

Trabajo Fin de Máster

Máster en Ingeniería Industrial

Estudio de impacto ambiental de la fabricación de filtros cerámicos para aplicaciones a alta temperatura

Autor: Álvaro Romero Macías

Tutor: Bernabé Alonso Fariñas

Dpto. de Ingeniería Química y Ambiental
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2020



Trabajo Fin de Máster
Máster en Ingeniería Industrial

Estudio de impacto ambiental de la fabricación de filtros cerámicos para aplicaciones a alta temperatura

Autor:

Álvaro Romero Macías

Tutor:

Bernabé Alonso Fariñas

Profesor Contratado Doctor

Dpto. de Ingeniería Química y Ambiental

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2020

Proyecto Fin de Carrera: Estudio de impacto ambiental de la fabricación de filtros cerámicos para aplicaciones a alta temperatura

Autor: Álvaro Romero Macías

Tutor: Bernabé Alonso Fariñas

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2020

El Secretario del Tribunal

Agradecimientos

Tras estos años de carrera este es el documento que me hace cumplir una de mis grandes metas desde muy temprana edad: convertirme en Ingeniero Industrial. Ha sido una etapa larga y dura pero bonita, donde me llevo grandes aprendizajes y grandes amigos.

En primer lugar, me gustaría mostrar mi agradecimiento a D. Bernabé Alonso Fariñas, tutor de este proyecto. Gracias a su manera de enseñar y a su lógica me voy de este proyecto siendo una persona con más capacidad analítica, mayor pensamiento crítico y, en definitiva, con mayor madurez profesional. Además, le agradezco enormemente su cercanía, paciencia y disponibilidad en todo momento.

Me gustaría dedicar también este proyecto a todos mis compañeros y amigos de carrera que me han acompañado durante esta travesía. Estoy feliz de que, habiendo compartido momentos buenos y no tan buenos, todos hayamos llegado al final.

Por último, dedicarlo y dar gracias a mi familia. A mis hermanos Tobías, Javier y Belén que me han cuidado y apoyado durante toda mi vida. A mi madre Pilar, que ha luchado tanto y que se merece el reconocimiento del título de ingeniería igual o más que yo. A ella GRACIAS. Y a mi padre Tobías, que sé que desde arriba me cuida y observa orgulloso.

Álvaro Romero Macías

Sevilla, 2020

Resumen

En este proyecto, se ha estudiado el impacto ambiental generado por la fabricación de filtros cerámicos para gases a alta temperatura mediante dos procesos diferentes. Por un lado, se ha estudiado el proceso de fabricación de estos filtros con carburo de silicio biomórfico, un material novedoso considerado como *ecofriendly* y, por otro lado, el proceso de fabricación convencional a partir de carburo de silicio granular para, finalmente, llevar a cabo una comparativa entre ambos procesos.

Para esto, se ha llevado a cabo un Análisis de Ciclo de vida (ACV) de ambos procesos de fabricación de acuerdo a los estándares ISO 14040 y 14044. Se ha elaborado un Inventario de Ciclo de Vida (ICV) a través de una búsqueda de información en publicaciones previas y en la base de datos Ecoinvent 3.0. Además, se ha hecho un modelo del mix eléctrico español adaptado a la producción actual que ha sido introducido en el modelo de ciclo de vida realizado. Para el cálculo de impactos se ha empleado el método RECIPE en su versión más actualizada y el software SimaPro.

Tras analizar los datos recogidos, se ha observado que en 10 de las 18 categorías estudiadas la fabricación convencional de candelas a partir de carburo de silicio granular produce menor impacto que la fabricación de candelas de carburo de silicio biomórfico. Además, se ha realizado un análisis de sensibilidad donde el mix eléctrico ha sido actualizado de acuerdo a los objetivos marcados de reducción de emisiones para 2030. Tras este análisis, 10 de las 18 categorías siguen siendo favorables a la fabricación de la candela de SiC convencional.

Índice

Agradecimientos	9
Resumen	10
Índice	11
Índice de Tablas	12
Índice de Figuras	13
Siglarío	15
1 Introducción	16
2 Objetivo	18
3 Alcance	20
3.1 <i>Definición del sistema</i>	20
3.2 <i>Función del sistema de estudio</i>	21
3.3 <i>Unidad funcional</i>	21
3.4 <i>Límites del sistema</i>	21
3.5 <i>Descripción del sistema</i>	22
3.6 <i>Categorías de impacto seleccionadas y metodología de evaluación de impacto</i>	24
3.7 <i>Suposiciones</i>	26
3.8 <i>Limitaciones</i>	26
4 Inventario del ciclo de vida	27
4.1 <i>Base de datos</i>	37
4.2 <i>Calidad de los datos</i>	38
4.3 <i>Mix eléctrico</i>	40
5 Evaluación del impacto del ciclo de vida	42
6 Interpretación de los resultados	47
6.1 <i>Interpretación de los resultados</i>	47
6.2 <i>Análisis de sensibilidad</i>	51
7 Conclusiones	57
Anexos	58
Bibliografía	67

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Descripción categorías de impacto del método ReCiPe utilizadas.....	25
Tabla 2. Inventario del ciclo de vida fabricación a partir de madera	27
Tabla 3. Coeficientes integral cp(t) del silicio en fase líquida y sólida [12].....	33
Tabla 4. Inventario del ciclo de vida fabricación a partir de arena de cuarzo y coque	37
Tabla 5. Requerimientos de calidad de datos	39
Tabla 6. Ponderación de los requerimientos de calidad de datos	39
Tabla 7. Ponderación y puntuación por requerimiento de calidad.....	40
Tabla 8. Valores absolutos de impacto para cada categoría y sistema	43
Tabla 9. Categorías favorables para cada sistema (el porcentaje entre paréntesis indica la disminución del impacto respecto al otro sistema)	47
Tabla 10. Comparativa de impactos con mix eléctrico de 2018 y estimación de 2030.....	55
Tabla 11. Resultados Sistema 1	61
Tabla 12. Resultados Sistema 2.....	62
Tabla 13. Comparativa entre sistemas con estimación del mix eléctrico 2030.....	63

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de instalación de un reactor de centrifugación por pirólisis [3]	16
Figura 2. Detalle de un dispositivo de filtrado a través de candelas [4]	17
Figura 3. Esquema de funcionamiento de las candelas [3].....	17
Figura 4. Marco de referencia de un ACV según UNE-EN-ISO 14040:2006	19
Figura 5. Candela SentroTech [20]	20
Figura 6. Límites del Sistema 1	22
Figura 7. Límites del Sistema 2.....	22
Figura 8. Formas de bioSiC obtenidas de diferentes precursores de madera [2]	23
Figura 9. Categorías de impacto UNEP/SETAC [25]	24
Figura 10. a) Preforma de MDF antes de la pirólisis; b) Preforma de carbono resultante de la pirólisis.....	28
Figura 11. Esquema de la candela contenida en el bloque pirolizado	28
Figura 12. a) Bloque de carbono resultante de la pirólisis; b) Preforma obtenida tras el mecanizado	30
Figura 13. Dimensiones candelas.....	30
Figura 14. Morfología de la preforma a) Tras el mecanizado; b) Tras la infiltración	31
Figura 15. Requerimientos de potencia en el horno a lo largo del proceso de infiltración [8]	32
Figura 16. a) Composición preforma tras la infiltración; b) Composición preforma tras la evaporización	35
Figura 17. Composición de la base de datos Ecoinvent [32]	38
Figura 18. Mix Eléctrico Español en 2018 [33]	40
Figura 19. Desglose participantes en la cogeneración [34]	41
Figura 20. Elementos de la fase EICV [19].....	42
Figura 21. Comparativa del impacto total generado por cada sistema en cada categoría de impacto.....	44
Figura 22. Impacto generado en porcentaje por cada subproceso del Sistema 1	45
Figura 23. Impacto generado en porcentaje por cada subproceso del Sistema 2	46
Figura 24. Estimación del mix eléctrico para 2030.....	52
Figura 25. Comparativa impacto producido por el mix eléctrico de 2018 y la estimación para 2030	53
Figura 26. Comparativa del impacto total generado por cada sistema actualizado con la estimación del mix eléctrico para 2030	54
Figura 27. Inventario de Ciclo de Vida Sistema 1	60
Figura 28. Inventario de Ciclo de Vida Sistema 2	60
Figura 29. Códigos de colores diagramas de red	64
Figura 30. Diagrama de red Sistema 1 categoría <i>Global Warming</i>	65
Figura 31. Diagrama de red Sistema 2 categoría <i>Global Warming</i>	66

Siglarío

ACV	Análisis de Ciclo de Vida
ISO	International Organization for Standardization
MDF	Medium Density Fiberboard
REE	Red Eléctrica Española
ICV	Inventario de Ciclo de Vida
EICV	Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida
RoW	Rest of the World
GLO	Global
APOS	Allocation at the Point Of Substitution

1 INTRODUCCIÓN

El concepto de Sostenibilidad aparece por primera vez en el informe Brundtland “*Nuestro futuro común*” de 1987. En este informe, se define por primera vez la Sostenibilidad como:

“Desarrollo que satisface las necesidades presentes sin comprometer la posibilidad de que las generaciones futuras puedan satisfacer las suyas”

Existe, como compromiso en esta nueva era, encontrar procesos productivos eficientes y rentables pero que al mismo tiempo sean sostenibles. Este compromiso está suponiendo un reto para la industria y trae consigo numerosos avances tecnológicos de gran envergadura. Algunos de estos avances se centran en la tecnología de los materiales.

Entre los diversos tipos de materiales, la cerámica desempeñó un papel clave en la revolución industrial. Los materiales cerámicos han sido frecuentemente utilizados en la industria y desde hace 50 años han incrementado sus aplicabilidades gracias a un crecimiento en la investigación y el desarrollo [1].

En concreto, el carburo de silicio (SiC) es un material muy utilizado en instalaciones industriales para la generación de energía dadas sus excelentes propiedades. Hoy en día, es utilizado como material estructural en aplicaciones que requieren dureza, resistencia a alta temperatura, alta conductividad térmica, bajo coeficiente de expansión térmica y buena resistencia al desgaste y a la abrasión [2].

Una de las aplicaciones del SiC es el filtrado de partículas en corrientes gaseosas a altas temperaturas. Actualmente, se fabrican filtros de SiC que se ubican en las instalaciones de manera que el gas pase a través de ellos. Estos filtros se conocen también como candelas. En la **Figura 1** se muestra como ejemplo el esquema de de una instalación de un reactor de centrifugación por pirólisis donde son utilizados estos filtros. En la **Figura 2** se detalla el dispositivo de filtrado donde se ubican las candelas.

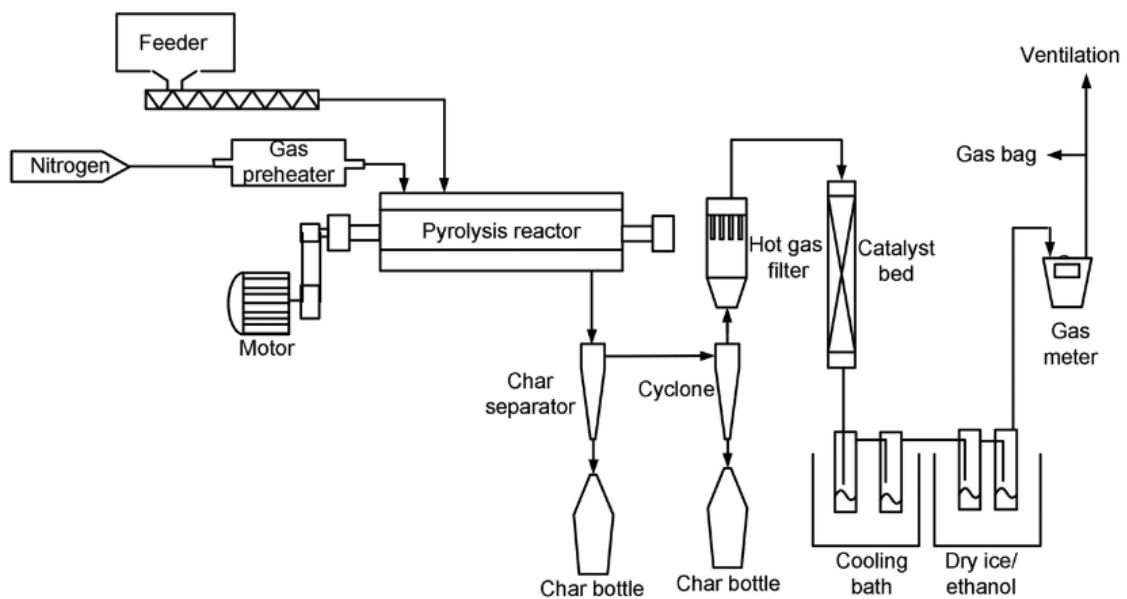


Figura 1. Esquema de instalación de un reactor de centrifugación por pirólisis [3]

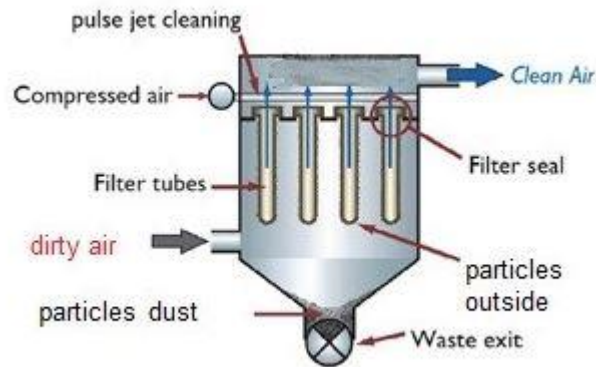


Figura 2. Detalle de un dispositivo de filtrado a través de candelas [4]

Este filtrado es muy importante a la hora de obtener un proceso limpio y eficiente, minimizando las emisiones contaminantes para producir el menor impacto posible o protegiendo los equipos situados aguas abajo de potenciales daños producidos por la abrasión. Estas partículas depositadas sobre las paredes de las candelas pueden ser eliminadas posteriormente mediante gas a presión en el sentido contrario al flujo de gas filtrado. Con esto, la candela quedaría limpia y disponible para un nuevo ciclo de filtración. En la **Figura 3** se detalla el funcionamiento de estas.

En la última década, se han realizado avances con respecto a este material, llegando a obtener lo que se conoce como carburo de silicio biomórfico (bioSiC). El bioSiC consiste en un material *ecocerámico* que se genera a partir de la infiltración con silicio de preformados de madera pirolizada. Posee excelentes propiedades ante esfuerzos térmicos y mecánicos y gracias a estas propiedades y a la posibilidad de fabricar con él elementos porosos, este material es idóneo para filtros de gases a alta temperatura.

En trabajos anteriores [1], [2], [12]–[17], [5], [6]–[11], ha sido estudiado su proceso de fabricación, sus propiedades mecánicas y su comportamiento en condiciones de trabajo. Aunque en estos trabajos se ha afirmado que es un material obtenido de manera respetuosa con el medio ambiente, no se ha encontrado ningún trabajo publicado que lo verifique o cuantifique desde el punto de vista ambiental.

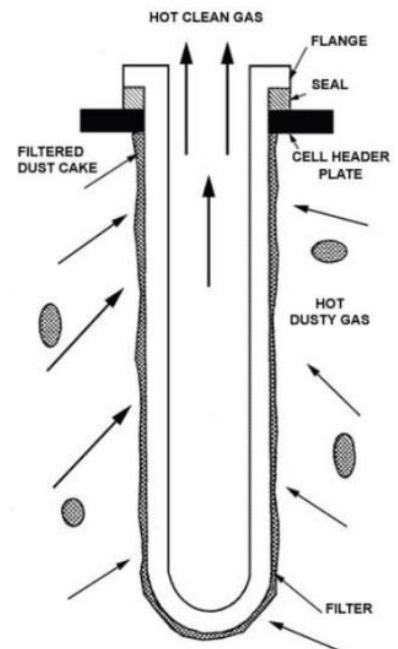


Figura 3. Esquema de funcionamiento de las candelas [3]

2 OBJETIVO

Dado el prometedor futuro del carburo de silicio biomórfico para la fabricación de filtros cerámicos para alta temperatura, según las investigaciones realizadas hasta el momento [1], [2], [12]–[17], [5], [6]–[11], se hace patente la necesidad de realizar una comparativa de la fabricación de estos filtros con este material frente su obtención a partir de carburo silicio convencional. El objetivo por tanto de este proyecto es realizar dicha comparativa para determinar si realmente la fabricación de candelas empleando bioSiC supone un proceso más respetuoso con el medio ambiente frente al proceso convencional de obtención de candelas de SiC.

Para llevar a cabo esta comparativa, se estudiarán ambos procesos para posteriormente realizar un Análisis de Ciclo de Vida (ACV). Un ACV es una herramienta de gestión medioambiental que permite analizar de manera sistemática, objetiva y científica, el impacto ambiental generado por un producto o proceso durante su ciclo de vida. En la normativa UNE-EN-ISO 14040 [18], tal y como muestra la **Figura 4**, el ACV es definido como una técnica que trata los aspectos medioambientales y los impactos ambientales potenciales a lo largo del ciclo de vida de un producto mediante:

- Definición del objetivo y el alcance.
- La recopilación de un inventario de las entradas y salidas relevantes del sistema del producto (producto/proceso en estudio).
- La evaluación de los potenciales impactos medioambientales asociados con las entradas y salidas identificadas en el inventario.
- La interpretación de los resultados de las fases de análisis de inventario y evaluación de impacto de acuerdo con los objetivos del estudio.

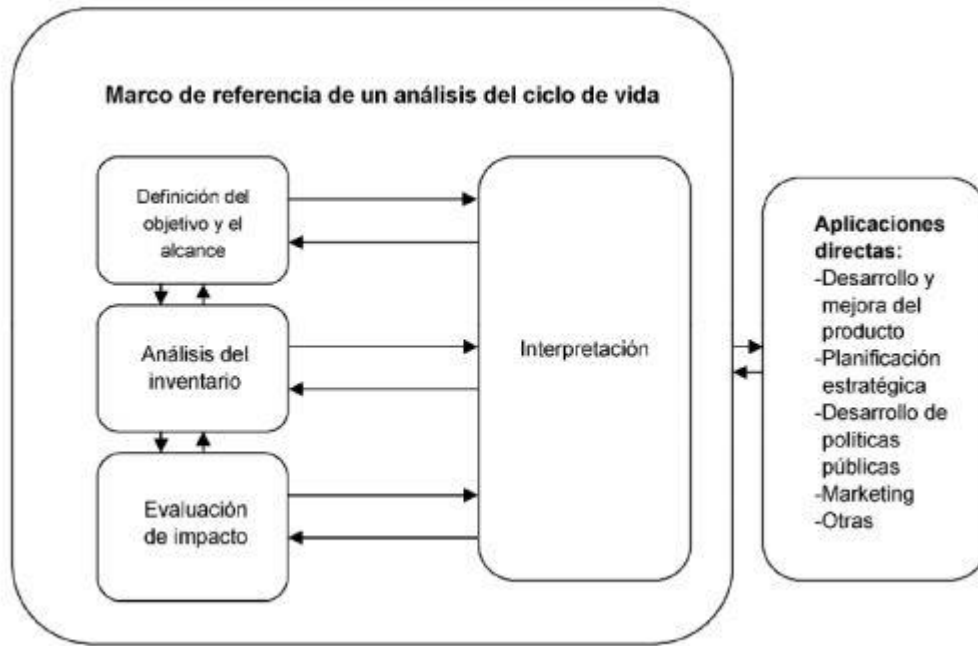


Figura 4. Marco de referencia de un ACV según UNE-EN-ISO 14040:2006

Este estudio proporcionará una visión global de los impactos producidos por cada proceso y permitirá ver qué subprocesos son los que más contribuyen al impacto ambiental total generado. Para esto, tal y como se ha comentado antes, se llevará a cabo un análisis de inventario del proceso con vistas a determinar entradas y salidas de cada sistema.

Este ACV se desarrollará con el software SimaPro y acorde a las normativas ISO 14040/44 [18], [19]. Con los resultados obtenidos, aquellas personas interesadas en producir o comprar esta tecnología, tendrán una visión de los impactos ambientales que genera cada alternativa, facilitando la toma de decisiones.

3 ALCANCE

En este apartado se describirá el alcance general del proyecto para lograr los objetivos establecidos. Dentro del alcance se incluirá:

- Definición del sistema a estudiar.
- Función del sistema de estudio.
- Unidad funcional.
- Límites del sistema
- Descripción del sistema
- Categorías de impacto seleccionadas y metodología de evaluación de impacto.
- Suposiciones.
- Limitaciones.

3.1 Definición del sistema

El estudio se llevará a cabo, tal y como se ha comentado en la introducción, sobre dos sistemas diferentes de producción de candelas cerámicas.

- **Sistema 1:** fabricación de una candela de bioSiC tomando madera Medium Density Fiberboard (MDF) como precursor
- **Sistema 2:** fabricación convencional de una candela de SiC producido a partir de SiC granulado

Se definirá filtro cerámico o candela como aquel dispositivo de origen cerámico utilizado para el filtrado de partículas de gases a alta temperatura a través de la porosidad de sus paredes. En la **Figura 5** se muestra la candela que ocupará el estudio de este proyecto obtenida del fabricante SentroTech.



Figura 5. Candela SentroTech [20]

Para el cálculo del ACV se tomará una candela de 60x1000 mm de este fabricante.

3.2 Función del sistema de estudio

Ambos sistemas comparten la misma función: la fabricación de candelas que, al hacer atravesar un gas a través de las mismas, las partículas del gas se depositen en sus paredes con un rendimiento de filtración suficiente para generar una salida de un gas limpio. Esto ayudará a mejorar la eficiencia del proceso en las siguientes etapas o reducirá las emisiones finales de partículas a la atmósfera de acuerdo a la legislación correspondiente, según el caso.

3.3 Unidad funcional

La unidad funcional es una medida del comportamiento de las salidas funcionales de un sistema y su propósito es proporcionar una referencia para las entradas y salidas del mismo. Esta referencia es necesaria para asegurar que la comparación entre los sistemas se hace sobre una base común. La unidad funcional seleccionada deberá estar definida y ser medible [21].

Para este proyecto se tomará como unidad funcional **una candela de SiC** de dimensiones 60x1000 mm.

Las características de esta candela pueden ser consultadas en el catálogo del fabricante [20].

3.4 Límites del sistema

En este apartado se establecerán qué subprocesos se tendrán en cuenta en cada sistema para llevar a cabo el ACV.

A la vista de las etapas que conforman el ciclo de vida, es habitual encontrarse con alcances diferentes respecto a los límites del sistema en el desarrollo de un ACV, siendo los más habituales [22]:

- De la puerta a la puerta (Gate to gate): considera únicamente las actividades (proceso productivo) de la empresa a la que se aplica.
- De la cuna a la puerta (Cradle to gate): toma en consideración desde la extracción y acondicionamiento de materias primas hasta el proceso productivo de la empresa.
- De la puerta a la tumba (Gate to grave): considera el proceso productivo de la empresa y abarca hasta la fase de gestión de los residuos a que da lugar el producto.
- De la cuna a la tumba (Cradle to grave): estudia desde el acondicionamiento de las materias primas hasta la gestión última de los residuos (reciclaje u otros).
- De la cuna a la cuna (Cradle to cradle): considera el ciclo de vida completo del producto, ya que abarca desde el acondicionamiento de las materias primas hasta que el producto, tras quedar fuera de uso, es reintroducido en el mismo proceso productivo o en otro.

Para este proyecto se tomará como límite del sistema **de la cuna a la puerta** dado que, como se comentará en el apartado de suposiciones, se tomará que el comportamiento de las candelas fabricadas por ambos métodos será exactamente igual de la puerta a la tumba, haciendo válido por tanto el análisis propuesto.

A continuación, se detallan los dos sistemas en cuestión:

Sistema 1 - Fabricación de una candela de bioSiC tomando madera (MDF) como precursor

En la **Figura 6** se muestran las distintas etapas de las que consta el proceso de fabricación de candelas de bioSiC a partir de un panel MDF.

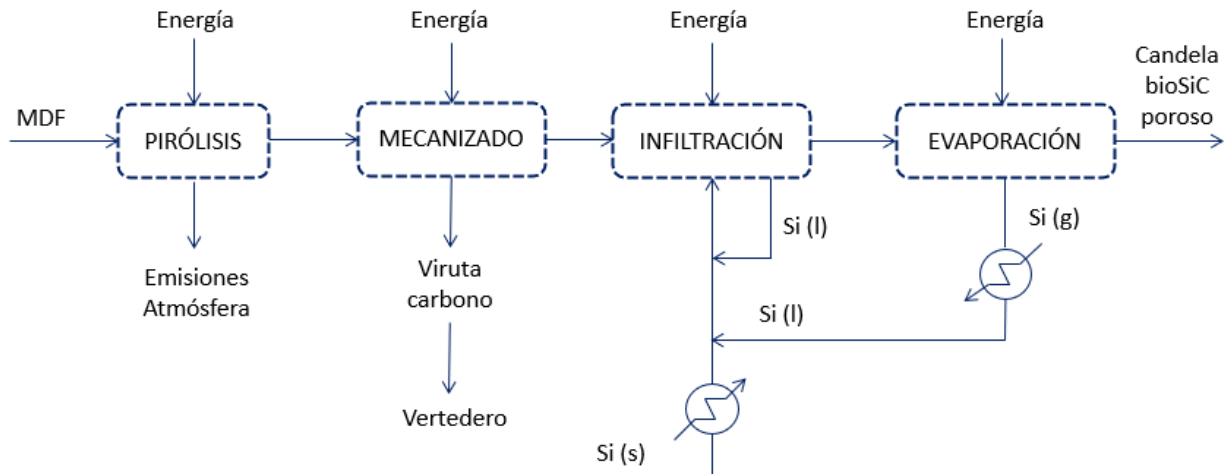


Figura 6. Límites del Sistema 1

Sistema 2 - Fabricación convencional de una candela de SiC producido a partir de SiC granulado

En la Figura 7 se muestran las distintas etapas del proceso convencional de fabricación de candelas a través de carburo de silicio granular compuesto de arena de cuarzo y coque de petróleo.



Figura 7. Límites del Sistema 2

Para el proceso de transformación de carburo de silicio granular a carburo de silicio en la preforma de la candela antes de la sinterización, también se utilizan métodos como el moldeo o la réplica. Para este proyecto se tomará el proceso de extrusión.

3.5 Descripción del sistema

Para los sistemas expuestos en el apartado anterior, se detallarán los subprocesos que los componen para así obtener una visión completa de la fabricación de la candela para cada uno de ellos.

Sistema 1 - Fabricación de una candela de bioSiC tomando madera (MDF) como precursor

Este proceso, tal y como se ha comentado anteriormente es el que da origen al carburo de silicio biomórfico. Como precursor se utilizará una preforma de MDF que puede elaborarse a partir de maderas con distintas densidades e incluso de desechos de madera, reciclando así esta materia prima. Esta preforma será sometida a una pirólisis de la que se obtendrá como producto principal una pieza de carbono con la misma microestructura que la preforma de madera.

Mediante la pirólisis, el agua y los volátiles de la madera se evaporan, y el resultado es una pieza que mantiene las características microestructurales básicas del material natural de partida, incluyendo 20-70% de los poros interconectados de diferentes tamaños y configuraciones que son idóneos para la infiltración de fluidos. En el proceso, se pierde aproximadamente el $75 \pm 5\%$ del peso inicial de la madera. El volumen se reduce al mismo tiempo en un $60 \pm 5\%$. Estos resultados parecen ser independientes del tipo de madera, por lo que son posibles algunas relaciones útiles para la selección de materiales [16].

Una vez obtenida la pieza de carbono tras la pirólisis, esta será sometida a un mecanizado simple para obtener la forma de la candela que finalmente se necesita para la instalación. Con esta estructura final lista, se procede a realizar una infiltración líquida de silicio para dotar a la estructura de las propiedades mecánicas necesarias.

La infiltración líquido-silicio se realiza en vacío. Las preformas porosas a base de carbono se colocan en un horno junto con las escamas de silicio. Cuando se alcanza la temperatura de fusión, el silicio se licua e infiltra en la preforma a través de sus poros hasta que se produce la reacción de este con el carbono produciendo carburo de silicio [16].

La temperatura debe ser superior a la temperatura de fusión del Si (1410°C). Las temperaturas más altas reducen básicamente la viscosidad del Si fundido, lo que aumenta la tasa de infiltración. A 1550°C , el Si se infiltra rápidamente en la preforma por capilaridad, rellenando los canales de madera de la gama de tamaños 5-100 μm de diámetro. A esta temperatura, los tiempos de mantenimiento del orden de 30 minutos son suficientes para lograr una reacción completa y una microestructura estable [16]. En la infiltración de Si fundido, la reacción de carbono total se obtiene cuando la cantidad de Si añadida excede la determinada por la estequiometría un 234% [12].

El material final consiste en un esqueleto de SiC con una microestructura muy parecida a la del precursor de la madera, con porosidad a menudo llena de silicio residual que no ha reaccionado y que debe ser removido mediante evaporación. Para esto, la pieza será sometida a una temperatura mayor a la temperatura de evaporación del silicio para que este sea eliminado de la estructura.

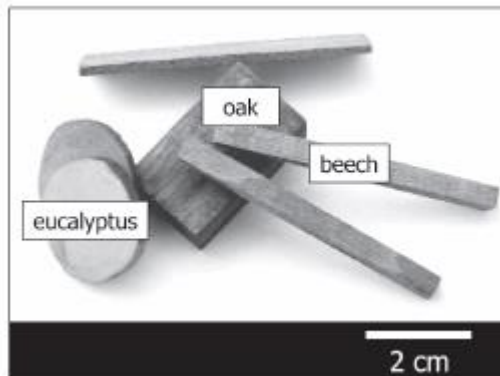


Figura 8. Formas de bioSiC obtenidas de diferentes precursores de madera [2]

Sistema 2 - Fabricación convencional de una candela de SiC producido a partir de SiC granulado

La mezcla de carburo de silicio granular con aditivos, permitirá mediante una extrusión obtener una candela con las dimensiones deseadas para el proceso. Esta candela tendrá la morfología deseada pero no las características mecánicas necesarias, por lo que habrá que someterla a un proceso de sinterización que le de compacidad al material y así aumentar su resistencia.

Para facilitar la sinterización es necesario recurrir al uso de aditivos y/o a métodos de sinterización asistidos con presión, como son los métodos de prensado en caliente (HP), prensado isostático en caliente (HIP) o sinterización bajo presión de gas (GPS). Mediante estas técnicas se pueden obtener materiales de elevadas densidades y buenas prestaciones mecánicas [23].

En este caso, se optará por el sinterizado con arco de plasma. En este proceso, la forma de carburo de silicio es calentada en un horno de plasma a una temperatura de sinterización de entre 2000°C.-2500°C. en una tasa de calefacción de 300° C./hr-2000° C./hr, manteniendo la temperatura de sinterización durante 0,1-2 horas [24].

3.6 Categorías de impacto seleccionadas y metodología de evaluación de impacto

La metodología de evaluación de impacto utilizada para este ACV será *ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.03 / World (2010) H*. Para las distintas metodologías de evaluación de impacto, es necesario escoger entre analizar el efecto último del impacto ambiental, también conocido como *endpoint*, o bien tener en consideración los efectos intermedios, conocidos como *midpoint*.

El enfoque *midpoint* proporciona resultados con baja incertidumbre, sin embargo, para la toma de decisiones a gran escala no aporta la información necesaria. Para esto se utilizaría un enfoque *endpoint* aunque su incertidumbre será algo mayor. En este proyecto se ha optado por un enfoque *midpoint* dada su menor incertidumbre. En la siguiente figura se detallan las categorías pertenecientes a ambas metodologías.

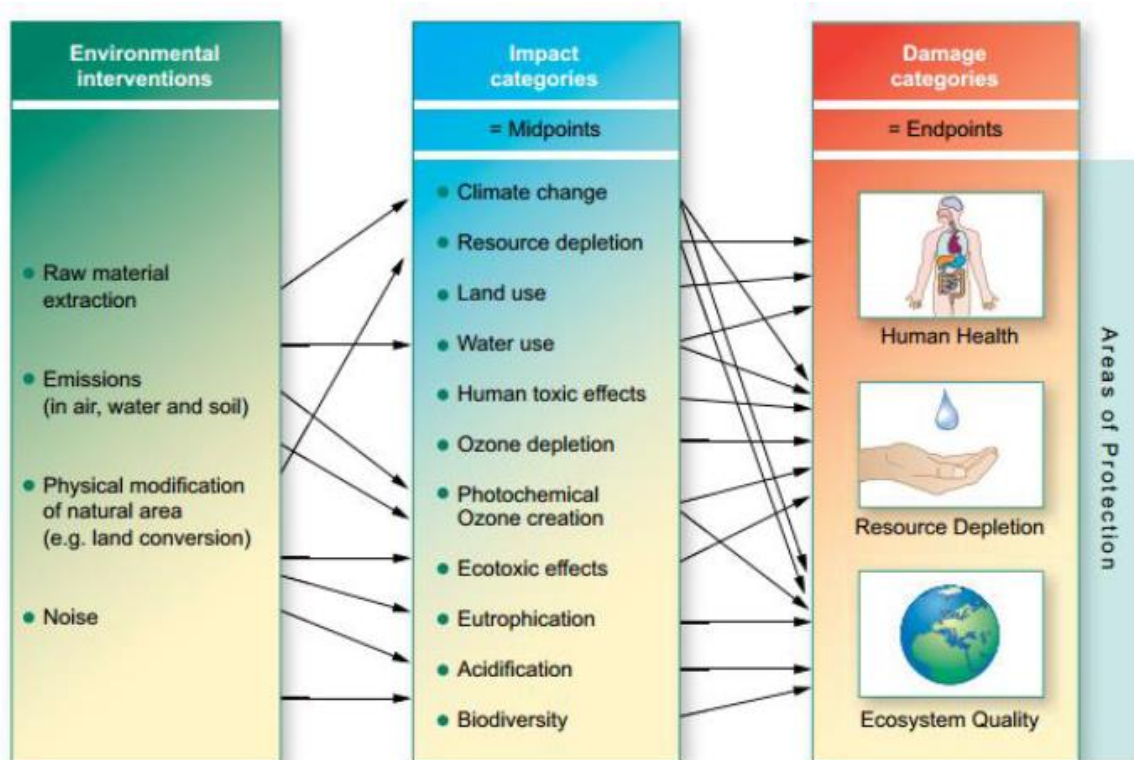


Figura 9. Categorías de impacto UNEP/SETAC [25]

El método seleccionado combina las ventajas de los métodos CML2001 y Eco-Indicator99 [26]. La ventaja del método CML es su solidez científica, mientras que la ventaja del Eco-indicator 99 es su facilidad a la hora de la interpretación. Se trata de una metodología bastante reciente (publicada en el año 2008) e internacionalmente aceptada. Esta metodología también está enmarcada en el ámbito europeo y está considerada como la sucesora de las metodologías anteriores. Además, integra el enfoque orientado al problema ambiental y el orientado al daño. Comprende, por tanto, dos grupos de categorías de impacto: uno de puntos intermedios, que incluye 18 categorías (Cambio climático, Disminución de la capa de ozono, Toxicidad humana, Formación de oxidantes fotoquímicos, Formación de materia particulada, Radiación ionizante, Acidificación terrestre, Eutrofización de agua dulce, Eutrofización marina, Ecotoxicidad terrestre, Ecotoxicidad de agua dulce, Ecotoxicidad marina, Ocupación de terreno agrícola, Ocupación de terreno urbano, Transformación de terreno natural, Disminución de cantidad de agua dulce, Disminución de recursos minerales y Disminución de combustibles fósiles) y otro de puntos finales que incluye 3 categorías (salud humana, ecosistemas y aumento del coste de recursos) [26].

En la **Tabla 1** se muestra una breve descripción para cada categoría de impacto seleccionada.

Categoría de impacto	Nomenclatura	Unidad	Descripción
Global warming	CC	kg CO ₂ eq	Alteración de la temperatura global causada por los gases de efecto invernadero
Stratospheric ozone depletion	OD	kg CFC11 eq	Disminución de la capa de ozono estratosférica debido a las emisiones antropogénicas de sustancias que agotan la capa de ozono
Ionizing radiation	IR	kBq Co-60 eq	Tipo de radiación compuesta de partículas con suficiente energía para liberar un electrón de un átomo o molécula
Ozone formation, Human health	OFH	kg NO _x eq	Efectos de la formación de ozono en los seres humanos
Fine particulate matter formation	PMF	kg PM _{2.5} eq	Las partículas extremadamente pequeñas en suspensión se originan en procesos antropogénicos como combustión, extracción de recursos, etc.
Ozone formation, Terrestrial ecosystems	OFT	kg NO _x eq	Efectos de la formación de ozono en un ecosistema
Terrestrial acidification	TA	kg SO ₂ eq	Reducción del pH debido a los efectos acidificantes de las emisiones antropogénicas
Freshwater eutrophication	FE	kg P eq	Acumulación de nutrientes en los sistemas acuáticos
Marine eutrophication	ME	kg N eq	
Terrestrial ecotoxicity	TET	kg 1,4-DCB	Efectos tóxicos de las sustancias químicas en un ecosistema
Freshwater ecotoxicity	FET	kg 1,4-DCB	
Marine ecotoxicity	MET	kg 1,4-DCB	
Human carcinogenic toxicity	HCT	kg 1,4-DCB	Efectos tóxicos de las sustancias químicas en los seres humanos
Human non-carcinogenic toxicity	HNCT	kg 1,4-DCB	
Land use	LU	m ² a crop eq	Impacto en la tierra debido a la agricultura, los asentamientos antropogénicos y las extracciones de recursos
Mineral resource scarcity	MR	kg Cu eq	Disminución de la disponibilidad de recursos no biológicos (y no renovables) como resultado de su utilización no sostenible
Fossil resource scarcity	FR	kg oil eq	
Water consumption	WC	m ³	Cantidad de agua utilizada

Tabla 1. Descripción categorías de impacto del método ReCiPe utilizadas

3.7 Suposiciones

Para poder llegar al objetivo establecido en el proyecto, se han asumido una serie de suposiciones que se mencionan a continuación:

Generales

- La candela escogida para este proyecto, tal y como se detalla en apartados anteriores, será una candela de carburo de silicio sinterizada del fabricante SentroTech. Se supondrá que una candela de bioSiC de las mismas dimensiones poseerá unas propiedades filtrantes exactamente iguales.
- Se supondrá que de la puerta a la cuna las candelas de cada sistema tendrán las mismas propiedades filtrantes, misma vida útil y misma gestión del residuo.
- El modelo del transporte de energía eléctrica será considerado igual al aportado por el modelo de Ecoinvent (ver Anexo A).
- Se ha despreciado el impacto de la fabricación, mantenimiento y desmantelamiento de las infraestructuras-equipos utilizados por unidad funcional.

Sistema 1

- Sólo se considerará el CO₂ como salida de la pirólisis por falta de datos para el resto de emisiones.
- La viruta generada en el proceso de mecanizado se considerará como residuo depositado en el vertedero.
- El consumo de energía del proceso de infiltración de silicio se aproximará al consumo indicado en la bibliografía [8]. Es una aproximación dado que las dimensiones del horno utilizado son ligeramente menores que las necesarias para introducir la preforma seleccionada.
- El exceso de silicio líquido de la infiltración será realimentado al proceso, no resultando por tanto ningún residuo tras este proceso.

Sistema 2

- La extrusión del carburo de silicio granular, se aproximará a la extrusión de aluminio disponible en la base de datos Ecoinvent.
- En el proceso de sinterización, se considerará que el gas nitrógeno utilizado se encuentra en un circuito cerrado y se ha despreciado el impacto de la carga inicial por unidad funcional.

3.8 Limitaciones

En este apartado se pretende destacar todo aquello que se conoce que existe dentro del modelo pero que no se puede cuantificar por falta de información. En este ACV se tienen las siguientes limitaciones:

Sistema 1

- En el mecanizado de la preforma tras la pirólisis, al no tener información válida para cuantificar el consumo energético de este proceso, este no se tendrá en cuenta en el Inventario de ciclo de vida (ICV).

Sistema 2

- No se considerará el impacto generado ni el peso añadido por los aditivos añadidos al carburo de silicio granular, ya que no se disponen de datos sobre los tipos específicos y cantidades necesarias.

4 INVENTARIO DEL CICLO DE VIDA

Para poder analizar el impacto producido por los procesos que ocupan este proyecto, primero es necesario determinar un ICV que recoja todos los flujos de entrada y salida de cada proceso de manera detallada. Una vez obtenidos todos los datos necesarios para que los procesos estén bien definidos, se procederá a su cuantificación. Para cada etapa del sistema será necesario cuantificar todas sus entradas y salidas y ser referenciadas con respecto a la unidad funcional.

Los datos utilizados para el ICV se distinguirán entre *foreground* y *background*. Los datos del *foreground* son aquellos datos cuya selección se ve afectada directamente por las decisiones basadas en el estudio. Los del *background* son los demás datos y son suministrados a través de una misma base de datos [27].

Los datos del *background* por tanto, serán tomados de la base de datos Ecoinvent, disponible en SimaPro, explicada en apartados posteriores. Por otro lado, los datos del *foreground* han sido tomados a través de una búsqueda bibliográfica de publicaciones científicas y proyectos sobre la materia tratada.

A continuación, se detallan los ICV para ambos procesos. Destacar que el valor de los flujos ya se encuentra referenciado a la unidad funcional, es decir, **una candela de SiC**.

Inventario del Ciclo de Vida Sistema 1

A continuación, en la **Tabla 2**, se detalla el ICV para el Sistema 1 atendiendo a los límites del sistema mostrados en la **Figura 6**.

Proceso	Nombre	Tipo Dato	Cantidad	Unidad	Fuente
Pirólisis	Panel MDF	Entrada	0,01	m ³	(1)
	Energía eléctrica	Entrada	7,57	kWh	[15]
	CO ₂	Salida	3,23	kg	[28]
Mecanizado	Energía eléctrica	Entrada	-	-	(2)
	Viruta	Salida	1,20	kg	(1)
Infiltración de silicio	Silicio	Entrada	1,87	kg	(1)
	Energía eléctrica	Entrada	4,6	kWh	(1)
Evaporación del silicio residual	Energía eléctrica	Entrada	1,73	kWh	(1)

Tabla 2. Inventario del ciclo de vida fabricación a partir de madera

(1) Se muestra el cálculo a continuación en los apartados correspondientes a cada proceso

(2) No se tiene en cuenta en el cálculo por falta de datos

Pirólisis

En este proceso, se llevará a cabo la pirólisis de una preforma de madera MDF de la que se obtendrá otra de carbono. En el proceso, tal y como se comentó en la descripción del sistema y según la bibliografía [16], aproximadamente el $75 \pm 5\%$ del peso inicial de la madera se pierde, y el volumen, al mismo tiempo se reduce en un $60 \pm 5\%$. Se supondrá que la reducción de volumen se produce de manera isotrópica.

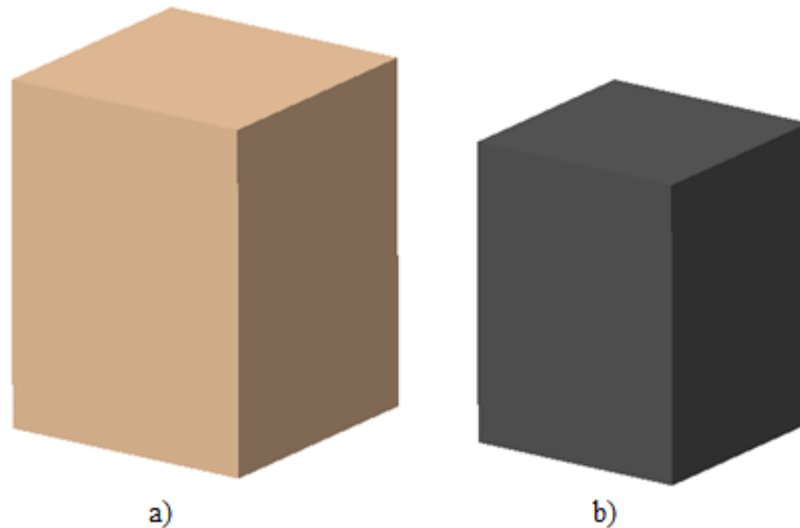


Figura 10. a) Preforma de MDF antes de la pirólisis; b) Preforma de carbono resultante de la pirólisis

El bloque resultante tras la pirólisis debe tener unas dimensiones suficientes para poder mecanizarlo posteriormente y obtener la candela con las dimensiones finales, tal y como se muestra en la **Figura 11**. Para esto, se determina que un margen mínimo de 2 mm con respecto a la candela final será suficiente para llevar a cabo correctamente el mecanizado. Conociendo que las dimensiones de la candela son de un diámetro exterior máximo de 60 mm y una longitud máxima de 1000 mm, el bloque tras la pirólisis deberá tener unas dimensiones mínimas de 64x64x1004 mm.

Estas dimensiones, suponen un volumen del bloque pirolizado de $0,004 \text{ m}^3$. Estableciendo una reducción del volumen del 60%, el bloque de madera inicial deberá tener el siguiente volumen:

$$V_{\text{tras pirólisis}} = (1 - 0,6) \cdot V_{\text{MDF}} \rightarrow V_{\text{MDF}} = 0,004 \text{ m}^3 / 0,4 = \mathbf{0,01 \text{ m}^3}$$

Siendo la densidad del MDF de 800 kg/m^3 [29], el peso del bloque MDF (m_{MDF}) será de 8 kg. Tomando una reducción de peso del 75% tras la pirólisis se tendrá:

$$m_{\text{tras pirólisis}} = (1 - 0,75) \cdot m_{\text{MDF}} = 0,25 \cdot 8 = 2 \text{ kg}$$

Teniendo el peso del bloque tras la pirólisis, que corresponderá al peso de la preforma de carbono pirolizado, y el volumen de dicho bloque, se puede obtener la densidad del carbono.

$$\rho_c = \text{Peso}_{\text{tras pirólisis}} / V_{\text{tras pirólisis}} = 2 \text{ kg} / 0,004 \text{ m}^3 = 500 \text{ kg/m}^3$$

En cuanto a los gases producidos por la pirólisis, según la bibliografía consultada [28], el componente mayoritario es el CO_2 . Tal y como se ha comentado en las suposiciones, no se tendrán en cuenta los volátiles por falta de datos considerando solo la salida de CO_2 .

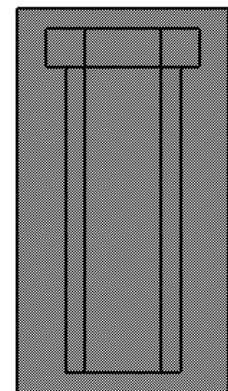


Figura 11. Esquema de la candela contenida en el bloque pirolizado

En trabajos anteriores, se ha demostrado una relación entre el peso de CO₂ emitido y el de la madera utilizada de 404 g_{CO2}/kg_{MDF} [28]. Con esto se puede obtener la masa de CO₂ emitida:

$$m_{CO_2} = 404 \text{ g}_{CO_2}/\text{kg}_{MDF} \cdot m_{MDF} = 404 \text{ g}_{CO_2}/\text{kg}_{MDF} \cdot 8 \text{ kg}_{MDF} = 3232 \text{ g CO}_2 = \mathbf{3,23 \text{ kg CO}_2}$$

Para el consumo energético de la pirólisis (P), se tomará el consumo de una pirólisis rápida de madera por microondas [15]. Es importante destacar que este método de pirólisis rápida por microondas es más sostenible energéticamente que el proceso de pirólisis lenta convencional y generará por tanto un menor impacto.

El consumo energético puede obtenerse a través de una relación entre el rendimiento del carbono y el diámetro y peso de la muestra [15]. Esta relación será la siguiente:

$$\ln Y_c = 5 - 200d^2 P/W$$

donde P es el consumo energético (kWh), W es el peso de la muestra de madera (kg), Y_c es el rendimiento del carbono (%) y d el diámetro de la muestra de madera (m).

Para determinar el diámetro inicial de la preforma de MDF pirolizada (d) se va a calcular la reducción radial que se produce sabiendo que la reducción volumétrica tras la pirólisis es de un 60% y que esta se produce de manera isotrópica.

$$V_{MDF} = H \cdot L \cdot L$$

Siendo H la altura del bloque de MDF y L el lado.

$$V_{\text{tras pirólisis}} = 0,4 \cdot V_{MDF} = (x \cdot H) \cdot (x \cdot L) \cdot (x \cdot L)$$

Siendo x la fracción resultante de altura y lado tras una reducción volumétrica isotrópica del 60%.

$$0,4 = x^3$$

$$x = 0,74$$

$$\text{Reducción radial (\%)} = (1-x) \cdot 100 = (1-0,74) \cdot 100 = 26\%$$

Como en este caso las piezas son de sección cuadrada, tal y como se muestra en la **Figura 10.b**, se ha empleado para los cálculos el diámetro equivalente que genera un área igual a la de la sección de las piezas. Para la pieza pirolizada:

$$(\pi/4) \cdot d_{\text{tras pirólisis}}^2 = 0,064 \cdot 0,064 \text{ m}^2$$

$$d_{\text{tras pirólisis}} = d \cdot x = 0,072 \text{ m}$$

$$d \cdot d \cdot 0,26 = 0,072 \text{ m}$$

$$d = 0,097 \text{ m}$$

Con esto ya se puede obtener el consumo energético (P):

$$\ln 25 = 5 - 200 \cdot 0,097^2 \cdot P/8$$

$$\mathbf{P = 7,57 \text{ kWh}}$$

Mecanizado

El mecanizado a realizar tras la pirólisis transformará el bloque de carbono en una preforma con las dimensiones de la candela utilizada como se muestra en la **Figura 12**. Este consistirá en un mecanizado simple donde básicamente habrá que darle la forma exterior a la candela mediante un fresado o corte y taladrar el interior de esta. Para esta etapa, hay que determinar la cantidad de viruta que se genera, por lo que se comparará el volumen de la preforma antes y después del mecanizado.

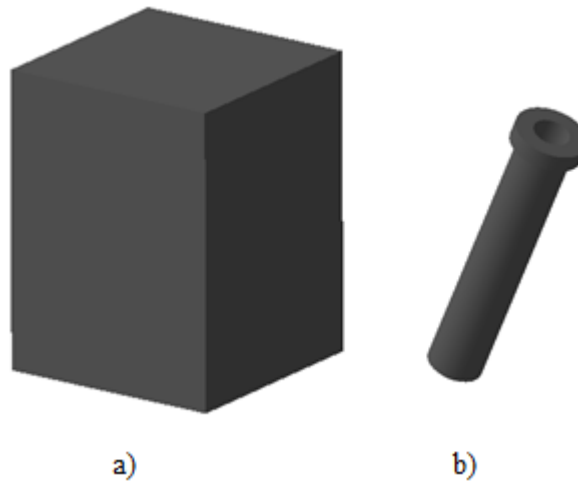


Figura 12. a) Bloque de carbono resultante de la pirólisis; b) Preforma obtenida tras el mecanizado

Con esto, se procede a calcular el volumen de viruta generada:

$$V_{\text{antes mec.}} = V_{\text{tras pirólisis}} = 0,004 \text{ m}^3$$

El volumen de la preforma de carbono resultante tras el mecanizado ($V_{\text{tras pirólisis}}$) será igual al volumen final de la candela. Este volumen sería:

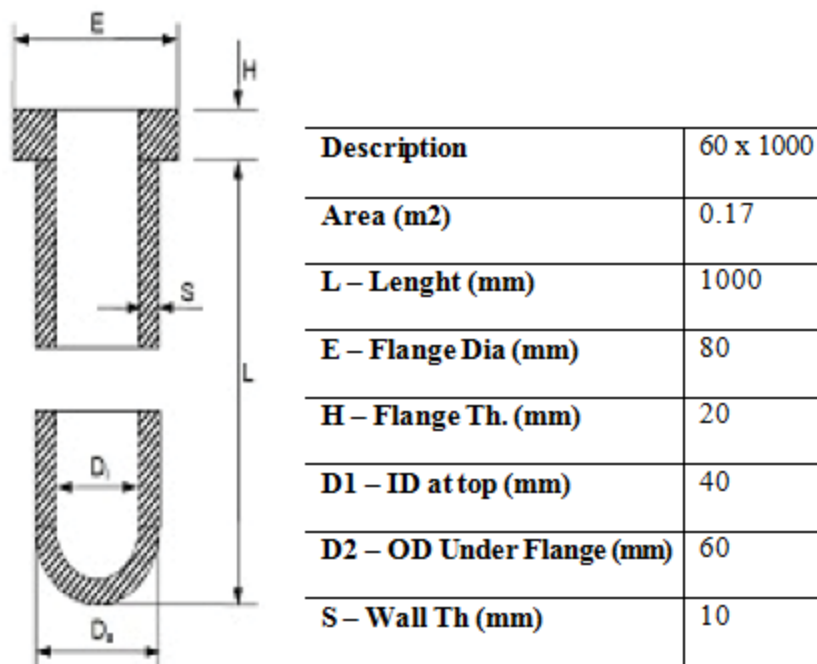


Figura 13. Dimensiones candelas

$$V \cong \pi \cdot (R_2^2 - R_1^2) \cdot L + \pi \cdot \left(\left(\frac{E}{2}\right)^2 - R_1^2\right) \cdot H = \pi \cdot (0,03^2 - 0,02^2) \cdot 1 + \pi \cdot (0,04^2 - 0,02^2) \cdot 0,02 = 0,0016 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{despues mec.}} = 0,0016 \text{ m}^3$$

El volumen de viruta generado por tanto será la diferencia entre ambos valores:

$$V_{\text{viruta}} = V_{\text{antes mec.}} - V_{\text{despues mec.}} = 0,004 - 0,0016 = 0,0024 \text{ m}^3$$

Conociendo la densidad del carbono calculada anteriormente:

$$m_{\text{viruta}} = \rho_c \cdot V_{\text{viruta}} = 500 \text{ kg/m}^3 \cdot 0,0024 \text{ m}^3 = \mathbf{1,2 \text{ kg}_{\text{viruta}}}$$

Infiltración de silicio

En este proceso, la preforma de carbono obtenida tras el mecanizado será infiltrada con silicio líquido para así obtener una estructura con las propiedades mecánicas deseadas. La infiltración, tal y como se puede observar en la **Figura 14** provocará que los poros de la preforma sean ocupados con silicio. Este deberá ser retirado posteriormente mediante evaporación.

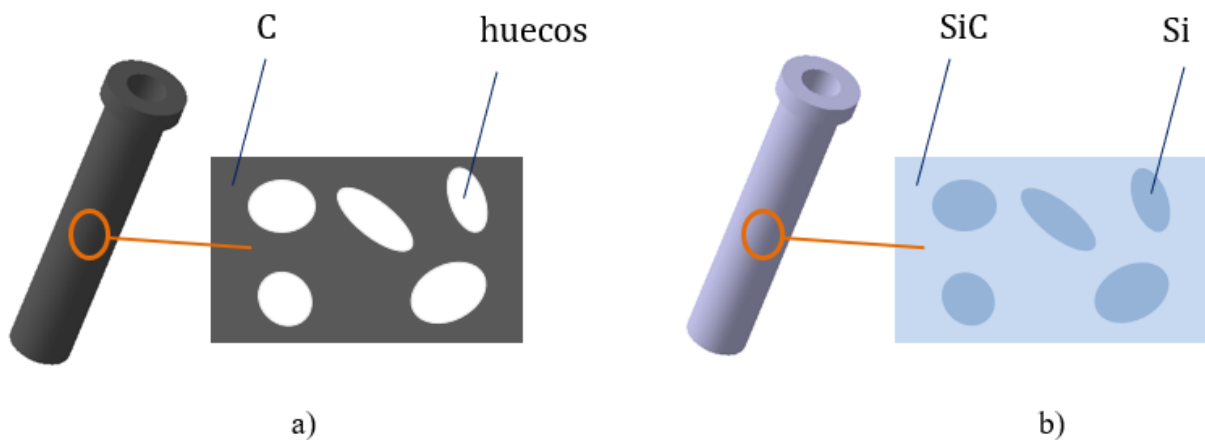
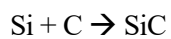


Figura 14. Morfología de la preforma a) Tras el mecanizado; b) Tras la infiltración

En primer lugar, se determinará la cantidad de silicio necesaria para que se produzca la infiltración. Conociendo el peso de la preforma de carbono se pueden calcular los moles de carbono y, a partir de estos, los moles de silicio según la estequiometría y por tanto su masa.

El peso de la preforma tras el mecanizado será la diferencia entre el peso tras la pirólisis y el peso de la viruta generada. Este peso será de 0,8 kg.

$$m_{\text{preforma}} = m_{\text{tras pirólisis}} - m_{\text{viruta}} = 2 \text{ kg} - 1,2 \text{ kg} = 0,8 \text{ kg}$$



$$MM_{\text{Si}} = 28 \text{ g/mol}$$

$$MM_{\text{C}} = 12 \text{ g/mol}$$

$$\text{Moles C} = \frac{\text{Peso C}}{\text{Peso Atómico C}} = 0,8 \text{ kg C} \cdot \frac{1 \text{ mol C}}{0,012 \text{ kg C}} = 66,7 \text{ mol C}$$

Por cada mol de SiC se tiene un mol de Si y un mol de C, por lo que para 66,7 moles de C:

$$\text{Si}_{\text{esteq}} = \text{Moles Si} \cdot \text{Masa Molecular Si} = 66,7 \text{ mol Si} \cdot 0,028 \frac{\text{kg Si}}{\text{mol}} = \mathbf{1,87 \text{ kg Si}}$$

Como se describió anteriormente, para que se produzca correctamente la infiltración es necesario añadir un exceso de silicio de un 234% sobre la cantidad estequiométrica [12]. Sin embargo, por las suposiciones descritas anteriormente, se considerará que este exceso es realimentado al proceso y por tanto no se tomará como un consumo de materia prima. De esta manera, únicamente los 1,87 kg de silicio (Si estequiométrico) será lo que se consuma en el proceso.

En cuanto a la energía necesaria para llevar a cabo la infiltración, en la bibliografía consultada [8] se ha llevado a cabo un análisis energético del proceso completo mostrado en la **Figura 15**. En ella se contempla la potencia demandada por el horno incluyendo el calentamiento del silicio y la preforma y las pérdidas del horno.

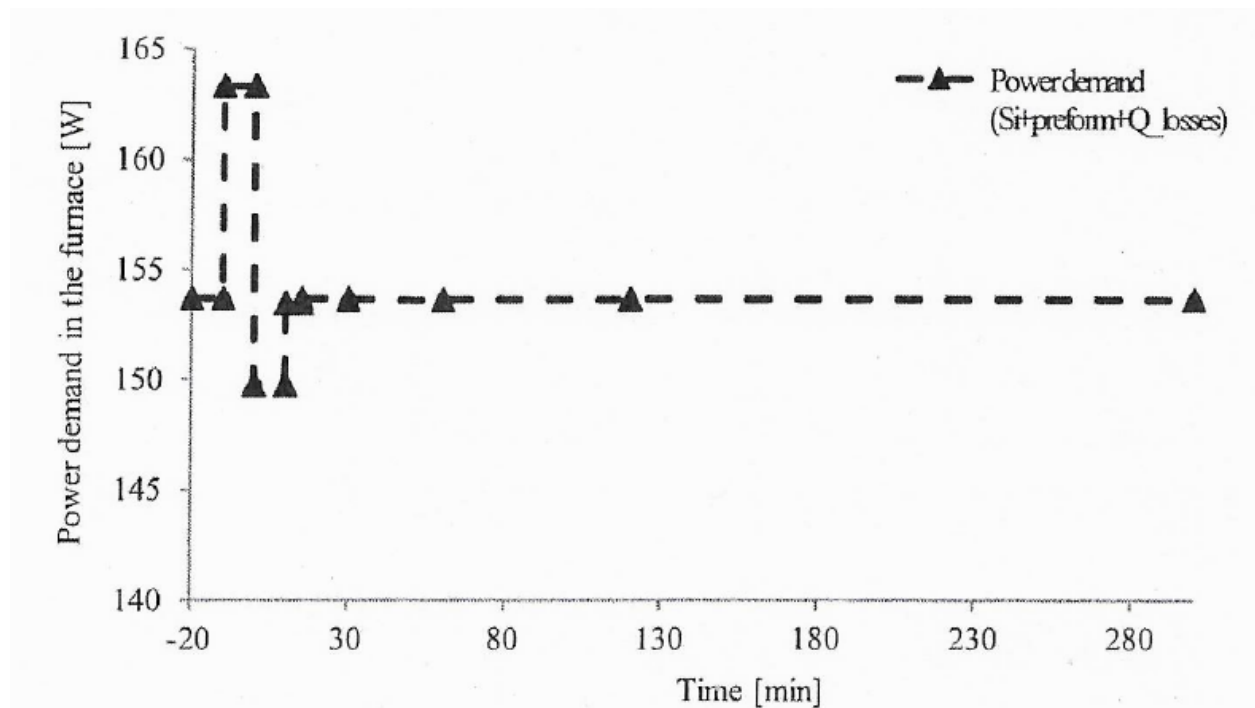


Figura 15. Requerimientos de potencia en el horno a lo largo del proceso de infiltración [8]

Lo primero que se realiza es un precalentamiento del horno antes de introducir la pieza. Este precalentamiento se realiza para compensar las pérdidas del horno, establecidas en este caso en 153,7 W. Tras esto, la preforma se introduce en el horno y se lleva a cabo un calentamiento de 10 minutos a 163 W en el que se funde el silicio. A partir de este punto ($t=0$ min) comienza la reacción [8]. El tiempo necesario para completar la infiltración de la candela será de 30 min [29].

Para obtener la energía total consumida en el proceso, se ha multiplicado cada tramo de potencia constante por su duración. De esta manera, la energía total consumida para la infiltración (E_{inf}) sería:

$$E_{inf} = \text{Energía calentamiento horno} + \text{Energía calentamiento preforma} + \text{Energía reacción}$$

$$E_{inf} = 154 \text{ W} \cdot 10 \text{ min} + 163 \text{ W} \cdot 10 \text{ min} + 149 \text{ W} \cdot 30 \text{ min} = 0,127 \text{ kWh}$$

La pieza estudiada en la bibliografía [8] es de 12 g. Para obtener el consumo para la pieza de este proyecto (E_1), se ha supuesto que el consumo energético varía de forma lineal con la masa de la pieza infiltrada.

$$m_{preforma} = 0,8 \text{ kg} = 800 \text{ g}$$

$$m_1 = 12 \text{ g}$$

$$E_1 = E_{\text{infl}} \cdot m_{\text{preforma}} / m_1$$

$$E_1 = 0,127 \text{ kWh} \cdot \frac{800 \text{ g}}{12 \text{ g}} = \mathbf{8,5 \text{ kWh}}$$

Sin embargo, esta energía contempla también el calentamiento y la fusión del exceso de silicio necesario. Sabiendo que el exceso de silicio insertado se realimentará al proceso, tal y como se muestra en la **Figura 6**, sólo será necesario (salvo para la primera candela que se fabrique) aportar el calor correspondiente al silicio estequiométrico. De esta manera, al consumo total de energía calculado anteriormente habrá que restarle la energía correspondiente al calentamiento y fusión de este exceso (E_2). Conociendo que para que se de correctamente la reacción se necesita un exceso de un 234% [12]:

$$Si_{\text{exceso}} = 2,34 \cdot Si_{\text{esteq}} = 2,34 \cdot 1,87 \text{ kg} = 4,37 \text{ kg Si} = 156 \text{ moles Si}$$

La energía (E_2) será la necesaria para calentar desde temperatura ambiente hasta el punto de fusión a 1410 °C (E_{calent1}), más la de cambio de fase ($E_{\text{fusión}}$) y la necesaria para alcanzar la temperatura idónea para la infiltración de 1550 °C (E_{calent2}).

$$E_2 = E_{\text{calent1}} + E_{\text{fusión}} + E_{\text{calent2}}$$

Las energías de calentamiento se obtendrán a integrando la siguiente expresión entre las temperaturas correspondientes [12]:

$$cp(t) = A + B \cdot t + C \cdot t^2 + D \cdot t^3 + E/t^2$$

Con cp en (J/mol K), t en (K)/1000 y los valores de los coeficientes mostrados en la **Tabla 3**.

	Liquid Phase	Solid Phase
Temperature (K)	1685. - 3504.616	298. - 1685.
A	27.19604	22.81719
B	$-1.198306 \times 10^{-10}$	3.899510
C	5.353262×10^{-11}	-0.082885
D	$-6.956612 \times 10^{-12}$	0.042111
E	$-4.294375 \times 10^{-12}$	-0.354063
F	40.36163	-8.163946
G	77.37178	43.27846
H	48.46997	0.000000
Reference	Chase, 1998	Chase, 1998
Comment	Data last reviewed in March, 1967	Data last reviewed in March, 1967

Tabla 3. Coeficientes integral $cp(t)$ del silicio en fase líquida y sólida [12]

$$E_{\text{calent1}} = \int_{0,298}^{1,683} (22,81719 + 3,89951 \cdot t - 0,082885 \cdot t^2 + 0,042111 \cdot t^3 - 0,354063/t^2) dt = 35,93 \text{ kJ/mol}$$

$$E_{\text{calent1}} = 35,93 \text{ kJ/mol} \cdot 156 \text{ mol Si} = 5605,08 \text{ kJ}$$

$$E_{\text{calent2}} = \int_{1,683}^{1,823} (27,196 - 1,19831E-10 \cdot t + 5,3533E-11 \cdot t^2 - 6,9566E-12 \cdot t^3 - 4,2943/t^2) dt = 3,61 \text{ kJ/mol}$$

$$E_{\text{calent2}} = 3,61 \text{ kJ/mol} \cdot 156 \text{ mol Si} = 563 \text{ kJ}$$

En cuanto a la energía de cambio de fase, esta será:

$$E_{\text{fusión}} = \Delta h_{\text{fusión}}(\text{Si}) \cdot \text{moles Si}$$

Siendo $\Delta h_{\text{fusión}}(\text{Si}) = 50,55 \text{ kJ/mol}$ [30]:

$$E_{\text{fusión}} = 50,55 \text{ kJ/mol} \cdot 156 \text{ mol Si} = 7885,8 \text{ kJ}$$

Con esto, la energía térmica total (E_2) será:

$$E_2 = E_{\text{calent1}} + E_{\text{fusión}} + E_{\text{calent2}} = 5605,08 \text{ kJ} + 7885,8 \text{ kJ} + 563 \text{ kJ} = 14053,9 \text{ kJ} = 3,9 \text{ kWh}$$

El proceso de infiltración será llevado a cabo en un horno eléctrico de resistencias, por lo que toda la energía eléctrica será transformada en energía térmica. La energía disipada que no es aprovechada para calentar se supondrá incluida en las pérdidas calculadas para el proceso. Estas pérdidas, que se asumen constantes durante todo el proceso de infiltración, suponen un 20% de la energía total consumida como puede verse a continuación:

$$\text{Pérdidas} = \frac{154 \text{ W} \cdot 10 \text{ min}}{154 \text{ W} \cdot 10 \text{ min} + 163 \text{ W} \cdot 10 \text{ min} + 149 \text{ W} \cdot 30 \text{ min}} = 20\%$$

Con esto la energía eléctrica ($E_{2\text{-elect}}$) quedará:

$$E_{2\text{-elect}} = E_2 / 0,8 = 3,9 \text{ kWh} / 0,8 = 4,875 \text{ kWh}$$

Se supondrá además que en el proceso de realimentación se tienen un 20% de pérdidas, por lo que el consumo total para la infiltración (E_3) será:

$$E_3 = E_1 - 0,8 \cdot E_{2\text{-elect}} = 8,5 \text{ kWh} - (0,8 \cdot 4,875 \text{ kWh}) = \mathbf{4,6 \text{ kWh}}$$

Evaporación del silicio residual

En este proceso se llevará a cabo la eliminación del silicio residual situado en los poros de la preforma, a través de la evaporación. Se calentará la preforma hasta superar la temperatura de evaporación del silicio y se obtendrá la misma preforma pero libre de silicio en los poros. Suponiendo que se pasa de la infiltración a la evaporación sin dejar que la pieza se enfríe, la energía de este proceso será la energía de calentamiento desde la temperatura de infiltración hasta la de ebullición y la energía de vaporización necesaria para el cambio de fase. El silicio evaporado será realimentado al proceso tras enfriarlo, tal y como muestra la **Figura 6**.

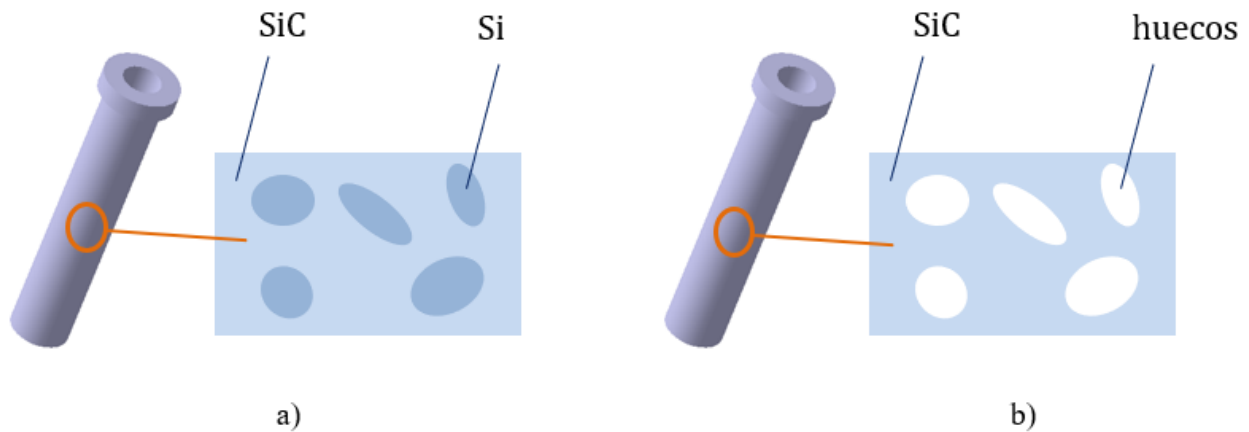


Figura 16. a) Composición preforma tras la infiltración; b) Composición preforma tras la evaporización

Todos los poros de la preforma estarán ocupados con silicio residual, por lo que será ese volumen el que haya que evaporar. Para esto, es necesario determinar la porosidad de la candela.

En primer lugar, se obtiene la masa de SiC necesaria para elaborar la candela, que será la suma del carbono y el silicio calculado anteriormente.

$$m_{\text{SiC}} = m_{\text{C}} + m_{\text{Si}} = 0,8 \text{ kg} + 1,87 \text{ kg} = 2,67 \text{ kg SiC}$$

La densidad calculada para el bioSiC (ρ_{bioSiC}) resultante sería:

$$\rho_{\text{bioSiC}} = m_{\text{SiC}} / V_{\text{aparente}} = 2,67 \text{ kg} / 0,0016 \text{ m}^3 = 1669 \text{ kg/m}^3 = 1,669 \text{ g/cm}^3$$

Este valor se encuentra dentro del rango experimental recogido en la bibliografía consultada de 1,1-2,6 g/cm³ [2].

Por otro lado, conociendo que la densidad del Carburo de Silicio es de 3000 kg/m³ [20] y el volumen aparente de la candela es de 0,0016 m³, se puede obtener la masa total de la candela en el caso de que esta fuera maciza (m_{total}) y compuesta totalmente por SiC.

$$m_{\text{total}} = 3000 \text{ kg/m}^3 \cdot 0,0016 \text{ m}^3 = 4,8 \text{ kg}$$

El cociente entre la masa de SiC (m_{SiC}) y este valor será el porcentaje de candela que no son huecos, obteniendo así la porosidad (ϵ).

$$\epsilon = 1 - (m_{\text{SiC}} / m_{\text{total}}) = 1 - (2,67 / 4,8) = 0,44$$

Este valor de porosidad se encuentra muy cercano al valor de porosidad del 40% de otras candelas comerciales consultadas [31].

Tras esto, se procede a calcular la cantidad de silicio a evaporar.

$$V_{\text{Si sin reaccionar}} = V_{\text{huecos}} = \epsilon \cdot V_{\text{aparente}} = 0,44 \cdot 0,0016 \text{ m}^3 = 0,000704 \text{ m}^3$$

$$m_{\text{Si sin reaccionar}} = V_{\text{Si sin reaccionar}} \cdot \rho_{\text{Si}}$$

$$\rho_{\text{Si}} = 2300 \text{ kg/m}^3 \text{ [30]}$$

$$m_{\text{Si sin reaccionar}} = 0,000704 \text{ m}^3 \cdot 2300 \text{ kg/m}^3 = 1,619 \text{ kg}$$

$$\text{Moles Si} = \frac{\text{Peso Si}}{\text{Peso Atómico Si}} = 1,619 \text{ kg} \cdot \frac{1 \text{ mol Si}}{0,028 \text{ kg Si}} = 57,8 \text{ moles Si}$$

La energía total necesaria (E_4), tal y como se ha comentado anteriormente, será:

$$E_4 = E_{\text{calent}} + E_{\text{vap}}$$

Al igual que en el apartado de infiltración, para calcular la energía de calentamiento necesaria se hará uso de la integral de $c_p(t)$, esta vez entre la temperatura de infiltración y la de ebullición, siendo esta última 3231 °C [12].

$$c_p(t) = A + B \cdot t + C \cdot t^2 + D \cdot t^3 + E/t^2$$

Siendo los coeficientes los correspondientes a la fase líquida, indicados en la **Tabla 3**.

La energía de calentamiento necesaria (E_{calent}) será, por tanto:

$$E_{\text{calent}} = \int_{1,823}^{3,504} (27,196 - 1,1983E-10 \cdot t + 5,3533E-11 \cdot t^2 - 6,9566E-12 \cdot t^3 - 4,2944/t^2) dt = 44,6 \text{ kJ/mol}$$

$$E_{\text{calent}} = 44,6 \text{ kJ/mol} \cdot 57,8 \text{ mol Si} = 2577,9 \text{ kJ}$$

Por otro lado, la energía de cambio de fase (E_{vap}) será:

$$E_{\text{vap}} = \Delta h_{\text{vap}}(\text{Si}) \cdot \text{moles Si}$$

Siendo $\Delta h_{\text{vap}}(\text{Si}) = 384,2 \text{ kJ/mol}$ [30]:

$$E_{\text{vap}} = 384,2 \text{ kJ/mol} \cdot 57,8 \text{ mol Si} = 22206,8 \text{ kJ}$$

Con esto ya se puede calcular la energía térmica teórica que necesaria para la evaporación (E_4).

$$E_4 = 2577,9 \text{ kJ} + 22206,8 \text{ kJ} = 24784,7 \text{ kJ} = 6,88 \text{ kWh}$$

Asumiendo, al igual que en la infiltración, que se producen unas pérdidas térmicas del 20%, la energía eléctrica necesaria será (E_4'):

$$E_4' = E_4 + \text{Pérdidas} = E_4 / 0,8 = 6,88 / 0,8 = 8,6 \text{ kWh}$$

Recuperación de energía

Tras la evaporación del Si no reaccionado, este es enfriado para su realimentación como silicio líquido al proceso (**Figura 6**). Esta energía podría ser recuperada para su aprovechamiento en procesos de calentamiento como la infiltración, o el propio proceso de evaporación. Suponiendo un 80% de eficiencia en la recuperación de la energía útil del proceso (E_4), el consumo de energía térmica podría reducirse en (E_R):

$$E_R = 0,8 \cdot E_4 = 0,8 \cdot 6,88 = 5,50 \text{ kWh}$$

Si esta energía es reutilizada para el proceso de evaporación, la energía térmica requerida final para este proceso sería (E_5):

$$E_5 = E_4' - E_R = 8,6 \text{ kWh} - 5,50 \text{ kWh} = 3,10 \text{ kWh}$$

Que trasladado a energía eléctrica sería (E_5'):

$$E_5' = E_5 / 0,8 = 3,10 / 0,8 = \mathbf{1,725 \text{ kWh}}$$

Inventario del Ciclo de Vida Sistema 2

A continuación, en la **Tabla 4**, se detalla el ICV para el Sistema 3 atendiendo a los límites del sistema mostrados en la **Figura 7**.

Proceso	Nombre	Tipo Dato	Cantidad	Unidad	Fuente
Extrusión	Carburo de Silicio granular	Entrada	2,67	kg	(1)
	Proceso de extrusión	Entrada	2,67	kg	(1)
Sinterización	Energía eléctrica	Entrada	41,23	kWh	[24]

Tabla 4. Inventario del ciclo de vida fabricación a partir de arena de cuarzo y coque

- (1) Se muestra el cálculo a continuación en los apartados correspondientes a cada proceso

Recordando que el volumen aparente de la candela, tal y como se ha calculado anteriormente, es de 0,0016 m³ y que la porosidad determinada es de un 44%, se puede obtener el volumen real, sin huecos, de la candela final.

$$V_{\text{real}} = V_{\text{aparente}} \cdot (1 - \text{Porosidad}) = 0,0016 \cdot (1 - 0,44) = 0,000896 \text{ m}^3$$

Con este volumen real y sabiendo que la densidad del SiC es de 3000 kg/m³ [20], el peso de la candela final será de 2,67 kg tal y como se había calculado anteriormente en el ICV del Sistema 1.

A continuación, se detallan los cálculos necesarios para cada proceso del sistema.

Extrusión

Tal y como se ha comentado en el apartado de suposiciones, se tomará el proceso de extrusión de aluminio obtenido de SimaPro. El dato de entrada requerido es la masa extruida de **2,67 kg**.

Sinterización

Para esta etapa se ha escogido un proceso novedoso que se recoge en la patente mencionada en la bibliografía y que reduce el consumo energético de la sinterización de carburo de silicio mediante arco de plasma. El consumo energético por unidad de masa de este proceso varía de 5-9 kW/lb.

Tomando como consumo una media de 7 kW/lb y conociendo que la masa en libras sometida a la sinterización será de 5,89 lb, se tiene un consumo energético de **41,23 kWh**.

Como se ha comentado anteriormente, para el cálculo del ACV se hará uso del software SimaPro. Esta herramienta, desarrollada por el grupo Pre Consultants, permite realizar Análisis de Ciclo de Vida a través de diferentes métodos con el fin de evaluar el impacto producido por un sistema definido previamente. Gracias a los resultados que se obtienen de la herramienta se pueden tomar decisiones con respecto al impacto de uno o varios sistemas simultáneos.

4.1 Base de datos

Una de las ventajas de la herramienta SimaPro es el acceso a las bases de datos de las que dispone. Dentro de cada base de datos se podrán encontrar distintas librerías y proyectos elaborados por distintos usuarios. Estos proyectos pueden ser de gran utilidad a la hora de calcular un sistema, ya que puede que algunos de los subprocesos se encuentren ya desarrollados previamente. La base de datos utilizada para este proyecto será la de Ecoinvent 3.0.

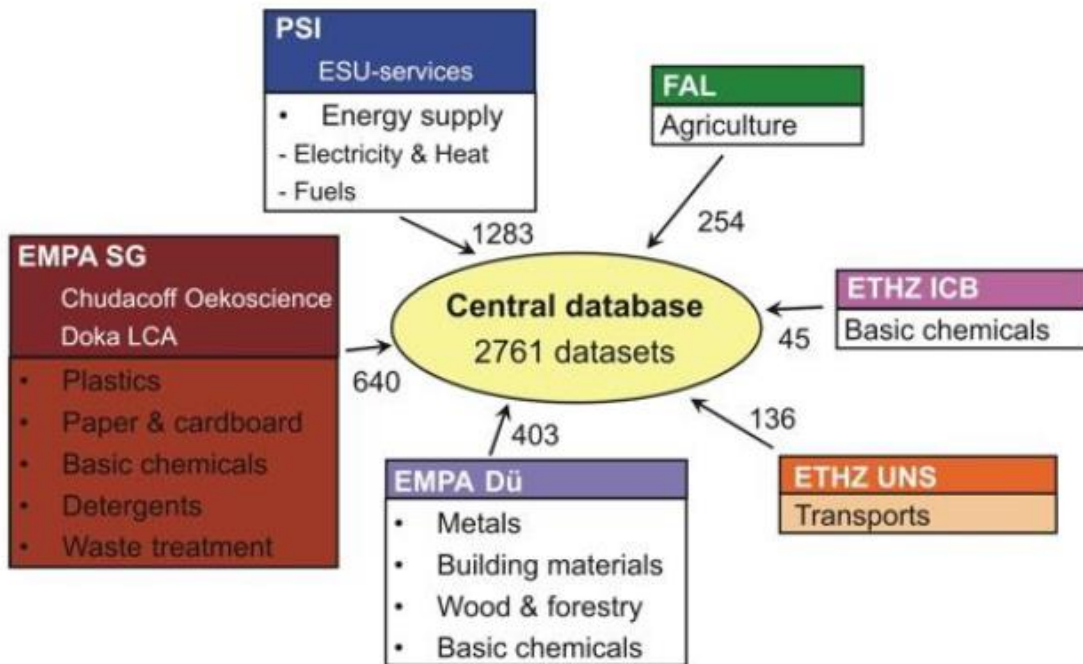


Figura 17. Composición de la base de datos Ecoinvent [32]

4.2 Calidad de los datos

Para evaluar la calidad de los datos utilizados para el cálculo del ACV, se hace referencia a lo recogido en la normativa *PAS 2050:2008. Verificación de la Huella de Carbono*. Esta normativa establece una serie de requerimientos que deben ser considerados a la hora de calcular la calidad de los datos. Estos son:

- Cobertura relacionada con el tiempo
- Cobertura geográfica
- Cobertura tecnológica
- Precisión y exactitud
- Integridad
- Consistencia
- Reproducibilidad
- Fuentes de datos (primarias o secundarias)

En las siguientes tablas, elaboradas por el software *Ccal*, se recogen para los diferentes requerimientos los requisitos que se deben de cumplir para alcanzar los distintos grados de calidad y su ponderación. Estas tablas están elaboradas de acuerdo a la normativa PAS 2050:2008 mencionada anteriormente.

Data quality criteria	Data quality indicators		
	High	Medium	Low
Age of data	< 5 years	5 - 10 years	> 10
Geographical origin of data	Specific	Partly specific	Generic/average
Source of data	Measured and/or modelled based on specific data (e.g. the company data or from suppliers)	Modelled using generic data from LCA databases; <u>some</u> data derived using expert knowledge	<u>Mainly</u> sourced from literature and/or estimated and/or derived using expert knowledge
Completeness of data	All inputs and outputs considered	Majority of relevant inputs and outputs considered	Some relevant inputs and outputs considered or known
Reproducibility /reliability/ consistency of data	Completely reproducible/reliable/ consistent	Partly reproducible/reliable/ consistent	Not reproducible/ not known

Tabla 5. Requerimientos de calidad de datos

Además, para cada criterio se establece una ponderación que finalmente proporcionará una puntuación y por tanto un grado de calidad.

Data quality criteria	Weighting for each criterion on a scale 1-10*	High quality Max. score for each criterion: 3	Medium quality Max. score for each criterion: 2	Low quality Max. score for each criterion: 1	Example data quality assessment
Age	2	3	2	1	1 (Low)
Geographical origin	1	3	2	1	3 (High)
Source	3	3	2	1	2 (Medium)
Completeness	2	3	2	1	3 (High)
Reproducibility /reliability/ consistency	2	3	2	1	1 (Low)
Maximum score		30 (max score) Overall score for High in the range: 21-30	20 (max score) Overall score for Medium in the range: 11-20	10 (max score) Overall score for Low in the range: 1-10	19 (overall score) Data quality indicator: Medium

*The sum of all weights is 10.

Tabla 6. Ponderación de los requerimientos de calidad de datos

Haciendo un estudio de los diferentes conceptos se obtiene que la calidad de los datos es **alta** con una puntuación final de 26. En la **Tabla 7** se detalla el cálculo siendo la puntuación: 1 para calidad baja, 2 para calidad media y 3 para calidad alta.

Concepto	Grado de calidad	Ponderación	Puntuación
Año datos	Medio	2	2
Geografía	Alto	1	3
Fuente de datos	Alto	3	3
Exhaustividad	Medio	2	2
Reproducibilidad	Alto	2	3

Tabla 7. Ponderación y puntuación por requerimiento de calidad

Puntuación Total = $2 \cdot 2 + 1 \cdot 3 + 3 \cdot 3 + 2 \cdot 2 + 2 \cdot 3 = 26$

4.3 Mix eléctrico

Para poder lograr unos resultados más representativos se ha introducido en SimaPro el Mix Eléctrico Español de 2018 publicado por la REE. De esta manera se tendrá el coste de un kWh actualizado, teniendo por tanto un impacto por consumo energético más exacto. Este mix es representado en la **Figura 18**.

■ Nuclear	20,6%	■ Eólica	19,0%
■ Carbón	13,5%	■ Hidráulica	13,2%
■ Ciclo combinado	10,2%	■ Solar fotovoltaica	2,9%
■ Cogeneración	11,2%	■ Solar térmica	1,7%
■ Residuos no renovables	0,9%	■ Otras renovables	1,4%
■ Turbinación bombeo ⁽¹⁾	0,8%	■ Residuos renovables	0,3%
		■ Saldo importador de intercambios internacionales	4,3%

Figura 18. Mix Eléctrico Español en 2018 [33]

Además, la cogeneración se desglosará en el modelo según los porcentajes de la **Figura 19**.

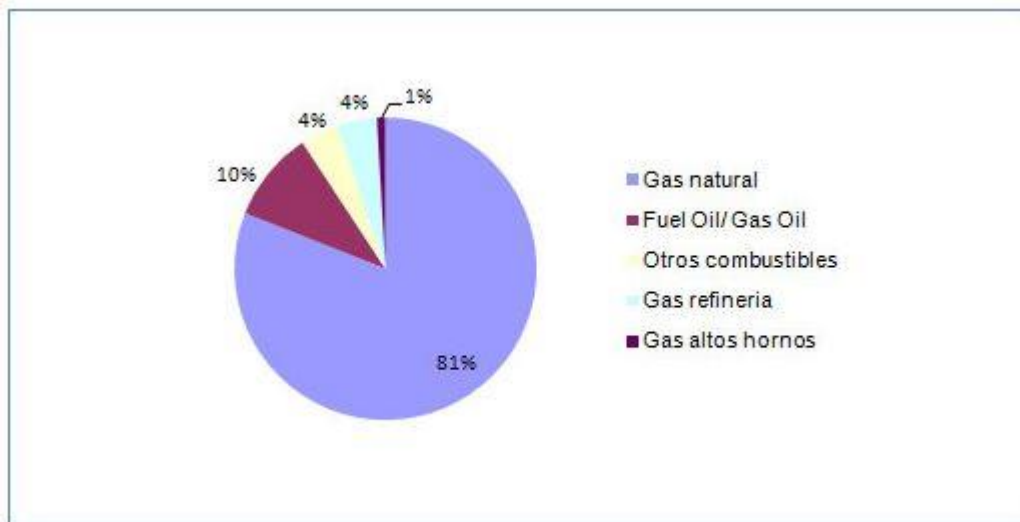


Figura 19. Desglose participantes en la cogeneración [34]

Para poder introducir el mix eléctrico sin necesidad de hacer nuevos submodelos sobre los conceptos que no están incorporados a la base datos y que no sería objeto de este proyecto, se han tomado las siguientes consideraciones:

- El porcentaje de *Residuos no renovables* (0.9%) se considerará como *Nuclear*.
- El porcentaje de *Otras renovables* (1.4%), *Residuos renovables* (0.3%) y *Turbinación bombeo* (0.8%) se considerarán como *Hidráulica*.
- El porcentaje de *Otros combustibles* (4%), *Gas refinería* (4%) y *Gas altos hornos* (1%) se considerarán como *Gas natural*.

Este modelo se introducirá como consumo del aporte de energía a la línea de alta tensión. Sin embargo, para llegar a obtener el modelo energético completo, se necesitará definir la transformación de alto a medio voltaje y el posterior consumo del medio voltaje. Para esto se utilizarán las consideraciones tomadas en el modelo energético de SimaPro en cuanto a entradas, transporte y emisiones, así como una estimación de pérdidas de energía debido a la transformación alta-media tensión (ver Anexo A).

Es importante destacar que para todas las entradas de los sistemas se ha considerado este mix energético para poder hacer comparables los resultados. Es decir, se han modificado los inventarios obtenidos de Ecoinvent 3.0 para que el consumo energético de cada uno de los procesos venga determinado por el mix que se ha descrito. Para esto, se ha supuesto que todo el consumo energético procede de la red española, por lo que en el caso de que un modelo tuviera consumo de varios países, se han sumado todos ellos e introducido como consumo de la red española. Esto se ha llevado a cabo en un primer nivel, es decir, no se han modificado todos los consumos energéticos de todas las materias primas, sino que se han modificado los consumos de las entradas más significativas.

5 EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL CICLO DE VIDA

Tal y como enuncia la normativa UNE-EN ISO 14040:2006, en la fase de evaluación de impacto de un ACV se tiene como propósito evaluar cuán significativos son los impactos ambientales potenciales utilizando los resultados del ICV. En general, este proceso implica la asociación de los datos de inventario con las categorías de impactos ambientales específicas y con los indicadores de esas categorías para entender estos impactos. La fase de la Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida (EICV) también proporciona información para la fase de interpretación del ciclo de vida.

La evaluación del impacto puede incluir un proceso iterativo de revisión del objetivo y del alcance del estudio de ACV para determinar si se han cumplidos los objetivos del mismo o para modificar el objetivo y el alcance si la evaluación indica que no se pueden alcanzar.

Cuestiones tales como la elección, el modelado, y la evaluación de las categorías de impacto, pueden introducir subjetividad en la fase de la EICV. Por lo tanto, la transparencia es crítica en la evaluación del impacto a fin de asegurar que las suposiciones están claramente descritas e informadas.

En la **Figura 20** se muestran las diferentes etapas del EICV.



Figura 20. Elementos de la fase EICV [19]

La etapa de caracterización implica la aplicación de modelos para obtener un indicador ambiental en cada categoría de impacto, unificando a una cantidad de referencia todas las sustancias clasificadas dentro de cada categoría mediante el empleo de factores de peso o equivalencia. Se han considerado los factores de caracterización incluidos en el método ReCiPe 2016. Por lo tanto, las categorías de impacto, los indicadores de categoría y los modelos de caracterización seleccionados, están aceptados internacionalmente, siendo las categorías de impacto las encargadas de representar la suma de los impactos de las entradas y salidas del sistema del producto para las categorías finales a través de los indicadores de categoría y garantizando observaciones empíricas reproducibles [26].

Una vez compilados los datos en SimaPro se procede a elaborar los gráficos y tablas de resultados para su posterior análisis y discusión. En la **Tabla 8** se muestran los valores de impacto de cada sistema para cada categoría.

Categoría de impacto	Unidad	Sistema 1 - bioSiC	Sistema 2 - SiC
Global warming	kg CO2 eq	23,27708800	20,46949300
Stratospheric ozone depletion	kg CFC11 eq	0,00000969	0,00001644
Ionizing radiation	kBq Co-60 eq	3,10470490	8,70684190
Ozone formation, Human health	kg NOx eq	0,06359735	0,05340783
Fine particulate matter formation	kg PM2.5 eq	0,03912960	0,04422450
Ozone formation, Terrestrial ecosystems	kg NOx eq	0,06639706	0,05378679
Terrestrial acidification	kg SO2 eq	0,10627876	0,14500522
Freshwater eutrophication	kg P eq	0,00532031	0,00767226
Marine eutrophication	kg N eq	0,00054955	0,00088948
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DCB	44,55308700	22,49521900
Freshwater ecotoxicity	kg 1,4-DCB	0,45278848	0,61901138
Marine ecotoxicity	kg 1,4-DCB	0,61645550	0,82032065
Human carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	0,87139427	0,73910209
Human non-carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	11,99542200	11,51811000
Land use	m2a crop eq	6,88563120	0,48346228
Mineral resource scarcity	kg Cu eq	0,04681702	0,03062762
Fossil resource scarcity	kg oil eq	4,62563070	4,48159750
Water consumption	m3	0,22955090	0,13203572

Tabla 8. Valores absolutos de impacto para cada categoría y sistema

En la **Figura 21**, se muestra una comparativa en porcentaje del impacto generado por cada sistema para cada categoría. Para dicha figura, en cada categoría de impacto se ha tomado como valor de referencia el del sistema con un impacto mayor, representándose, para el otro sistema, el porcentaje de reducción correspondiente. Por otro lado, la **Figura 22** y **Figura 23** muestran, para el Sistema 1 y Sistema 2 respectivamente, un desglose de los impactos indicando cuánto contribuye cada subproceso en porcentaje.

▪ **Resultados comparativa**

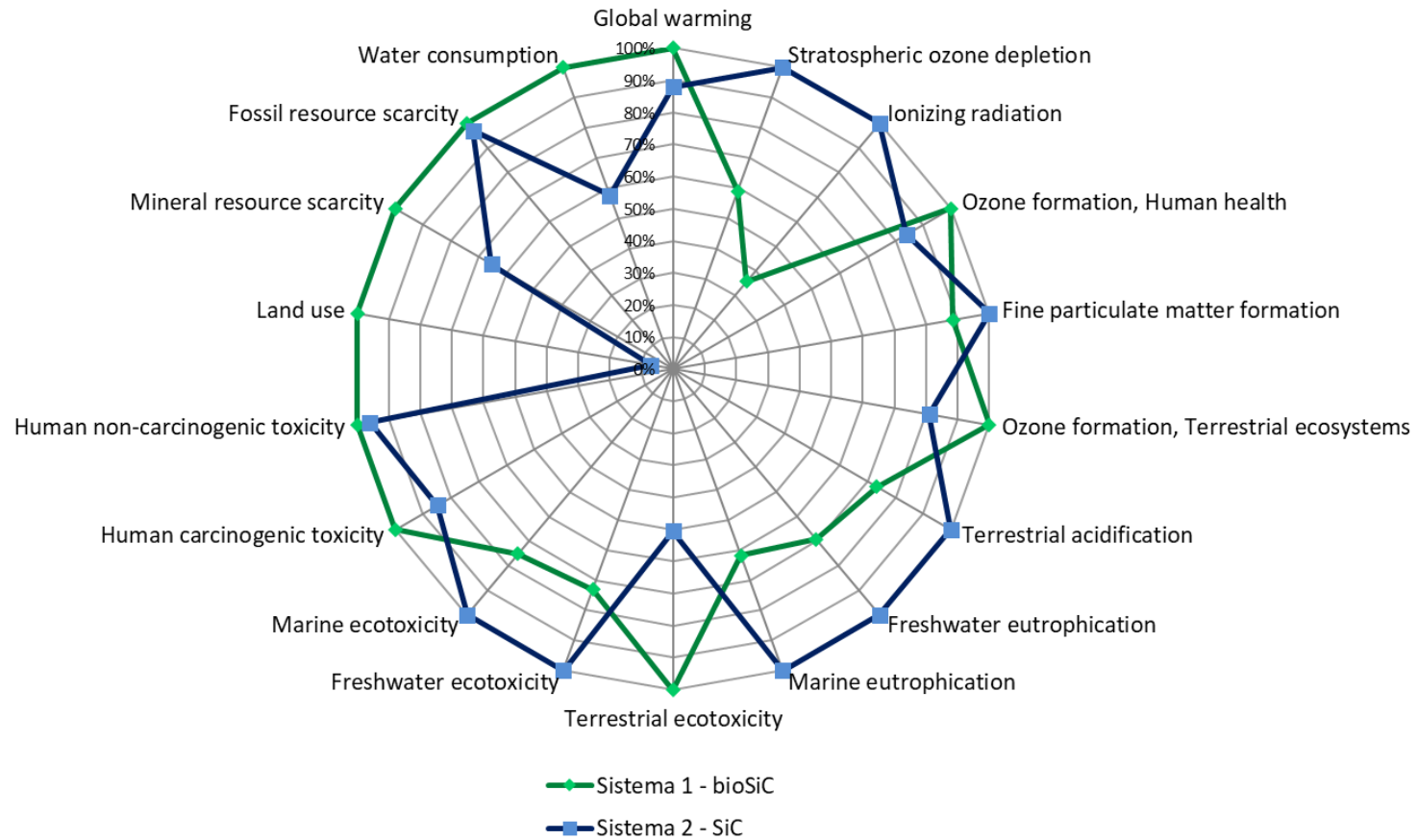


Figura 21. Comparativa del impacto total generado por cada sistema en cada categoría de impacto

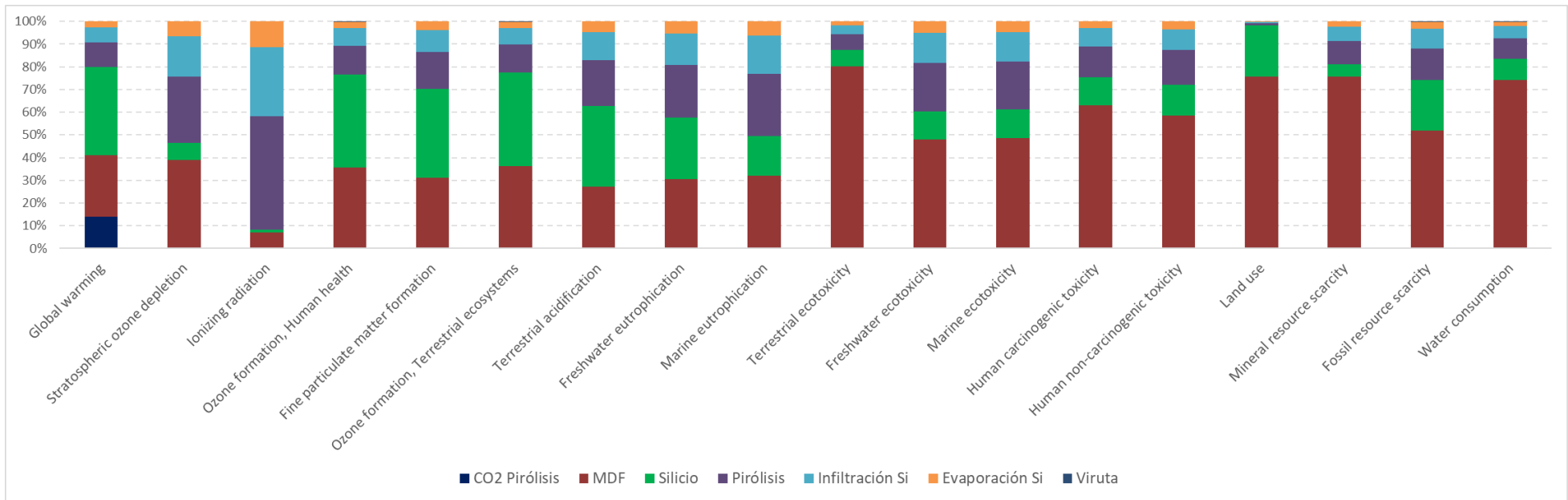


Figura 22. Impacto generado en porcentaje por cada subprocesso del Sistema 1

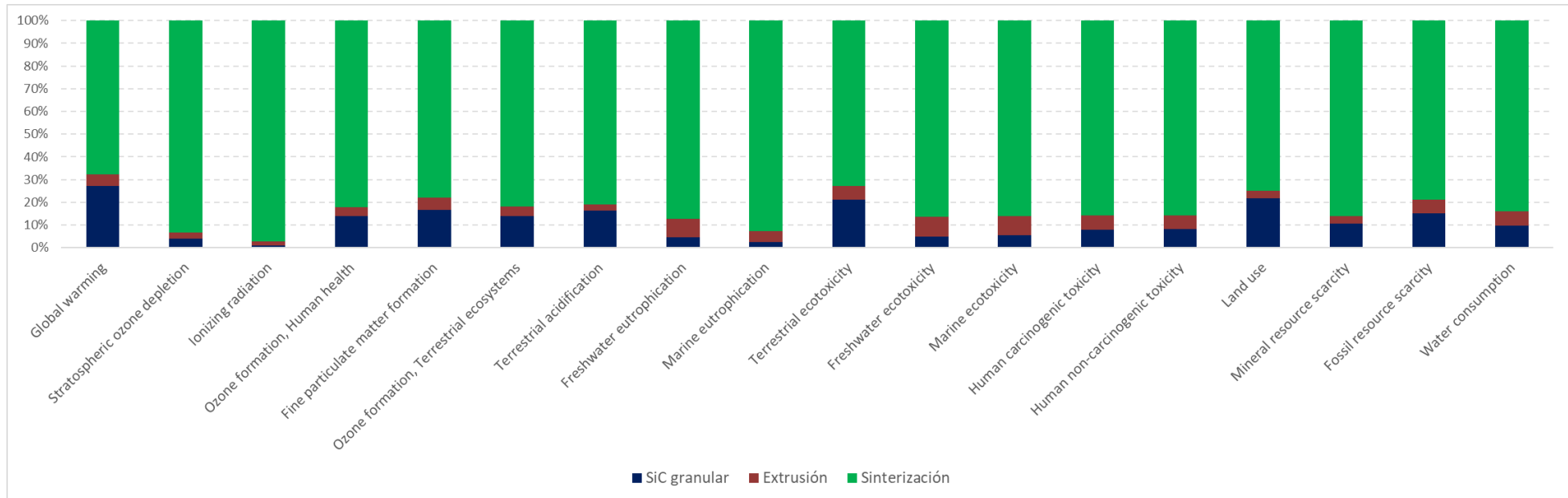


Figura 23. Impacto generado en porcentaje por cada subprocesso del Sistema 2

6 INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

En este apartado, en primer lugar, se realizará un análisis y discusión de los resultados obtenidos mostrados en el apartado anterior. Tras esto, se llevará a cabo un análisis de sensibilidad que será explicado posteriormente, para determinar la robustez de los resultados.

6.1 Interpretación de los resultados

Lo primero que se destaca de los resultados es que la candela de SiC convencional tiene un menor impacto ambiental que la de bioSiC en 10 de las 18 categorías. A continuación, en la **Tabla 9** se muestra, para cada sistema, aquellas categorías en las que produce el menor impacto en comparación con el otro sistema.

Categorías favorables bioSiC	Categorías favorables SiC convencional
✓ Fine particulate matter formation (12%)	✓ Fossil resource scarcity (3%)
✓ Marine ecotoxicity (25%)	✓ Human non-carcinogenic toxicity (4%)
✓ Freshwater ecotoxicity (27%)	✓ Global warming (12%)
✓ Terrestrial acidification (27%)	✓ Human carcinogenic toxicity (15%)
✓ Freshwater eutrophication (31%)	✓ Ozone formation, Human health (16%)
✓ Marine eutrophication (38%)	✓ Ozone formation, Terrestrial ecosystems (19%)
✓ Stratospheric ozone depletion (41%)	✓ Mineral resource scarcity (35%)
✓ Ionizing radiation (64%)	✓ Water consumption (42%)
	✓ Terrestrial ecotoxicity (50%)
	✓ Land use (93%)

Tabla 9. Categorías favorables para cada sistema (el porcentaje entre paréntesis indica la disminución del impacto respecto al otro sistema)

De los datos obtenidos y mostrados en la **Tabla 9** se puede observar lo siguiente:

1. En las categorías favorables del SiC convencional, de media el impacto generado por este sistema es un 33% menor que el del bioSiC. Por otro lado, en las categorías favorables del bioSiC, el impacto es de media un 29% menor que el del SiC convencional.
2. Sin embargo, la dispersión de los datos es mayor en el SiC convencional que en el bioSiC. Las disminuciones de impacto para este último van del 12% al 64%, mientras que para el SiC convencional varían entre el 3% y el 93%.

3. Las categorías con mayor variabilidad son *Fossil Resource Scarcity* y *Human non-carcinogenic toxicity* dada la cercanía entre los impactos de ambos sistemas (3% y 4% de desviación respectivamente), mientras que para la categoría de *Land Use* la diferencia llega a ser de un 93%.

Observando la **Figura 22** y **Figura 23** se pueden apreciar las distintas contribuciones de todas las entradas al impacto total generado para el Sistema 1 y Sistema 2 respectivamente. Para la fabricación del bioSiC, la producción del bloque de MDF y la obtención silicio necesario para la infiltración son los impactos más significativos en todas las categorías exceptuando la de *Ionizing Radiation*, donde el mayor impacto es producido por el consumo eléctrico de la pirólisis. Por otro lado, en el SiC convencional, el impacto generado por el consumo eléctrico de la sinterización es el más significativo en todas y cada una de las categorías.

A continuación, haciendo uso de los diagramas de red elaborados por SimaPro (ver ejemplo en Anexo D) se puede observar el origen de estos impactos.

En el caso de la producción de MDF, en todas las categorías el impacto ambiental es causado principalmente por el uso de resinas. Estas resinas son principalmente la urea-formaldehído y la melamina-formaldehído. El formaldehído es un compuesto químico utilizado para la formulación de los adhesivos utilizados en la fabricación de tableros MDF. Este compuesto está considerado como un compuesto nocivo y clasificado, además, por la IARC (Agencia Internacional de investigación sobre el Cáncer) como cancerígeno [35]. Por esto último, se observa efectivamente que para la categoría de *Human carcinogenic toxicity*, aquella donde se evalúa el efecto tóxico y cancerígeno sobre el ser humano de la sustancia, la fabricación del panel MDF produce el mayor impacto.

En cuanto al silicio metalúrgico utilizado para la infiltración, su producción se realiza a partir de ceniza de coque de petróleo. La obtención de esta materia prima es a través del refinado de petróleo, lo que supone un consumo energético muy elevado debido a su proceso de extracción. Este último es el factor que origina la gran contribución de la producción de silicio metalúrgico sobre el impacto total generado por la producción de bioSiC.

Para la producción de SiC convencional es mucho más directo. El mayor impacto, tal y como se ha comentado anteriormente, viene dado en todas las categorías por el consumo energético de la sinterización. Los 41,23 kWh que precisa este proceso suponen un gran impacto en comparación con el consumo del proceso de extrusión o de la obtención del carburo de silicio granular.

A continuación, se van a analizar más detalladamente todas las categorías de impacto:

Global warming

En el calentamiento global, que mide los kg de CO₂ equivalente y refleja la alteración de la temperatura global causada por la emisión de gases de efecto invernadero, el SiC convencional produce un impacto un 12% menor al generado por el bioSiC.

En el caso del bioSiC, la mayor contribución se debe a la producción del silicio necesario para la infiltración, suponiendo un 38% (9,02 kg CO₂ eq) sobre el impacto total. Tal y como se ha comentado anteriormente, la extracción de este producto conlleva una alta demanda energética produciendo grandes emisiones de gases de efecto invernadero.

Sin embargo, en el caso del SiC convencional, el proceso de sinterización produce un impacto de 13,86 kg CO₂ eq, mayor que el producido por cualquiera de las entradas del Sistema 1. Aún así, la suma del impacto de todas las entradas del Sistema 1 son mayores que las del Sistema 2 haciendo que el bioSiC produzca por tanto más kg de CO₂ equivalente.

Stratospheric ozone depletion

En esta categoría, el impacto producido por el bioSiC es casi un 40% menor que el producido por el SiC convencional. Esta categoría se ve impactada principalmente por el consumo energético de cada proceso.

La mayor parte de este 40% de diferencia es debido al gran consumo energético que produce la sinterización.

Este proceso consume 41,23 kWh mientras que la totalidad del consumo energético directo de la producción de bioSiC es de 13,9 kWh, que sumado al consumo indirecto de la fabricación del panel MDF, suponen el 40% mencionado anteriormente.

Ionizing radiation

La radiación ionizante es un tipo de radiación compuesta de partículas con suficiente energía para liberar un electrón de un átomo o molécula. En esta categoría, se produce la segunda mayor diferencia entre ambos sistemas, siendo el impacto generado por el bioSiC un 64% menor que para el SiC convencional.

El principal impacto es producido por el consumo de uranio necesario para la obtención de energía a través de plantas nucleares. Este es mucho mayor en la fabricación de SiC dado el mayor consumo energético que precisa.

Ozone formation, Human health

Aquí la diferencia es de un 16% entre ambos sistemas, siendo el bioSiC el que más impacto produce. En el caso de la fabricación de SiC convencional el 82% del impacto producido en esta categoría es producido sólo por el consumo energético de la sinterización. Sin embargo, en el caso del bioSiC está muy diversificado, siendo el 35,6% producido por la fabricación del panel de MDF, el 41,1% por la obtención del silicio para la infiltración y el sólo el 23,2% por el consumo energético directo.

Por tanto, aunque el consumo energético entre ambos sistemas es muy desigual, a la fabricación de la candela de bioSiC, la fabricación y obtención del panel MDF y el silicio aportan bastante impacto.

Fine particulate matter formation

Esta categoría, que mide las partículas extremadamente pequeñas en suspensión que se generan, recibe un impacto muy similar en ambos sistemas, siendo el producido por la fabricación de la candela de bioSiC un 12% menor. En ambos sistemas el impacto se encuentra muy diversificado entre las diferentes entradas. Para el caso del SiC convencional, la obtención del carburo de silicio granular supone un 16,8%, el proceso de extrusión un 5,1% y la sinterización un 78,1%. En el caso del bioSiC, está más igualado, el panel MDF supone un 31,2%, la obtención de silicio un 39% y el consumo energético de todos los procesos un 29,7%.

Ozone formation, Terrestrial ecosystems

En esta categoría el SiC produce un impacto un 19% menor que el bioSiC. El proceso que más impacta de ambos sistemas es la sinterización, aportando 0,044 kg NOx eq. Sin embargo, la suma del impacto de la fabricación del panel MDF y la obtención del silicio (0,051 kg NOx eq) ya supera ese impacto y, por tanto, sumado al que se genera del consumo energético del resto de procesos del bioSiC, hace a este más perjudicial.

Terrestrial acidification

Esta categoría mide la reducción del pH debido a los efectos acidificantes de las emisiones antropogénicas y es impactada en mayor medida por el SiC convencional, siendo el impacto producido por el bioSiC un 27% menor. Al igual que en la categoría anterior, es el consumo energético de la sinterización el que produce mayor impacto aportando 0,117 kg SO2 eq, es decir, un 81% del total. Además, en esta ocasión solamente este impacto es mayor que el producido por todas las entradas y salidas de la fabricación de la candela de bioSiC.

Freshwater eutrophication

Esta categoría, que mide la acumulación de nutrientes (fósforo en este caso) en los sistemas acuáticos, es impactada en mayor medida por la producción de la candela de SiC convencional, siendo la reducción de impacto del bioSiC de un 31%.

En ambos sistemas, el origen del impacto proviene de los residuos generados en la minería para la extracción de carbón. En cuanto a la candela de SiC convencional, son necesarios unos 26,8 kg de carbon (para materia prima y energía) mientras que para la de bioSiC se necesitan unos 18,8 kg, lo que supone una diferencia de aproximadamente el 31% mencionado anteriormente.

Marine eutrophication

Al igual que en la categoría anterior, aquí se mide la acumulación de nutrientes en los sistemas acuáticos, sin embargo, en vez de fósforo se mide la acumulación de nitrógeno. Los resultados son muy parecidos a los de la categoría anterior, siendo el impacto producido por el bioSiC un 38% menor debido principalmente a la menor generación de residuos en la extracción de carbón.

Terrestrial ecotoxicity

El SiC convencional posee para esta categoría un impacto un 50% menor que la fabricación de bioSiC. Analizando el origen de estos impactos aparece una causa nueva: las partículas que se producen del desgaste de los frenos en el transporte, siendo 5 veces mayor en la fabricación de bioSiC debido al transporte que se genera del panel MDF.

Por otro lado, para el caso de la fabricación de la candela de SiC convencional, el consumo de uranio debido al consumo de electricidad de fuente nuclear tiene un gran impacto para esta categoría. En el caso del bioSiC, el origen proviene del consumo de cobre necesario para la producción de la melamina utilizada en el panel MDF.

Freshwater ecotoxicity

En este caso, la fabricación de la candela de bioSiC produce un impacto un 27% menor que la de SiC convencional. La mayor parte de esta diferencia de impacto es debida a los lodos producidos en el biogas utilizado para la producción de la energía necesaria para la sinterización.

Marine ecotoxicity

Esta categoría es muy similar a la anterior, siendo el impacto de la fabricación de la candela de bioSiC un 25% menor que la de SiC convencional. Sin embargo, al igual que en la categoría de *Terrestrial ecotoxicity*, el mayor impacto viene dado por los lodos que se generan en la producción de biogas. En el caso del panel MDF es debido a la construcción de industrias químicas necesarias para la producción de melamina.

Human carcinogenic toxicity

Esta categoría, que mide los efectos tóxicos de las sustancias químicas cancerígenas en los seres humanos, se ve impactada un 15% menos por la fabricación de la candela de SiC convencional. En ambos sistemas el origen es el mismo principalmente: las partículas que se genera de la minería del carbón y los lodos que se generan en la producción de electricidad a través de biogas.

Human non-carcinogenic toxicity

El impacto en esta categoría se encuentra muy parejo en ambos sistemas, siendo únicamente un 4% menor para la fabricación de la candela de SiC convencional. En el caso del SiC convencional, el mayor impacto viene dado por el consumo energético de la sinterización (representando un 85,7% del total) y más concretamente de los lodos generados por la producción de electricidad a través de biogas. Para el caso de la candela de bioSiC, es la fabricación del panel MDF el impacto más significativo con un 58,5% del total. En la fabricación del panel MDF, el proceso que más impacta es la construcción, proporcional al consumo de MDF, de una planta química necesaria para la producción de la melamina.

Land use

Esta categoría, que mide el impacto en la tierra debido a la agricultura, los asentamientos antropogénicos y las extracciones de recursos, es la que tiene mayor diferencia entre ambos sistemas, siendo la fabricación de la candela de bioSiC un 93% que la de SiC convencional. En ambos sistemas el origen del impacto proviene principalmente de las partículas de madera generadas. Es obvio que este impacto será mucho mayor en la producción de la candela de bioSiC debido a la fabricación y consumo del panel de MDF.

Mineral resource scarcity

El mayor impacto para esta categoría lo produce la fabricación de la candela de bioSiC, siendo el total de la fabricación de la candela de SiC convencional un 35% menor. En el caso del bioSiC el mayor impacto es el producido por el panel MDF, suponiendo este un 75,8%. El origen de este viene dado principalmente por la obtención de hierro mineral necesario (0,452 kg), aguas arriba, para la construcción de hornos utilizados en la fabricación del MDF.

En el caso de la candela de SiC convencional, el consumo eléctrico del proceso de sinterización supone un 79% del impacto total. Al igual que en el bioSiC, el origen del consumo proviene principalmente por la obtención de hierro mineral además de algo de uranio. En este caso el consumo de hierro mineral es de 0,272 kg, es decir, una diferencia de un 40% que es representativo de la diferencia del 35% entre el impacto de ambos sistemas. El 5% que queda viene dado por el impacto producido por el uranio ya mencionado.

Fossil resource scarcity

El impacto producido por los dos sistemas en esta categoría es prácticamente igual, siendo la diferencia de un 3% favorable a la fabricación de la candela de SiC convencional. Para el caso del SiC convencional, al igual que en la mayoría de las categorías anteriores, el impacto producido por el consumo energético de la sinterización es el más significativo suponiendo un 78,9% del total. El origen en este caso proviene de la extracción de carbón.

Para el caso del bioSiC, el impacto viene más repartido entre varias entradas, siendo las más significativas: la fabricación del panel MDF (51,9% de impacto), el silicio para la infiltración (22,2%) y la electricidad necesaria para todos los procesos (25,8%).

Water consumption

Esta categoría, que mide la cantidad de agua utilizada durante todo el proceso, se ve impactada un 42% menos por la fabricación de la candela de SiC convencional. El mayor consumo de agua del SiC convencional se produce en la generación de la electricidad necesaria, en este caso, para el proceso de sinterización. Sin embargo, para el bioSiC, sólo el 16,3% del impacto es producido por el consumo energético mientras que el 74,3% es producido por la fabricación del panel MDF.

6.2 Análisis de sensibilidad

En este apartado se pretende observar como la variación de ciertos valores del estudio realizado, puede afectar a los resultados. En concreto, estas variaciones se van a estudiar para el mix energético.

Análisis de la variación del mix eléctrico

Dado que el mix eléctrico se encuentra en continuo cambio debido al auge de las energías renovables, se hace patente la necesidad de estudiar cómo estos cambios afectarán a los impactos producidos por los consumos energéticos. Para ello, se ha elaborado un nuevo mix en base a las predicciones elaboradas para 2030 [36].

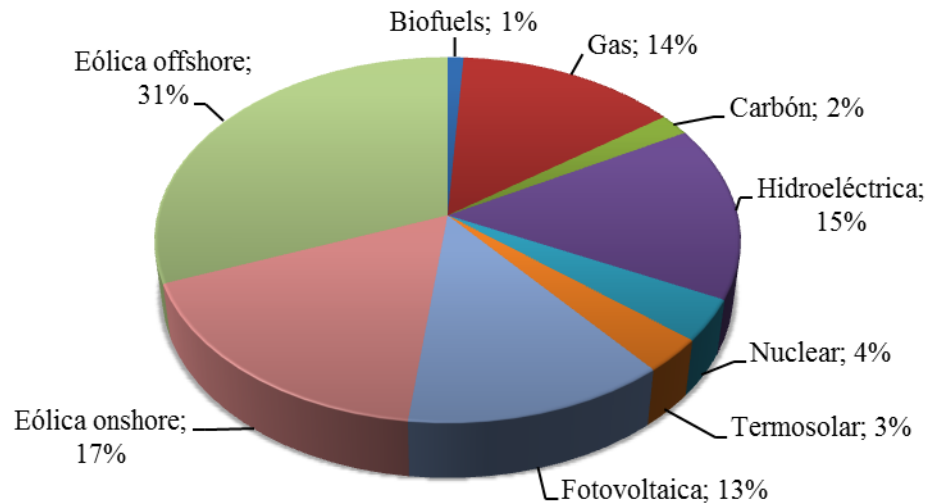


Figura 24. Estimación del mix eléctrico para 2030

Este mix contempla un desarrollo constante de las energías renovables, un crecimiento económico moderado y se encuentra alineado con el objetivo de emisiones marcado por la Unión Europea. En él se puede apreciar una gran reducción de la energía proveniente de centrales nucleares que se convertirá en un aumento de la energía fotovoltaica y eólica. Por otro lado, la energía hidráulica y la termosolar se mantienen prácticamente constantes con respecto al mix actual.

A continuación, se muestra una comparativa entre 1 kWh producido por el mix actual frente a uno producido con el mix de 2030 descrito.

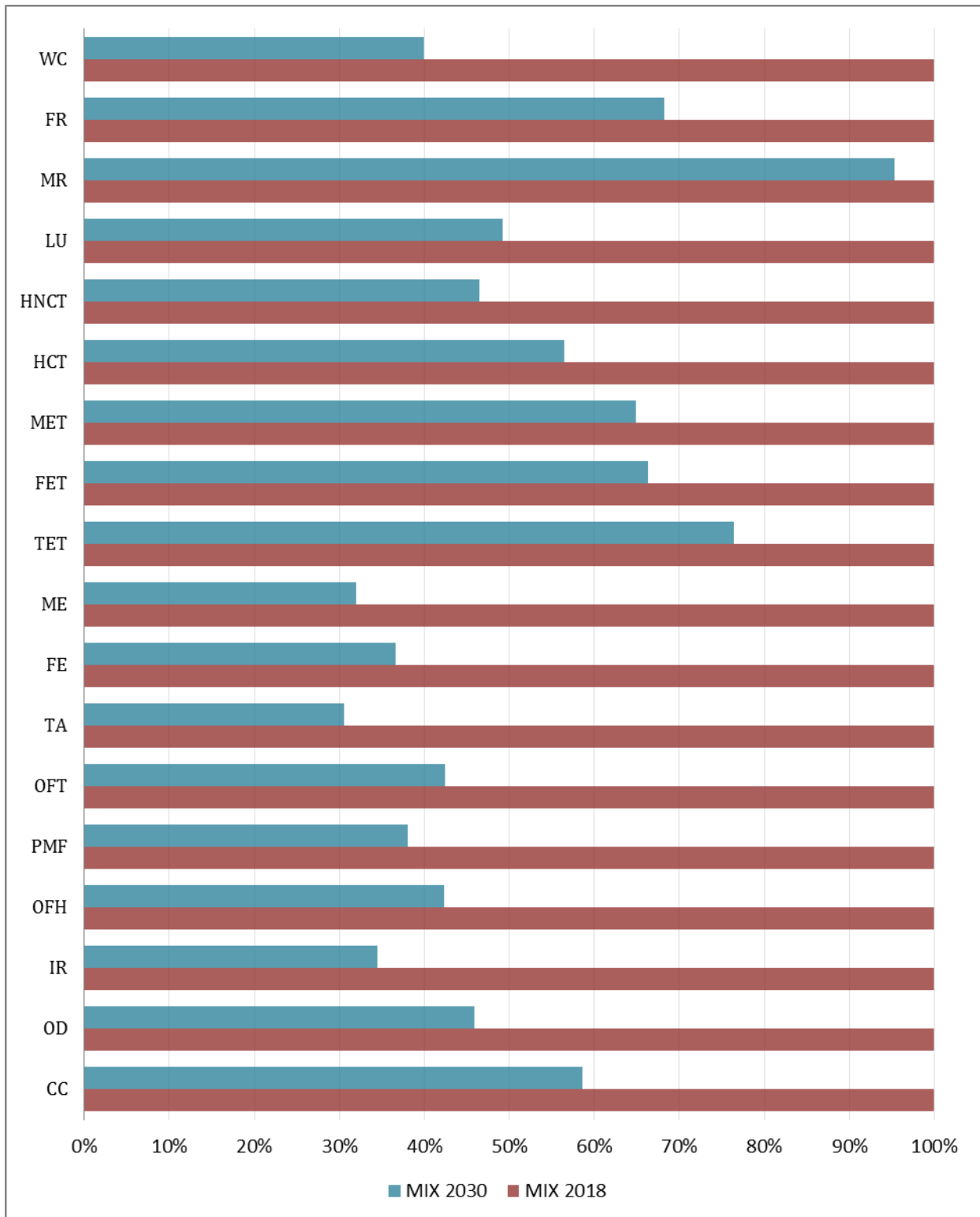


Figura 25. Comparativa impacto producido por el mix eléctrico de 2018 y la estimación para 2030¹

En la **Figura 25** se puede apreciar como el mix actual produce un impacto mayor en todas las categorías. El aumento considerable de las fuentes renovables genera, como era de esperar, un modelo energético más sostenible. A continuación, se obtendrán de nuevo los resultados para así poder valorar cómo de significativos son estos cambios en los sistemas estudiados.

¹ Nomenclatura detallada en la **Tabla 1**

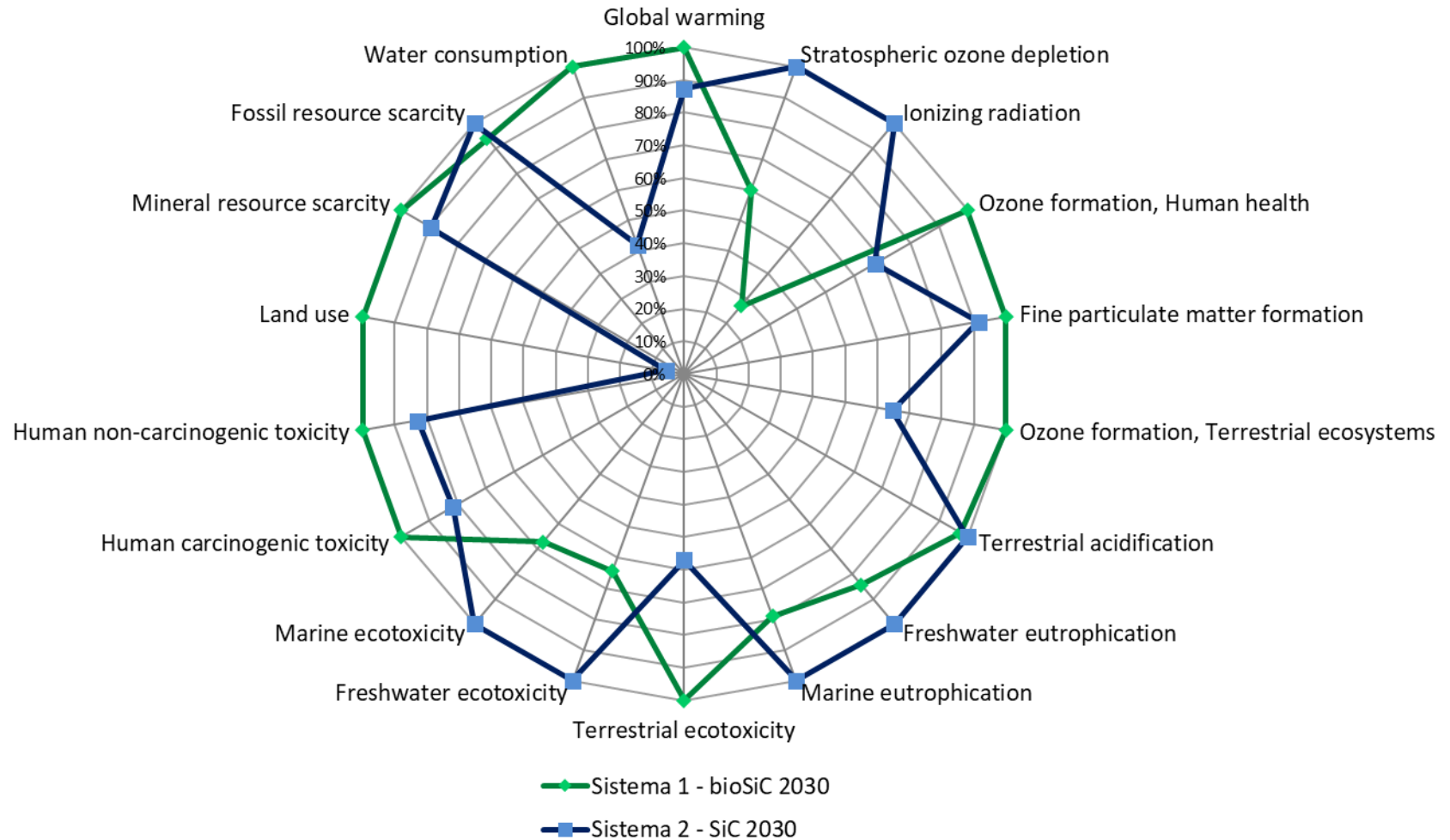


Figura 26. Comparativa del impacto total generado por cada sistema actualizado con la estimación del mix eléctrico para 2030

Tal y como se ha comentado anteriormente, la variación de estos resultados viene dada por un cambio en el mix energético que hace que la producción de 1 kWh sea más sostenible. Esto lógicamente mejorará el impacto producido por los consumos energéticos de cada proceso.

A partir de los nuevos resultados que se muestran en la **Figura 26**, se observa que la fabricación de la candela de SiC convencional sigue produciendo menor impacto que la de bioSiC en 10 de las 18 categorías. Sin embargo, la categoría de *Fine particulate matter formation* ahora es favorable para la candela de SiC convencional y la de *fossil resource scarcity* para la de bioSiC. A continuación, se observan las variaciones que ha sufrido cada categoría de impacto resaltando aquellas que han pasado a ser favorables para el otro sistema:

Categoría de impacto	Mix eléctrico de 2018		Estimación Mix eléctrico 2030		Δ
	Favorable	% disminución	Favorable	% disminución	
Global Warming	SiC	12%	SiC	13%	(↑) 1%
Stratospheric ozone depletion	bioSiC	41%	bioSiC	40%	(↓) 1%
Ionizing radiation	bioSiC	64%	bioSiC	73%	(↑) 9%
Ozone formation, Human health	SiC	16%	SiC	33%	(↑) 17
Fine particulate matter formation	bioSiC	12%	SiC	9%	(↓) 21
Ozone formation, Terrestrial ecosystems	SiC	19%	SiC	35%	(↑) 16
Terrestrial acidification	bioSiC	27%	bioSiC	2%	(↓) 25
Freshwater eutrophication	bioSiC	31%	bioSiC	16%	(↓) 15
Marine eutrophication	bioSiC	38%	bioSiC	21%	(↓) 17
Terrestrial ecotoxicity	SiC	50%	SiC	43%	(↓) 7
Freshwater ecotoxicity	bioSiC	27%	bioSiC	36%	(↑) 9
Marine ecotoxicity	bioSiC	25%	bioSiC	33%	(↑) 8
Human carcinogenic toxicity	SiC	15%	SiC	18%	(↑) 3
Human non-carcinogenic toxicity	SiC	4%	SiC	17%	(↑) 13
Land use	SiC	93%	SiC	94%	(↑) 1
Mineral resource scarcity	SiC	35%	SiC	10%	(↓) 25
Fossil resource scarcity	SiC	3%	bioSiC	6%	(↓) 9
Water consumption	SiC	42%	SiC	58%	(↑) 16

Tabla 10. Comparativa de impactos con mix eléctrico de 2018 y estimación de 2030

Las categorías que han cambiado a ser favorables al otro sistema han sido dos de las que mayor variabilidad tenían. Sin embargo, las categorías que mas han variado tras la actualización del mix eléctrico son:

- ***Terrestrial acidification***: con una variación del 25%, ahora únicamente un 2% separa los impactos de ambas categorías siendo aún favorable para la fabricación del bioSiC. Como se explicó en el apartado anterior, el mayor impacto producido en esta categoría venía dado por el consumo energético de la sinterización, por lo que una mejora del mix eléctrico ha hecho que este impacto se reduzca considerablemente.
- ***Mineral resource scarcity***: al igual que la anterior, la variación es de un 25%. Sin embargo, en este caso el sistema favorable es la fabricación de la candela de SiC convencional pasando de tener un impacto un 35% menor a uno un 10% menor. Aquí, la variación del mix eléctrico ha supuesto una reducción de impacto significativa en la fabricación del panel MDF que era el proceso que más impacto aportaba. Con esto, la diferencia entre ambos sistemas se ha visto reducida.

7 CONCLUSIONES

Este proyecto presenta los resultados de la comparativa entre el impacto generado por la fabricación de filtros cerámicos para aplicaciones a alta temperatura a través del método convencional y a partir de bioSiC. Estos resultados permiten obtener una visión clara de que partes de dichos procesos intervienen en mayor medida en el impacto ambiental.

Tanto con los primeros resultados como tras en el análisis de sensibilidad, la fabricación de una candela de SiC convencional produce menor impacto que la de bioSiC en 10 de las 18 categorías. Sin embargo, para establecer qué método es más sostenible dependerá de la categoría que se quiera controlar. Por ejemplo, si se quieren controlar los kg de CO₂ equivalentes que se vierten a la atmósfera, algo que ya se está empezando a controlar en muchas industrias, el SiC convencional resulta menos perjudicial. Sin embargo, si lo que se desea controlar es la exposición a radiaciones ionizantes, es la candela de bioSiC la más sostenible.

Las principales contribuciones al impacto producido por el bioSiC se deben al consumo de materias primas (madera MDF y silicio) mientras que para el SiC convencional es el consumo energético de la sinterización el que predomina ampliamente. Tal y como se ha comprobado, para la fabricación del panel MDF, el consumo de resinas supone un gran impacto ambiental. Por ello, como línea de mejora para este novedoso material como es el bioSiC, podría plantearse el uso de otros precursores o maderas más naturales con ausencias de resinas y así disminuir el impacto producido por este material.

Tras una actualización del mix eléctrico donde el consumo eléctrico se hace más sostenible debido al crecimiento de las energías renovables, se observa que la fabricación de la candela de SiC es la que mayores variaciones favorables sufre. Esto era de esperar debido a que el consumo energético que engloba su fabricación es mayor que para la candela de bioSiC.

Como resultado de todo esto, se concluye que la fabricación de candelas de carburo de silicio convencional resulta más sostenible para un mayor número de categorías de impacto que las candelas de carburo de silicio biomórfico tanto antes como después del análisis de sensibilidad, sin embargo, estas últimas presentan un mayor potencial de mejora.

ANEXOS

ANEXO A

Descripción de consideraciones del modelo energético utilizado en la base de datos de SimaPro

- Transmisión de la electricidad en el modelo de alto voltaje: 6.58 km

“Estimation. Data taken over from Switzerland.

Swiss data are calculated values based on the electricity transported in this voltage level (60129 GWh) and the total medium voltage power line length in Switzerland (cables and aerial lines - 15831 km). Lifetime is assumed to be 40 years.”

- Pérdida de energía durante la transformación alta-media tensión: se establece 1,0082 kW para suponer que llegan 1 kW de media tensión

“Calculated value/estimation. This value compensates for the losses during transformation from high to medium voltage. The calculation is made based on total electricity losses between net electricity available at the busbar and the use of electricity calculated based on the IEA electricity information 2014, table 1.1, Electricity supply vs. transmission losses. These total losses over the whole chain are then allocated to the different voltage levels as well as transformation and transmission losses based on information in Itten et al. 2014. For details please see the documentation available on ecoQuery.

IEA. 2014. Electricity Information 2014. ISBN 978-92-64-21692-1. International Energy Agency (IEA), Paris Cedex (FR).

Itten R., Frischknecht R., Stucki M. 2014. Life Cycle Inventories of Electricity Mixes and Grid. Version 1.3. treeze, Uster, Switzerland”

- Modelo de media tensión:

“This dataset describes the electricity available on the medium voltage level in {{location}} for year {{year}}. This is done by showing the transmission of 1kWh electricity at medium voltage.

Production volume: 221117743088.116 kWh

Included activities start: This activity starts from 1kWh of electricity fed into the medium voltage transmission network.

Included activities end: This activity ends with the transport of 1 kWh of medium voltage electricity in the transmission network over aerial lines and cables.

This dataset includes:

- electricity inputs produced in this country and from imports and transformed to medium voltage
- the transmission network
- direct emissions to air (SF6 from the insulation gas in the high voltage level switchgear are allocated to the electricity demand on medium voltage).
- electricity losses during transmission

This dataset doesn't include

- electricity losses during transformation from high to medium voltage or medium to low, as these are included in the dataset for transformation
- leakage of insulation oil from cables and electro technical equipment (transformers, switchgear, circuit breakers) because this only happens in case of accidental release
- SF6 emissions during production and deconstruction of the switchgear, as these are accounted for in the transmission network dataset.

Energy values:

Geography: The inventory is modelled for Spain

Technology level:

Technology: - Low voltage level below 1 kV (Households)---comment merge---Average technology used to transmit and distribute electricity. Includes underground and overhead lines, as well as air-, vacuum- and SF6-insulated high-to-medium voltage switching stations. Electricity production according to related technology datasets. ---comment merge---Definition of the voltage levels: ---comment merge---and public buildings)---comment merge--- - Medium voltage level between 1 kV and 24 kV (medium to small scale industry, service sector---comment merge--- - High voltage level above 24 kV (large scale industry)”

ANEXO B

Inventarios de Ciclo de Vida obtenidos de SimaPro

Entradas								
Entradas conocidas desde la naturaleza (recursos)	Subcompartimento	Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2^D	Mín	Máx	Comentario
(Insertar línea aquí)								
Entradas conocidas desde la tecnósfera (materiales/combustibles)		Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2^D	Mín	Máx	Comentario
Medium density fibreboard (GLO) market for APOS, U - ARM94		0,01	m3	Indefinido				Item 1 - Preforma MDF
Silicon, metallurgical grade (RoW) production APOS, U - ARM94		1,87	kg	Indefinido				Item 2 - Silicio infiltrado
(Insertar línea aquí)								
Entradas conocidas desde la tecnósfera (electricidad/calor)		Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2^D	Mín	Máx	Comentario
Electricity, medium voltage (ES) market for 2018 ARM94		7,57	kWh	Indefinido				Item 3 - Pirólisis
Electricity, medium voltage (ES) market for 2018 ARM94		4,60	kWh	Indefinido				Item 4 - Infiltración de Silicio
Electricity, medium voltage (ES) market for 2018 ARM94		1,73	kWh	Indefinido				Item 5 - Evaporación Si residual
(Insertar línea aquí)								
Salidas								
Emisiones al aire	Subcompartimento	Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2^D	Mín	Máx	Comentario
Carbon dioxide		3,23	kg	Indefinido				Item 6 - CO2 Pirólisis
(Insertar línea aquí)								
Salidas conocidas a la tecnósfera. Residuos y emisiones para tratamiento		Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2^D	Mín	Máx	Comentario
Inert waste, for final disposal (RoW) treatment of inert waste, inert materi		1,2	kg	Indefinido				Item 7 - Viruta mecanizado
(Insertar línea aquí)								

Figura 27. Inventario de Ciclo de Vida Sistema 1

Productos								
Salidas conocidas a la tecnósfera. Productos y co-productos	Cantidad	Ud.	Cantidad	Asignación	Tipo de resid.	Categoría	Comentario	
Silicon carbide candle from coke - ARM94	1	p	Amount	100 %		Cer...Transformation		
(Insertar línea aquí)								
Salidas conocidas a la tecnósfera. Productos evitados		Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2^D	Mín	Máx	Comentario
(Insertar línea aquí)								
Entradas								
Entradas conocidas desde la naturaleza (recursos)	Subcompartimento	Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2^D	Mín	Máx	Comentario
(Insertar línea aquí)								
Entradas conocidas desde la tecnósfera (materiales/combustibles)		Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2^D	Mín	Máx	Comentario
Silicon carbide (GLO) market for APOS, U - ARM94		2,67	kg	Indefinido				Item 1 - Carburo de Silicio granular
(Insertar línea aquí)								
Entradas conocidas desde la tecnósfera (electricidad/calor)		Cantidad	Ud.	Distribución	DS^2 or 2^D	Mín	Máx	Comentario
Impact extrusion of aluminium, deformation stroke (GLO) market for AP		2,67	kg	Indefinido				Item 2 - Extrusión
Electricity, medium voltage (ES) market for 2018 ARM94		41,23	kWh	Indefinido				Item 3 - Sinterización
(Insertar línea aquí)								

Figura 28. Inventario de Ciclo de Vida Sistema 2

ANEXO C

Tablas de resultados

Categoría de impacto	CO2 Pirólisis	MDF	Silicio	Pirólisis	Infiltración Si	Evaporación Si	Viruta
Global warming	3,23000000	6,34763520	9,02110930	2,54434400	1,54610070	0,58146831	0,00642995
Stratospheric ozone depletion	0,00000000	0,00000377	0,00000075	0,00000281	0,00000171	0,00000064	0,00000000
Ionizing radiation	0,00000000	0,21601332	0,03906914	1,55180650	0,94297355	0,35464005	0,00020239
Ozone formation, Human health	0,00000000	0,02265901	0,02611201	0,00804474	0,00488848	0,00183849	0,00005462
Fine particulate matter formation	0,00000000	0,01220091	0,01527260	0,00633897	0,00385195	0,00144867	0,00001650
Ozone formation, Terrestrial ecosystems	0,00000000	0,02400154	0,02748157	0,00809183	0,00491710	0,00184926	0,00005576
Terrestrial acidification	0,00000000	0,02876696	0,03787068	0,02156866	0,01310645	0,00492917	0,00003683
Freshwater eutrophication	0,00000000	0,00161847	0,00144682	0,00122770	0,00074603	0,00028057	0,00000072
Marine eutrophication	0,00000000	0,00017597	0,00009582	0,00015124	0,00009190	0,00003456	0,00000005
Terrestrial ecotoxicity	0,00000000	35,71197500	3,30573470	3,00632070	1,82682630	0,68704554	0,01518432
Freshwater ecotoxicity	0,00000000	0,21720636	0,05528824	0,09815366	0,05964423	0,02243142	0,00006457
Marine ecotoxicity	0,00000000	0,30013881	0,07820844	0,12961984	0,07876503	0,02962250	0,00010088
Human carcinogenic toxicity	0,00000000	0,54926220	0,10821855	0,11640749	0,07073639	0,02660303	0,00016661
Human non-carcinogenic toxicity	0,00000000	7,01302220	1,65025920	1,81357470	1,10204010	0,41446291	0,00206338
Land use	0,00000000	5,20599580	1,55664440	0,06643842	0,04037209	0,01518342	0,00099708
Mineral resource scarcity	0,00000000	0,03550405	0,00241875	0,00483719	0,00293938	0,00110546	0,00001219
Fossil resource scarcity	0,00000000	2,40286660	1,02576640	0,64946380	0,39465436	0,14842436	0,00445522
Water consumption	0,00000000	0,17061977	0,02139803	0,02032984	0,01235367	0,00464605	0,00020354

Tabla 11. Resultados Sistema 1

Categoría de impacto	SiC granular	Extrusión	Sinterización
Global warming	5,58424270	1,02748230	13,85776800
Stratospheric ozone depletion	0,00000067	0,00000044	0,00001533
Ionizing radiation	0,07862774	0,17630123	8,45191300
Ozone formation, Human health	0,00739001	0,00220217	0,04381565
Fine particulate matter formation	0,00741713	0,00228217	0,03452520
Ozone formation, Terrestrial ecosystems	0,00749530	0,00221933	0,04407216
Terrestrial acidification	0,02381734	0,00371417	0,11747371
Freshwater eutrophication	0,00034949	0,00063611	0,00668666
Marine eutrophication	0,00002306	0,00004267	0,00082374
Terrestrial ecotoxicity	4,77737320	1,34392250	16,37392300
Freshwater ecotoxicity	0,03037447	0,05404306	0,53459385
Marine ecotoxicity	0,04489931	0,06944696	0,70597439
Human carcinogenic toxicity	0,05798398	0,04710482	0,63401330
Human non-carcinogenic toxicity	0,94577248	0,69470447	9,87763330
Land use	0,10530884	0,01629666	0,36185678
Mineral resource scarcity	0,00323600	0,00104586	0,02634576
Fossil resource scarcity	0,68508074	0,25921259	3,53730420
Water consumption	0,01302256	0,00828671	0,11072645

Tabla 12. Resultados Sistema 2

Categoría de impacto	Sistema 1 - bioSiC	Sistema 2 - SiC
Global warming	21,341655	18,647117
Stratospheric ozone depletion	6,89023E-06	1,15348E-05
Ionizing radiation	1,2380809	4,5773917
Ozone formation, Human health	0,055076646	0,037084899
Fine particulate matter formation	0,031919831	0,029182195
Ozone formation, Terrestrial ecosystems	0,057853551	0,037487374
Terrestrial acidification	0,078772715	0,080741114
Freshwater eutrophication	0,003891783	0,004617448
Marine eutrophication	0,000360697	0,00045654
Terrestrial ecotoxicity	43,254667	24,689192
Freshwater ecotoxicity	0,39213262	0,61031684
Marine ecotoxicity	0,5330153	0,79415244
Human carcinogenic toxicity	0,7783974	0,63616287
Human non-carcinogenic toxicity	10,215216	8,4570106
Land use	6,8237112	0,38581832
Mineral resource scarcity	0,046404661	0,04153255
Fossil resource scarcity	4,2465555	4,5220265
Water consumption	0,20713768	0,086913261

Tabla 13. Comparativa entre sistemas con estimación del mix eléctrico 2030

ANEXO D

Diagramas de Red

■	Montaje
■	Ciclo de vida
■	Escenario de disposición final
■	Desensamblar
■	Reutilizar
■	Material
■	Energía
■	Transporte
■	Transformaciones
■	Uso
■	Escenario de residuo
■	Tratamiento de residuos

Figura 29. Códigos de colores diagramas de red

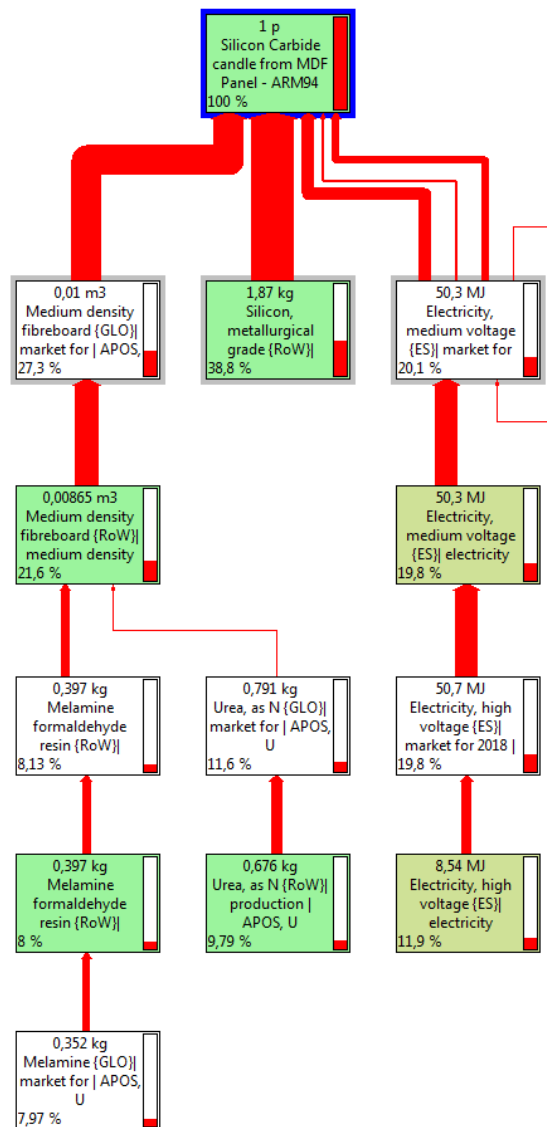


Figura 30. Diagrama de red Sistema 1 categoría *Global Warming*

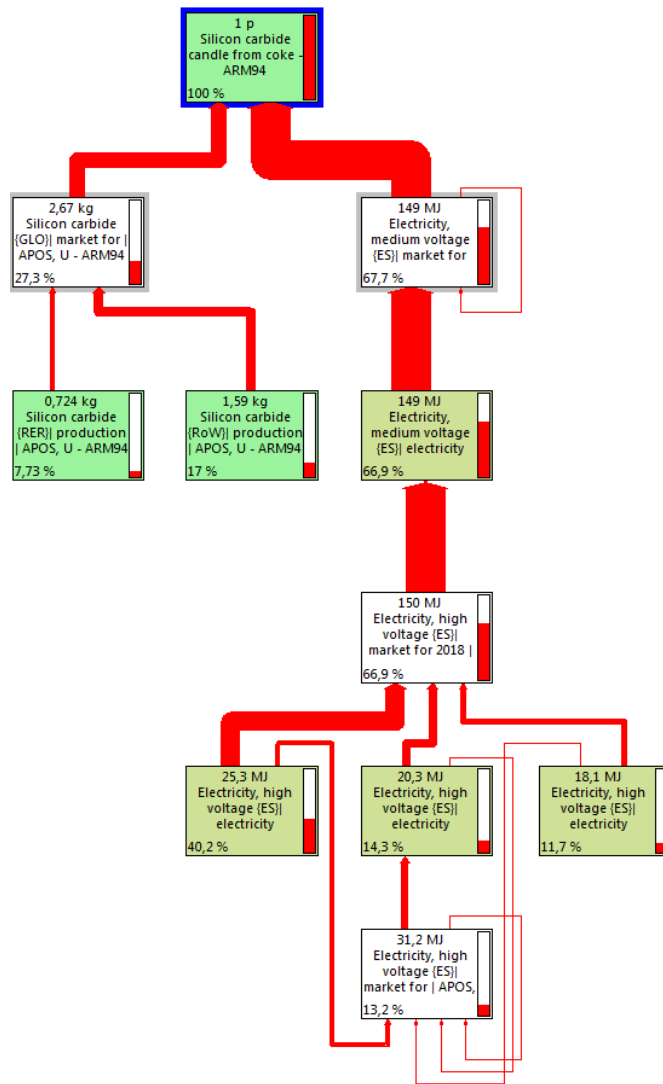


Figura 31. Diagrama de red Sistema 2 categoría *Global Warming*

BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. Singh, J. Martínez-Fernández, and A. R. de Arellano-López, “Environmentally conscious ceramics (ecoceramics) from natural wood precursors,” *Curr. Opin. Solid State Mater. Sci.*, vol. 7, no. 3, pp. 247–254, 2003, doi: 10.1016/j.cossms.2003.09.004.
- [2] B. Alonso-Fariñas, M. Lupion, M. Rodriguez-Galan, and J. Martinez-Fernandez, “New candle prototype for hot gas filtration industrial applications,” *Fuel*, vol. 114, pp. 120–127, 2013, doi: 10.1016/j.fuel.2012.12.054.
- [3] G. Zhou, P. A. Jensen, D. M. Le, N. O. Knudsen, and A. D. Jensen, “Direct upgrading of fast pyrolysis lignin vapor over the HZSM-5 catalyst,” *Green Chem.*, vol. 18, no. 7, pp. 1965–1975, 2016, doi: 10.1039/c5gc01976a.
- [4] “P&P Industries: Produkte & Leistungen.” [Online]. Available: <https://www.pp-industries.at/produkteleistungen>. [Accessed: 21-Oct-2019].
- [5] N. L. A. Rahman, K. M. Hyie, A. Kalam, and F. M. Yusof, “Biomorphic silicon carbide from Malaysian Hardwood,” *Int. J. Eng. Technol.*, vol. 7, no. 4, pp. 257–261, 2018, doi: 10.14419/ijet.v7i4.5.20080.
- [6] E. Vogli, H. Sieber, and P. Greil, “Biomorphic SiC-ceramic prepared by Si-vapor phase infiltration of wood,” *J. Eur. Ceram. Soc.*, vol. 22, no. 14–15, pp. 2663–2668, 2002, doi: 10.1016/S0955-2219(02)00131-0.
- [7] L. . and K. A. 4. Greil.P, “Biomorphic cellular silicon carbide ceramic from wood:I Processing and Microstructure II Mechanical Properties,” *J.Eur.Ceram.Soc*, vol. 18, no. 98, pp. 1961–1975, 1998.
- [8] “2015-Arnal, Usón_Exergy analysis of ceramic composite manufacturing processes. The caso of silicon infiltration.pdf.” .
- [9] M. J. L. Robledo, R. Sepúlveda, J. Martínez, and R. De López, “Cerámica y Vidrio Propiedades mecánicas de SiC biomórfico poroso,” vol. 323, no. 10, pp. 318–323, 2005.
- [10] A. Dey, N. Kayal, and O. Chakrabarti, “Preparation of porous SiC ceramics by an infiltration technique,” *Ceram. Int.*, vol. 37, no. 1, pp. 223–230, 2011, doi: 10.1016/j.ceramint.2010.09.022.
- [11] M. A. Bautista, J. Q. Cancapa, J. M. Fernandez, M. A. Rodríguez, and M. Singh, “Microstructural and mechanical evaluation of porous biomorphic silicon carbide for high temperature filtering applications,” *J. Eur. Ceram. Soc.*, vol. 31, no. 7, pp. 1325–1332, 2011, doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2010.06.014.
- [12] D. J. Lee *et al.*, “Fabrication of biomorphic SiC composites using wood preforms with different structures,” *Ceram. Int.*, vol. 38, no. 4, pp. 3089–3095, 2012, doi: 10.1016/j.ceramint.2011.12.008.
- [13] M. Singh, “Environment Conscious Ceramics (Ecoceramics): An Eco-Friendly Route to Advanced Ceramic Materials,” no. December, 2001.
- [14] M. Singh and B. M. Yee, “Reactive processing of environmentally conscious, biomorphic ceramics from natural wood precursors,” *J. Eur. Ceram. Soc.*, vol. 24, no. 2, pp. 209–217, 2004, doi: 10.1016/S0955-2219(03)00244-9.
- [15] M. Miura, H. Kaga, A. Sakurai, T. Kakuchi, and K. Takahashi, “Rapid pyrolysis of wood block by microwave heating,” *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 71, no. 1, pp. 187–199, 2004, doi: 10.1016/S0165-2370(03)00087-1.
- [16] A. R. Arellano-López, J. Martínez-Fernández, P. González, C. Domínguez, V. Fernández-Quero, and M. Singh, “Biomorphic SiC: A New Engineering Ceramic Material,” *Int. J. Appl. Ceram. Technol.*, vol.

- 1, no. 1, pp. 56–67, 2005, doi: 10.1111/j.1744-7402.2004.tb00155.x.
- [17] J. H. Eom, Y. W. Kim, and S. Raju, “Processing and properties of macroporous silicon carbide ceramics: A review,” *J. Asian Ceram. Soc.*, vol. 1, no. 3, pp. 220–242, 2013, doi: 10.1016/j.jascer.2013.07.003.
- [18] “Norma UNE EN ISO 14040: Gestión Ambiental. Análisis de ciclo de vida. Principios y marco de referencia.” 2006.
- [19] “Norma UNE EN ISO 14040: Gestión Ambiental. Análisis de ciclo de vida. Requisitos y directrices,” 2006.
- [20] “Silicon Carbide Tubes for Industrial Furnaces | Sentro Tech.” [Online]. Available: <https://www.sentrotech.com/ceramic-tubes/silicon-carbide/>. [Accessed: 21-Apr-2020].
- [21] Y. Lechón, H. Cabal, C. Lago, C. de la Rúa, R. M^a Sáez, and M. Fernández, *Análisis Del Ciclo De Vida De Combustibles Alternativos Para El Transporte*. 2004.
- [22] E. Haya, “Análisis de Ciclo de Vida Master en Ingeniería y Gestión Medioambiental,” p. 43, 2016.
- [23] M. Nieto, R. Becerra, P. Miranzo, and R. Moreno, “Cerámica y Vidrio Materiales de SiC obtenidos por sinterización sin presión,” pp. 399–404, 2000.
- [24] “1987-J. Kim_Plasma Arc Sintering of Silicon Carbide.pdf.” .
- [25] S. Couillard and M. Sc, “Comparative Life Cycle Assessment (Lca),” vol. 2, no. February, pp. 69–75, 2009.
- [26] ecoRae, “Informe de resultados del ACV del proceso de reutilización de equipos informáticos,” p. 115, 2013.
- [27] R. Clift, A. Doig, and G. Finnveden, “The application of Life Cycle Assessment to Integrated Solid Waste Management. Part 1 - Methodology,” *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 78, no. 4, pp. 279–287, 2000, doi: 10.1205/095758200530790.
- [28] T. Lca, “Steng – nacionalni center za čistejšo proizvodnjo d A Life cycle Assessment (LCA) of Biomass Pyrolysis & Gasification.”
- [29] M. A. Bautista, “Miguel Antonio Bautista,” 2014.
- [30] “Silicio - Wikipedia, la enciclopedia libre.” [Online]. Available: <https://es.wikipedia.org/wiki/Silicio>. [Accessed: 21-Jan-2020].
- [31] S. Heidenreich, “Hot gas filtration - A review,” *Fuel*, vol. 104, pp. 83–94, 2013, doi: 10.1016/j.fuel.2012.07.059.
- [32] R. Frischknecht *et al.*, “The ecoinvent database: Overview and methodological framework,” *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 10, no. 1, pp. 3–9, 2005, doi: 10.1065/lca2004.10.181.1.
- [33] “Informe del sistema eléctrico | Red Eléctrica de España.” [Online]. Available: <https://www.ree.es/es/estadisticas-del-sistema-electrico-espanol/informe-anual>. [Accessed: 21-Oct-2019].
- [34] “Ministerio para la Transición Ecológica - Energía.” [Online]. Available: <https://energia.gob.es/es-es/Paginas/index.aspx>. [Accessed: 21-Oct-2019].
- [35] “Ensayo de emisión de formaldehído en tableros derivados de la madera | Símbolo de Calidad Blog.” [Online]. Available: <http://blog.simbolocalidad.com/ensayo-emision-formaldehido-tableros-derivados-madera>. [Accessed: 22-Jan-2020].
- [36] “Así será el mix eléctrico en España en 2030 y 2040, según los operadores de la red eléctrica europea – El Periodico de la Energía | El Periodico de la Energía con información diaria sobre energía eléctrica,

eólica, renovable, petróleo y gas, mercados y legislación energética.” [Online]. Available: <https://elperiodicodelaenergia.com/asi-sera-el-mix-electrico-en-espana-en-2030-y-2040-segun-los-operadores-de-la-red-electrica-europea/>. [Accessed: 08-Jan-2020].