

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**SELECCIÓN DE MATERIALES EN EL DISEÑO MECÁNICO**  
**ESTUDIO DE UNA METODOLOGÍA PARA LA SELECCIÓN DE**  
**MATERIALES EN EL DISEÑO MECÁNICO.**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO**  
**REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA MECÁNICA**

**ALISSON DANIELA HERRERA PAZ**

**[alisson.herrera@epn.edu.ec](mailto:alisson.herrera@epn.edu.ec)**

**DIRECTOR: MARIO GERMÁN GRANJA RAMÍREZ**

**[mario.granja@epn.edu.ec](mailto:mario.granja@epn.edu.ec)**

**DMQ, febrero 2023**

## CERTIFICACIONES

Yo, ALISSON DANIELA HERRERA PAZ declaro que el trabajo de Integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.



---

ALISSON DANIELA HERRERA PAZ

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por ALISSON DANIELA HERRERA PAZ, bajo mi supervisión.



---

MARIO GERMAN GRANJA RAMÍREZ  
DIRECTOR

## DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio Institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.



ALISSON DANIELA HERRERA PAZ



MARIO GERMÁN GRANJA RAMÍREZ

## DEDICATORIA

Dedico este trabajo de integración curricular a:

A Karina Paz y Edison Herrera, mis dos guías y pilares, mis dos principales compañeros que me han llevado de su mano desde hace más de 25 años (y estoy segura que, desde antes de llegar a sus vidas, ellos ya estaban buscando las maneras de ofrecerme lo mejor). Ustedes me han dedicado su tiempo y amor en mis malos momentos, en cada evento y celebración, los amo papi y mami. Por eso, todo esto es por y para ustedes.

A Karim y Christopher, mis pequeños hermanos, para quienes espero haber sido y continuar siendo un buen ejemplo, pero, sobre todo, les dedico este trabajo como una muestra de que ellos tienen en mí un apoyo incondicional, y que nunca duden que cuentan conmigo para todo.

A mis abuelitas Marcia (siempre complaciendo mis gustos culinarios con sus recetas deliciosas que nadie iguala) y Rosa (siempre teniendo listos unos quimbolitos y unos ricos limones para mí), a mis tías, tíos, primos y primas; todos los miembros de mi querida familia que siempre han tratado de estar junto a mí en los momentos desde los más pequeños hasta los más importantes.

A mis dos mejores amigas, Clau y Delita, quienes llegaron a mi vida en el momento más inesperado y desde entonces no me han dejado de acompañar en cada paso que he dado para llegar hasta donde estoy hoy. Y por supuesto, a mis dos mejores amigos, Sebas y Alan, mis queridos niños gigantes que todo el mundo siempre ve como mis guardaespaldas, siempre cuidándome incluso a la distancia. Los amo a los cuatro.

## AGRADECIMIENTO

*“...invéntate, y vuelve a inventarte, cambia de tono y forma, que no puedan encasillarte jamás.”*

**Charles Bukowski.**

Hace 5 años mi vida tomó un rumbo incierto, siempre supe lo que quería hacer después, pero en ese momento no tenía idea. La Facultad de Ingeniería Mecánica se veía como algo muy lejano y ajeno para mí, y, sin embargo, fue en sus aulas y laboratorios donde descubrí que puedo ser mucho más de lo que me imaginaba. Por eso estoy agradecida de que el universo haya puesto esa prueba en mi camino que me dirigió hacia donde estoy ahora.

Quiero agradecer a Dios por día a día cubrirme con su manto de amor, reflejado en cada una de las personas que me acompañan en cada paso, con sus esfuerzos, cariño, enseñanzas y amor que han sido incondicionales, invaluable e impresionantes. Gracias papi y mami por siempre haberme hecho creer que puedo ser quien yo quiera ser, por permitirme desde muy pequeña expresar todo lo que yo siento y mostrar quien soy al mundo; gracias por soportar mis malos momentos, mis enojos, por acompañarme en mis desveladas, por proveerme siempre de todo lo que he necesitado y por siempre mostrarme su amor.

Gracias a mi familia por darme los mejores momentos, alegrías y enseñanzas de vida, por ser tan unidos y únicos, porque en cada uno de ustedes puedo encontrar un mundo entero por descubrir. Gracias por siempre hacerme sentir única y especial. Gracias por nunca dejar de bríndame su amor, cariño y compañía, porque me siento tan afortunada de dar este paso de la mano de todos y cada uno de ustedes.

Gracias a mis amig@s, algunos llegaron por casualidad, y otros estoy segura de que la vida los tenía preparados para mí, para que fueran quienes me acompañen hasta hoy y, espero que, para siempre. Ustedes también me han dado grandes momentos, experiencias, y aventuras. Soy tan afortunada por tener todavía conmigo a mis amigos del colegio, a mis amigos que estuvieron conmigo en mi primer día en la EPN, a mis amigos de los Scouts que el G7 me brindó, y a todos los demás amigos que el camino me ha dado.

Finalmente, quiero agradecer al Ing. Mario Granja, un gran profesor, quien me brindó su tiempo, paciencia y guía para poder llevar a cabo este trabajo de integración curricular.

Solo porque siento que en francés suena más bonito, les digo a todos: “Merci beaucoup”

# ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES .....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA .....	II
DEDICATORIA .....	III
AGRADECIMIENTO .....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO .....	V
RESUMEN.....	VII
ABSTRACT .....	VIII
1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO.....	1
1.1 Objetivo general .....	2
1.2 Objetivos específicos.....	2
1.3 Alcance.....	3
1.4 Marco teórico.....	3
El Diseño Mecánico .....	3
Los Materiales en el Diseño Mecánico.....	4
Estrategias de Selección .....	8
Huella Ecológica .....	11
Huella de Carbono.....	11
2 METODOLOGÍA.....	11
2.1 Comparación de las Metodologías de Selección de Materiales .....	11
2.2 Selección de Materiales de acuerdo con M. Ashby.....	14
2.3 Utilización del Cambridge Engineering Selector (CES) Edupack .....	18
2.4 Consideración de la Huella de Carbono en la Selección de Materiales.....	20
2.5 Utilización de la Herramienta Eco-Audit de CES Edupack.....	21
2.6 Análisis de Casos de Estudio en la Selección de Materiales .....	25
Selección de Materiales para Remos.....	25
Selección de Materiales para horquillas de una bicicleta de carreras .....	29
Selección de Materiales para Espejos de Grandes Telescopios .....	34

3	RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	40
3.1	Resultados .....	40
3.2	Conclusiones .....	43
3.3	Recomendaciones .....	44
4	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	45
5	ANEXOS.....	47
	ANEXO I. Ejemplos de Índices de Desempeño de Material.....	47
	ANEXO II. Informe Ejemplo Proyecto Eco Audit.....	48
	ANEXO III. Modelo de Bicicleta de 1920 .....	53
	ANEXO IV. Ejemplos de Índices de Desempeño de Forma.....	54

## RESUMEN

El presente trabajo de integración curricular estudia de una manera detallada la estrategia teórico-metodológica desarrollada por el Dr. Michael Ashby para la Selección de Materiales con aplicación directa en el Diseño Mecánico. Busca constituir una guía de este método con la finalidad de apoyar la rama de la Ingeniería Mecánica como es el diseño para lograr mejores resultados de rendimiento en etapas posteriores. Se emplea la herramienta digital desarrollada por el departamento de Ingeniería de la Universidad de Cambridge con el liderazgo del Dr. Ashby: CES Edupack, tomando como referencia las bases de datos Nivel 2, 3 y Ecodiseño en donde se incluyen todo el universo de materiales que corresponden a metales, cerámicos, polímeros, fibras, compuestos y naturales. Para un enfoque más directo dentro del Diseño de Elementos Mecánicos, se considera para análisis de casos de estudio las propiedades mecánicas, físicas y térmicas de los materiales que se encuentran estrechamente relacionadas con los indicadores de desempeño de material o forma. Mediante el uso de estos índices, se compara dos propiedades de los materiales de tal manera que se obtienen gráficos de barras o burbujas denominados Diagramas de Ashby mediante los que se puede verificar el cumplimiento de los requisitos de diseño para cada caso, así se corrobora la existencia de la relación entre la parte funcional de un elemento mecánico, los materiales de los que está conformado, la forma que se le ha otorgado en su diseño y su proceso de manufactura.

**PALABRAS CLAVE:** Ashby, diseño mecánico, requisitos de diseño, selección de materiales, ecoauditoría, indicadores de desempeño.



## **ABSTRACT**

The present document studies in a detailed way the theoretical-methodological strategy developed by Dr. Michael Ashby for the Selection of Materials with a direct application in Mechanical Design. Seeking to constitute a guide of use for this method in order to support the design branch of Mechanical Engineering to achieve better performance results in later stages of manufacture. The digital tool developed by the Department of Engineering of the University of Cambridge with the leadership of Dr. Ashby CES Edupack is used in this work, taking as reference the Level 2, 3 and Ecodesign databases where the entire universe of materials that are included is implemented in the analysis: metals, ceramics, polymers, fibers, composites, and natural materials. For a more direct approach within the Design of Mechanical Elements, the mechanical, physical and thermal properties of the materials that are closely related to the key performance indicators of material or shape are considered for case study analysis. Through the use of these KPI's, two properties of the materials are compared in such a way that bar or bubbles graphs called Ashby Diagrams are obtained through which compliance with the design requirements for each case can be verified, thus corroborating the existence of the relationship between the functional part of a mechanical element, the materials from which it is made, the shape that has been given to it in its design and its manufacturing process.

**KEYWORDS:** Ashby, mechanical design, design requirements, materials selection, eco-audit, key performance indicators.

# 1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO

La calidad de un producto está determinada por la interrelación fuerte que existe entre cuatro grupos de factores que son: la función, el material, la forma, y el proceso de fabricación; la función determina el material que se requiere con todas sus propiedades intrínsecas, mismas que deben emparejar con los requerimientos funcionales que demande el diseñador, a su vez existe una conexión entre función y material con otro factor que es la forma o propiedades geométricas como el momento de inercia, momento polar de inercia; y finalmente se debe considerar el proceso de fabricación, mismo que debe ser compatible con la función, el material y la forma geométrica. La integración de estos factores son el fundamento donde se puede sustentar la calidad de un producto, o lo que es lo mismo, en donde radica la vida útil y desempeño de un componente de máquina; son estos mismos factores los que directa o indirectamente se tiene presentes durante su diseño, pues permiten que se realice de manera adecuada la selección de los materiales que más se adapten a las necesidades del elemento a diseñar.

## DEFINICIÓN DE LA PROBLEMÁTICA

De acuerdo con el Ing. Fredy Llano, la principal y más grande causa de fallas en los elementos de máquinas obtenidos por diseño mecánico es la incorrecta selección del material apropiado para su fabricación, lo que se complementa con los procesos de manufactura empleados, como se muestra en la **Tabla 1.1**.

**Tabla 1.1.** Causas de las fallas determinadas en investigaciones diversas. [1]

<b>Causas de fallas determinadas en varias investigaciones</b>	
<b>Origen</b>	<b>Porcentaje</b>
Selección incorrecta de materiales	38
Defectos de fabricación	15
Tratamiento térmico incorrecto	15
Fallas de diseño	11
Condiciones imprevistas de operación	8
Control inadecuado de las condiciones de trabajo	6
Inapropiada inspección o control de calidad	3
Cambio equivocado de materiales	2

Los avances tecnológicos en el elemento mecánico tienen un largo recorrido en la historia, se han apoyado en el descubrimiento y desarrollo de materiales, así como también del proceso de fabricación usado en su obtención; en este sentido, una de las principales problemáticas que se presentan en el diseño mecánico es la inadecuada selección de los materiales para que un elemento mecánico tenga un correcto funcionamiento (performance).

Además, gracias a estos avances tecnológicos, existe la posibilidad de usar varios métodos de selección para correlacionarlos, de tal manera que se pueda tener una mayor eficiencia en la selección correcta del material. Sin embargo, es evidente que la mayoría de estos métodos propuestos por los investigadores parten de la disponibilidad de una amplia gama de materiales, que entran a un proceso de análisis y refinamiento, empleando: recomendaciones (métodos tradicionales), mapas de materiales (método gráfico) o con ayuda de software (bases de datos virtuales). En ese sentido, surge la necesidad de acoplar las herramientas digitales disponibles para las realidades de cada diseño mecánico en específico.

El presente proyecto estudia la influencia de estos cuatro factores descritos sobre la calidad de un producto, para que permitan fortalecer una metodología para la selección de materiales en el diseño mecánico.

## **1.1 Objetivo general**

Estudiar la metodología para la selección de materiales desarrollada por el Dr. Michael Ashby, aplicada al diseño mecánico.

## **1.2 Objetivos específicos**

1. Estudiar la metodología de Selección de Materiales para el Diseño de Elementos de Máquina desarrollada por el Dr. Michael Ashby.
2. Comparar la metodología de Selección de Materiales del Dr. Ashby con las desarrolladas por otros autores.
3. Describir el uso la herramienta de Selección de Materiales Cambridge Engineering Selector Edupack, software desarrollado por el Dr. Ashby
4. Estudiar la importancia de la inclusión de los aspectos ambientales durante el diseño mecánico para la selección de materiales.
5. Analizar casos de estudio de selección de materiales en el diseño mecánico de diversos productos que satisfagan necesidades puntuales, empleando las herramientas teóricas y computarizadas de la metodología del Dr. Ashby

### **1.3 Alcance**

El presente proyecto involucra el uso del software computacional CES (Cambridge Engineering Selector) para la selección de materiales; se realiza un estudio de la interrelación estrecha existente entre la parte funcional de un elemento de máquina, los materiales que lo componen, la forma en que se lo ha concebido y su proceso de fabricación; siendo estos factores los que determinan la calidad de un producto final. Se trata del estudio de la metodología desarrollada por el Dr. Michael Ashby.

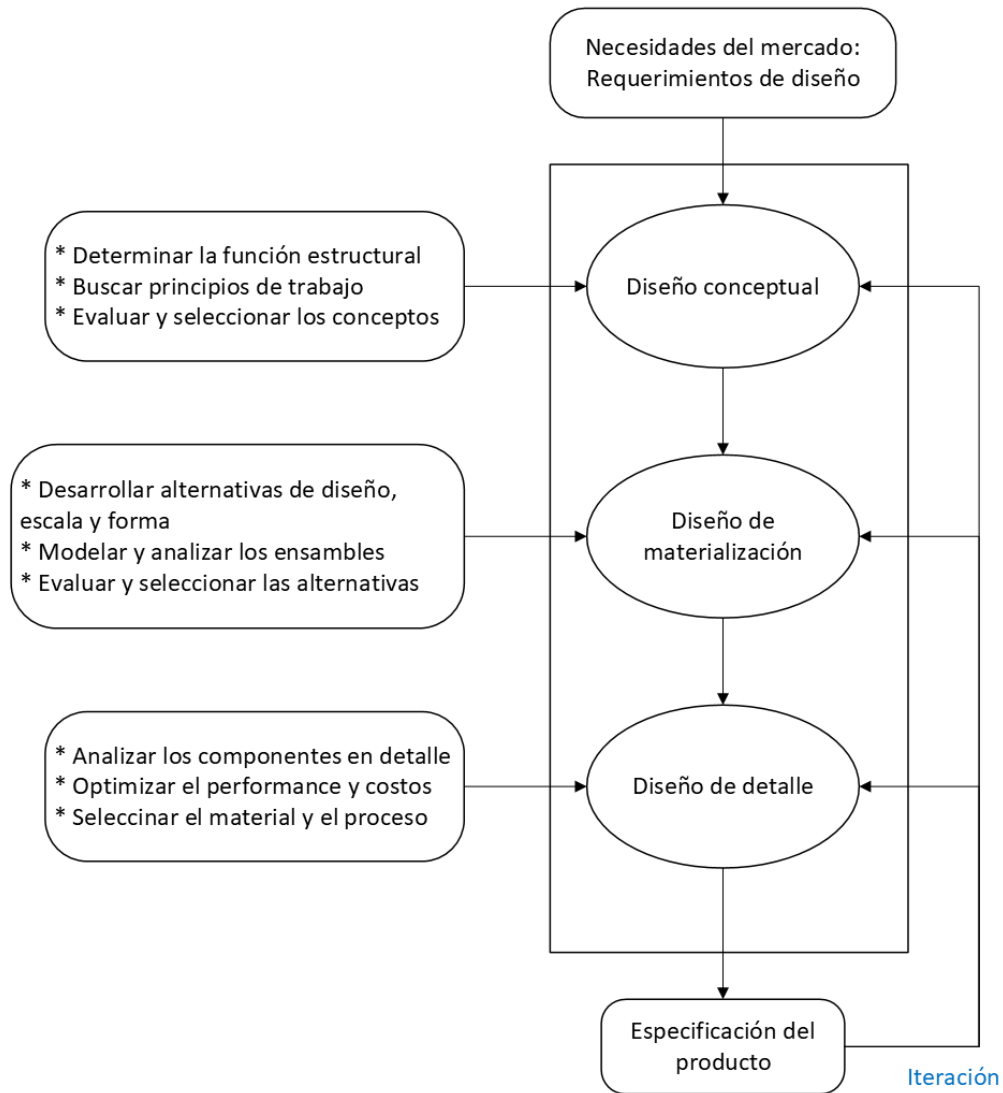
### **1.4 Marco teórico**

#### **El Diseño Mecánico**

Etimológicamente, la palabra diseño fue tomada del italiano *disegno* que significa dibujo o designio; y de *signare* que traducido sería signado o "lo por venir"; en base a esto se puede concebir al diseño como una representación gráfica del futuro, en el sentido de que el mismo acto de diseñar es el proceso previo a la búsqueda de una solución o conjunto de ellas [2]. De acuerdo con Shigley, diseñar consiste en la formulación de un plan que busca satisfacer una necesidad específica o resolver un problema particular; es decir, en el caso de que el plan conlleve a la creación física de un objeto, este debe ser funcional, seguro, confiable, competitivo, útil, que pueda fabricarse y comercializarse [3]. En la actualidad, el diseño es un proceso innovador y altamente iterativo, aunque también requiere de la toma de decisiones por la cantidad de información que se tiene al inicio de una problemática.

En el diseño mecánico, se busca crear productos que permitan satisfacer una necesidad en específico. Un sistema mecánico está formado por varios elementos mecánicos, y, piezas móviles que transmiten potencia y movimiento, por lo que el diseñador debe tener la capacidad de diseñar elementos individuales e integrarlos en un sistema coordinado, respondiendo a las necesidades del "cliente". El diseño de un nuevo producto parte de varias condiciones que son base de todo el proceso de desarrollo y fabricación; a partir del cual inicia un proceso de mejora continua, de acuerdo con la aceptación o rechazo del cliente hacia el producto. [4]

El diseño inicia con la identificación de una necesidad existente en el mercado que es detallada como un conjunto de “requisitos de diseño”, a través del concepto, la realización y el análisis para obtener la especificación del producto, como se observa en el diagrama de flujo de la **Figura 1.1**.

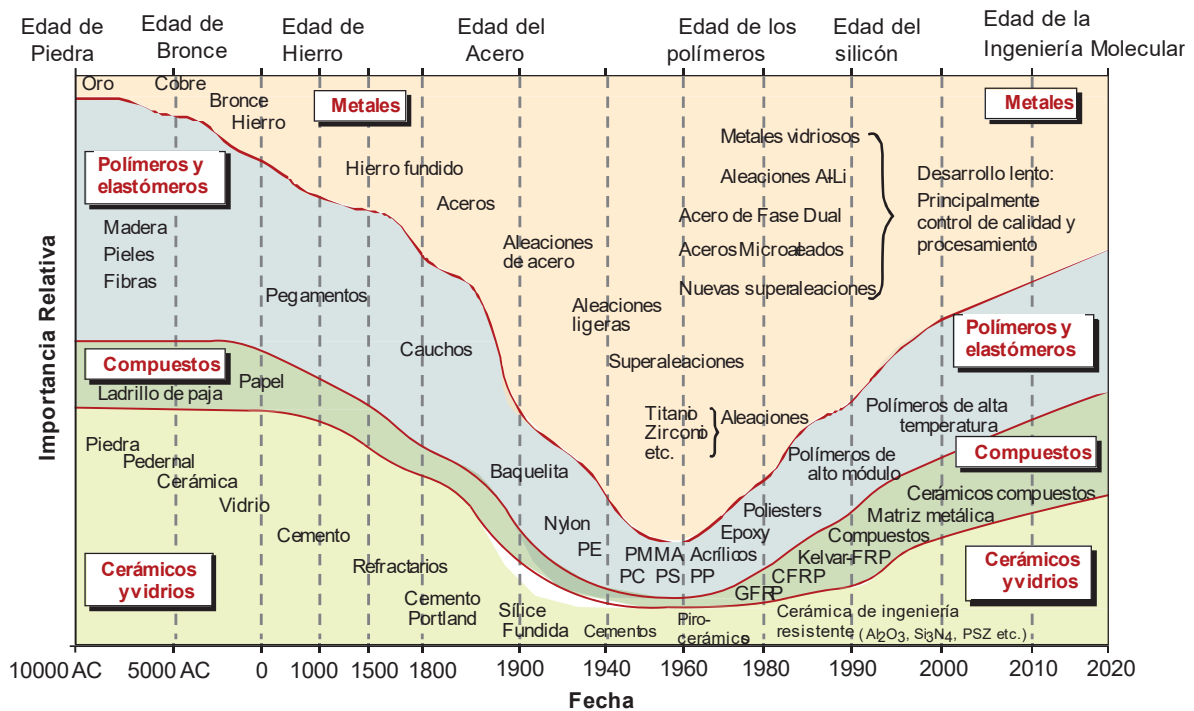


**Figura 1.1.** Diagrama de Flujo del Proceso de Diseño. [3]

## Los Materiales en el Diseño Mecánico

En la historia de la humanidad, los materiales han formado parte del avance de la humanidad en todos los sentidos, es por eso que las edades del hombre surgen a partir de los materiales que utilizó: piedra, bronce, hierro. Cuando un hombre moría, los materiales que atesoraba se enterraban con él como lo hicieron Tutankamón o Agamenón (espada de bronce y máscara de oro), cada tesoro representaba la alta tecnología de su época.

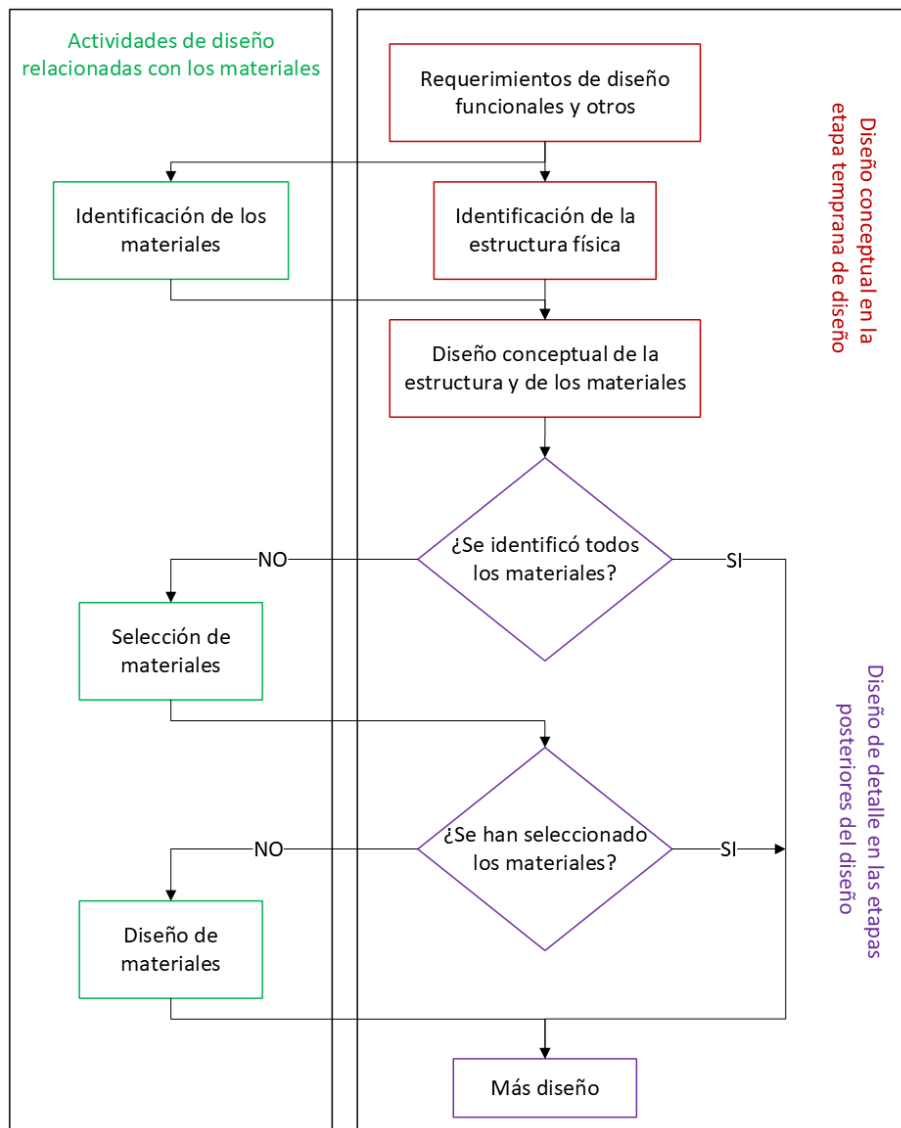
En la actualidad, se vive la era en la que existe una inmensa gama de materiales, que han tenido rápida evolución y han variado el rango de sus propiedades. El diseño innovador tiene que ver con la explotación imaginativa de las propiedades que ofrecen los materiales nuevos o mejorados, para aprovechar todo lo que la era de los materiales avanzados tiene para ofrecer a la ingeniería. La evolución de los materiales y su crecimiento hasta aproximadamente 2020 se muestran con más detalle en la **Figura 1.2**.



**Figura 1.2.** Diagrama de la evolución de los materiales de ingeniería con el tiempo<sup>1</sup>. [3]

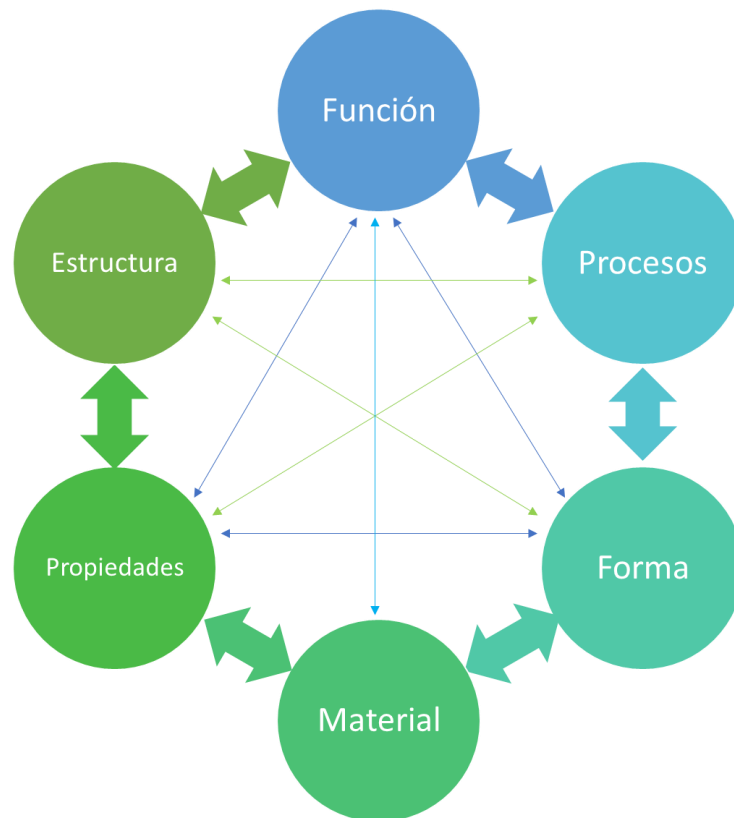
Como se lo ha presentado en la sección anterior, el diseño mecánico tiene varias fases en el proceso para el desarrollo de productos. En cada una de estas etapas del diseño, es de gran importancia el uso de herramientas para la selección de materiales: En la etapa conceptual del diseño los requerimientos tienen cierto nivel de precisión y amplitud, con valores de propiedad aproximados para una gama de materiales lo más amplia posible. En la mitad del proceso de diseño, los datos de los requerimientos son específicos para un subconjunto de materiales más preciso y detallado. La última fase requiere aún mayor precisión y detalle para uno o muy pocos materiales, se deben utilizar las propiedades descritas por los proveedores en los cálculos de diseño; aunque, si el componente es crítico, es prudente realizar pruebas internas para medir las propiedades críticas con una muestra del material. [3]

<sup>1</sup> La escala de tiempo no es lineal. La tasa de cambio es más rápida en la actualidad que en otro momento de la historia.



**Figura 1.3.** Diagrama de flujo que relaciona las actividades de selección de materiales con las etapas del diseño mecánico. [5]

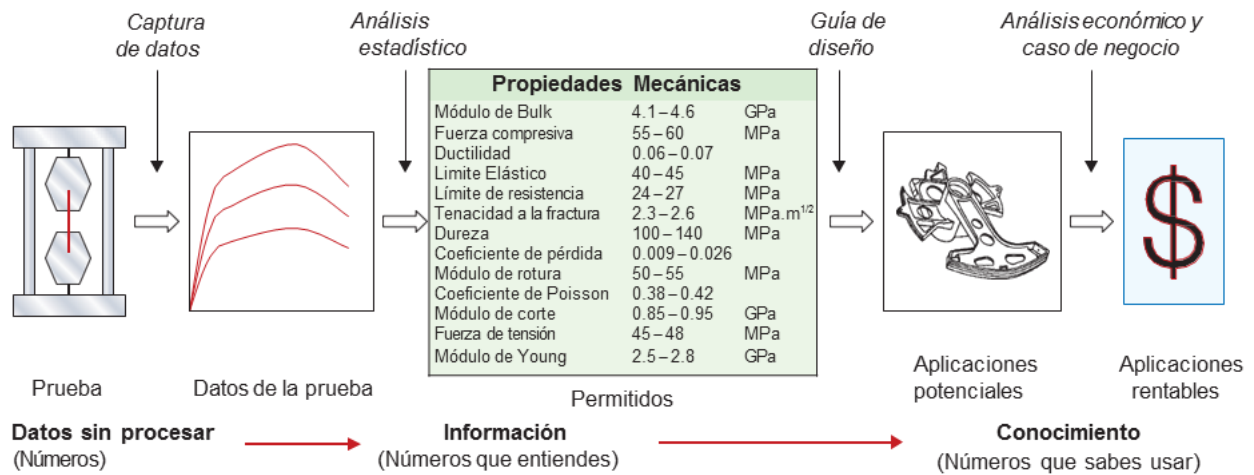
Entonces, durante el diseño mecánico, se identifica que la elección del material depende de la función que el producto final tendrá, aunque no es la única restricción ni condición para su elección; en realidad la calidad de producto depende de la interacción entre la función, el material, el proceso y la forma. Esto se debe a que, para dar forma a un material, este se debe someter a procesos de manufactura para ser modificado y definir su forma, talla, precisión y costo; estas interacciones entre las propiedades, funciones, procesos son bidireccionales, es decir, la forma restringe la selección del material y el proceso; pero el proceso limita la selección del material y la forma que se le puede dar, como se presenta en la **Figura 1.4.**



**Figura 1.4.** Diagrama de relación entre los elementos del diseño mecánico que permiten seleccionar un material. (Fuente: Elaboración propia)

Un ingeniero que se encuentre en desarrollo de un diseño mecánico, para seleccionar materiales adecuados necesita datos sobre las propiedades de los materiales disponibles, aunque en realidad los diseñadores tienden a ser conservadores en su elección, en especial cuando se trata de incluir en la selección a materiales con los que no están familiarizados. Para un ingeniero de diseño, los datos de materiales antiguos y bien probados son confiables y fáciles de encontrar, mientras que los datos de materiales más nuevos pueden estar incompletos o no ser confiables. Sin embargo, la innovación solo es posible incluyendo a los nuevos materiales, por lo que es importante conocer la mejor manera de juzgar la calidad de los datos de propiedades, para esto se realizan pruebas en probetas de material de interés de manera que se pueda extraer datos reales que permitan evaluar y analizar su funcionalidad, como se muestra en la **Figura 1.5**. En este esquema, se busca obtener la información de los materiales que se encuentra en el centro: datos "permitidos" estructurados para el diseño y las características de un material que se relacionan con su capacidad para ser transformado, registros de experiencia y lineamientos de diseño para su uso. [3]





**Figura 1.5.** Esquema de la información obtenida de los tipos de materiales mediante la realización de pruebas y ensayos. [3]

## Estrategias de Selección

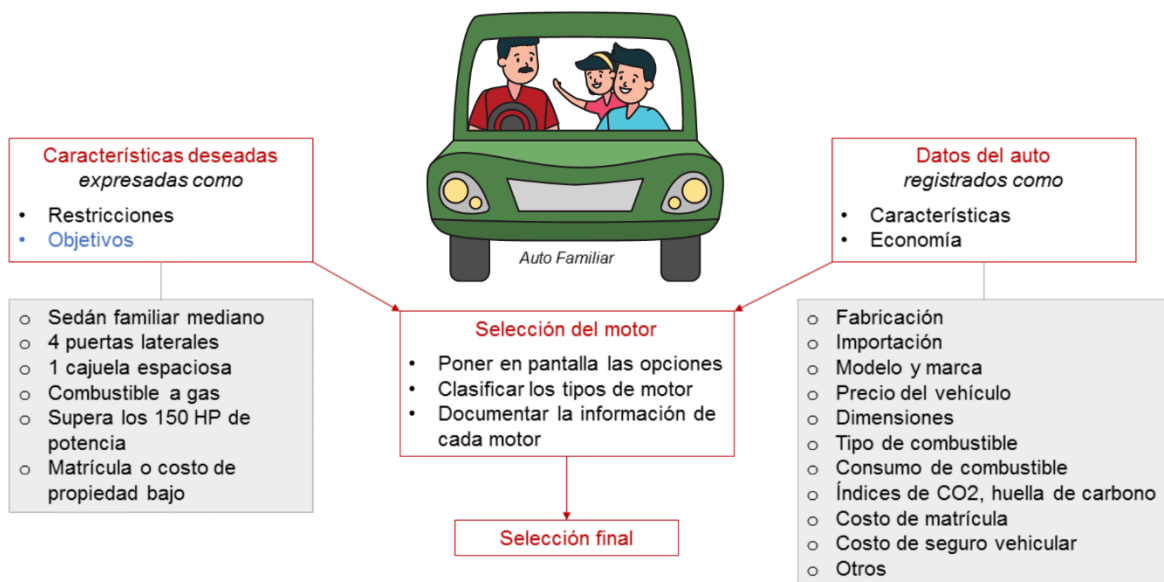
En la actualidad, a diario la humanidad se enfrenta con oportunidades de selección, desde la elección de lo que se comerá para el desayuno hasta la elección de un vehículo de uso personal. En cada una de estas situaciones existen criterios y variables a evaluar para que la selección tenga fundamentos y propósitos. En este caso, para un mejor entendimiento de este proceso, se tomará como base la selección de un vehículo.

En este, y en todos los momentos en que se requiera hacer una elección, lo primero que se debe hacer es recopilar la información relevante que proporcione detalles del funcionamiento, características y especificaciones de los vehículos, los términos que se debe conocer de un auto antes de su adquisición y que son proporcionados por el fabricante se presentan a continuación [6]:

- 1) **PROPULSIÓN:** Motor diesel/gasolina/híbrido, Cilindrada (cc), Válvulas por cilindro, Tracción delantera/trasera/integral, Cambio manual/automático, Neumáticos y llantas.
- 2) **PRESTACIONES:** Potencia (CV), Par máximo/vueltas, Aceleración, Velocidad máxima, Consumo urbano/combinado, Autonomía, Relación peso-potencia.
- 3) **SEGURIDAD:** Frenos de disco/de tambor, ABS, ASR, ESP, Suspensión y amortiguación, Airbag frontal/lateral/de cortina, Pretensor pirotécnico, Aviso salida de carril, Faros halógenos.

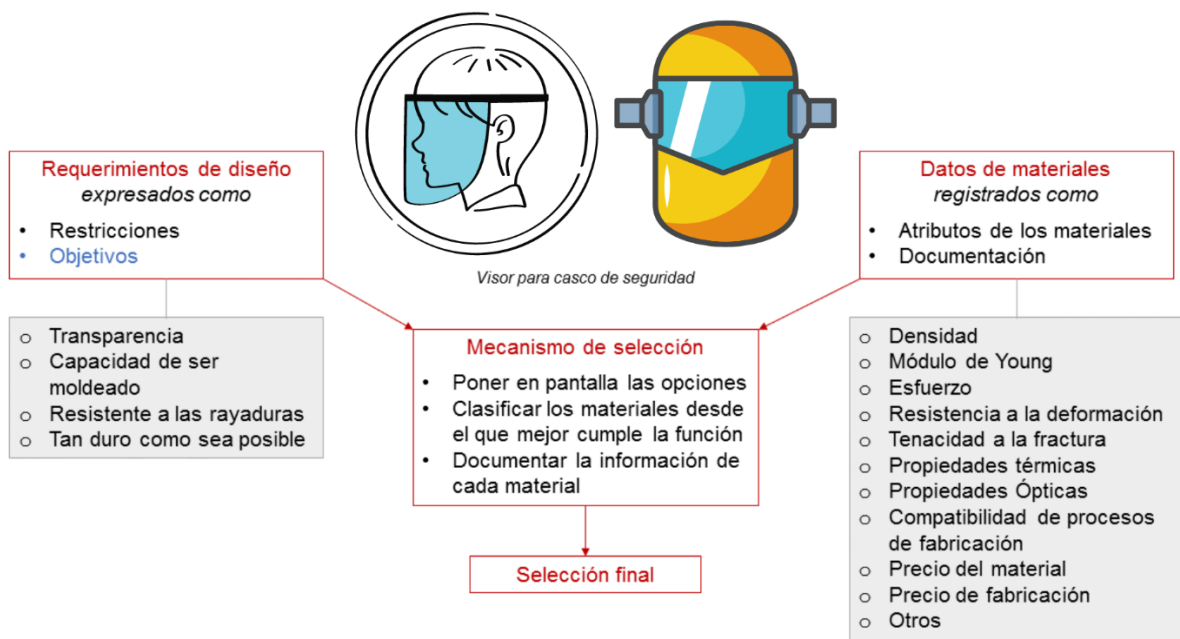
- 4) **CONFORT:** Dimensiones (largo, ancho, alto), distancia entre ejes, Ancho de vía, Diámetro de giro, Capacidad del maletero, Dirección asistida, Número de puertas, Aire acondicionado o climatizador.
- 5) **COSTE:** Precio matriculado, Consumo de combustible, Neumáticos, Seguro terceros/a todo riesgo/con franquicia, Período de mantenimiento, Red de servicio técnico, Coste del mantenimiento.
- 6) **EXTRAS:** Regulador de velocidad, Teléfono manos libres, Espejos eléctricos calefactados, Luneta térmica, Pintura metalizada, Cierre centralizado, Asistencia al aparcamiento, Asistente de salida en pendiente.

Una vez se ha obtenido toda la información necesaria, esta debe ser analizada o procesada para compararla y determinar qué relación de datos da mejores resultados a largo plazo que es lo que se busca en un auto. En un primer procesamiento se filtrará las mejores opciones del mercado, luego se las categorizará en base a nuevos parámetros y finalmente se documentará esta información de tal manera que se pueda tener de manera cuantitativa más que cualitativa la decisión final de selección. Este proceso se presenta resumido en la **Figura 1.6**.



**Figura 1.6.** Esquema de las estrategias empleadas en la selección de un automóvil. [3]

Cuando se tiene una idea de las estrategias que se pueden emplear en un proceso general de selección como el de la **Figura 1.6**, se pasa a analizar cómo aplicar estas estrategias en un proceso de selección de materiales. Para esto, se considera la importancia de la seguridad del rostro en diversas actividades, desde aplicaciones industriales hasta defensa personal en el caso de miembros de la fuerza pública (policía, militares, etc.), como ejemplo se tiene a un visor para casco. Los requisitos de diseño se expresan primero como restricciones y objetivos, que se emplearán para la detección y los elementos restantes se clasifican de acuerdo con su objetivo, expresado con un índice material en función del diagrama presentado en la **Figura 1.7**.



**Figura 1.7.** Esquema de las estrategias empleadas en la selección de material para ser empleado en el visor de un casco de seguridad. [3]

## **Huella Ecológica**

William Rees creó el concepto y método de cálculo de la Huella Ecológica en conjunto con Mathis Wackernagel. Ambos investigaron acerca de las políticas públicas para condiciones ecológicas que buscan el desarrollo socioeconómico sostenible, y en 1996 publicaron *Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth*. Además, Wackernagel publicó un informe que señala que en la actualidad se ha superado el 120% de la capacidad ecológica del planeta, es decir, los ecosistemas pueden no ser capaces de proporcionar los recursos naturales y de absorber los residuos o emisiones. [7] [8]

El estudio de la Huella Ecológica tiene el propósito de sopesar la sobrecarga que se ha puesto sobre el planeta y sus recursos, por eso, Rees y Wackernagel han desarrollado la *metodología de cálculo de la Huella Ecológica, para medir el peso o demanda de recursos sobre los ecosistemas a través del consumo, se considera una herramienta contable que permite estimar los requerimientos en términos de recursos y asimilación de residuos para satisfacer las necesidades de áreas productivas globales*. [9]

## **Huella de Carbono**

Este concepto corresponde a la medida del impacto de todos los gases de efecto invernadero (GEI) producidos por las actividades, desde las individuales cotidianas hasta las productivas, en el medio ambiente; se mide en toneladas o kilos de CO<sub>2</sub> equivalente de GEI, y es producida a diario por la quema de combustibles fósiles. [9]

## **2 METODOLOGÍA**

### **2.1 Comparación de las Metodologías de Selección de Materiales**

Existen diversos métodos que se han desarrollado con el avance del tiempo para la selección de materiales, muchos investigadores han trabajado arduamente para generar procesos convincentes que permitan determinar el mejor material para una determinada aplicación. A continuación, se describe las metodologías desarrolladas por los doctores Ashby, Farag y Raman respectivamente.

Metodología de selección de materiales de acuerdo con el Dr. Michael Ashby [3]

Para un componente mecánico de un producto en desarrollo, los requisitos de diseño especifican lo que este debe hacer, pero en realidad no determinan ninguna especificación en cuanto a las propiedades deben tener los materiales que lo conforman. En este sentido, Ashby propone como primer paso en la selección de materiales a la “traducción” que busca convertir los requisitos de diseño en restricciones y objetivos que se pueden aplicar a la base de datos de materiales existentes. Después, es necesario filtrar las opciones de acuerdo con los establecido en la etapa anterior, eliminando los materiales que no cumplen con las restricciones. Más adelante, se debe realizar una clasificación, ordenando a los materiales filtrados en base a diversos criterios que garanticen su capacidad para cumplirlos, lo ideal en realidad es que los materiales puedan minimizar costos o maximizar propiedades mecánicas. Finalmente, se realiza la documentación, que es el proceso en el que se explora a detalle a las opciones más prometedoras, considerando su uso en la actualidad, casos de fallo y la mejor manera emplearlos en el diseño de elementos mecánicos.

Metodología de selección de materiales de acuerdo con el Dr. Mahmoud Farag [10]

Para el diseño y desarrollo de productos en la industria de acuerdo con Farag se inicia con un estudio de la factibilidad e identificación de necesidades para lo que se realiza una investigación de mercado, de las necesidades del usuario de manera que se genera conceptos y filtrado en función a un análisis económico que permita llegar a la selección de la solución óptima. Con la información y requerimientos obtenidos, se procede al diseño del nivel del sistema, y luego al diseño de Detalle de la Selección de Materiales y Procesos para ingresar las opciones de materiales ya empleados en prototipos a un proceso de Prueba y Refinado.

Metodología de selección de materiales de acuerdo con Dr. Aravamudhan Raman [11]

Para Raman, el primer paso en la selección de materiales es el diseño, pues los parámetros pueden ajustarse después del diseño básico y el establecimiento de las especificaciones. En este punto, el diseño puede ser ajustado en la mayoría de los caso, esto se realiza en función de la economía, tomando en consideración que la relación costo total/vida útil del componente sea lo más pequeña posible. Después del ajuste, se realiza una definición de materiales, requerimientos de desempeño y otros factores que son establecidos en función del diseño para finalmente especificar las variaciones y tolerancias en las propiedades que se pueden permitir para el correcto funcionamiento de un elemento mecánico.

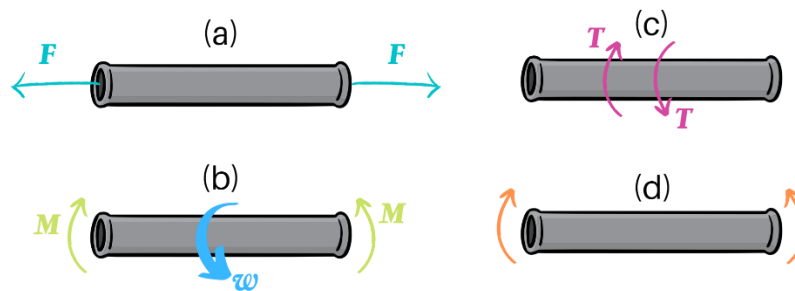
**Tabla 2.1.** Resumen comparación de tres métodos de selección de materiales (Fuente: Elaboración propia)

De acuerdo con el Dr. M. Ashby		De acuerdo con el Dr. M. Farag		De acuerdo con el Dr. A. Raman	
1	Traducir los requerimientos de diseño expresado como función, restricción, objetivos o variables libres	1	Estudio de factibilidad, identificación de necesidades, selección de materiales	1	El primer paso en la selección de materiales es el diseño
2	Filtrar usando restricciones eliminar materiales que no cumplan con el trabajo requerido	2	Diseño del nivel del sistema	2	Ajuste de Diseño
3	Clasificar usando objetivos encontrar los materiales filtrados que pueden hacer mejor el trabajo requerido	3	Diseño de Detalle y Selección de Materiales y Procesos	3	El diseño se ajusta, a menudo en función de la economía. Regla: El costo total/vida útil del componente debe ser lo más bajo posible.
4	Buscar documentación buscar la historia familiar de los materiales candidatos que se encuentran en los primeros lugares de la clasificación	4	Diseño de configuración (realización); Diseño de detalles finales; Reseñas de diseño	4	Definición de materiales, requerimientos de desempeño y otros factores
5	Elección final de material	5	Prueba y refinamiento	5	Propiedades del material y requisitos de rendimiento y otros factores, se definen con el diseño.
		6	Lanzamiento del producto	6	Variaciones y tolerancias
		7	Planificación y Programación de Proyectos; Fabricación; Control de calidad; Embalaje; Marketing; Servicio postventa	7	se especifican las variaciones y tolerancias en las propiedades que se pueden permitir
		8	Vender el producto		
		9	Costo de Ingeniería de Producto; Costo real de fabricación; Gastos de Venta y Costo Administrativo; Precio de venta		
		10	Planificación para el Retiro del Producto y Consideraciones ambientales		
		11	Reciclaje de Materiales; Fuentes de Materiales para Reciclaje; Infraestructura para el Reciclaje de Materiales de Empaque; Clasificación; Procesamiento de chatarra; Reciclabilidad de Materiales		

## 2.2 Selección de Materiales de acuerdo con M. Ashby

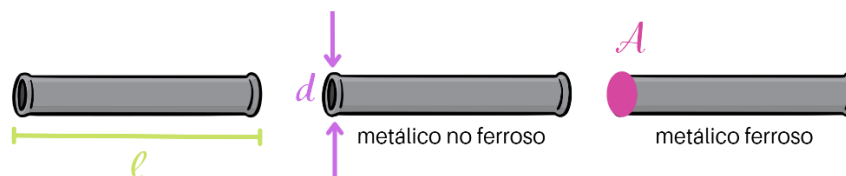
Como se mencionó en el apartado anterior, en el diseño de elementos de máquina, esta metodología inicia con la **traducción** de los requerimientos funcionales o deseos del diseñador/cliente en cuatro partes:

1. *Función*, que es determinada por las cargas, es lo que se busca que logre realizar el componente diseñado, por ejemplo: soportar una carga, contener una presión, transmitir calor, etc.



**Figura 2.1.** Representación de la función de los elementos de máquina: (a) tirante, (b) eje, (c) árbol, (d) viga. (Fuente: Elaboración propia)

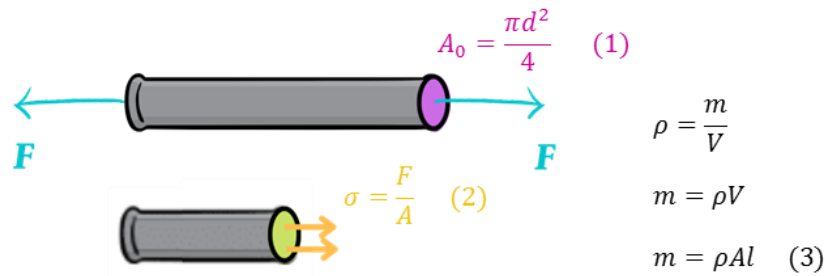
2. *Objetivo*, busca la optimización del elemento de máquina, como: "minimizar" peso o "maximizar" rendimiento, reducir costos, garantizar seguridad, etc.
3. *Restricción*, dada por los requisitos de diseño en cuanto a dimensiones o funcionalidades del elemento, pues en el diseño de un elemento de máquina se puede buscar, por ejemplo: que sus dimensiones sean fijas, que soporte cargas de diseño sin fallar, que sea aislante, que pueda funcionar a cierta temperatura o entorno, etc.



**Figura 2.2.** Representación de las posibles restricciones en elementos de máquina (Fuente: Elaboración propia)

4. *Variable libre*, la más importante de esta etapa, pues en realidad el diseñador tiene la libertad de variar todo lo que no ha sido restringido por los requisitos de diseño, generalmente se toma una de las dimensiones como variable libre cuando se busca que el elemento cumpla una función específica.

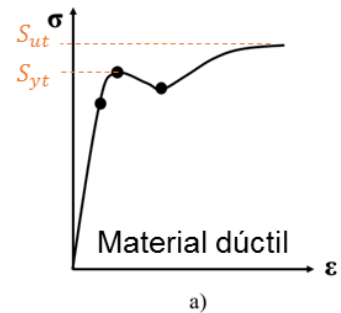
La segunda etapa de selección es el **screening (filtro o tamización)** de los materiales de acuerdo con su capacidad de cumplir con la función que se ha asignado en la primera etapa. Para esto se emplean los conocidos indicadores de desempeño para el material (M), para su forma (G) o para su función (F). A continuación, se presenta la determinación del indicador de desempeño de material (más índices se pueden encontrar en el **Anexo I**) para un elemento de máquina “tirante” que trabaja con esfuerzo de tracción:



1. Análisis para un material dúctil

$$\eta = \frac{S_{yt}}{\sigma}$$

$$\eta = \frac{S_{yt} \times A}{F} \quad (4)$$



Despejar A de la ecuación (4)

$$\Rightarrow A = \frac{\eta \times F}{S_{yt}} \quad (5)$$

Reemplazar (5) en la ecuación (3)

$$m = \rho \times \frac{\eta \times F}{S_{yt}} \times l \quad (6)$$

Reordenando (6)

$$m = \eta F l \left( \frac{1}{\frac{S_{yt}}{\rho}} \right) \quad (7)$$

De (7) se puede extraer el indicador de desempeño de material M

$$M = \frac{S_{yt}}{\rho}$$



2. Análisis para un material frágil

$$\eta = \frac{S_{ut}}{\sigma}$$

$$\eta = \frac{S_{ut} \times A}{F} \quad (8)$$

Despejar A de la ecuación (8)

$$\Rightarrow A = \frac{\eta \times F}{S_{ut}} \quad (9)$$

Reemplazar (9) en la ecuación (3)

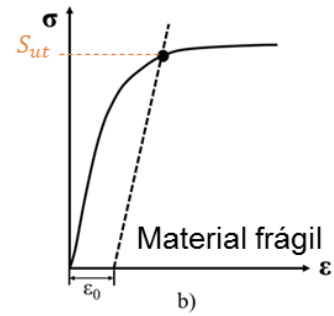
$$m = \rho \times \frac{\eta \times F}{S_{ut}} \times l \quad (10)$$

Reordenando (10)

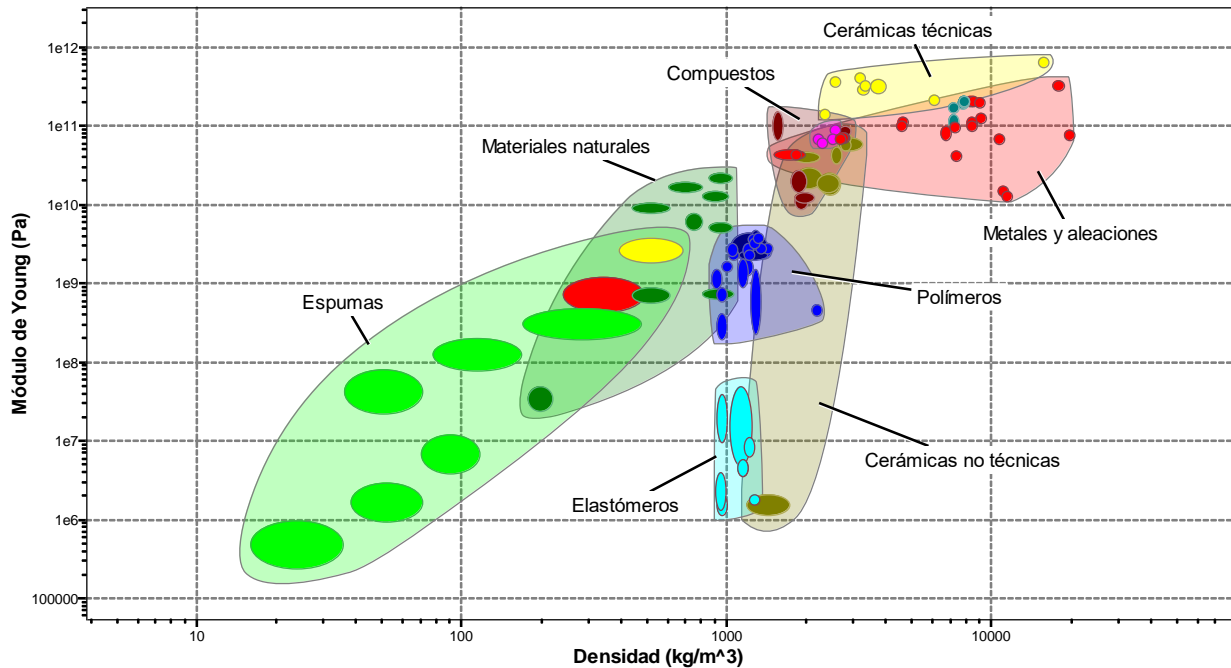
$$m = \eta F l \left( \frac{1}{\frac{S_{ut}}{\rho}} \right) \quad (11)$$

De (11) se puede extraer el indicador de desempeño de material M

$$M = \frac{S_{ut}}{\rho}$$



Una vez se ha filtrado a los materiales más aptos para ser empleados en el diseño, se los ingresa a un **ranking o clasificación**, es decir, se ordenan del “mejor” al “peor” en función del desempeño que tienen, empleando criterios de optimización indicados anteriormente. Estos criterios se basan en la propiedad o grupo de propiedades que maximizan el rendimiento de un diseño determinado y que se denominada *índice de material*, del cual existen muchos tipos, cada uno asociado con la maximización de algún aspecto del rendimiento en específico. Para realizar de mejor manera una clasificación apropiada, se emplean los **Diagramas de Ashby**, que permiten mediante el método gráfico presentar una relación entre las propiedades de los materiales y su clasificación; estos gráficos de Ashby permiten comparar propiedades, por ejemplo, la resistencia y densidad de los materiales: en el eje Y puede colocarse el módulo de Young (resistencia del material respecto a su área) y en el eje X se tiene densidad (peso del material respecto a su volumen), como se muestra en la **Figura 2.3**.



**Figura 2.3.** Diagrama de Ashby para comparar el módulo de Young y la Densidad de diversos materiales. (Fuente: Elaboración Propia mediante CES Edupack 2019)

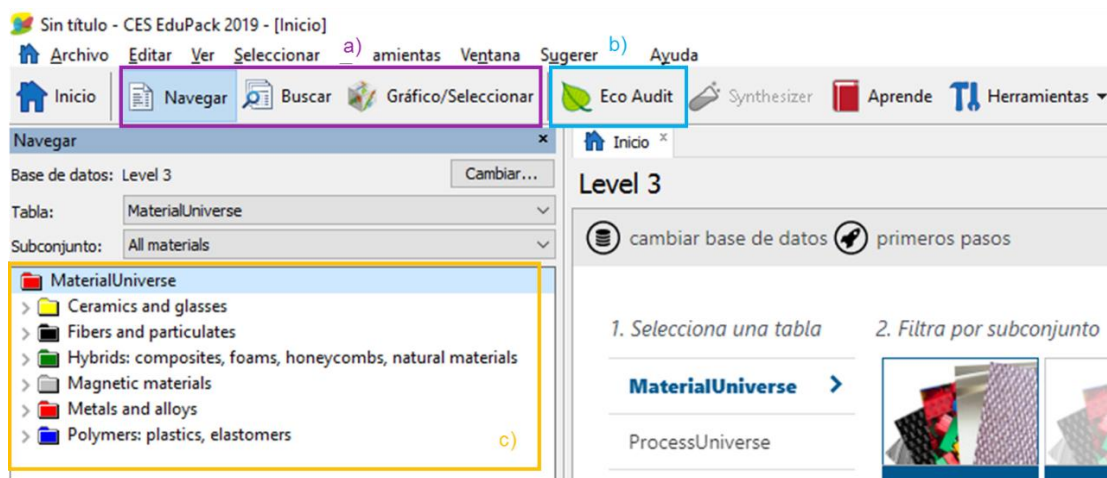
Gracias a las etapas anteriores, se ha podido generar un “listado” de los materiales que mejor se acoplan a los requerimientos y criterios de rendimiento, con lo que se puede realizar el **seeking o documentación de la información**, es decir, se busca el perfil detallado de cada candidato.

La documentación es un proceso descriptivo, gráfico o pictórico, pues depende de la información que se tome como base para cada material, se puede emplear casos de estudio de usos previos, análisis de fallas o de corrosión, investigación sobre disponibilidad y precios, entre otros. Todos estos datos se pueden obtener de manuales, hojas de datos de proveedores, informes de ensayos, etc. El objetivo es que las opciones sean las mínimas posible hasta que la combinación de los requisitos de diseño y los atributos del material permitan dar con la mejor alternativa.

Finalmente, la selección definitiva depende de las **condiciones locales**, pues influye la experiencia del personal a cargo de la manipulación del material para la fabricación del diseño, el equipo o maquinaria que se empleará, la disponibilidad de proveedores locales o internacionales para importación, entre otros. Entonces, en muchos casos, la decisión de selección de material pasará a ser directamente del diseñador, de su experiencia y conocimientos previos.

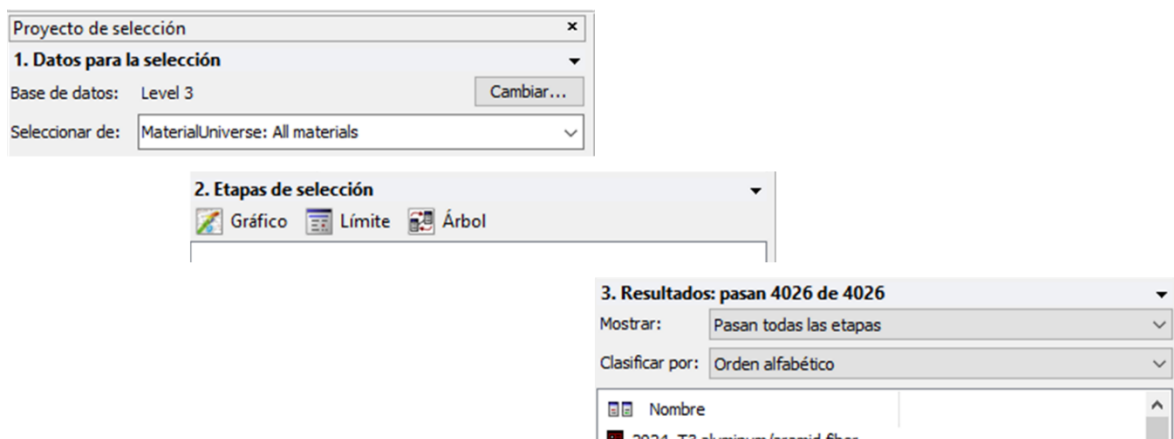
## 2.3 Utilización del Cambridge Engineering Selector (CES) Edupack

CES Edupack posee una base de datos con 3 niveles, que consta de alrededor de más de 3750 de los materiales más utilizados y los procesos más comunes en la industria, con una información numérica extensa, pautas de diseño, propiedades ecológicas y notas técnicas. El programa posee 3 herramientas principales de control: **Navegar**, **Buscar**, **Seleccionar** como muestra la **Figura 2.4.a)**. En *Navegar* se puede encontrar el universo de materiales con sus divisiones en Cerámicos, Fibras, Híbridos, Magnéticos, Metales y Polímeros como se muestra en la **Figura 2.4.c)**. [12]



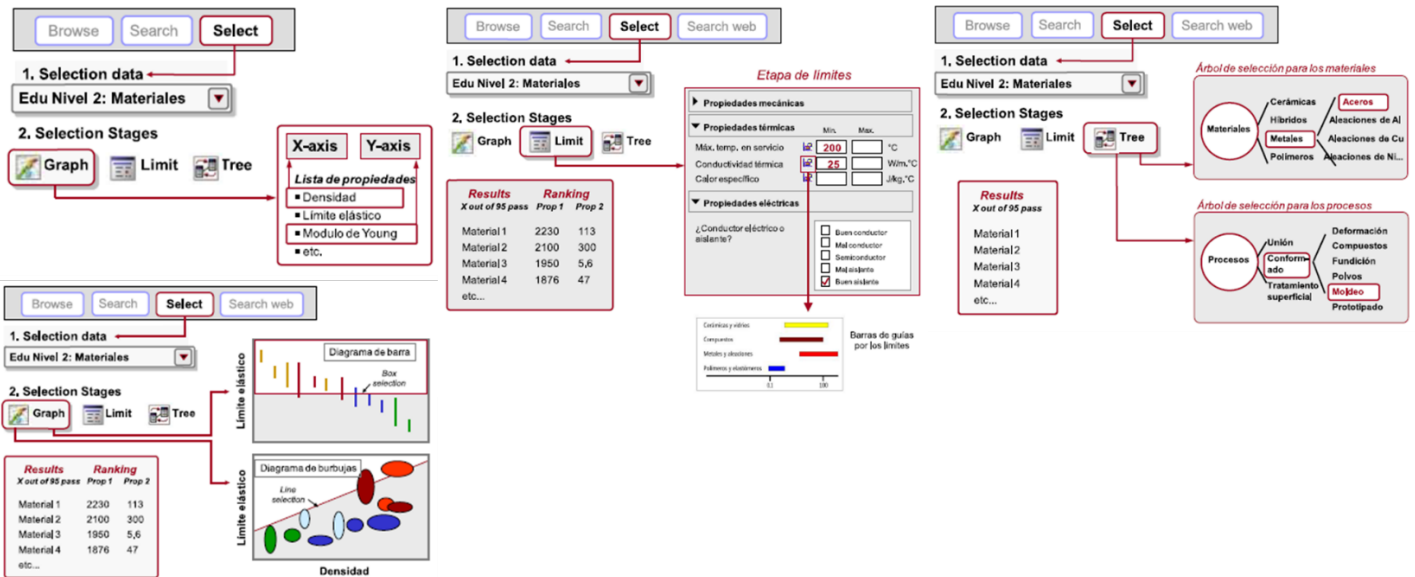
**Figura 2.4.** Captura de pantalla de inicio tomada de CES Edupack 2019.

La herramienta *Seleccionar* sirve para crear proyectos de selección, en donde se definirá los parámetros para, mediante un gráfico, presentar los materiales clasificados y facilitar la selección en 3 pasos: Datos para la selección (Base de datos), Etapas de selección (Gráfico, Límite, Árbol), Resultados (de acuerdo con la base de datos, exactamente 4026 materiales, de acuerdo con la **Figura 2.5**.



**Figura 2.5.** Captura de pantalla de "Proyecto de selección" de CES Edupack 2019.

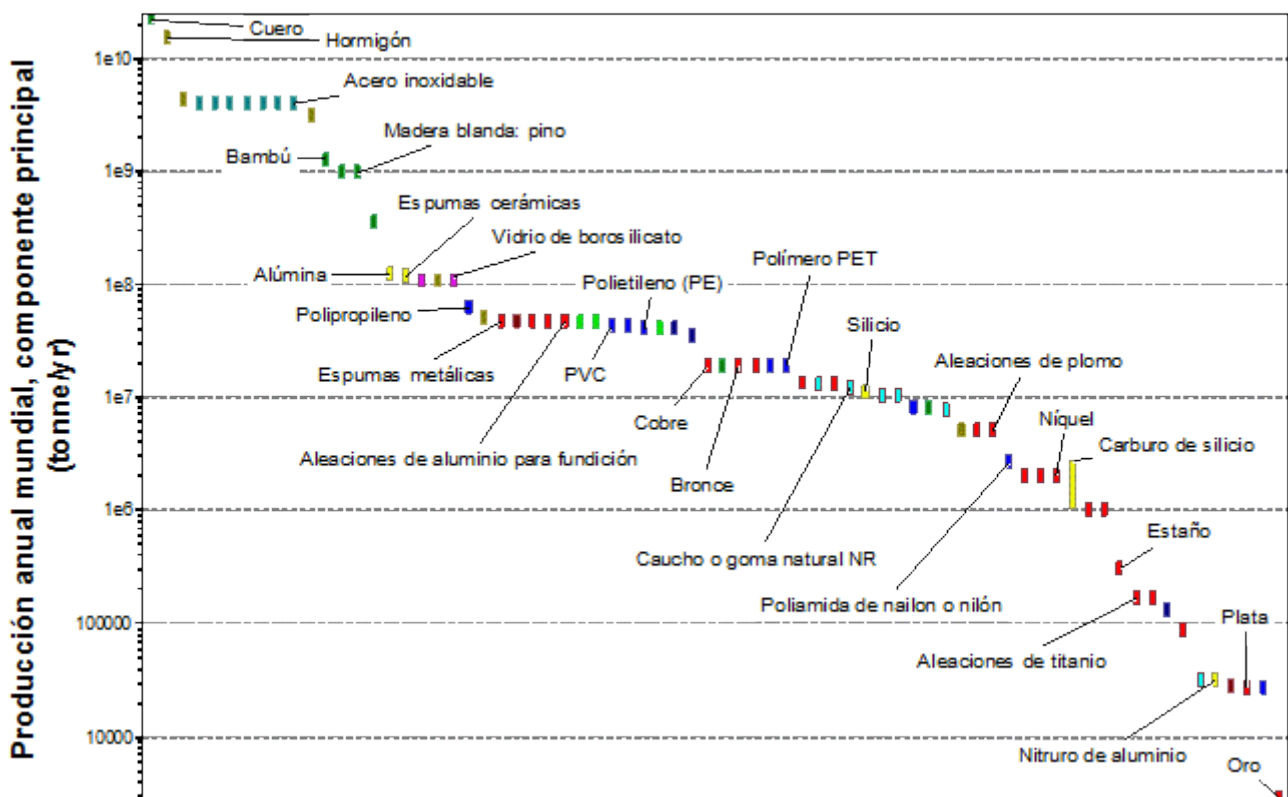
En la Etapa de Selección se filtra y clasifica los materiales, para lo cual se determina las propiedades que se desea comparar gráficamente, se establecen los límites o rango de análisis y se presenta el árbol de familias cuyas características son más cercanas a los requerimientos, como se presenta en la **Figura 2.6**.



**Figura 2.6.** Captura de pantalla de “Etapas de selección” de CES Edupack 2013. [12]

## 2.4 Consideración de la Huella de Carbono en la Selección de Materiales

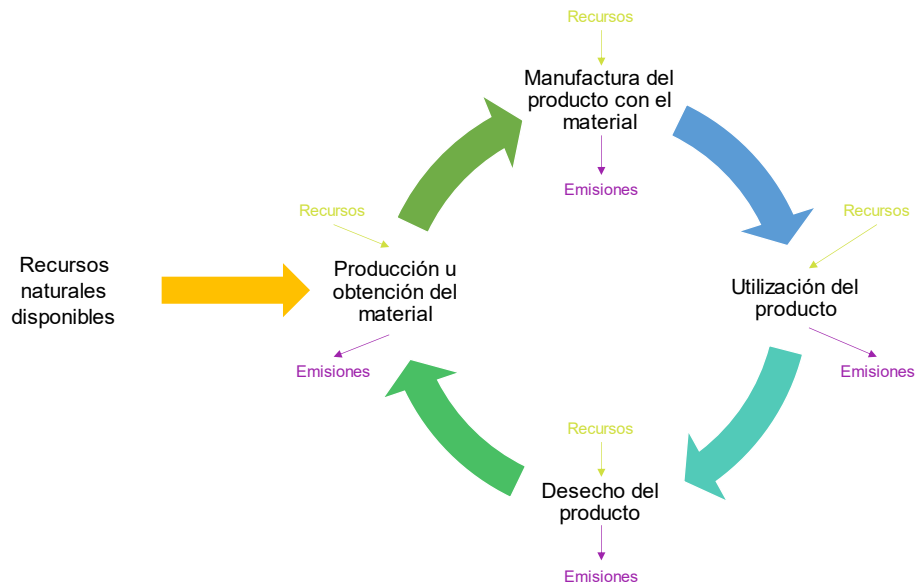
En cuanto al uso de materiales, a nivel global se consumen aproximadamente 20 mil millones de toneladas de material destinado al diseño ingenieril cada año, es decir, en promedio cada persona consume 2.7 toneladas. Entre los materiales de ingeniería de mayor consumo se encuentran metales, como se muestra en la **Figura 2.7.**, de los cuales, mediante la escala logarítmica se puede evidenciar que la producción de acero es 1 billón ( $10^9$ ) veces más grande que la de varios polímeros. [13]



**Figura 2.7.** Diagrama de Ashby de la producción mundial anual de diversos materiales.

(Fuente: Elaboración Propia mediante CES Edupack 2019)

La razón por la que el consumo y producción de los materiales de ingeniería se ha visto acelerado con el paso de los años, tiene que ver con su "ciclo de vida", presentado en la **Figura 2.8.** Los materiales obtenidos de manera natural o fabricados permiten producir elementos funcionales que son distribuidos, vendidos y utilizados, estos productos tienen una vida útil que al terminar los convierte en desperdicios. [13]



**Figura 2.8.** Diagrama del Ciclo de Vida de los materiales. [13]

En este sentido, se emplea la Huella de Carbono como una forma de medir el impacto ecológico de la vida útil de un producto de tal manera que se pueda seleccionar el material que lo permita ser viable y capaz de guiar el diseño. Se ha desarrollado una serie de protocolos y compromisos en base a la reducción progresiva de las emisiones de carbono, aunque en realidad, para el diseño mecánico basta con centrar los esfuerzos en que la fabricación de un producto permita reducir el consumo de energía pues esto solo provocaría que se reduzca en igual proporción la producción de CO<sub>2</sub>. [13]

## 2.5 Utilización de la Herramienta Eco-Audit de CES Edupack

Esta herramienta que forma parte del software desarrollado por el Dr. Ashby, presentada en la **Figura 2.4.b)**, permite al ingeniero de diseño tener una base para consolidar su preparación para la adecuada selección de materiales incluyendo dentro de sus requisitos la sostenibilidad del producto, buscando la reducción de emisión de CO<sub>2</sub>; esta herramienta se emplea después de obtener una lista corta de candidatos para la fabricación del producto. El Proyecto Eco-Audit tiene una interfaz de definición del producto en donde se coloca su información general, de material, de transporte, de uso para finalmente obtener un informe de la auditoría realizada, como se muestra en la **Figura 2.9.**

**Proyecto Eco Audit**

Definición del producto Informe

Nuevo Abrir Guardar Comparar con... ▾

^ Información del producto ?

Nombre: Producto

^ Material, fabricación y fin de vida ?

Cantidad	Nombre del componente	Material	Contenido reciclado	Masa (kg)	Proceso primario	Fin de vida

∨ Transporte ?

∨ Uso ?

^ Informe ?

Gráfico Imagen: Notas:

Informe detallado Buscar... Borrar

**Figura 2.9.** Captura de pantalla de “Proyecto Eco Audit” tomada de CES Edupack 2019

Ejemplo de Ecoauditoría para la producción de botellas PET

*Las sillas de jardín de plástico se fabrican en China y se transportan desde Shanghái al puerto de Le Havre, Francia (19118km) para su distribución en toda Europa. Las sillas están hechas de polipropileno (PP) moldeado, pesan 4 kg y están diseñadas para usarse y permanecer al aire libre. Al final de su vida útil, se envían, con otros plásticos mixtos, a una planta de recuperación de calor residual donde se queman. [13]*

Con la información proporcionada, empleando la base de datos Nivel 2, se selecciona la calculadora Eco-Audit de CES EDUPACK 2019, y se procede a completar las entradas posibles en esta ventana, de acuerdo con la **Figura 2.6.**

### 1. Material, fabricación y fin de vida

En este punto se establece el material óptimo (obtenido con el análisis de selección de materiales estudiado anteriormente); además, se coloca las técnicas de proceso primarias y el fin de vida para este material, esta información se coloca en base a los datos preliminares dado por el ejercicio, como se encuentra en la **Figura 2.10.**

**Proyecto Eco Audit**

Definición del producto Informe

Nuevo Abrir Guardar Comparar con...

^ Información del producto ?

Nombre: Sillas de Jardín

^ Material, fabricación y fin de vida ?

Cantidad	Nombre del componente	Material	Contenido reciclado	Masa (kg)	Proceso primario	Fin de vida
500	Silla	Polipropileno...	Virgen (0%)	4	Moldeo de polímeros	Incineración

**Figura 2.10.** Captura de pantalla de Información del producto y Material, fabricación y fin de vida del “Proyecto Eco Audit” de Sillas de Jardín tomada de CES Edupack 2019

## 2. Transporte

Aquí se analiza el mecanismo de transporte de las sillas desde la planta en China en donde son fabricadas, hasta el punto desde el cual se distribuirán por Europa, que de acuerdo con el enunciado corresponde a un trayecto de 19118 km, y como llegan a un puerto se considera un transporte marítimo, como se muestra en la **Figura 2.11**.

^ Transporte ?

Nombre	Tipo de transporte	Distancia (km)
desde Shanghái, China al puerto de Le Havre, Francia	Transporte marítimo	1.912e+04

**Figura 2.11.** Captura de pantalla de Transporte del “Proyecto Eco Audit” de Sillas de Jardín tomada de CES Edupack 2019

## 3. Uso

En este punto, se indica la vida útil promedio del producto basado en reportes de su uso en exteriores, y el lugar en el que se usará, en este caso Europa, como se encuentra en la **Figura 2.12**.

^ Uso ?

Vida del producto: 10 años

País de uso: Europa

**Modo estático**  El producto utiliza la siguiente energía:

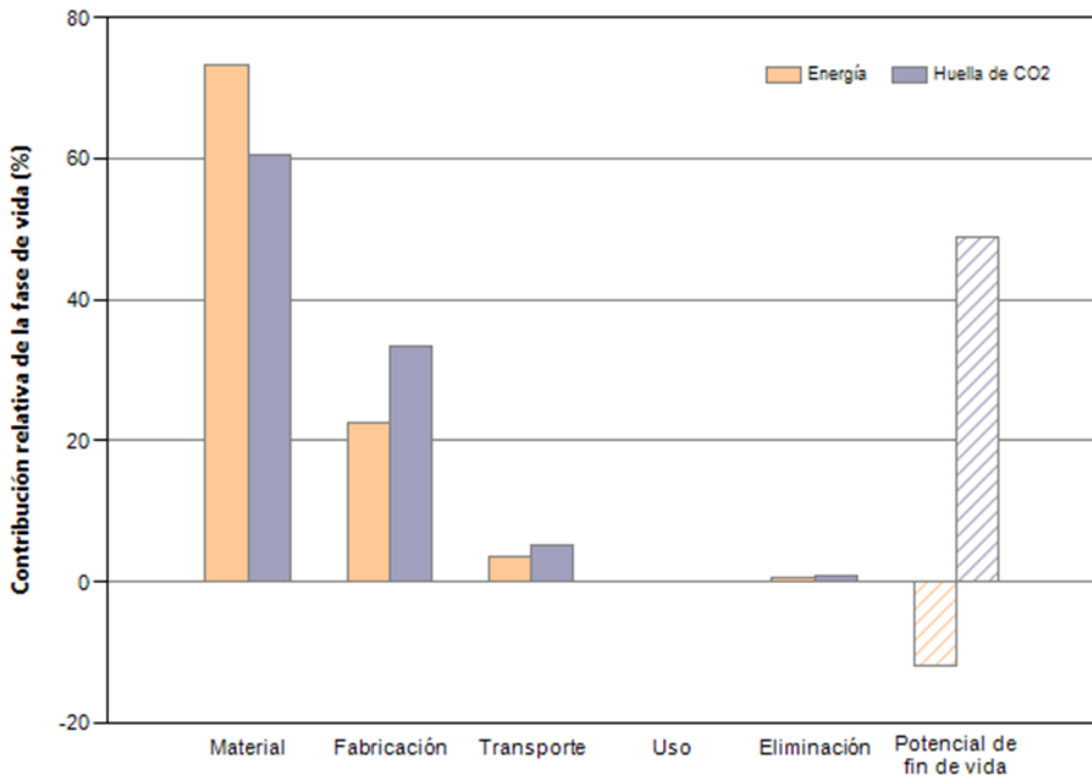
**Modo dinámico**  El producto es parte de un vehículo o se transporta en él:

Entrada v salida de energía: Eléctrica a térmica Tipo de combustible v movilidad: Diésel - transoorte marítimo

**Figura 2.12.** Captura de pantalla de Uso del “Proyecto Eco Audit” de Sillas de Jardín tomada de CES Edupack 2019



Posteriormente, la herramienta Eco-Audit permite obtener gráficos de la Energía consumida y de la Huella de Carbono generada por cada una de las etapas de vida de las sillas; la comparación de estos dos se muestra en la **Figura 2.13.**, y se observa que la fase “Material” es la dominante en la vida del producto. Además, con esta herramienta, se puede imprimir un informe final detallado con los resultados del proyecto analizado, mismo que se presenta en el **Anexo II.**



**Figura 2.13.** Gráfico del porcentaje de contribución relativa de la fase de vida tomado del informe de Proyecto Eco Audit de Sillas de Jardín en CES Edupack 2019.

## 2.6 Análisis de Casos de Estudio en la Selección de Materiales

Para el presente trabajo, se tomará como base el análisis de selección de materiales de 3 casos de estudio en los que se considera las propiedades mecánicas de los materiales más empleados en todas las industrias de la actualidad (metales, polímeros, cerámicos, materiales compuestos)

### Selección de Materiales para Remos

#### Historia de los remos

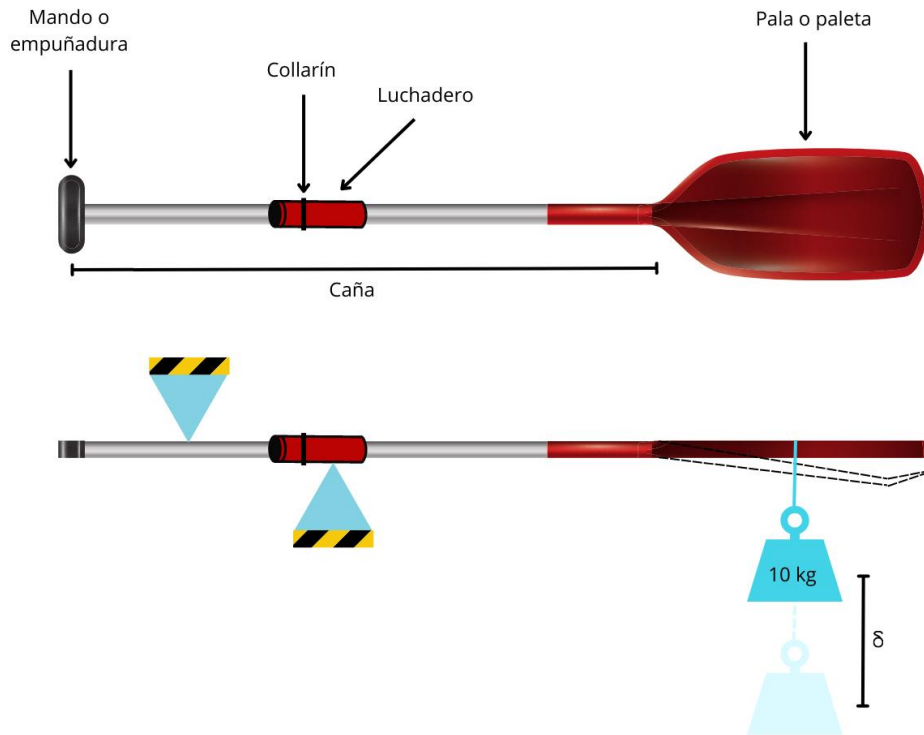
El remo, como mecanismo de propulsión de una embarcación, tiene su origen desde el antiguo Egipto en donde se tenía la presencia de los trirremes en el Nilo y en Grecia. Platón con su Pireo y Virgilio con su Eneida relatan las regatas en sus obras. Además, en el Imperio Romano aparecen las galeras: pena impuesta a delincuentes (galeotes) que consistía en remar en las galeras del rey. Históricamente, se considera que el uso del remo en el deporte tuvo su origen en Gran Bretaña en el siglo XVII, siendo principalmente una actividad reservada para la nobleza. En esta época se conocía de la existencia de alrededor de 40 mil barqueros que se ganaban la vida trabajando en el Río Támesis, entre los que se generó un ambiente de competición pues los clientes buscaban “los barqueros más rápidos”. Así iniciaron las competiciones entre los barqueros profesionales y los jóvenes aprendices, por premios en especie. [14]

La idea del uso de remos para las embarcaciones era dar más control durante la navegación aportando un gran potencial militar reconocido por los romanos, vikingos y venecianos. Desde esa época hasta la actualidad, el remo ha ido desarrollándose en todos los sentidos, en especial en su tecnología de construcción. Estos eran fabricados con madera de Haya para darles flexibilidad; eran reforzados en el escámo (sujeta remos) con dos piezas de encina, aunque también se los solía reforzar con bronce; además, se solía adornar las naves de recreación con oro y plata, en especial en la realeza. Ahora son comúnmente fabricados de Aluminio para mayor resistencia, con palas de Nylon o Plástico, son ajustables y desmontables para facilitar su transporte. [15]

#### Descripción Mecánica del Remo [3]

Un remo, como mecanismo, puede ser interpretado como una viga que se encuentra a flexión, que tiene la resistencia para soportar el momento flector ejercido por la persona que lo controla sin llegar a la fractura; además, debe tener una rigidez que se acople al navegante sin dejar de proporcionarle confort.

Para interpretar estas condiciones, se entiende al remo como un elemento en el que se ha colocado un peso de 10kg a 2.05m del collarín, para en este punto medir la desviación  $\delta$ . Se considera que un remo blando tendrá una desviación de 50mm mientras que uno más rígido solo se desviará 30mm. Además, debe ser ligero, es decir que el peso adicional aumenta la superficie mojada y la resistencia, como se muestra en el diagrama de la **Figura 2.14**.



**Figura 2.14.** Diagrama de las partes y del mecanismo de un remo. [3]  
(Elaboración propia)

De esta manera, se verifica que el remo se comporta como una viga con rigidez y peso mínimo, por lo que su índice de material, considerando al remo como una viga ligera y rígida, se puede tomar de la **Tabla 5.1. del Anexo I**:

$$M = \frac{E^{1/2}}{\rho}$$

**Ecuación 2.1.** Índice de material para una viga ligera y rígida.

Se debe considerar, además, que existen otros factores que influyen en el comportamiento de los remos, estos se caen al agua y las paletas chocan entre sí o con rocas; por lo tanto, el material debe ser lo suficientemente resistente como para sobrevivir a cualquier circunstancia, es así que, inicialmente se descarta de la selección a los materiales frágiles que poseen una dureza inferior a  $1 \frac{kJ}{m^2}$ . En la **Tabla 2.2.** se encuentran resumidos los requerimientos del diseño que corresponde a la etapa de Traducción dentro de la metodología de selección de materiales.

**Tabla 2.2.** Traducción de los requisitos de diseño de un remo para la selección de material correspondiente [3]

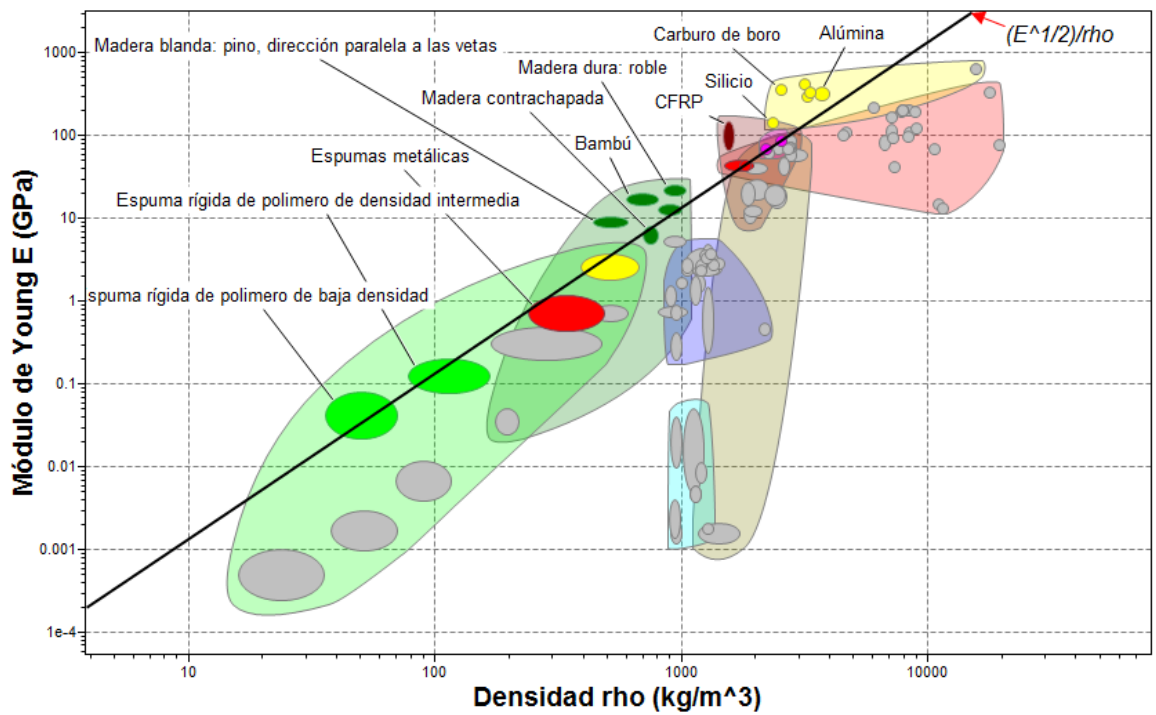
<b>Función</b>	Remar, por lo que es una viga ligera y rígida
<b>Restricciones</b>	Longitud $L$ especificada Rigidez de flexión $S^*$ especificada Dureza $G_{1c} > 1 \text{ kJ/m}^2$
<b>Objetivo</b>	Reducir al mínimo la masa $m$
<b>Variables Libres</b>	Diámetro del eje $d$ Selección del material

#### Selección del material

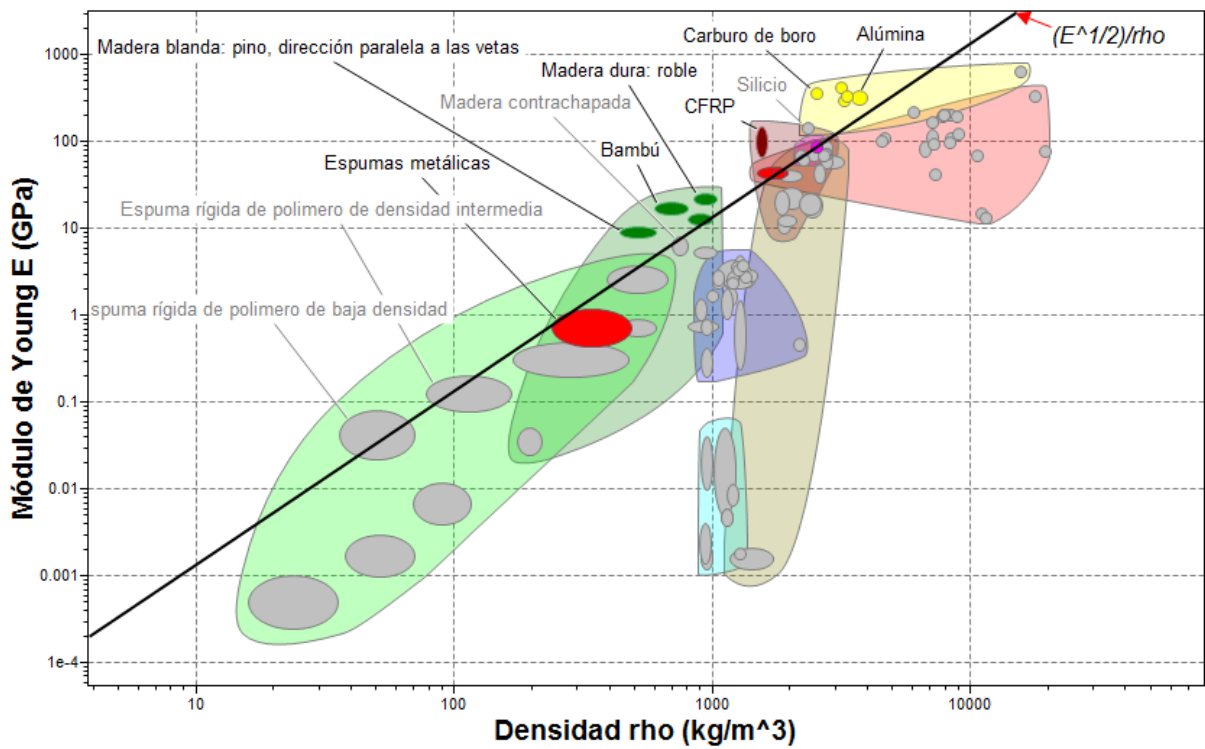
La **Figura 2.15.** muestra el gráfico de comparación entre el Módulo de Young y la Densidad que corresponden a las dos propiedades que dan base al índice del material de la **Ecuación 2.1.** La recta de visualización para este índice  $M$  posee una pendiente de 2 que CES Edupack permite colocar en el gráfico de tal manera que se pueda diferenciar el pequeño grupo de materiales que queda por encima de ella, es decir, estos son los materiales con los mayores valores de  $M$  y que representan las mejores opciones de selección, aunque aún queda verificar que se satisfaga el límite de tenacidad, al aplicar este límite, el programa descarta a los materiales que no lo cumplen, como se observa en la **Figura 2.16.**

Para un análisis más rápido y preciso de la selección de materiales, considerando que se busca el material con mayor índice de desempeño, CES Edupack permite elaborar los denominados gráficos de barras en los que se puede obtener la visualización del universo de materiales que cumplen con las restricciones al compararlos directamente con el índice de material  $M$ , como se muestra en la **Figura 2.17.**

En general, se puede distinguir tres clases de materiales: maderas, polímeros reforzados y ciertas cerámicas. Las cerámicas son más frágiles, por lo tanto, la recomendación de material para los remos está entre CFRP (mejor opción) o las maderas.



**Figura 2.15.** Gráfico Módulo de Young  $E$  vs. Densidad  $\rho$  del universo de materiales considerando el índice  $M$  para la selección de material para remos.  
(Fuente: Elaboración propia mediante CES Edupack 2019)



**Figura 2.16.** Gráfico Módulo de Young  $E$  vs. Densidad  $\rho$  del universo de materiales considerando el índice  $M$  y límite de Tenacidad para la selección de material para remos.  
(Fuente: Elaboración propia mediante CES Edupack 2019)



**Figura 2.17.** Gráfico del universo de materiales comparados con el índice de desempeño de material M para la selección de material para remos.  
(Fuente: Elaboración propia mediante CES Edupack 2019)

### Selección de Materiales para horquillas de una bicicleta de carreras

#### Historia de las horquillas de bicicleta

Se tiene registro de la primera bicicleta inventada, en 1817 (aunque se tiene indicios que existía desde antes de 1800), por Karl von Drais de Alemania quien patentó su "máquina andante" en 1818 como el primer transporte dirigitivo de dos ruedas propulsado por un humano. Mas adelante, otros tomaron este concepto, como Denis Johnson, que creó una versión más nueva y mejorada, tallada en madera con una rueda delantera orientable, diseñada para reducir el tiempo de viaje a la mitad. Esta invención de dos ruedas no disponía de pedales ni de una horquilla para suspensión como tal pues su principio de funcionamiento es que los usuarios los impulsen hacia adelante con los pies para deslizarse cuesta abajo mientras intentaban mantener el equilibrio, este primer modelo de bicicleta tenía una apariencia similar a la **Figura 2.18**. [16]



**Figura 2.18.** Réplica de la draisiana de 1817, primer antecedente de la bicicleta moderna (Fotografía tomada del Deutsches Fahrradmuseum Bad Brückenau por Sarah Seefried)

Entre 1920 y 1950 se vivieron épocas de grandes cambios, los gustos habían diferido resultando en una “disminución” de la moda de la bicicleta por la llegada del automóvil, que se consideraba el transporte del futuro. Estos períodos de guerra que dieron paso a los avances tecnológicos hicieron que las bicicletas pasaran a ser como juguetes para niños, y ya no se lo consideraba un transporte. En realidad, los ciclistas solían ser despreciados por los conductores, situación que se vive incluso en la actualidad. Sin embargo, durante esta época también se iniciaron las competencias con bicicleta con la primera *Vuelta a Francia*; por lo que se considera que con la nueva tecnología se pudo desarrollar los primeros modelos de horquillas de suspensión para las bicicletas de competencia para los recorridos que realizaban, así mismo, su desarrollo continuó avanzando para acoplarse a su uso actual en la montaña y para *bicicross*. [17] La primera patente de una bicicleta con horquilla y transmisión tardó 2 años en ser registrada siendo archivada inicialmente en 1918, esto puede deberse a las condiciones de la época, el modelo de su diseño se puede encontrar en el **ANEXO III**.

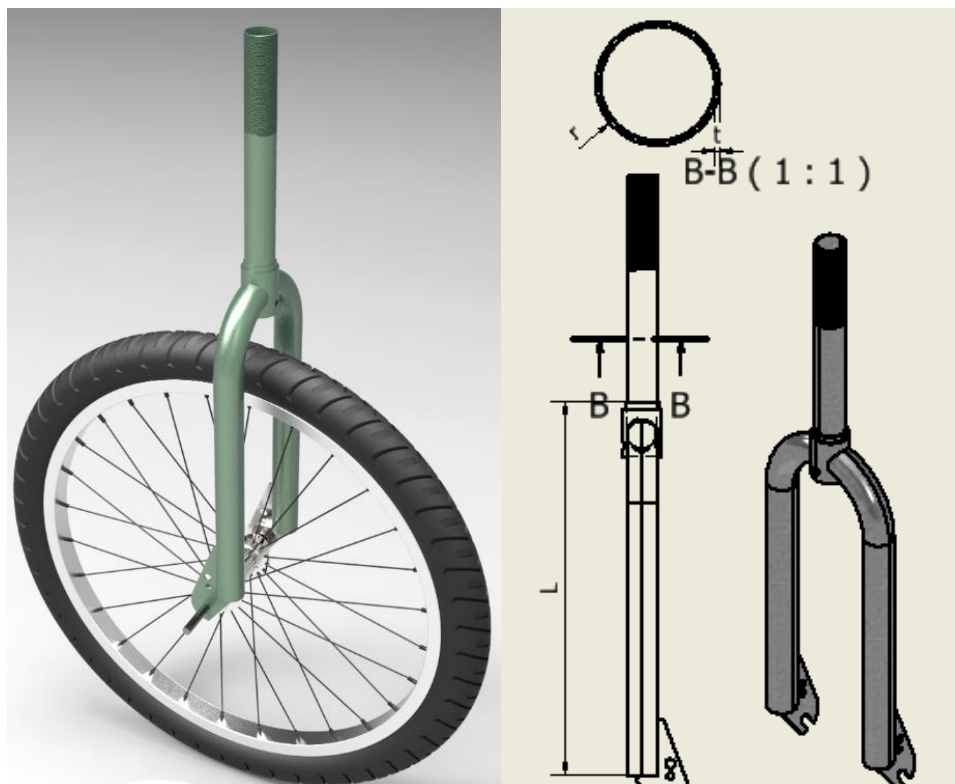
## Descripción Mecánica del Remo

La primera consideración en el diseño de bicicletas es la resistencia, a parte del movimiento que tiene que proporcionar, lo importante es que el cuadro y la horquilla de la bicicleta tengan la capacidad de soportar las cargas de uso normal que mayoritariamente son de flexión. En el caso de una bicicleta de carreras se debe tomar en cuenta la masa porque tanto el cuadro como la horquilla deben ser lo más ligeros posible.

De acuerdo con la **Figura 2.19.**, en donde se tiene el diseño 3D de una horquilla adaptada a una rueda, se puede modelar una horquilla como vigas de longitud  $L$  que deben soportar una carga máxima  $P$  sin colapso plástico ni fractura (Tabla 10.4). Del diagrama se conoce que las horquillas son tubulares, de radio  $r$  y espesor de pared fijo  $t$ . Además, debido a la función que tendrá la bicicleta, se establece que la masa debe ser minimizada, para encontrar el mejor material y forma; estos requerimientos de diseño se encuentran resumidos en la **Tabla 2.3.** En base a estos detalles, de la **Tabla 5.2.** del **Anexo IV**, el índice que se debe emplear es:

$$M_2 = \frac{(\phi_B^f \sigma_f)^{2/3}}{\rho}$$

**Ecuación 2.2.** Índice de material para una viga ligera y rígida.



**Figura 2.19.** Diagrama de las partes y del mecanismo de la horquilla de una bicicleta de carreras. (Fuente: Elaboración propia mediante Autodesk Inventor)



**Tabla 2.3.** Traducción de los requisitos de diseño de la horquilla de bicicleta para la selección de material y forma correspondiente. [3]

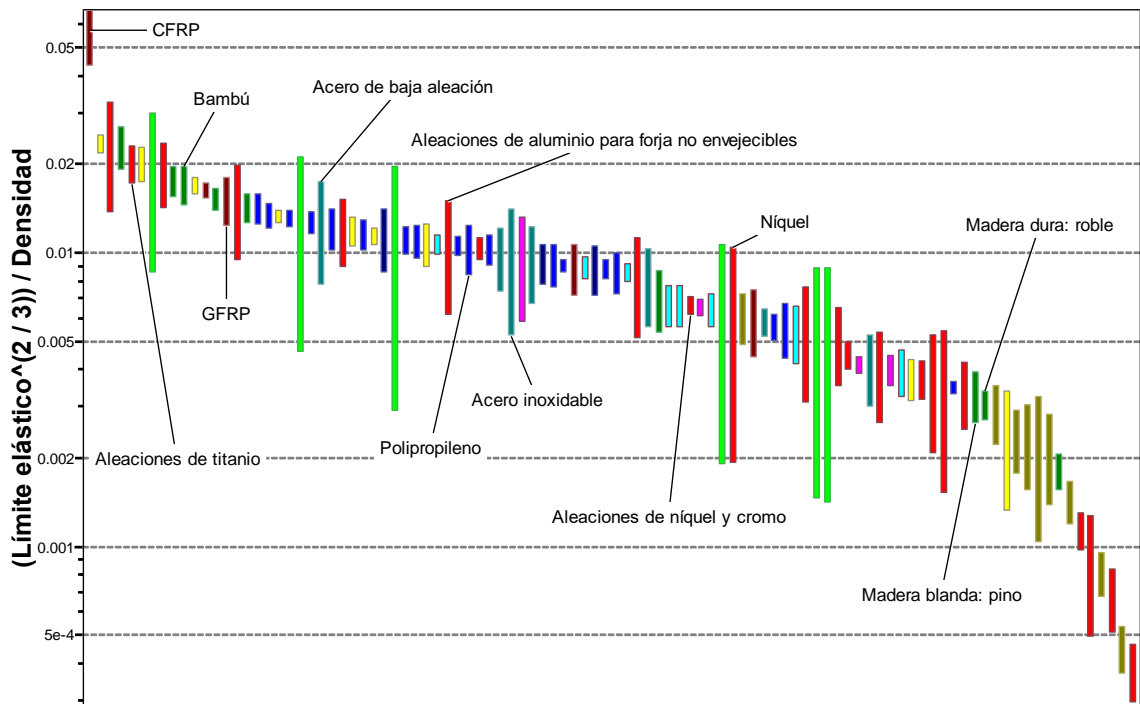
<b>Función</b>	Suspensión para bicicleta
<b>Restricciones</b>	No debe fallar bajo las cargas de diseño, restricción de esfuerzos Longitud especificada
<b>Objetivo</b>	Reducir al mínimo la masa $m$
<b>Variables Libres</b>	Forma de la sección Selección del material

### Selección del material

Para iniciar el proceso de selección, se compara una parte de las propiedades de los materiales mediante sin considerar el factor de forma (se incluirá más adelante) tomando de la **Ecuación 2.2.**:  $\frac{\sigma_f^{2/3}}{\rho}$ , entonces se obtiene el gráfico de la **Figura 2.20**. En cuanto al factor de forma, se conoce que mientras más sólido sea el material de las horquillas, es decir, el índice de forma es cercano a 1, entonces el material será el más adecuado. Los valores de factor de forma  $\phi_B^f$  se toman de patrones ya establecidos, pues se conoce que en general estos corresponden a la relación entre la altura y el diámetro iniciales de una pieza que será sometida a ensayos; entonces, para los materiales que de acuerdo con la **Figura 2.21**. pasan la pendiente establecida, se tiene los valores promedio que se reflejan en la **Tabla 2.4.**, en donde se puede identificar que el material que mejor cumple con el índice de material es el pino, mientras que el que cumple con el índice de material y forma es el CFRP.

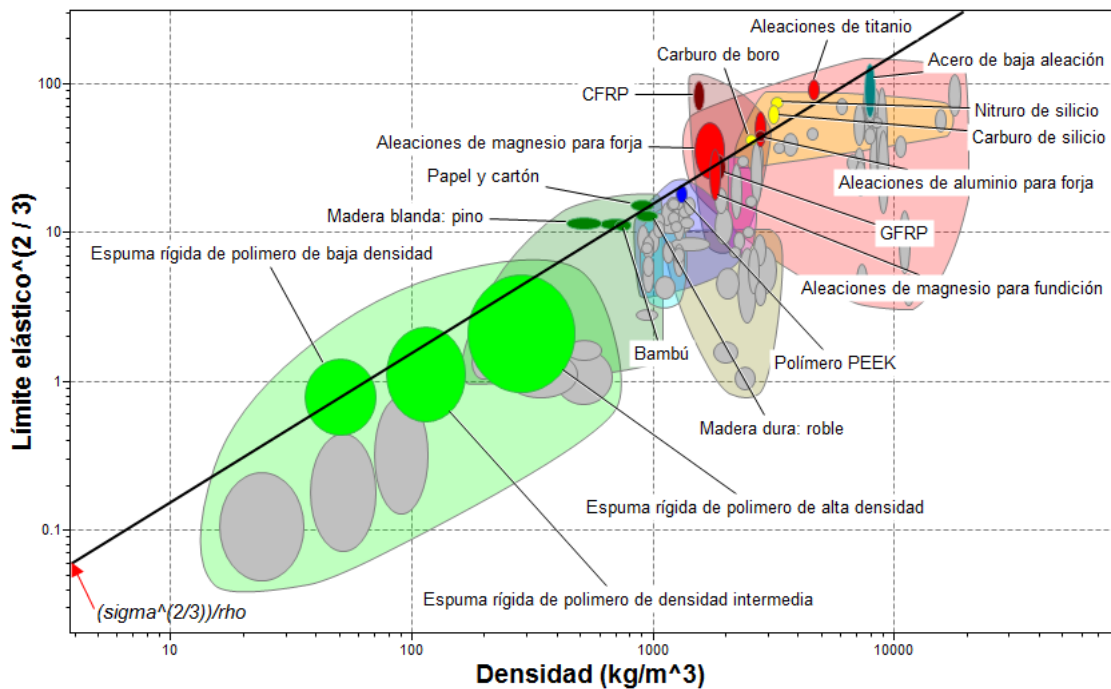
**Tabla 2.4.** Indicadores de desempeño de material y forma para los materiales óptimos para horquillas de bicicletas de carreras [3]

Material	Factor de forma $\phi_B^f$	Índice del material	Índice de material y forma $M_2$
		$\frac{\sigma_f^{2/3}}{\rho} \left[ \frac{MPa^{2/3}}{\frac{Mg}{m^3}} \right]$	
<b>Madera blanda: pino</b>	1.5	<b>39</b>	51
Bambú	2.2	24	41
Acero de baja aleación de carbono	7.5	12	46
Aleaciones de aluminio	5.9	15	49
Aleaciones de Titanio	5.9	22	72
Aleaciones de Magnesio	4.25	17	45
<b>CFRP</b>	4.25	33	<b>87</b>



**Figura 2.20.** Gráfico del universo de materiales comparados con  $\frac{\sigma_f^{2/3}}{\rho}$  para la selección de material para horquillas de bicicletas de carreras.

(Fuente: Elaboración propia mediante CES Edupack 2019)



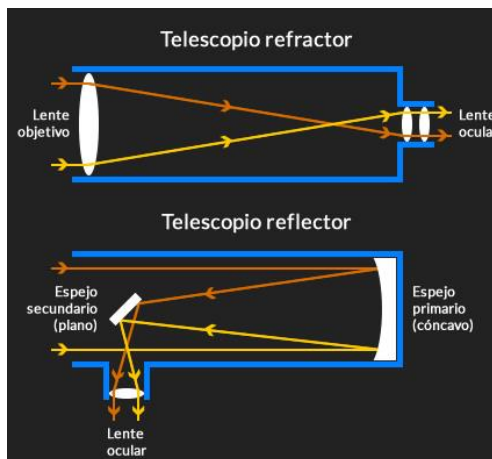
**Figura 2.21.** Gráfico  $\sigma_f^{2/3}$  vs. Densidad  $\rho$  del universo de materiales considerando la pendiente de  $\frac{\sigma_f^{2/3}}{\rho}$  para la selección de material para horquillas de bicicleta.

(Fuente: Elaboración propia mediante CES Edupack 2019)

## Selección de Materiales para Espejos de Grandes Telescopios

### Historia de los grandes telescopios

Se cree que el primer telescopio fue creado por Hans Lippershey de Holanda quien era un conocido fabricante de lentes, en los primeros años del siglo XVII, después de que sus hijos al jugar con un par de lentes en su taller realizaron una “combinación” de estos dando como resultado que el tamaño de los objetos lejanos se ampliaba, entonces Lippershey observó este fenómeno y decidió ofrecer su invento en secreto a la corona por su gran valor estratégico. Se cree, además, que en las demostraciones del efecto estaba presente un amigo de Galileo Galilei, que a su regreso a Italia se lo comunicó y en ese mismo momento (noviembre de 1609) Galileo comenzó a experimentar con unas lentes de un fabricante de anteojos hasta lograr reproducir el fenómeno e inmediatamente pensó en su aplicación para el estudio del firmamento. Galileo construyó varios telescopios similares, con una lente objetivo-convexa de 3 cm de diámetro y otra lente cóncava más pequeña llamada ocular por ser la más cercana al ojo del observador; este telescopio compuesto por lentes es denominado refractor. Más adelante, Johannes Kepler mejoró el instrumento de Galileo utilizando como ocular una lente convexa, de manera que se logró aumentar considerablemente el campo del telescopio, pero se invertía la imagen aumentada. Por su parte, Christiaan Huygens, a mediados del siglo XVII, trató de combatir la aberración esférica alargando la distancia focal de sus objetivos, aumentando la imagen proporcionalmente. Años después Isaac Newton, que creía que la aberración esférica no podría corregirse nunca, inventó otro tipo de telescopio sustituyendo las lentes por espejos, mismo que se denominó reflector; su razonamiento simple fue que, *si la luz no atravesaba ninguna lente, la aberración esférica dejaría de ser un problema*. En la **Figura 2.22**. se presenta la comparación de los mecanismos de funcionamiento de estos dos tipos de telescopios. [18]



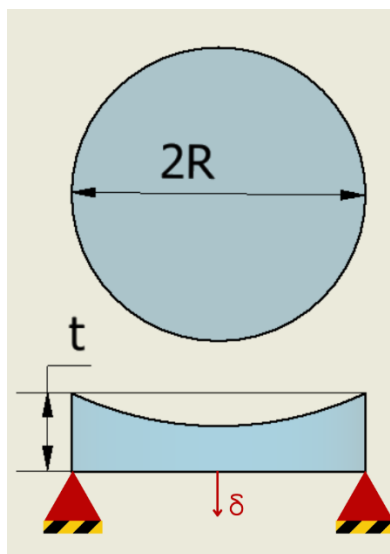
**Figura 2.22.** Mecanismo de funcionamiento de los telescopios refractor y reflector. [18]

Después de Newton, la siguiente gran mejora vino de la mente de León Foucault, quien fabricó sus espejos con vidrio en lugar de metal de campana para lo que inventó un procedimiento químico para platearlos. Así, en el siglo XX, debido a la imposibilidad física que constituía la construcción de grandes telescopios refractores por su elevado peso, los reflectores terminaron ganando campo; y en los últimos veinte años se han construido telescopios de hasta 8.4 metros de diámetro con espejos monolíticos y 10 metros de diámetro con espejos segmentados. En la actualidad se tiene un “limitante” para aumentar la resolución de los telescopios sin aumentar más su diámetro (a pesar de la existencia de sistemas de óptica activa y adaptativa), es que solo se puede conseguir con técnicas de interferometría óptica, lo que consiste en captar la luz de dos telescopios alejados entre sí y combinarla en una pantalla común para que produzcan un patrón de interferencia. [18]

El telescopio reflector más grande del mundo posee un espejo de vidrio de 6m de diámetro, aproximadamente 1m de grosor y pesa 70 toneladas. En general, se conoce que el costo total de un gran telescopio puede superar los 300 millones de dólares, de los cuales, este enorme espejo solo corresponde al 5%. Se debe considerar que para duplicar la masa del espejo se debe aumentar proporcionalmente en  $m^2$  las secciones de la estructura de soporte para mantener las tensiones, por lo tanto, también aumentará el costo total del telescopio. Se conoce que, en el siglo XX, los espejos se fabricaban con metal especular ( $\rho = 8000 \text{ kg/m}^3$ ), pero ahora se fabrican con vidrio ( $\rho = 2300 \text{ kg/m}^3$ ) plateado en la superficie frontal sin aprovechar sus propiedades ópticas. [3]

#### Descripción Mecánica del Espejo

A continuación, se describe la forma más simple de un espejo de telescopio, se trata de un disco circular de diámetro  $2R$  y espesor medio  $t$ , simplemente apoyado en su periferia. Mecánicamente, cuando se encuentra en una posición horizontal este se desvía por su propio peso, mientras que cuando se coloca de manera vertical no se desvía significativamente. Lo que se debe buscar en el mecanismo es que esta desviación sea lo suficientemente pequeña para no interferir en el rendimiento del espejo, es decir,  $\delta$  del punto medio del espejo debe ser menor que la longitud de onda de la luz, como se muestra en la **Figura 2.23**. Adicionalmente, se requiere que el espejo tenga buena estabilidad dimensional, es decir, que no exista fluencia, y baja expansión térmica. Todos los requerimientos se encuentran resumidos en la **Tabla 2.5**.



**Figura 2.23.** Diagrama de las partes y del mecanismo de un disco circular cóncavo que conforma un espejo para grandes telescopios. [3]  
(Elaboración propia)

**Tabla 2.5.** Traducción de los requisitos de diseño de un espejo de telescopio para la selección de material correspondiente [3]

<b>Función</b>	Espejo de precisión para grandes telescopios
<b>Restricciones</b>	Radio $R$ especificado No debe deformarse más de $\delta$ bajo su propio peso Alta estabilidad dimensional: sin fluencia, baja expansión térmica
<b>Objetivo</b>	Reducir al mínimo la masa $m$
<b>Variables Libres</b>	Espesor del espejo $t$ Selección del material

Una vez se conocen los requerimientos de diseño, para determinar el índice de desempeño de material, se toma en cuenta la restricción presentada en la **Tabla 2.5.**, en donde se indica que la propiedad que se desea minimizar es la masa del espejo, misma que se puede determinar mediante la **Ecuación 2.3.**

$$m = \pi R^2 t \rho$$

**Ecuación 2.3.** Masa del disco cóncavo que conforma el espejo de telescopio.

Por otra parte, la deflexión elástica  $\delta$ , en base al diagrama de la **Figura 2.23.**, para un material con relación de Poisson de 0.3 está dada por la **Ecuación 2.4.**

$$\delta = \frac{3}{4\pi} \frac{mgR^2}{Et^3}$$

**Ecuación 2.4.** Deflexión elástica  $\delta$  del centro de un disco horizontal debido a su propio peso para un material con relación de Poisson de 0.3

Para que el espejo funcione adecuadamente, se busca que esta desviación sea inferior a  $10 \mu m$ . Además, el diámetro  $2R$  del disco está especificado en función del diseño del telescopio, pero el espesor  $t$  es una variable libre. De la Ecuación 2.4. se despeja  $t$  y este valor se sustituye en la **Ecuación 2.3.** obteniendo:

$$m = \left(\frac{3g}{4\delta}\right)^{1/2} \pi R^4 \left[\frac{\rho}{E^{1/3}}\right]^{3/2}$$

**Ecuación 2.5.** Masa del disco cóncavo que conforma el espejo de telescopio.

Entonces, de la **Ecuación 2.5.** se extrae el valor del índice del material  $M$ , que cuanto mayor sea permitirá determinar el material que entregue el espejo más ligero para los grandes telescopios:

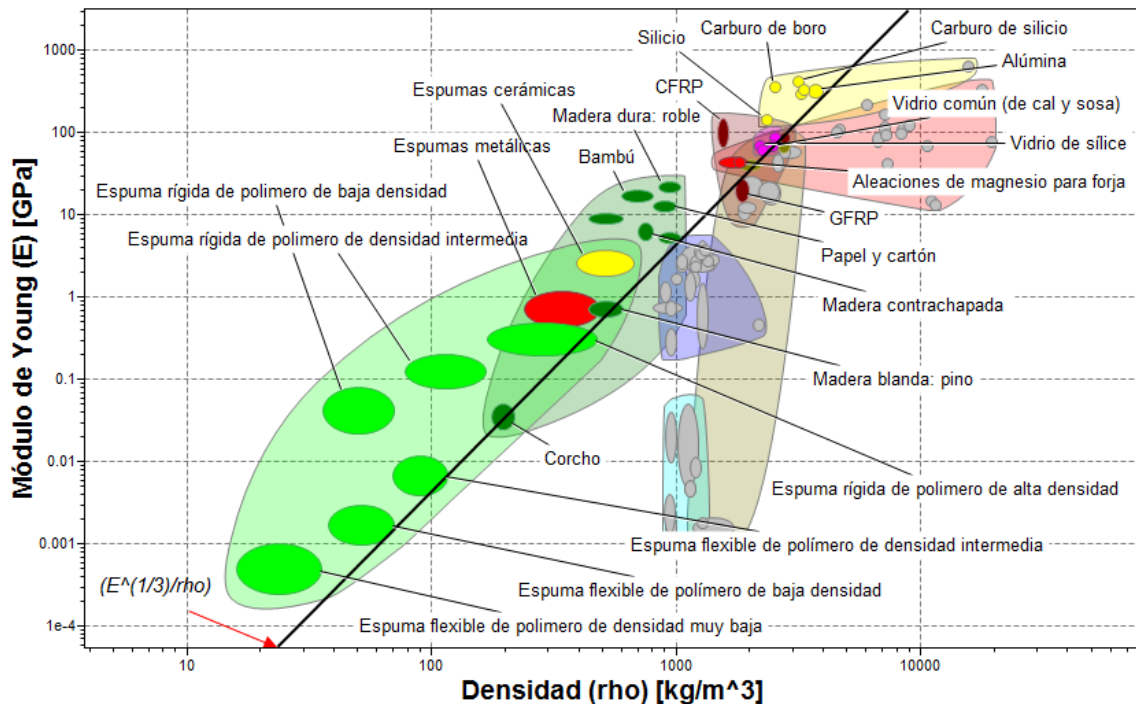
$$M = \frac{E^{1/3}}{\rho}$$

**Ecuación 2.6.** Índice de material para un espejo de telescopio.

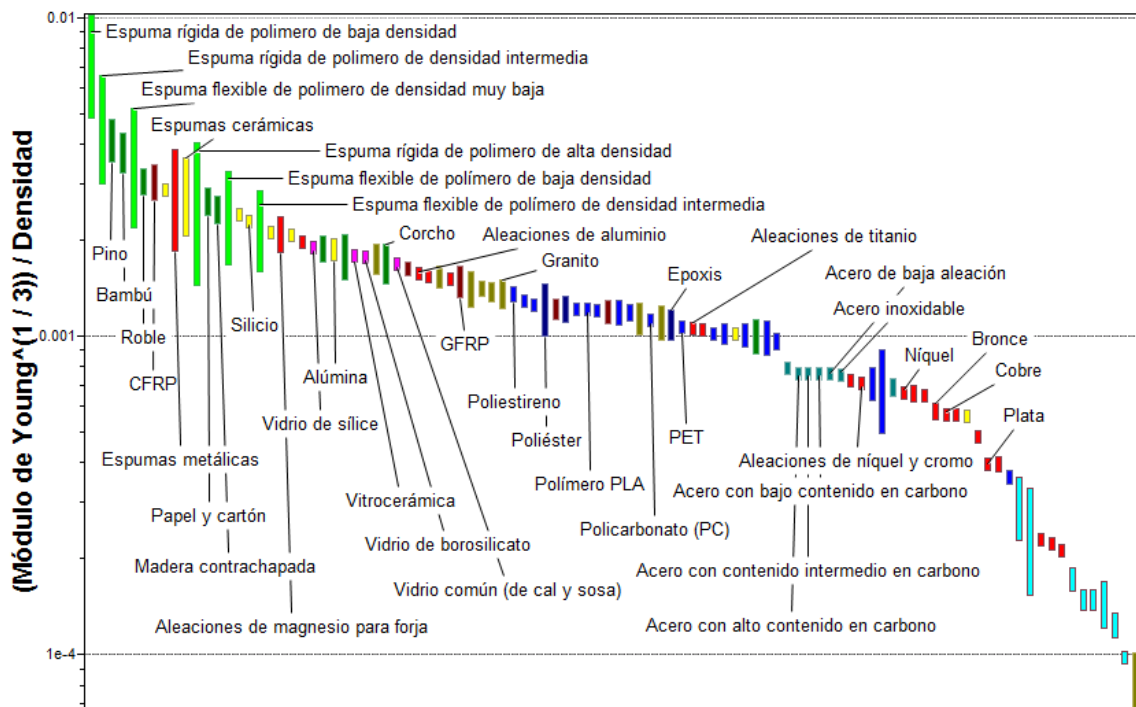
Para un mejor entendimiento de los resultados, se trata las demás restricciones dadas como límites de atributos, de esta manera, se exige: un punto de fusión superior a  $500^\circ C$  para evitar la fluencia, una absorción de humedad nula y un bajo coeficiente de dilatación térmica ( $\alpha < 20 \times 10^{-6} /K$ ). [3]

## Selección del material

Con el índice de desempeño obtenido en la Ecuación 2.6., se emplea CES Edupack para generar los gráficos que permitan visualizar a los mejores candidatos para esta aplicación. En la **Figura 2.24.** se relaciona el módulo de Young y la densidad, y los materiales a elegir se encuentran sobre la línea de pendiente 3 que corresponde a indicador M. Evidentemente, dentro de las posibilidades se encuentra el vidrio común y el vidrio de sílice, que son mucho mejores que todos los metales y sus aleaciones; sin embargo, los superan algunos materiales compuestos, reforzados con fibras y ciertas cerámicas, de acuerdo con este gráfico. Para un mejor entendimiento y reducir aún más el listado, en la sección de límites se incluye los señalados en la **Tabla 2.5.**, y se presenta el gráfico de barras que compara los materiales directamente con el indicador de material en la **Figura 2.25.**



**Figura 2.24.** Gráfico Módulo de Young  $E$  vs. Densidad  $\rho$  del universo de materiales considerando el índice M y límite de Temperatura de Fusión para la selección de material para espejos de telescopio. (Fuente: Elaboración propia mediante CES Edupack 2019)



**Figura 2.25.** Gráfico del universo de materiales comparados con el índice de desempeño de material M para la selección de material para espejos de telescopios.

(Fuente: Elaboración propia mediante CES Edupack 2019)

La primera opción, de acuerdo con los diseños de los que se ha hablado en la sección de Historia de los Telescopios, sería el vidrio; pero en realidad se debe tomar en cuenta otros aspectos que se busca optimizar como es la masa del espejo. Es evidente que un espejo de CFRP pesaría menos de la mitad que uno de vidrio, en incluso se puede reconocer que su estructura de soporte podría ser hasta cuatro veces menos costosa. Sin embargo, los gráficos de las **Figuras 2.24.** y **2.25.** abren la posibilidad al uso de Espumas como sustituto del vidrio comúnmente empleado, considerando que tienen mayor valor de índice de material lo que generaría mayor ahorro en costos generales. [3]



### 3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 3.1 Resultados

El Departamento de Evaluación de Operaciones del Banco Mundial define a un estudio de caso o caso de estudio como un método de aprendizaje de una situación compleja que se basa en su entendimiento profundo, considerándola como un conjunto de factores con el objetivo de desarrollar una solución al problema. Realizar un estudio de casos aplicativos reales permite analizar el cómo y el porqué de la metodología empleada en cada uno [19]. Partiendo de este contexto, los estudios de casos presentados en este trabajo de integración curricular muestran el proceso de selección del material que se emplea o debe emplearse en el diseño mecánico, partiendo de un amplio menú de requerimientos que puede examinarse en profundidad. La mayoría de los diseños presentan algunos requisitos que no se pueden modificar, por ejemplo, cuando se considera que el material debe soportar una temperatura alta, que debe resistir fluidos corrosivos, entre otros. Estas consideraciones constituyen una restricción o límite para la selección que permiten recortar la lista de opciones de material a seleccionar.

Mediante el uso de la herramienta CES Edupack, como se ha podido verificar en los casos analizados, la selección de materiales es más eficaz, en especial porque permite combinar propiedades que buscan optimizar las características del producto final, lo que se realiza mediante el uso de los índices de desempeño (KPI's). Sin embargo, la elección final siempre dependerá de información más detallada sobre sus propiedades, consideraciones de fabricación, económicas o estéticas.

Para el caso de **Selección de Materiales para Remos**, con el gráfico de la **Figura 2.17**, se confirma que los remos si presentan buen rendimiento al ser fabricados en madera o con un compuesto de alto rendimiento (como lo es la matriz epoxi reforzada con fibra de carbono, CFRP). La diferencia es que un remo de madera pesa alrededor de 4.5kg, mientras que uno de material compuesto resulta un poco más ligero (menos de 4kg) conservando su rigidez; y hasta hace poco se tenía la desventaja de que fabricar un remo de CFRP costaba mucho más que uno de madera, pero en la actualidad el precio de las fibras de carbono se ha reducido lo suficiente para que cuesten más o menos lo mismo. Además, en el análisis se empleó una base de datos Nivel 2 en CES Edupack, por lo que es evidente que nuevos materiales compuestos con mejores características y propiedades no aparecerán en los gráficos; entonces, se podría considerar que estos materiales tendrían la capacidad de garantizar mayor optimización en el peso de los remos manteniendo la funcionalidad con esto materiales modernos. [3]

Para el caso de **Selección de Materiales para Horquillas de Bicicletas de Carreras**, se han obtenido algunos resultados algo inesperados, en el sentido de que en la actualidad no se pensaría en emplear materiales tan “antiguados” como la madera para una bicicleta, aunque así era como se las fabricaba anteriormente. El bambú es una de las primeras opciones que salta a la vista en la **Figura 2.20.**, es un material que se lo puede considerar bastante útil para esta aplicación debido a que en su forma natural crece como un tubo hueco que posee un factor de forma macroscópico de aproximadamente 2.2, otorgando a las horquillas una resistencia a la flexión mucho mayor que la que le daría una madera más dura como de pino o abeto macizo. En la **Tabla 2.4.** se registran los factores de forma de los materiales que se consideró mejores candidatos en base a los Diagramas de Ashby, así se observa que sin duda unas horquillas de acero no son mala opción, pero serían mejores una de aleación de titanio, y aun así la mejor alternativa termina siendo el CFRP [3]. Ahora, para este tipo de bicicletas, es imperativo la consideración de los costos pues en el mercado se las encuentra con valores que superan los 2 mil dólares, el antecedente de que muchos corredores que no han nacido en hogares privilegiados han aprovechado las ventajas de materiales como el bambú para fabricar sus propias horquillas debe ser una base para enfocar la fabricación de estas bicicletas con los mejores materiales a costos más accesibles, por lo que sí es necesario realizar un análisis de costos para este caso. Así se obtiene el gráfico de la **Figura 3.1.**, en donde se observa claramente que ni el bambú, ni el CFRP resultan las mejores opciones, sino que la mejor pasa a ser directamente una aleación de acero (sin considerar el factor de forma, evidentemente)



**Figura 3.1.** Gráfico de materiales comparados con  $\frac{\sigma_f^{2/3}}{C_m}$  para la selección de material para horquillas de bicicletas de carreras. (Fuente: Elaboración propia con CES Edupack 2019)

Para el caso de **Selección de Materiales para Espejos de Grandes Telescopios**, los resultados presentados en la **Figura 2.25**. pueden parecer a primera vista poco prácticos o incluso insólitos por el hecho de que el uso de maderas para fabricar un espejo es algo prácticamente imposible, sin embargo, se debe recordar que los Diagramas de Ashby son una herramienta de apoyo para el ingeniero de diseño, pues aquí se debe aplicar todo el sentido común y experiencia posibles. Otras opciones poco convencionales como las Espumas al principio parecen no viables, pero al considerar el ahorro potencial en costos que es tan necesario para este equipo de gran magnitud, en realidad sí merece la pena examinarlas. En este sentido, se conoce que existen formas de aplicar una fina película de caucho de silicona o de epoxi a la superficie del soporte del espejo para obtener una superficie ópticamente lisa que pueda ser plateada; en este caso, el obstáculo viene dado por la falta de estabilidad que presentan los polímeros pues estos tienden a cambiar de dimensiones con el tiempo, los afecta la humedad y la temperatura, etc. El criterio aquí tiene que ver más con una combinación de materiales, en este sentido, se puede emplear el mismo vidrio, que ya se conoce en esta aplicación, pero reforzado con fibras de carbono, y este a su vez puede espumarse con la finalidad de obtener un material más denso que el poliestireno, pero mucho más ligero que el vidrio común. Cabe mencionar que, para espejos de grandes telescopios, tanto el vidrio espumado como el reforzado con fibras de carbono tendrían la misma estabilidad química y medioambiental que vidrio en condiciones normales, de esta manera, la combinación de estos elementos constituye en una gran mejora para conseguir grandes espejos a costos más económicos. [3]

El software CES Edupack resulta una herramienta de uso profesional y académico que simplifica la etapa del diseño mecánico correspondiente a la selección de materiales, pues, proporciona una extensa base de datos con una amplia gama de propiedades y de procesos de fabricación que dan posibilidades casi infinitas de combinación. Además, facilita el trabajo del diseñador al presentar la información en gráficos bien resultados y con la opción de continuar agregando criterios o restricciones para refinar aún más los resultados del proceso de selección. Con el Nivel 3 y Nivel de Ecodiseño que presenta, garantiza aún más beneficios para discernir los más de 300 mil materiales que se encuentra sobre la superficie terrestre. Se justifica su uso, en especial para aplicaciones comunes de la industria pues permite emparejar los atributos de cada material con los requerimientos del diseño, mediante los análisis y cálculos que realiza el diseñador previamente para obtener los indicadores de rendimiento.

## 3.2 Conclusiones

En el presente trabajo de integración curricular se ha podido estudiar a fondo y con detalle la metodología de Selección de Materiales para el Diseño Mecánico que ha sido desarrollada por el Dr. Michael Ashby de la Universidad de Cambridge, pero además, se la ha podido comparar con otros métodos de Selección de Materiales en donde se ha determinado que con algunas diferencias ligeras, la metodología de Ashby constituye la base de cualquier otro método que se pueda desarrollar, aunque evidentemente se pueden hacer mejoras u optimizaciones.

Gracias a los estudios del Dr. Ashby, en este trabajo se ha podido también describir la herramienta de Selección de Materiales: Cambridge Engineering Selector (CES) Edupack, explicando su uso desde las funciones básicas de selección mediante la comparación de propiedades para obtener gráficos de burbujas o mediante el uso de indicadores de desempeño para obtener gráficos de barras. Además, se estudió una de las herramientas más avanzadas de CES Edupack que incluye datos eco-ambientales para una selección de materiales más sostenible, que permite obtener informes de EcoAuditoría que verifican la importancia de la inclusión de los aspectos ambientales durante el diseño mecánico para reducir el consumo energético innecesario y reducir también las emisiones contaminantes mediante un análisis de la Huella de Carbono.

Finalmente, en este trabajo se han analizado tres casos de estudio de aplicación real de la selección de materiales en el diseño mecánico de tres productos que tienen su importancia en diferentes áreas: remos (competencias y comunidades amazónicas), bicicletas (competencias y movilización), y espejos (telescopios, microscopios, etc). En cada caso se ha tomado en cuenta todas las condiciones de diseño necesarias y puntuales, pasando por un proceso primero teórico para comprender la naturaleza mecánica de cada uno de estos sistemas, obteniendo los indicadores de desempeño correspondientes, para luego procesarlos mediante la herramienta de selección de materiales ya conocida CES Edupack.

### **3.3 Recomendaciones**

Como adición al presente estudio realizado en este trabajo, se puede considerar combinar todas las extensiones que proporciona CES Edupack para un mejor alcance de los resultados de análisis de casos, es decir, se puede realizar un estudio comparativo de selección de materiales incluyendo tanto índices de desempeño como costos y ecoauditoría. Esto puede permitir obtener una opción de material que proporcione al mismo tiempo la mejor calidad y con los mejores réditos a futuro.

El presente trabajo de integración curricular corresponde a un estudio de la metodología de Selección de Materiales del Dr. Ashby, sin embargo, debe considerarse que la principal herramienta empleada en este método es el software CES Edupack que no cuenta con una licencia gratuita para su uso ni académico ni profesional, esto constituye en un limitante en el proceso de selección en especial cuando no se cuenta con los recursos para poder adquirir los permisos correspondientes. La Escuela Politécnica Nacional cuenta con amplias ramas de la ingeniería como lo es la Ingeniería en Sistemas, por lo que puede resultar bastante útil combinar los esfuerzos de esta carrera con estudiantes de Ingeniería Mecánica para desarrollar un software similar al desarrollado por la Universidad de Cambridge, y aprovechar la rentabilidad que podría dar a futuro como herramienta para la industria.

## 4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] F. Llano, «Materiales II- Selección de materiales-Semana 5-Sesión 2,» SlideShare, 04 junio 2012. [En línea]. Available: <https://es.slideshare.net/jorgefllano/materiales-ii-seleccin-de-materialessemana-5sesin-2>.
- [2] P. Medina, Descubre el Diseño, Madrid: IED Editorial Madrid, 2014.
- [3] M. Ashby, Materials Selection in Mechanical Design, Burlington, MA, USA: Butterworth-Heinemann, ELSEVIER, 2011.
- [4] BirtLH - Centro de formación profesional de aprendizajes virtuales y digitalizados, «DPM08.- Diseño de productos mecánicos. Fases de un proceso de diseño mecánico,» 31 marzo 2020. [En línea]. Available: [https://ikastaroak.birt.eus/edu/argitalpen/backupa/20200331/1920k/es/DFM/DPM/DPM08/es\\_DFM\\_DPM08\\_Contenidos/website\\_1\\_fases\\_de\\_un\\_proceso\\_de\\_diseo\\_mecnico.html](https://ikastaroak.birt.eus/edu/argitalpen/backupa/20200331/1920k/es/DFM/DPM/DPM08/es_DFM_DPM08_Contenidos/website_1_fases_de_un_proceso_de_diseo_mecnico.html).
- [5] Y. Deng y K. Edwards, «The role of materials identification and selection in engineering design,» *Materials & Design*, vol. 28, nº 1, pp. 131-139, 2007.
- [6] L. Gonzalez, «Cómo elegir un coche: Proceso,» 29 septiembre 2006. [En línea]. Available: <http://platea.pntic.mec.es/~lgonzale/analisis/wqelegir/elige proceso.html>.
- [7] E. Chao, «William Rees y Mathis Wackernagel, creadores del concepto huella ambiental,» Ambiente Plástico, 25 noviembre 2021. [En línea]. Available: <https://www.ambienteplastico.com/william-rees-y-mathis-wackernagel-creadores-del-concepto-huella-ambiental/>.
- [8] M. Wackernagel y W. Rees, Nuestra huella ecológica: Reduciendo el impacto humano sobre la Tierra, Santiago de Chile: IEP/Lom Ediciones, 2001.
- [9] H. Schneider y J. Samaniego, La huella del carbono en la producción, distribución y consumo de bienes y servicios., Impreso en Naciones Unidas, Santiago de Chile: Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), marzo, 2010.
- [10] M. Farag, Materials and process selection for engineering design, Broken Sound Parkway NW. Boca Raton, FL: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2014.
- [11] A. Raman, Materials Selection and Applications in Mechanical Engineering, New York, USA: Industrial Press Inc., 2006.
- [12] M. Ashby, Primeros pasos en CES Edupack, University of Cambridge: Granta Design Ltd., 2013.
- [13] M. Ashby, Materials and the Environment: Eco-Informed Material Choice, 3rd ed., Oxford, United Kingdom: Butterworth-Heinemann, Elsevier, 2021.

- [14] Federación Española de Remo, «Historia del Remo,» 03 marzo 2014. [En línea]. Available: <http://federemo.org/historia-del-remo/#:~:text=En%20el%20Imperio%20Romano%20aparecen,de%20otros%20pa%C3%ADses%20de%20Europa>.
- [15] SemirrigidasOnline.es, «¿Conoces la historia de los remos? Te la contamos,» 16 junio 2016. [En línea]. Available: <https://semirrigidasonline.es/conoces-la-historia-los-remos-te-la-contamos/>.
- [16] J. Gonzalez, «La historia de la bicicleta, de vehículo a declaración política,» 20minutos.es, 18 julio 2016. [En línea]. Available: <https://www.20minutos.es/noticia/2796905/0/historia-bicicleta-exposicion/>.
- [17] Bikester, «DESARROLLO DE LA BICICLETA DURANTE LOS ÚLTIMOS 200 AÑOS,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.bikester.es/info/historia-bicicleta/>.
- [18] R. Tohmé, «La historia del telescopio,» Astronomía Online, septiembre 2013. [En línea]. Available: <https://www.astronomiaonline.com/2013/09/la-historia-del-telescopio/#:~:text=La%20invenci%C3%B3n%20del%20telescopio%20marc%C3%B3,primeros%20a%C3%B1os%20del%20siglo%20XVII..>
- [19] A. Medellín, L. Rodríguez, I. Esparza y A. D. L. Garza, «La enseñanza de la Ingeniería Mecánica apoyada en herramientas de innovación educativa,» de *MEMORIAS DEL XXIV CONGRESO INTERNACIONAL ANUAL DE LA SOMIM, CAMPECHE, MÉXICO, 2018*.
- [20] W. L., «BICYCLE». Patente 1 329 940, 03 febrero 1920.

## 5 ANEXOS

### ANEXO I. Ejemplos de Índices de Desempeño de Material

Tabla 5.1. Ejemplos de Indicadores de Desempeño de Materiales para determinadas Funciones, Objetivos y Restricciones [3]

Función, objetivo y restricción	Indicadores
Tirante, peso mínimo, rigidez prescrita	$\frac{E}{\rho}$
Viga, peso mínimo, rigidez prescrita	$\frac{E^{1/2}}{\rho}$
Viga, peso mínimo, resistencia prescrita	$\frac{\sigma_y^{2/3}}{\rho}$
Viga, costo mínimo, rigidez prescrita	$\frac{E^{1/2}}{C_m \rho}$
Viga, costo mínimo, resistencia prescrita	$\frac{\sigma_y^{2/3}}{C_m \rho}$
Columna, costo mínimo, carga de pandeo prescrita	$\frac{E^{1/2}}{C_m \rho}$
Resorte, peso mínimo para almacenamiento de energía dado	$\frac{\sigma_y^2}{E \rho}$
Aislante térmico, costo mínimo, flujo de calor prescrito	$\frac{1}{\lambda C_p \rho}$
Electroimán, campo máximo, aumento de temperatura prescrito	$\frac{C_p \rho}{\rho_e}$
<p><math>\rho = \text{densidad}; E = \text{Módulo de Young}; \sigma_y = \text{Límite de resistencia elástico}; C_m = \frac{\text{costo}}{\text{kg}};</math>  <math>\lambda = \text{conductividad térmica}; \rho_e = \text{resistividad eléctrica}; C_p = \text{calor específico}</math></p>	



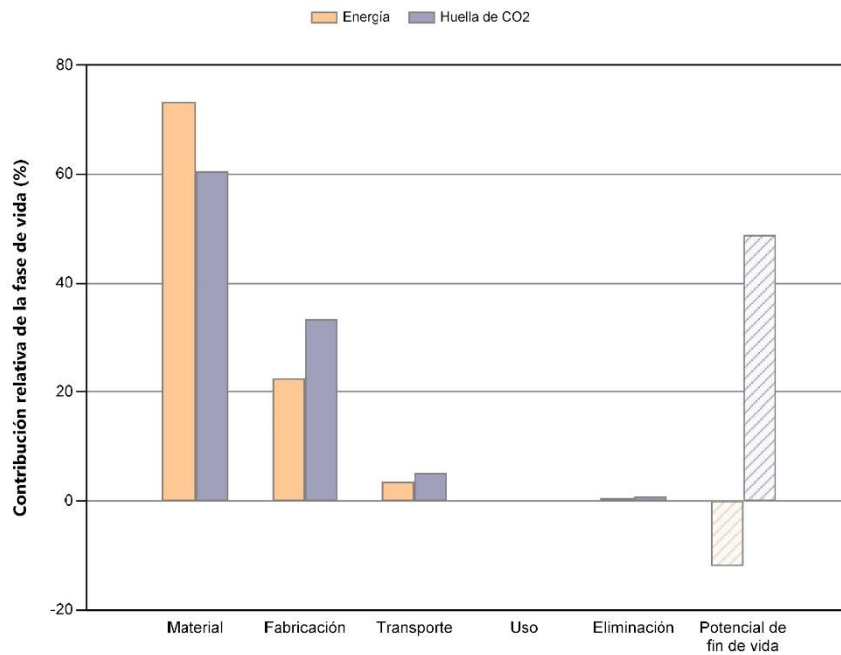
## ANEXO II. Informe Ejemplo Proyecto Eco Audit



### Informe de Eco Audit

Nombre del producto: Sillas de Jardín  
 País de uso: Europa  
 Vida del producto (años): 10

#### Resumen:



[Detalles energéticos](#)

[Detalles de la huella de carbono](#)

Fase	Energía (MJ)	Energía (%)	Huella de CO2(kg)	Huella de CO2 (%)
Material	1.38e+05	73.2	5.82e+03	60.7
Fabricación	4.28e+04	22.6	3.21e+03	33.4
Transporte	6.88e+03	3.6	496	5.2
Uso	0	0.0	0	0.0
Eliminación	1e+03	0.5	70	0.7
Total (para primera vida)	<b>1.89e+05</b>	<b>100</b>	<b>9.6e+03</b>	<b>100</b>
Potencial de fin de vida	-2.25e+04		4.7e+03	

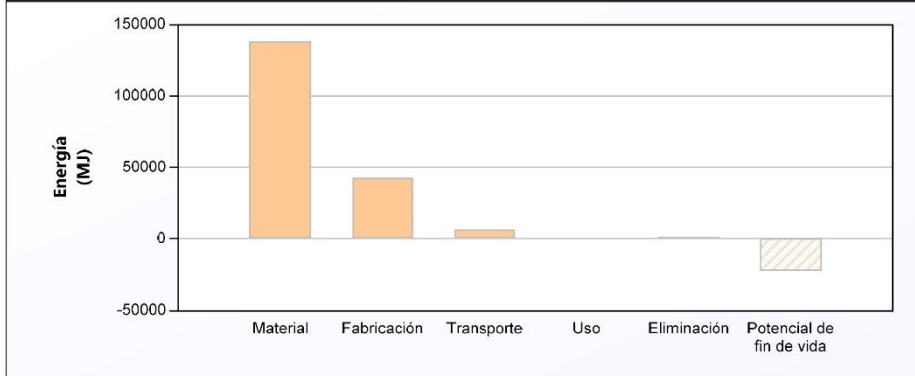
NOTA: Las diferencias de menos del 20% no suelen ser significativas.

[Ver notas sobre precisión y fuentes de datos.](#)

Página 1 / 5  
viernes, 19 de abril de 2019

**Análisis de energía**

[Resumen](#)



	Energía (MJ / año)
Carga ambiental anual equivalente (promediada a lo largo de 10 año/s de vida útil del producto):	1.89e+04

**Desglose detallado de las fases de vida individual**

**Material:**

[Resumen](#)

Componente	Material	% reciclado*	m (kg) pieza	Uds.	m total (kg)	Energía (MJ)	%
Silla	Polipropileno o polímero PP	Virgen (0%)	4	500	2e+03	1.4e+05	100.0
Total				500	2e+03	1.4e+05	100

\*Típico: Incluye 'fracción de reciclaje en el suministro actual'

**Fabricación:**

[Resumen](#)

Componente	Proceso	Uds.	Energía (MJ)	%
Silla	Moldeo de polímeros	2e+03 kg	4.3e+04	100.0
Total			4.3e+04	100

---

**Transporte:**[Resumen](#)**Desglose por etapa de transporte**

Nombre de etapa	Tipo de transporte	Distancia (km)	Energía (MJ)	%
desde Shanghái, China al puerto de Le Havre, Francia	Transporte marítimo	1.9e+04	6.9e+03	100.0
Total		<b>1.9e+04</b>	<b>6.9e+03</b>	<b>100</b>

**Desglose por componentes**

Componente	Masa (kg)	Energía (MJ)	%
Silla	2e+03	6.9e+03	100.0
Total	<b>2e+03</b>	<b>6.9e+03</b>	<b>100</b>

---

**Uso:**[Resumen](#)**Contribución relativa de los modos estáticos y móviles**

Modo	Energía (MJ)	%
Estático	0	
Móvil	0	
Total	<b>0</b>	<b>100</b>

---

**Eliminación:**[Resumen](#)

Componente	Opción de fin de vida	Energía (MJ)	%
Silla	Incineración	1e+03	100.0
Total		<b>1e+03</b>	<b>100</b>

**Potencial de fin de vida:**

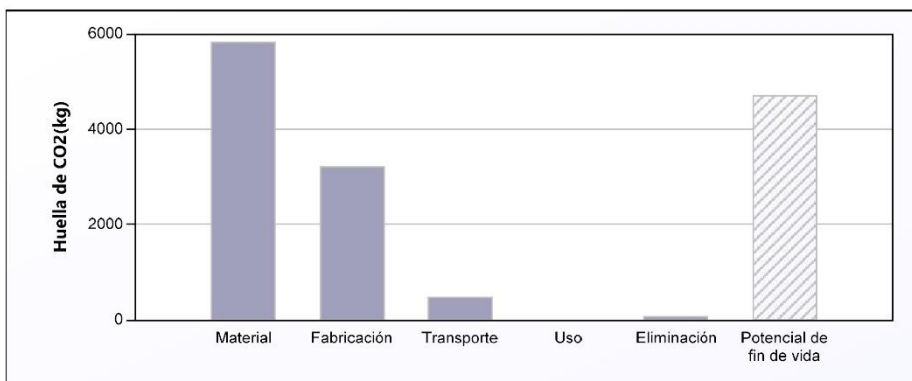
Componente	Opción de fin de vida	Energía (MJ)	%
Silla	Incineración	-2.3e+04	100.0
Total		<b>-2.3e+04</b>	<b>100</b>

---

**Notas:**[Resumen](#)

**Análisis de la huella de carbono**

[Resumen](#)



	CO2 (kg/año)
Carga ambiental anual equivalente (promediada a lo largo de 10 año/s de vida útil del producto):	960

**Desglose detallado de las fases de vida individual**

**Material:**

[Resumen](#)

Componente	Material	% reciclado*	m (kg) pieza	Uds.	m total (kg)	Huella de CO2(kg)	%
Silla	Polipropileno o polímero PP	Virgen (0%)	4	500	2e+03	5.8e+03	100.0
Total				500	2e+03	5.8e+03	100

\*Típico: Incluye 'fracción de reciclaje en el suministro actual'

**Fabricación:**

[Resumen](#)

Componente	Proceso	Uds.	Huella de CO2(kg)	%
Silla	Moldeo de polímeros	2e+03 kg	3.2e+03	100.0
Total			3.2e+03	100

---

**Transporte:**[Resumen](#)**Desglose por etapa de transporte**

Nombre de etapa	Tipo de transporte	Distancia (km)	Huella de CO2 (kg)	%
desde Shanghai, China al puerto de Le Havre, Francia	Transporte marítimo	1.9e+04	5e+02	100.0
Total		<b>1.9e+04</b>	<b>5e+02</b>	<b>100</b>

**Desglose por componentes**

Componente	Masa (kg)	Huella de CO2 (kg)	%
Silla	2e+03	5e+02	100.0
Total	<b>2e+03</b>	<b>5e+02</b>	<b>100</b>

---

**Uso:**[Resumen](#)**Contribución relativa de los modos estáticos y móviles**

Modo	Huella de CO2(kg)	%
Estático	0	
Móvil	0	
Total	<b>0</b>	<b>100</b>

---

**Eliminación:**[Resumen](#)

Componente	Opción de fin de vida	Huella de CO2(kg)	%
Silla	Incineración	70	100.0
Total		<b>70</b>	<b>100</b>

**Potencial de fin de vida:**

Componente	Opción de fin de vida	Huella de CO2(kg)	%
Silla	Incineración	4.7e+03	100.0
Total		<b>4.7e+03</b>	<b>100</b>

---

**Notas:**[Resumen](#)





## ANEXO IV. Ejemplos de Índices de Desempeño de Forma

**Tabla 5.2.** Ejemplos de Indicadores de Desempeño de Forma para un diseño de rigidez y resistencia limitada con peso mínimo [3]

Función, objetivo y restricción	Diseño limitado por la rigidez	Diseño limitado por la resistencia
Tirante (tracción) con carga, rigidez y longitud especificadas; sección libre	$\frac{E}{\rho}$	$\frac{\sigma_f}{\rho}$
Viga (flexión) cargada externamente o por peso propio; rigidez, resistencia y longitud especificadas; área de sección y forma libres	$\frac{(\phi_B^e E)^{1/2}}{\rho}$	$\frac{(\phi_B^f \sigma_f)^{2/3}}{\rho}$
Barra o tubo de torsión cargado externamente; con rigidez, resistencia y longitud especificadas; área de sección y forma libres	$\frac{(\phi_T^e E)^{1/2}}{\rho}$	$\frac{(\phi_T^f \sigma_f)^{2/3}}{\rho}$
Columna (compresión) con carga de colapso por pandeo o aplastamiento plástico; resistencia y longitud especificadas, área de sección y forma libres	$\frac{(\phi_B^e E)^{1/2}}{\rho}$	$\frac{\sigma_f}{\rho}$
<p><i>Los factores de forma <math>\phi_B^e</math> y <math>\phi_B^f</math> son para cargas a flexión;</i>  <i>los factores de forma <math>\phi_T^e</math> y <math>\phi_T^f</math> son para cargas a torsión</i>  <i><math>\rho</math> = densidad; <math>E</math> = Módulo de Young; <math>\sigma_f</math> = Límite de resistencia elástico;</i>  <i>Para costo mínimo de diseño se recomienda cambiar <math>\rho</math> por <math>C_m</math> en los índices</i></p>		