta dos veces el volumen habitual (un traje elástico puede evitar esto, en parte). El pulso se acelera en un principio, y cae después, junto con la tensión arterial, en un periodo de 30 a 60 s. La presión venosa aumenta por el gas y el vapor, superando la presión arterial en un minuto, punto en el cual dejará de haber circulación sanguínea. El gas que hubiera en los pulmones es expulsado rápidamente tras la descompresión, y el vapor continúa fluyendo hacia el exterior por las vías aéreas. Esta evaporación continua congela, primero, la boca y la nariz, y después, de forma más gradual, el resto del cuerpo.

Aunque se puede sobrevivir a estas condiciones durante unos segundos, es obvio que, a corto plazo, la habitabilidad en este entorno requiere de hábitats presurizados.

### Temperaturas extremas

Citando de nuevo a Finckenor & De Groh<sup>[A3]</sup>, a medida que la EEL, en su órbita alrededor de la Tierra, alterna entre zonas directamente iluminadas por la radiación solar y zonas protegidas por la sombra del planeta, las temperaturas varían drásticamente. La aproximación sugerida es una oscilación periódica entre los  $-120^{\circ}\text{C}$  en el lado nocturno y los  $+120^{\circ}\text{C}$  en el lado diurno, debida, de nuevo, a la ausencia de una atmósfera que regule estas temperaturas. Eso son extremos intolerables para la vida humana, sin necesidad de describir los efectos que tendría cualquiera de estas dos temperaturas en la hora y media que duraría la exposición.

Figura A2.01: Tiempos de supervivencia en la OTB para distintos grados de protección (basada en la información de Parker & West<sup>[A4]</sup>). En un escenario sin fallos accidentales, la línea discontinua representa el punto a partir del cual la supervivencia no está garantizada, y la terminación de la línea el punto en el cual la muerte es segura. En el tercer caso y anteriores (sin protección contra la radiación) una erupción solar sería letal en cualquier punto de la misión. Para los casos cuarto y quinto, la supervivencia de seres humanos no está documentada más allá de los 437 días en órbita de Valeri Poliakov.



TRABAJO DE FIN DE GRADO - AUTOR: Jaime López Nieto - TUTOR: Juan Luis Guerrero Rascado - CURSO: 2020/2021

### Radiación

La radiación es uno de los mayores problemas de la estancia más allá de nuestra atmósfera protectora, y es uno para el que, a día de hoy, no hay solución. La protección contra la radiación ionizante, definida como la radiación que penetra la materia y, en sus interacciones con ella, causa la formación de iones positivos y negativos a lo largo del camino de incidencia de la partícula o fotón, mediante la pérdida o ganancia de electrones y cuya energía puede variar enormemente según la fuente, requiere de materiales muy pesados como el plomo, extremadamente caros de poner en órbita.

Parker & West<sup>[A4]</sup> clasifican los tipos de radiación en el ambiente espacial en tres categorías: radiaciones atrapadas geomagnéticamente (cinturones de Van Allen), radiaciones cósmicas primarias, y radiación por partículas solares.

La radiación geomagnética no es demasiado significativa para la estancia en la OTB, no porque no sea energética, sino porque está muy localizada. A su altura máxima, la EEL está aún muy lejos de los puntos más densos en cuanto a carga de partículas de los cinturones de Van Allen. Fueron un problema, sin embargo, para las misiones *Apolo*, pero uno que puede solucionarse minimizando el tiempo de exposición. La tripulación del *Apolo 14*, la que más tiempo permaneció en esta región del espacio hasta la fecha, recibió una dosis de 1.14 rads, el equivalente a dos radiografías de pecho<sup>[A5]</sup>.

Las radiaciones cósmicas son algo más preocupantes. Se trata de una radiación ionizante producida cuando partículas alfa procedentes de fuera del sistema solar entran en contacto con los componentes de la atmósfera terrestre. Es una fuente de radiación constante y, de nuevo, el factor clave es el tiempo de exposición, con lo que limita la duración de las misiones en la OTB. Los ciclos solares afectan también a la intensidad de este tipo de radiación<sup>[A5]</sup>.

En cuanto a la radiación por partículas solares, se trata de una radiación muy variable, su intensidad está ligada a los ciclos de actividad solar de 11 años (máximos y mínimos solares) y, de forma más preocupante, a las erupciones solares. Las erupciones solares son la principal amenaza, en cuanto a radiación, en la OTB. En estos eventos, un enorme número de partículas se aceleran a velocidades cercanas a la de la luz (hasta el 60%), y a energías entre 100 y 300 MeV. La absorción potencial para un astronauta durante los eventos más graves de este tipo supera los 1000 rads, una dosis fácilmente letal<sup>[A3]</sup>.

### Microgravedad

Como ya hemos discutido, un cuerpo en órbita, ya sea en la OTB o en cualquier otra, está en una situación de caída libre junto con todo a su alrededor, en la cual no experimenta peso. Esto es un problema, porque el cuerpo humano ha evolucionado para adaptarse a un entorno en el que la fuerza de atracción de la gravedad, y en consecuencia el peso, tienen un efecto constante e importante. Aunque se han propuesto muchas soluciones para este problema, generalmente en forma de hábitats rotatorios capaces de simular la atracción gravitatoria mediante una fuerza centrípeta<sup>[A6]</sup>, a día de hoy ninguna de estas soluciones se ha implementado, y presentan importantes retos técnicos.

Los efectos a medio y largo plazo de la microgravedad en el cuerpo humano aún encierran incógnitas, pero ya son muchas las patologías que se han podido asociar a estas condiciones durante vuelos espaciales de larga duración, incluso a corto plazo. La mayoría de ellas, con efectos tanto físicos como psicológicos, se experimentan durante la estancia en órbita, ya sea en toda la duración de la misma o sólo al principio, hasta que el cuerpo se adapta a las nuevas circunstancias. Algunas, sin embargo, pueden tener efectos más persistentes.

[A1] Inter-agency Space Debris Coordination Comitee (2008). *IADC space debris mitigation guidelines*. IADC Action Item n°22.4.

[A2] El efecto de aerofrenado de la atmósfera se ha percibido de forma sustancial a alturas de 700-800 km.

[A3] Finckenor, M. M. & De Groh, K. K. (2015). *A researcher's guide to international space station: Space enviromental effects*. *ISS Researcher's Guide Series*, NASA, Washington D. C.

[A4] Parker, J. F. & West, V. R. (1973). *Bioastronautics data book* (2. ed). NASA, Washington D.C.

[A5] Keystone, J. S. (2019). *Travel medicine* (4 ed). Editorial Elsevier, Edinburgo.

[A6] Rousek, T. (2010). *AG-SYS, Artificial Gravity System concepts*. NASA Jet Propulsion Laboratory. Pasadena, 2010.

Los efectos de la microgravedad en el cuerpo humano<sup>[A7]</sup> pueden clasificarse de la siguiente forma:

## -Sistema Vestibular

Las alteraciones en el sistema vestibular del oído interno, guiado por fluidos y por tanto afectado por la ausencia de gravedad, pueden afectar a la percepción de la orientación y generar una serie de síntomas, desde vértigos y dolor de cabeza a náuseas y vómitos, conocidos como "síndrome de adaptación espacial". Actualmente, estos síntomas se combaten con medicación durante toda la estancia en órbita.

## -Sistema cardiovascular

Estas alteraciones también tienen que ver con la relocalización de fluidos en el cuerpo tras la exposición a ambientes de microgravedad. En los primeros días, esta relocalización puede ser severa, reduciéndose el volumen de la mitad baja del cuerpo hasta en dos litros y generando hinchazón en el cuello y la cara. Tras esta etapa inicial, los síntomas se vuelven más leves conforme el sistema cardiovascular se adapta y estabiliza esta situación. Sin embargo, a largo plazo, se produce una reducción del volumen y la presión sanguínea que conlleva alteraciones de diversos tipos en varios órganos, algunas pasajeras, como la reducción de tamaño del corazón, y otras persistentes, como un aplanamiento del globo ocular y un aumento de presión en el nervio óptico que pueden acarrear problemas de visión. La readaptación a un entorno de 1 G tras el vuelo puede llevar semanas, en las que se produce lo que se conoce como 'intolerancia ortostática'. Esto es, incapacidad para ponerse en pie que puede oscilar en gravedad desde una simple incomodidad a dificultades circulatorias.

## -Sistema locomotor

Los cambios en el sistema locomotor se producen de forma más lenta, tardando hasta dos semanas en experimentarse. Tras este periodo, se produce una pérdida de masa muscular por el esfuerzo reducido al no tener que lidiar, de forma continua, con la gravedad. Esto puede generar atrofia muscular, y afecta a unos músculos más que a otros. En gran medida, las patologías asociadas a este problema pueden corregirse con ejercicio constante. También el metabolismo óseo se deteriora, llevando a una pérdida de masa ósea, especialmente en las piernas, que puede traducirse en fracturas una vez que se vuelve a un entorno de gravedad convencional. Además, la escasa absorción de calcio en los huesos puede traducirse en una mayor calcificación en los riñones, generando cálculos renales. De igual forma que con las afectaciones musculares, las afectaciones óseas pueden tratarse con ejercicio y medicación.

## -Sistema inmunológico

La pérdida de presión en el sistema cardiovascular lleva asociada una reducción del número de células sanguíneas. Un estudio reciente<sup>[A8]</sup> ha relacionado esto con alteraciones persistentes del sistema inmunológico y su respuesta frente a determinados patógenos, especialmente frente a virus.

El vuelo espacial más largo hasta la fecha es el de Valeri Poliakov, con 437 días en órbita. Para la NASA, el record lo ostenta Scott Kelly, con 340 días en los que se buscaba estudiar precisamente los efectos de la microgravedad en el cuerpo humano. Más allá de estas duraciones, no está claro cómo las condiciones de microgravedad o gravedad reducida pueden afectar al cuerpo humano, convirtiendo éste, quizá, en el factor más preocupante y menos explorado de cara a la exploración espacial.

# HABITAR EN LA ÓRBITA TERRESTRE BAJA

Un estudio desde la óptica de la arquitectura

## ANEXO 3: LANZAMIENTO Y ENSAMBLAJE DE LA EEI

Los diferentes componentes de la EEI se diseñaron para ser puestos en órbita por las naves del programa del transbordador espacial STS, o en el caso de los módulos rusos *Zarya* y *Zvezda*, por un cohete *Proton-V*. Tras la cancelación en 2011 del programa del transbordador espacial, el lanzamiento de nuevos componentes como el módulo hinchable experimental de Bigelow (BEAM) o los adaptadores IDA se ha llevado a cabo en cohetes *Falcon 9* de la compañía estadounidense SpaceX.

La secuencia de ensamblaje de la estación hasta su finalización en 2011 se desarrolló a lo largo de 40 misiones tripuladas. Ordenadas cronológicamente, tal y como se presentan en la web de la NASA<sup>[A9]</sup>, se desarrollan de la siguiente forma:

1. ISS Assembly Mission 1 A/R (20 de noviembre, 1998). Lanzamiento del módulo de control *Zarya*, a bordo de un cohete *Proton-V* desde el cosmódromo ruso de Baikonur. *Zarya* es capaz de generar y almacenar electricidad, almacenar combustible, y acoplarse con vehículos del tipo *Soyuz* y *Progress*.

2. ISS AM 2A (6 de diciembre, 1998). El transbordador espacial *Endeavour* entrega el módulo *Node 1, Unity*, junto con dos adaptadores de acoplamiento presurizados (PMA). *Unity* se encuentra en órbita con *Zarya*, es capturado por la tripulación y acoplado el 13 de diciembre. Cuando *Endeavour* se separa al fin del módulo *Unity*, nace la EEI.

3. ISS AM 2A.1 (27 de mayo, 1999). El transbordador espacial *Discovery* equipa la EEI con suministros logísticos, entre ellos una grúa de carga en el módulo ruso para tareas de mantenimiento.

4. ISS AM 2A.2a (19 de mayo, 2000). La tripulación prepara la EEI para la llegada del siguiente módulo, *Zvezda*, con cuatro nuevas baterías, diez detectores de humos y nuevos ventiladores de refrigeración para *Zarya*, así como raíles para futuras EVA.

5. ISS AM 1R (12 de julio, 2000). Lanzamiento del módulo de servicio *Zvezda* a bordo de un *Proton-V* desde Baikonur. *Zvezda* incluye alojamiento para la tripulación y más funciones de soporte vital.

6. ISS AM 2A.2b (8 de septiembre, 2000). Entrega de suministros y mantenimiento.

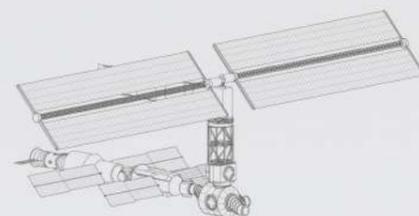
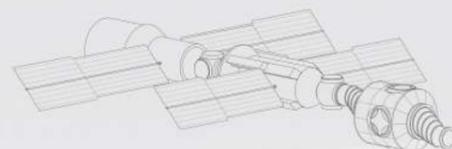
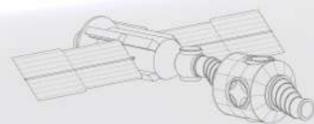
7. ISS AM 3A (11 de octubre, 2000). El transbordador espacial *Discovery* entrega el armazón Z1, o *Z1 Truss*, con cuatro giroscopios que permiten a la EEI controlar su altitud. También se entrega un tercer adaptador de acoplamiento presurizado, instalado en el módulo *Unity*, y una antena de televisión.

8. ISS AM 2R (20 de octubre, 2000). La primera tripulación residente en la EEI parte de Baikonur en un cohete *Soyuz*. La cápsula *Soyuz* permanecerá acoplada a la estación para actuar como bote salvavidas en caso de emergencia, cambiándose periódicamente.

9. ISS AM 4A (30 de noviembre, 2000). Entrega del armazón P6, que contiene la primera de las dos instalaciones solares. Queda instalado, de forma temporal, en la parte alta del armazón Z1, y aumenta la capacidad de generación y almacenaje eléctrico de la estación.

10. ISS AM 5A (7 de febrero, 2001). El transbordador espacial *Atlantis* entrega el primer módulo de laboratorio, el americano *Destiny*. Los giroscopios quedan conectados a la electrónica del laboratorio, y son activados por primera vez.

11. ISS AM 5A.1 (8 de marzo, 2001). El transbordador espacial *Discovery* reabastece la estación mediante el módulo multiusos *Leonardo*, de fabricación Italiana. Llega la segunda tripulación, y se marcha la primera.



24. ISS AM 12A.1 (9 de diciembre, 2006). El transbordador espacial *Discovery* entrega la tercera pieza del armazón de Babor, P5, que se instala junto a P3/4.

23. ISS AM 12A (9 de septiembre, 2006). El transbordador espacial *Atlantis* entrega la segunda pieza del armazón de babor, P3/4 Truss, que es instalada junto al armazón P1. Desde esta nueva pieza, se extiende la segunda instalación solar.

22. ISS AM ULF 1.1 (4 de julio, 2006). El transbordador espacial *Discovery* entrega suministros en el módulo multiusos *Leonardo* para una futura expansión, así como un nuevo miembro para la tripulación.

21. ISS AM LFI (26 de julio, 2005). Después de dos años de parón en el programa del transbordador espacial tras el accidente del *Columbia*, el transbordador *Discovery* lleva a cabo una entrega de suministros y la instalación de una plataforma externa de almacenamiento.

20. ISS AM 11A (23 de noviembre, 2002). El transbordador espacial *Endeavour* entrega la primera pieza del armazón de babor, P1 truss, y es instalada en S0. Se instalan también ayudas al desplazamiento a lo largo del armazón.

19. ISS AM 9A (7 de octubre, 2002). El transbordador espacial *Atlantis* entrega la primera pieza del armazón de estribor, S1 Truss, que es instalada por la tripulación en el armazón S0. Entrega de los primeros paneles radiadores, que tras su prueba permanecerían almacenados hasta la conclusión de la estructura de armazón.

18. ISS AM UF-2 (5 de junio, 2002). El transbordador espacial *Endeavour*, con un módulo multiusos abordo, entrega nuevas cargas y racks para el módulo de laboratorio *Destiny*. La quinta tripulación sustituye a la cuarta, después de 196 días en el espacio.

17. ISS AM 8A (8 de abril, 2002). El transbordador espacial *Atlantis* entrega el armazón S0, centro de la futura estructura de armazón, y la tripulación lo instala en su localización final sobre el módulo *Destiny*. Se instala también una base móvil para el brazo robótico *Canadarm2*.

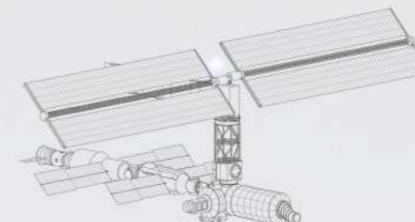
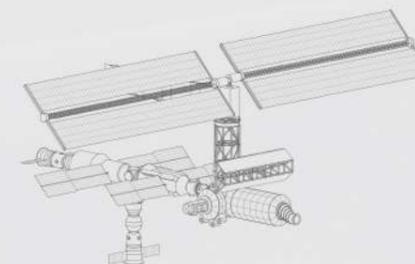
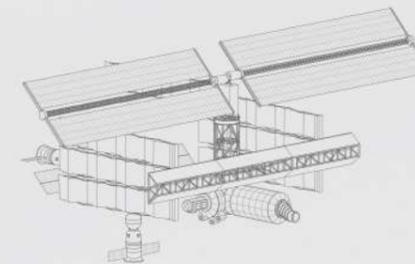
16. ISS AM UF-1 (5 de diciembre, 2001). El transbordador espacial *Endeavour* entrega, mediante el módulo multiusos *Leonardo*, más racks para el laboratorio *Destiny*. La cuarta tripulación sustituye a la tercera.

15. ISS AM 4R (14 de septiembre, 2001). Un cohete *Soyuz* desde Baikonur entrega el compartimento *Pirs*, junto con otros componentes. *Pirs* es el equivalente ruso de *Quest*, una cámara desde la que se realizan EVA y a la que pueden acoplarse cápsulas *Soyuz*. Queda instalado en el puerto nadir del módulo de servicio *Zvezda*.

14. ISS AM 7A.1 (10 de agosto, 2001). Llega la tercera tripulación a bordo del transbordador espacial *Discovery*, y parte la segunda.

13. ISS AM 7A (12 de julio, 2001). El transbordador espacial *Atlantis* instala, con su brazo robótico, el compartimento *Quest* (o *Joint Airlock*) desde el que tanto estadounidenses como rusos llevarán a cabo sus EVAs. *Quest* también complementa algunos sistemas del módulo de servicio *Zvezda*.

12. ISS AM 6A (19 de abril, 2001). El transbordador espacial *Endeavour* entrega algunos racks para el módulo de laboratorio, desde el interior del módulo multiusos *Raffaello*. Se instala *Canadarm2*, el brazo robótico de la estación, y una antena para facilitar la comunicación durante las EVAs.



2006

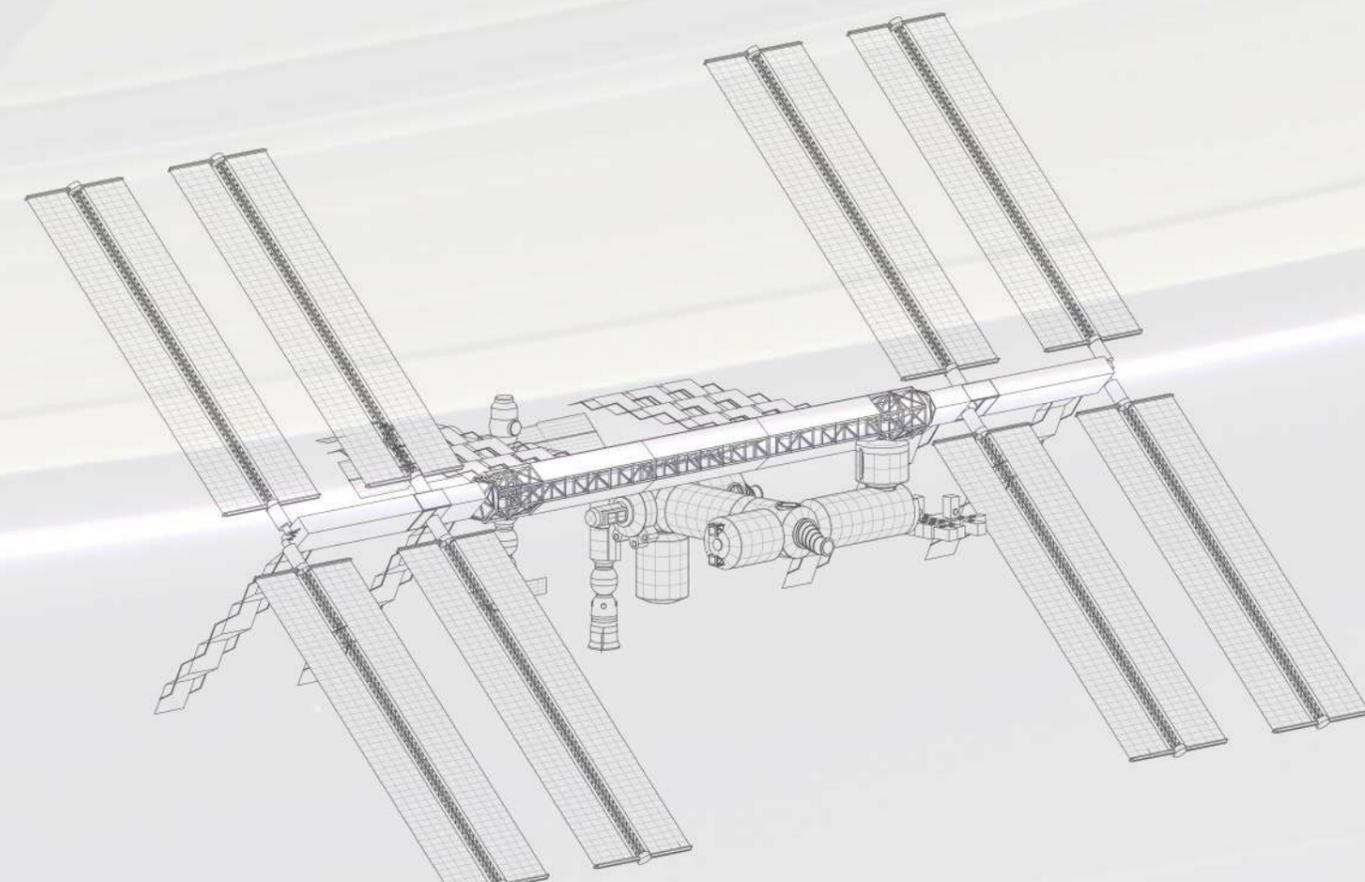
2002 2005

2001

1998

1999

2000



2007

25. ISS AM 13A (8 de junio, 2007) Entrega de la segunda pieza del armazón de estribor, S3/4 Truss, que es instalada en S1. Se despliega la nueva instalación solar asociada a S3/4, y se sustituye un miembro de la tripulación.

26. ISS AM 13A.1 (8 de agosto, 2007) Entrega e instalación de la tercera pieza del armazón de estribor, S5.

27. ISS AM 10A (23 de octubre, 2007) Entrega del módulo Node-2, Harmony, instalado en el extremo delantero del módulo laboratorio Destiny. Será en este módulo donde se acoplarán los laboratorios europeo y japonés. El armazón P6 y su instalación solar, previamente instalados en Z1, se trasladan a su posición final junto a P5, completando la parte de babor del armazón estructural de la estación.

28. ISS AM 1E (7 de febrero, 2008) El transbordador espacial Atlantis entrega el módulo de laboratorio europeo, Columbus, que es instalado en el puerto de estribor del módulo Harmony. Sustitución de un miembro de la tripulación 16.

29. ISS AM 1J/A (11 de marzo, 2008) El transbordador espacial Endeavour entrega el primer componente del módulo de laboratorio japonés Kibo, el experimental logistics module. Éste se instala provisionalmente en el puerto Cénit del módulo Harmony. Se entrega también un componente robótico canadiense, Dextre, para el complejo, y se produce un nuevo relevo en la tripulación.

30. ISS AM 1J (31 de mayo, 2008) Entrega del segundo componente presurizado del módulo de laboratorio japonés Kibo, instalado en el puerto de babor del módulo Harmony. El primer componente del módulo japonés se traslada de su posición provisional a su posición final en el puerto cénit del módulo Kibo. Nuevo relevo en la tripulación 17.

31. ISS AM ULF2 (14 de noviembre, 2008) El transbordador espacial Endeavour entrega nuevos racks con equipamiento de habitabilidad en el interior del módulo multiusos Leonardo, entre ellos las habitaciones de la tripulación y máquinas de ejercicio. Reparación de la junta solar rotatoria en S3/4 previa a la entrega de la última parte del armazón.

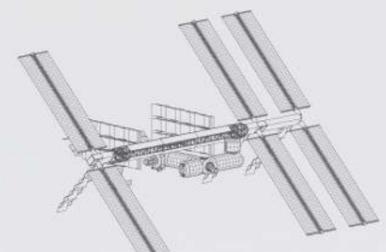
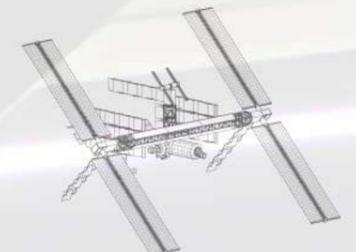
32. ISS AM 15A (15 de marzo, 2009) El transbordador espacial Discovery entrega e instala el último segmento de la estructura de armazón, S6 Truss, y la cuarta y última instalación solar.

33. ISS AM 2J/A (15 de julio, 2009) El transbordador espacial Endeavour entrega la parte expuesta del laboratorio japonés Kibo, así como el brazo robótico para la manipulación de experimentos en esta parte de la estación.

34. ISS AM 17A (28 de agosto, 2009) El transbordador espacial Discovery entrega un nuevo cargamento de racks de almacenamiento y ciencia para Kibo a bordo del módulo multiusos Leonardo.

35. ISS AM 5R (10 de noviembre, 2009) Un cohete Soyuz desde Baikonur entrega el mini-research module 2 (MRM2), Poisk, que se instala en el puerto cénit del módulo de servicio Zvezda. El nuevo módulo actúa tanto de laboratorio como de compartimento estanco para EVA en el lado ruso de la estación.

36. ISS AM ULF3 (16 de noviembre, 2009) El transbordador espacial Atlantis realiza la que será la última rotación de la tripulación en un transbordador espacial. Su carga en esa misión incluye también un nuevo giroscopio para la estación.



2008

2009

2011

2010

ISS AM ULF6 sería la última misión de la NASA a la EEI por sus propios medios. En 2016 se entregó el módulo hinchable BEAM de Bigelow aerospace a bordo de un cohete Falcon 9, y dos vuelos más de este cohete, en 2016 y 2019, entregarían adaptadores del tipo IDA (International Docking Adapter). En 2020 estaba previsto el lanzamiento de un nuevo módulo, Nauka, para expandir la parte rusa, pero debido a la situación de pandemia por la COVID-19, ha sido pospuesto hasta junio de 2021.

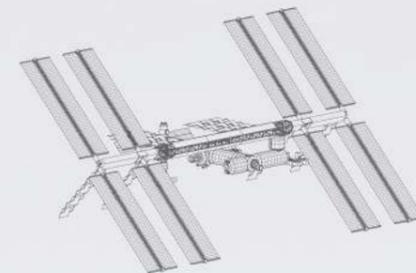
41. ISS AM ULF6 (16 de mayo de 2011) Último vuelo del transbordador espacial Endeavour y fin del programa de transbordadores espaciales. Entrega de puertos exteriores EXPRESS para la estructura de armazón y una extensión del brazo robótico Canadarm2.

40. ISS AM ULF5 (24 de febrero de 2011) En su última misión antes de ser retirado, el transbordador espacial Discovery entrega el módulo multiusos Leonardo con suministros y equipamiento, y éste quedará permanente instalado en la estación, en una posición que varía según las necesidades. Actualmente, se encuentra conectado provisionalmente en el puerto estribor de Tranquility, aunque en los planos se ha representado en su posición más común, el puerto nadir de Unity.

39. ISS AM ULF4 (14 de mayo de 2010) En su última misión antes de ser retirado, el transbordador espacial Atlantis entrega el mini research module 1 (MRM1) Rassvet, que se instala en el puerto nadir del módulo ruso Zarya. Junto con los de Pairs, Pirs y Zvezda, el de Rassvet es el cuarto puerto de acoplamiento para vehículos orbitales del tipo Soyuz o Progress.

38. ISS AM 19A (5 de abril, 2010) El transbordador espacial Discovery realiza una nueva entrega de Racks en el interior del módulo multiusos Leonardo.

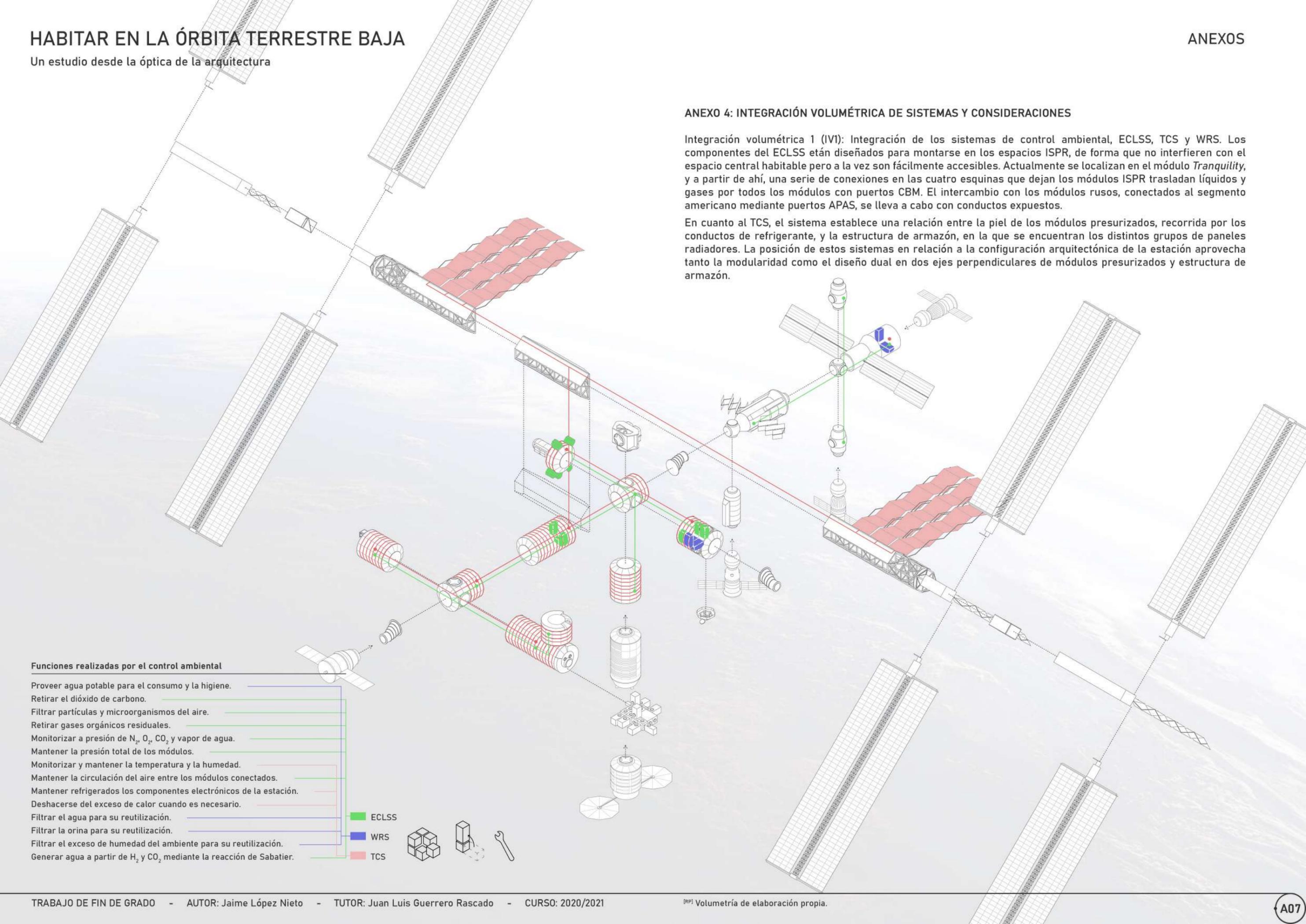
37. ISS AM 20A (8 de febrero, 2010) El transbordador espacial Endeavour entrega el módulo Node-3, Tranquility, con nuevos sistemas de soporte vital. Se instala en el puerto de babor del módulo Unity. Acoplada al puerto de Nadir de Tranquility está la cúpula, una estación de trabajo con siete ventanas orientadas a la Tierra.



## ANEXO 4: INTEGRACIÓN VOLUMÉTRICA DE SISTEMAS Y CONSIDERACIONES

Integración volumétrica 1 (IVI): Integración de los sistemas de control ambiental, ECLSS, TCS y WRS. Los componentes del ECLSS están diseñados para montarse en los espacios ISPR, de forma que no interfieren con el espacio central habitable pero a la vez son fácilmente accesibles. Actualmente se localizan en el módulo *Tranquility*, y a partir de ahí, una serie de conexiones en las cuatro esquinas que dejan los módulos ISPR trasladan líquidos y gases por todos los módulos con puertos CBM. El intercambio con los módulos rusos, conectados al segmento americano mediante puertos APAS, se lleva a cabo con conductos expuestos.

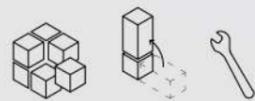
En cuanto al TCS, el sistema establece una relación entre la piel de los módulos presurizados, recorrida por los conductos de refrigerante, y la estructura de armazón, en la que se encuentran los distintos grupos de paneles radiadores. La posición de estos sistemas en relación a la configuración arquitectónica de la estación aprovecha tanto la modularidad como el diseño dual en dos ejes perpendiculares de módulos presurizados y estructura de armazón.

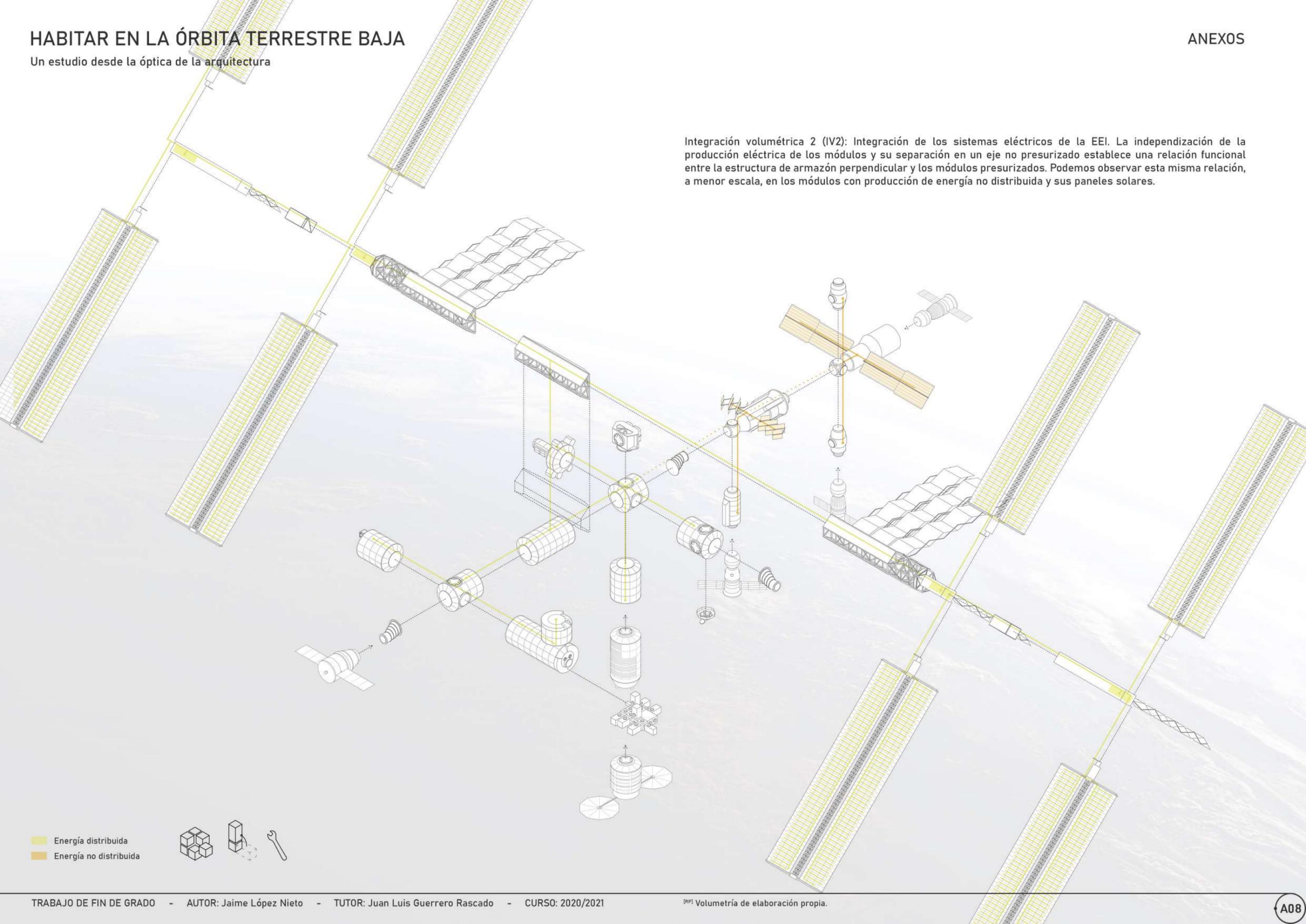


### Funciones realizadas por el control ambiental

- Proveer agua potable para el consumo y la higiene.
- Retirar el dióxido de carbono.
- Filtrar partículas y microorganismos del aire.
- Retirar gases orgánicos residuales.
- Monitorizar a presión de  $N_2$ ,  $O_2$ ,  $CO_2$  y vapor de agua.
- Mantener la presión total de los módulos.
- Monitorizar y mantener la temperatura y la humedad.
- Mantener la circulación del aire entre los módulos conectados.
- Mantener refrigerados los componentes electrónicos de la estación.
- Deshacerse del exceso de calor cuando es necesario.
- Filtrar el agua para su reutilización.
- Filtrar la orina para su reutilización.
- Filtrar el exceso de humedad del ambiente para su reutilización.
- Generar agua a partir de  $H_2$  y  $CO_2$  mediante la reacción de Sabatier.

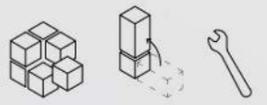
- ECLSS
- WRS
- TCS



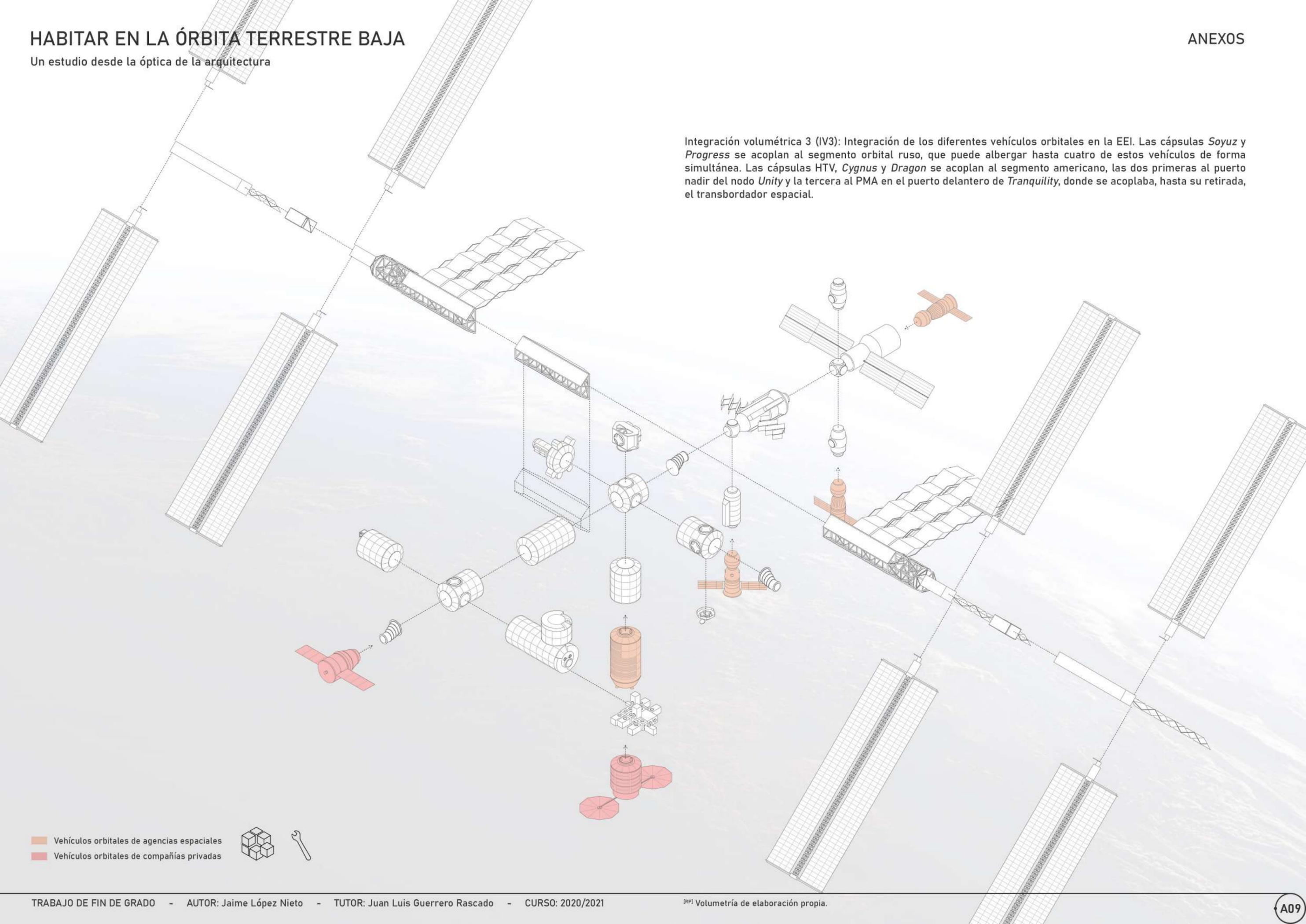


Integración volumétrica 2 (IV2): Integración de los sistemas eléctricos de la EEI. La independización de la producción eléctrica de los módulos y su separación en un eje no presurizado establece una relación funcional entre la estructura de armazón perpendicular y los módulos presurizados. Podemos observar esta misma relación, a menor escala, en los módulos con producción de energía no distribuida y sus paneles solares.

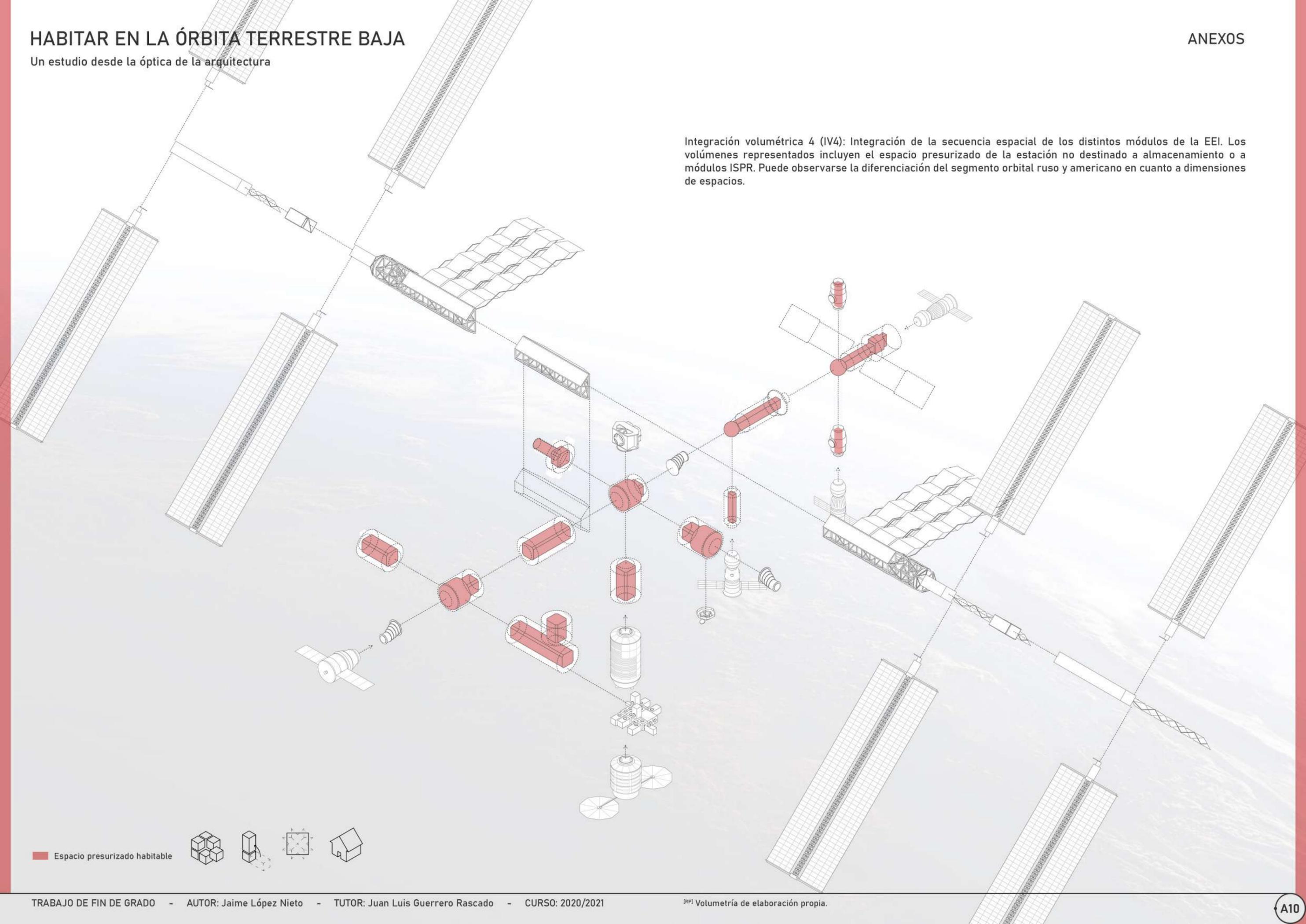
■ Energía distribuida  
■ Energía no distribuida



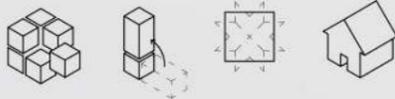
Integración volumétrica 3 (IV3): Integración de los diferentes vehículos orbitales en la EEI. Las cápsulas *Soyuz* y *Progress* se acoplan al segmento orbital ruso, que puede albergar hasta cuatro de estos vehículos de forma simultánea. Las cápsulas *HTV*, *Cygnus* y *Dragon* se acoplan al segmento americano, las dos primeras al puerto nadir del nodo *Unity* y la tercera al PMA en el puerto delantero de *Tranquility*, donde se acoplaba, hasta su retirada, el transbordador espacial.



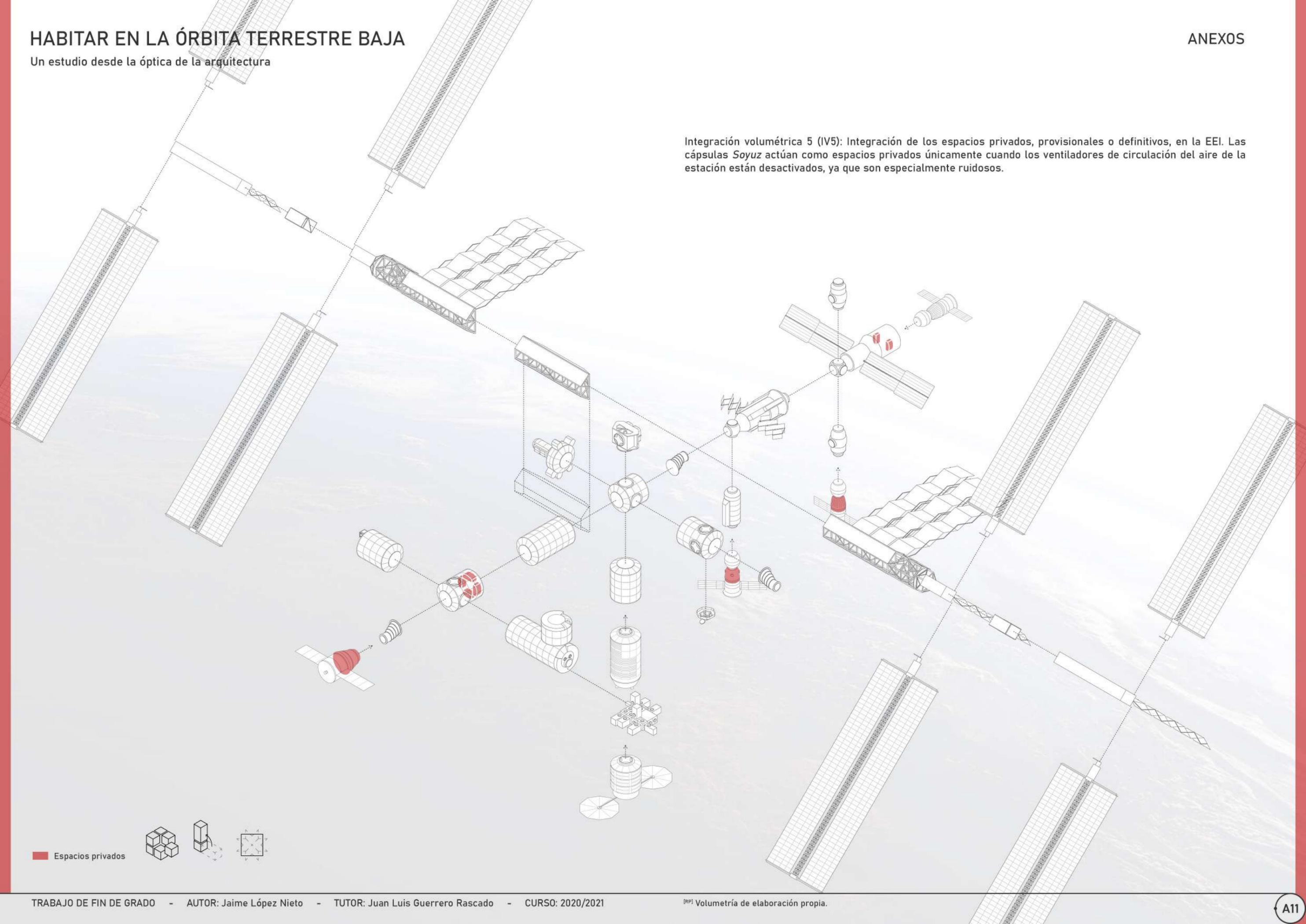
Integración volumétrica 4 (IV4): Integración de la secuencia espacial de los distintos módulos de la EEI. Los volúmenes representados incluyen el espacio presurizado de la estación no destinado a almacenamiento o a módulos ISPR. Puede observarse la diferenciación del segmento orbital ruso y americano en cuanto a dimensiones de espacios.



■ Espacio presurizado habitable



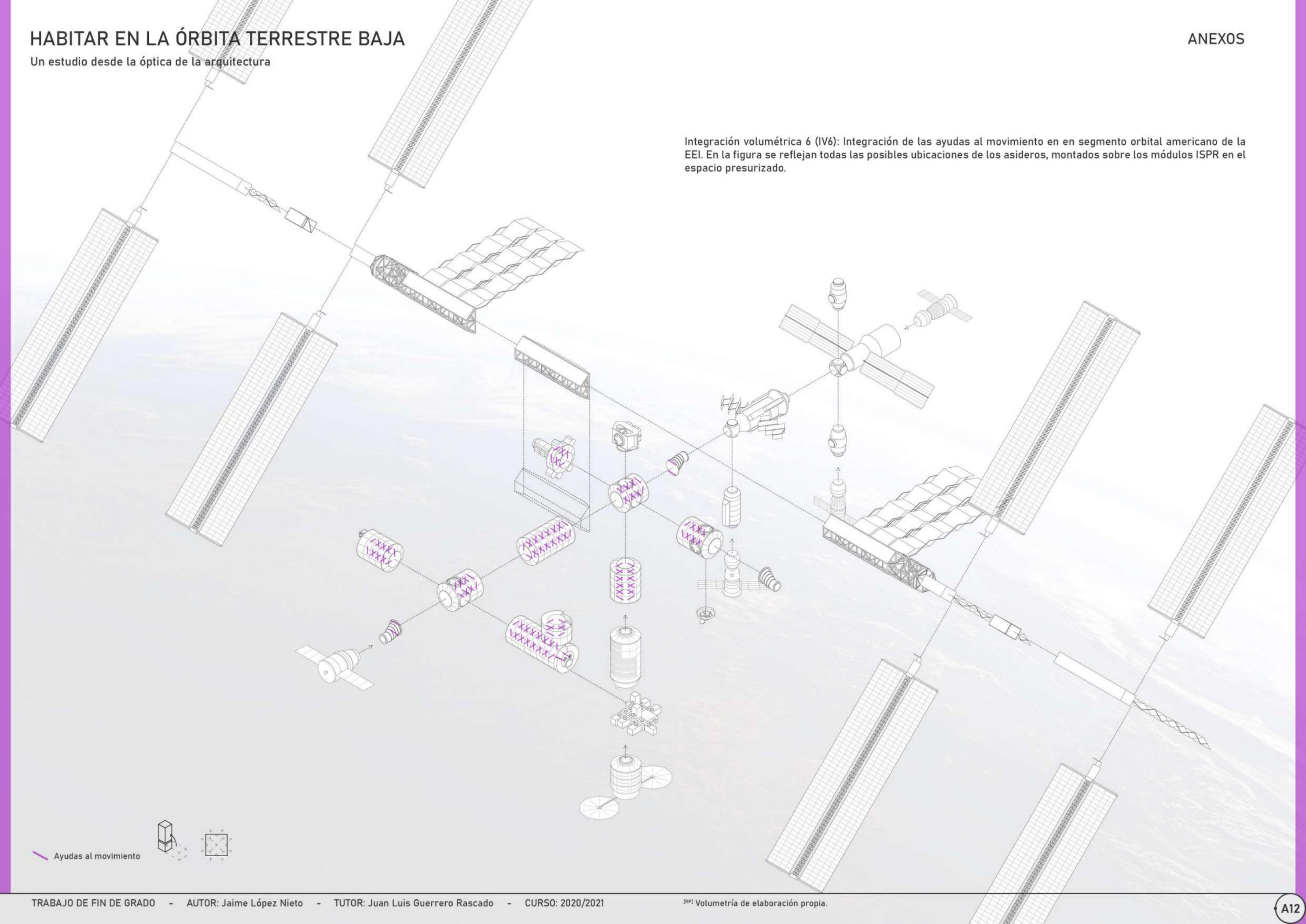
Integración volumétrica 5 (IV5): Integración de los espacios privados, provisionales o definitivos, en la EEI. Las cápsulas Soyuz actúan como espacios privados únicamente cuando los ventiladores de circulación del aire de la estación están desactivados, ya que son especialmente ruidosos.



■ Espacios privados



Integración volumétrica 6 (IV6): Integración de las ayudas al movimiento en en segmento orbital americano de la EEI. En la figura se reflejan todas las posibles ubicaciones de los asideros, montados sobre los módulos ISPR en el espacio presurizado.



Ayudas al movimiento



Integración volumétrica 7 (IV7): Integración de los espacios y utensilios de higiene. Los puntos azules, dos en el módulo *Zarya* y cuatro en el nodo *Harmony*, representan la localización de los kits de higiene personal para una tripulación de seis personas.

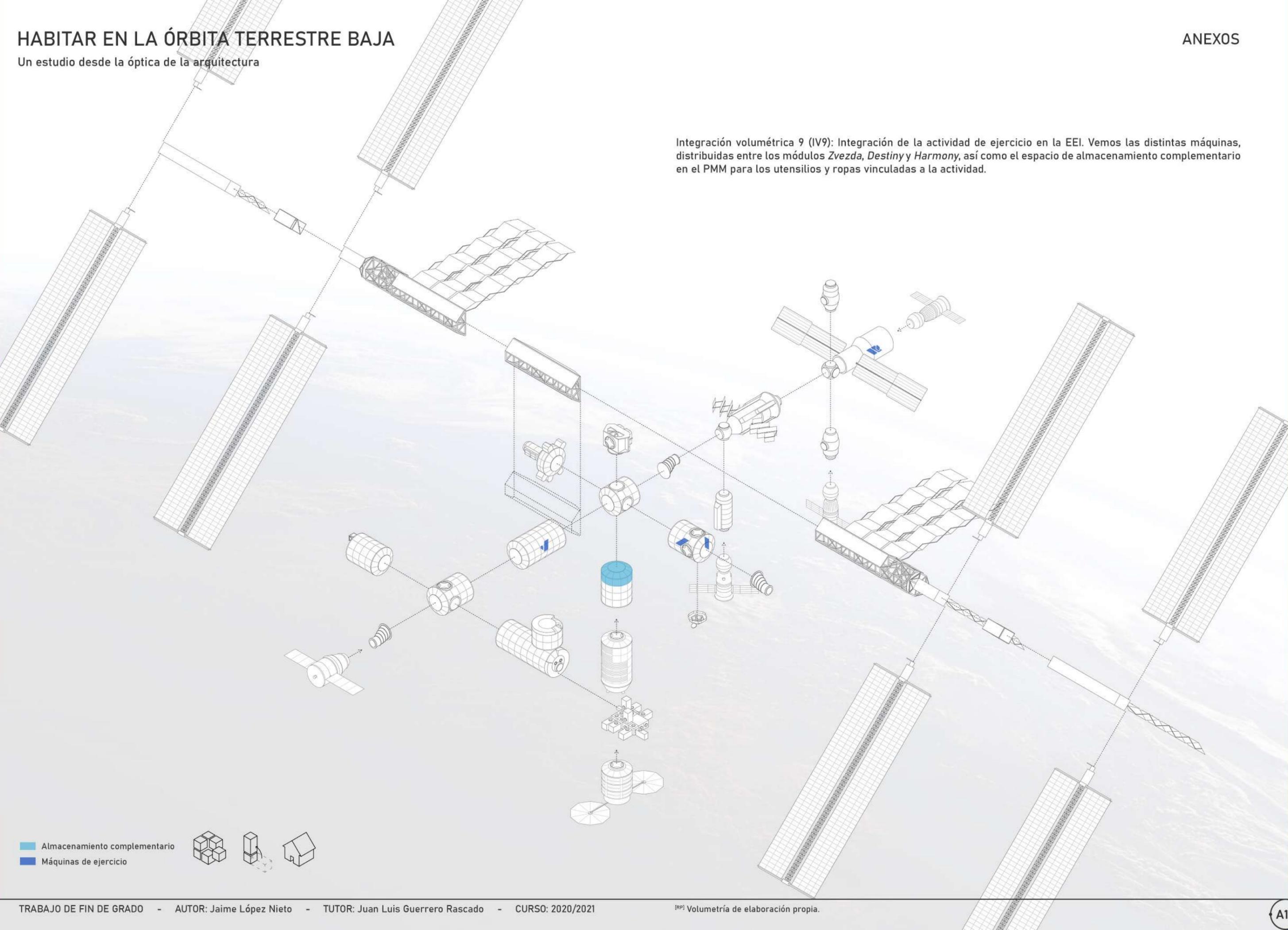
Aspiradora  
WHCs y puntos de higiene personales



Integración volumétrica 8 (IV8): Integración de los espacios de descanso de la EEI. Puede apreciarse la concentración de estos espacios en dos módulos, en el caso de las *Kayutkas* rusas entorno al espacio de mayores dimensiones del ROS, el del módulo *Zvezda*, y en el caso de los *crew quarters*, en los módulos ISPR de *Tranquility*, cercanos a la parte delantera de la estación. Estos dos lugares tienen en común estar situados en extremos del eje central, lejos de los lugares más transitados.



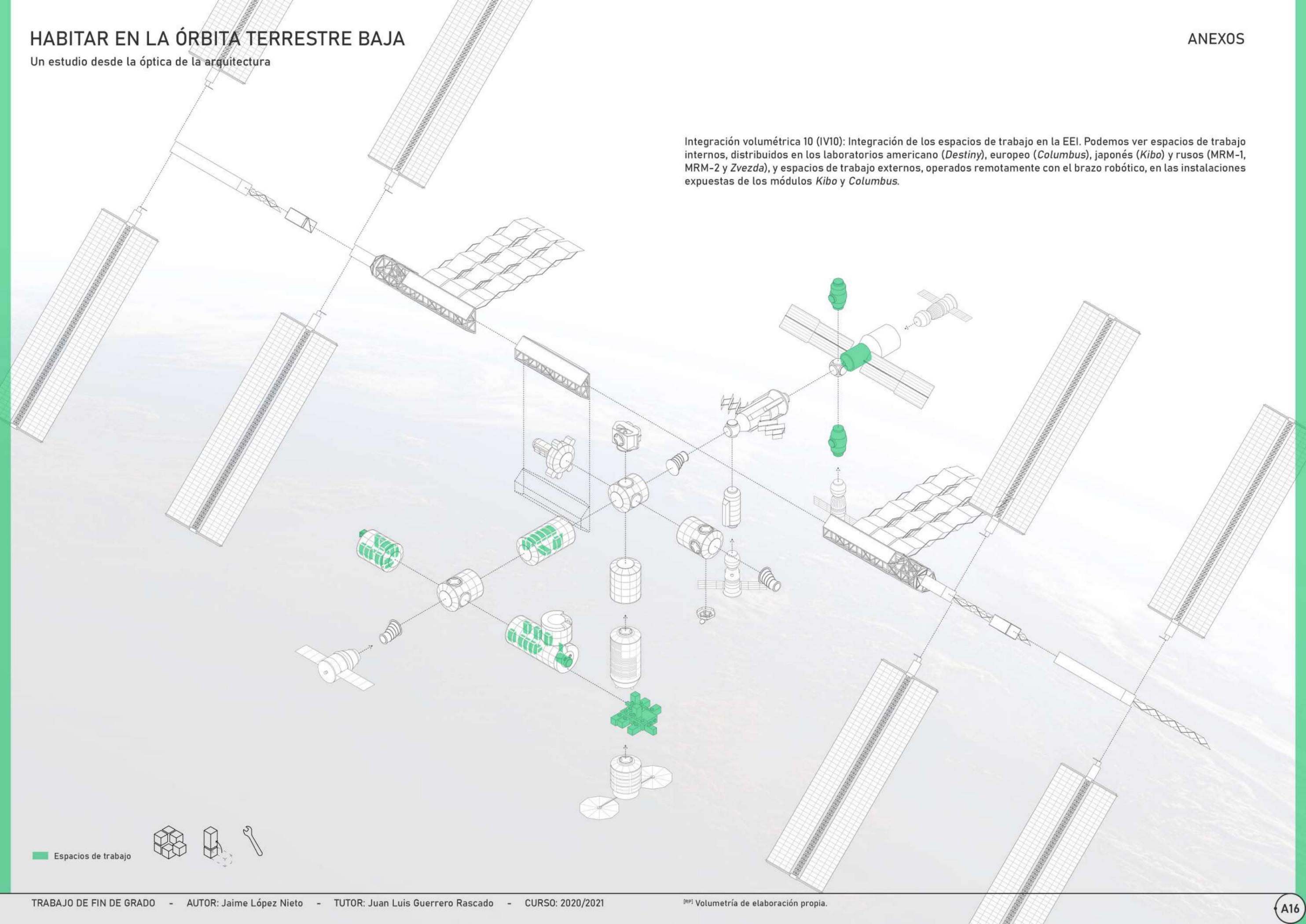
Integración volumétrica 9 (IV9): Integración de la actividad de ejercicio en la EEI. Vemos las distintas máquinas, distribuidas entre los módulos *Zvezda*, *Destiny* y *Harmony*, así como el espacio de almacenamiento complementario en el PMM para los utensilios y ropas vinculadas a la actividad.



Almacenamiento complementario  
Máquinas de ejercicio



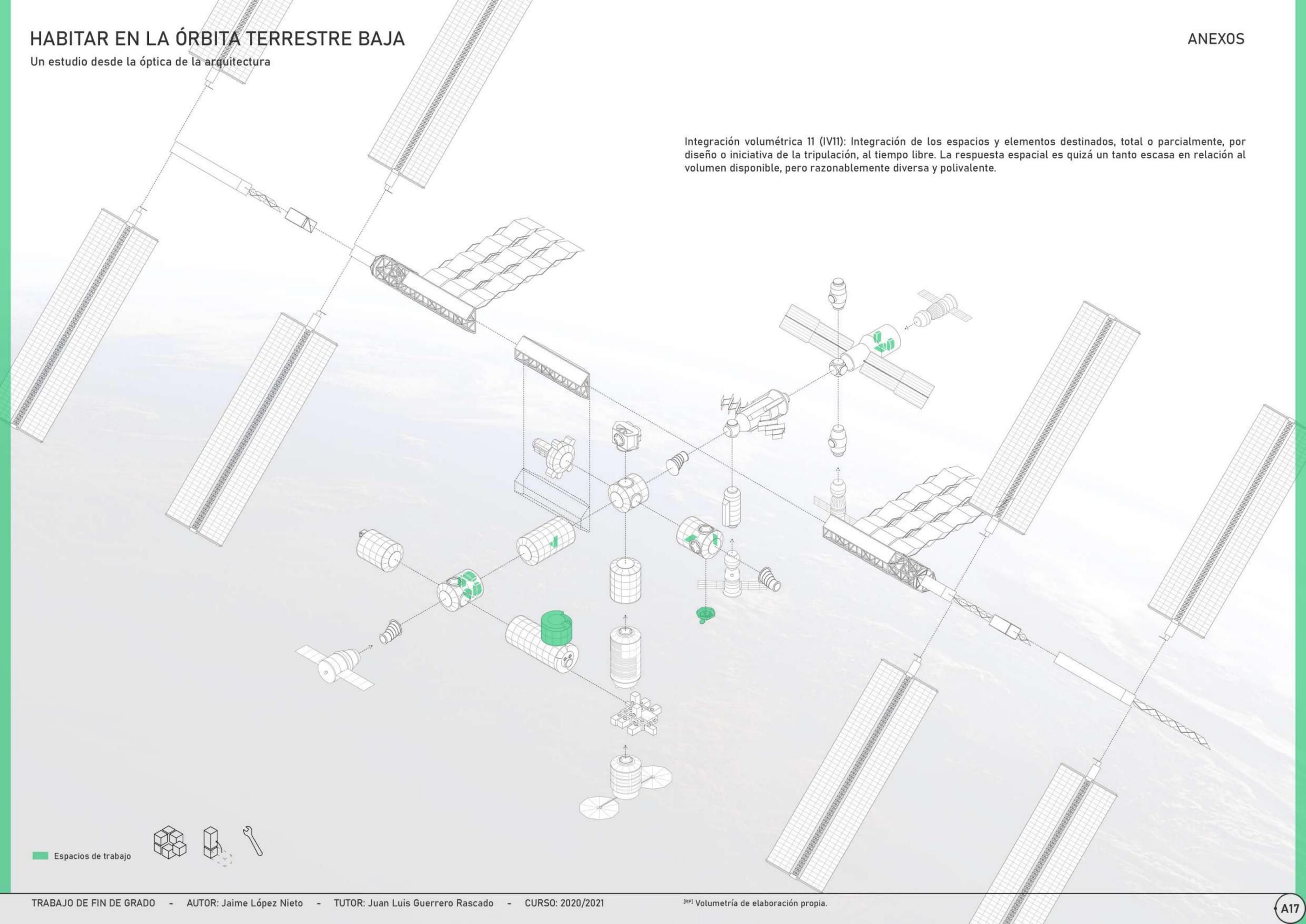
Integración volumétrica 10 (IV10): Integración de los espacios de trabajo en la EEI. Podemos ver espacios de trabajo internos, distribuidos en los laboratorios americano (*Destiny*), europeo (*Columbus*), japonés (*Kibo*) y rusos (MRM-1, MRM-2 y *Zvezda*), y espacios de trabajo externos, operados remotamente con el brazo robótico, en las instalaciones expuestas de los módulos *Kibo* y *Columbus*.



■ Espacios de trabajo



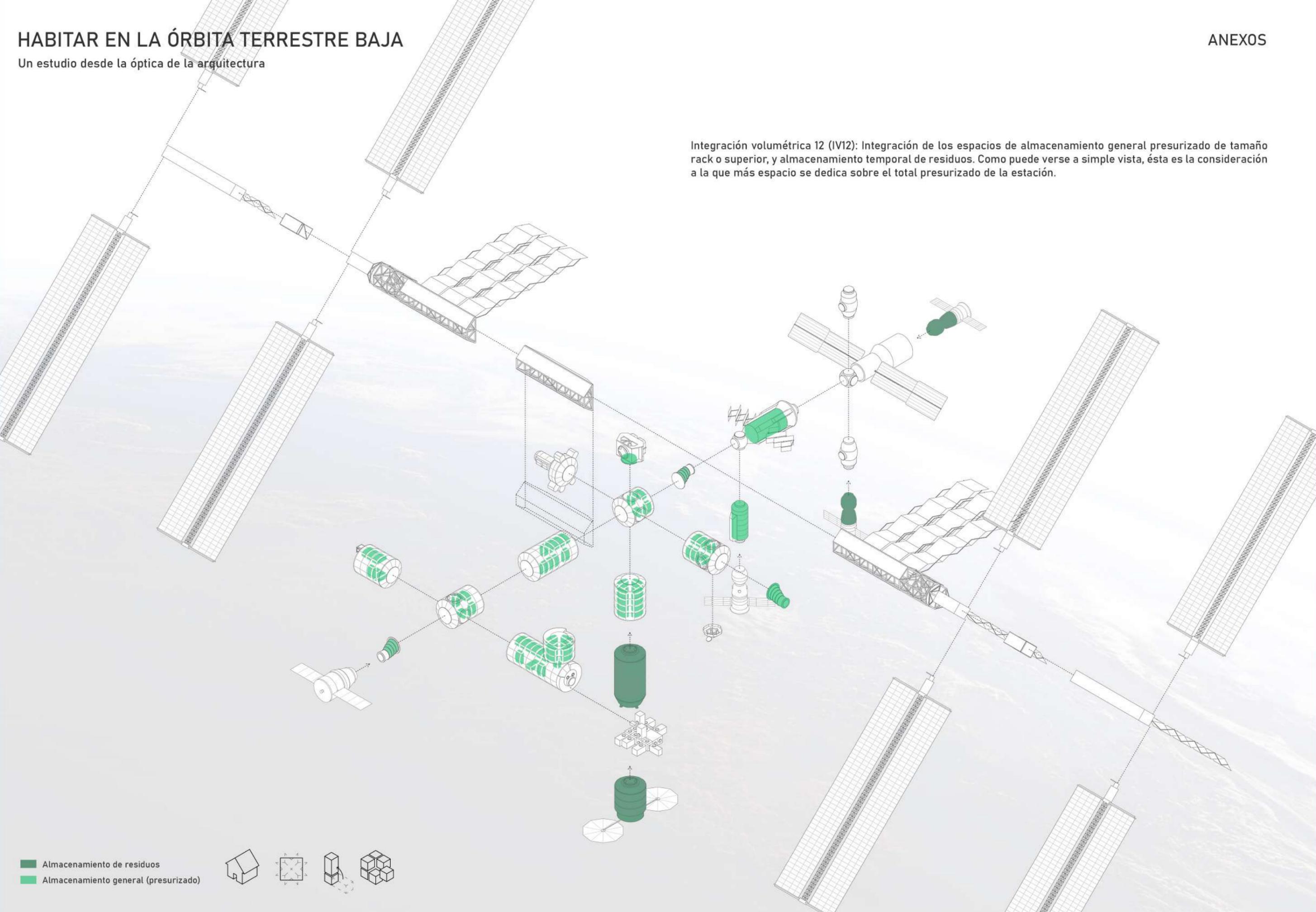
Integración volumétrica 11 (IV11): Integración de los espacios y elementos destinados, total o parcialmente, por diseño o iniciativa de la tripulación, al tiempo libre. La respuesta espacial es quizá un tanto escasa en relación al volumen disponible, pero razonablemente diversa y polivalente.



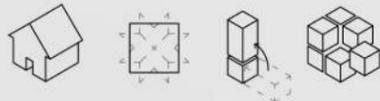
■ Espacios de trabajo



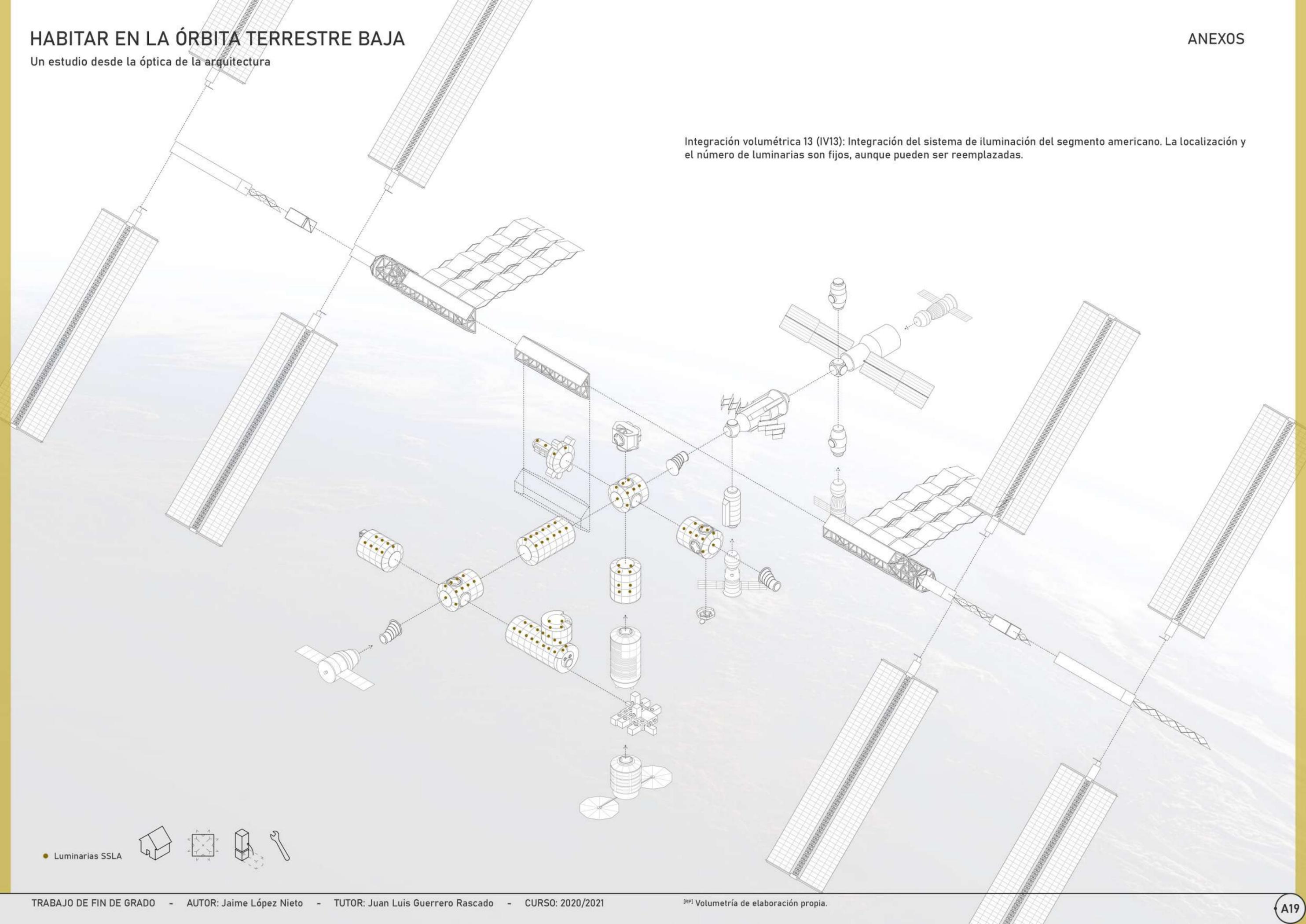
Integración volumétrica 12 (IV12): Integración de los espacios de almacenamiento general presurizado de tamaño rack o superior, y almacenamiento temporal de residuos. Como puede verse a simple vista, ésta es la consideración a la que más espacio se dedica sobre el total presurizado de la estación.



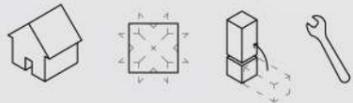
■ Almacenamiento de residuos  
■ Almacenamiento general (presurizado)



Integración volumétrica 13 (IV13): Integración del sistema de iluminación del segmento americano. La localización y el número de luminarias son fijos, aunque pueden ser reemplazadas.



● Luminarias SSLA



Integración volumétrica 14 (IV14): Integración de los espacios de observación y ventanas de la estación. La cúpula es la protagonista en cuanto a vistas, pero son también destacables las catorce ventanas, de las cuales nueve están situadas en Zvezda.

■ Espacios de observación  
● Ventanas

