



Artículo invitado

¿Es sostenible la Estrella de la Muerte?

Fermín Sánchez, Jordi Garcia, Eva Vidal, David López,
Jose Cabré, Helena García, Marc Alier y Carme Martín

Universitat Politècnica de Catalunya
Barcelona

fermin@ac.upc.edu, jordig@ac.upc.edu, eva.vidal@upc.edu, david@ac.upc.edu,
jose.cabre@upc.edu, helena.garcia@est.fib.upc.edu, ludo@essi.upc.edu, martin@essi.upc.edu

Resumen

El futuro será sostenible o no será. Por eso, es fundamental que todos los Trabajos de Fin de Grado (TFG) de las ingenierías incorporen un estudio de sostenibilidad que analice su impacto ambiental, social y económico. Este análisis es importante en todas las disciplinas de la ciencia, pero más si cabe en las relacionadas con las TIC, ya que pueden contribuir a mejorar significativamente la sostenibilidad en otros campos de la ciencia.

En este trabajo se propone una metodología para guiar al estudiante en la realización del análisis de sostenibilidad de su TFG. Consideramos que la existencia de una guía al respecto es fundamental debido a la poca formación en sostenibilidad que tienen los estudiantes. La guía no sólo proporciona ayuda a los estudiantes a la hora de realizar su proyecto, sino también a los profesores a la hora de evaluarlo.

La propuesta está basada en una matriz ponderada cuyas celdas contienen preguntas que el estudiante debe plantearse mientras realiza su proyecto. La matriz está inspirada en la matriz del bien común de Felber y en el método socrático, y es una evolución de anteriores trabajos de los autores.

Como ejemplo de aplicación de la propuesta se ha escogido la estación de combate denominada Estrella de la Muerte, popularizada por George Lucas en la saga Star Wars. Se defiende que la Estrella de la Muerte podría ser construida en los próximos 100 años a partir de la tecnología existente actualmente, y que su construcción no sólo podría hacerse de forma sostenible, sino que contribuiría a mejorar la sostenibilidad de nuestro planeta y permitiría revertir el cambio climático, alcanzar los objetivos del milenio y detener la sexta gran extinción.

Palabras clave: Evaluación TFG, sostenibilidad TFG, matriz TFG, sostenibilidad estrella de la muerte, construcción estrella de la muerte.

1. Motivación

La introducción de las competencias transversales en el Espacio Europeo de Educación Superior ha propiciado la inclusión en los planes de estudios de algunos conceptos que habían sido habitualmente olvidados o ignorados.

Una de las competencias incluidas en la mayoría de los planes de estudios es la Sostenibilidad y Compromiso Social (en adelante, SyCS) que, con diferentes nombres, encontramos en muchas titulaciones. Sin embargo, a pesar de que hay un amplio consenso en que la sostenibilidad es uno de los grandes problemas del siglo XXI y que el futuro será sosten-

nible o, simplemente, no será, esta competencia parece de las más complicadas de introducir en los planes de estudios debido a la poca o nula formación del profesorado en este tema, que algunos consideran más una opción personal que una competencia que deba introducirse en unos estudios de grado. Sin embargo, que nuestros egresados adquieran formación en SyCS no es sólo necesario, sino imprescindible.

La Escuela de Arquitectura de Vallés (EAV) de la Universidad Politècnica de Catalunya (UPC) elaboró un informe [9] que demuestra la importancia de la formación en sostenibilidad de sus egresados. Según el informe, la construcción del edificio de la escuela generó una contaminación equivalente a

150 Toneladas de CO₂ (TCO₂), mientras que los servicios del edificio (iluminación, calefacción, etc.) generan anualmente el equivalente a 370 TCO₂. Así que no importa cuán óptima —desde el punto de vista de la sostenibilidad— sea la construcción del edificio si este no ha sido diseñado para tener un consumo responsable. Por tanto, es más importante considerar la sostenibilidad de la vida útil del edificio que la de su construcción. Si extrapolamos esta información a un proyecto de ingeniería, vemos que considerar la sostenibilidad del proyecto durante toda su vida útil puede ser más importante que considerar la sostenibilidad de su diseño, construcción y puesta en marcha.

Por otra parte, la EAV se halla en las afueras de la ciudad y no está tan bien comunicada como si estuviera en el centro. Esto provoca desplazamientos de sus usuarios que representan, anualmente, un total de 750 TCO₂. Es decir, que una ubicación distinta o disponer de un sistema público de transporte más sostenible tendrían más impacto en la “sostenibilidad de la escuela” que hacer más sostenible la construcción del edificio o su uso cotidiano.

Sin embargo, el número más impactante del estudio se descubre cuando se evalúa el impacto ambiental que producirán los egresados de la escuela, que se calculó que diseñarían edificios que consumirán anualmente más de 2 250 000 TCO₂. Es decir, que una educación que integre la sostenibilidad tendría un impacto muchísimo más grande que el mejor diseño que se pudiera hacer de la escuela incluso cambiando su localización geográfica.

A raíz de este estudio está claro que para un ingeniero la sostenibilidad no es una opción personal, es una necesidad profesional. Por mucho que un ingeniero actúe de forma sostenible como individuo, separe basuras, recicle, se mueva en transportes poco contaminantes o colabore con una ONG, es en la aplicación de su actividad profesional como ingeniero como mayor impacto puede tener en la sociedad y en el medio ambiente. Por ello, la competencia SyCS debe incorporarse en los estudios de ingeniería, y en particular en las ingenierías informáticas y de telecomunicaciones ya que el consumo de las TIC supone entre un 2 % y un 3 % de las emisiones mundiales de CO₂, pero el uso de las TIC puede contribuir a reducir el 98 % del consumo de otras actividades industriales [15]. Por ello, es fundamental que los ingenieros del área sean conscientes del impacto que su trabajo puede tener a la hora de hacer el mundo más sostenible.

Varios trabajos presentan la implementación de la competencia SyCS en asignaturas o en el plan de estudios de diferentes ingenierías [4, 6, 8, 13, 17, 22, 23]. Sin embargo, es en el Trabajo de Final de Grado (TFG) donde introducir la sostenibilidad resulta más crucial. Como otros autores [19], pensamos que es en el TFG donde mejor se pueden practicar y demostrar que se han adquirido competencias como la SyCS. El TFG debe ser el lugar donde el estudiante integre los conocimientos adquiridos en la carrera en un proyecto que sea un ejemplo de metodología de trabajo.

Este artículo presenta el trabajo realizado por el grupo STEP de la FIB (sostenibilidad y compromiso social de la

Facultat d'Informàtica de Barcelona) durante los tres últimos años para definir una guía que permita considerar y evaluar la sostenibilidad de un TFG.

2. Trabajo previo

El grupo STEP investiga desde hace años cómo integrar la sostenibilidad en unos estudios de Ingeniería en el ámbito de las TIC. En el año 2009 se elaboró una propuesta general de desarrollo de esta competencia en los estudios de Ingeniería Informática [15, 20] para formar en sostenibilidad al profesorado; en concreto, en la creación de materiales y en métodos para evaluar la competencia. También se argumentó la ventaja de introducir SyCS en un amplio conjunto de asignaturas específicas de la titulación frente a la opción de crear unas pocas asignaturas dedicadas exclusivamente a trabajar la sostenibilidad.

Como una de las dificultades de introducir SyCS en los planes de estudios es el desconocimiento del área por parte del profesorado, se diseñó una base de conocimiento [3] que reuniese desde artículos científicos hasta experiencias que relacionasen la sostenibilidad con diferentes áreas de la ingeniería informática. De esta manera, se podía dar soporte y ayudar a complementar las asignaturas que trabajasen esta competencia. También se redactó un capítulo de un libro para orientar a los profesores TIC en cómo introducir la sostenibilidad en sus asignaturas [2].

Dada la dificultad que suponía para el estudiante integrar SyCS en su TFG y la falta de experiencia del profesorado, decidimos elaborar una guía que sirviese por un lado a los estudiantes para analizar la sostenibilidad de sus TFG y por otro lado a los profesores para evaluar este análisis. Con el objeto de no establecer un modelo único y rígido que el alumno siguiese de manera estricta, en lugar de plantearse el caso particular de su TFG, se propuso un modelo de evaluación basado en el método socrático [21] que orientase al estudiante a hacer una reflexión crítica y meditada de su trabajo.

A partir de este estudio decidimos ampliar la visión hasta los proyectos de ingeniería en general, para así influir en el impacto del trabajo de nuestros egresados cuando se enfrenten a proyectos en el mundo real [11]. Finalmente, después de cinco años de experiencia en la integración de SyCS en el Grado en Ingeniería Informática de la Facultat d'Informàtica de Barcelona, se hizo un análisis retrospectivo [12] incidiendo en los mecanismos de organización y coordinación entre las asignaturas implicadas en la competencia SyCS y extrayendo las lecciones aprendidas de su implantación. El presente artículo culmina el trabajo realizado durante los últimos 7 años para introducir la sostenibilidad en unos estudios de Ingeniería.

3. Trabajo de Fin de Grado contra Proyecto de Ingeniería

Los proyectos realizados por los ingenieros son la aplicación de los conocimientos que adquieren durante toda su formación y los hitos claves de su desarrollo profesional. La primera parte del ciclo de vida de un proyecto está constituida por el *Proyecto Puesto en Producción* (en adelante, PPP), que comprende la planificación, el desarrollo y la implantación, y termina cuando comienza la vida útil del proyecto. Un proyecto de ingeniería, sin embargo, puede acabar mucho antes, ya que está determinado por su alcance (pese a que el alcance de muchos proyectos es el PPP). Lo mismo sucede con un TFG, cuyo alcance puede no llegar a la implantación, especialmente porque su duración suele estar limitada a un semestre. En general, un TFG supondrá bastante menos trabajo que un proyecto de ingeniería, como muestra la figura 1. En cualquier caso, el máximo alcance de un proyecto o de un TFG llegaría hasta la implantación, por lo que el concepto de PPP es más amplio que el de proyecto de ingeniería o que el de TFG.

La cantidad de trabajo representada en la figura 1 pretende ilustrar que la carga de trabajo es diferente en las distintas fases del proyecto y que en general es menor en un TFG que en un proyecto de ingeniería. No obstante, el TFG es un trabajo académico y por lo tanto tiene asociado un trabajo “extra” que no estaría incluido en un proyecto real, como se muestra en la figura 2. Este trabajo extra correspondería al dedicado a la evaluación, que si bien existe en un proyecto de ingeniería, es distinta de la que se realiza a nivel académico. La figura 2 muestra un TFG cuyo alcance acaba antes de la implantación, y aún así contiene una parte de trabajo extra correspondiente a la evaluación que no estaría incluido en el PPP.

Durante todas las fases del proyecto, pero en especial durante su vida útil, existen factores que son difíciles de controlar: los riesgos y los imprevistos. Los riesgos son inherentes al proyecto y condicionan las posibilidades de éxito de éste según se hayan tenido en cuenta (o no) en la planificación. Son variables que no se pueden controlar pero se pueden identificar. Por ejemplo, la dependencia excesiva de una o varias personas en un proyecto es un riesgo que, si bien se puede aceptar en algunos proyectos, puede provocar su fracaso si estas personas se marchan o reducen su nivel de implicación en el proyecto. Los imprevistos, sin embargo, no se pueden anticipar en la mayoría de ocasiones, ya que pueden estar fuera del ciclo de vida esperado como se muestra en la figura 3. Existe un riesgo, por ejemplo, si se diseña una aplicación móvil de venta en línea y la competencia decide copiar nuestra idea con una iniciativa similar. En cambio, sería un imprevisto que una ley estatal prohibiera a partir de la semana que viene las ventas a través de Internet. Puede suceder, pero no podemos diseñar el proyecto teniendo en cuenta esa posibilidad. En cualquiera de las fases de un proyecto pueden existir riesgos, como muestra la figura 4.

Los riesgos en un proyecto deben ser considerados y evaluados en términos de sostenibilidad, pues representan dife-

rentes escenarios posibles que podrían afectar a su viabilidad. Los imprevistos quedan claramente fuera del alcance de un TFG y difícilmente podrían considerarse en un PPP.

Teniendo en cuenta estas consideraciones, el apartado 4 presenta una propuesta de guía y evaluación de la sostenibilidad de un TFG o de un proyecto de ingeniería, independientemente de cuál sea su alcance.

4. Propuesta de guía y evaluación

Siguiendo la filosofía de los trabajos previos descritos en el apartado 2, partimos de las siguientes premisas:

- La Matriz de Sostenibilidad será una matriz ponderada como la que presenta Felber en la economía del bien común [10].
- La matriz servirá tanto de guía para el estudiante/ingeniero como de herramienta para la evaluación de la sostenibilidad del proyecto.
- Las celdas de la matriz contendrán únicamente preguntas, siguiendo el método socrático [21].
- El estudiante/ingeniero debe usar la matriz como ayuda para razonar sobre la sostenibilidad de su proyecto mientras lo realiza y usar ese razonamiento al finalizarlo para evaluar su grado de sostenibilidad.
- El razonamiento debe exponerse en un capítulo específico de la memoria del proyecto, que sugerimos se denomine Informe de Sostenibilidad.
- La evaluación (nota) de la sostenibilidad del TFG se realizará a partir del Informe de Sostenibilidad. En ningún caso se usará como elemento de evaluación el grado de sostenibilidad de proyecto obtenido al evaluar la matriz. Dicho cálculo es un mero ejercicio realizado por el estudiante para razonar sobre la sostenibilidad de su TFG.

En el apartado 4.1 se justifica la propuesta de matriz realizada. El apartado 4.2 identifica en qué celdas de la matriz están las preguntas que el estudiante/ingeniero debe plantearse en cada momento del proyecto. El apartado 4.3 describe brevemente cómo debe ser el Informe de Sostenibilidad.

4.1. Matriz de Sostenibilidad

Cuando empezamos a realizar este trabajo pensábamos que un estudiante/ingeniero debía abordar de forma holística la sostenibilidad de su proyecto y por eso consideramos que no era adecuado tener las tres dimensiones de la sostenibilidad (ambiental, económica y social) en uno de los ejes de la matriz. Sin embargo, la experiencia nos ha demostrado que los estudiantes de grado (y los actuales ingenieros) no están suficientemente formados al final de sus estudios para ser

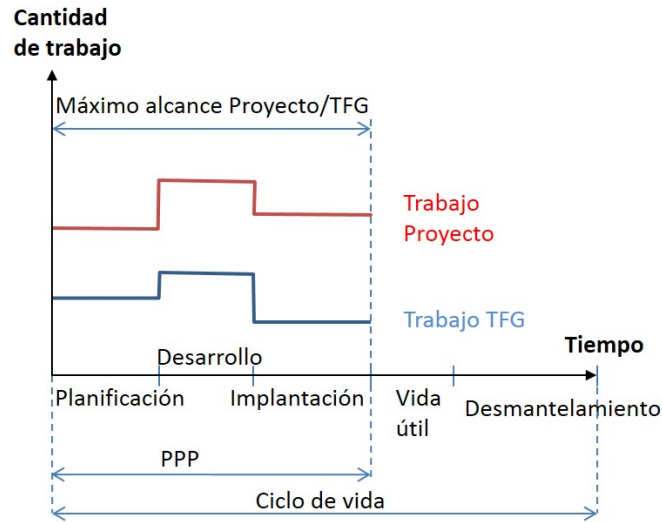


Figura 1: Ciclo de vida, PPP y fases de un proyecto en función de la cantidad de trabajo en Proyecto y TFG.

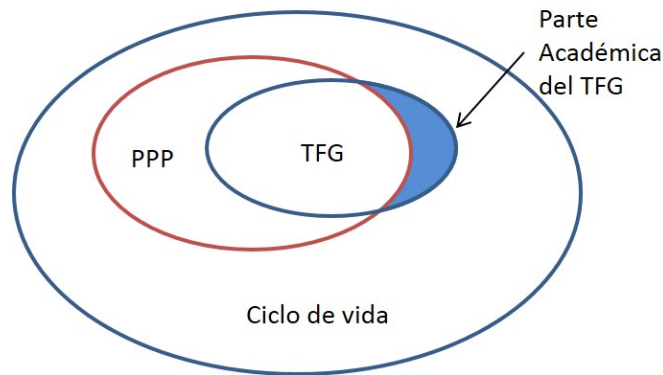


Figura 2: Trabajo extra de un TFG que no está incluido en un proyecto de ingeniería (o en un PPP).

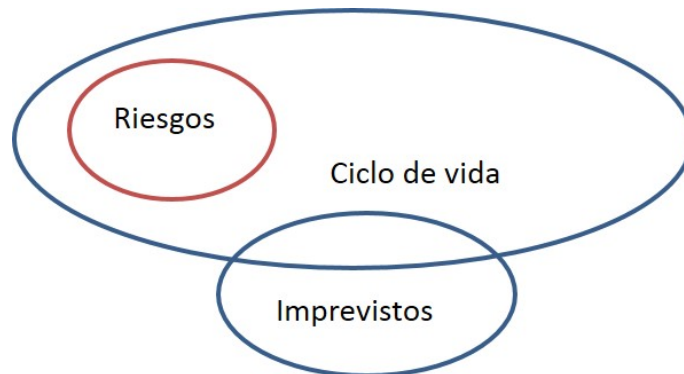


Figura 3: Riesgos vs imprevistos en un proyecto.

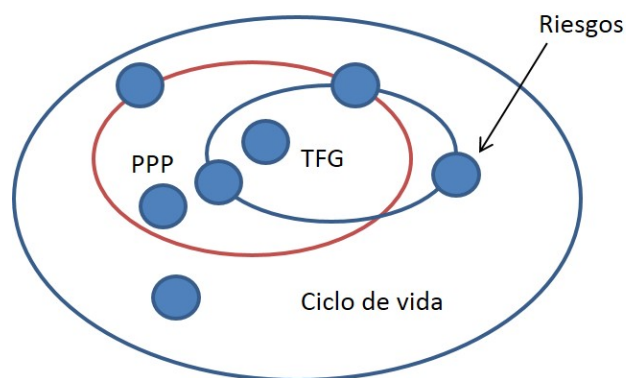


Figura 4: Riesgos en las fases de un proyecto o un TFG.

capaces de abordar un planteamiento holístico. Los estudiantes han trabajado las tres dimensiones de la sostenibilidad por separado, y les resulta más natural analizarla de ese modo y no de una forma holística. Ese hecho nos ha llevado a reconsiderar nuestro planteamiento inicial y a plantear que uno de los ejes de la matriz esté formado por las tres dimensiones de la sostenibilidad. Cuando el estudiante haya madurado y haya hecho varios proyectos adquirirá, probablemente, la visión holística que deseamos, pero no la tiene en el momento de enfrentarse al TFG.

Con respecto al otro eje, en un trabajo anterior [16] proponíamos usar la clasificación planificación-resultados-riesgos. La propuesta estaba fundamentada en que la mayoría de decisiones importantes de un proyecto se toman en la etapa de planificación, y es por tanto en ella donde el estudiante debe hacerse todas (o casi todas) las preguntas. Los resultados nos permitían valorar si los objetivos del proyecto se habían conseguido. Sin embargo, esta propuesta nos llevaba a “olvidar” la valoración de la vida útil del proyecto, que como hemos visto en el apartado 1 tiene más influencia en la sostenibilidad del proyecto que su construcción, y el efecto producido por su desmantelamiento, ya que los resultados se ceñían a los observados al finalizar el alcance del proyecto, que podía tener lugar antes de su implantación. Los riesgos, por otra parte, nos siguen pareciendo importantes de cara a considerar posibles cambios en los escenarios en los que el proyecto se desenvolverá.

Hemos decidido, por lo tanto, mantener los riesgos y sustituir la pareja planificación-resultados por PPP-vida útil. En esta propuesta, el PPP abarca las fases de planificación, desarrollo e implantación del proyecto (mostradas en la figura 1), independientemente de cuál sea su alcance, y la vida útil acaba cuando comienza su desmantelamiento. Por lo tanto, un proyecto (o TFG) quedaría enmarcado en la primera fila de la matriz, pero podría llegar a no cubrirla de forma completa, ya que su alcance puede acabar mucho antes de la implantación, como se muestra en la figura 5. En el caso del TFG, el alcance está claramente limitado a lo que el estudiante pueda hacer en un curso académico y en muchos casos no se llegará a su

implantación.

Como alternativa, valoramos también la posibilidad de que la primera fila abarcara exclusivamente el alcance del proyecto en lugar del PPP. Esta posibilidad presentaba un problema de cara a establecer las preguntas de cada celda: que en función del alcance algunas preguntas deberían ir en la primera fila o en la segunda (y no estaba claro cuál sería la segunda). Por ejemplo, un proyecto que acabe en su fase de desarrollo (algo típico en los TFG) o que forme parte de un proyecto más grande, y que por lo tanto no llegue a implantarse, no podría tener en la primera fila las preguntas relativas a la implantación. Sin embargo, un proyecto cuyo alcance incluyese la implantación sí que las tendría. Para no complicar el planteamiento, decidimos acotar la primera fila a una etapa determinada del proyecto, la implantación, y no a su alcance (que depende de cada proyecto).

La aproximación escogida nos permite definir además el concepto que representa cada celda de la matriz. Por ejemplo, en el caso de analizar el PPP, la columna «Ambiental» corresponde al consumo realizado durante el diseño, la realización y la puesta en marcha del proyecto; la columna «Económico» supone el coste total del proyecto (factura) y la columna «Social» es el impacto que ha tenido la realización del proyecto en el equipo que lo ha llevado a cabo. Al considerar la vida útil del proyecto, la columna «Ambiental» se corresponde con la huella ecológica del proyecto, la columna «Económico» representa el plan de viabilidad y la columna «Social» identifica el impacto que el proyecto tendrá en la sociedad. Finalmente, en la fila «Riesgos» se detallan los riesgos que presenta el proyecto en cada una de las tres dimensiones de la sostenibilidad. La figura 6 muestra estos conceptos, junto con la ponderación que hemos decidido para cada celda de la matriz.

La primera decisión ha sido que las dos primeras filas (PPP y vida útil) tendrán valores positivos, mientras que los riesgos tendrán valores negativos. En cuanto a la escala, para facilitar la evaluación de cada celda hemos decidido usar una escala de 10 puntos que resulta fácil de valorar para prácticamente todo el mundo porque es una escala a la que estamos acostumbrados. No obstante, como ya se ha explicado en el

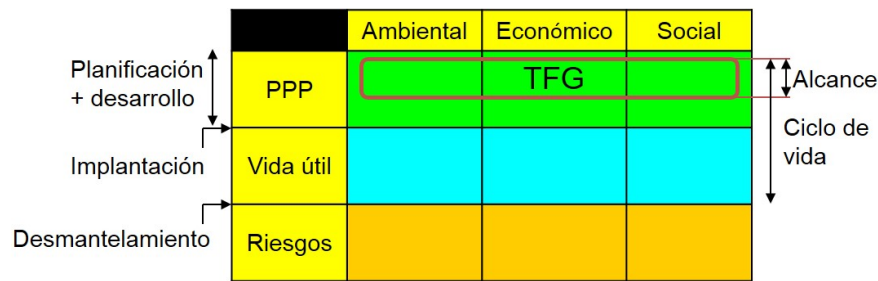


Figura 5: Alcance de un TFG en la Matriz de Sostenibilidad.

	Ambiental	Económico	Social
PPP	Consumo del diseño	Factura	Impacto Personal
	0 : 10	0 : 10	0 : 10
Vida útil	Huella ecológica	Plan de viabilidad	Impacto social
	0 : 20	0 : 20	0 : 20
Riesgos	Riesgos ambientales	Riesgos económicos	Riesgos sociales
	-20 : 0	-20 : 0	-20 : 0
Sostenibilidad	-20 : 30	-20 : 30	-20 : 30

Figura 6: Rango de valores e identificación de cada celda de la Matriz de Sostenibilidad.

apartado 1, la vida útil tendrá mucho más impacto en la sostenibilidad del proyecto que su diseño e implantación. Por otra parte, otras métricas para evaluar a partir de una matriz, como por ejemplo la matriz del bien común de Felber [10], dan más peso a los aspectos negativos que a los positivos para que las organizaciones traten de eliminar o reducir los aspectos negativos en lugar de tratar de mejorar lo que no hacen tan mal. Por ello, hemos decidido que para valorar el grado de sostenibilidad de un proyecto realizaremos una suma ponderada de sus celdas, dando a la primera fila la mitad de la ponderación de las otras dos. Con esta aproximación, el resultado global de evaluar la matriz se calcularía mediante la Fórmula 1:

$$\text{Sostenibilidad del proyecto} = \text{PPP} + 2 \times \text{vida útil} - 2 \times \text{riesgos} \quad (1)$$

Como se muestra en la figura 6, el rango de evaluar globalmente la matriz está entre -20 y 30 para cada columna, y por lo tanto entre -60 y 90 en su conjunto. Como puede observarse, no es un rango simétrico. Usar esta ponderación permitiría, por ejemplo, comparar todos los TFG de una determinada escuela. Sin embargo, es posible que en algunos proyectos de ingeniería la vida útil o los riesgos deban tener una ponderación distinta a la aquí propuesta, por lo que la variación de estos coeficientes permitiría adaptar la matriz a diferentes tipos de proyectos. Por ejemplo, los proyectos de Arquitectura podrían tener unos coeficientes distintos de los proyectos TIC,

pero una vez definidos los coeficientes, los proyectos de un determinado tipo serían comparables entre sí. Lo mismo puede pasar en proyectos de ingeniería de diferentes ámbitos.

Finalmente, un último aspecto que es interesante reflejar es que las valoraciones realizadas durante el alcance del proyecto son “medibles”, mientras que las que se prevén para después de su alcance sólo se pueden estimar (los riesgos, obviamente, son imprevisibles a menos que se conozca la probabilidad de que se produzcan). Este hecho hace que la fila correspondiente al PPP contenga valoraciones tanto medibles (las que están dentro del alcance) como estimadas (las que están fuera), mientras que en el caso de la vida útil las valoraciones son siempre estimadas, tal como se muestra en la figura 7. En el caso de que hubiésemos escogido el alcance como frontera entre la primera fila y la segunda, la otra aproximación que habíamos considerado, la primera fila sería completamente medible siempre. Pese a que en este caso resultaba más elegante escoger esta opción, al considerar globalmente todos los aspectos creemos más clara la propuesta presentada en este trabajo.

4.2. Evaluación en 3 hitos del TFG

En la FIB la evaluación del TFG se realiza en 3 hitos, siguiendo el modelo propuesto en la Guía para la evaluación de competencias en los trabajos de Fin de Grado y Máster de las Ingenierías [1]: el Hito Inicial, el Hito de Seguimiento y

	Ambiental	Económico	Social
PPP		Medible	
Vida útil		Estimable	
Riesgos		Imprevisible	

Figura 7: Aspectos medibles vs estimables del TFG.

	Ambiental	Económico	Social
PPP	I ¿Has estimado el impacto ambiental que tendrá la realización del proyecto? ¿Te has planteado minimizar el impacto, por ejemplo, reutilizando recursos?	¿Has estimado el coste de la realización del proyecto (recursos humanos y materiales)?	¿Qué crees que te va a aportar a nivel personal la realización de este proyecto?
	F ¿Has cuantificado el impacto ambiental de la realización del proyecto? ¿Qué medidas has tomado para reducir el impacto? ¿Has cuantificado esta reducción?	¿Has cuantificado el coste (recursos humanos y materiales) de la realización del proyecto? ¿Qué decisiones has tomado para reducir el coste? ¿Has cuantificado este ahorro?	¿La realización de este proyecto ha implicado reflexiones significativas a nivel personal, profesional o ético de las personas que han intervenido?
	P Si hicieras de nuevo el proyecto, ¿podrías realizarlo con menos recursos?	¿Se ha ajustado el coste previsto al coste final? ¿Has justificado las diferencias (lecciones aprendidas)?	
	P ¿Cuál es la procedencia de las materias primas y/o materiales usados? ¿Su origen, desarrollo y/o fabricación es ético (condiciones de trabajo, riesgos laborales, etc)? ¿Y lo es su empresa extractiva, fabricante o distribuidora?	¿La inversión inicial del proyecto permitirá que sea competitivo?	¿Cuál es la situación social y política del país/lugar/ciudad/... donde se implantará el proyecto? ¿Y la del sector en el que se incluye el proyecto?
	P ¿Se ha tenido en cuenta la desmantelación una vez acabe la vida útil del proyecto? Si es un producto, ¿se han tenido en cuenta en su diseño criterios para facilitar su posterior reciclaje?		
Vida útil	I ¿Cómo se resuelve actualmente el problema que quieres abordar (estado del arte)? ¿En qué mejorará ambientalmente tu solución a las existentes?	¿Cómo se resuelve actualmente el problema que quieres abordar (estado del arte)? ¿En qué mejorará económicamente tu solución a las existentes?	¿Cómo se resuelve actualmente el problema que quieres abordar (estado del arte)? ¿En qué mejorará socialmente (calidad de vida) tu solución a las existentes?
	F ¿Qué recursos estimas que se usarán durante la vida útil del proyecto? ¿Cuál será el impacto ambiental de estos recursos?	¿Qué coste estimas que tendrá el proyecto durante su vida útil? ¿Se podría reducir este coste para hacerlo más viable?	¿Quién se beneficiará del uso del proyecto? ¿Hay algún colectivo que puede verse perjudicado por el proyecto? ¿En qué medida?
	F ¿El proyecto permitirá reducir el uso de otros recursos? ¿Globalmente, el uso del proyecto mejorará o empeorará la huella ecológica?	¿Se ha tenido en cuenta el coste de los ajustes/actualizaciones/repares durante la vida útil del proyecto?	¿En qué medida soluciona el proyecto el problema planteado inicialmente?
	P ¿Se ha previsto alguna forma de medir el impacto ambiental del proyecto? ¿Se realizará seguimiento de este impacto ambiental?	¿Se ha previsto alguna forma de medir el impacto económico del proyecto? ¿Se realizará seguimiento de este impacto?	¿Se ha previsto alguna forma de medir el impacto social del proyecto? ¿Se realizará seguimiento de este impacto?
	P Cuando finalice la vida útil del proyecto, ¿qué residuos se generarán? ¿Se puede reducir el impacto ambiental de la desmantelación?	¿Has realizado un estudio de viabilidad del proyecto?	¿Cómo afectará el desmantelamiento del proyecto a los colectivos relacionados con él?
Riesgos	F ¿Se podría hacer el proyecto de forma que el impacto ambiental fuese menor?	¿El desmantelamiento del proyecto puede provocar costes adicionales?	¿Se podría realizar el proyecto con una menor afectación social?
	F ¿Podrían producirse escenarios que hiciesen aumentar la huella ecológica del proyecto?	¿Podrían producirse escenarios que perjudicasen la viabilidad del proyecto?	¿Podrían producirse escenarios que hiciesen que el proyecto fuese perjudicial para algún segmento particular de la población?
	F ¿Se podría prevenir o mitigar el impacto de posibles escenarios que pudieran aumentar la huella ecológica del proyecto?	¿Se podría prevenir o mitigar el impacto de posibles escenarios que pudieran perjudicar la viabilidad del proyecto?	¿Podría crear el proyecto algún tipo de dependencia que dejase a los usuarios en posición de debilidad?
	P ¿Se podría prevenir o mitigar el impacto de posibles escenarios que pudieran aumentar la huella ecológica del proyecto?	¿Se podría prevenir o mitigar el impacto de posibles escenarios que pudieran perjudicar la viabilidad del proyecto?	¿Se podría prevenir o mitigar el impacto de posibles escenarios que pudieran perjudicar algún colectivo social directa o indirectamente relacionados con el proyecto?

Figura 8: Preguntas de la Matriz de Sostenibilidad de un proyecto de ingeniería TIC.

el Hito Final. El indicador correspondiente a sostenibilidad se evalúa en los Hitos Inicial y Final. Por lo tanto, es preciso determinar cuáles de las preguntas de cada celda deberá el estudiante plantearse en cada hito.

La selección de preguntas para los hitos Inicial y Final se ha hecho *ad hoc* a partir de la lista de preguntas contenidas en cada celda de la matriz. En una misma celda puede haber preguntas que vayan al Hito Inicial o al Hito Final (sombreados en verde y azul respectivamente en la figura 8). Hay preguntas, sin embargo, que consideramos deberían plantearse en un proyecto de ingeniería pero no son procedentes en un TFG. Estas preguntas se han identificado en la celda correspondiente de la matriz, pero no se han asignado a ningún hito de evaluación del TFG (sombreadas en naranja en la figura 8).

Para seleccionar las preguntas que el estudiante debe plantearse en cada celda hemos partido también de nuestro trabajo anterior. Mapeando las preguntas que ya teníamos (y algunas nuevas después de un intenso proceso de reflexión) sobre la nueva matriz y aplicando el resultado a algunos TFG de nuestro centro hemos afinado el resultado. Hemos procurado que el número de preguntas de cada celda sea reducido. Para evaluar cada celda proponemos que inicialmente todas las preguntas tengan el mismo peso, pero dejamos a criterio del estudiante/ingeniero asignar pesos diferentes si lo justifica adecuadamente. La figura 8 presenta la Matriz de Sostenibilidad de un proyecto de ingeniería TIC con la lista de preguntas propuestas. Las filas identificadas con «I» corresponden a preguntas del Hito Inicial (fondo verde), las marcadas con «F» al Hito Final (fondo azul) y las señaladas con «P» a preguntas que deberían tenerse en cuenta en un proyecto de ingeniería, pero no en un TFG (fondo naranja). Una titulación/área no TIC podría usar la matriz de la figura 8 como punto de partida para evaluar sus proyectos, pero sería necesario que adaptase alguna de las preguntas o incluso incluyese alguna nueva y definiese la ponderación de cada celda.

4.3. Informe de autoevaluación

Nuestra propuesta es que el estudiante/ingeniero redacte un Informe de Sostenibilidad de su proyecto, que preferiblemente debería constituir un capítulo específico de la memoria. El informe tiene formato libre, ya que todos los proyectos son diferentes y pautarlo limitaría el estudio. No obstante, en el informe se deben contestar de forma razonada las preguntas planteadas en la Matriz de Sostenibilidad, asignando una puntuación a cada celda y calculando la puntuación final, que será el grado de sostenibilidad del proyecto.

En el caso particular del TFG, el Informe de sostenibilidad debe finalizar con una sección de conclusiones, de unas 500 palabras de longitud, donde el estudiante realice una autoevaluación de su proyecto y exprese las conclusiones a las que ha llegado a partir de la evaluación de la matriz. Este autoinforme

es lo que probablemente tendrá más impacto en su futura vida profesional, como se explica en la apartado 1 de este trabajo.

La evaluación de la sostenibilidad del TFG debe hacerse a partir del análisis realizado en el Informe de Sostenibilidad, y no tiene por qué tener correlación con la puntuación obtenida en la matriz.

Para ilustrar la aplicación de la Matriz de Sostenibilidad a un proyecto de ingeniería hemos escogido como proyecto La Estrella de la Muerte, la famosa estación de combate popularizada en la saga Star Wars por George Lucas. Hemos seleccionado este proyecto por varias razones. En primer lugar, se trata de un proyecto enormemente ambicioso, probablemente el más ambicioso que jamás haya emprendido la humanidad (en el supuesto de que se pusiera en marcha, claro). En segundo lugar, se trata de un proyecto transversal, conocido por una gran parte de los estudiantes/ingenieros y que por lo tanto no es necesario explicar previamente. En tercer lugar, es un proyecto multidisciplinar con grandes efectos sobre la sociedad y el medio ambiente. Difícilmente otro proyecto podría tener en un futuro próximo un impacto tan grande en la humanidad y en el propio planeta Tierra. Finalmente, se trata de un proyecto suficientemente atractivo como para que los estudiantes de ingeniería (y algunos de sus profesores) se tomen el tiempo de leer este artículo, lo que constituye el primer paso para que puedan aplicar la Matriz de Sostenibilidad a sus proyectos.

5. ¿Es sostenible la Estrella de la Muerte?

Como puede entenderse fácilmente, no es posible realizar una estimación precisa ni del coste económico ni del impacto ambiental o social de la construcción de la Estrella de la Muerte (en adelante, EM), por lo que nos centraremos en el impacto general que tendría su construcción y valoraremos las consecuencias de su hipotético diseño y posterior construcción.

5.1. ¿Es posible?

En noviembre del año 2012, 34 435 ciudadanos americanos solicitaron al gobierno de EEUU que en 2016 comenzase la construcción de la EM¹ con el objetivo de generar puestos de trabajo en la construcción y en la ingeniería de la exploración del espacio, además de reforzar la defensa nacional. La respuesta del gobierno fue que el coste de la estación de combate, estimado en 850×10^{15} dólares, lo hacía inviable, además de indicar que la administración Obama no apoyaba la construcción de armas capaces de destruir planetas, especialmente si estaban diseñadas de tal modo que un solo hombre con un pequeño caza de combate era capaz de destruirla.²

Pero los ciudadanos no se rindieron, y tras el rechazo de la petición, decidieron recaudar fondos a través de una pla-

¹<https://petitions.whitehouse.gov/petition/secure-resources-and-funding-and-begin-construction-death-star-2016>.

²<https://petitions.whitehouse.gov/response/isnt-petition-response-youre-looking>

³<https://www.kickstarter.com/projects/461687407/kickstarter-open-source-death-star?ref=live>

taforma de *crowdfunding* para financiar con capital privado la construcción de la EM.³ Para reducir el coste apostaban por usar plataformas de software abierto como LiNuX o Android. Se marcaron como objetivo inicial para poner en marcha el proyecto conseguir 23,2 millones de euros.⁴ Aquellos que daban 1 € recibían el agradecimiento de los promotores y conseguían su propia satisfacción al saber que estaban colaborando para tener un planeta más seguro. Los que donaban al menos 10 € verían además su nombre impreso en uno de los androides de mantenimiento MSE-6 de la EM. El proyecto consiguió en la plataforma de *crowdfunding* poco más de 380 000 € y fue cerrado el 1 de abril de 2013 por no recaudar el mínimo necesario preestablecido para su puesta en marcha.

En realidad, el coste de la EM indicado por el gobierno de EEUU estaba mal estimado. De hecho, probablemente ni siquiera hicieron ningún cálculo. Se limitaron a usar la información que encontraron en una página web⁵ publicada por un grupo de estudiantes de economía de la Universidad de Lehigh, Pennsylvania. Estos estudiantes supusieron que la EM sería construida con acero, y calcularon la cantidad de acero que se necesitaría para construir una estación espacial como la EM de 140 km de diámetro⁶ en el supuesto de que la densidad fuese similar a la de un moderno portaviones. Determinaron que se necesitarían 1,08 billones de toneladas de acero, que con el coste del material en 2012 suponía un precio de 852×10^{15} dólares, equivalentes a unas 13 000 veces el producto interno bruto mundial. Además, calcularon también que con los niveles de producción de 2012 se tardarían 833 315 años en extraer todo ese acero y que obtener semejante cantidad sólo sería posible si se sacase del núcleo de la Tierra, donde hay acero suficiente para construir al menos 2000 EM de esta densidad. Esto parece un poco peligroso porque podría desestabilizar la rotación del planeta.⁷

Como puede observarse, el cálculo no tiene en cuenta otros elementos imprescindibles para construir la EM, como por ejemplo otros materiales, la mano de obra, las fuentes de energía, los sistemas de navegación y control, los sistemas de soporte vital, el armamento o el transporte al espacio todos los materiales y humanos implicados en el proyecto. Para que nos hagamos una idea, la NASA cobra aproximadamente 95 millones de dólares por poner una tonelada de material en el espacio, aunque este coste se ha reducido enormemente en los últimos años gracias a los cohetes reutilizables de la empresa SpaceX.⁸ Poner 1 billón de toneladas de acero en el espacio costaría, a precio de la NASA, 13×10^{15} dólares. Por otra parte, habría que rellenar la EM con aire respirable a una presión

de una atmósfera. Eso supone algo más de 8×10^{12} metros cúbicos de nitrógeno y $1,5 \times 10^{12}$ metros cúbicos de oxígeno.⁹ Más o menos, el 0,005 % del nitrógeno y el 0,002 % del oxígeno disponible en la atmósfera de la Tierra. Si se comprime el gas, sólo sería necesario transportar 21×10^9 metros cúbicos de nitrógeno y casi 2×10^9 metros cúbicos de oxígeno. Si incluimos los costes de transporte de los contenedores obtenemos un coste adicional, sólo del transporte del acero y el aire, de más de 13×10^{15} dólares.¹⁰ Y no estamos contabilizando el probablemente más alto de los costes: el armamento. Un moderno caza de combate como el Eurofighter Typhoon cuesta algo menos de 9×10^7 €. La EM debería contar con miles de estos cazas (que además deberían ser capaces de desplazarse en el vacío interestelar) y cientos de cruceros de combate cuyo precio no nos atrevemos a estimar en este artículo.

El «diseñador de páginas web, pensador estafalario y especialista de Apple» Ryszard Gold, estima que construir la EM costaría más de 15×10^{24} dólares, aunque usando materiales alternativos como aluminio, titanio o grafeno en lugar de acero, y disponiendo de una planta de fabricación en la luna para reducir gastos de transporte, entre otras alternativas, podría reducirse el coste a la mitad.¹¹

Teniendo en cuenta que el valor de la economía mundial ronda actualmente los 14×10^9 dólares, la EM costaría $1,11 \times 10^{15}$ veces la cantidad de dinero disponible en el mundo, y se necesitaría el espacio equivalente a 10,3 EM para almacenarlo.¹² Ante estos desoladores datos, parece que la construcción de la EM no es viable económicamente (y por lo tanto, no es sostenible). Sin embargo, vamos a tratar de demostrar que sí que lo es, y a evaluar la sostenibilidad del proyecto.

5.2. Es posible. Es necesario.

En la década de los 60 del siglo XX nadie sabía en la NASA cómo llevar un ser humano de ida y vuelta a la Luna. Muchos decían que no se podía conseguir a corto plazo. El proyecto Apolo fue desarrollado por un equipo humano con una media de edad inferior a los 30 años que no sabía que no se podía conseguir. La inversión e ilusión de todo EEUU volcada en el programa espacial consiguió hacer, en menos de 10 años, lo que nadie sabía cómo hacer. Esa inversión revirtió en las siguientes décadas de forma multiplicada en forma de un enorme impacto económico, conocimiento científico y desarrollo de nuevas tecnologías que hoy disfrutamos. De hecho, ese comportamiento sigue produciéndose actualmente: se es-

⁴<http://www.20minutos.es/noticia/1724990/0/estrella-de-la-muerte/crowdfunding/kickstarter>

⁵<http://www.centives.net/S/2012/how-much-would-it-cost-to-build-the-death-star>

⁶El diámetro estimado de la EM del episodio IV de Star Wars oscila entre 140 y 160 km, por lo que la estimación de los estudiantes es una cota inferior.

⁷Lo cierto es que algunos de estos cálculos son erróneos. La densidad de la EM sería probablemente más parecida a la de la Estación Espacial Internacional que a la de un portaviones, lo que arrojaría una cifra 2 órdenes de magnitud menor (850×10^{13} dólares) y un tiempo de producción de “sólo” 8300 años. Además, el riesgo de desestabilizar la rotación de la tierra sería también menor.

⁸<http://www.spacex.com>

⁹El aire está compuesto de un 78 % de nitrógeno, un 21 % de oxígeno y apenas un 1 % de otras sustancias que podrían eliminarse en la atmósfera de la EM.

¹⁰<http://www.taringa.net/posts/info/2491160/Cuanto-costaria-construir-la-Estrella-de-la-Muerte.html>

¹¹<http://www.taringa.net/posts/info/2491160/Cuanto-costaria-construir-la-Estrella-de-la-Muerte.html>

¹²<http://www.taringa.net/posts/info/2491160/Cuanto-costaria-construir-la-Estrella-de-la-Muerte.html>

tima que cada euro invertido en la actividad espacial reporta a la economía de un país entre 4 y 20 veces su valor.¹³

El pensamiento científico avanza exponencialmente cuando se dedican recursos suficientes. Cuando se aplican tecnologías que se rigen por patrones de crecimiento exponencial, misiones imposibles se convierten en asumibles. Construir un artefacto como la EM es un proyecto imposible si se usa un pensamiento lineal: es preciso utilizar el pensamiento exponencial. A principios de los años 90 del siglo pasado se estimaba que el genoma humano sería secuenciado totalmente para el año 2050. Esta estimación estaba basada en una visión lineal del progreso de principios de los 90. En 1998, sin embargo, ya se había conseguido secuenciar completamente el genoma. Hoy (2015) se prevé que en menos de 5 años se pueda analizar el genoma de un individuo en pocos minutos con un coste asumible.

El estudio (superficial) de coste que hemos presentado al principio del apartado 5.1 está basado en un pensamiento lineal y, por lo tanto, equivocado. Pensamos que si la humanidad se lo propone y se coordina, es posible construir una estación espacial como la EM en los próximos 100 años a partir de la tecnología actual y de sus previsibles avances.

Para empezar, existe una cosecha de billonarios (en billones anglosajones, 10^9) salidos de Silicon Valley, la mayoría con edades entre treinta y cuarenta y pocos años, que se ha propuesto revivir la carrera espacial.

Elon Musk, cofundador de Paypal, ha creado SpaceX,¹⁴ una empresa que ha reducido el coste de poner un kilo de material en órbita de casi 100 000 dólares a 1400 dólares en menos de 10 años. Ha reducido el coste al 1,4 % usando cohetes reutilizables, a diferencia de los cohetes desechables de la NASA de un único uso (una vez más, la sostenibilidad se demuestra clave en la viabilidad de un proyecto). De hecho, la NASA contrata actualmente los cohetes de SpaceX para llevar material a la Estación Espacial Internacional. Con costes de órdenes de 10^{15} o 10^{24} , una reducción de dos órdenes de magnitud puede representar poco, pero el cambio es significativo a pequeña escala. A 1400 dólares el kilo, enviar aparatos experimentales al espacio ya no está exclusivamente en manos de la NASA o de agencias similares. Estos costes están al alcance de *startups* como las que han creado 1 000 000 de *apps* para *smartphones* en menos de 5 años.

Planetary Resources,¹⁵ fundada por Peter H. Diamandis en 2010, cuenta con inversores como Larry Page, Erich Smith, Richard Branson o Ross Perot entre otros, y tiene como objetivo establecer minas en asteroides para explotar sus recursos. Se han identificado asteroides (C-type) con una composición del 20 % de agua que pueden aportar hidrógeno (combustible para cohetes) y oxígeno (elemento crucial para la vida tal y como la conocemos) en el espacio. Otros asteroides (X-type) contienen metales pesados escasos en la tierra como el niobio y el tantalio, que en la Tierra se extraen del coltán y generan en

la República Democrática del Congo uno de los peores desastres sociales de nuestro planeta. Uno de los asteroides objetivo de Planetary Resources, por poner un ejemplo, contiene más platino del que jamás se ha obtenido en la Tierra.

La estrategia de Planetary Resources para obtener estos recursos es combinar dos tecnologías exponenciales: la robótica y la impresión 3D. Su idea es utilizar naves robotizadas equipadas con impresoras 3D que, una vez lleguen a un asteroide, dispongan de la capacidad de imprimir y ensamblar duplicados de sí mismas: tecnologías exponenciales combinadas en una aproximación exponencial. Además, Planetary Resources tiene un plan de negocio viable por sí mismo solamente con la comercialización de las tecnologías que está creando en la Tierra. La abundancia de recursos que presumiblemente provocará el desarrollo de la tecnología de Planetary Resources va a cambiar muy pronto las cosas en nuestro planeta. Operaciones mineras nada éticas y desequilibrios políticos causados por la escasez de ciertos recursos (platino, uranio, coltán, etc.) pueden tener sus días contados.

En menos de diez años, Planetary Resources o alguna de las empresas que compiten en la carrera de explotar los recursos de los asteroides conseguirán establecer una flota robotizada de minadores de asteroides. Una vez esto suceda, todo se va a acelerar —igual que sucedió con Internet en el año 1995—, y construir algo como la EM sólo va a depender de nuestra voluntad e imaginación. Es cuestión de tiempo, de poco tiempo.

Pero no sólo las empresas privadas están apostando por el futuro interplanetario. La NASA tiene previsto llevar un humano a Marte en los próximos 20 años, y para ello ha definido 15 áreas de nuevas tecnologías en las que se debe invertir¹⁶:

- sistemas de propulsión en el lanzamiento;
- tecnologías de propulsión en el espacio;
- producción y almacenamiento espaciales de energía;
- robótica y sistemas autónomos;
- sistemas de comunicaciones y navegación, así como de seguimiento de basura espacial;
- salud y sistemas de soporte de la vida humana y habitacionales en el espacio;
- sistemas de exploración humana en los destinos;
- instrumentos científicos, observatorios y sensores;
- sistemas de entrada, descenso y aterrizaje;
- nanotecnología;
- tecnologías de la información, modelización, simulación y proceso de datos;
- materiales, estructuras, sistemas mecánicos y fabricación;
- sistemas de lanzamiento y de seguimiento en Tierra;
- sistemas térmicos y
- aeronáutica.

Como puede comprobarse, estas áreas están perfectamente alineadas con la construcción de la EM. Pero no solamente

¹³http://sociedad.elpais.com/sociedad/2012/11/09/actualidad/1352493569_046969.html

¹⁴<http://www.spacex.com>

¹⁵<http://www.planetaryresources.com>

¹⁶http://elpais.com/elpais/2015/05/12/ciencia/1431451760_438794.html

es posible. Es necesario, sino imprescindible, que la humanidad aborde la construcción de un proyecto como la EM para garantizar la supervivencia de la especie. En primer lugar, esto puede conseguirse gracias a que la EM nos permitirá convertirnos en una especie interplanetaria. En segundo lugar, las características de la EM contribuirán a conseguir la paz mundial, como veremos más adelante. Finalmente, el objetivo último de esta obra de ingeniería es mejorar la vida de todos los habitantes de la Tierra. Esto no sólo se conseguirá mediante la generación de millones de puestos de trabajo de calidad, sino también desarrollando las tecnologías que contribuyan a ello, como veremos en las siguientes secciones.

5.3. Diseñando la Estrella de la Muerte

No vamos a hacer aquí una exposición pormenorizada de los detalles técnicos del proyecto (no es el objetivo de este artículo), pero sí que podemos estudiar a grandes rasgos cómo estaría diseñada la EM para poder aplicar al proyecto la Matriz de Sostenibilidad.

5.3.1. El diseño del interior

Tal como se muestra en la figura 9, la EM será una esfera de 160 km de diámetro. Su interior estará formado por 176 esferas concéntricas (desde radio 75 km hasta radio 40 km) separadas 200 metros entre sí hasta llegar a radio 40 km. Las esferas estarían numeradas del 1 (esfera más exterior) al 177 (esfera más interior). La distancia entre las esferas 1 y 2 será de 5 km. En ese espacio se encontrarán los hangares capaces de albergar los cruceros, cazas y demás naves de combate, además de todo el armamento de defensa de la estación de combate.

Hemos valorado dos posibles modelos de giro. En el modelo 1, todas las esferas giran de forma sincronizada con la misma velocidad angular. Este modelo permitiría una construcción muy sólida del interior de la EM, con las esferas fuertemente interconectadas entre sí. La superficie exterior (esfera 1) girará sobre un eje imaginario situado entre los polos de la EM a una velocidad lineal de 914,476 m/s para conseguir 1 g en la superficie del ecuador interior de la esfera 2 como resultado de la fuerza centrífuga. De esta forma, las personas que habiten el ecuador interior de la esfera 2 se verían sometidas a una gravedad similar a la de la Tierra. En el ecuador de la esfera 177, sin embargo, la gravedad será de 0,53 g, casi la mitad que en la tierra. En el interior del ecuador de la esfera 1, la que forma el exterior de la EM, la gravedad será de 1,07 g. En los polos habría gravedad 0, por lo que los puertos principales de atraque y despegue estarán situados en esa zona.

En el modelo 2 las esferas sólo están conectadas por la zona de sus ejes, lo que permite que giren a diferentes velocidades para que se pueda generar 1 g en el interior de la superficie habitable de cada una de las esferas. En este modelo, la esfera 177 tendría que girar un 37% más rápido que la esfera 2 para tener la misma gravedad, y la velocidad lineal de

un punto de sus superficie sería de 626,099 m/s (nótese que es menor que la de la esfera 1),

Existe un modelo híbrido en el que las esferas estarían conectadas por grupos (de 5 esferas, por ejemplo) que girarían con una misma velocidad angular para obtener 1 g en la esfera exterior del grupo, y algo menos en el resto de esferas (aproximadamente un 1% menos de gravedad en la esfera más interior del grupo).

La superficie habitable de la EM se encontrará en una franja de 25 km a cada lado de la línea del ecuador interior en cada una de las 176 esferas interiores. En esa zona, la fuerza centrífuga provocada por el movimiento de rotación tendrá una dirección casi perpendicular a la superficie de cada esfera, lo que resultará cómodo para la habitabilidad de los humanos que vivan en su interior. Cuanto más nos desplazemos hacia los polos, mayor inclinación notaremos en el vector de la gravedad. La superficie habitable de las 176 esferas interiores es equivalente a la superficie de Argelia, o lo que es lo mismo 4,7 veces la superficie de España (2 370 000 km²). La EM puede albergar cómodamente, por lo tanto, más de 200 millones de personas. Las zonas no habitables de cada esfera, la mayoría del espacio disponible, se dedicarán a zonas de ocio (gravedad 0, por ejemplo, cerca de los polos) y a los sistemas de sustento vital (regeneración de aire, producción de alimentos, etc.).

El espacio interior, desde el centro hasta la esfera de radio 40 Km., contendrá los sistemas más críticos de la estación espacial: los generadores de energía, el control del sistema de propulsión o los centros de cálculo, por ejemplo, protegidos del bombardeo exterior de neutrinos y los rayos cósmicos por la densidad de la propia EM.

5.3.2. El movimiento de aceleración y deceleración

Dentro de la zona habitable de cada esfera habrá una zona especial para albergar a los habitantes de la EM durante los procesos de aceleración/deceleración. Hemos estudiado dos modelos posibles considerablemente distintos.

El modelo 1 se muestra en la figura 10. Durante los procesos de aceleración y deceleración la EM avanzará en una dirección situada en el plano del ecuador y no girará sobre su eje, por lo que la gravedad simulada se conseguirá a partir del efecto acción/reacción de la propia fuerza causada por la aceleración de la nave. De esta forma, si la EM avanza en un sentido determinado, en la zona interior de cada esfera situada en la parte de “atrás” de la nave (considerando el sentido del movimiento) se producirá una gravedad simulada equivalente a la aceleración. Los habitantes de esa zona de la EM sentirían que están “abajo”, mientras que el polo opuesto correspondería a la parte de arriba. Si queremos que esta gravedad sea similar a la de la Tierra, la EM deberá tener aceleraciones y deceleraciones de 1 g, lo que le permitirá pasar de estar detenida a la velocidad de la luz y viceversa en aproximadamente 1 año. La zona de habitabilidad durante los períodos de aceleración y deceleración es en este modelo considerablemente menor que en las condiciones normales de rotación (ya

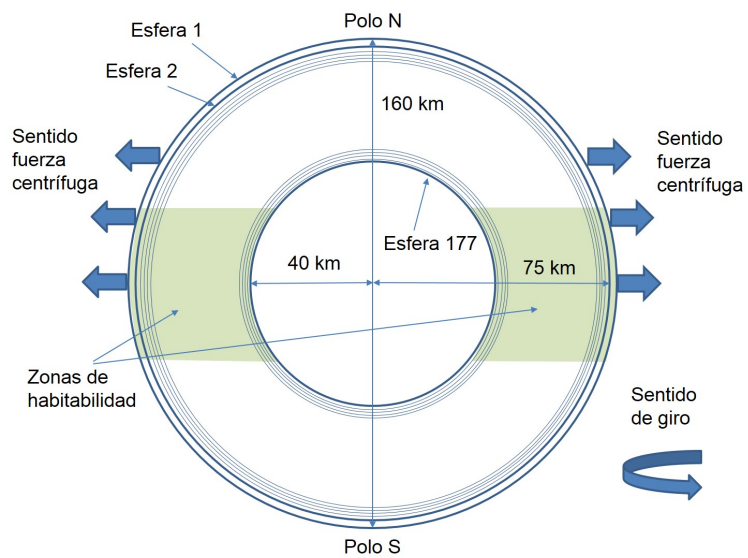


Figura 9: Sección transversal de la Estrella de la Muerte.

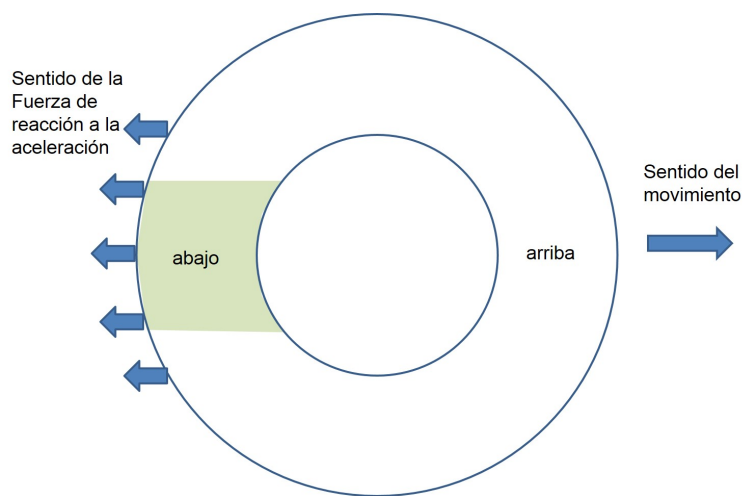


Figura 10: Desplazamiento por el espacio de la Estrella de la Muerte. Modelo 1.

que corresponde a la parte de “atrás” de la nave, equivalente aproximadamente a $1/20$ del espacio habitable total, por lo que esta zona estará densamente poblada y debería ser diseñada de forma especial, usando arquitectura vertical. Una vez la EM adquiera velocidad constante, comenzará a girar y la fuerza centrífuga del giro proporcionará la simulación de la gravedad en todo el espacio de las zonas habitables de cada esfera.

En el modelo 2, mostrado en la figura 11, la EM avanzará en una dirección perpendicular al plano del ecuador con una aceleración de $0,1\text{ g}$. En este caso la EM seguiría en rotación durante todo el proceso, alcanzaría la velocidad de la luz en 9,5 años y sus habitantes podrían vivir de forma normal durante todo el tiempo que durase la aceleración/deceleración, aunque el vector de gravedad no sería completamente perpendicular a la superficie, lo que haría la vida un poco más incómoda. Esto es debido a que el vector de gravedad en este caso es la suma de la fuerza centrífuga de rotación más la fuerza de reacción a la aceleración del desplazamiento lineal de la EM, perpendicular a la fuerza centrífuga pero 10 veces menor. Debido a esta suma de fuerzas, sería más cómodo vivir en la mitad interior de la EM que apunta a su punto de origen que hacerlo en la mitad interior que apunta a su destino,¹⁷ por lo que sólo se usaría la mitad del espacio habitable durante los periodos de aceleración y deceleración. En cualquier caso, en este modelo se dispone de 10 veces más espacio que en el modelo 1.

En cualquiera de los dos modelos, los habitantes y la propia EM se verían afectados por los efectos de la relatividad general una vez alcanzasen una velocidad suficientemente próxima a la de la luz.

5.3.3. La tecnología

Para construir la EM será preciso desarrollar nanotecnologías de materiales (nanotubos de carbono, diamante o grafeno). También hay que potenciar el desarrollo de la tecnología solar-fotovoltaica, eólica y el almacenamiento de energía (baterías) para eliminar en 20 años la dependencia de hidrocarburos fósiles (para rebajar, por ejemplo, el coste del combustible de los cohetes necesarios para transportar el material inicial para construir la EM). Esto ya lo están haciendo en la actualidad empresas como Tesla.¹⁸ Como tecnología básica de propulsión de la EM se usará el viento solar¹⁹ (sólo dentro de un sistema solar y para alejarse de la estrella). Para moverse fuera de un sistema solar se usarán otras fuentes de energía, como por ejemplo la propulsión por agua (se divide en O_2 y

H_2 usando energía solar).

La construcción de la EM tendrá sin duda efectos incentivadores en la economía mundial y llevará asociada la creación de una nueva y potente industria tecnológica que potenciará la innovación técnica y científica para desarrollar nuevas tecnologías, técnicas, materiales y paradigmas que transformarán la dinámica económica, social y ambiental.

5.3.4. Convertirnos en una especie interplanetaria

Es más que probable que la construcción de la EM una las naciones del planeta hasta tal punto que se establecerá un gobierno mundial orientado a su construcción como medio para mejorar las condiciones de vida de los humanos y con el objetivo final de convertirnos en una especie interplanetaria. Ser una especie interplanetaria debe ser un objetivo fundamental de la raza humana si queremos sobrevivir como especie. La paradoja de Fermi²⁰ presenta la contradicción entre las estimaciones que afirman que hay una alta probabilidad de existencia de civilizaciones inteligentes en el universo (según la ecuación de Drake²¹) y la ausencia de evidencia de dichas civilizaciones (paradoja SETI²²). La respuesta de Fermi²³ a su paradoja es que toda civilización avanzada de la galaxia desarrolla con su tecnología el potencial de exterminarse. Y lo usa.

Por otra parte, el continuo incremento y envejecimiento de la población de nuestro planeta debido al aumento de la esperanza de vida hará que pronto la Tierra se quede pequeña para la humanidad. Aunque usemos los recursos de forma sostenible (cosa que no hacemos actualmente), hay un máximo de personas que la Tierra puede soportar. Por ello, si queremos seguir creciendo es imprescindible expandirnos hacia otros mundos.

5.4. Proyecto Puesto en Producción

En esta apartado analizaremos las consecuencias, desde el punto de vista de la sostenibilidad, que supondría construir la EM.

5.4.1. Dimensión económica

Hemos analizado algunas de las tecnologías necesarias para construir la EM y hemos visto que pueden ser desarrolladas en un plazo razonable de tiempo. Sin embargo, no se ha estimado el coste del proyecto (sería imposible hacerlo de forma realista) ni el tiempo necesario para llevarlo a cabo (por la

¹⁷La gravedad generada por la aceleración del desplazamiento de la EM compensa la inclinación del vector de gravedad simulada debido al efecto de la fuerza centrífuga en la mitad de la EM que apunta hacia el origen del movimiento, mientras que acentúa su inclinación en la otra mitad.

¹⁸<http://www.teslamotors.com>

¹⁹El 7 de junio de 2015 se probó con éxito por primera vez este tipo de propulsión. La nave Lightsail, un proyecto de la Planetary Society, desplegó con éxito sus velas solares en el espacio. <http://sail.planetary.org>

²⁰https://es.wikipedia.org/wiki/Paradoja_de_Fermi

²¹https://es.wikipedia.org/wiki/Ecuaci%C3%B3n_de_Drake

²²<http://www.antiguosastronautas.com/articulos/Zaitsev02.html>

²³Todas las posibles respuestas a la paradoja de Fermi pueden encontrarse en un interesante artículo de James Schombert en <http://web.archive.org/web/20040417010200/http://zebu.uoregon.edu/~js/cosmo/lectures/lec28.html>

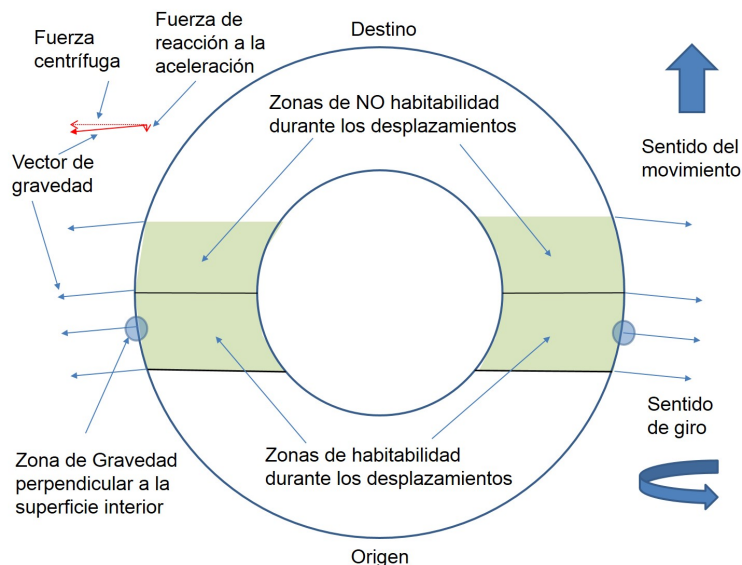


Figura 11: Desplazamiento por el espacio de la Estrella de la Muerte. Modelo 2.

misma razón), y mucho menos se ha podido hacer una planificación detallada del mismo. Tampoco sería el primer proyecto que se aborda sin una planificación detallada ni la seguridad de disponer del presupuesto necesario para acabarlo. Basta pensar en la Gran Muralla China, las catedrales de la Edad Media que pueblan Europa o, más recientemente, en la Sagrada Familia de Barcelona.²⁴

No estamos en condiciones de hacer una estimación del coste económico y mucho menos una planificación detallada, pero los ingenieros que hicieran el proyecto deberían hacerla, al menos de la primera etapa, y hemos de asumir que sería “apropiada”, tendría en cuenta recursos humanos y materiales y se haría con costes mínimos, ya que al implicar a toda la humanidad se buscaría el bien común (no hay ganadores ni perdedores, solo hay un objetivo común: la construcción de la EM para mejorar la vida de toda la humanidad y garantizar la supervivencia de la especie).

Este coste estaría, muy probablemente, varios órdenes de magnitud por debajo del que se ha estimado al principio de la apartado 5.1. El cálculo debería realizarse teniendo en cuenta el pensamiento exponencial, no lineal. No obstante, dado que estamos hablando de un proyecto de 100 años de duración, es previsible que este coste inicial no fuese muy preciso, ya que el cambio de las tecnologías y los precios de los materiales y la mano de obra a lo largo de los 100 años que durará la construcción de la EM hará que cualquier cálculo inicial sea, con toda seguridad, equivocado. Aun así, será preciso hacer una estimación, al menos del orden de magnitud, para evaluar las probabilidades de éxito. Dado que también será muy complicado realizar una planificación detallada a 100 años vista, parece razonable que se diseñen las líneas maestras de pro-

yecto para ponerlo en marcha y se vaya avanzando por etapas más cortas, con presupuestos cerrados y planificación detallada para cada etapa. El propio pensamiento exponencial hace que sea imposible realizar una planificación global precisa al inicio del proyecto.

Es presumible que la construcción de la EM genere millones de puestos de trabajo (tanto directos como indirectos) en diferentes industrias, tal como propugnaban los 34 435 firmantes de la petición al gobierno de EEUU en 2012 para construir la EM.

Con respecto a que el proyecto sea competitivo, uno de los objetivos de construir la EM es que las tecnologías creadas para desarrollar el proyecto mejoren la vida de los habitantes del planeta. Como esto se puede conseguir con creces, podemos considerar al proyecto como competitivo, ya que no hay de hecho competencia (al menos en nuestro planeta) para construir otra EM.

Por todo ello, le daremos un 5 sobre 10 (somos conservadores en este aspecto, ya que no disponemos de los números finales y somos conscientes de que en este estadio del proyecto la definición es aún muy vaga).

5.4.2. Dimensión ambiental

Dado que no tenemos una estimación de los recursos necesarios para construir la EM, es imposible tampoco calcular de forma precisa el impacto ambiental y la huella ecológica de su construcción. Al igual que en la dimensión económica, podemos suponer que los ingenieros que diseñarán la EM durante los próximos 100 años evaluarán adecuadamente la cantidad de recursos que se necesitarán y, por lo tanto, también

²⁴http://elpais.com/diario/2011/09/21/catalunya/1316567247_850215.html

su impacto ambiental.

Enfocaremos este análisis desde el punto de vista de coste de oportunidad. Es decir, lo importante no es qué impacto tendrá en el medio ambiente interplanetario la construcción de la EM, sino comparar ese impacto con el que tendría el no haberla construido. Así, si la contaminación generada durante la construcción (por ejemplo) es inferior a la contaminación que se evitará gracias al desarrollo de las tecnologías necesarias para construirla, el impacto (huella ecológica de la construcción) será positivo. Durante la vida útil esta valoración aumentará más aún, ya que muy probablemente la construcción de la EM habrá permitido desarrollar tecnologías que disminuirán notablemente la huella ecológica de la humanidad sobre el planeta Tierra y, en el futuro, sobre el resto del universo.

Un primer impacto visible será la reducción de la contaminación ambiental hasta eliminarla completamente gracias al uso de energías limpias. En el informe de la OMS de abril de 2015²⁵ se indica que la contaminación le cuesta a Europa $1,4 \times 10^{12}$ € de euros en enfermedades y muertes cada año. Eliminar la contaminación supondrá, por lo tanto, un ahorro importante de dinero y una clara mejora en las condiciones de vida de los habitantes de la Tierra, además de un ahorro anual de varios billones de euros.

En el interior de la EM se deben producir todos los elementos para satisfacer las necesidades de su población (200 millones de personas). Debe generar de forma limpia energía para su propio sustento y el de sus armas (la destrucción de un planeta como Aldebarán²⁶ requiere $2,25 \times 10^{32}$ julios mientras que nuestro Sol produce una energía de 3×10^{26} julios/s), además de mantener de forma continua el soporte vital de sus habitantes (atmósfera, líquidos, comida, etc.). Es necesario desarrollar la tecnología que haga posible los cultivos en el espacio en ecosistemas cerrados (la NASA ya está trabajando en ello y ya existen prototipos que funcionan y permitirán enviar pronto un hombre a Marte) y disponer de tecnología para el reciclado total de desperdicios (lo que incluye todo tipo de basura, aguas fecales, etc.).

Con respecto a los materiales necesarios para construirla, además de usar los materiales de los asteroides, la Luna y Marte, se limpiará de basura espacial la órbita de la Tierra. Dado que la humanidad se alineará con el bien común para la extracción de materiales, podemos considerar que la extracción y manipulación de materiales se hará de forma ética y limpia. En cuanto al desmantelamiento, pese a que la EM se construirá para durar miles de años, sus diferentes partes deben ser construidas de forma que sea fácil reemplazarlas (mantenimiento rápido y barato) y sean fáciles de reciclar dentro de la propia EM, ya que ningún material puede entrar o salir una vez esté en funcionamiento (no sabemos cuánto pueden durar sus viajes estelares ni si encontrará materia en su camino). Será imprescindible por lo tanto potenciar tecnologías para

incrementar la eficiencia y eficacia de la recogida, reciclaje y reuso de materiales (debe ser rentable, y además la EM es un ecosistema cerrado del que nada entra ni sale). También habrá que desarrollar tecnologías para reducir el coste y el impacto del transporte de mercancías, tanto terrestre como al espacio.

Finalmente, habrá que aumentar la eficiencia energética de toda la tecnología. Dado que no es posible usar energías fósiles en la EM, será necesario potenciar otras tecnologías limpias y sostenibles que podrán aplicarse también a la vida en la Tierra, de forma que se reduzca la huella ecológica global hasta consumir los recursos de 1 solo planeta (no los de 1,4 Tierras,²⁷ como sucedía en 2010, y la situación no ha dejado de empeorar desde entonces). La tecnología necesaria para construir la EM permitirá, por lo tanto, revertir el cambio climático y hará sostenible la vida en la Tierra (hoy en día no lo es, y la supervivencia de la especie humana está en peligro si no hacemos algo al respecto).

Indudablemente, habría sido posible construir la EM de forma que su impacto ambiental hubiese sido menor. Los inicios del proyecto se enmarcan en unos años en que la tecnología no estaba suficientemente avanzada. Con el conocimiento conseguido en el momento de su finalización, la EM se podría haber realizado de una forma más sostenible desde el primer día. En todo caso, se continuará trabajando durante todo el proyecto para revertir el proceso y conseguir una huella ecológica cero.

Dado que la construcción de la EM contribuirá a descontaminar nuestro planeta, revertir el cambio climático y a desarrollar energías más limpias, haciendo sostenible la vida de la humanidad sobre la propia Tierra, le daremos un 9 sobre 10 porque, pese a nuestro optimismo declarado, seguro que no todo es tan perfecto como nos gustaría.

5.4.3. Dimensión social

Al igual que en la dimensión ambiental, vamos a centrarnos en el impacto que tendrá en la sociedad la decisión de construir la EM y el desarrollo de la tecnología necesaria para hacerlo.

A nivel personal, la EM es el mayor proyecto en el que un ingeniero puede trabajar, el proyecto que por fin unirá al mundo bajo un mismo objetivo, el proyecto que permitirá mejorar la calidad de vida de la humanidad y restaurar la estabilidad del planeta (que nos hemos cargado en los siglos XIX y XX). Indudablemente, los millones de personas que participarán en este proyecto sabrán que están contribuyendo a que la humanidad tenga un futuro mejor y a hacer de los humanos una especie interplanetaria, que como hemos visto es uno de los objetivos para garantizar la supervivencia de la especie.

Para construir la EM será preciso un esfuerzo conjunto de toda la humanidad. Todos los países del mundo deberán ali-

²⁵http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0004/276772/Economic-cost-health-impact-air-pollution-en.pdf?ua=1

²⁶<http://www.taringa.net/posts/info/13836410/La-estrella-de-la-muerte-destruye-la-tierra.html>

²⁷http://www.footprintnetwork.org/es/index.php/GFN/page/world_footprint

²⁸<http://economia-del-bien-comun.org/es>

nearse con el proyecto, lo que mejorará la economía mundial, que se basará en el bien común,²⁸ y reducirá la distancia entre ricos y pobres. Se generarán millones de puestos de trabajo, la mayoría de ellos cualificados, y se producirá un salto tecnológico y social importantísimo.

Un proyecto global como éste aumentará la riqueza mundial, como pasó en los años 60 con la carrera espacial o anteriormente con la revolución industrial, mejorará la calidad del empleo y reducirá el nivel mundial de pobreza. Pese a que inicialmente una parte de los trabajadores podrían provenir de la población reclusa o ser personas condenadas a efectuar servicios sociales, para abaratar el coste del proyecto, los puestos de responsabilidad o los que tienen perfiles más técnicos requieren cualificación. La EM generará, por lo tanto, empleo de calidad.

El desarrollo de la robótica hará que los trabajos peligrosos sean realizados por robots, lo que mejorará la calidad del trabajo para los humanos. Las familias de los trabajadores de la EM podrán vivir con ellos en la estación espacial si las zonas habitables son las primeras en construirse, lo que reducirá el movimiento de personas Tierra-EM y mejorará la calidad de vida de los trabajadores y de sus familias. Muchos de ellos se podrán quedar después, durante la vida útil de la EM, en la estación espacial para realizar tareas de mantenimiento, conviviendo con sus familias en alojamientos apropiados. Será preciso dotar a la población de todos los recursos necesarios para su supervivencia y convivencia (colegios, hospitales, centros comerciales y de ocio, canales de televisión y radio, ligas de fútbol, zonas de vacaciones y recreo, etc.).

La tecnología para la fabricación de alimentos desarrollada para la EM permitirá eliminar el hambre de la Tierra, lo que junto con el aumento del nivel de vida contribuirá a la erradicación de muchas enfermedades y a la reducción de la mortalidad infantil. Permitirá, en definitiva, alcanzar los objetivos del milenio.²⁹

Además, la construcción de la EM unirá las naciones hasta tal punto que se establecerá un gobierno mundial orientado a la construcción de la estación espacial como medio para mejorar las condiciones de vida de los humanos. La EM es, por otra parte, un elemento disuasivo para mantener la paz mundial. ¿Quién osará enfrentarse al gobierno mundial sabiendo que dispone de tan poderosa arma de combate?

Finalmente, pero no por ello menos importante, si no la construimos nosotros, la construirá una civilización extraterrestre que podría atacarnos y destruirnos o sojuzgarnos, así que es necesario construirla para poder defenderse de un hipotético ataque alienígena (no sea que Fermi esté equivocado en su paradoja).

Por todo lo anterior, le daremos un 9 sobre 10 (al igual que en la dimensión ambiental, seguro que no todo es tan perfecto como parece).

5.5. Vida útil

La EM debe ser un ecosistema cerrado, donde todo se reusa o se recicla. Ningún material debe salir de la nave como desecho. Todo desecho orgánico puede ser utilizado para generar energía, mientras que los inorgánicos pueden reciclarse para disponer de piezas de recambio o para construir nuevos elementos. Se puede desarrollar, por ejemplo, tecnología de impresoras 3D capaces de imprimir cualquier objeto usando cualquier material que haya en la EM. Esto determinaría, por ejemplo, el tipo de materiales con que se construirá la EM. El factor reuso, junto con el coste de oportunidad, son las claves para evaluar la sostenibilidad durante la vida útil de la EM.

5.5.1. Dimensión económica

Gracias al aumento del conocimiento conseguido con el reto del diseño y construcción de la EM se producirá un importante cambio cualitativo en el uso de tecnologías que permitirá no sólo reducir los costes de muchos procesos productivos, sino conseguir que la EM sea autosuficiente. Este hecho reduce prácticamente a cero el coste de adquisición de nuevos materiales para el mantenimiento de la nave y la generación de energía, siendo necesario solamente considerar el coste de la mano de obra. Por razones obvias, resulta imposible en este momento calcular dicho coste, ya que es preciso aplicar el pensamiento exponencial y no podemos hacerlo basándonos en el modelo socioeconómico actual.

Desde el punto de vista de coste de oportunidad, antes de construir la EM las naciones de la Tierra destinaban cantidades muy altas de su presupuesto a mantener su estructura militar y, en menor medida, a reducir los grandes desequilibrios planetarios (escasez de recursos, desequilibrios entre países, desnutrición de casi un 20 % de la población mundial a principios del siglo XXI, etc.). A este coste había que sumar el coste de las guerras³⁰ y de la reconstrucción necesaria después de cada guerra. Por otra parte, la construcción de la EM contribuirá decisivamente a mejorar los procesos de producción y gestión de recursos y a aumentar el conocimiento global y la productividad de las empresas.

Dado que la EM conseguirá unir a la humanidad y contribuirá a mantener la paz en el planeta, todo ese dinero que ya no se gastará puede dedicarse a su mantenimiento, con la ventaja de haber conseguido mejorar las condiciones de vida de todas las personas, tanto las que viven en la EM como las que siguen habitando en la Tierra. Si la humanidad se ha unido en una única nación, será ésta la que financie la EM. Si, más probablemente, lo ha hecho mediante una confederación de naciones, serán las aportaciones monetarias de cada nación, en función de su población y de su PIB, las que financien la EM.

La construcción de la EM era imprescindible, ya que nuestro planeta estaba superpoblado y sobreexplotado a principios del siglo XXI, y la construcción de la EM era imprescindible

²⁹<http://www.un.org/es/millenniumgoals>

³⁰En la guerra de EEUU contra Irak a principios del siglo XXI se gastaron 343 millones de dólares diarios.

para asegurar la supervivencia de la especie humana. Es previsible que su vida útil sea de cientos de años, tal vez miles, y al final de dicha vida será preciso desmantelarla. Dado que la EM ha sido construida pensando en su total autosuficiencia y reutilización, desmantelarla permitirá una reutilización del 100 % de sus materiales e instalaciones. Todos los elementos y productos que no puedan ser reusados se harán impactar en la estrella más cercana para aumentar su energía cerrando así el ciclo, ya que todos los materiales del universo (incluyendo los que nos forman a los humanos) son fabricados en las estrellas. Algunos de los objetos de la EM, no obstante, pueden acabar en museos o servir como adornos en casas particulares, distribuidos por empresas de *souvenirs*.³¹ El dinero obtenido por la venta de estos recuerdos serviría para financiar los posibles costes de desmantelamiento de la EM.

Por todo lo anterior, y teniendo en cuenta que ha sido imposible calcular el coste, pero se ha demostrado que la EM es viable desde el punto de vista de coste de oportunidad, puntuaremos con un 6 sobre 10 esta celda de la matriz.

5.5.2. Dimensión ambiental

Desde el punto de vista de coste de oportunidad, la mejora de las condiciones ambientales de la Tierra gracias a la construcción de la EM producirá una disminución del impacto ecológico que supone la pérdida de biodiversidad que se ha producido en la Tierra desde el siglo XIX. La actual tasa de pérdida de especies nos indica que estamos viviendo la «sexta gran extinción» [24].

La reducción de la contaminación y el equilibrio en el consumo de recursos (reducción de la huella ecológica hasta consumir una sola Tierra) conseguido para construir la EM se mantendrá después de su construcción, lo que a medio plazo permitirá revertir el cambio climático, eliminará completamente la contaminación y detendrá la sexta gran extinción.

En la EM, por otra parte, todos los procesos habrán sido diseñados de forma sostenible, por lo que continuarán siéndolo durante la vida útil de la nave. El calor sobrante procedente de las fuentes de energía se usará para aumentar la temperatura interior de la EM hasta hacerla confortable y las zonas que necesiten refrigeración pueden enfriarse con intercambio de aire y líquidos con otras zonas o haciendo que el aire o un líquido circule por el exterior de la EM, que estará próximo al cero absoluto (-273°C).

La EM usará ocasionalmente la materia proveniente principalmente de asteroides (que no alberguen vida) cuando sea necesario, por lo que tendrá un cierto impacto sobre estos cuerpos celestes. No obstante, dada la poca utilidad de la mayoría de estos cuerpos, dicho impacto no se estimará como negativo. Además, en el caso de usar asteroides del sistema

solar como materia prima, se elimina la posibilidad de que en el futuro puedan desplazarse de su órbita y colisionar con la Tierra.

Los estudios científicos que continuamente se realizan en la Tierra permitirán verificar la reducción de la huella ecológica producida por el hombre gracias a la EM. En la propia estación espacial, por otro lado, se monitorizarán continuamente todos los parámetros ambientales y la reutilización de recursos para garantizar una huella ecológica cero.

Dado que la EM ha sido diseñada siguiendo las antiguas filosofías del *Cradle-to-cradle*,³² en el momento de su desmantelamiento se reaprovechará el material para construir nuevas naves o para la reconstrucción de poblados en diferentes satélites y planetas que sean compatibles con los materiales.

Por todo ello, le daremos un 9 sobre 10 a esta celda de la matriz.

5.5.3. Dimensión social

Toda la humanidad se verá beneficiada por la existencia de la EM, y probablemente también algunas especies alienígenas (si es que alguna vez las encontramos o nos encuentran ellas a nosotros).

Los avances tecnológicos producidos durante la construcción y posterior vida útil de la EM mejorarán la calidad de vida de los habitantes de la Tierra. El increíble avance de la tecnología, que no podría cien años antes diferenciarse de la magia [7], permitirá asegurar una protección social adecuada para todos: educación, sanidad, necesidades básicas y lúdicas, etc. Por otra parte, la paz y el orden estarán aseguradas en la Tierra, lo que a su vez contribuirá a la supervivencia de la raza humana.

Pero también se beneficiarán los habitantes de la EM. En la EM convivirá personal militar con personal civil. Los militares dispondrán de viviendas cercanas a sus puestos de trabajo donde podrán alojar a sus familias, existiendo por lo tanto la reunificación familiar. Dado que será difícil que las pateras espaciales lleguen a la EM,³³ el pleno empleo estará garantizado. Y en una sociedad con pleno empleo, ya se sabe, es más fácil ser feliz. Los 200 millones de personas que viven en la EM dispondrán de todo tipo de servicios (hospitales, colegios, ocio, etc.) y podrán visitar la Tierra una vez al año durante dos semanas para ir de vacaciones.³⁴ El ambiente será luminoso para ayudar a mantener un buen estado de ánimo en los moradores de la EM y, dado que el control del clima será absoluto, se podrán simular estaciones para favorecer la adaptación de los habitantes a un entorno artificial. La mayoría del clima será mediterráneo con pocas diferencias de temperatura entre el verano y el invierno, aunque en algunas zonas de ocio se permitirán temperaturas elevadas ($25^{\circ}\text{C} - 30^{\circ}\text{C}$) o bajas

³¹Empresas como *aliens4sale.com* pueden servir como ejemplo.

³²https://en.wikipedia.org/wiki/Cradle-to-cradle_design

³³Difícil pero no imposible, como se puede comprobar por ejemplo en la película *Elysium*.

³⁴Esto supone un máximo de 200 millones de viajes anuales de ida y vuelta, que implican desplazar 548 000 personas cada día en ambos sentidos. Dado que la EM dispondrá de transportes de pasajeros con capacidad para 1000 personas, serán necesarios 548 viajes diarios, y deberán despegar por lo tanto 23 de estos transportes cada hora. Este volumen de tráfico es inferior al de un aeropuerto como el de Barcelona.

(próximas a 0°C) para permitir ir a la playa (artificial) o a la piscina y la práctica de deportes de invierno (nieve artificial).

Teniendo en cuenta lo anterior, le daremos un 9 sobre 10 a esta celda de la matriz.

5.6. Riesgos (de construir la EM y de no hacerlo)

Si la población, el medio ambiente y los recursos económicos no se ven expuestos a factores potencialmente peligrosos, no existe riesgo de problemas de desastre. La exposición es un factor necesario, pero no suficiente para determinar que existe un riesgo. Es posible estar expuesto y no ser vulnerable, pero para ser vulnerable es necesario haber estado expuesto. La vulnerabilidad está relacionada con la predisposición, susceptibilidades, fragilidades, debilidades, deficiencias o falta de capacidades que favorecen los efectos adversos en los elementos expuestos (los seres humanos y sus medios de vida) [5].

La pregunta clave para estudiar los riesgos, por lo tanto, es si la construcción de la Estrella de la Muerte expone a la humanidad a algún peligro y por lo tanto la haría vulnerable.

5.6.1. Dimensión económica

Para reducir el coste económico del proyecto podría suceder que se tendiese a que la mayoría de los trabajadores cobraran salarios muy bajos o incluso que no cobraran (trabajadores que estén cumpliendo servicios sociales o reclusos, por ejemplo). Si la capacidad económica de los trabajadores disminuye, también disminuye el consumo. Si disminuye el consumo, y teniendo en cuenta la gran cantidad de mano de obra que estará implicada en la construcción y mantenimiento de la EM, tanto de forma directa como indirecta, la probabilidad de que se produzca un desastre económico a nivel mundial debería ser considerada, no sólo porque no permitiría la finalización del propio proyecto, sino porque desestabilizaría la economía mundial con graves consecuencias. La experiencia nos demuestra que somos vulnerables a este peligro por haberse dado con anterioridad (crisis del 29).

Por otro lado, dado que la construcción se alargará durante 100 años y las condiciones económicas en el planeta no pueden garantizarse en ese período, podría suceder que el proyecto fuese cancelado o ralentizado debido a factores externos (guerras, rebeliones contra el proyecto, sabotajes, crisis económicas, etc.).

Finalmente, dado que es imposible realizar un cálculo exacto del coste de la construcción de la EM debido a que debe usarse pensamiento exponencial (sólo será posible establecer un rango del coste), cabe la posibilidad de que el coste se dispare más allá de lo inicialmente previsto y se ponga en riesgo la viabilidad económica del proyecto.

Dado que los riesgos descritos no son despreciables, le otorgaremos un -5 sobre -10 a esta celda.

5.6.2. Dimensión ambiental

Jacques Laskar y Mickael Gastineau, del Observatorio de París, usaron un modelo no promedio que tiene en cuenta la relatividad general para estudiar la evolución del sistema solar en los próximos cinco mil millones de años. Si bien la mayoría de los resultados no presentaron ningún problema, un porcentaje muy bajo de ellos predijo una gran perturbación de la órbita de Mercurio. En estos escenarios poco probables, el cambio de la órbita de Mercurio provocaría una desestabilización total del sistema solar dentro de 3,3 millones de años aproximadamente, provocando colisiones de la Tierra con Mercurio, Marte o Venus [14].

Existe el riesgo de que la propia existencia de un objeto como la EM provoque una aceleración en la desestabilización del sistema solar calculada por Laskar y Gastineau, o incluso que haga más probable los escenarios apocalípticos poco probables que ellos calcularon.

Más aún, aunque la EM fuese construida en un área de Lagrange,³⁵ la influencia de su masa sobre el sistema gravitatorio Tierra-Luna o Tierra-Sol podría desestabilizarlo, especialmente cuando la EM se desplazase en las cercanías de la Tierra, lo que podría producir alteraciones en su órbita o incluso en su eje de rotación.

Si una catástrofe de este tipo llegase a producirse, la propia existencia de la EM podría garantizar la supervivencia de la raza humana, ya que es capaz de albergar 200 millones de personas. La experiencia nos demuestra que somos muy vulnerables a desastres medioambientales de mucho menor impacto que el descrito (terremotos, inundaciones, etc.).

Por otra parte, si las naciones no se ponen de acuerdo para realizar el proyecto cabe la posibilidad de que no se alcancen sus objetivos, y construir la EM conduzca a una mayor degradación del planeta en lugar de contribuir a revertir los efectos de la actividad del hombre sobre la naturaleza. Eventualmente, esta falta de acuerdo podría llevar incluso a una guerra que podría terminar con la humanidad.

Debido a lo poco probable de este riesgo, le otorgaremos un -1 sobre -10 a la celda de la matriz.

5.6.3. Dimensión social

El riesgo más importante es que la vida prolongada en el espacio produzca secuelas en los habitantes de la EM. Las condiciones de gravedad simulada eliminarían los riesgos de salud debidos a la ausencia de gravedad y la EM estará protegida de la radiación cósmica con unos cinturones de radiación similares a los de Van Allen³⁶ de la Tierra, que podrían generarse a partir del campo magnético provocado por el giro de sus esferas interiores. No obstante, nuestro desconocimiento de la repuesta del cuerpo humano a un viaje interplanetario es aún profunda, por lo que no son descartables secuelas producidas por efectos desconocidos en este momento para nosotros.

³⁵https://es.wikipedia.org/wiki/Puntos_de_Lagrange

³⁶<http://es.gizmodo.com/descubren-nueva-barrera-de-energia-que-protege-la-tierr-1664056753>

Por otra parte, los cambios sociales derivados de la construcción de la EM podrían dar lugar a un régimen totalitario que supusiera nuevas masacres de sectores minoritarios de la sociedad. Todo aquel que no estuviera de acuerdo con el proyecto sería eliminado. La experiencia nos demuestra que, desgraciadamente, somos vulnerables a desastres sociales ya que se han producido en el pasado (el Holocausto Nazi es seguramente el más conocido, pero no el único).

Aún en el caso de que este régimen totalitario no se produzca y las naciones consigan formar una confederación en armonía, existirán algunos colectivos contrarios al proyecto por diferentes razones (colectivos egoístas, poco solidarios, amantes del caos y del libertinaje, contrarios a las armas, anti-expansión por la galaxia, alienflautas, enemigos de la fuerza, seguidores del *auténtico lado oscuro*, etc.).

Por otra parte, si no construimos nosotros la EM, podría construirse otra civilización que tendría la capacidad de atacarnos y destruirnos. Por lo tanto, es necesario construirla para poder defenderse si es necesario. Pese a que no hemos detectado vestigios de la existencia de una civilización extraterrestre con capacidad tecnológica para construir la EM, la ecuación de Drake nos indica que podrían existir miles de ellas en el universo.

Dado que la historia de la humanidad nos dice que este riesgo no es despreciable, le daremos una puntuación de -3 sobre -10 .

5.7. ¿Pero es sostenible?

Como puede observarse en la figura 12, a partir de las puntuaciones establecidas en las secciones anteriores la sostenibilidad de la EM recibiría una puntuación de 53 en una escala de $[-60 : 90]$, ya que la vida útil y los riesgos tienen una ponderación doble que el PPP. Consideramos que esta es una puntuación bastante alta y que por lo tanto podríamos definir el proyecto como “bastante” sostenible.

Pese a la valoración que pueda haberse obtenido a partir de la matriz, es preciso preguntarse si puede considerarse sostenible la construcción de un arma que tiene la capacidad de destruir planetas, aunque haya sido concebida para garantizar la supervivencia de la especie humana y pueda hacerse con criterios sostenibles.

Sin embargo, ya existen en la actualidad armas de destrucción masiva capaces de aniquilar el planeta y a toda la humanidad (varias veces), armas cuyo desarrollo ha ayudado en gran medida al progreso de nuestra especie. Es muy posible que esas armas contribuyan, de hecho, a que las guerras tengan un alcance limitado. No ha habido, por ejemplo, ninguna guerra mundial desde la invención de la bomba atómica en 1945 (hace ya 70 años), mientras que entre las dos guerras mundiales apenas pasaron 22 años.

Así que, si dispusiésemos de un botón que permitiese cambiar el pasado de forma que esas armas no se hubieran construido nunca, y con la garantía de que no se volverían a construir nunca más (pero tampoco la tecnología que las hace posibles), ¿lo pulsaríamos, con todas sus consecuencias?

Hay muchas formas de progresar, muchos caminos que pueden conducir al mismo futuro posible. Siempre tenemos la posibilidad de escoger el camino que queremos seguir. El futuro está en nuestras manos, pero el futuro será sostenible o no será.

6. Discusión

¿Cómo se introduce la sostenibilidad en un Proyecto de Ingeniería? ¿Y en un TFG? Si no se hace correctamente puede significar un esfuerzo inútil o incluso contraproducente.

En primer lugar, el proyectista debe sentirse cómodo calculando la sostenibilidad del proyecto. Es importante que lo perciba como algo necesario y perfectamente integrado en el proyecto en sí. Si nos limitamos a ofrecer al alumnado una serie de ejemplos, probablemente se limitarán a escoger uno como modelo y a reproducirlo sin meditar, muchas veces considerando la sostenibilidad como un requisito académico del TFG y no como una necesidad profesional. Plantear una serie de preguntas orientadas a la reflexión, que no tengan una respuesta correcta o única, sino que requieran reflexionar y elaborar un informe razonado, es un buen principio, pero también debe ofrecerse un marco temporal. Si simplemente se pide un informe final, la mayoría de los proyectistas evaluarán la sostenibilidad al final del proyecto, cuando el objetivo debería ser intentar diseñar un proyecto sostenible desde el principio, no evaluar el grado de sostenibilidad del proyecto al final. Por eso, proponemos plantear preguntas orientadas en cada uno de los hitos de evaluación, intentando que el estudiante medite sobre cómo afectan las decisiones de diseño de cada fase a la fase posterior y al proyecto en general.

Es importante no dejar sólo al estudiante en su reflexión. Una herramienta como la Matriz de Sostenibilidad permite organizar y estructurar el Informe de Sostenibilidad. Lo que hay que evaluar como sostenibilidad del TFG es el propio informe, ya que es en él donde planteará las implicaciones de su proyecto, y no la evaluación numérica resultante de la matriz. No hemos de olvidar que nuestro objetivo real no es que el proyecto sea muy sostenible, sino que el estudiante aprenda a integrar la sostenibilidad en los proyectos como una parte esencial de los mismos.

Por ello, también conviene separar el proyecto (que puede ser muy grande y se puede participar en sólo una parte) del TFG, que es un trabajo académico, limitado en tiempo, recursos y profundidad. El alumnado debe tener claro que ha de centrarse en el TFG (incluyendo la sostenibilidad), que es por lo que será evaluado. Sin embargo, debe también aprender que hacer de manera sostenible una parte de un proyecto no sostenible no soluciona gran cosa. Por ello buscamos que no sólo medite en su parte del proyecto, sino en la totalidad del mismo. Aunque ahora sólo se centre en una parte bajo la supervisión de su director, el día de mañana será él o ella quien diseñe grandes proyectos, y debe hacerlo con la visión puesta en la sostenibilidad global, aunque delegue la sostenibilidad de cada parte en el resto del equipo.

	Ambiental	Económico	Social
PPP	Consumo del diseño	Factura	Impacto Personal
	9/10	5/10	9/10
Vida útil	Huella ecológica	Plan de viabilidad	Impacto social
	18/20	12/20	18/20
Riesgos	Riesgos ambientales	Riesgos económicos	Riesgos sociales
	-2/-20	-10/20	-6/20
Sostenibilidad	53 (-60/90)		

Figura 12: Matriz de sostenibilidad de la Estrella de la Muerte.

7. Conclusiones

El futuro necesita que los habitantes que compartimos este planeta empecemos a pensar y actuar de una manera sostenible. Un ingeniero puede contribuir mucho más a hacer el mundo más sostenible durante el ejercicio de su profesión que en su vida personal. La integración de la sostenibilidad como parte del trabajo diario del ingeniero es un hábito que debe adquirirse durante su formación y uno de los momentos más importantes es el Trabajo de Final de Grado. Hemos presentado aquí una metodología para introducir la sostenibilidad en los proyectos de ingeniería del área TIC, y en particular en el TFG, que se usa en la FIB.

Nuestra metodología busca ser simple y provocar la reflexión del estudiante. Si el método es complicado, no está bien organizado o es irreal, el alumnado se limitará a hacer un Informe de Sostenibilidad para salir del paso, sin interiorizar los conceptos asociados. Queda como trabajo futuro estudiar la calidad de los informes de sostenibilidad de los TFG dentro de unos años y, si es posible, analizar el grado de sostenibilidad de los proyectos en que participan nuestros egresados, que sería lo que realmente marcará el impacto de esta propuesta.

No obstante, más allá de que un proyecto pueda construirse de forma sostenible, es importante plantearse si el propio objetivo del proyecto es sostenible. Hemos puesto un ejemplo extremo, el caso de la Estrella de la Muerte, que se puede construir de forma sostenible pero cuya sostenibilidad es, cuanto menos, dudosa si su objetivo es disponer de una arma con la capacidad de destruir planetas. Los ingenieros, como responsables de los proyectos, deben influir en la sociedad y en las empresas para que los proyectos que se financien sean proyectos sostenibles, además de que puedan hacerse de forma sostenible.

Porque el futuro será sostenible o no será.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido subvencionado por el CCD de la UPC a través del proyecto S002-2014.

Referencias

- [1] Agència per a la Qualitat del Sistema Universitari de Catalunya. *Guia per a l'avaluació de competències als treballs de final de grau i de màster a les Enginyeries*. 2009. Disponible en http://www.aqu.cat/doc/doc_21214293_1.pdf
- [2] M. Alier, D. López, J. Garcia y F. Sánchez. *Tecnologia i Sostenibilitat*. En E. Carrera y J. Segalás (editores), *Les TIC i la Sostenibilitat*, cap. 33. Universitat Politècnica de Catalunya y Càtedra UNESCO de Sostenibilitat. Disponible en <https://tecnologiaisostenibilitat.cus.upc.edu/continguts/les-tic-i-la-sostenibilitat>.
- [3] Marc Alier Forment, David López, Fermin Sánchez Carracedo, Jordi Garcia Almiñana, Jordi Piguillem Poch y Martha Velasco. *Using a crowdsourcing knowledge base to support the Social Compromise and Sustainability skill in Computer Science Engineering Studies*. En Proceedings of the 4th World Summit on the Knowledge Society (WSKS 2011). Mykonos, Grecia, septiembre de 2011.
- [4] William Z. Bernstein, Devarajan Ramanujan, Fu Zhao, Karthik Ramani y Monica F. Cox. *Teaching Design for Environment through Critique within a Project-Based Product Design Course*. International Journal of Engineering Education, vol. 28, núm. 4, pp. 1–12. 2012.

- [5] Omar-Dario Cardona, Maarten K. van Aalst, Jörn Birkmann, Maureen Fordham, Glenn McGregor, Rosa Perez, Roger S. Pulwarty, E. Lisa F. Schipper, and Bach Tan Sinh. Determinants of risk: exposure and vulnerability. En Christopher B. Field, Vicente Barros, Thomas F. Stocker, Quin Dahe, David Jon Dokken, Kristie L. Ebi, Michael D. Mastrandrea, Katharine J. Mach, Gian-Kasper Plattner, Simon K. Allen, Melinda Tignor, Pauline M. Midgley (editores). *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation, Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 65–108). Cambridge University Press, 2012.
- [6] Belinda A. Christie, Kelly K. Miller, Raylene Cooke y John G. White. *Environmental sustainability in higher education: how do academics teach?* Environmental Education Research, vol. 19, núm. 3, pp. 385–414. 2013.
- [7] Arthur C. Clarke. *Profiles of the future: An Inquiry into the Limits of the Possible*. Edición revisada. Harper & Row. New York, 1973.
- [8] Edward J. Coyle, Leah H. Jamieson y William C. Oakes. *EPICS: Engineering Projects in Community Service*. International Journal of Engineering Education, vol. 21, núm. 1, pp. 139–150. Enero de 2005.
- [9] Albert Cuchí, Isaac López Caballero. Informe MIES. *Una aproximació a l'impacte ambiental de l'Escola d'Arquitectura del Vallés*. Universitat Politècnica de Catalunya. Disponible en <http://www.upc.edu/sostenible2015/ambits/la-gestio-interna/energia-i-aigua/mies.pdf>. Última consulta, mayo de 2015.
- [10] Christian Felber. *Die Gemeinwohl-Ökonomie. Das Wirtschaftsmodell der Zukunft*. Deuticke. Agosto de 2010.
- [11] Jordi Garcia, Helena García, David López, Fermín Sánchez, Eva Vidal, Marc Alier y Jose Cabré. *La sostenibilidad en los proyectos de ingeniería*. ReVisión, vol. 6, núm. 2, pp. 91–100. Septiembre de 2013.
- [12] Jordi Garcia, Fermín Sánchez, David López, Eva Vidal, Jose Cabré, Helena García, Marc Alier. *De la teoría a la práctica: cinco años después de la integración de la competencia genérica de sostenibilidad en el Grado en Ingeniería Informática*. En Actas de las XX Jornadas de Enseñanza Universitaria de la Informática, Jenui 2014, pp. 253–260. Oviedo, julio de 2014.
- [13] Stefan Gößling-Reisemann y Arnim Von Gleich. *Training Engineers for Sustainability at the University of Bremen*. International Journal of Engineering Education, vol. 23, núm. 2, pp. 301–308. Marzo de 2007.
- [14] J. Laskar y M. Gastineau. *Existence of collisional trajectories of Mercury, Mars and Venus with the Earth*. Nature, vol. 459, pp. 817–819. Junio de 2009.
- [15] David López, Fermín Sánchez, Jordi Garcia, Marc Alier, Jordi Piguillem y Martha Velasco. *Introducing "Sustainability and Social Commitment" Skills in an Engineering Degree*. En actas del 41st ASEE/IEEE Frontiers in Education Conference (FIE), pp. S2C-1 – S2C-6. Rapid City, EEUU. Octubre de 2011.
- [16] David López, Fermín Sánchez, Eva Vidal, Josep Peguerols, Marc Alier, Jose Cabré, Jordi Garcia y Helena García. *A Methodology to Introduce Sustainability into the Final Year Project to Foster Sustainable Engineering Projects*. En actas del 2014 IEEE Frontiers in Education Conference (FIE). Madrid, España. Octubre de 2014.
- [17] Robert G. McLaughlan. *Instructional Strategies to Educate for Sustainability in Technology Assessment*. International Journal of Engineering Education, vol. 23, núm. 2, pp. 201–208. Marzo de 2007.
- [18] Stephen Ruth. *Green IT - More Than a Three Percent Solution?* IEEE Internet Computing, vol. 13, núm. 4, pp. 74–78, Julio/Agosto de 2009.
- [19] J.L. Sánchez, C.S. González y S. Alayon. *Evaluation of transversal competences in the final year project in engineering*. En actas del 22nd EAEEIE Annual Conference, junio de 2011.
- [20] Fermín Sánchez, David López y Jordi García. *El desarrollo de la competencia Sostenibilidad y Compromiso Social en la Facultat d'informàtica de Barcelona*. En Actas de las XVI Jornadas de Enseñanza Universitaria de la Informática, Jenui 2010, pp. 249–256. Santiago de Compostela, julio de 2010.
- [21] Fermín Sánchez, Jordi Garcia, David López, Marc Alier, Jose Cabré, Helena García y Eva Vidal. *El método socrático como guía del Trabajo de Fin de Grado*. ReVisión, vol. 8, núm. 1. pp. 53–62. Septiembre de 2013.
- [22] Thomas J. Siller. *Sustainability and critical thinking in civil engineering curriculum*. Journal of Professional Issues in Engineering Education and Practice, vol. 127, núm. 3, pp. 104–108. Julio de 2001.
- [23] Edwin Kwan Lap Tam. *Developing a Sustainability Course for Graduate Engineering Students and Professionals*. International Journal of Engineering Education, vol. 23, núm. 6, pp. 1133–1140. Noviembre de 2007.
- [24] Mark C. Urban. *Accelerating extinction risk from climate change*. Science, vol. 348, núm. 6234, pp. 571–573. Mayo de 2015. DOI: 10.1126/science.aaa4984.
-



Dr. Fermín Sánchez Carracedo (Barcelona, 1962) es Técnico Especialista en Electrónica Industrial por la E.A. SEAT (Barcelona, España, 1981), Licenciado en Informática desde 1987 y Doctor en Informática desde 1996, los dos últimos títulos obtenidos en la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC Barcelona-Tech, Barcelona, España). Sus campos

de estudio son la arquitectura de computadores, la innovación docente y la educación para la sostenibilidad.

Desde 1987 trabaja como profesor en el Departament d'Arquitectura de Computadors de la UPC, donde es profesor Titular de Universidad desde 1997. Ha sido consultor de la Universitat Oberta de Catalunya (UOC) desde 1997 hasta 2010 y Vicedecano de innovación de la Facultat d'Informàtica de Barcelona (FIB) desde mayo de 2007 hasta junio de 2013. Desde julio de 2013 ocupa el cargo de Adjunto de Innovación en la FIB. Tiene varias decenas de publicaciones relacionadas con sus temas de investigación, es revisor de numerosas conferencias y revistas nacionales e internacionales y autor y coautor de varios libros y capítulos de libro. Actualmente trabaja en el desarrollo de nuevas arquitecturas multihebra para procesadores VLIW, la sostenibilidad en las Tecnologías de la Información y la innovación en la educación universitaria.

El Dr. Sánchez es miembro de AENUI, ha sido miembro del Comité Directivo de JENUI desde septiembre de 2006 hasta julio de 2015 y fue su presidente las ediciones 2011 a 2013, ha sido miembro del Comité de Organización y Programa de diversas conferencias y otros eventos nacionales e internacionales, es miembro de la ONG TxT (Tecnologia per Tothom) desde 2004 y ocupa la vicepresidencia desde 2013, es director del MAC (Museo de Arquitectura de Computadores) desde Febrero de 2006 y miembro de la junta directiva del Cercle Fiber-FIB Alumni desde Noviembre de 2002.



Dr. Jordi Garcia Almiñana (Barcelona, 1968) obtuvo el grado de Licenciado en Informática en la Facultat d'Informàtica de Barcelona (FIB) en 1991 y el grado de Doctor en Informática en el Departament d'Arquitectura de Computadors en 1997, ambos de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC Barcelona Tech).

En 1991 se incorporó al Departament d'Arquitectura de Computadors como profesor asociado en la FIB y en el año 1998 obtuvo una posición de profesor Titular de Universidad. También es consultor de la Universitat Oberta de Catalunya (UOC) desde 1998. Sus intereses en investigación se centran en el campo de los sistemas operativos, la optimización de entornos virtuales, y el proceso eficiente de grandes cantidades de datos (*big data*), así como en la innovación docente y la educación en sostenibilidad.

El Dr. Garcia fue vicedecano de extensión universitaria del 2001 al 2004, y vicedecano jefe de estudios del 2004 al 2010

en la FIB, cargo en el que fue el responsable de la puesta en marcha de los nuevos planes de estudio de la FIB adaptados al EEES. Del 2010 al 2013 fue Director Académico del Centro de Cooperación para el Desarrollo de la UPC Barcelona Tech. Fue miembro del equipo que obtuvo el premio a la calidad docente en el año 2005.



Dra. Eva Vidal recibió los títulos de Ingeniera Superior en Telecomunicaciones y Doctora Ingeniera en Telecomunicaciones (ambos Matrícula de Honor) por la UPC BarcelonaTech. Es Profesora Titular de Universidad desde 1998 en el Departamento de Ingeniería Electrónica de la UPC con adscripción a la

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicaciones. Sus intereses tanto en investigación como en docencia se centran en el área de la electrónica analógica y de RF, y en la sostenibilidad y el desarrollo en el área TIC. Es autora de varias decenas de publicaciones internacionales relacionadas con sus temas de investigación. Actualmente es la directora académica del Centro de Cooperación para el Desarrollo de la UPC.



David López (Barcelona, 1967) es profesor titular de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC). Licenciado y doctor en informática (UPC 1991 y 1998 respectivamente), imparte clases desde 1991.

Aunque su tesis versó sobre compilación y arquitecturas para códigos numéricos, en 2004 dio un giro radical a su investigación dedicándose a la educación, la ética y la sostenibilidad

en la informática, habiendo publicado más de 80 artículos científicos y divulgativos en esta nueva etapa. Ha impartido más de un centenar de talleres y conferencias en el tema de competencias transversales, especialmente en temas de sostenibilidad y comunicación. Es responsable de la competencia Comunicación en la Facultat d'Informàtica de Barcelona. En la actualidad, es presidente de la ONG Tecnología para Todos (TxT) y director del Instituto de Ciencias de la Educación de la UPC.

El Dr. López es miembro de las asociaciones AENUI, SEFI y ASEE.



Jose Cabré Garcia (Barcelona, 1958) es profesor titular en la Universitat Politècnica de Catalunya, con docencia en la Facultat de Informàtica de Barcelona (FIB). Especializado en el área de la macroeconomía, la política económica y la sostenibilidad. En el campo de la economía ha trabajado de asesor para

los gobiernos de Andorra y el gobierno local de la isla de Menorca. También ha participado en diversos programas Tempus (Hungría, Rumanía y Turkmenistán) y programas Alfa crean-

do una red de colaboración entre diversas Universidades de distintos países latinoamericanos (cresunem). En estos momentos es coordinador de la competencia Espíritu Emprendedor e Innovación en la Facultad de Informática de Barcelona y miembro del grupo de investigación STEP (sostenibilidad y compromiso social de la FIB-UPC).



Helena García Gómez (Barcelona, 1990) es estudiante de último curso de Ingeniería Informática en la Facultad de Informática de Barcelona (UPC). Desde febrero de 2013 trabaja a tiempo parcial en Grupo Catalana Occidente Tecnología y Servicios, AIE en tareas de seguridad de la información, LOPD y metodologías de desarrollo, entre otras.

Participa activamente en la Delegación de Alumnos de su facultad y desde 2012 colabora como becaria en el proyecto de sostenibilidad STEP-FIB. Está interesada en las actividades de cooperación y concienciación social. En Julio de 2011 participó en un proyecto de cooperación con Guatemala y El Salvador para el desarrollo de las TIC a través de la UPC, con el soporte del CCD (Centre de Cooperació per al Desenvolupament) y con la colaboración y ayuda de TxT (Tecnologia per a Tothom).



Marc Alier (Badalona-1971), responde también al nombre de Ludo.

En 1996 se graduó como Ingeniero en Informática por la UPC (<http://www.upc.edu>). La primavera del 2009 presentó su tesis doctoral: «Educació per a una societat de la informació sostenible» (Educación para una sociedad de la información sostenible.)

Desde 2002 es profesor e investigador en la UPC en la Facultat d' Informàtica de Barcelona (FIB <http://www.fib.upc.edu>) donde da clases de Gestión de Sistemas de Información y Aspectos Sociales y Ambientales de la Informática. Dirige el Master de Gestion Integral de la Empresa con SAP

en la UPC-School.

Desde 2004 trabaja en temas relacionados con el software libre aplicado a la educación para el desarrollo sostenible. Su labor se resume en un Tweet publicado en su cuenta de twitter (<http://twitter.com/granludo> en abril de 2009): «Ante la necesidad de mejorar el mundo, aprovechemos las TIC para aprender a Compartir, Colaborar y Hacer aquellos que nos Entretenga de verdad».

En esta línea: Colabora desde 2004 en la comunidad Moodle, pone en marcha y lidera diversos proyectos de software libre, escribe diversos blogs, produce podcasts, vídeos educativos, da conferencias e intenta consolidar un equipo de entusiastas que trabaje de forma sostenible en esta misma línea.

Se rumorea que antes del 2003 hizo de todo menos la fotosíntesis.



Carme Martín es licenciada en Informática por la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC) y obtuvo el doctorado europeo en ciencias de la computación por la UPC en el 2005. Es profesora del departamento de Ingeniería de Servicios y Sistemas de Información (ESSI) y miembro del centro de Tecnologías y Aplicaciones del Lenguaje y del Habla (TALP), ambos de la UPC. Desde 2010 es coordinadora de la competencia genérica “Actitud adecuada frente al trabajo” en la Facultad de Informática de Barcelona (FIB). Sus intereses en investigación incluyen sistemas de bases de datos, bases de datos temporales, bases de datos para el procesamiento del lenguaje natural, sostenibilidad y educación en ingeniería.



2015 F. Sánchez, J. Garcia, E. Vidal, D. López, J. Cabré, H. Garcia, M. Alier, C. Martín Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 4.0 Internacional que permite copiar, distribuir y comunicar públicamente la obra en cualquier medio, sólido o electrónico, siempre que se acrediten a los autores y fuentes originales y no se haga un uso comercial.