

Natalia Muñoz López

Evaluación y mejora de la  
sostenibilidad de Sistemas  
producto- servicio con un enfoque  
de flujos entre sistemas

Director/es

Santolaya Sáenz, José Luis  
Biedermann, Anna María

<http://zaguan.unizar.es/collection/Tesis>

© Universidad de Zaragoza  
Servicio de Publicaciones

ISSN 2254-7606



**Universidad**  
Zaragoza

Tesis Doctoral

**EVALUACIÓN Y MEJORA DE LA SOSTENIBILIDAD  
DE SISTEMAS PRODUCTO- SERVICIO CON UN  
ENFOQUE DE FLUJOS ENTRE SISTEMAS**

Autor

**Natalia Muñoz López**

Director/es

Santolaya Sáenz, José Luis  
Biedermann, Anna María

**UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA**  
**Escuela de Doctorado**

Programa de Doctorado en Ingeniería de Diseño y Fabricación

2020





**Universidad**  
Zaragoza

EVALUACIÓN Y MEJORA  
DE LA SOSTENIBILIDAD DE SISTEMAS  
PRODUCTO-SERVICIO CON UN ENFOQUE  
DE FLUJOS ENTRE SISTEMAS

Natalia Muñoz López

**TESIS DOCTORAL**

Zaragoza, 2020



**Universidad**  
Zaragoza

Tesis Doctoral

**EVALUACIÓN Y MEJORA  
DE LA SOSTENIBILIDAD DE SISTEMAS  
PRODUCTO-SERVICIO CON UN ENFOQUE  
DE FLUJOS ENTRE SISTEMAS**

**Autora:**

**Natalia Muñoz López**

**Directores:**

**José Luis Santolaya Sáenz**

**Anna Biedermann**

**UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA**

**Departamento de Ingeniería de Diseño y Fabricación**

**2020**



## **AGRADECIMIENTOS**

---

Quiero agradecer, en primer lugar, a los directores de esta tesis, José Luis y Anna, por su tiempo, dedicación e inestimable ayuda, tanto profesional como personalmente, y por ser capaces de transmitirme su entusiasmo por el trabajo bien hecho. Sin ellos, esto no hubiera sido posible.

A las personas y empresas que me han ayudado aportando datos de procesos y productos, lo que nos ha permitido trabajar con datos actuales y dar más envergadura al trabajo realizado.

A mis padres, abuelos y hermano, por su apoyo incondicional, comprensión y cariño, ya no solo durante estos cuatro años, sino durante el largo camino que me ha llevado hasta aquí. Y también a Nacho, por sus continuos ánimos para lograr, éste y todos los objetivos que me propongo.





Este trabajo de investigación tiene como objetivo contribuir al desarrollo de métodos de evaluación y mejora de la sostenibilidad de Sistemas Producto-Servicio (PSS). Estudios previos consideran los PSS como potenciales soluciones al desafío de la sostenibilidad, pero no proporcionan criterios, métodos o modelos que permitan comprobar esta hipótesis.

En primer lugar, se revisa el concepto de sostenibilidad, los métodos y herramientas utilizados para evaluar la sostenibilidad de productos y servicios, los estudios ya realizados en este tipo de sistemas y los dedicados a la definición y análisis de PSS. A continuación, se desarrolla un esquema metodológico para realizar la evaluación y mejora de la sostenibilidad en PSS basado en un enfoque de flujos entre sistemas. Se identifican los sistemas que forman un PSS y las relaciones que se establecen entre ellos a lo largo de las etapas que forman parte de su ciclo de vida. Se utiliza la metodología LCSA para obtener simultáneamente impactos ambientales, económicos y sociales, a la que se añaden aspectos específicos relacionados con la combinación de varios sistemas. Y se aplican métodos de diseño sostenible que tienen en cuenta especificaciones iniciales y factores de impacto, para lograr una mejora de la sostenibilidad.

Esta metodología se pone en práctica en dos casos de estudio muy diferentes. En el primer caso, se estudia la producción de leche en una granja de ganado vacuno. En el segundo caso, se estudia un PSS centrado en la comercialización de prendas de vestir. En ambos casos se identifican los sistemas que forman parte del PSS, se analiza su incidencia en la sostenibilidad y se identifican los factores con mayor impacto. Además, se pretende mejorar la sostenibilidad de cada PSS planteando una serie de estrategias. Se evalúan los sistemas proyectados teniendo en cuenta estas estrategias y se comparan con el sistema inicial. Finalmente, se determina si se ha logrado una mejora global en la sostenibilidad del PSS aplicando diferentes ponderaciones a los indicadores de cada dimensión.



The aim of this research work contributes to develop sustainability assessment and improvement methods of Service- Product Systems (PSS). According to previous studies, PSS are considered as potential solutions to sustainability challenge, however criteria, methods and tools to support this hypothesis are required.

First, the sustainability concept, methods and tools used to assess the sustainability of products and services and the studies already carried out in this kind of systems are revised. Moreover, the studies focused on PSS definition and assessment are reviewed. A methodology scheme is developed to perform the PSS sustainability assessment and improvement using flows between systems approach. The systems that are part of a PSS and relations between them throughout its life cycle stages, are identified. LCSA methodology is used to obtain simultaneously environmental, economic and social impacts and specific aspects related with the systems combination are added. Sustainable design methods which having into account initial specifications and impact factors are applied to achieve a sustainability improvement.

This methodology is applied to two different study cases. First, the production process of cow's milk is studied. Second, a PSS focused on clothing retail is studied. In both cases, the systems that form part of PSS are recognised, its sustainability incidence is analysed and the highest impact factors are identified. Moreover, a range of strategies are raised to improve the sustainability of each PSS. The sustainability of planned systems is assessed and compared with initial systems. Finally, different weightings are applied to each dimension sustainability indicators to determinate if a sustainability global improvement has been achieved.



*“La sostenibilidad no puede ser como una especie de sacrificio moral o dilema político o una causa filantrópica. Tiene que ser un reto de diseño”*

Bjarke Ingels

**Índice**

<b>Capítulo 1. Introducción.....</b>	<b>18</b>
1.1. La sostenibilidad de un sistema y su evaluación .....	19
1.1.1. Concepto de sostenibilidad .....	19
1.1.2. Evaluación del impacto ambiental .....	21
1.1.3. Evaluación de la sostenibilidad.....	24
1.2. Eco-diseño y diseño sostenible .....	27
1.2.1. Eco-diseño .....	27
1.2.2. Diseño sostenible .....	31
1.2.3. Estudios previos.....	35
1.3. Sistemas Producto-Servicio .....	39
1.3.1. Sistemas Producto y Sistemas Servicio.....	39
1.3.2. Sistemas Producto-Servicio .....	42
<b>Capítulo 2. Métodos aplicados.....</b>	<b>49</b>
2.1. Ciclo de vida de sistemas .....	50
2.2. Flujos entre sistemas.....	51
2.3. Aplicación de LCSA a PSS.....	54
2.4. Indicadores de sostenibilidad .....	56
2.5. Metodología de evaluación y mejora de la sostenibilidad en PSS .....	59

---

<b>Capítulo 3. Casos de estudio. Evaluación de la sostenibilidad .....</b>	<b>62</b>
<b>CASO 1 - PRODUCCIÓN DE LECHE .....</b>	<b>63</b>
Caso 1 - 1. Objetivo y alcance.....	64
Caso1 - 2. Inventario.....	64
Caso 1 - 3. Evaluación de indicadores .....	67
Caso 1 - 4. Interpretación de resultados .....	68
Caso 1 - 5. Conclusiones del estudio .....	70
<b>CASO 2 – SERVICIO DE VENTA DE PRENDAS.....</b>	<b>71</b>
Caso 2 - 1. Objetivo y alcance.....	73
Caso 2 - 2. Inventario.....	73
Caso 2 - 3. Evaluación de indicadores .....	77
Caso 2 - 4. Interpretación de resultados .....	78
<b>Capítulo 4. Casos de estudio. Mejora de la sostenibilidad.....</b>	<b>81</b>
<b>CASO 1 - PRODUCCIÓN DE LECHE .....</b>	<b>82</b>
Caso 1 - 1. Especificaciones del sistema.....	82
Caso 1 - 2. Estrategias de mejora .....	83
Caso1 - 3. Evaluación de la sostenibilidad aplicando estrategias de mejora .....	84
3.1. Estrategia 1: cambio de alimentación .....	84
3.2. Estrategia 2: cambio en el régimen de vistas del veterinario.....	88
Caso1 - 4. Comparación de sistemas.....	89
4.1. Estrategias independientes .....	89
4.2. Estrategias combinadas.....	91
Caso 1 - 5. Conclusiones.....	93
<b>CASO 2 – SERVICIO DE VENTA DE PRENDAS.....</b>	<b>95</b>
Caso 2 - 1. Especificaciones del sistema.....	95
Caso 2 - 2. Estrategias de mejora .....	95
Caso 2 - 3. Evaluación de la sostenibilidad aplicando estrategias de mejora .....	96
3.1. Estrategia 1: cambio del tipo de pintura aplicada en la tienda .....	96
3.2. Estrategia 2: cambio en la provisión de prendas del servicio.....	98
Caso1 – 4. Comparación de sistemas.....	101
4.1. Estrategias independientes .....	101
4.2. Estrategias combinadas.....	102
Caso 2 - 5. Conclusiones.....	104



---

<b>Capítulo 5. Conclusiones</b> .....	106
5.1. Resumen de resultados.....	107
Caso 1 - Producción de leche.....	109
Caso 2 - Servicio de venta de prendas.....	110
5.2. Contribuciones de la tesis .....	111
5.3. Trabajo de investigación futuro .....	113
<b>Referencias</b> .....	114
<b>Anexos</b> .....	128
<b>Anexo 1</b> .....	129
<b>CASO 1 - PRODUCCIÓN DE LECHE</b> .....	130
Caso 1- 1. Cálculo de indicadores ambientales.....	130
Caso 1- 2. Alternativas de alimentación.....	131
<b>CASO 2 – SERVICIO DE VENTA DE PRENDAS</b> .....	132
Caso 2- 1. Etapa de creación. Datos de inventario.....	132
Caso 2- 2. Etapa de creación. Distribución de impacto de actividades.....	137
Caso 2- 3. Etapa de operación. Indicadores ambientales unitarios. Factores de emisión .	138
<b>Anexo 2</b> .....	141
1- Publicaciones asociadas al trabajo de investigación.....	142
2- Participación en Congresos Internacionales .....	142
3- Ponencias enviadas y aceptadas.....	143

## Lista de figuras

Figura 1.1. Datos de temperatura global relativos al periodo pre-industrial (EEA, 2020).....	19
Figura 1.2. Diferentes enfoques de la sostenibilidad. ....	21
Figura 1.3. Etapas de un LCA (ISO, 2006a).....	22
Figura 1.4 Sistema producto y etapas del ciclo de vida (ISO, 2006a). ....	23
Figura 1.5. LCSA - Esquema de aplicación (Finkbeiner et al., 2010). ....	25
Figura 1.6. Fases en un proyecto de diseño de Sistemas Eco-eficientes (Brezet et al.,2001). ....	29
Figura 1.7. Rueda de LiDS (Brezet and van Hemel, 1997). ....	30
Figura 1.8. Triángulo de Sistemas Sostenibles (Brezet et al., (2001).....	32
Figura 1.9. Etapas de la guía de diseño para la sostenibilidad D4S (Crul and Diehl, 2009). ....	33
Figura 1.10. Esq. metodológico para proyectar productos sostenibles (Lacasa, 2018). ....	35
Figura 1.11. Esq. triangular que representa la actividad de un servicio (Gadrey, 2002).....	41
Figura 1.12. Clasificación de PSS (Mont, 2002). ....	42
Figura 1.13. Elementos para describir PSS según sus características (Lay et al., 2009). ....	44
Figura 2.1. Fases del ciclo de vida de un producto (adaptada de ISO, 2006a). ....	50
Figura 2.2. Esquemas de ciclo de vida. ....	51
Figura 2.3. Flujo entre sistemas en un PSS.....	52
Figura 2.4. Flujos entre sistemas en un PSS. Ejemplos.....	53
Figura 2.5. Fases de desarrollo de la metodología LCSA. ....	55
Figura 2.6. Fases de desarrollo de la metodología LCSA aplicada a PSS.....	56

---

Figura 2.7. Fases de rediseño de producto. ....	60
Figura 2.8. Esq. metodológico para la evaluación y mejora de la sostenibilidad en PSS.....	61
Figura 3.1. Producción de leche. Sistemas y etapas del ciclo de vida objeto de estudio. ....	63
Figura 3.2. Producción de leche. Esquema de producción y resumen de inventario.....	65
Figura 3.3. Producción de leche. Distribución porcentual de factores de impacto.....	68
Figura 3.4. Producción de leche. Sensibilidad de indicadores de sostenibilidad. ....	69
Figura 3.5. Etapas del ciclo de vida de un producto de construcción (EN 15804:2012+A2:2019).....	71
Figura 3.6. Servicio de venta de prendas. Sistemas objeto de estudio y correlaciones entre etapas del ciclo de vida. ....	72
Figura 3.7. Servicio de venta de prendas. Resumen de inventario en la etapa de creación. ....	74
Figura 3.8. Servicio de venta de prendas. Datos de inventario en la fase de operación.....	75
Figura 3.9. Servicio de venta de prendas. Distrib. porcentual de factores de impacto.....	78
Figura 3.10. Servicio de venta de prendas. Sensibilidad de indicadores de sostenibilidad.....	79
Figura 4.1. Producción de leche. Esquema y resumen de inventario en el nuevo sistema productivo. ....	85
Figura 4.2. Producción de leche. Distrib.porcentual de los factores de impacto en PSS <sub>1</sub> . ....	87
Figura 4.3. Producción de leche – Comparación de indicadores.....	90
Se obtienen los siguientes resultados tras aplicar la estrategia 1:.....	90
Figura 4.4. Producción de leche – Comparación indicadores entre PSS <sub>0</sub> y PSS <sub>3</sub> . ....	92
Figura 4.6. Servicio de venta de prendas. Distrib. porcentual de factores de impacto.....	100
Figura 4.7. Servicio de venta de prendas – Comparación de indicadores.....	101
Figura 4.8. Servicio de venta de prendas - Variación de indicadores aplicando estrategias 1 y 2. ....	103
Figura A1.1. Servicio de venta de prendas. Puerta enrollable automática. ....	132
Figura A1.2. Servicio de venta de prendas. Trasdosado arriostrado autoportante. ....	133
Figura A1.3. Servicio de venta de prendas. Pintura al silicato.....	134
Figura A1.4. Servicio de venta de prendas. Falso techo continuo.....	135
Figura A1.5. Servicio de venta de prendas. Impacto causado por las actividades de construcción. ....	137
Figura A1.6. Servicio de venta de prendas. Indicadores ambientales unitarios (pantalones. ....	139
Figura A1.7. Servicio de venta de prendas. Indicadores ambientales unitarios (camiseta). ....	139
Figura A1.8. Servicio de venta de prendas. Indicador ambiental unitario de energía eléctrica.....	140

## Lista de tablas

Tabla 1.1. Herramientas de cálculo utilizadas en la realización de un LCA. ....	24
Tabla 1.2. Agentes sociales y subcategorías (UNEP/SETAC, 2009).....	26
Tabla 1.3. Fases de un proyecto de Eco-diseño (Brezet and van Hemel, 1997).....	28
Tabla 1.4. Herramientas de evaluación y mejora ambiental (Andriankaja et al., 2015). ....	31
Tabla 1.5. Tareas en un proceso de diseño integrado y sostenible (Gagnon et al., 2012). ....	34
Tabla 1.6. Estudios de sostenibilidad de producto enfocados en la dimensión ambiental.....	37
Tabla 1.7. Estudios de sostenibilidad de producto considerando diferentes dimensiones. ....	38
Tabla 1.8. Diferencias entre el diseño tradicional de productos y servicios (Brezet et al., 2001). ....	40
Tabla 1.9. Beneficios de los PSS. ....	43
Tabla 1.10. Estudios de sostenibilidad de sistemas servicio. ....	47
Tabla 2.1. Categorías de impacto ambiental en diferentes métodos. ....	57
Tabla 2.2. Indicadores seleccionados para evaluar la sostenibilidad de PSS. ....	58
Tabla 3.1. Producción de leche. Datos del proceso productivo inicial. ....	65
Tabla 3.2. Producción de leche. Coste de materia prima utilizada en alimentación.....	66
Tabla 3.3. Producción de leche. Indicadores de sostenibilidad.....	67
Tabla 3.4. Servicio de venta de prendas. Inventario de costes. ....	76
Tabla 3.5. Servicio de venta de prendas. Indicadores de sostenibilidad.....	77
Tabla 4.1. Alimentación de las vacas - Cantidad de nutrientes recomendados por vaca y día...82	
Tabla 4.2. Producción de leche. Alternativas de alimentación. ....	83
Tabla 4.3. Producción de leche. Alternativas en el tipo de visitas del veterinario. ....	84
Tabla 4.4. Producción de leche. Datos de materia prima en el nuevo proceso productivo.....	86

---

Tabla 4.5. Producción de leche. Indicadores de sostenibilidad en PSS <sub>1</sub> .....	87
Tabla 4.6. Producción de leche. Indicadores de sostenibilidad aplicando estrategia 2. ....	89
Tabla 4.7. Producción de leche. Indicadores de sostenibilidad aplicando estrategias 1 y 2. ....	91
Tabla 4.8. Producción de leche. Mejora de la sostenibilidad según coef. de ponderación de indicadores.....	93
Tabla 4.9. Servicio de venta de prendas. Alternativas de revestimiento. ....	96
Tabla 4.10. Servicio de venta de prendas. Alternativas de la provisión de prendas. ....	96
Tabla 4.11. Servicio de venta de prendas. Indicadores de sostenibilidad aplicando la estrategia 1. ....	98
Tabla 4.12. Servicio de venta de prendas. Indicadores de sostenibilidad aplicando estrategia 2. ....	99
Tabla 4.13. Servicio de venta de prendas. Indicadores de sostenibilidad aplicando estrategias 1 y 2.....	103
Tabla 4.14. Servicio de venta de prendas. Mejora de la sostenibilidad según coef. de ponderación de indicadores.....	104
Tabla A1.1. Producción de leche. Indicadores ambientales unitarios.....	130
Tabla A1.2. Producción de leche. Indicadores ambientales del sistema inicial.....	130
Tabla A1.3. Producción de leche. Composición de diferentes mezclas para alimentación.....	131
Tabla A1.4. Servicio de venta de prendas. Indicadores de la etapa de creación. ....	136

## Capítulo 1

# Introducción

---

En este capítulo se revisan los conocimientos relacionados con la evaluación y mejora de la sostenibilidad. **Sachs (2015)** indica que la sostenibilidad es el desafío de nuestro tiempo. Tratar de lograr la armonía simultánea entre los subsistemas ecológico, económico y social es un reto complejo y multidimensional. No obstante, una estrategia holística puede ayudar a alcanzar la combinación de una prosperidad económica, una inclusión social y una protección medioambiental.

En las últimas décadas se ha producido un cambio de una economía de producto a una economía de servicio y los sistemas formados por la combinación de productos y servicios son ahora el foco de atención de las actividades económicas y modelos de negocios, ya que además de satisfacer las necesidades de los consumidores tienen un gran potencial para proporcionar soluciones sostenibles. Diseñar Sistemas Producto- Servicio sostenibles es un reto que requiere la aplicación de métodos apropiados que integren todos los elementos, etapas y factores que intervienen en el análisis de este tipo de sistemas y en el estudio de su sostenibilidad.

## 1.1. La sostenibilidad de un sistema y su evaluación

### 1.1.1. Concepto de sostenibilidad

El efecto de la actividad humana sobre el medio ambiente ha sido objeto de innumerables estudios desde mediados del siglo XX. En 1972, siguiendo los postulados de Malthus, la publicación del libro *The limits to growth* (Meadows et al., 1972) generó un gran impacto sobre la opinión pública e impulsó el movimiento ecologista. Alertaba sobre las consecuencias, en forma de contaminación y agotamiento de recursos naturales, que un proceso continuo de crecimiento económico y demográfico tenía sobre nuestro planeta. Ese mismo año se celebraba la primera Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Humano (Estocolmo, 1972) donde se decide realizar un seguimiento continuado del estado medioambiental y analizar el impacto que genera el desarrollo humano.

Los investigadores del clima cuentan con registros de diferentes parámetros climáticos, en particular, de la temperatura, que han sido recopilados desde el periodo pre-industrial. La Figura 1.1 muestra los datos publicados por la Agencia Europea de Medioambiente (EEA) en 2020, procedentes de cuatro fuentes independientes. Se observa claramente el incremento de la temperatura a nivel global sobre la superficie de la Tierra. Desde el periodo pre-industrial hasta la actualidad, el aumento detectado en la temperatura es de 1.2°C. Este incremento va asociado al aumento de la concentración de CO<sub>2</sub> y de otros gases de efecto invernadero, que son considerados responsables de este proceso de calentamiento global.

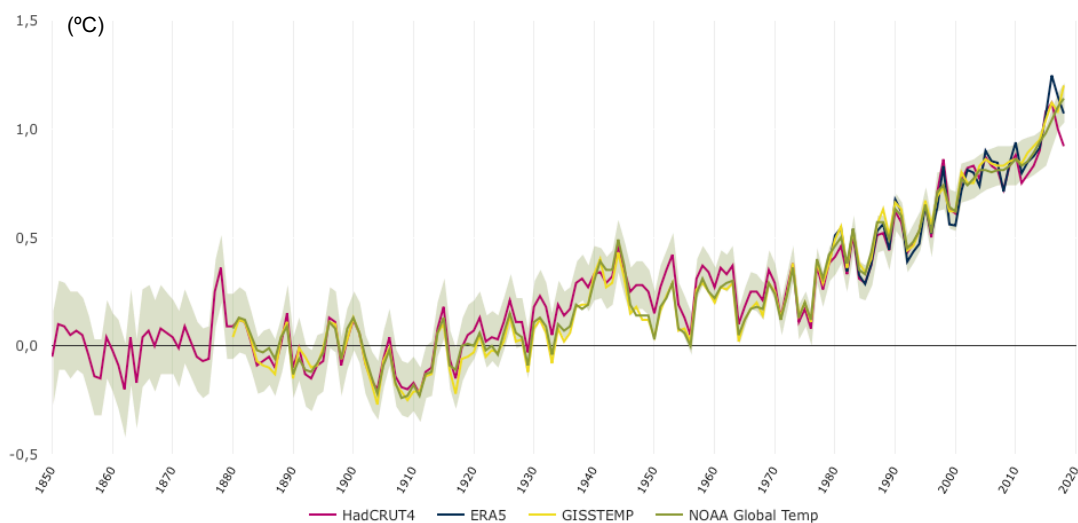


Figura 1.1. Datos de temperatura global relativos al periodo pre-industrial (EEA, 2020).

El término 'desarrollo sostenible', impulsado por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP), aparece por primera vez en los foros internacionales en 1980, aunque no llega a consolidarse hasta la publicación del informe *Our Common Future* (**WCED, 1987**), en el que se define como:

“Aquél que satisface las necesidades actuales de las generaciones presentes sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades”.

En 1992 se celebra la Cumbre de la Tierra de Rio de Janeiro donde, a nivel global, se asientan las bases del desarrollo sostenible y se elabora la Agenda 21, un programa de acción para hacer frente al cambio climático, proteger la biodiversidad y eliminar sustancias tóxicas emitidas (**UNCED, 1992**). En el año 2000, en la Cumbre de las Naciones Unidas en Nueva York, se acuerda la firma de los Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM), un conjunto de objetivos que pretenden el 'desarrollo sostenible' de nuestra sociedad.

Diferentes autores han analizado este concepto y sus implicaciones. **Dalal-Clayton and Bass, (2002)** consideran que 'desarrollo sostenible' es lograr un desarrollo económico y social sin degradar el ambiente a niveles irreversibles y protegiendo los derechos y oportunidades de las generaciones venideras. Para **Leff (2010)**, la sostenibilidad es el límite que reorienta el proceso civilizatorio de la humanidad. Según **Bermejo et al. (2010)**, desarrollo sostenible es el que proporciona el crecimiento necesario para alcanzar la satisfacción de las necesidades humanas esenciales y, considera imprescindible mejorar la organización social y garantizar una distribución más equitativa.

La definición del término 'desarrollo sostenible' supone considerar una triple dimensión: social, económica y ambiental. Es el modelo llamado “Triple Bottom Line” (TBL) (**Maxwell et al., 2003**). La dimensión ambiental se refiere a la gestión de los recursos del planeta, la dimensión económica al control y distribución de los rendimientos derivados de las actividades industriales y económicas y la dimensión social, al bienestar de los seres vivos. Teniendo en cuenta los tres pilares en los que se sustenta, **Hilty and Aebischer, (2014)** plantean dos posibles enfoques. Un primer enfoque se basa en el equilibrio entre dimensiones, que son independientes pero conectadas y contienen zonas que se superponen (Figura 1.2a). El segundo enfoque describe el desarrollo sostenible como un conjunto de sistemas anidados (Figura 1.2b), en el que la actividad económica se integra en la sociedad y ésta, a su vez, forma parte del sistema medioambiental.



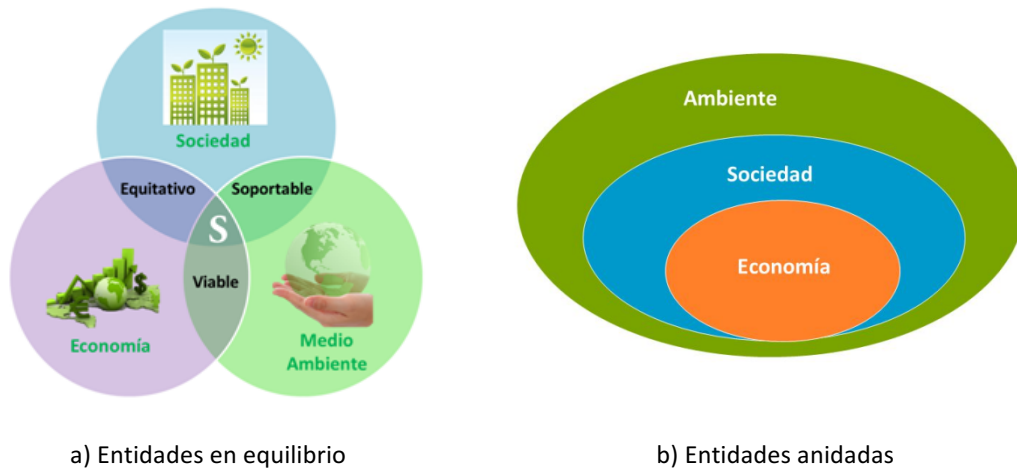


Figura 1.2. Diferentes enfoques de la sostenibilidad.

En 2015, en el marco de la 70 edición de la Asamblea General de Naciones Unidas, los ODM fueron reemplazados por la nueva Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, un documento marco que contiene 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) para la transformación del mundo (**A/69/L.85\_2015**). En 2019 se celebra por primera vez la llamada Cumbre ODS de las Naciones Unidas, donde se solicita la aceleración del compromiso por los estados miembros para implementar la Agenda 2030 y alcanzar sus objetivos.

### 1.1.2. Evaluación del impacto ambiental

Aplicar criterios ambientales en el desarrollo de actividades implica evaluar los impactos que generan estas actividades y plantear estrategias para minimizarlos. La mayoría de los estudios de evaluación de impacto ambiental utilizan la metodología basada en el ciclo de vida. Según **Zamagni et al., (2013)** el enfoque de ciclo de vida es un inestimable apoyo para la integración de la sostenibilidad en diseño, innovación y evaluación de productos y servicios. Aplicar este tipo de enfoque supone tener en cuenta todas las fases que intervienen en el desarrollo de un sistema, desde su concepción hasta el final de vida.

Los primeros estudios basados en el ciclo de vida aparecen en 1969 y son realizados por el Midwest Research Institute de EEUU. Pero la primera definición oficial de Evaluación del Ciclo de Vida ("Life Cycle Assessment", LCA) no se establece hasta 1993 cuando the Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC) formula el primer código internacional de homogeneización y define LCA de la siguiente forma:

“Un proceso objetivo para evaluar cargas ambientales asociadas a un producto, proceso o actividad identificando y cuantificando el uso de materia y energía y los vertidos al entorno, para determinar su impacto en el medioambiente y evaluar y poner en práctica estrategias de mejora medioambiental”.

La Organización Internacional para la Estandarización (ISO) define los procedimientos y desarrolla la metodología para aplicar LCA, **(ISO-14040, 2006a, 2006b)**. Un LCA se compone de cuatro fases principales (Figura 1.3): i) Definición de alcance y objetivos; ii) Análisis de inventario; iii) Evaluación de impactos; iv) Interpretación de resultados. Entre etapas, se establecen diferentes flujos de información.

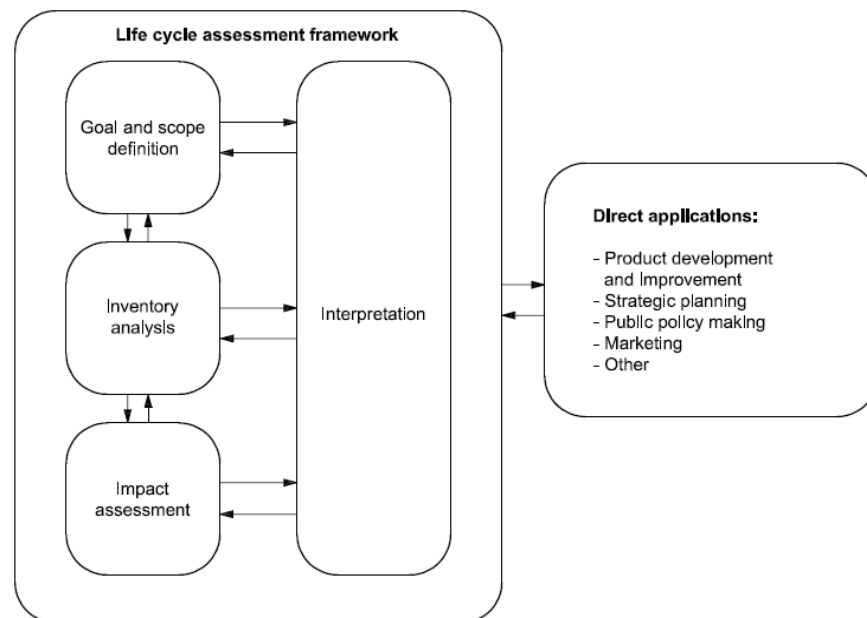


Figura 1.3. Etapas de un LCA **(ISO, 2006a)**.

El ciclo de vida de un sistema producto está constituido por un conjunto de fases. **ISO (2006a)** define el ciclo de vida como una secuencia de etapas interconectadas que comienzan con la extracción de materia prima o creación del producto a partir de recursos naturales y terminan con actividades de disposición final como el reciclado o la gestión de residuos (Figura 1.4). De esta forma, realizar un LCA conlleva un proceso exhaustivo de recogida y organización de datos que estarán asociados a flujos elementales de entrada y salida del sistema y a flujos intermedios (productos, materiales o energía) que intervienen entre procesos unitarios. Además, otros sistemas fuera de los límites de estudio, pueden generar un flujo de productos de entrada o salida.

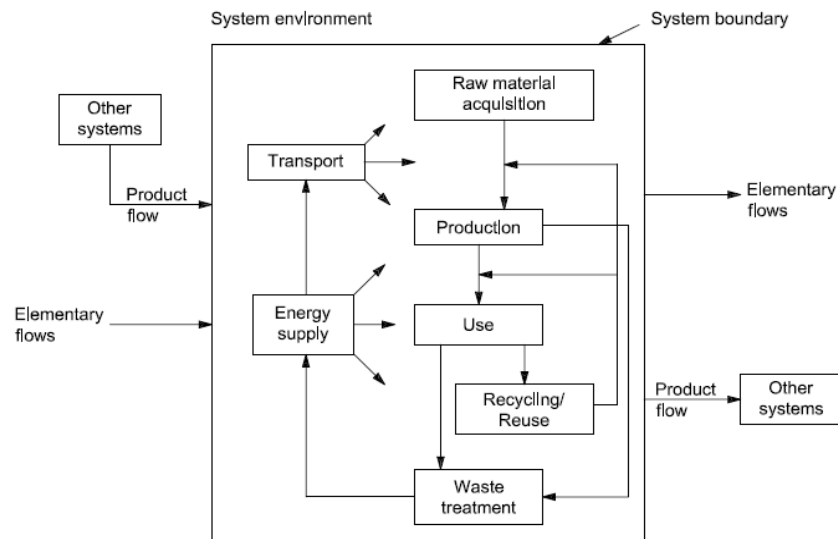


Figura 1.4 Sistema producto y etapas del ciclo de vida (ISO, 2006a).

Los efectos de un sistema sobre el medioambiente se expresan a través de un conjunto de categorías de impacto y unos parámetros, denominados eco-indicadores, que cuantifican ese impacto. Además, se pueden diferenciar dos métodos de evaluación:

- i) 'Midpoint', que utiliza un indicador diferente para cada una de las categorías de impacto (Guinée et al., 2001).
- ii) 'Endpoint', que agrupa diferentes categorías de impacto en un único indicador, como el EI-99 (Goedkoop and Spruiensma, 2000). La agrupación de diferentes categorías de impacto requiere aplicar factores de ponderación que valoren la importancia relativa de cada categoría.

Una de las categorías de impacto evaluada en todos los estudios es el potencial de calentamiento global o cambio climático (Global Warming Potential, GWP). Se refiere a la alteración de la temperatura global del planeta causada por los gases de efecto invernadero (CO<sub>2</sub> y otros gases como CH<sub>4</sub>, NO<sub>2</sub> y HFCs). Puesto que intervienen diferentes tipos de gases, es necesario aplicar factores de conversión que transformen las emisiones en un sólo indicador (Zabalza, 2010). La evaluación de impactos ambientales se realiza habitualmente utilizando herramientas específicas de cálculo, capaces de administrar convenientemente los datos de entrada proporcionados por el usuario al realizar el inventario y de presentar los resultados finales de impacto ambiental a través de un conjunto de indicadores. Para ello, se apoyan en bases de datos (Ecoinvent, Agri-footprint,...) que incluyen indicadores unitarios de amplia variedad de materiales y recursos. Algunas de las herramientas más utilizadas se muestran en la Tabla 1.1.

Software	Base de datos	MEI	Características	Sector/ Usuario
BEES	United States LCI database	TRACI - Multiattribute decision analysis	Combina análisis ambiental y económico	Construcción/ Amateur
EcoPack	Boustead model y otras (BUWAL)	Se ajusta a SETAC Método Eco-Points	Indica % de reciclaje; entrada de datos limitada	Embalaje/ Amateur
eVerdEE	Propia (Italian N. Agency)	Categorías de impacto independientes	Herramienta online	Producto/ Amateur
GaBi	Integrada Módulos temáticos Otras (Ecoinvent)	Múltiples métodos: ILCD Midpoint - CML ReCiPe - IPCC - Traci	Procesos complejos asociando costes y aspectos sociales	Producto/ Experto
KCL- ECO	KCL Ecodata Datos de industria papelera	Dos tipos de indicadores: DAIA (Finnish Env. Institute) Eco-indicator	Flexibilidad Análisis de sensibilidad y de incertidumbre	Industria/ Amateur
EuPeco-LIMaS	Propia - Ámbito europeo	MEEuP (Energy-using Products)	Herramienta online y gratuita	Productos eléctricos/ Amateur
Open LCA	Importada (ELCD, Ecoinvent, GaBi,..)	CML - EI99 - ILCD - ReCiPe - Traci	Código abierto Software libre	Varios/ Amateur
SimaPro	Ecoinvent - USLCI IDEMAT (materiales) Agri-footprint	Múltiples métodos: ILCD Midpoint - CML IA - EDIP - ReCiPe - EI99	Datos documentados Análisis de diferentes dimensiones	Producto- servicio/ Experto
Umberto	Base externa: Ecoinvent - GaBi	ReCiPe Impact 2002 - EI99	Integra un amplio análisis de costes. Conexión con sistemas ERP	Producto- Proceso/ Amateur

Tabla 1.1. Herramientas de cálculo utilizadas en la realización de un LCA.

Trabajos como los de **Lehtinen et al., (2011)** y **Boër et al., (2013)** analizan y comparan las características más relevantes de este tipo de herramientas. Cada software de cálculo aplica una metodología de evaluación de impactos (MEI), trabaja con una o varias bases de datos y presenta una serie de características y un ámbito de aplicación que deben ser revisados a la hora de hacer su selección.

### 1.1.3. Evaluación de la sostenibilidad

La evaluación de impactos ambientales solo tiene en cuenta una de las tres dimensiones de la sostenibilidad. De acuerdo con un enfoque basado en tres dimensiones (**WCED, 1987; UNCED, 1992**), la evaluación de la sostenibilidad ha de abordar también aspectos económicos y sociales. Varios trabajos de investigación afrontan este reto (**Kloepffer, 2007; Finkbeiner et al., 2010**) y, utilizando un enfoque de ciclo de vida, desarrollan un marco de trabajo para evaluar de manera simultánea cada uno de estos ámbitos. El resultado de estos trabajos es el planteamiento de la metodología LCSA (Life Cycle Sustainability Assessment) que combina tres técnicas de evaluación: E-LCA (Environmental Life Cycle Assessment), que se centra en los aspectos medioambientales, LCC (Life Cycle Costing) que evalúa los aspectos económicos y S-LCA (Social Life Cycle Assessment) que analiza el impacto sobre organizaciones y agentes sociales.

Este planteamiento, basado en la determinación simultánea de impactos ambientales, económicos y sociales (Figura 1.5) es expresado como:  $LCSA = LCA + LCC + S-LCA$ .

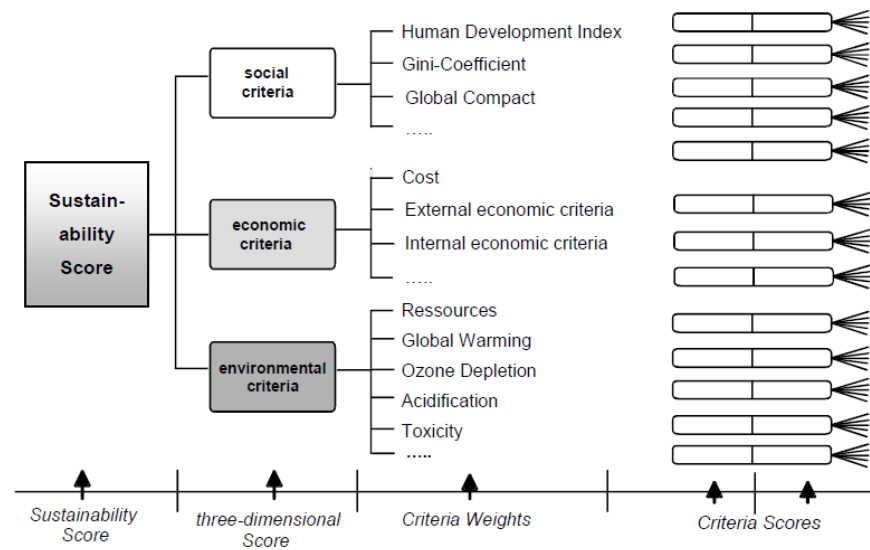


Figura 1.5. LCSA - Esquema de aplicación (Finkbeiner et al., 2010).

De acuerdo con la estructura ya establecida en la realización de un LCA, el desarrollo de un LCSA se compone también de cuatro fases principales (Valdivia et al., 2013): i) Definición de alcance y objetivos; ii) Análisis de inventario; iii) Evaluación de impactos; iv) Interpretación de resultados. Los objetivos del estudio, los límites del sistema y la unidad funcional deberían ser definidos de manera común a las tres técnicas de evaluación.

Si en la evaluación de impactos ambientales se establecen diferentes categorías de impacto y se utilizan indicadores que permiten su valoración cuantitativa, para evaluar aspectos socio-económicos se recomienda la utilización de las categorías de agentes sociales y sub-categorías de impacto (Tabla 1.2) propuestas por UNEP/SETAC, (2011). Se establecen cinco categorías de agentes sociales: trabajadores, comunidad local, consumidores, sociedad (nacional y global) y actores de la cadena de valor. Esta última categoría pretende capturar el impacto de las relaciones entre productores y proveedores. Se considera que una clasificación de impactos basada en agentes sociales proporciona una base más sólida para desarrollar un S-LCA y es más fácil de consensuar. No obstante, otras clasificaciones basadas en las directrices del Global Reporting Initiative (GRI) pueden ser encontradas en la literatura científica (Benoît-Norris et al., 2011). Consideran grandes temas sociales tales como los derechos humanos, las condiciones de trabajo o la salud y seguridad, para establecer categorías de impacto, por lo que aportan información complementaria.

Stakeholders	Subcategories
Workers	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Freedom of association and collective bargaining</li> <li>■ Child labour</li> <li>■ Forced labour</li> <li>■ Fair salary</li> <li>■ Working time</li> <li>■ Discrimination</li> <li>■ Health and safety</li> <li>■ Social benefits/social security</li> </ul>
Local community	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Access to material resources</li> <li>■ Access to immaterial resources</li> <li>■ Delocalisation and migration</li> <li>■ Cultural heritage</li> <li>■ Respect of indigenous rights</li> <li>■ Safe and healthy living conditions</li> <li>■ Secure living conditions</li> <li>■ Local employment</li> <li>■ Community engagement</li> </ul>
Society	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Public commitments to sustainable issues</li> <li>■ Contribution to economic development</li> <li>■ Prevention and mitigation of conflicts</li> <li>■ Technology development</li> <li>■ Corruption</li> </ul>
Value chain actors	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Fair competition</li> <li>■ Promoting social responsibility</li> <li>■ Supplier relationships</li> <li>■ Respect of intellectual property rights</li> </ul>
Consumers	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Health and safety</li> <li>■ Feedback mechanism</li> <li>■ Transparency</li> <li>■ End of life responsibility</li> </ul>

Tabla 1.2. Agentes sociales y subcategorías (UNEP/SETAC, 2009).

Un punto crítico en la realización de un LCSA es la selección de indicadores. **Kloepffer, (2008)** destaca la dificultad que puede entrañar su cuantificación, particularmente en S-LCA, donde muchos aspectos sociales son difíciles de medir. Los indicadores se pueden clasificar en cuantitativos, semi-cualitativos y cualitativos. En general, LCA y LCC utilizan indicadores cuantitativos. Sin embargo, S-LCA maneja gran cantidad de datos de tipo semi-cuantitativo y cualitativo. La incertidumbre de datos cuantitativos puede ser valorada con métodos estadísticos y la de los datos cualitativos con un análisis de sensibilidad.

A la hora de presentar e interpretar los resultados de sostenibilidad, **Valdivia et al., (2013)** recomiendan hacer una presentación por separado de los indicadores utilizados en cada técnica en lugar de realizar la agregación o combinación de indicadores. Por el contrario, otros autores consideran que utilizar un solo indicador que agrupe resultados de diferentes dimensiones facilita la interpretación y comparación de resultados y lo aplican en sus estudios (**Ediger et al., 2007; Zhang et al., 2009**). En este último caso, los criterios aplicados para realizar la ponderación

de indicadores influyen de forma decisiva en el resultado final. **Gan et al., (2017)** consideran tres métodos de ponderación: proporcionada, basado en la estadística y basado en la opinión de expertos. Si se utiliza un índice de sostenibilidad compuesto, éste debería proporcionar resultados transparentes que no incrementen la incertidumbre.

Con el fin de tratar los criterios cualitativos de la dimensión social y a la vez, tener en cuenta el carácter multidimensional de un LCSA, **Ren et al., (2015)** desarrollan una metodología de evaluación de la sostenibilidad basada en el análisis de jerarquías (Analytic Hierarchy Process, AHP) y la toma de decisiones multi-criterio (Multicriteria Decision-Making, MCDM). Además, distinguen dos tipos de indicadores: simples y múltiples. Los indicadores múltiples utilizan criterios multidimensionales. Esta metodología permite encontrar el escenario más sostenible entre varias alternativas.

## 1.2. Eco-diseño y diseño sostenible

### 1.2.1. Eco-diseño

El Eco-diseño es la metodología que aplica de manera conjunta criterios medioambientales y criterios convencionales al diseño de productos. Los trabajos de **Keoleian and Menerey, (1993)** y **Brezet and van Hemel, (1997)** plantean los fundamentos del Eco-diseño y han sido la referencia para la elaboración de manuales que tienen como objetivo lograr diseños mejorados desde el punto de vista ambiental.

El Eco-diseño o diseño para el medio ambiente tiene en cuenta los impactos potenciales del producto a lo largo de todo su ciclo de vida, desde la obtención de materias primas hasta su tratamiento final. Por tanto, las herramientas que se emplean en su implementación se basan en un enfoque de ciclo de vida. **Brezet and van Hemel (1997)** en su publicación "*Ecodesign: a promising approach to sustainable production and consumption*" proponen organizar el desarrollo de un proyecto de eco-diseño en siete etapas. En cada una de ellas se realizan diversas actividades, tal y como se detalla en la Tabla 1.3. Otra forma de organizar el proceso de Eco-diseño es propuesta por **Wenzel et al., (1997)**. Se basa en cuatro etapas: concreción, especificación, síntesis y verificación, y es también la estructura que se sugiere desde la SETAC.

En cualquier caso, con el objetivo de definir prioridades en una acción efectiva, el enfoque de ciclo de vida es prioritario como forma de determinar impactos globales y establecer interdependencias entre las diferentes fases (**Fiksel et al., 1998**).

Etapas		Actividades
1	Organización del proyecto de eco-diseño	1.1. Conseguir la aprobación de Dirección 1.2. Establecer un equipo de proyecto 1.3. Trazar planes y preparar un presupuesto
2	Selección del producto	2.1. Establecer los criterios de selección 2.2. Decidir el producto de referencia 2.3. Definir el informe de diseño
3	Establecimiento de la estrategia de eco-diseño	3.1. Analizar el perfil medioambiental del producto 3.2. Analizar los puntos a favor internos y externos 3.3. Generar opciones de mejora 3.4. Estudiar su viabilidad 3.5. Definir la estrategia de eco-diseño
4	Generación y selección de ideas	4.1. Generar ideas de producto 4.2. Organizar un taller en eco-diseño 4.3. Seleccionar las ideas más prometedoras
5	Detalle del concepto	5.1. Desarrollar las estrategias de eco-diseño 5.2. Estudiar la viabilidad de los conceptos 5.3. Seleccionar el más prometedor
6	Comunicación y lanzamiento del producto	6.1. Promover internamente el nuevo diseño 6.2. Desarrollar un plan de promoción 6.3. Preparar la producción
7	Establecimiento de actividades de seguimiento	7.1. Evaluar el producto resultante 7.2. Evaluar los resultados del proyecto 7.3. Desarrollar un programa de eco-diseño

Tabla 1.3. Fases de un proyecto de Eco-diseño (Brezet and van Hemel, 1997).

El diseño de servicios eco-eficientes también ha sido abordado. **Brezet et al., (2001)** proponen una metodología que busca el mínimo impacto medioambiental, uso de recursos y de espacio, mientras se crea el máximo valor añadido para los diferentes agentes sociales implicados. Consta de un marco de trabajo para estructurar y comunicar las diferentes actividades, reglas y herramientas necesarias para conseguir exitosamente un servicio eco-eficiente. Se pueden distinguir 6 fases (Figura 1.6):

- 1) Exploración. Se obtiene la idea;
- 2) Elaboración de políticas de diseño. Se definen los objetivos y las estrategias que se deberán realizar en las siguientes fases;



- 3) Búsqueda de ideas. Se lleva a cabo la ampliación de las ideas de servicio eco-eficiente pensando en las demandas del consumidor;
- 4) Desarrollo completo del diseño;
- 5) Realización. Se generan los componentes del producto y se realizan todos los preparativos para ejecutar la parte del servicio y, por último,
- 6) Evaluación. Garantiza un proceso de mejora continua.

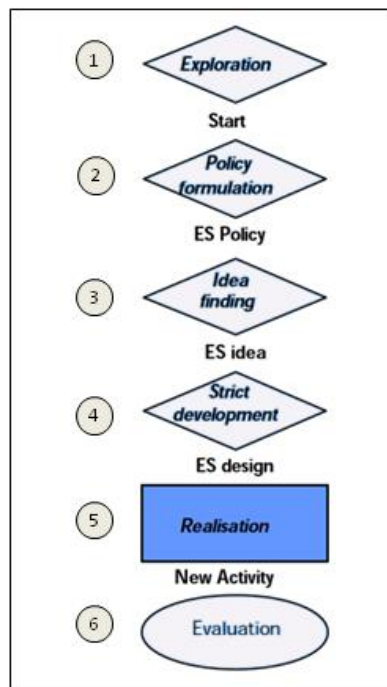


Figura 1.6. Fases en un proyecto de diseño de Sistemas Eco-eficientes (Brezet et al.,2001).

El Eco-diseño hace uso de tres tipos principales de herramientas:

1) *Herramientas de evaluación ambiental*

Tienen como objetivo evaluar impactos ambientales. Permiten comparar los impactos de diferentes etapas del ciclo de vida de un producto, comparar impactos de diferentes productos y comparar diseños previos con nuevos diseños de producto. Estas herramientas pueden ser de tipo cualitativo o semi-cuantitativo, más fáciles y rápidas de usar, aunque no muy fiables, o de tipo cuantitativo, que aportan un detallado perfil medioambiental de un producto. Entre las herramientas de tipo semi-cuantitativo se puede destacar la matriz MET (Materials, Energy and Toxic emissions) que organiza la información de un producto y establece prioridades de actuación (IHOBE, 2000). Localiza las etapas donde se concentran aspectos ambientales críticos e indica la severidad de los efectos de forma cualitativa (bajo, medio, alto). Las herramientas de tipo cuantitativo más completas consisten en aplicaciones que realizan exhaustivas evaluaciones del ciclo de vida de un producto.

## 2) Herramientas de mejora ambiental

Son herramientas que tienen como objetivo plantear soluciones para reducir el impacto ambiental. Consisten básicamente en una serie de principios y reglas que identifican acciones potenciales de mejora. Entre estas herramientas se pueden destacar la rueda de LiDS (Life Cycle Design Strategies wheel), que proponen **Brezet and Van Hemel (1997)**. Se compone de 8 estrategias principales y 33 principios de eco-diseño que se pueden poner en práctica a lo largo de las diferentes etapas del ciclo de vida del producto (Figura 1.7). A través de esta herramienta se puede comparar el perfil ambiental de un producto existente con el obtenido tras haberle aplicado alguna de las estrategias de mejora. Por otra parte, **Luttropp and Lagerstedt, (2006)** desarrollan "The Ten Golden Rules" como apoyo a la enseñanza del eco-diseño. Estas reglas se basan en considerar tres etapas principales en la vida del producto: la de uso, la de antes del uso y la de después del uso.

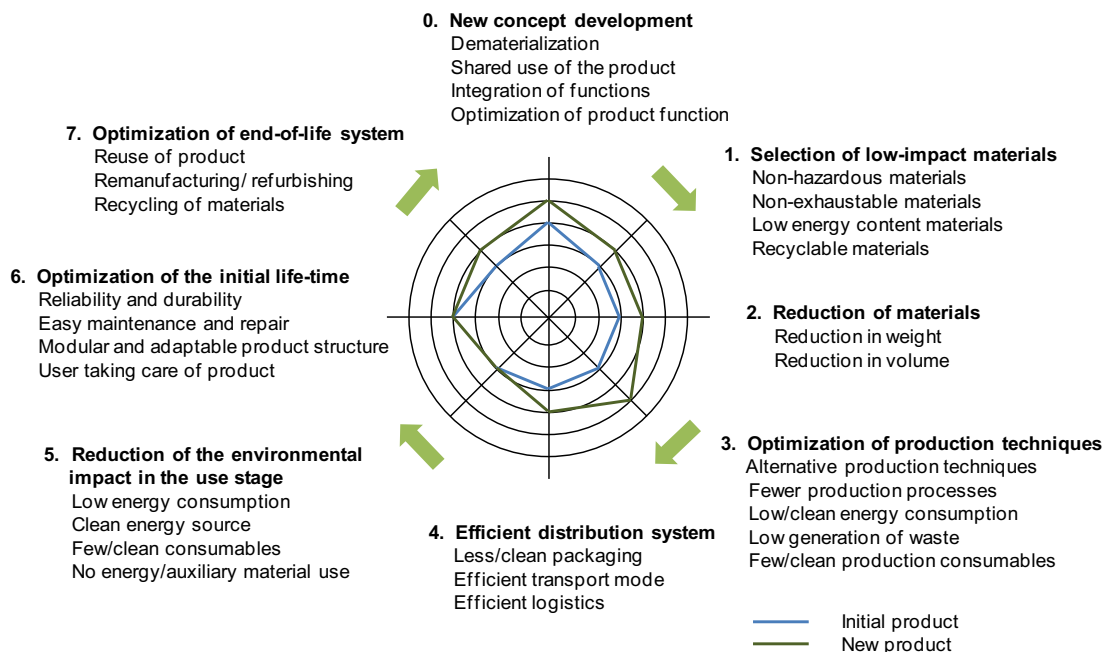


Figura 1.7. Rueda de LiDS (Brezet and van Hemel, 1997).

## 3) Herramientas que integran requerimientos

Este tipo de herramientas son utilizadas para facilitar que todos los requerimientos, tanto los convencionales como los medioambientales se puedan integrar en el proceso de diseño. **Kuo (2003)** combina QFD (Quality Function Deployment) y diseño para el ciclo de vida del producto para desarrollar la herramienta G-QFD (Green Quality Function Deployment). **Lagerstedt et al., (2003)** proponen la matriz eco-funcional como herramienta para que el diseñador visualice las relaciones entre criterios funcionales y criterios medioambientales.

Otro trabajo importante es el realizado por **Bovea and Pérez-Belis (2012)**, en el que hacen una extensa revisión y recopilación de herramientas que evalúan e integran requerimientos en el proceso de diseño, teniendo en cuenta un enfoque de ciclo de vida.

Según **Andriankaja et al., (2015)** las herramientas de evaluación y mejora ambiental se pueden clasificar en diferentes grupos (Tabla 1.4). En el caso de las herramientas de evaluación, el grado de profundidad y de cuantificación en la evaluación de impactos ambientales se va reduciendo progresivamente desde el primer grupo (LCA completo) hasta el último (listas de verificación). En el caso de las herramientas de mejora, los dos primeros grupos incluyen herramientas que plantean esencialmente principios de eco-diseño, en el tercer grupo, relacionan características del producto e impactos y en el último grupo se incluyen herramientas de ayuda a la toma de decisiones.

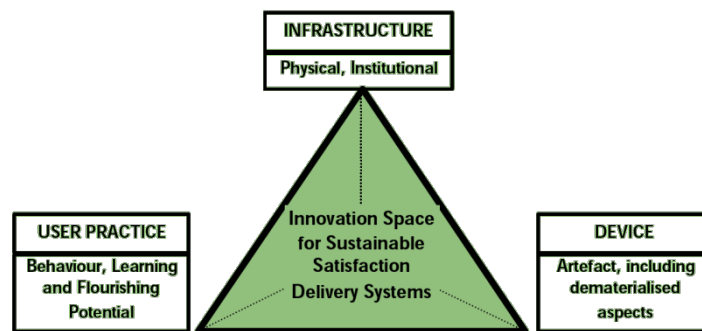
Herramientas de evaluación ambiental	
LCA completo	Soluciones de software que evalúan el ciclo de vida
Herramientas basadas en LCA	Aplicaciones que simplifican el desarrollo de un LCA y la presentación de los resultados
Herramientas basadas en matriz	Identifican los aspectos ambientales más relevantes en cada etapa del ciclo de vida del producto
Listas de verificación	Listado de preguntas relacionadas con las características funcionales del ciclo de un producto
Herramientas de mejora ambiental	
Directrices	Recopilan, clasifican y priorizan reglas generales de eco-diseño
Reglas de Eco-diseño	Agrupan principios de eco-diseño y reglas básicas para mejorar un proyecto de diseño de producto
Herramientas paramétricas	Correlaciones matemáticas entre parámetros del producto e impactos asociados
Herramientas para la decisión	Herramientas convencionales de ayuda a la toma de decisiones aplicadas a la mejora ambiental

Tabla 1.4. Herramientas de evaluación y mejora ambiental (Andriankaja et al., 2015).

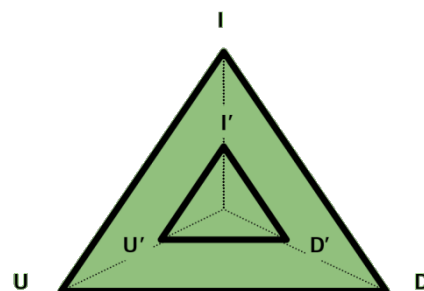
### 1.2.2. Diseño sostenible

Las metodologías de diseño que tienen en cuenta las tres dimensiones de la sostenibilidad son, en gran parte, metodologías de Eco-diseño evolucionadas, principalmente orientadas a diseño de producto, con una planificación de actividades y utilización de herramientas de evaluación-mejora, que se apoya en los desarrollos ya realizados en diseño para el medio ambiente. Los métodos de evaluación incorporan técnicas para determinar simultáneamente impactos ambientales, económicos y sociales.

Considerando que productos y servicios son las vías por las que los consumidores buscan satisfacer sus necesidades, **Brezet et al., (2001)** proponen utilizar un marco de trabajo denominado Sustainable Systems Triangle (SST) para diseñar sistemas sostenibles de prestación de satisfacción (Figura 1.8). Este marco sugiere a los diseñadores utilizar un enfoque holístico basado en el potencial innovador de tres factores situados en los vértices de un triángulo: 1) el objeto al que es aplicado; 2) la estructura institucional en el que el objeto es utilizado; 3) el potencial de las nuevas prácticas del usuario y el aprendizaje del usuario (Figura 1.8a). Una vez aplicado este esquema en el sistema objeto, se puede obtener una actualización del esquema SST (Figura 1.8b) donde se observa la mejora en la sostenibilidad de los factores actuales ( $D'$ ,  $I'$  y  $U'$ ) comparados con los originales ( $D$ ,  $I$  y  $U$ ).



a) Sustainable Systems Triangle - Factores



b) Sustainable Systems Triangle - Actualización de factores

Figura 1.8. Triángulo de Sistemas Sostenibles (Brezet et al., (2001).

Basada en una estructura muy definida de tareas y actividades, **Crul and Diehl, (2009)**, proponen la guía de diseño para la sostenibilidad (Design For Sustainability, D4S). Esta guía tiene como objetivo integrar la sostenibilidad en el proceso de diseño y para ello se apoya en cuatro actividades principales: planteamiento de objetivos, generación de ideas, desarrollo y realización (Figura 1.9).

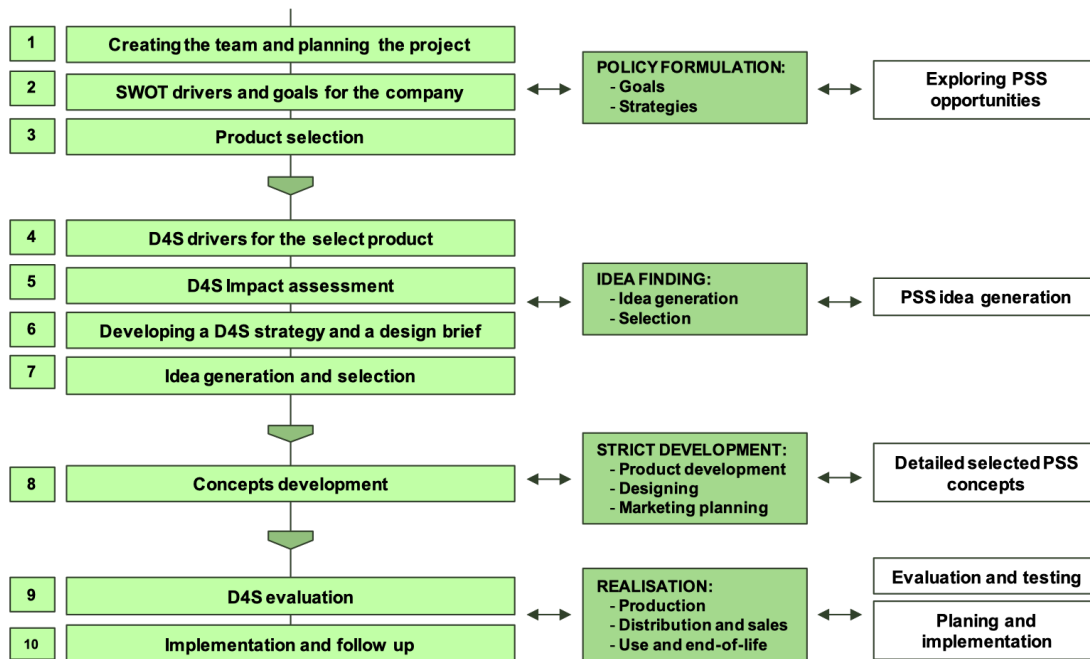


Figura 1.9. Etapas de la guía de diseño para la sostenibilidad D4S (Crul and Diehl, 2009).

**Gagnon et al. (2012)** definen un marco de trabajo conceptual para abordar el proyecto de diseño de una forma integral y recogen diferentes propuestas para transformar un proceso de diseño convencional (Conventional Design Process, CDP) en un proceso de diseño sostenible (Sustainable Design Process, SDP). Se hace énfasis en el hecho de que un diseño sostenible implica evaluar las diferentes dimensiones de la sostenibilidad (ambiental, económica y social) en potenciales soluciones.

Proponen un enfoque práctico y próximo al de la ingeniería, en el que se deberían usar un conjunto de herramientas específicas. En particular, consideran dos grupos de herramientas: las que tienen por objetivo el estudio de impactos en cada dimensión de la sostenibilidad y las que se centran en la síntesis e interpretación de los resultados. En este segundo grupo se incluyen herramientas que permiten tratar eficazmente la información de los diferentes indicadores y las especificaciones técnicas propias del diseño, para facilitar los procesos de toma de decisión. Tomando como referencia la secuencia de tareas que se ha de realizar en un proceso de diseño sostenible, estos autores proponen añadir una serie de tareas complementarias para desarrollar un proceso de diseño integrado y sostenible (ISED). En la Tabla 1.5 se enumeran estas tareas y se indican las tareas añadidas con un asterisco.

Planificación y definición del problema
(1) Formar un equipo de diseño multidisciplinar (2) Definir principios de sostenibilidad (3) *Definir un marco de trabajo conceptual de sostenibilidad (4) Identificar cuestiones de sostenibilidad asociadas con el problema a tratar (5) *Identificar relaciones entre el proyecto y los elementos del marco de trabajo conceptual (6) Analizar la involucración de los agentes sociales
Análisis conceptual
(7) Definir criterios de sostenibilidad en línea con las cuestiones de sostenibilidad identificadas (8) *Confirmar la inclusión de los criterios de sostenibilidad en el marco de trabajo conceptual (9) Desarrollar funciones que sean capaces de satisfacer los principios de sostenibilidad (10) *Generar al menos un concepto radicalmente diferente de los convencionales (11) *Definir escenarios en los que probablemente los conceptos evolucionarán (12) Definir indicadores de sostenibilidad en paralelo con especificaciones técnicas (13) *Identificar herramientas que permitan generar datos para evaluar cada indicador (14) Definir el planteamiento de decisión multi-criterio
Diseño preliminar
(15) Evaluar conceptos de acuerdo con los criterios de sostenibilidad (16) Validar el planteamiento de decisión multi-criterio y utilizarlo para seleccionar un concepto (17) *Validar los conceptos bajo los escenarios identificados
Diseño en detalle
(18) Refinar la evaluación del concepto preferente (19) Optimizar su eficacia de acuerdo con los criterios de sostenibilidad (20) *Mejorar la flexibilidad y solidez del concepto seleccionado en diferentes escenarios (21) Comunicar las recomendaciones adecuadas para cada etapa del ciclo de vida (22) Generar un conjunto de indicadores de control

Tabla 1.5. Tareas en un proceso de diseño integrado y sostenible (Gagnon et al., 2012).

**Lacasa (2018)** parte de un modelo genérico de desarrollo de producto que tiene en cuenta todo su ciclo de vida, y de una metodología de evaluación de impactos basada en LCSA para plantear una metodología de rediseño de productos sostenibles. Aplica un enfoque ingenieril que define métricas en paralelo con aspectos técnicos y selecciona indicadores cuantitativos adecuados para evaluar la sostenibilidad en cada una de sus dimensiones.

La metodología pone su foco de atención en el desarrollo de productos y en el planteamiento de alternativas que mejoren la sostenibilidad del diseño inicial. Se compone de 3 etapas, tal y como se muestra en la Figura 1.10. En la etapa 1) Evaluación de la sostenibilidad, se define el producto y sistema objeto de estudio, se evalúan los impactos en cada dimensión y se detectan los factores que generan mayor impacto. En la etapa 2) Rediseño de producto, se plantean diferentes alternativas de producto basadas en la aplicación de estrategias de mejora de la sostenibilidad y en el cumplimiento de las especificaciones iniciales del producto. Se evalúa la alternativa seleccionada. Y en la etapa 3) Comparación de diseños, se analiza el comportamiento sostenible del diseño inicial y el rediseño y se valora el alcance de los cambios producidos.

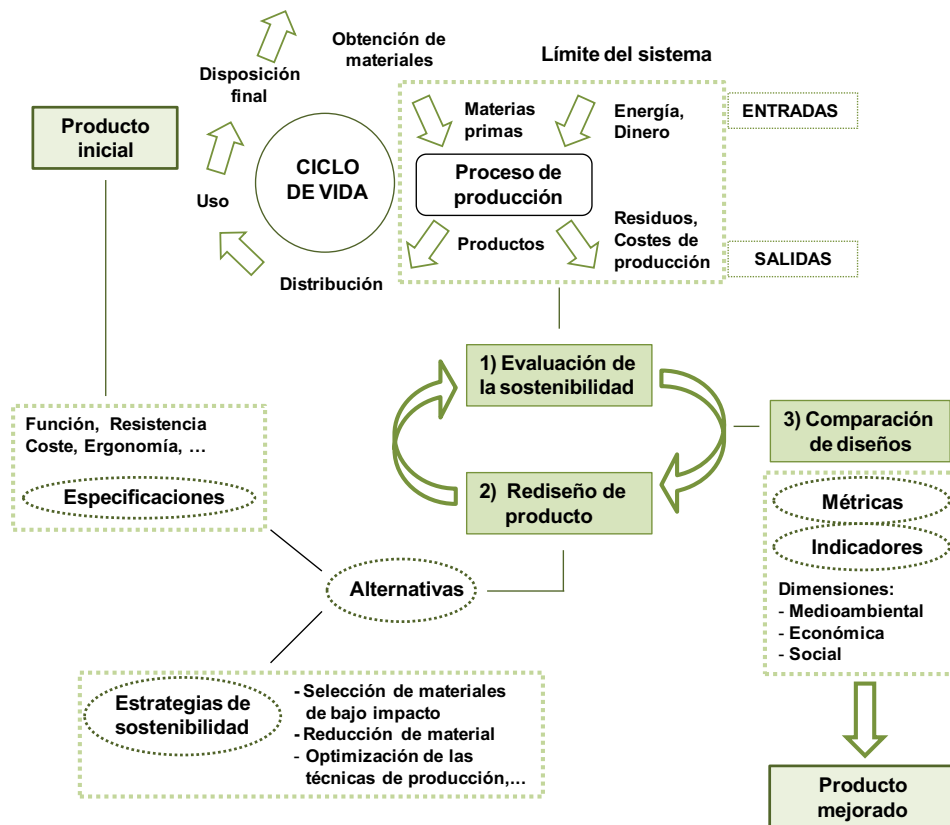


Figura 1.10. Esquema metodológico para proyectar productos sostenibles (Lacasa, 2018).

### 1.2.3. Estudios previos

A lo largo de estas dos últimas décadas, se han realizado un amplio número de trabajos de investigación que tienen como objetivo poner en práctica metodologías que permitan diseñar productos más sostenibles. En las Tablas 1.6 y 1.7 se muestran algunos de los trabajos revisados en la literatura. La Tabla 1.6 resume trabajos centrados en la determinación de impactos ambientales y en la aplicación de métodos de Eco-diseño. En la Tabla 1.7 se muestran trabajos que estudian, además de la dimensión ambiental, otras dimensiones de la sostenibilidad.

Los trabajos revisados se refieren a estudios de productos, ya que este tipo de sistemas son los que han recibido mayor interés por parte de los investigadores y han sido la referencia de modelos de negocio y actividades industriales y económicas. En cada estudio se indican los siguientes aspectos: autores de la investigación, tipo de producto, objetivos, alcance del trabajo, métodos y herramientas aplicadas y principales resultados obtenidos. Los estudios muestran la amplia variedad de productos analizados.

Los trabajos de la Tabla 1.6 ponen en práctica la metodología LCA. Tal y como apuntan **Lacasa et al. (2016)**, se pueden diferenciar tres tipos de objetivos:

- (a) Evaluación y comparación de impactos en diferentes etapas del ciclo de vida.
- (b) Evaluación y comparación de impactos con diferentes alternativas o escenarios.
- (c) Evaluación de impactos, identificación y aplicación de mejoras en el diseño.

Muchos estudios tienen como objetivo evaluar el impacto ambiental que generan diferentes alternativas o escenarios que se están planteando en torno a un producto. Aplican metodologías de evaluación de tipo "endpoint", lo que proporciona una valoración global del impacto, y sobre todo de tipo 'midpoint', lo que permite hacer una interpretación más completa de los efectos ambientales mostrando diferentes categorías. Por el contrario, no son muchos los estudios que además de la evaluación ambiental proyectan mejoras y proponen evaluarlas y compararlas con el producto inicial.

La relación de trabajos presentados en la Tabla 1.7 se extiende principalmente a lo largo de la última década, a partir del planteamiento y desarrollo de la metodología LCSA, que establece un marco de evaluación de la sostenibilidad integrado por tres dimensiones. Los productos analizados implican diferentes ámbitos y sectores industriales. En cada caso, se indica la unidad funcional, que permite expresar y comparar los resultados de sostenibilidad. El objetivo de muchos trabajos sigue siendo comparar diferentes alternativas de producto o escenarios de desarrollo. En los estudios revisados se puede apreciar que se ponen en práctica varias técnicas de evaluación: (a) LCA; (b) LCC; (c) S-LCA, para determinar, respectivamente, los impactos en la dimensión ambiental, económica y social. Algunos estudios solo aplican algunas de estas técnicas y otros estudios, de acuerdo con la metodología LCSA (d), proponen la combinación de las tres.

El enfoque de ciclo de vida del producto es el aplicado en todos los estudios. No obstante, una evaluación completa de impactos en todas las etapas (análisis 'cradle to grave') solo es realizada en algunos casos. Muchos trabajos se centran en el análisis de algunas de las etapas que componen el ciclo de vida (análisis 'cradle to gate'). De esta manera, se limita la complejidad del estudio poniendo énfasis en la evaluación y análisis en detalle de una parte del ciclo de vida, la detección de los principales focos de impacto y el planteamiento de posibles estrategias de mejora. Por otra parte, son muchos los aspectos que, en algunas dimensiones como la social, solamente son tratados de manera parcial.



Autores	Producto	Objetivo	Etapas analizadas	Metodología	Resultados
Hospidio et al., (2002)	Leche de vaca	(b) - Dos granjas lecheras (c) - Tres opciones de mejora	Obtención de m. primas, producción y envasado	LCA, CML (midpoint)	Se logran mejoras al añadir un reactor anaeróbico, una instalación de trat. de gas y cambiar la ración de comida
Reginald and Hsien, (2005)	Materiales de embalaje EPS y CPB	(b) - Cantidad de material utilizado - Cinco escenarios de final de vida	Todo el ciclo de vida	LCA, E99 (endpoint)	Utilizar menos material es favorable. El peor escenario de fin de vida es el vertedero
Masruroh et al., (2006)	Sistema termo-solar	(a) - Tres etapas (b) - Cuatro sist. de calentamiento	Obtención de m. primas, producción y distribución	LCA, Midpoint impact categories	La etapa de distribución es muy poco significativa. El sistema desarrollado mejora la eficiencia
Foolmaun and Ranjeawon, (2008)	Botellas de PET	(a) - Todas las etapas (b) - Comparación de tres escenarios	Todo el ciclo de vida	LCA, E99	Producción y uso son las etapas de mayor impacto. La incineración es la opción de tratamiento preferida
Martinez et al., (2009)	Turbina eólica	(a) - Estudio de 4 componentes: góndola, torre, rotor, cimentación	Todo el ciclo de vida	LCA, CML, E99	La cimentación es la parte de todo el conjunto turbina que tiene mayor impacto medioambiental
Hetherington et al., (2011)	Aceites de colza y girasol	(a) - Análisis de etapas y diferentes métodos de asignación	Cultivo, extracción, refinado y transporte	LCA, E99	La contribución relativa de cada etapa cambia con la metodología de asignación aplicada
Song et al., (2012)	Monitores de TV CRT	(a) - Todas las etapas (b) - Tres escenarios de final de vida	Todo el ciclo de vida	LCA, CML, E99	La etapa de uso presenta el mayor impacto ambiental. Se recomienda el tratamiento específico de residuos
Bortolini et al., (2014)	Maquinaria de recogida de forraje	(b) - Estudio de dos máquinas	Todo el ciclo de vida	LCA, E99	La máquina con menor impacto y menor coste es la que realiza, a la vez, acopio y empaquetado del forraje
Elduque et al., (2014)	Placa electrónica de cocina de inducción	(b) - Dos placas electrónicas de control de potencia	Todo el ciclo de vida	LCA, CML	El mayor impacto es generado en la etapa de uso y por inductores de núcleo anular
Fargnoli et al., (2014)	Cortacésped	(c) - Estudio de dos mejoras en el sistema de alimentación del motor	Todo el ciclo de vida	LCA, E99, QEFD	Mejora ambiental y económica en la etapa de uso y mantenimiento del producto
Babazadeh et al., (2015)	Sistemas de sombra (ventanas exteriores)	(b) - Cinco climas - Tres materiales diferentes de generación de sombra	Todo el ciclo de vida	LCA, BEES (midpoint)	Se obtiene una guía sobre el diseño de sistemas de sombra en diferentes instalaciones
Del Pero et al., (2015)	Metro de Roma	(a) - Estudio de la sensibilidad del vehículo a la ocupación	Todo el ciclo de vida	LCA, CML	Elevado impacto en la etapa de uso debido al consumo de energía en operaciones de tracción
Iritani et al., (2015)	Armario realizado en tablero MDF	(a) - Tres etapas (b) - Tres sistemas de producción	Obtención de m. primas, fabricación y distribución	LCA, EDIP-97 (midpoint)	Alto impacto en la etapa de obtención de materias primas. Se recomienda el uso de madera residual
Chobtang et al., (2017)	Leche de vaca - aliment. con pastos	(b) - Dos niveles de intensificación (53 granjas en estudio)	Obtención de m. primas, transporte y producción	LCA, Midpoint impact categories	Alta intensificación produce mayor producción de leche y mayor impacto ambiental.
Siddiqui et al. (2017)	Energía eléctrica	(b) - Tres tipos de generación: hidroeléctrica, eólica y nuclear	Todo el ciclo de vida	LCA, CML	La producción de energía hidroeléctrica tiene el menor impacto. El sistema eólico el mayor impacto global
O'Born (2018)	Puente (1,65 Km)	(b) - Dos tipos de materiales: madera y hormigón	Todo el ciclo de vida	LCA, CML	El proyecto de puente construido en madera tiene menor impacto global
Horowitz et al., (2018)	Agua embotellada	(a) - Todas las etapas (b) - Cuatro tipos de materiales	Todo el ciclo de vida	LCA, Midpoint impact categories	Producción y distribución son las etapas de mayor impacto. Se recomiendan materiales biodegradables
Burchart-Karol et al., (2020)	Carga de batería en vehículo (fu: 100 Km)	(b) - Estudio del impacto en diferentes países europeos	Todo el ciclo de vida	LCA	Elevada diversificación de la producción eléctrica en los países que genera diferentes impactos

\*Objetivo: (a) Evaluación y comparación de impactos en diferentes etapas del ciclo de vida del producto;  
(b) Evaluación y comparación de impactos en diferentes alternativas o escenarios;  
(c) Evaluación de impactos, identificación y aplicación de mejoras en el diseño.

Tabla 1.6. Estudios de sostenibilidad de producto enfocados en la dimensión ambiental.

Autores	Producto	Objetivo	Etapas analizadas	Metodología	Resultados
Zhou et al., (2007)	Combustibles (fu: 200.000 Km)	Seis tipos de combustible	Todas las etapas del ciclo de vida	(a), (b) – LCA, LCC; Multi-criterio	Análisis de criterios individuales. Identificación de áreas problemáticas y prioritarias
Capitano et al., (2011)	Productos de mármol (fu: 1 m <sup>3</sup> )	Dos plantas de producción	Obtención de m. primas, producción y distribución	(d) – LCSA; CML	Identificación de fortalezas y debilidades de los productos en cada proceso de producción
Ciroth and Franze (2011)	Notebook (fu: 1 unidad)	Identificación de factores de mayor impacto social y medioambiental	Todo el ciclo de vida	(a), (c) – LCA, S-LCA	Es posible desarrollar un producto con un impacto social y medioambiental aceptable
Traverso et al., (2012)	Módulo fotovoltaico (fu: 1 m <sup>2</sup> )	Dos fabricantes y tres escenarios productivos	Fase de montaje en la etapa de producción	(d) – LCSA; LCSD	Los indicadores agregados obtenidos a través de LCSD muestran el procedimiento más sostenible
Foolmaun and Ramjeawon (2013)	Botellas de PET (fu: 1 t)	Comparación de 4 escenarios de final de vida de botellas usadas	Etapas de final de vida	(d) – LCSA; Multi-criterio, AHP	75% trituración y 25% vertedero es el escenario con menor impacto
Martínez-Blanco et al. (2014)	Fertilizante agrícola (fu: 1 t)	Estudio de tipos de fertilizantes (dos minerales y uno industrial)	Producción, transporte y ciertas fases de cultivo	(c) – S-LCA; SHDB	La comparabilidad y fiabilidad de los resultados está condicionada por muchos factores y es un desafío
Chang et al., (2015)	Tecnol. de soldadura (fu: 1 m de cordón)	Cuatro procesos de soldadura diferentes	Etapas de producción	(a), (c) – LCA, S-LCA	MMAW tiene mayor impacto y supone mayor riesgo para los soldadores
Eastwood and Haapala (2015)	Engranajes cónicos	Tres diseños diferentes de engranajes	Etapas de fabricación	Métricas, métodos de agregación	Cada métrica utilizada requiere un método de agregación diferente
Ren et al., (2015)	Bio-etanol (fu: 1 t)	Comparación de tres alternativas de producción	Obtención de materia prima y producción	(d) – LCSA; MCDM, AHP	Si bien una alternativa es seleccionada, MCDM es difícil para los usuarios
Asadi et al., (2016)	Sistema de tuberías (fu: 1000 m)	Estudio de dos materiales: polietileno y cobre	Todas las etapas del ciclo de vida	(a), (b) – LCA, LCC	El sistema PEX reduce los costes totales y reduce también el impacto medioambiental
Hannouf and Assefa (2017)	Polietileno de alta densidad (fu: 1 t)	Análisis integrado de impactos y propuestas de mejora	Extracción, transporte y producción	(d) – LCSA; DPSIR método	La producción de etileno es la de mayor impacto. Se indican posibles mejoras para reducir de emisiones
Wang et al., (2017)	Estructuras de hormigón (fu: 1 m <sup>3</sup> )	Diferentes porcentajes en la composición del material	Obtención de materia prima y producción	(d) – LCSA; Sustainable Value	La sustitución de cemento por cenizas volantes genera una reducción en el impacto
De Luca et al., (2018)	Gestión del olivar (fu: 1 ha)	Tres escenarios diferentes de crecimiento de cultivo	Todo el ciclo de vida agrícola	(d) – LCSA; MCDA	El escenario de bajo uso de químicos es el más adecuado excepto para oportunidades de trabajo
Hossain and Poon (2018)	Resid. de madera de la construcción (fu: 1 t)	Cuatro sistemas diferentes de gestión de residuos	Todo el ciclo de vida	(a) – LCA; análisis de sensibilidad	En la producción de tableros es preferible el uso de residuos de madera en lugar de madera virgen
Lenzo et al., (2018)	Prenda textil (fu: 1 capa tejida)	Estudio de impactos dentro de un contexto regional	Materia prima, transporte y producción	(a), (c) – LCA, S-LCA	La recopilación de datos para el estudio de aspectos sociales en toda la cadena de suministro es complejo
Budzinski et al., (2019)	Biorrefinería	Comparación de dos plantas y selección de su localización óptima	Extracción, transporte y producción	(a), (b) – LCA, LCC; Program. lineal	Se determina el número óptimo de instalaciones y su ubicación regional
Ferrari et al., (2019)	Baldosas de cerámica (fu: 1 m <sup>2</sup> )	Construcción de un marco de referencia en este ámbito	Todo el ciclo de vida y costes internos	(d) – LCSA	El sistema logístico presenta aspectos críticos y oportunidades de mejora
Santolaya et al., (2019)	Producción de leche (fu: 1 l)	Identificar factores de impacto y aplicar estrategias de mejora	Producción	(d) – LCSA	La alimentación es un factor crítico. Cambios en este factor no logran la mejora simultánea de indicadores

\* Metodología: (a) LCA: evaluación de la dimensión ambiental; (b) LCC: evaluación de la dimensión económica; (c) S-LCA: evaluación de la dimensión social; (d) LCSA: LCA + LCC + S-LCA

Tabla 1.7. Estudios de sostenibilidad de producto considerando diferentes dimensiones.

### 1.3. Sistemas Producto-Servicio

Tradicionalmente, los productos han sido el foco de las actividades de producción y comercialización, mientras que los servicios eran planteados, en muchos casos, como un complemento a la utilidad de los productos. En los últimos años, los servicios han recibido la atención de sistemas productivos y de diferentes modelos de negocio, por su capacidad para satisfacer las necesidades de los usuarios y como posible respuesta al desafío de la sostenibilidad desde la perspectiva de la desmaterialización.

#### 1.3.1. Sistemas Producto y Sistemas Servicio

En la economía actual, las empresas normalmente prestan valor a través de la oferta de productos o servicios a otras empresas, entidades públicas o consumidores individuales. La mayoría de empresas trabajan principalmente con este tipo de sistemas ya que consideran que las necesidades de usuarios y consumidores pueden satisfacerse de dos modos diferentes: mediante el uso de productos o la provisión de servicios (**Ashford and Hall, 2011**).

A lo largo de estos años, diferentes autores han tratado de definir los conceptos de producto y servicio. Según **Normann, (1984)** los productos son artefactos producidos a través de procesos de manufactura para después ser comprados por consumidores y utilizados para su satisfacción. Varios autores señalan que los servicios son un modo alternativo de satisfacer la demanda, de naturaleza inmaterial y que se consumen de manera inmediata (**Mont, 1999; Stahel, 2000; Normann, 1984**). Productos y servicios son formas de satisfacción que involucran a diferentes actores y objetos, ambos utilizan algún tipo de infraestructura para ser suministrados y, posteriormente, consumidos. **Metcalfe and Miles, (2000)** consideran que los servicios son actividades que transforman la forma, la disponibilidad del tiempo o la situación de un objeto, de una persona o de una información en el espacio.

**Brezet et al. (2001)** consideran que todo producto contiene algún tipo de servicio y todo servicio está basado en el uso de varios productos. Por lo tanto, existe una continuidad de los productos a los servicios con un límite poco claro entre ellos. Por ejemplo, ningún equipo de televisión puede venderse sin una red de tiendas de distribución (ya sean virtuales o físicas), las cuales son servicios. Y ningún servicio de distribución puede existir sin camiones, ordenadores y almacenes, que son productos.

A nivel teórico, algunos autores (**Fisk et al., 1993; Clow and Kurtz, 1998**) plantean que existen cuatro características principales que describen la naturaleza de los servicios y permiten la distinción entre productos y servicios. Estas características son: intangibilidad, inseparabilidad, variabilidad y perecederabilidad. La inseparabilidad tiene en cuenta que la producción y el consumo son etapas simultáneas en el desarrollo del servicio, la variabilidad se debe a la no estandarización y la perecederabilidad se refiere a la dificultad de cumplir un inventario. La intangibilidad está relacionada con la perecederabilidad, ya que se considera que los servicios no pueden ser almacenados y deben ser consumidos cuando se producen.

Otros autores (**Hockerts and Weaver, 2002**) han propuesto definiciones de sistemas puros referidos, respectivamente, a producto y servicio. Un sistema producto puro es un sistema en el cual el proveedor del producto transfiere todos los derechos de propiedad al cliente en el punto de venta. Después de abandonar el punto de venta no tiene lugar ninguna interacción entre el cliente y el proveedor. Y definen un sistema servicio puro como un sistema en el que el proveedor del servicio mantiene todos los derechos de propiedad y a los clientes no les corresponde ningún otro derecho que no sea el de consumo del servicio.

Las principales diferencias entre el proceso de diseño de productos y servicios son revisadas por **Brezet et al., (2001)**. Tal y como se muestra en la Tabla 1.8, las principales diferencias se encuentran en el tiempo de ejecución (mucho más corto en servicios), la capacidad de adaptación al entorno (mayor adaptación en servicios), el cumplimiento de especificaciones (menos estrictas en servicios) y en el impacto ambiental de los productos secundarios (más elevado en servicios).

Diseño de producto	Diseño de servicio
Elevado tiempo de ejecución	Tiempo de ejecución reducido
Realizado por desarrolladores y técnicos de producto	Realizado por vendedores, administradores de negocio y proveedores de servicios
Difícilmente ajustable a un entorno cambiante	Fácilmente ajustable a un entorno cambiante
Especificaciones técnicas estrictas (material, dimensiones,...)	Especificaciones menos estrictas (tiempo, lugar,...)
Impacto medioambiental insignificante en los productos secundarios	Impacto medioambiental elevado en los productos secundarios

Tabla 1.8. Diferencias entre el diseño tradicional de productos y servicios (Brezet et al., 2001).

**Gadrey, (2002)** propone un esquema triangular para representar la actividad de un servicio, formado por el proveedor, el consumidor o usuario y el medio o soporte de interacción (Figura 1.11). **Morelli (2006)** también utiliza este tipo de esquemas para mostrar la interacción entre los actores del sistema.

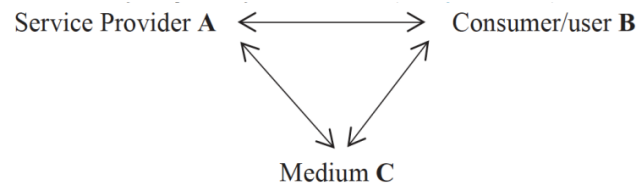


Figura 1.11. Esquema triangular que representa la actividad de un servicio (Gadrey, 2002).

De acuerdo con **Ashford and Hall, (2011)** y **Fourcroy, (2012)** la diferencia entre sistemas producto y sistemas servicio reside en el tiempo de consumo, el cual suele ser más corto en el caso de los servicios, así como en la naturaleza material de los productos y el carácter inmaterial de los servicios. Esta inmaterialidad es debida al hecho de que no producen bienes físicos como resultado final. Sin embargo, los servicios tienen diferentes fuentes de materialidad y son capaces de transformar combinaciones de energía, material e información en otras altamente valiosas.

**Djellal and Gallouj, (2013)** consideran que la provisión de un servicio es la combinación, en proporciones variables, de tres elementos básicos: intervención, preparación y desplazamiento, en la que se identifican diferentes fuentes de materialidad de servicio. La intervención incluye todas aquellas operaciones (material, informativa o cognitiva) relativas al objetivo de la entrega del servicio. La preparación considera las actividades de acondicionamiento de los lugares donde se proporcionarán los servicios (limpieza, calefacción, ...) así como la formación de los proveedores del servicio. Finalmente, el desplazamiento se refiere al movimiento de los consumidores y los proveedores del servicio para poder llevarlo a cabo.

De esta manera, los servicios son consumidores importantes de recursos materiales. Al mismo tiempo, los productos requieren de diferentes aspectos de servicio para obtener una utilidad final. Por ello, productos y servicios no son sistemas completamente independientes. La provisión del servicio está basada en productos y los productos necesitan de servicios para ser útiles.

### 1.3.2. Sistemas Producto-Servicio

Ya que todo producto requiere algún tipo de servicio y que todo servicio está basado en el uso de productos, servicios y productos pueden ser tratados como partes de otros sistemas que los combinan (**Brezet et al., 2001**). Estos sistemas son denominados Sistemas Producto-Servicio (Product-Service Systems, PSS).

A lo largo de las últimas décadas, algunos autores han tratado de aportar definiciones de este tipo de sistemas. **Goedkoop et al. (1999)** y **Mont, (2000)** proponen una definición práctica y los consideran como sistemas comerciales de productos y servicios capaces de satisfacer las demandas de los usuarios. La relación producto/servicio puede variar, ya sea en términos de satisfacción de la función o en valor económico. **Brezet et al., (2001)** hace referencia a su potencial para reducir el impacto medioambiental y obtener, a la vez, un máximo valor añadido. **Hockerts and Weaver, (2002)** apuntan que en un PSS el derecho de propiedad permanece distribuido entre cliente y proveedor. **Mont, (2002)** define PSS como un sistema de productos, servicios, redes e infraestructuras de apoyo que es diseñado para ser competitivo, satisfacer las necesidades del consumidor y tener menor impacto ambiental que los modelos de negocio tradicionales.

Según **Mont, (2002)** los actores principales de un PSS son: el cliente o usuario final, el proveedor, los actores con un rol intermedio y otros stakeholders, internos y externos, de la empresa o institución. De esta forma, el proceso de diseño de un PSS no solo conlleva el diseño de servicios o productos, sino también el diseño de la red de agentes involucrados y de la infraestructura de apoyo. Este autor clasifica los PSS en cinco tipos principales (Figura 1.12).

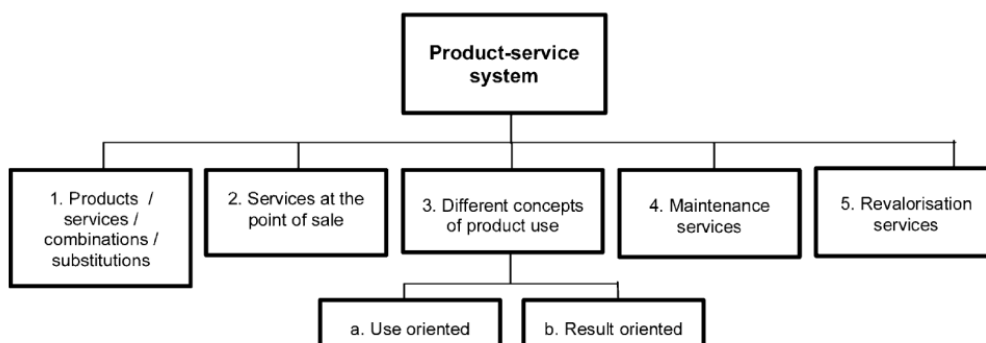


Figura 1.12. Clasificación de PSS (Mont, 2002).

**Manzini and Vezzoli, (2003)** definen PSS como una estrategia de innovación para satisfacer necesidades concretas de usuarios y clientes a través de la combinación de productos y servicios. A esta definición **Brandstötter et al. (2003)** añaden la capacidad de los PSS para alcanzar un desarrollo sostenible. **Tukker and Tischner, (2006a)** definen PSS como una mezcla de productos tangibles y servicios intangibles diseñados y combinados para satisfacer las necesidades del consumidor. **Baines et al. (2007)** señalan que un PSS ofrece la oportunidad de separar el éxito económico del consumo material y, por lo tanto, reduce el impacto medioambiental de la actividad económica. De acuerdo con **Bohem and Thomas, (2013)** un PSS es un conjunto integrado de productos y servicios cuyo objetivo es crear utilidad y generar valor para el consumidor (enfatisa la necesidad de los proveedores de crear valor).

En la línea de las definiciones presentadas, los PSS pueden ser beneficiosos de diferentes maneras para el consumidor, el proveedor, el medio ambiente y la sociedad. Estos beneficios se resumen en la Tabla 1.9.

Beneficios de un PSS	
Consumidor	Servicio personalizado y flexible; Satisfacción continua (Aurich et al.,2010). Recogida de información del producto durante el uso para mejorar los productos en las diferentes etapas del ciclo de vida (Sundin et al., 2009)
Proveedor	Alta fidelización y confianza del cliente (Aurich et al.,2010) Potencial de innovación debido a la monitorización de los productos y servicios (Tukker and Tischner, 2006) Reducción de costes y recursos; Maximización de resultados; Venta del conocimiento creado durante el proceso de desarrollo a servicios de consultoría y formación; Reutilización de productos combinándolos en varios servicios diferentes (Mittermeyer et al., 2010)
Medioambiente	El proveedor es responsable de los productos y servicios y se ocupa de su recuperación, reciclaje y renovación, reduciendo residuos durante la vida del producto; Servicios planeados acorde al ciclo de vida de los productos (Baines et al., 2007)
Sociedad	Crecimiento de la presión pública sobre temas medioambientales (Baines et al., 2007) Incremento de la prestación de servicios; Nuevos puestos de trabajo (Baines et al., 2007; Gao et al., 2009)

Tabla 1.9. Beneficios de los PSS.

**Lay et al., (2009)** desarrollan un marco de trabajo para describir los PSS (Figura 1.13). Establece los siguientes elementos para su caracterización: propiedad (durante o después del uso); trabajadores (de fabricación o de mantenimiento), ubicación de la operación, tipo de cliente (particular o múltiple) y modelo de pago.

Characteristic Features		Options			
Ownership	during phase of use	Equipment producer	Leasing bank	Operating joint venture	Customer
	after phase of use	Equipment producer	Leasing bank	Operating joint venture	Customer
Personnel	Manufacturing	Equipment producer	Operating joint venture	Customer	
	Maintenance	Equipment producer	Operating joint venture	Customer	
Location of operation		Equipment producer's establishment	Establishment "fence to fence" to the customer	Customer's establishment	
Single / multiple customer operation		In parallel operation for multiple customers		Operation for a single customer	
Payment model		pay per unit	pay for availability	fixed rate	pay for equipment

Figura 1.13. Elementos para describir PSS según sus características (Lay et al., 2009).

Los PSS reflejan una transición desde un “bienestar basado en el producto” a un “bienestar basado en el acceso al producto” (Manzini et al., 2001; Sakao et al., 2009b). Sin embargo, desde una perspectiva cultural, la implementación de los PSS puede ser un desafío para consumidores y proveedores (Rexfelt and Ornäs, 2009; Geum and Park, 2010). El hecho de prestar la función de un producto es un cambio importante para todos los stakeholders. Los consumidores están acostumbrados a adquirir productos, no a pagar sólo por su función. Este cambio de perspectiva podría provocar la duda de muchas personas para aceptarlos.

Autores como Aurich et al. (2006a) proponen un proceso de diseño de PSS paso-a-paso, que en esencia lo que hacen es trasladar el proceso tradicional de diseño de producto. Aurich et al. (2006a); Wang et al., (2011a); Li et al., (2012) destacan la importancia del diseño modular en el desarrollo de PSS, que permite nuevas e inesperadas combinaciones de PSS sin gran diseño ni necesidad de testeo. En este sentido, el diseño y desarrollo de PSS plantea nuevas cuestiones, ya que el componente servicio introduce otras necesidades que, en un modelo de negocio basado en producto, no son relevantes. En particular, se produce un cambio cultural de un enfoque basado en transacciones a un enfoque de relaciones duraderas con los consumidores. Según Diehl and Crul, (2009), los PSS pueden permitir a una compañía:

- Encontrar nuevos mercados y centros de beneficio;
- Sobrevivir en mercados muy cambiantes;
- Incrementar la eficiencia y reducir el uso de recursos;
- Cumplir con las regulaciones y los estándares medioambientales y laborales;
- Competir en el mercado y generar valor y calidad social, mientras decrece el impacto negativo total medioambiental y social (directa o indirectamente).



**Geng et al., (2011, 2010a, b)** sugieren otro método de diseño de PSS que destaca la evaluación cuantificada de las necesidades del consumidor y las características ingenieriles. **Clayton et al., (2012)** y **Pezzotta et al., (2012)** señalan que el proceso de diseño es cíclico e iterativo. Por su parte, **Akasaka et al., (2012)** proporcionan una metodología de diseño de PSS con un alto grado de formalización basado en la investigación del campo de ingeniería de servicios. Según **Beuren et al., (2013)**, todas las metodologías disponibles tienen determinadas limitaciones y no han sido desarrolladas en profundidad. Normalmente, las empresas diseñan PSS de la misma manera que diseñan productos y este enfoque no funciona porque el diseño de PSS es mucho más complejo (**Geng et al. 2010**). Por lo tanto, son necesarias metodologías y herramientas necesarias que ayuden a las empresas en la implementación de PSS.

Muchos estudios coinciden en considerar los PSS como un modelo innovador de negocio que cambia el modelo de empresa tradicional centrada en la producción por otro de empresa centrada en satisfacer necesidades altamente personalizadas. Esta tendencia genera un cambio en los modelos de desarrollo económico, pasando de una economía industrial a una economía de servicios. En una economía de servicio, los consumidores están comprando movilidad en vez de coches, servicios de limpieza en vez de detergente de limpieza y películas en vez de reproductores de video (**UNEP, 2015**). La manera tradicional de ofrecer utilidad a usuarios y clientes por parte de las empresas pasa de basarse únicamente en la producción y venta masiva de productos a buscar una combinación equilibrada de productos y servicios (**Tukker, 2015**).

Según este enfoque, se pueden considerar tres categorías principales de PSS:

- Sistemas orientados a un producto: el consumidor será el propietario del producto, por lo que el modelo de negocio todavía está orientado principalmente a la venta de productos. Sin embargo, la empresa proporciona algunos servicios adicionales (ej.: protección o mantenimiento).
- Sistemas orientados al uso: el proveedor del servicio es el propietario del producto, vendiendo solamente la función al consumidor. De esta manera se produce un cambio en la disponibilidad. Algunas veces el producto puede ser compartido por más usuarios (ej.: alquiler de coches).
- Sistemas orientados al resultado: el beneficio principal es el resultado prestado, que acuerdan inicialmente el cliente y el proveedor (ej.: subcontratación de servicios de catering). No existe un producto predeterminado. Todos los materiales y consumibles utilizados para prestar el resultado se convierten en costes, creando un incentivo para minimizar su uso.

Numerosos autores consideran que los PSS tienen el potencial de proporcionar soluciones más sostenibles que respondan a las demandas económicas de la sociedad actual (**Ceschin, 2013; Vezzoli et al., 2014; Tukker, 2015; Pigosso and McAloone, 2016**). En la última década, varios trabajos de investigación tienen como objetivo poner en práctica metodologías que permitan diseñar PSS más sostenibles. **Vezzoli et al., (2014)** definen el Diseño Sostenible de Sistemas Producto-Servicio como el diseño de sistemas capaces de prestar una 'unidad de satisfacción' a partir de interacciones innovadoras entre stakeholders y donde el interés económico y competitivo de los proveedores busca también soluciones medioambientales y sociales beneficiosas. Sin embargo, los aspectos sociales en PSS todavía carecen de definiciones claras y ocupan una posición secundaria en los estudios realizados (**Chou et al. 2015**).

Este potencial para contribuir a la sostenibilidad procede, en parte, de la idea de que los servicios generan una desmaterialización y, por tanto, una menor demanda de recursos y un menor impacto, pero estos efectos no han sido medidos y analizados de forma sistemática. A lo largo de estos últimos años, algunos trabajos de investigación ya han comenzado a aplicar metodologías de evaluación de la sostenibilidad en sistemas servicio. En la Tabla 1.10 se recogen los trabajos encontrados en la literatura. Se indican autores, tipo de servicio, objetivo de la investigación, alcance del trabajo, métodos y herramientas aplicadas y principales resultados obtenidos.

Se comprueba que han sido estudiados tipos de servicios muy diferentes, tanto de ámbito público como privado. Por ejemplo, **Cheng and Hsu (2015)** analizan un servicio de distribución de comida refrigerada y **Bartolozzi et al., (2018)** analizan un servicio municipal de limpieza. Al igual que sucede en muchos estudios realizados sobre sistemas producto, uno de los objetivos principales es evaluar la sostenibilidad de diferentes alternativas o escenarios de desarrollo del servicio. La etapa operativa es la que centra la mayor parte de los estudios y al aplicar métodos de evaluación de la sostenibilidad, la mayor parte sólo evalúan impactos ambientales. Los aspectos socio-económicos son tratados en muy pocos casos.

Si bien la metodología LCSA es cada vez más utilizada en el estudio de sistemas producto, no tiene igual aplicación en sistemas servicio. Por otra parte, los trabajos que tratan la evaluación de la sostenibilidad de PSS se encuentra todavía en una fase muy temprana (**Sousa-Zomer and Cauchick, 2018**), y se requieren métodos y herramientas adecuados que permitan establecer conclusiones.

Autores	Servicio	Objetivo	Etapas analizadas	Metodología	Resultados
Iriarte et al., (2009)	Recogida de residuos sólidos urbanos	Comparar tres sistemas de recogida selectiva de residuos	Almacenamiento y transporte	LCA, CML fu: 1500 t (1 mes)	El sistema multi-contenedor tiene el menor impacto. El transporte inter-urbano es una etapa crítica
Farreny et al., (2012)	Servicio cultural en museos	Cuantificar demanda de recursos y emisiones	Etapas de operación	Factor de emisión, Análisis estadístico	El consumo de agua y energía tiene una fuerte correlación con el área y el número de visitantes
Del Borgui et al., (2013)	Suministro de agua potable	Estudio y mejora de la red de suministro regional	Obtención, tratamiento y distribución de agua	LCA, EPD fu: 1 m <sup>3</sup> (1 año)	El proceso de desalminación tiene el impacto más elevado en las categorías seleccionadas
Vinyes et al., (2013)	Recogida de aceite usado doméstico	Comparar tres sistemas de recogida en una gran ciudad	Recogida y transporte a planta de tratamiento	LCSA, fu: 10000 h (1 año)	El servicio preferido es el de recogida multi-residuo. La etapa de transporte es muy influyente
Duane et al., (2014)	Cuidado dental	Estudio de diferentes escenarios	Traslado a la clínica y atención a pacientes	Mod probabilístico, Rediseño	Mejora de la utilización de la clínica y reducción de los traslados de pacientes
Li et al., (2014)	Alojamiento en hotel	Evaluación y comparación de emisiones en seis hoteles	Construcción, operación y post-operación	LCA, modelo CFT	Destaca el elevado impacto de la fase de operación debido al consumo de energía
Chen and Hsu, (2015)	Distribución de comida refrigerada	Análisis de dos técnicas de control de temperatura	Transporte desde centro terminal a vendedores	Modelo numérico, fu: 1 Kg (1 día)	Se reduce el consumo de combustible y las emisiones mediante un sistema de distribución multi-Temperatura
Baden and Prasad, (2016)	Servicio de peluquería	Proporcionar pautas y potenciar cambios en stakeholders	Servicio en sala y atención en casa	Motivación, Encuestas	Intención de adoptar prácticas sostenibles por parte de trabajadores y clientes
Gómez et al., (2016)	Actividad educativa en campus regional	Determinar emisiones de gases de efecto invernadero	Emisiones directas e indirectas	Modelo híbrido, Periodo: 8 años	Las emisiones indirectas son relevantes. Detección de estrategias de mitigación de emisiones
Rabbitt and Ghosh; (2016)	Compartir vehículo	Comparar el uso compartido con el uso individual	Usuarios individuales y colectivo social	Datos estadísticos, Observ, encuestas	Compartir vehículo de forma organizada supone ahorros significativos en costes y emisiones
Sanjuán et al., (2016)	Educación infantil	Obtener el perfil ambiental de doce guarderías públicas	Traslado a la guardería y cuidado de niños	E-LCA, CML, Encuestas	El consumo de energía en edificios y el uso de vehículo tienen un alto potencial de mejora
Schepens et al., (2016)	Turismo recreativo acuático	Estudio de diferentes proyectos de navegación	Marketing, operación y final de vida	LCA, modelo Eco-costs	Es recomendable la utilización de tecnología eléctrica en el sistema de propulsión
Chun and Lee, (2017)	Alquiler de sistema purificador de agua	Comparar sistema de alquiler con sistema orientado a producto	Operación y mantenimiento	LCA, fu: 10l/día (15 años)	El sistema de alquiler tiene un alto potencial de mejora si los consumidores son educados
Bartolozzi et al., (2018)	Servicio municipal de limpieza de calles	Comparar sistemas de limpieza manual y mecánico	Actividades directamente relacionadas con operación	LCA, CML, PEF fu: 1 operario (1 h)	El consumo de combustible es el factor más influyente en todas las categorías de impacto
Cerutti et al., (2018)	Servicio de restauración	Determinar y clasificar el efecto de diferentes estrategias de mejora	Todo el ciclo de vida	LCA, fu: comida en 1 año	La etapa con más impacto es la producción de comida. La estrategia más efectiva es un cambio de dieta
Nazar and Nazar, (2019)	Farmacia comunitaria	Valorar el potencial sostenible	Desde la financiación hasta la planificación estratégica	Encuestas, Entrevistas	El servicio fue calificado como insostenible en la mayoría de las fases analizadas
Zheng et al., (2019)	Mantenimiento de pavimento	Analizar tres alternativas y seleccionar la más sostenible	Todo el ciclo a excepción del final de vida	LCSA, MCDA	La alternativa basada en el reciclaje es la más adecuada económica y socialmente.

Tabla 1.10. Estudios de sostenibilidad de sistemas servicio.

## Glosario de acrónimos:

AHP	Analytic Hierarchy Process
BEES	Building for Environmental and Economic Sustainability
CDP	Conventional Design Process
CML	Center of Environmental Science of Leiden University
D4S	Design For Sustainability
EEA	Environmental European Agency
Ecoinvent	Life Cycle Inventory Database
EcoPack	Ecological - Package
EDIP	Environmental Design of Industrial Product
EI99	Eco-indicator 99
E-LCA	Environmental Life Cycle Assessment
EuPeco-LIMaS	Life Cycle Innovation and Management for SMEs (EuP and EEE)
eVerdEE	Webbased Screening Life Cycle Assessment Tool for European SMEs
GaBi	Ganzheitliche Bilanzierung
GISSTEMP	Goddard Institute for Space Studies Temperature
GRI	Global Reporting Initiative
G-QFD	Green Quality Function Deployment
GWP	Global Warming Potential
HadCRUT	Hadley Climatic Research Unit Temperature
ISED	Integrated Sustainable Engineering Design Process
ISO	International Organization for Standardization
KCL-ECO	Keskuslaboratorio – Centrallaboratorium Ab – Ecology
LCA	Life Cycle Assessment
LCC	Life Cycle Cost
LCSA	Life Cycle Sustainability Assessment
LiDS	Lifecycle Design Strategies
MEI	Metodología de Evaluación de Impacto
MET	Materials, Energy and Toxic emissions
MCDM	Multicriteria Decision-Making
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
Open LCA	Open Life Cycle Assessment
PSS	Product-Service System
QFD	Quality Function Deployment
SDP	Sustainable Design Process
SETAC	Society of Environmental Toxicology and Chemistry
SimaPro	System for Integrated Environmental Assessment of Products
S-LCA	Social Life Cycle Assessment
SST	Sustainable Systems Triangle
TBL	Triple bottom line
UNCED	United Nations Conference on Environment and Development
UNEP	United Nations Environment Programme
WCED	World Commission on Environment and Development

## Capítulo 2

# Métodos aplicados

---

En este capítulo se exponen los métodos aplicados en el estudio de la sostenibilidad de Sistemas Producto-Servicio.

Puesto que en un PSS intervienen tanto productos como servicios, es necesario identificar las relaciones que se establecen entre sistemas a lo largo de las etapas que forman parte de su ciclo de vida. Para ello, se propone aplicar un enfoque de flujos entre sistemas.

La evaluación de la sostenibilidad requiere establecer un marco conceptual que además de evaluar la sostenibilidad, permita identificar con facilidad la incidencia de cada sistema que interviene en un PSS y determinar los factores que causan mayor impacto. Para ello se propone utilizar la metodología LCSA, que permite obtener simultáneamente impactos ambientales, económicos y sociales. Su aplicación a PSS ha de tener en cuenta aspectos específicos relacionados con la combinación de varios sistemas.

La mejora de la sostenibilidad implica el planteamiento de estrategias que permitan reducir impactos. Para ello, se propone la utilización de métodos de diseño sostenible que tienen en cuenta las especificaciones iniciales del PSS y que concluyen con un estudio comparativo de indicadores de sostenibilidad.

## 2.1. Ciclo de vida de sistemas

Aplicar un enfoque de ciclo de vida supone tener en cuenta todas las fases que intervienen en el desarrollo de un sistema, desde su concepción hasta el tratamiento al final de su vida útil. Tal y como se pone de manifiesto en el capítulo anterior, este enfoque forma parte esencial de los métodos de evaluación de la sostenibilidad de un sistema.

**ISO (2006a)** define el ciclo de vida como una secuencia de etapas interconectadas que comienzan con la extracción de materia prima o creación del producto a partir de recursos naturales y terminan con actividades de disposición final como el reciclado o la gestión de residuos (Figura 2.1).

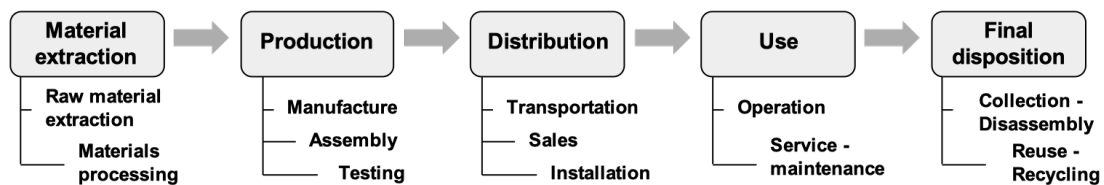


Figura 2.1. Fases del ciclo de vida de un producto (adaptada de ISO, 2006a).

La literatura científica que tiene como objetivo evaluar la sostenibilidad ha puesto especial atención en los sistemas de tipo producto. Sin embargo, los sistemas de tipo servicio no han recibido el mismo interés, hay muchos menos casos analizados y se centran habitualmente en el estudio de la etapa operativa. Puesto que en un PSS intervienen tanto productos como servicios, para evaluar la sostenibilidad de PSS es necesario tener en cuenta los ciclos de vida de todos los sistemas que lo componen y las relaciones que se establecen entre las diferentes etapas de los sistemas.

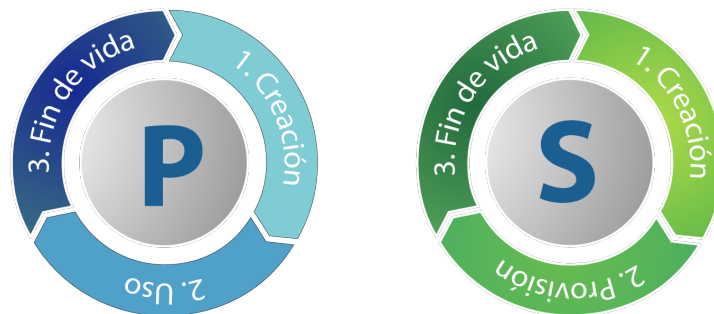
Para describir el ciclo de vida de cualquier sistema se propone un esquema simplificado, que parte de las etapas que intervienen en el ciclo de vida de un producto y las agrupa en tres:

1. La etapa de uso, donde se lleva a cabo el objetivo primordial de ese producto, es decir, satisfacer unas necesidades o cumplir una función;
2. Una etapa anterior al uso (creación), donde se incluyen las fases de extracción de materias primas, fabricación y distribución;
3. Una etapa posterior al uso, que consiste en la disposición y tratamiento final del producto una vez ha terminado su vida útil.

Estas tres etapas principales en un sistema producto: 1. Creación, 2. Uso y 3. Fin de vida se muestran en la Figura 2.2a.

Teniendo en cuenta que proporcionar satisfacción o crear utilidad es el objetivo primordial tanto de productos como de servicios, se propone un esquema similar para describir el ciclo de vida de un sistema servicio con tres etapas principales: 1. Creación, 2. Provisión y 3. Final de vida (Figura 2.2b).

La etapa de provisión del servicio consiste en satisfacer las necesidades del consumidor por parte del proveedor. En la etapa de creación se realizan las actividades necesarias para llevar a cabo la provisión del servicio en condiciones óptimas. Cuando la provisión del servicio termina, la etapa de fin de vida incluye todas las actividades necesarias para realizar el tratamiento satisfactorio de todos los materiales y recursos que han sido utilizados.



a) Ciclo de vida de un sistema producto.      b) Ciclo de vida de un sistema servicio.

Figura 2.2. Esquemas de ciclo de vida.

Estos esquemas genéricos, describen el ciclo de vida de sistemas producto (P) y sistemas servicio (S), mostrando la similitud en el desarrollo de etapas y son utilizados en este trabajo de investigación para mostrar la estructura básica de PSS de acuerdo a un enfoque de flujos entre sistemas.

## 2.2. Flujos entre sistemas

La gran mayoría de los estudios que tratan los PSS lo hacen desde una perspectiva económica y profundizan en las consecuencias que tiene su desarrollo en una economía basada principalmente en el consumo de productos. El objetivo de esta investigación es cuantificar la sostenibilidad de un PSS, y para ello se considera imprescindible plantear un esquema básico para describir su estructura y las relaciones que se establecen entre los diferentes sistemas componentes.

Diferentes autores coinciden en definir PSS como una combinación de productos tangibles y servicios intangibles diseñada para satisfacer las necesidades de usuarios y consumidores. Y también en considerar que todo producto requiere algún tipo de servicio y que todo servicio está basado en el uso de productos. Por esta razón, entre los productos y servicios que forman parte de un PSS se establecen diferentes flujos de entrada y salida que los conectan.

Además, desde un punto de vista organizativo, en un PSS se pueden diferenciar dos tipos de sistemas: el sistema principal objeto de estudio (Foreground System, FS) y los sistemas secundarios (Background System, BS), que son los sistemas que soportan el desarrollo del sistema principal. En la Figura 2.3 se muestra un esquema general del flujo de sistemas secundarios (BS) que entran o salen en el sistema principal (FS). Este flujo se puede producir a lo largo de cualquier etapa del ciclo de vida.

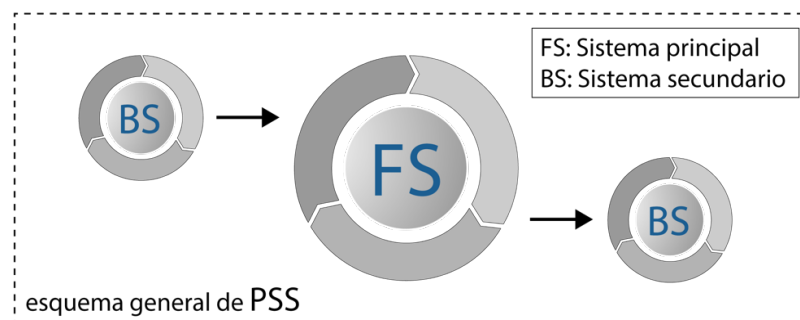


Figura 2.3. Flujo entre sistemas en un PSS.

El sistema principal puede ser un sistema producto o un sistema servicio. De la misma forma, los sistemas secundarios pueden ser sistemas producto o sistemas servicio que intervienen en alguna de las etapas del ciclo de vida del sistema principal. A continuación, en la Figura 2.4 se muestran una serie de ejemplos prácticos de PSS en los que se combinan productos y servicios (son designados como i, ii, iii, iv, respectivamente).

Se pueden diferenciar PSS donde FS es un producto y PSS donde FS es un servicio. En ambos casos, se necesitan y/o se generan diferentes BS. Los sistemas que intervienen en los ejemplos son los siguientes:

- i) FS: sistema caldera de gas (producto); BS: sistema servicio de mantenimiento.
- ii) FS: sistema vino (producto); BS: sistema bagazo (producto).
- iii) FS: sistema escuela de idiomas (servicio); BS: sistema proyector (producto).
- iv) FS: sistema peluquería (servicio); BS<sub>1</sub>: tintes y BS<sub>2</sub>: pelo (productos).



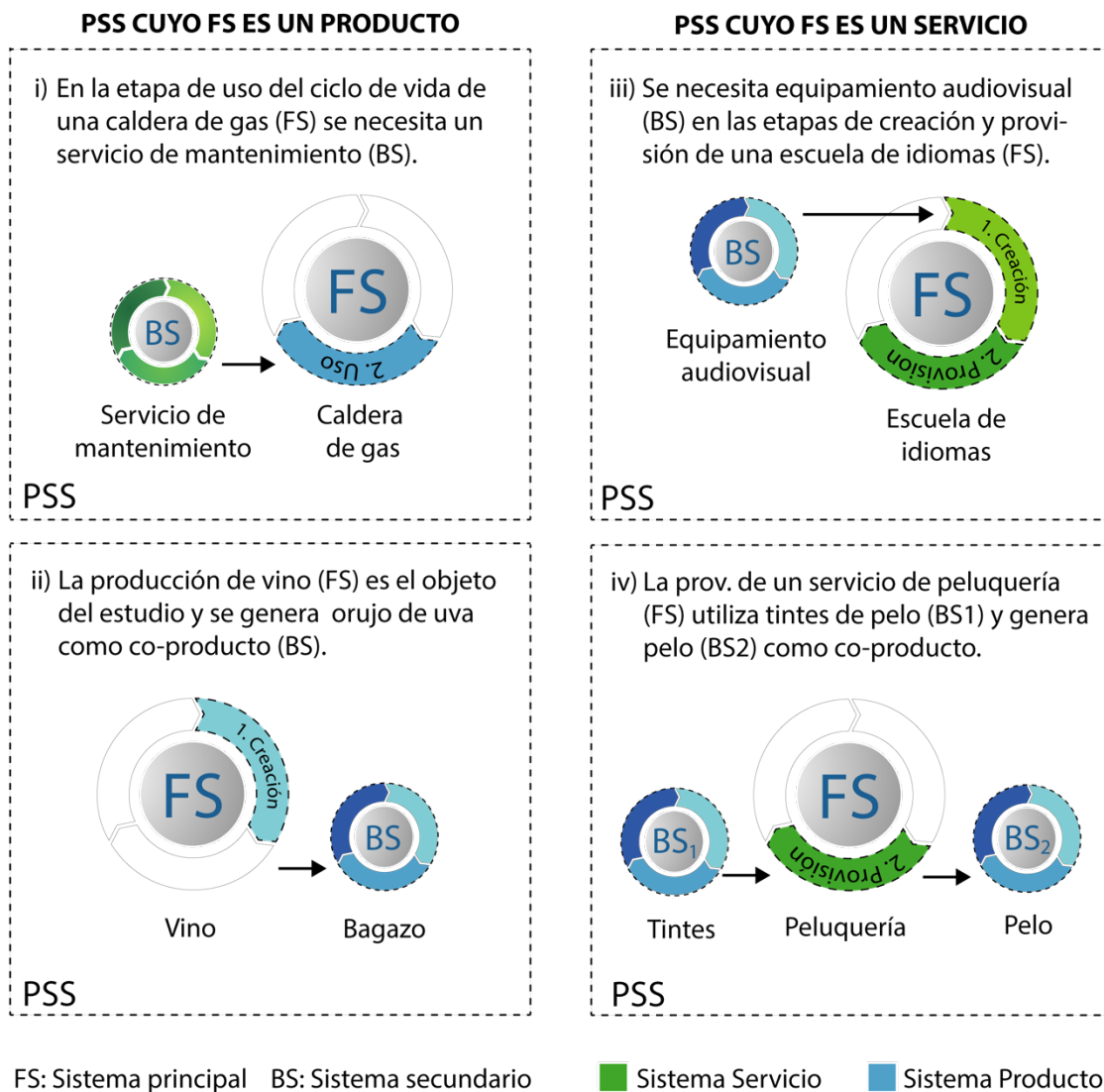


Figura 2.4. Flujos entre sistemas en un PSS. Ejemplos.

En cada caso, los BS intervienen en una o varias de las etapas del ciclo de vida de FS. Estas etapas de FS se resaltan con color. Son las siguientes:

- i) Etapa de uso de la caldera. Requiere un servicio de mantenimiento;
- ii) Etapa de producción de vino. Genera como co-producto bagazo.
- iii) Etapas de creación y operación de la escuela de idiomas. Requiere la instalación y uso de un equipo audiovisual.
- iv) Etapa de provisión del servicio de peluquería. Requiere tintes y genera pelo.

Estos esquemas describen la estructura combinativa de sistemas en un PSS. Muestran cómo es su organización basada en un sistema principal, permiten identificar las conexiones entre sistemas y facilitan la definición de los límites de estudio.

### 2.3. Aplicación de LCSA a PSS

La metodología LCSA es el marco de trabajo en el que se basan diferentes investigadores para analizar y evaluar la sostenibilidad de una forma sistemática. LCSA evalúa impactos y proporciona directrices para el desarrollo de productos y servicios sostenibles combinando tres técnicas de evaluación del ciclo de vida: E-LCA, LCC y S-LCA, que se refieren a cada una de las dimensiones que comprende la sostenibilidad. E-LCA (Environmental Life Cycle Assessment), o también LCA, se centra en los aspectos medioambientales. LCC (Life Cycle Costing) reúne y evalúa los aspectos económicos. S-LCA (Social Life Cycle Assessment) trata de evaluar el impacto sobre las diferentes organizaciones y agentes sociales. Este planteamiento es expresado como:  $LCSA = LCA + LCC + S-LCA$ .

Su desarrollo se basa en cuatro fases (Figura 2.5):

1. Definición de objetivos y alcance.

Se define el alcance del estudio, la unidad funcional (Functional Unit, FU) respecto a la que se expresa el funcionamiento del sistema, las categorías de impacto a evaluar y los procedimientos de asignación de recursos.

2. Análisis de inventario.

Se recopilan todas las entradas y salidas del sistema analizado teniendo en cuenta el estudio de las tres dimensiones (ambiental, económica y social). Supone determinar materiales y recursos utilizados, identificar flujos económicos y actores implicados.

3. Evaluación del impacto.

Se obtienen indicadores que representan los impactos del sistema en cada dimensión. Preferentemente se utilizan indicadores cuantitativos, aunque en la valoración de aspectos sociales también se suelen utilizar indicadores semi-cuantitativos o cualitativos.

4. Interpretación de resultados.

Se analizan los resultados obtenidos (etapas determinantes, factores decisivos, indicadores relevantes, ...) y se proponen recomendaciones para un posterior proceso de toma de decisiones.

Esta metodología es relativamente reciente (**Kloepffer, 2007; Finkbeiner et al., 2010**). Se utiliza cada vez más en el análisis de sistemas producto y tiene una aplicación todavía muy limitada en sistemas servicio. Su aplicación a PSS implica tener en cuenta aspectos específicos relacionados con la combinación de varios sistemas.

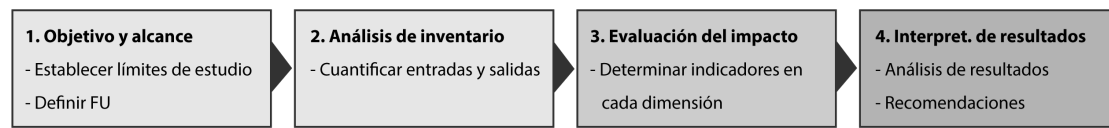


Figura 2.5. Fases de desarrollo de la metodología LCSA.

Un aspecto crítico es la definición de la unidad funcional. FU cuantifica la función primaria del sistema y permite expresar y comparar resultados de sostenibilidad. **Doualle et al., (2015)** indica que cuando se tiene que definir FU en un PSS, ésta debe describir la funcionalidad del sistema incluyendo productos y servicios. Además, para evaluar impactos en sistemas que generan co-productos, se debe establecer la asignación o división de los flujos entre el sistema principal y el resto de sistemas. **Weidema, (1999)** indica que la asignación requiere un adecuado conocimiento de las proporciones de utilización. La aplicación de ponderaciones físicas o económicas permite ajustar la implicación de un sistema en un PSS y su incidencia final en su sostenibilidad.

De acuerdo con el enfoque previamente expuesto basado en los flujos entre sistemas y teniendo en cuenta que la identificación de FU y establecer asignaciones son cuestiones relevantes para una adecuada evaluación de la sostenibilidad de PSS, se incluyen una serie de cuestiones que deben ser específicamente tratadas en cada fase de la metodología LCSA:

1. Definición del objetivo y alcance.

Identificar FS y BSs. Establecer relaciones entre sistemas y límites de estudio. Definir FU referida a productos y a servicios.

2. Análisis de inventario.

Obtener datos de inventario de cada uno de los sistemas del PSS. Se pueden expresar de acuerdo a la unidad de referencia que cuantifica cada proceso o actividad.

3. Evaluación del impacto del PSS.

Determinar indicadores en cada dimensión expresados de acuerdo a la FU definida. La asignación se debe aplicar en los sistemas que generan co-productos.

4. Interpretación de resultados.

Analizar el impacto de cada sistema. Analizar la sensibilidad a diferentes factores.

La Figura 2.6 resume las actividades a realizar en cada fase de la metodología LCSA para evaluar la sostenibilidad de un PSS.

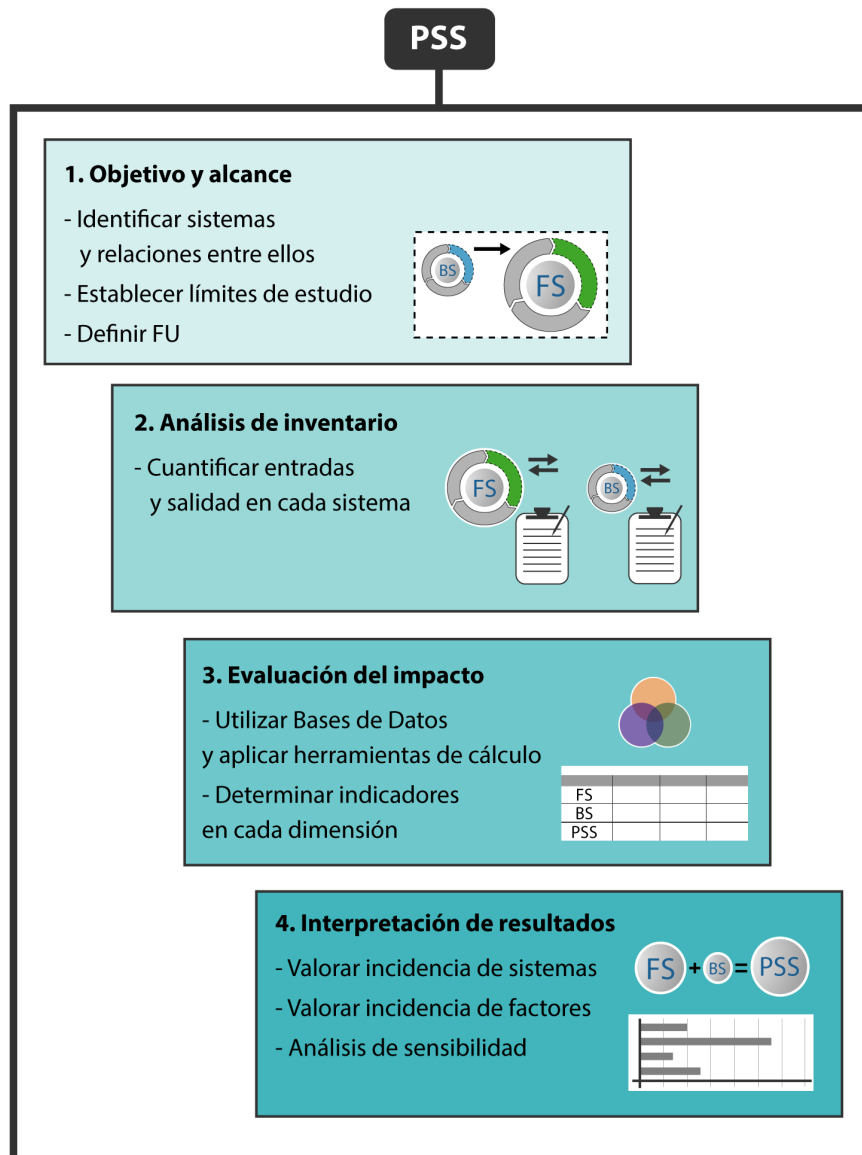


Figura 2.6. Fases de desarrollo de la metodología LCSA aplicada a PSS.

## 2.4. Indicadores de sostenibilidad

Los indicadores que miden la sostenibilidad de un sistema pueden cubrir un amplio número de categorías y de sub-categorías, tanto para analizar la dimensión medioambiental como para los aspectos socio-económicos. La selección debe ajustarse a los objetivos y alcance del estudio. En este trabajo de investigación se han seleccionado indicadores cuantitativos que permitan valorar y comparar resultados fácilmente con los de otros sistemas similares o con sistemas a los que se aplican estrategias de mejora.

La dimensión medioambiental se puede medir a través del uso de indicadores 'midpoint', con un indicador diferente para cada categoría de impacto, o indicadores 'endpoint' que agrupan diferentes categorías de impacto en un único indicador. En la Tabla 2.1, se muestran las categorías consideradas en cada uno de estos métodos.

Método CML, 'midpoint' (Guinée et al., 2001)	Método EI99, 'endpoint' (Goedkoop and Spriensma, 2000)
<p>A. Baseline impact categories:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>· Depletion of abiotic resources (AD)</li> <li>· Impacts of land use (LU)</li> <li>· Climate change (GWP)</li> <li>· Stratospheric ozone depletion (OD)</li> <li>· Human toxicity (HT)</li> <li>· Ecotoxicity (ET):                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Freshwater aquatic ecotoxicity (FAET)</li> <li>- Marine aquatic ecotoxicity (MAET)</li> <li>- Terrestrial ecotoxicity (TET)</li> </ul> </li> <li>· Photo-oxidant formation (PO)</li> <li>· Acidification (A)</li> <li>· Eutrophication (E)</li> </ul> <p>B. Study-specific impact categories: Land use/ Ecotoxicity/ Ionising/ Radiation/ Odour/ Noise/ Waste heat/ Casualties</p> <p>C. Other impact categories: Depletion of biotic resources/ Desiccation</p>	<p>Human health damage</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>· Smog and air pollution (IR)</li> <li>· Health damaging substances (HD)</li> <li>· Carcinogens (C)</li> </ul> <p>Ecological damage</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>· Global warming potential (GWP)</li> <li>· Ozone depletion (OD)</li> <li>· Acid rain (A)</li> <li>· Water eutrophication (E)</li> <li>· Habitat alteration or land use (LU)</li> <li>· Ecotoxicity (ET)</li> </ul> <p>Resource depletion</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>· Fossil fuels (Fuels)</li> <li>· Fresh water (WU)</li> <li>· Minerals (M)</li> <li>· Topsoil (T)</li> </ul>

Tabla 2.1. Categorías de impacto ambiental en diferentes métodos.

En este trabajo se selecciona un método 'midpoint' y los indicadores Potencial de Calentamiento Global (Global Warming Potential,  $GWP_{100}$ ), Acidificación (Acidification, Ac) y Energía Global (Global Energy, GE).  $GWP_{100}$  representa las emisiones totales de los gases de efecto invernadero y es el indicador más utilizado en estudios de sostenibilidad. Ac es utilizado frecuentemente para mostrar el impacto medioambiental de las actividades agrícolas y ganaderas y GE es un indicador que se utiliza habitualmente en actividades de transporte, fabricación y construcción. La definición de estos indicadores se muestra en la Tabla 2.2 y han sido seleccionados de acuerdo con los casos de estudio que van a ser tratados.

Los indicadores unitarios medioambientales de una variedad de productos y servicios básicos se pueden obtener de diferentes bases de datos. Éstas han sido desarrolladas en las últimas décadas basadas principalmente en los datos promedio de una producción y unas condiciones de abastecimiento promedio. En este trabajo, se utilizan las siguientes bases de datos: Agri-footprint (Durlinger et al., 2017) y Probas (UBA, 2007).

Además, se ha utilizado el módulo medioambiental del software CYPE Ingenieros para evaluar los impactos de los proyectos de construcción, el programa International Environmental Product Declaration (EPD) System (EPD, 2020) se ha aplicado para determinar consumos de energía de la producción de prendas y los factores de emisión de las empresas eléctricas que operan en España (Mapama, 2018) se han utilizado para obtener las emisiones de gases de efecto invernadero debidas al consumo de energía o de uso de combustible.

Para evaluar las dimensiones económica y social, se proponen diferentes indicadores que informan y cuantifican los datos globales de cada sistema de estudio (Tabla 2.2). En concreto, se utilizan los siguientes indicadores económicos: el coste de ejecución ( $C_E$ ) que expresa los costes totales para desarrollar una actividad y la eco-eficiencia (EE) que combina aspectos económicos y medioambientales (Ng et al., 2015). Por otro lado, se selecciona la categoría de trabajadores para evaluar la dimensión social de la sostenibilidad (UNEP/SETAC, 2011) y se utilizan los indicadores cuantitativos de tiempo de trabajo (Working Time,  $T_w$ ) y el salario (Working Salary,  $S_w$ ) para valorar el impacto social. Se considera que la categoría de los trabajadores es la más directamente implicada en los PSS objeto de estudio. Sin embargo, para realizar una exhaustiva evaluación de la sostenibilidad sería necesario tener en cuenta el estudio de otros grupos de stakeholders.

Dimensión medioambiental		
$GWP_{100}$ (kgCO <sub>2</sub> -eq)	Potencial de Calentamiento Global. Emisiones totales de gases de efecto invernadero calculando la fuerza radiactiva a lo largo de un horizonte de tiempo de 100 años.	
$Ac$ (gSO <sub>2</sub> -eq)	Acidificación. Indica la reducción de pH debido a las emisiones de gases ácidos como los óxidos de nitrógeno (NO <sub>x</sub> ) y los óxidos de sulfuro (SO <sub>x</sub> ).	
$GE$ (MJ)	Energía Global. Consumo de energía considerando el uso de la electricidad como valor calorífico neto de recursos.	
Dimensión económica		
$C_E$ (€)	Coste de ejecución. Expresa el coste total para desarrollar una actividad.	
$EE$ (€/kgCO <sub>2</sub> -eq)	Eco-eficiencia. Ratio entre $C_E$ y $GWP_{100}$ . Permite una comparación sencilla entre los impactos económicos y ambientales.	
Dimensión social		
$T_w$ (h)	Tiempo de trabajo. Tiempo requerido por los trabajadores para desarrollar una actividad.	Categoría de trabajadores
$S_w$ (€)	Salario de los trabajadores implicados en el desarrollo de una actividad.	

Tabla 2.2. Indicadores seleccionados para evaluar la sostenibilidad de PSS.

A la hora de presentar los resultados de sostenibilidad, se puede optar por analizar de forma individual los indicadores de cada dimensión o por obtener un solo indicador que agrupe resultados de diferentes dimensiones. Se propone la utilización de ambos métodos:

- Presentación individual de indicadores. Permite comparar los resultados con otros sistemas similares, la representación gráfica de la distribución de factores afectando a ese indicador permite detectar focos de impacto y permite analizar la sensibilidad del indicador a la variación de un determinado factor.
- Presentación combinada de resultados en un solo indicador de sostenibilidad. Facilita la interpretación global de resultados y la toma de decisiones cuando se plantean procesos de mejora. Requiere aplicar unos coeficientes de ponderación para cada dimensión o para indicador.

El indicador global de sostenibilidad del sistema se puede determinar aplicando diferentes ponderaciones a cada dimensión. Se han considerado 4 posibilidades de acuerdo con las siguientes hipótesis:

- Caso 1: se da la misma importancia a las tres dimensiones. Por tanto, a cada uno de los indicadores de sostenibilidad se le asigna un coeficiente de ponderación de 0.33.
- Casos 2, 3 y 4: en cada uno de estos casos se establece una dimensión dominante a la que se le asigna un coeficiente de 0.5, mientras que al resto de dimensiones se le asigna un coeficiente de 0.25.

Estos coeficientes de ponderación pueden ser modificados de acuerdo a criterios preferentes o dominantes.

## **2.5. Metodología de evaluación y mejora de la sostenibilidad en PSS**

A partir de los datos de sostenibilidad del PSS y de la distribución de factores de impacto obtenidos en el proceso de evaluación, se puede plantear la mejora del sistema (tanto existente como en proyecto). En un proceso de rediseño de producto aplicando estrategias de sostenibilidad (Figura 2.7), es imprescindible mantener una serie de requerimientos previamente establecidos en el diseño inicial. Se plantean diferentes alternativas basadas en estrategias que permitan reducir los impactos más significativos del sistema. Se evalúa la sostenibilidad de la alternativa de seleccionada y finalmente se realiza su estudio comparativo con el sistema inicial.



Figura 2.7. Fases de rediseño de producto.

Este planteamiento es aplicado en la mejora de la sostenibilidad de un PSS y se desglosa en tres etapas principales (Figura 2.8):

### 1) Evaluación de la sostenibilidad en el PSS inicial ( $PSS_0$ )

Se aplica la metodología LCSA de acuerdo con el desarrollo secuencia de 4 fases y teniendo en cuenta aspectos específicos de PSS. En su fase final de interpretación de resultados, se analizan los indicadores de sostenibilidad del PSS y se detectan los factores que generan mayor impacto.

### 2) Aplicación de estrategias de mejora en $PSS_0$ y evaluación del nuevo PSS ( $PSS_1$ )

Se proponen diferentes alternativas de mejora a partir de la aplicación de estrategias de sostenibilidad. Se justifica el cumplimiento de las especificaciones iniciales del sistema y se excluyen las alternativas que no las cumplen. Se evalúa la sostenibilidad del PSS obtenido tras la aplicación de las estrategias de mejora.

### 3) Comparación de resultados

Se analiza la variación de los indicadores de sostenibilidad a través de la presentación comparativa de resultados obtenidos en  $PSS_0$  y  $PSS_1$ . Se valoran los cambios producidos. Una mejora de la sostenibilidad puede estar asociada al incremento o reducción del indicador. El indicador medioambiental,  $GWP_{100}$ , el indicador económico,  $C_E$ , y el indicador social,  $T_w$ , expresan impactos negativos, de manera que su reducción será tomada como un resultado favorable.



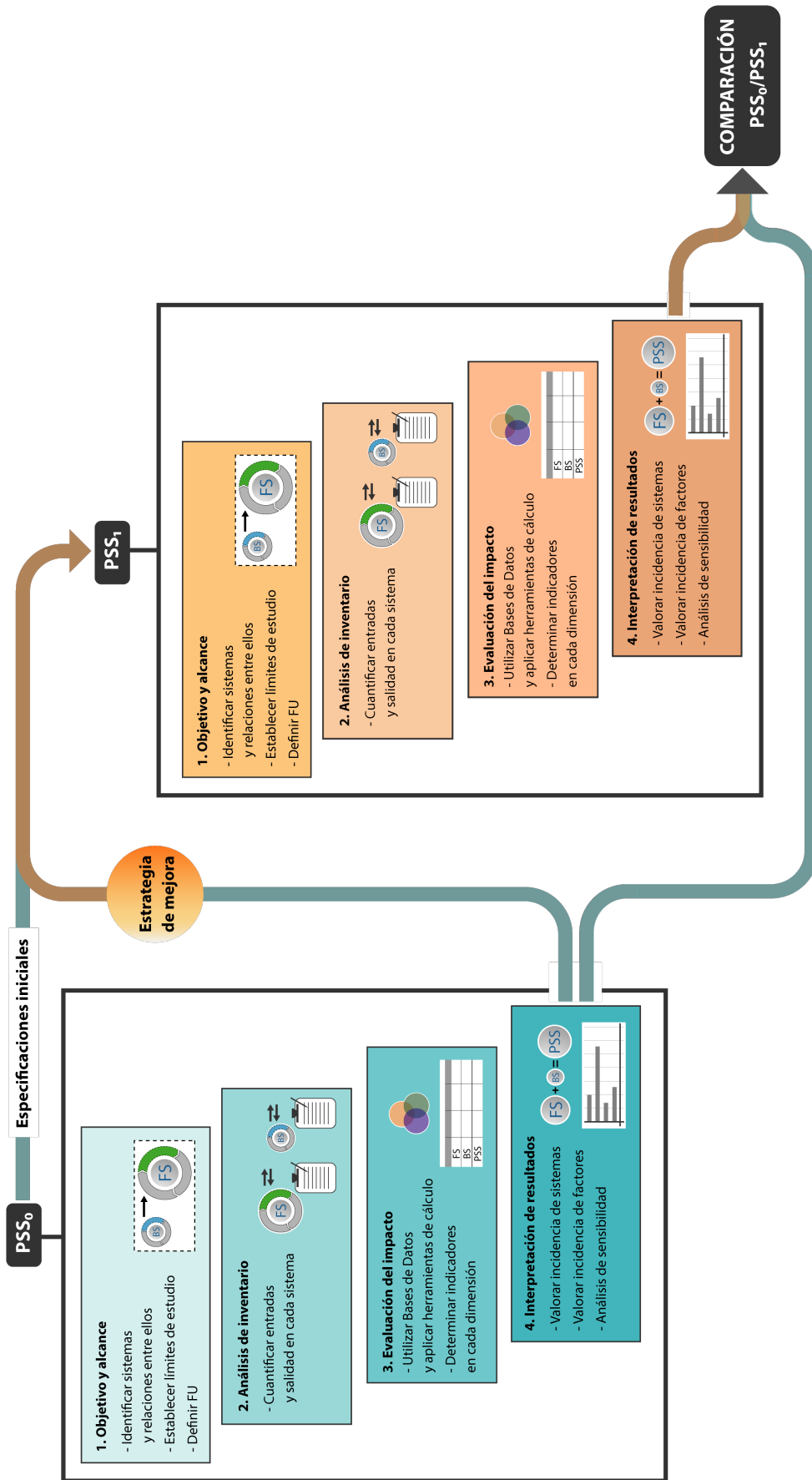


Figura 2.8. Esquema metodológico para la evaluación y mejora de la sostenibilidad en PSS.

## Capítulo 3

# Casos de estudio. Evaluación de la sostenibilidad

---

La metodología expuesta previamente se pone en práctica a través de dos casos de estudio con el objetivo de analizar la incidencia de cada uno de los sistemas que componen un PSS y detectar los factores con mayor impacto en la sostenibilidad.

En el Caso 1, se estudia un PSS relacionado con el ámbito agropecuario. El objetivo principal es estudiar la producción de leche en una granja de ganado vacuno. De esta manera el sistema principal del PSS es un producto, la leche. Además, se consideran dos sistemas secundarios, un servicio veterinario y otro producto que se genera simultáneamente con la leche (estiércol).

En el Caso 2, se estudia un PSS cuyo sistema principal es un servicio de venta de prendas de ropa. Por tanto, la actividad principal se desarrolla en el ámbito de la distribución y comercialización de productos. Además, se considera como sistema secundario el local comercial donde se desarrolla el servicio. La evaluación se centra en las etapas de creación y operación del servicio.

## CASO 1 - PRODUCCIÓN DE LECHE

En este caso se evalúa la sostenibilidad del proceso de obtención de leche en una explotación de ganado vacuno. En la cadena de suministro de la leche, se suelen considerar las siguientes fases: i) producción de alimento para las vacas; ii) producción de leche; iii) transporte de la leche desde las granjas hasta las empresas de procesado; iv) procesado y envasado; v) distribución a los vendedores; vi) consumo. El estudio se centra en la fase de producción. Otras fases como el procesado de la leche, envasado y distribución no son analizadas. La Figura 3.1 presenta el sistema principal y las fases del ciclo de vida objeto de estudio.

En el proceso de obtención de leche intervienen también otros sistemas. En el estudio se consideran dos. Por una parte, se requiere un servicio veterinario para asegurar la salud de los animales. Este sistema secundario interviene como un sistema o flujo entrante. Por otra parte, en la explotación lechera se obtiene también estiércol como producto adicional o co-producto. Este sistema secundario es un sistema o flujo de salida. En la Figura 3.1 se muestra un esquema del Sistema Producto-Servicio resultante, en el que dos sistemas de fondo (servicio veterinario,  $BS_1$ , y estiércol,  $BS_2$ ) intervienen en el sistema principal. Otros sistemas quedan fuera de los límites de estudio.

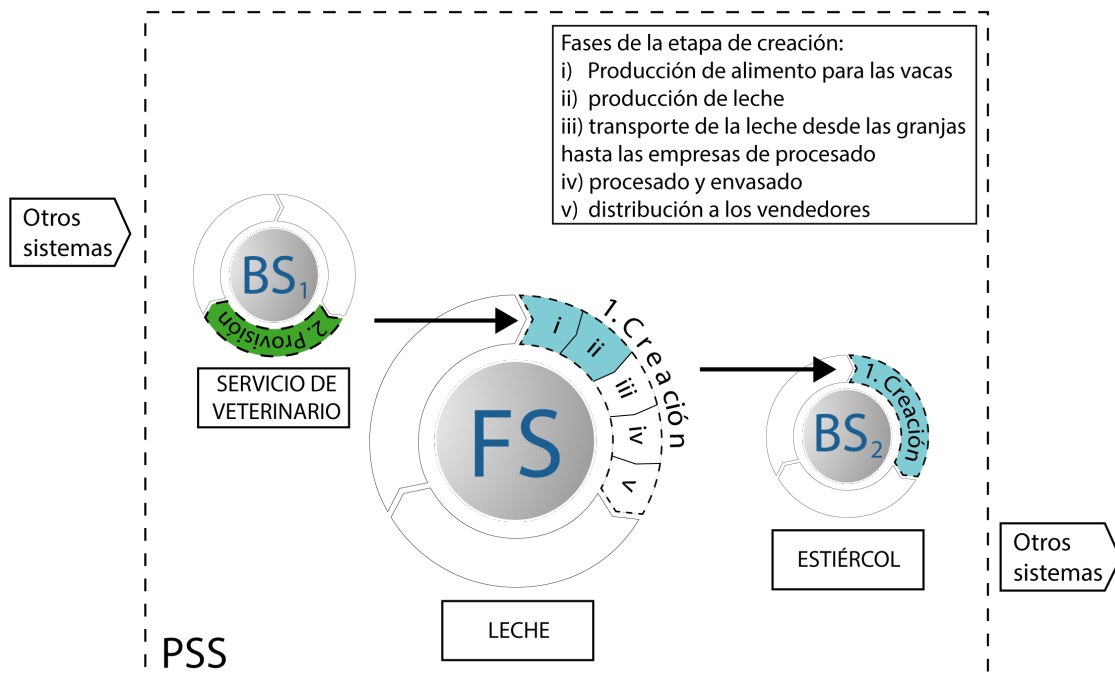


Figura 3.1. Producción de leche. Sistemas y etapas del ciclo de vida objeto de estudio.

El estudio se ha llevado a cabo en una explotación láctea situada en la Comunidad Autónoma de Aragón. Se trata de una granja de carácter intensivo, por tanto, las vacas se encuentran en un recinto acondicionado. Es una explotación de tamaño pequeño-medio, con 38 vacas, y la producción media diaria es de 1064 litros. El número de ordeños puede variar de acuerdo al rendimiento a obtener.

### **Caso 1 - 1. Objetivo y alcance**

El objetivo es obtener indicadores que permitan evaluar de forma cuantitativa la sostenibilidad del PSS en sus tres dimensiones: ambiental, económica y social. El Sistema se compone de un sistema principal (leche) y dos sistemas de fondo (servicio veterinario y estiércol). Las etapas del ciclo de vida que se evalúan son: etapa de producción en el caso de los sistemas leche y estiércol y etapa de operación en el caso del servicio veterinario.

### **Caso1 - 2. Inventario**

En esta fase se recopilan las entradas y salidas generadas por las actividades propias de la explotación durante un periodo de 6 meses. Estas actividades consisten principalmente en tareas de alimentación y ordeño de los animales y tareas de mantenimiento y limpieza del recinto. En la Figura 3.2 se muestra un esquema del proceso productivo, con las entradas y salidas que intervienen en el sistema. Se indica la cantidad de cada una de las materias primas utilizadas en el proceso de obtención de leche y las correspondientes salidas de productos y subproductos. Se muestran los consumos de energía en cada actividad y el consumo global de energía a lo largo del proceso productivo. Además se muestran los principales flujos económicos intercambiados por el sistema. Todos los datos se expresan por litro de leche producido.

Las entradas se pueden clasificar en materia prima utilizada en la alimentación de los animales (ensilado de maíz, pienso, alfalfa y agua); productos para la limpieza de los equipos de extracción y almacenamiento de la leche (agua, jabón, ácido y protector), medicinas, paja para el acondicionamiento de la instalación y gasóleo para el funcionamiento de los tractores. Cada animal en fase de producción requiere por día, en torno a 40 Kg de comida y entre 80 y 100 litros de agua, dependiendo de la estación del año. En la limpieza se emplea agua acompañada de un detergente y un ácido de desinfección específico.

Además, dentro de las entradas al sistema, se contabiliza el consumo de energía en los diferentes equipos utilizados para el desarrollo de las actividades dentro de la explotación láctea (dos calentadores de agua, de 100 y 50 litros cada uno, máquina de ordeño, tanque de almacenamiento y refrigeración de leche).

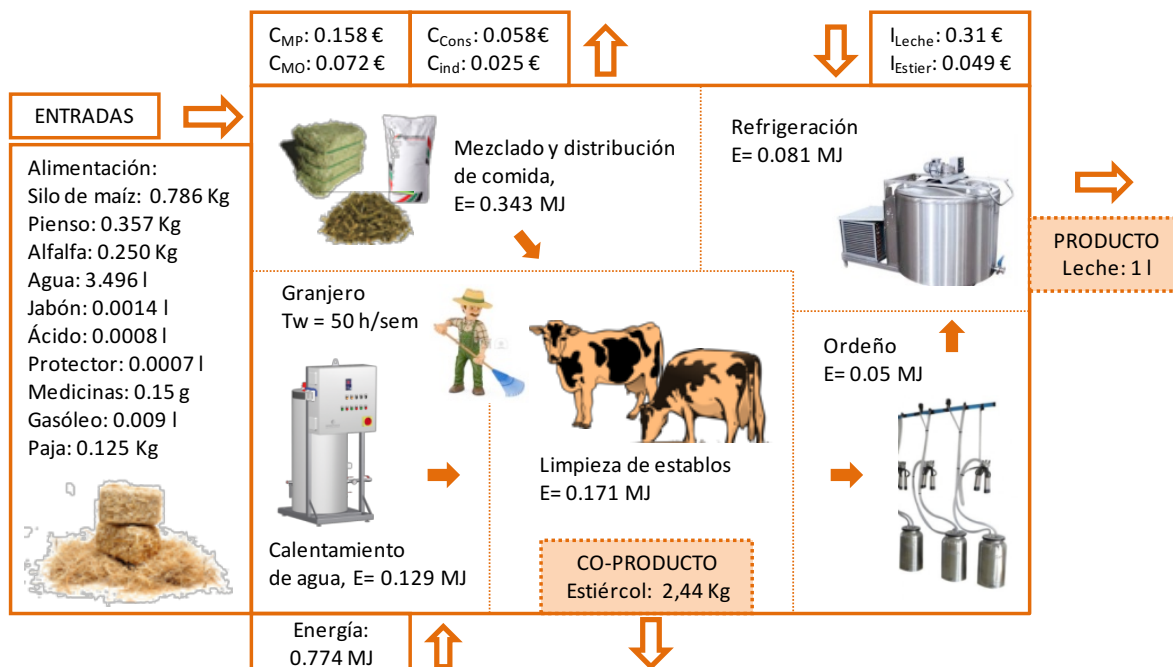


Figura 3.2. Producción de leche. Esquema de producción y resumen de inventario.

En la Tabla 3.1 se indican, para cada una de las actividades que intervienen en el proceso productivo, los recursos utilizados, el tiempo empleado y la energía consumida para obtener un litro de leche. Las tareas de preparación y distribución de la comida y de limpieza del recinto se realizan con la ayuda de dos tractores. Las actividades diarias de la explotación son realizadas por un trabajador con una dedicación de casi 50 h/semana.

Proceso	Máquina	n°	t <sub>proc</sub> (h)·10 <sup>-3</sup>	E <sub>proc</sub> (MJ)
Mezclado y distribución de comida	Fiat 780 e DT Massey Ferguson 6180	2	0.93	0.343
Ordeño	Máquina de ordeño DeLaval 6	1	3.75	0.05
Refrigeración y almacenamiento de leche	Tanque refrigeración Alfa-Laval 1700 l	1	11.4	0.081
Calentamiento de agua	Termo agua EDESA Capacidades: 50 y 100 l	2	10.9	0.129
Limpieza del recinto	Fiat 780 e DT	1	0.95	0.171

Tabla 3.1. Producción de leche. Datos del proceso productivo inicial.

La granja genera dos tipos de producto: leche (producto principal) y estiércol (co-producto). La producción diaria de leche por vaca es de 28 litros. Se obtiene a través de dos ordeños. El estiércol se obtiene tras la limpieza de la zona de estancia de las vacas. Éste se retira junto con la paja utilizada una vez cada dos días y se acondiciona el suelo con paja nueva y seca. Los ingresos de la explotación proceden de la producción de leche y de la recogida y venta de estiércol. El precio indicado para la leche según MAPAMA (Mapama, 2018) es de 0.31 €/l. Por otra parte, los ingresos por estiércol están en torno a los 20 € por tonelada (0.049 €/l). De esta forma, la proporción en la que cada sistema contribuye a los ingresos de la explotación es, respectivamente, 86.3 y 13.7%. Otros ingresos, como los que se obtendrían por la venta de animales no destinados a la producción de leche, quedan fuera del sistema de estudio y no han sido considerados.

Los costes de producción en la granja lechera se clasifican en cuatro grupos principales: costes debidos a la compra de alimentos, consumible (adquisición de otros materiales y electricidad), costes de mano de obra y costes indirectos (pago de seguros e impuestos). Otros costes debidos a la amortización de instalaciones y equipamiento quedan fuera del sistema de estudio. En la Tabla 3.2 se detallan los costes debidos a la compra de los componentes que forman parte de la alimentación. En cada caso, se indica la cantidad requerida para producir un litro de leche, el precio por unidad y el coste final.

Tipo de entrada	Componente	Cantidad (Kg)	Precio (€/ud)	C <sub>MP alim</sub> (€)
Materia prima alimentación	Ensilado de maíz	0.786	0.035	0.027
	Pienso	0.357	0.27	0.096
	Alfalfa	0.250	0.12	0.030
	Agua	3.214 l	0.001 €/l	0.004

Tabla 3.2. Producción de leche. Coste de materia prima utilizada en alimentación.

La actividad del veterinario fue también analizada con el objetivo de obtener los datos de inventario. Su trabajo se desarrolla dentro de un amplio territorio, en el que visita de forma regular 10 granjas, realizando una visita por semana a cada una de ellas. En sus desplazamientos, utiliza una furgoneta diesel y realiza un trayecto promedio de 110 Km en cada visita en el que consume 6.8 l de combustible. El tiempo total de trabajo incluye el tiempo de traslado (1.5 h) y el tiempo de prestación del servicio en la granja (2.5 h). Su tarifa es de 99.1 € por visita, lo que incluye mano de obra (70.6 €) y otros costes como el del material empleado y combustible.

### Caso 1 - 3. Evaluación de indicadores

La sostenibilidad del PSS y de cada sistema involucrado fue evaluada a través de un conjunto de indicadores. En la dimensión ambiental, se seleccionan los indicadores de calentamiento global ( $GWP_{100}$ ) y acidificación (Ac), ya que son indicadores habitualmente utilizados en el sector lechero. Se utiliza la base de datos Agri-footprint (**Durlinger et al., 2017**) para obtener los impactos unitarios de diferentes materias primas. Los datos correspondientes a indicadores unitarios pueden ser consultados en el **Anexo 1**. En la dimensión económica se utilizan como indicadores el coste de ejecución ( $C_E$ ) y la eco-eficiencia (EE) y en la dimensión social, el tiempo de trabajo ( $T_w$ ) y el salario de los trabajadores ( $S_w$ ).

Los indicadores resultantes se muestran en la Tabla 3.3. Los valores finales de emisiones de gases de efecto invernadero y acidificación son los siguientes:  $0.645 \text{ kgCO}_2\text{-eq}$  y  $13.28 \cdot 10^{-3} \text{ gSO}_2\text{-eq}$ . En la dimensión económica, los costes de ejecución son de  $0.326 \text{ €}$  y la eco-eficiencia global es de  $0.5 \text{ €/kgCO}_2\text{-eq}$ . En la dimensión social, el tiempo de trabajo total acumulado por el granjero y el veterinario es  $7.13 \cdot 10^{-3} \text{ h}$  y el salario acumulado es de  $0.081 \text{ €}$ . Todos los datos corresponden a la producción de un litro de leche que es la unidad funcional del PSS.

Los indicadores de sostenibilidad del servicio veterinario ( $BS_1$ ) muestran que la incidencia de este sistema es relativamente pequeña en las emisiones de efecto invernadero (0.31%) pero significativa en otros indicadores como acidificación (4.3%), costes de producción (3.9%) y tiempo de trabajo (7.4%). Por otra parte, en la producción conjunta de leche y estiércol se obtienen valores de  $0.643 \text{ kgCO}_2\text{-eq}$  en emisiones de efecto invernadero,  $0.313 \text{ €}$  en costes de producción y  $6.6 \cdot 10^{-3} \text{ h}$  en el indicador de tiempo de trabajo.

FU: 1 litro de leche						
Sistema	Dimensión medioambiental		Dimensión económica		Dimensión social	
	$GWP_{100}$ (kg CO <sub>2</sub> -eq)	Ac (g SO <sub>2</sub> -eq)·10 <sup>-3</sup>	$C_E$ (€)	EE (€/kg CO <sub>2</sub> -eq)	$T_w$ (h)·10 <sup>-3</sup>	$S_w$ (€)
(FS) Leche	0.557	10.9	0.270	0.53	5.7	0.062
(BS <sub>2</sub> ) Estiércol	0.086	1.8	0.043	0.53	0.9	0.010
(FS+BS <sub>2</sub> )	0.643	12.7	0.313	0.53	6.6	0.072
(BS <sub>1</sub> ) Veterinario	0.002	0.58	0.013	6.5	0.53	0.009
<b>PSS (FS+BS<sub>1</sub>+BS<sub>2</sub>)</b>	<b>0.645</b>	<b>13.28</b>	<b>0.326</b>	<b>0.50</b>	<b>7.13</b>	<b>0.081</b>

Tabla 3.3. Producción de leche. Indicadores de sostenibilidad.

Los indicadores de los sistemas leche y estiércol se expresan también de forma separada, teniendo en cuenta que contribuyen a los ingresos de la explotación con 86.3 y 13.7%, respectivamente. Por tanto, utilizando una ponderación con criterios económicos.

### Caso 1 - 4. Interpretación de resultados

En la Figura 3.3 se muestra la incidencia de diferentes factores en la sostenibilidad del PSS. En las Figuras 3.3a, 3b y 3c, se representan, respectivamente, la distribución porcentual de emisiones de gases de efecto invernadero, de costes de producción y de tiempo de trabajo. Además, en cada diagrama se indica la contribución porcentual de cada uno de los sistemas (FS y BSs) que interviene en el PSS. La contribución de FS (leche) y BS<sub>2</sub> (estiércol) se ha obtenido de acuerdo a la ponderación previamente indicada.

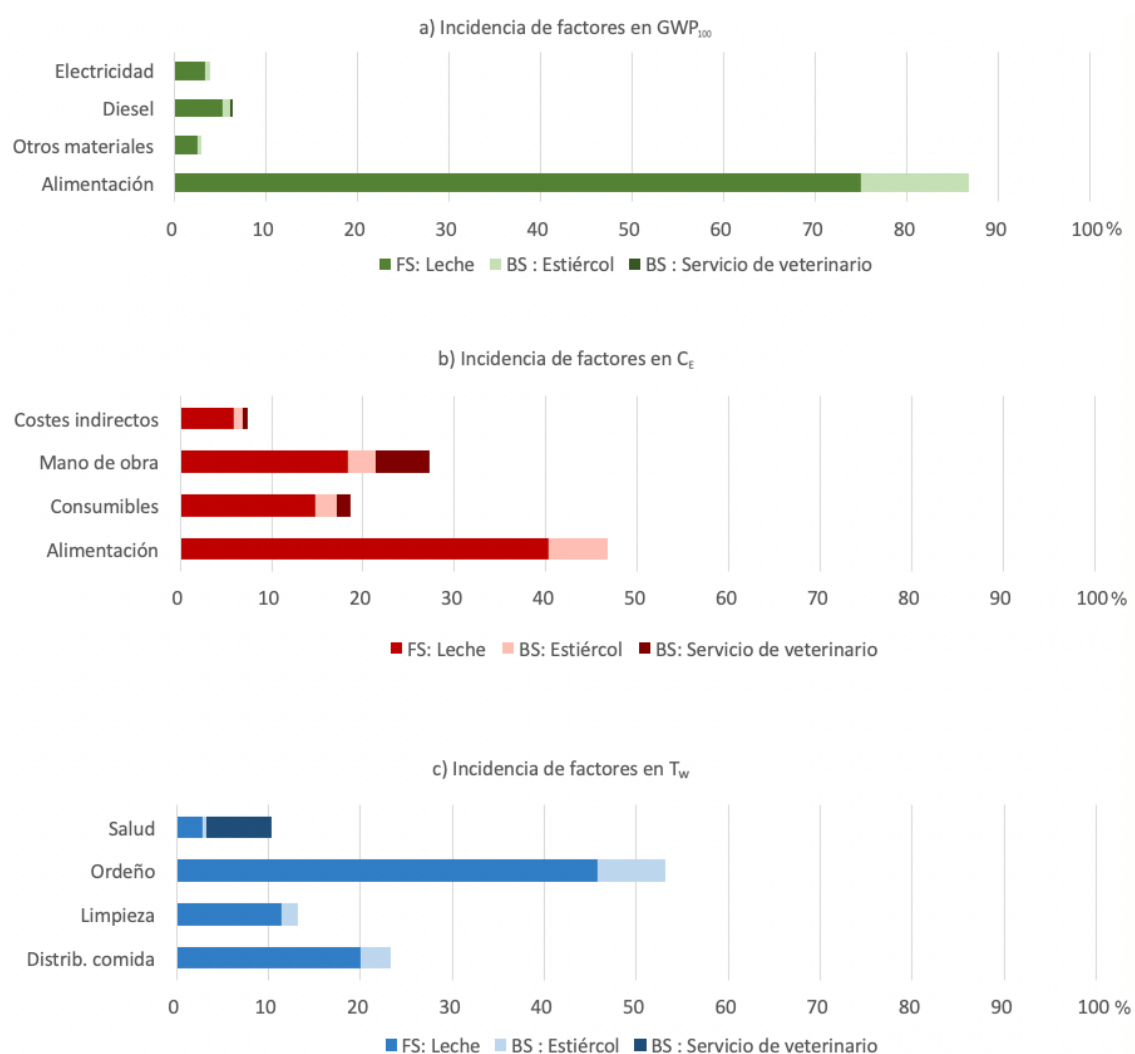


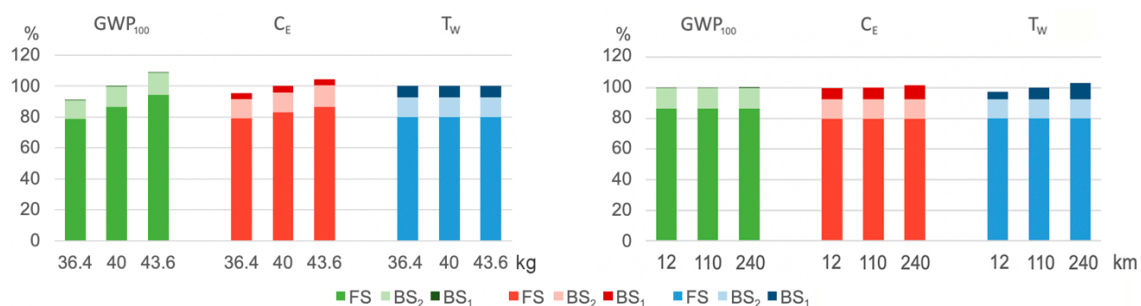
Figura 3.3. Producción de leche. Distribución porcentual de factores de impacto.



Se pueden destacar los siguientes resultados:

- La materia prima destinada a la alimentación tiene un elevado impacto ambiental (86.8%), mucho más elevado que el debido al consumo de otros materiales, electricidad o combustible. En particular, el ensilado de maíz (42%) y la alfalfa (24%) son los componentes de la alimentación con mayor incidencia. Las emisiones del sistema veterinario son debidas principalmente al consumo de combustible y tienen una contribución inferior al 0.3%.
- La alimentación tiene también una elevada incidencia en los costes (46.7%). Dentro de este tipo de costes, el del pienso es el más elevado. Supone el 28.5% de los costes totales. La mano de obra tiene una incidencia destacada (27.2%). Los costes del veterinario son especialmente significativos en el factor mano de obra.
- La actividad de ordeño es la actividad productiva con mayor incidencia en el tiempo de trabajo (53.1%), ya que implica tareas como la entrada, colocación y retirada de cada animal, pero otras actividades como las de distribución de comida (23.4%) y limpieza de establos (13.2%) son también relativamente importantes. También es notable el tiempo de trabajo del veterinario dentro de las actividades relacionadas con la salud animal.

Por otra parte, se ha realizado un análisis de sensibilidad para determinar la incertidumbre asociada con dos factores: la cantidad de comida consumida por los animales y la distancia que el veterinario tiene que conducir para visitar la granja. En primer lugar, se plantea una variación de  $\pm 9\%$  en la masa de alimento consumido. El efecto que esta variación tiene sobre los indicadores  $GWP_{100}$ ,  $C_E$  and  $T_W$  se muestra en la Figura 3.4a. Los resultados se comparan con los obtenidos en el caso base (40 Kg de comida por vaca y por día). Se detectan unas variaciones de  $\pm 7.6$  y  $\pm 4.2\%$  en los indicadores  $GWP_{100}$  y  $C_E$ , mientras que el indicador  $T_W$  no se ve prácticamente afectado.



a) Variación del consumo de comida.

b) Variación de la distancia que recorre el veterinario.

Figura 3.4. Producción de leche. Sensibilidad de indicadores de sostenibilidad.

En la Figura 3.4b se muestran los resultados del análisis de sensibilidad a la distancia recorrida por el veterinario. Dada la extensión del territorio y la alteración que puede experimentar el orden de las visitas, se considera una variación de la distancia en el rango 12-240 Km. El efecto es comparado con el caso base (110 Km). La variación de este factor genera pequeñas modificaciones en los indicadores  $C_E$  (-0.3 y +1.4%) y  $T_W$  (-2.5 y +3.2%). Mientras, en el indicador  $GWP_{100}$  las variaciones son mínimas.

### **Caso 1 - 5. Conclusiones del estudio**

Se ha evaluado la sostenibilidad de un PSS formado por un sistema principal y dos sistemas secundarios. El sistema principal se refiere al proceso de obtención de leche en una explotación de ganado vacuno y los sistemas secundarios considerados en el estudio son el servicio veterinario que atiende la salud de los animales y la obtención de estiércol como co-producto dentro de la explotación.

Se han obtenido indicadores que permiten cuantificar aspectos ambientales, económicos y sociales de la sostenibilidad. Se ha aplicado un enfoque de flujos entre sistemas que permite interpretar la relación entre los sistemas que integran el PSS y una metodología de evaluación basada en LCSA. La combinación de ambos facilita la definición de la unidad funcional, el establecimiento de los límites del sistema y el análisis de los resultados de sostenibilidad teniendo en cuenta la incidencia relativa de cada uno de los sistemas.

Respecto a los indicadores totales del PSS, el servicio veterinario tiene una incidencia significativa en los indicadores de acidificación (4.3%), costes de producción (3.9%) y tiempo de trabajo (7.4%). Por otra parte, la incidencia del sistema secundario estiércol se ha obtenido teniendo en cuenta que su contribución a los ingresos de la explotación es del 13.7%.

Se ha determinado la distribución porcentual de factores de impacto en indicadores de la sostenibilidad del sistema. Se comprueba que la materia prima utilizada en la alimentación de los animales es un factor crítico que supone el 86.8% de las emisiones de gases de efecto invernadero y el 46.7% de los costes de producción. El análisis de sensibilidad al consumo de alimento revela que estos indicadores pueden variar, respectivamente,  $\pm 7.6$  y  $\pm 4.2\%$ . Otro factor destacado en los costes es la mano de obra (27.2%). También se detecta que el 53.1% del tiempo de trabajo se dedica a la actividad de ordeño.

## CASO 2 – SERVICIO DE VENTA DE PRENDAS

En este caso se evalúa la sostenibilidad de un servicio de venta al por menor de prendas de vestir. Las etapas consideradas en el ciclo de vida del servicio son: 1. Implementación o creación; 2. Operación o provisión; 3. Desmantelamiento o fin de vida. En la etapa central de operación se proporciona un servicio de atención personalizada a clientes que desean adquirir prendas de vestir. En la etapa de creación se llevan a cabo las actividades necesarias para que el servicio pueda ser prestado bajo condiciones óptimas y, una vez que el servicio termina, en la etapa final de desmantelamiento, se realizan las actividades necesarias para el adecuado tratamiento de los materiales y recursos utilizados.

En la creación de la mayoría de los servicios basados en la venta de artículos, se requiere la transformación de un espacio de dimensiones conocidas en una tienda bien equipada y en el desmantelamiento del servicio se realiza el proceso de demolición y gestión de los residuos generados. De esta manera, en el desarrollo del servicio interviene otro sistema. Es el producto de construcción donde se lleva a cabo la atención comercial a clientes. De acuerdo al estándar **EN 15804:2012+A2:2019**, en un producto de construcción se establecen las siguientes etapas del ciclo de vida (Figura 3.5): A) Producto y proceso de construcción, B) Uso, C) Final de vida y D) Beneficios del potencial de reciclaje.

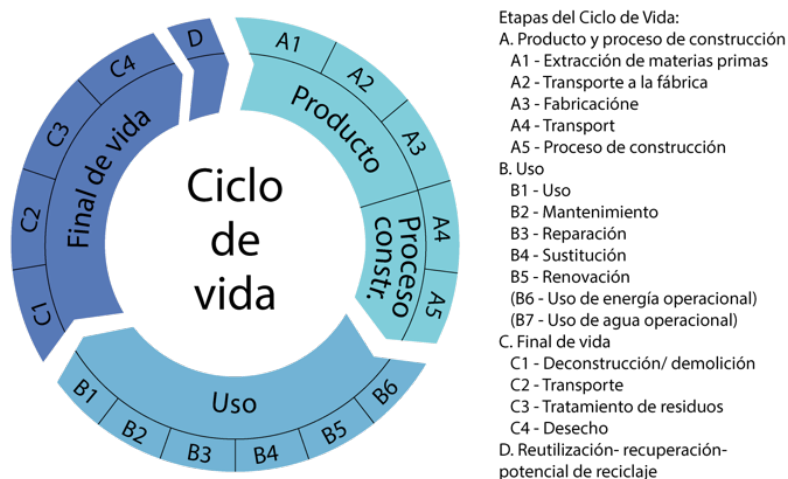


Figura 3.5. Etapas del ciclo de vida de un producto de construcción (EN 15804:2012+A2:2019).

En cada una de las etapas se incluyen una serie de fases. Las fases de producto, A1-3, se refieren a la extracción de materiales, transporte y manufactura. Las fases de proceso de construcción, A4-5, se asocian al transporte de los materiales manufacturados al lugar de construcción y a los procesos de construcción o instalación. Las fases de uso, B1-7, se desarrollan durante el uso operacional del producto de construcción. Las fases de final de vida, C1-4, se refieren al proceso de demolición, así como el transporte, procesado y disposición final de los residuos generados. Finalmente, la fase D tiene en cuenta los beneficios del potencial de reciclaje.

El PSS objeto de estudio está formado por un sistema principal (servicio de venta de prendas) y un sistema secundario (producto de construcción) y se muestra en la Figura 3.6a.

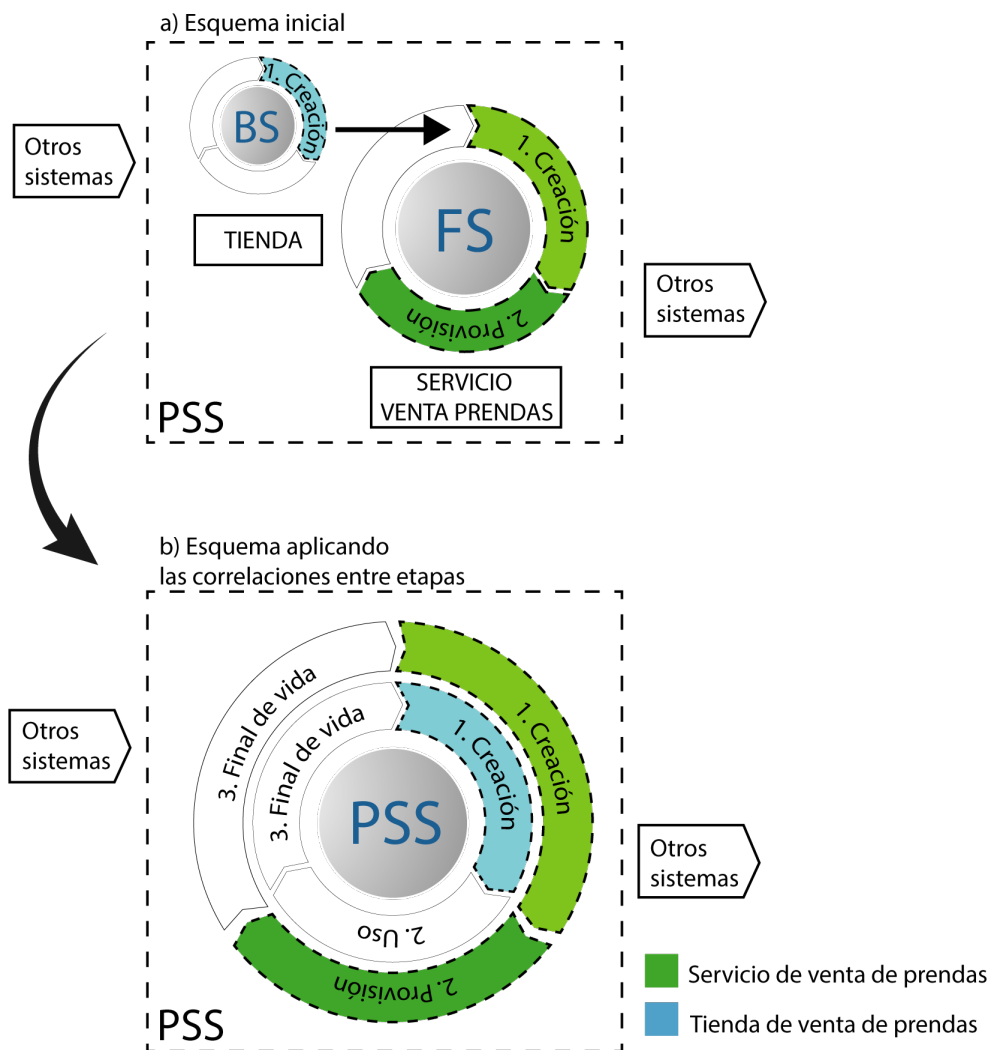


Figura 3.6. Servicio de venta de prendas. Sistemas objeto de estudio y correlaciones entre etapas del ciclo de vida.

En este caso, se establece una clara relación en el desarrollo de las etapas del ciclo de vida del servicio y del producto de construcción. La creación del producto es necesaria en la etapa de implementación del servicio, el uso del producto de construcción ocurre durante la operación del servicio y, finalmente, los procesos de demolición y tratamiento de residuos se llevan a cabo en la etapa de fin de vida del servicio. El esquema de flujos entre sistemas de la Figura 3.6b expresa esta estrecha relación entre las etapas del ciclo de vida.

El estudio se ha realizado en un servicio de venta al por menor de prendas de vestir situado en la zona centro de Zaragoza y se desarrolla en un local comercial de 65.3 m<sup>2</sup>. Los clientes habituales del servicio son mujeres de un nivel adquisitivo medio-alto que buscan una atención personalizada incluyendo asesoramiento personal y arreglo de las prendas acorde a sus necesidades.

### **Caso 2 - 1. Objetivo y alcance**

El objetivo es obtener indicadores que permitan evaluar de forma cuantitativa la sostenibilidad del Sistema Producto-Servicio en sus tres dimensiones: ambiental, económica y social. El PSS se compone de un sistema principal (servicio de venta de prendas) y un sistema secundario (local comercial). Las etapas del ciclo de vida que se analizan son la etapa de creación y provisión en el caso del servicio de venta y la etapa de creación en el caso del local comercial.

### **Caso 2 - 2. Inventario**

Se recopilan las entradas y salidas generadas en las etapas de creación y provisión del servicio. Las principales actividades que se desarrollan en la etapa de creación están relacionadas con el proceso de construcción del local comercial en el que se realizará el servicio de venta de prendas. Las actividades de construcción se organizan en un total de 10 grupos. Los datos correspondientes a materiales utilizados, consumos de energía, costes de ejecución y tiempos de trabajo son obtenidos mediante el software Cype, utilizado en proyectos de construcción. En la Figura 3.7 se muestran resumidos los datos asociados a cada una de las actividades y expresados por unidad de medición. Se indican consumos de energía en las fases de producto (A1-3) y construcción (A4-5), número de trabajadores, tiempo de trabajo y salario en la fase A5, y el coste total de ejecución de la actividad.

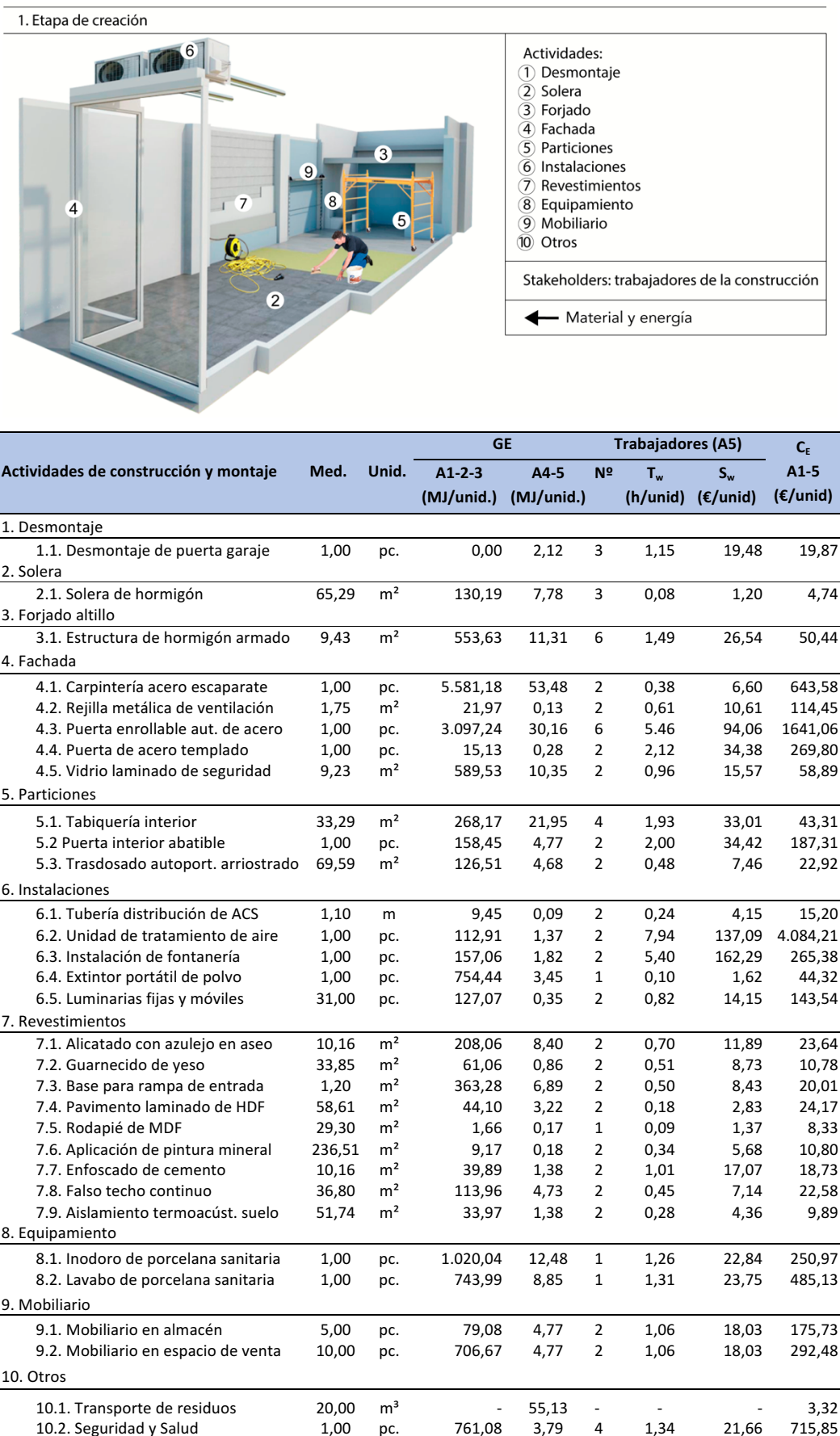


Figura 3.7. Servicio de venta de prendas. Resumen de inventario en la etapa de creación.

Cada actividad está designada con un número. En el grupo 6. Instalaciones, la actividad 6.1. Instalar tubería de distribución de ACS de 1.1 m tiene un consumo de energía de 9.45 y 0.09 MJ/m en las fases de producto y proceso de construcción, requiere dos trabajadores que dedican 0.24h/m con un salario de 4.15€/m. El coste de ejecución de la actividad es 15.2 €/m.

Por otro lado, la etapa de provisión del servicio fue también analizada en detalle para obtener el inventario de entradas y salidas. El servicio de venta de prendas es atendido por dos trabajadores con una jornada de 38.5 horas semanales cada uno. Sus actividades se clasifican en los siguientes grupos (Figura 3.8):

- i) Preparación de las prendas para su venta: incluye recepción y desempaquetado de mercancía suministrada por la industria textil, clasificación, planchado y etiquetado de las prendas recibidas;
- ii) Almacenaje y exposición de las prendas;
- iii) Prueba y arreglo de las prendas: se caracteriza por la atención personalizada a clientes;
- iv) Venta y empaquetamiento de las prendas y cobro al cliente;
- v) Otras actividades como limpieza de la tienda y gestión del servicio.

2. Etapa de provisión



Actividades	T <sub>w</sub> (h/sem)	GE (MJ/sem)
1. Preparación de prendas	10.5	157.57
2. Exhibición y almacenaje	6	51.66
3. Prueba y arreglo de prendas	14.5	124.84
4. Venta y empaquetamiento	1.5	12.92
5. Otros	6	54
<b>Total</b>	<b>38.50</b>	<b>401.04</b>

Figura 3.8. Servicio de venta de prendas. Datos de inventario en la fase de operación.

La duración de estas actividades puede variar significativamente a lo largo de un año. La mayoría de la mercancía se recibe dos veces al año. Sin embargo, otras actividades se realizan diariamente. En la Figura 3.8 se indican tiempos de trabajo en cada grupo de actividad y consumos de energía debido al uso de diferentes equipos. Los datos se refieren a datos promedio recogidos a lo largo de un año.

Un total de 336 visitas de clientes (en las que se adquiere algún tipo de prenda) son registradas durante el año de referencia. Se diferencian cuatro tipos de clientes: clientes de temporada, los que normalmente visitan la tienda dos veces al año y adquieren un gran número de prendas en cada visita; clientes mensuales, que compran una vez al mes; clientes de rebajas, que intentan aprovecharse de ofertas ocasionales y, finalmente, clientes de eventos especiales, que visitan la tienda para adquirir alguna prenda adecuada para llevarla en un evento especial.

Los costes de operación se dividen en cuatro bloques principales: provisión de prendas, mano de obra, consumibles y costes indirectos. La provisión de prendas conlleva el gasto inicial realizado por el proveedor del servicio al comprar mercancía. Los costes debidos al consumo de energía y adquisición de materiales utilizados en packaging, tareas de costura o actividades de limpieza se incluyen en consumibles. Los costes indirectos tienen en cuenta impuestos y seguros. En la Tabla 3.4 se resumen los costes, expresados por año de operación. La cantidad de prendas adquiridas está en torno a las 1600 ud (en dos colecciones). Para evaluar su impacto ambiental, se utiliza The International Environmental Product Declaration (EPD) System (**EPD, 2020**) y se estima que la mitad de las prendas son pantalones de tela vaquera (EPD ISKO26632) y la otra mitad camisetas (EPD 7046 THV).

Tipo de coste		Cantidad/año	Coste (€/año)
Provisión de prendas		1600 ud	136000
Mano de obra			34320
Material Consumible	Packaging	107.5 Kg	2900
	Costura	0.50 Kg	158
	Limpieza	9.44 Kg	118
	Gestión	3.22 Kg	1397.2
Energía			2733
Costes indirectos			46318

Tabla 3.4. Servicio de venta de prendas. Inventario de costes.



### Caso 2 - 3. Evaluación de indicadores

La sostenibilidad del PSS fue evaluada a través de un conjunto de indicadores. En la dimensión ambiental se seleccionan los indicadores de calentamiento global ( $GWP_{100}$ ) y energía global (GE). Se utiliza el software de Cype para determinar impactos de las actividades de construcción, la base de datos International EPD System para obtener impactos unitarios de los diferentes tipos de prendas y los factores de emisión de las compañías eléctricas que operan en España (**Mapama, 2018**) para obtener emisiones debidas a consumo de energía. Los factores utilizados y los indicadores resultantes pueden ser consultados en el **Anexo 1**. En la dimensión económica se utilizan como indicadores el coste de ejecución ( $C_E$ ) y la eco-eficiencia (EE) y en la dimensión social, el tiempo de trabajo ( $T_w$ ) y el salario de los trabajadores ( $S_w$ ). Los indicadores resultantes se muestran en la Tabla 3.5 y se expresan por visita de cliente que es la unidad funcional del PSS. Además, se considera un periodo de operación de 10 años.

FU: 1 visita de un cliente						
Sistema	Dimensión medioambiental		Dimensión económica		Dimensión social	
	$GWP_{100}$ (kg CO <sub>2</sub> -eq)	GE (MJ)	$C_E$ (€)	EE (€/kg CO <sub>2</sub> -eq)	$T_w$ (h)	$S_w$ (€)
(FS) Servicio	0.454	10.18	10.13	22.31	0.176	0.683
(BS) Tienda	0.033	0.37	0.127	3.86	0.0016	0.027
<b>PSS (FS+BS)</b>	<b>0.487</b>	<b>10.55</b>	<b>10.25</b>	<b>21.04</b>	<b>0.177</b>	<b>0.71</b>

Tabla 3.5. Servicio de venta de prendas. Indicadores de sostenibilidad.

Los valores finales de emisiones de gases de efecto invernadero y energía global son los siguientes: 0.487 kgCO<sub>2</sub>-eq y 10.55 MJ. En la dimensión económica, los costes de ejecución son de 10.25 € y la eco-eficiencia global es de 21.04 €/kgCO<sub>2</sub>-eq. En la dimensión social, el tiempo acumulado de trabajo por los proveedores del servicio y por los operarios de la fase de instalación en obra es 0.177 h y el salario acumulado es 0.71 €.

Los indicadores de sostenibilidad de la fase operativa del servicio muestran que su incidencia es mucho más alta que los obtenidos en la fase de implementación, que no llega a causar más del 7% del impacto total en ninguna de las tres dimensiones de la sostenibilidad. Su mayor incidencia se produce en las emisiones de gases de efecto invernadero (6.77%) ya que en las dimensiones económica y social tiene una contribución inferior al 1.2%.

**Caso 2 - 4. Interpretación de resultados**

En la Figura 3.9 se muestra la incidencia de diferentes factores en la sostenibilidad del PSS. En las Figuras 3.9a, 9b y 9c, se representan, respectivamente, la distribución porcentual de emisiones de gases de efecto invernadero, de costes de producción y de tiempo de trabajo. Además, en cada diagrama se indica la contribución porcentual de los sistemas (FS y BS) que intervienen en el PSS.

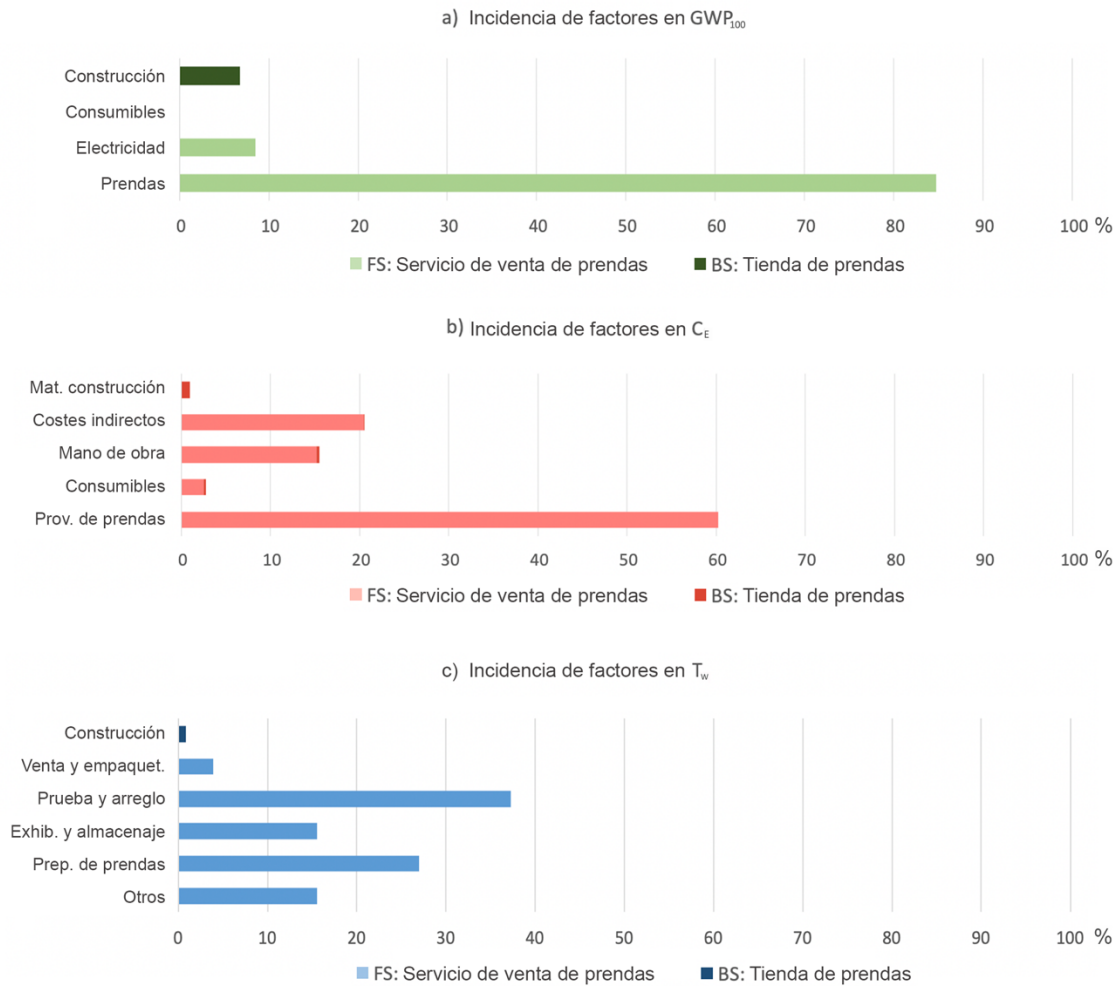


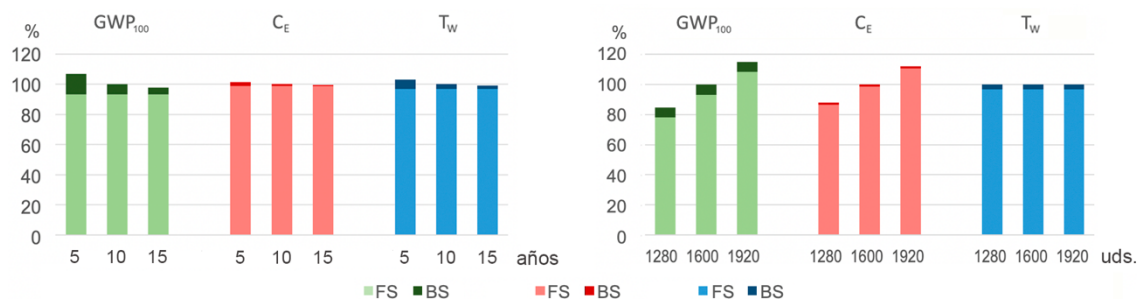
Figura 3.9. Servicio de venta de prendas. Distribución porcentual de factores de impacto.

Las prendas son el factor que causa mayor impacto ambiental (84.7%) y económico (60%). Los costes indirectos también es un factor importante (20.5%). En cuanto a las actividades de trabajo, la actividad de prueba y arreglo de prendas es la que conlleva más tiempo (37.5%) ya que es donde el servicio presta su valor añadido a través de la atención personalizada y ajuste de prendas según las necesidades de cada cliente. También el tiempo de la actividad de

preparación de las prendas es relativamente alto (27.1%). En las tres dimensiones el impacto del sistema tienda es muy bajo.

Por otra parte, se ha realizado un análisis de sensibilidad para determinar la incertidumbre asociada con dos factores: el tiempo de operación del servicio y la provisión de prendas. En primer lugar, se considera una variación del tiempo de operación del servicio en un rango de  $\pm 5$  años. En la Figura 3.10a se muestra el efecto que esta variación tiene sobre los indicadores  $GWP_{100}$ ,  $C_E$  and  $T_W$ . Principalmente, las variaciones se producen entre el escenario de 5 años y el escenario base (10 años de apertura del servicio) en los indicadores  $GWP_{100}$  (+6.77%) y  $C_E$  (+3.16%). La comparación de las variaciones entre el escenario base, 10 años, y el escenario de 15 años es mucho menor.

Por otra parte, en la Figura 3.10b se muestran los resultados de análisis de sensibilidad de la provisión de prendas. Se considera una variación de  $\pm 20\%$  de prendas adquiridas por el proveedor del servicio en comparación con el caso base (aprovisionamiento de 1600 prendas cada año). Se detectan unas variaciones de  $\pm 15.2$  y  $\pm 12.1\%$  en los indicadores  $GWP_{100}$  y  $C_E$ , mientras que el indicador  $T_W$  no se ve prácticamente afectado.



a) Variación del tiempo de operación del servicio.

b) Variación de la provisión de prendas.

Figura 3.10. Servicio de venta de prendas. Sensibilidad de indicadores de sostenibilidad.

## Caso 2 - 5. Conclusiones del estudio

Se ha evaluado la sostenibilidad de un PSS formado por un sistema principal y un sistema secundario. El sistema principal se refiere al servicio de venta de prendas de vestir y el sistema secundario a la tienda necesaria para poder atender a los clientes bajo condiciones óptimas.

Se han detectado relaciones entre las etapas del ciclo de vida del servicio y del producto. Se han obtenido indicadores cuantitativos de las tres dimensiones de la sostenibilidad. Se ha aplicado un enfoque de flujos entre los sistemas y una metodología de evaluación basada en LCSA. Esta combinación ha facilitado la definición de la unidad funcional, el establecimiento de los límites del sistema y el análisis de los resultados de sostenibilidad conociendo la implicación de cada uno de los sistemas en el PSS.

Respecto a los indicadores totales del PSS, la mayor incidencia se produce por el sistema principal. El sistema tienda tiene una incidencia significativa en el indicador de  $GWP_{100}$  (6.77%) y muy pequeña en el resto de indicadores (<1.2%).

Se obtiene la distribución porcentual de los indicadores que producen los factores de impacto que intervienen en la sostenibilidad del PSS. Se comprueba como las prendas de vestir son el principal factor que supone el 84.7% de las emisiones de gases de efecto invernadero y el 60% de los costes de operación. El análisis de sensibilidad de provisión de prendas demuestra que estos datos pueden variar  $\pm 15.2$  y  $\pm 12.1\%$ , respectivamente. Respecto al indicador social, se comprueba que la actividad de prueba y arreglo de prendas supone un factor importante en el tiempo de trabajo.

## Capítulo 4

# Casos de estudio. Mejora de la sostenibilidad

---

Tras realizar la evaluación de la sostenibilidad de los casos de estudio se aplican estrategias de mejora y se comparan los resultados obtenidos para determinar si se ha logrado una mejora en la sostenibilidad del sistema.

Conociendo los factores que tienen mayor incidencia en ambos casos de estudio se plantean unas estrategias de mejora con varias alternativas a elegir según las especificaciones de cada sistema. En el caso de la producción de leche se aplican estrategias de mejora para reducir el impacto cambiando la alimentación de las vacas y disminuyendo el número de visitas del veterinario. En el caso del servicio de venta de prendas se aplican estrategias de mejora para reducir el impacto que causan el revestimiento final aplicado en el local comercial y la provisión de las prendas.

Por último, se realiza una comparación entre los sistemas iniciales y los obtenidos tras aplicar las estrategias de mejora y se determina si se ha logrado una mejora global en la sostenibilidad del PSS aplicando diferentes ponderaciones a cada dimensión.

## CASO 1 - PRODUCCIÓN DE LECHE

A partir de los datos de sostenibilidad del sistema inicial y de la distribución de factores de impacto obtenidos en el capítulo anterior, se plantea la mejora actuando sobre dos factores: la alimentación de los animales y las visitas del veterinario. Se evalúa la sostenibilidad del nuevo sistema y se compara con la del sistema anterior.

### Caso 1 - 1. Especificaciones del sistema

Dos especificaciones del sistema principal deben ser preservadas: la producción media de leche (1064 l/día) y el contenido en proteína (>3,2%).

La alimentación de las vacas influye de forma determinante en la composición y cantidad final de nutrientes de la leche. Una correcta mezcla de alimentos permite obtener leche con la adecuada cantidad de nutrientes y, por tanto, los cambios introducidos deben estar basados en las tablas de composición y valor nutritivo de alimentos que proporciona la Fundación Española para el Desarrollo de la Nutrición Animal (**FEDNA, 2010**). En la Tabla 4.1 se muestran las cantidades de nutrientes que deben ingerir al día las vacas en fase de producción. Estos datos sirven para definir la composición adecuada de materia prima empleada en la alimentación. Los nutrientes se expresan referenciados a la Materia Seca (MS) o alimentación aportada sin humedad.

Nutrientes	Cantidad	Unidad	Total (Kg)
Materia seca	21-25	Kg	21-25
Fibra detergente ácida	25.5-30.5	% de MS	5.3-7.6
Fibra detergente neutra	43-48	% de MS	9-12
Proteína bruta	16-19	% de MS	3.4-4.8
Proteína no degradable	43-45	% de MS	9-11.25
Calcio (Ca)	1.00-1.10	% de MS	0.21-0.27
Magnesio (Mg)	0.34-0.38	% de MS	0.07-0.10
Fosforo (P)	1.55-1.60	% de MS	0.33-0.40
Sodio (Na)	0.22-0.26	% de MS	0.05-0.07

Tabla 4.1. Alimentación de las vacas - Cantidad de nutrientes recomendados por vaca y día.

## Caso 1 - 2. Estrategias de mejora

Se plantean dos estrategias de mejora: 1) disminuir el impacto de la materia prima utilizada en la alimentación de los animales proponiendo una composición de alimentos diferente y 2) reducir el impacto del servicio veterinario proponiendo un número promedio de visitas menor.

En primer lugar, se proponen varias alternativas de alimentación que aporten a las vacas los nutrientes adecuados. Siguiendo las recomendaciones de un nutricionista, se hacen dos propuestas con dos mezclas diferentes (Tabla 4.2). La primera propuesta consiste en cambiar el ensilado de maíz por un ensilado de cebada manteniendo las proporciones en las que los diferentes componentes forman la mezcla. En la segunda alternativa, se propone sustituir el ensilado de maíz por otro de paja de cebada y modificar las proporciones de alimentos para equilibrar los nutrientes aportados. Los datos se expresan por litro de leche.

Mezclas para alimentación	Componente	Cantidad (Kg)	GWP <sub>100</sub> (Kg CO <sub>2</sub> -eq)	Ac (g SO <sub>2</sub> -eq)
<b>Sistema inicial</b>	Ensilado de maíz	0.786	0.275	0.0044
	Pienso	0.357	0.129	0.0008
	Alfalfa	0.251	0.156	0.0017
	Total	1.394	0.560	0.0069
<b>Alternativa 1</b>	Ensilado de cebada	0.786	0.418	0.0045
	Pienso	0.357	0.129	0.0008
	Alfalfa	0.251	0.156	0.0017
	Total	1.394	0.703	0.0070
<b>Alternativa 2</b>	Paja	0.143	0.021	0.0001
	Pienso	0.500	0.180	0.0012
	Alfalfa	0.357	0.223	0.0024
	Total	1	0.424	0.0037

Tabla 4.2. Producción de leche. Alternativas de alimentación.

En la Tabla 4.2 se indican los alimentos que componen cada una de las mezclas y su proporción para obtener un litro de leche. Además, se calculan los indicadores de impacto ambiental (GWP<sub>100</sub> y Ac) para cada alimento individual y para cada alternativa de alimentación. Se puede observar que en la segunda alternativa la masa final de alimento es menor y genera también un impacto ambiental menor, por lo que se opta por implementarla durante 6 meses.

Por otra parte, para reducir el impacto del servicio veterinario se propone disminuir el número promedio de sus visitas a la granja. Se consideran dos posibles alternativas (Tabla 4.3). En la alternativa 1, el número de visitas se reduce y el tiempo en granja se incrementa de 2.5 a 3 h por visita. En la alternativa 2, el tiempo en granja no se modifica y se propone que algunas tareas del veterinario sean asumidas por el propio granjero. Esta última alternativa supone menor impacto, pero tras consultar con el granjero, se selecciona la alternativa 1.

Servicio veterinario	Sistema inicial	Alternativa 1	Alternativa 2
Visitas	1 cada 7 días	1 cada 10 días	1 cada 10 días
T granja/visita (h)	2.5	3	2.5
T total/visita (h)	4	4.5	4
$T_w$ (h/litro)	$0.53 \cdot 10^{-3}$	$0.44 \cdot 10^{-3}$	$0.39 \cdot 10^{-3}$
$C_E$ (€/litro)	0.013	0.010	0.009

Tabla 4.3. Producción de leche. Alternativas en el tipo de visitas del veterinario.

### Caso1 - 3. Evaluación de la sostenibilidad aplicando estrategias de mejora

#### 3.1. Estrategia 1: cambio de alimentación

##### 3.1.1. Objetivo y alcance

El objetivo es evaluar los indicadores de sostenibilidad en el PSS una vez implementada la estrategia de mejora de cambio en la alimentación. El sistema se compone de un sistema principal (leche) y dos sistemas secundarios (servicio veterinario y estiércol). Se evalúan la etapa de producción de leche y estiércol y la etapa de operación en el servicio veterinario.

##### 3.1.2. Inventario

Se recopilan las entradas y salidas del sistema con los cambios introducidos. En la Figura 4.1 se muestra un esquema del nuevo proceso productivo. Se indica la cantidad de cada una de las materias primas utilizadas en el proceso de obtención de leche y las correspondientes salidas de productos y subproductos. Se muestran los consumos de energía en cada actividad y el consumo global de energía a lo largo del proceso productivo. Además, se muestran los principales flujos económicos intercambiados por el sistema. Todos los datos se expresan por litro de leche producido.



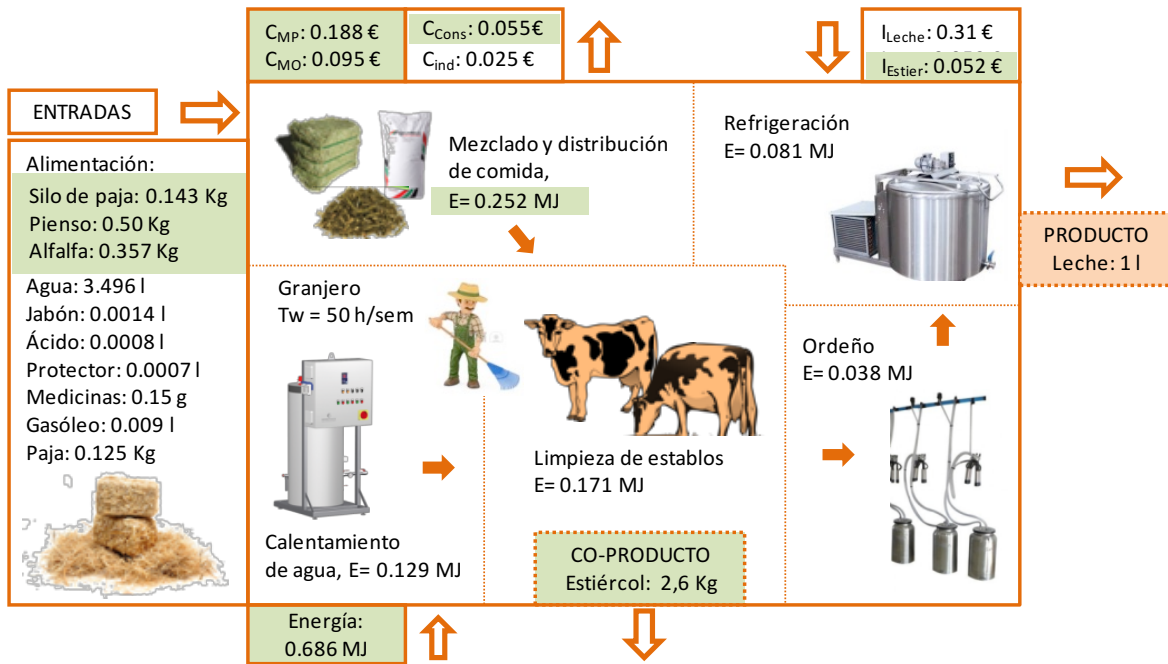


Figura 4.1. Producción de leche. Esquema y resumen de inventario en el nuevo sistema productivo.

La producción media de leche por vaca se mantiene en 28 litros/día y la producción de estiércol se incrementa un 6%, siendo de 2.6 kg por litro de leche. La cantidad que se genera de este subproducto aumenta debido a que la nueva alimentación contiene un porcentaje más elevado de materia seca (detalles de composición en Anexo 1). De esta manera los ingresos por la venta de estiércol como fertilizante también se incrementan. Teniendo en cuenta los mismos precios de venta de leche (0.31€/l) y estiércol (20€/t), la proporción en la que cada sistema contribuye a los ingresos de la explotación en el nuevo sistema es, respectivamente, 85.6 y 14.4%. Otros ingresos, como los que se obtendrían por la venta de animales no destinados a la producción de leche, no han sido considerados en el estudio.

Se observa que en el nuevo sistema productivo se produce una reducción del consumo de energía en un 10.3%. Puesto que la cantidad de alimento disminuye, algunas actividades como las de transporte, mezclado y distribución de la comida, cuyo consumo de energía depende de la masa que se ha de manipular, tienen un consumo menor. Los costes de producción aumentan considerablemente por el incremento de costes de materia prima para alimentación, mientras que los costes en consumible se reducen ligeramente por el menor consumo de energía. En la Tabla 4.4 se indican precios y costes de la materia prima utilizada en la nueva alimentación.

Puesto que los costes del pienso y de la alfalfa se incrementan respecto a los que se obtenían en la alimentación inicial, el coste total de la materia prima se incrementa en 0.03 € por litro de

leche y supone un incremento significativo de los costes de producción globales. Además, los cambios introducidos en la mezcla para alimentación suponen un cambio considerable en la masa total de alimento que se reduce un 26.6%.

Entrada	Componente	Cantidad (kg)	Precio (€/ud.)	Coste (€)
Alimentación	Paja	0.143	0.04	0.007
	Pienso	0.500	0.27	0.136
	Alfalfa	0.357	0.12	0.044
Total		1		0.188

Tabla 4.4. Producción de leche. Datos de materia prima en el nuevo proceso productivo.

### 3.1.3. Evaluación de indicadores

Se obtienen los indicadores de sostenibilidad del PSS y de cada sistema involucrado. Al igual que en el sistema inicial, se utiliza la base de datos Agri-footprint (**Durlinger et al., 2017**) para obtener los impactos ambientales unitarios de diferentes materias primas (Anexo 1). Los resultados se muestran en la Tabla 4.5, de acuerdo con la unidad funcional que es un litro de leche. Los indicadores de calentamiento global y acidificación son, respectivamente, 0.502 kgCO<sub>2</sub>-eq y 8.98·10<sup>-3</sup> gSO<sub>2</sub>-eq. Los costes de producción son 0.376 € y la eco-eficiencia global es 0.74 €/kgCO<sub>2</sub>-eq. Los indicadores sociales no varían.

Los indicadores de sostenibilidad del servicio veterinario (BS<sub>1</sub>) muestran que la incidencia de este sistema sigue siendo relativamente pequeña en GWP<sub>100</sub> (0.4%) pero significativa en otros indicadores como Ac (6.4%), C<sub>E</sub> (3.4%) y T<sub>W</sub> (7.4%). Se observa que esta incidencia es un poco inferior en los costes de producción, ya que éstos se han incrementado, y no varía en el indicador de tiempo de trabajo, ya que éste no ha cambiado. Por otra parte, en la producción conjunta de leche y estiércol se obtienen valores de 0.5 kgCO<sub>2</sub>-eq en emisiones de efecto invernadero, 0.363 € en costes de producción y 6.6·10<sup>-3</sup> h en tiempos de trabajo. Los indicadores de los sistemas leche y estiércol se obtienen teniendo en cuenta que contribuyen a los ingresos de la explotación con 85.6 y 14.4%, respectivamente. Los indicadores sociales varían muy ligeramente respecto a los iniciales.

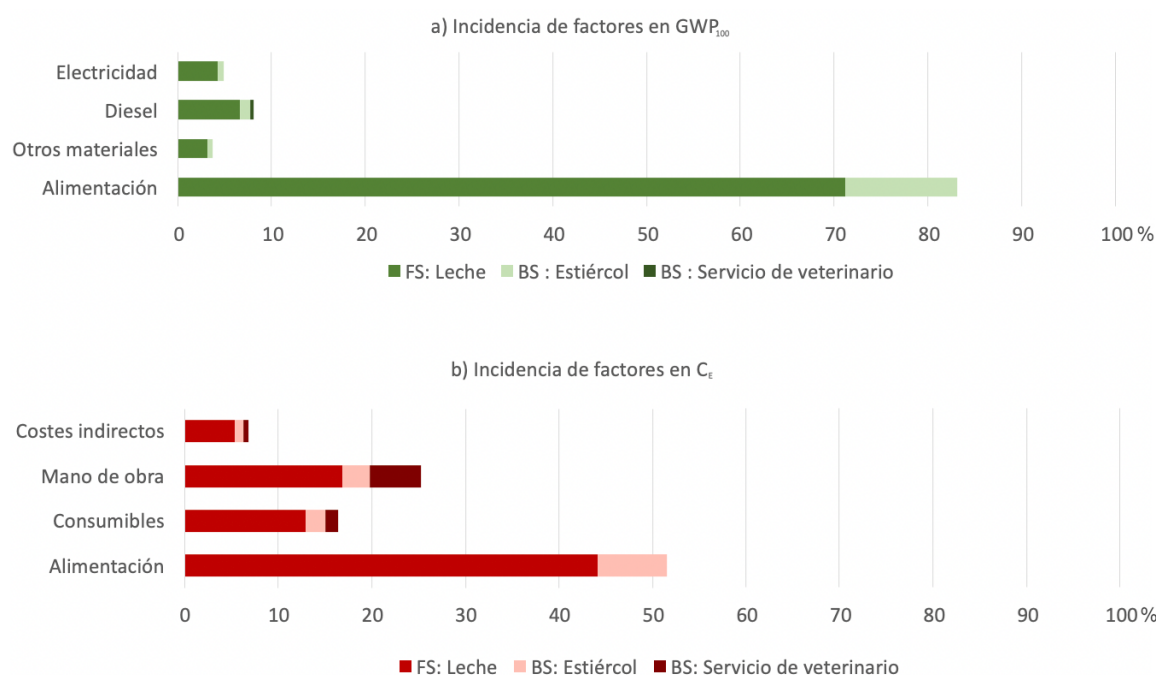
FU: 1 litro de leche

Sistema	Dimensión medioambiental		Dimensión económica		Dimensión social	
	GWP <sub>100</sub> (kg CO <sub>2</sub> -eq)	Ac (g SO <sub>2</sub> -eq)·10 <sup>-3</sup>	C <sub>E</sub> (€)	EE (€/kg CO <sub>2</sub> -eq)	T <sub>w</sub> (h)·10 <sup>-3</sup>	S <sub>w</sub> (€)
(FS) Leche	0.428	7.19	0.311	0.72	5.65	0.062
(BS <sub>2</sub> ) Estiércol	0.072	1.21	0.052	0.72	0.95	0.010
(FS+BS <sub>2</sub> )	0.500	8.40	0.363	0.72	6.6	0.072
(BS <sub>1</sub> ) Veterinario	0.002	0.58	0.013	6.5	0.53	0.009
<b>PSS<sub>1</sub>(FS+BS<sub>1</sub>+BS<sub>2</sub>)</b>	<b>0.502</b>	<b>8.98</b>	<b>0.376</b>	<b>0.74</b>	<b>7.13</b>	<b>0.081</b>

 Tabla 4.5. Producción de leche. Indicadores de sostenibilidad en PSS<sub>1</sub>.

### 3.1.4. Interpretación de resultados

En la Figura 4.2 se muestra la incidencia de los factores en la sostenibilidad del PSS tras aplicar como estrategia de mejora el cambio en la alimentación. En las Figuras 4.2a y 4b se representan, respectivamente, la distribución porcentual de emisiones de efecto invernadero y de costes de producción. La distribución de factores en la dimensión social se mantiene constante.


 Figura 4.2. Producción de leche. Distribución porcentual de los factores de impacto en PSS<sub>1</sub>.

La incidencia del factor alimentación continúa siendo la más alta (83.2%) en el indicador GWP<sub>100</sub>, aunque obtiene una reducción de 3.65%. En el indicador de C<sub>e</sub> la alimentación aumenta 1.7% con respecto al sistema inicial, representando la incidencia más alta (51.5%).

### **3.2. Estrategia 2: cambio en el régimen de vistas del veterinario**

#### *3.2.1. Objetivo y alcance*

El objetivo es evaluar los indicadores de sostenibilidad en el PSS una vez implementada como estrategia de mejora un cambio en el número y duración de las visitas del veterinario a la granja. El sistema se compone de un sistema principal (leche) y dos sistemas secundarios (servicio veterinario y estiércol). Se evalúan la etapa de producción de leche y estiércol y la etapa de operación en el servicio veterinario.

#### *3.2.2. Inventario*

Los cambios que se producen en el inventario están relacionados con la actividad del veterinario. El número total de granjas que visita, la distancia promedio que tiene que desplazarse y el tipo de vehículo que utiliza, no cambia respecto al sistema inicial. Tras aplicar la estrategia 2, el número de visitas promedio a la granja es de una cada 10 días. El tiempo promedio en traslado es 1.5 h, como en el sistema inicial. Sin embargo, el tiempo que dedica al cuidado de la salud de los animales se incrementa, siendo en promedio de 3 h en cada visita. Por esta razón, se produce un incremento de los costes de mano de obra que pasan a ser 81.5 €/visita y su tarifa a 110 €/visita.

#### *3.2.3. Evaluación de indicadores*

Los indicadores de sostenibilidad que se obtienen tras aplicar la estrategia 2 se muestran en la Tabla 4.6. Se detectan ligeras variaciones en los indicadores del servicio veterinario ( $BS_1$ ) que suponen también pequeños cambios en los indicadores globales del PSS. El calentamiento global y la acidificación son, respectivamente,  $0.644 \text{ kgCO}_2\text{-eq}$  y  $13.1 \cdot 10^{-3} \text{ gSO}_2\text{-eq}$ . Los costes totales del sistema son  $0.323 \text{ €}$  y la eco-eficiencia es  $0.501 \text{ €/kgCO}_2\text{-eq}$ . En la dimensión social, el tiempo acumulado de trabajo por el granjero y el veterinario es  $7.04 \cdot 10^3 \text{ h}$  y el salario acumulado es de  $0.079 \text{ €}$ .

La estrategia 2 no afecta a los indicadores del sistema leche-estiércol ( $FS+BS_2$ ). Los indicadores parciales también se mantienen teniendo en cuenta la ponderación inicial de 86.3 y 13.7% para cada uno de los sistemas.

FU: 1 litro de leche

Sistema	Dimensión medioambiental		Dimensión económica		Dimensión social	
	GWP <sub>100</sub> (kg CO <sub>2</sub> -eq)	Ac (g SO <sub>2</sub> -eq)·10 <sup>-3</sup>	C <sub>E</sub> (€)	EE (€/kg CO <sub>2</sub> -eq)	T <sub>w</sub> (h)·10 <sup>-3</sup>	S <sub>w</sub> (€)
(FS) Leche	0.557	10.9	0.270	0.53	5.7	0.062
(BS <sub>2</sub> ) Estiércol	0.086	1.8	0.043	0.53	0.9	0.010
(FS+BS <sub>2</sub> )	0.643	12.7	0.313	0.53	6.6	0.072
(BS <sub>1</sub> ) Veterinario	0.0015	0.43	0.010	6.6	0.44	0.0076
<b>PSS<sub>2</sub>(FS+BS<sub>1</sub>+BS<sub>2</sub>)</b>	<b>0.644</b>	<b>13.13</b>	<b>0.323</b>	<b>0.501</b>	<b>7.04</b>	<b>0.079</b>

Tabla 4.6. Producción de leche. Indicadores de sostenibilidad aplicando estrategia 2.

### 3.2.4. Interpretación de resultados

Tras aplicar la estrategia de mejora de cambio en el régimen de visitas del veterinario el sistema (BS<sub>1</sub>) tiene una incidencia en el indicador GWP<sub>100</sub> de 0.2% en el PSS. En los indicadores C<sub>E</sub> y T<sub>w</sub> la incidencia del sistema veterinario es más significativa suponiendo un 3.0 y 6.2%, respectivamente.

## Caso1 - 4. Comparación de sistemas

### 4.1. Estrategias independientes

En la Figura 4.3a y 3b se muestran, respectivamente, las variaciones que experimentan los indicadores de sostenibilidad del PSS de partida (PSS<sub>0</sub>) con respecto al PSS aplicando la estrategia 1 (PSS<sub>1</sub>) y al PSS aplicando la estrategia 2 (PSS<sub>2</sub>).

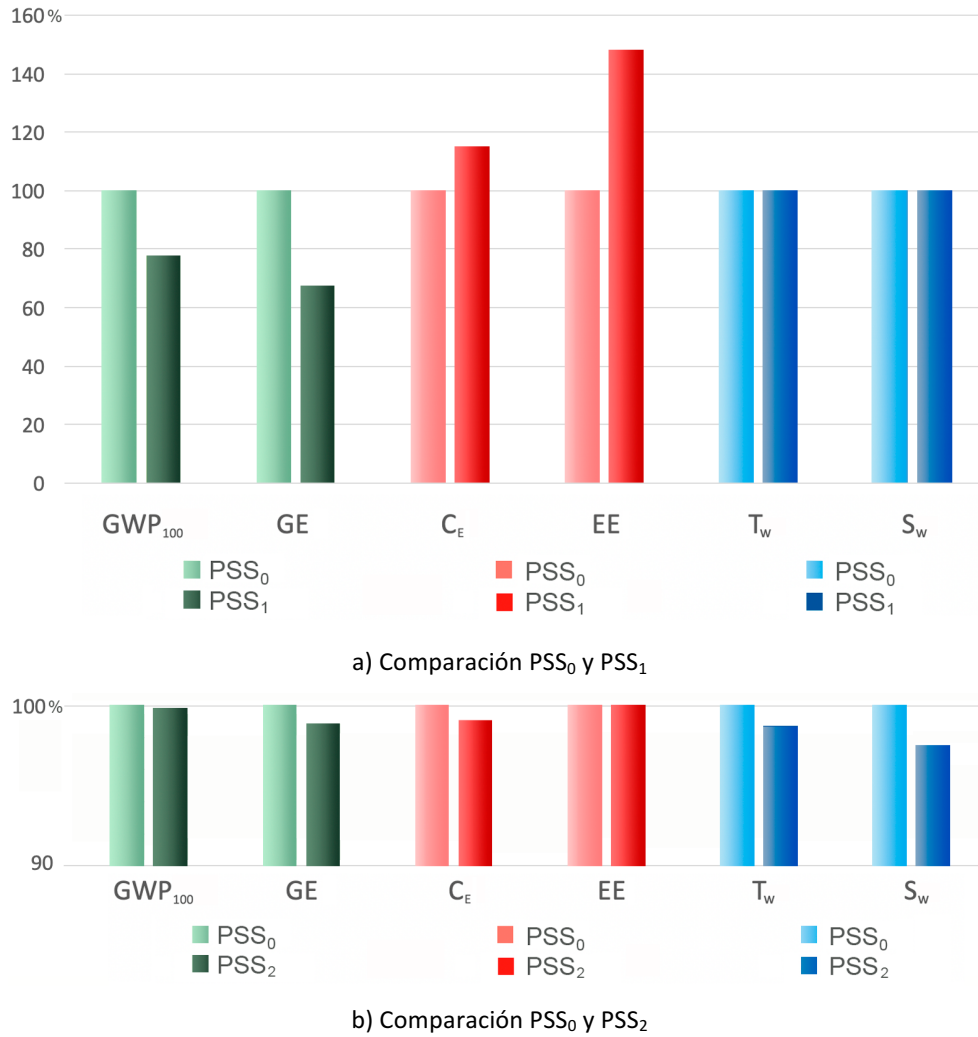


Figura 4.3. Producción de leche – Comparación de indicadores.

Se obtienen los siguientes resultados tras aplicar la estrategia 1:

- Variación muy importante de los indicadores ambientales con una reducción del 22% en GWP<sub>100</sub> y del 32.3% en Ac. Por tanto, los cambios introducidos en los componentes y proporciones de la alimentación, permiten modificar de forma muy substancial el impacto ambiental del PSS.
- Notable variación de los indicadores económicos con un incremento de los costes de producción en un 15.3%. Esto se debe a que los costes de adquisición de alimentos se incrementan considerablemente. No obstante, la eco-eficiencia mejora (46.5%) ya que la reducción del indicador GWP<sub>100</sub> es más acusada.
- No se produce variación significativa en los indicadores sociales.

Se obtienen los siguientes resultados tras aplicar la estrategia 2:

- Leve variación en los indicadores ambientales con una reducción de 0.15% en  $GWP_{100}$  y de 1.1% en Ac. Esta pequeña mejora se debe a la reducción del consumo de combustible en las visitas realizadas por el veterinario.
- Ligera reducción de los costes de producción en 0.9% y aumento de la eco-eficiencia en 0.20%. A pesar del incremento de la tarifa por visita, al reducir el número de visitas, se reduce el coste (expresado por litro de leche).
- Pequeñas variaciones en  $T_w$  y en  $S_w$  que se reducen, respectivamente, 1.26 y 2.47%.

## 4.2. Estrategias combinadas

En este apartado se obtienen los indicadores de sostenibilidad tras aplicar en el sistema las estrategias 1 y 2 ( $PSS_3$ ). Los resultados se muestran en la Tabla 4.7, de acuerdo con la unidad funcional que es un litro de leche. Los indicadores de calentamiento global y acidificación son, respectivamente, 0.501  $kgCO_2$ -eq y  $8.83 \cdot 10^{-3}$   $gSO_2$ -eq. Los costes de producción son 0.373 € y la eco-eficiencia global es 0.744 €/kg $CO_2$ -eq. En la dimensión social, el tiempo acumulado de trabajo por el granjero y el veterinario es  $7.04 \cdot 10^{-3}$  h y el salario acumulado es de 0.079 €. La incidencia del servicio veterinario ( $BS_1$ ) en los indicadores del PSS es la siguiente: 0.3% en  $GWP_{100}$ , 4.8% en Ac, 2.6% en  $C_E$ , 6.2% en  $T_w$  y 9.6% en  $S_w$ . Por otra parte, en la producción conjunta de leche y estiércol se obtienen valores de 0.5  $kgCO_2$ -eq en  $GWP_{100}$ , 0.363 € en  $C_E$  y  $6.6 \cdot 10^{-3}$  h en  $T_w$ . Los indicadores de los sistemas leche y estiércol se obtienen teniendo en cuenta que contribuyen a los ingresos de la explotación con 85.6 y 14.4%, respectivamente.

FU: 1 litro de leche						
Sistema	Dimensión medioambiental		Dimensión económica		Dimensión social	
	$GWP_{100}$ (kg $CO_2$ -eq)	Ac (g $SO_2$ -eq)· $10^{-3}$	$C_E$ (€)	EE (€/kg $CO_2$ -eq)	$T_w$ (h)· $10^{-3}$	$S_w$ (€)
(FS) Leche	0.428	7.19	0.311	0.72	5.65	0.062
(BS <sub>2</sub> ) Estiércol	0.072	1.21	0.052	0.72	0.95	0.010
(FS+BS <sub>2</sub> )	0.500	8.40	0.363	0.72	6.6	0.072
(BS <sub>1</sub> ) Veterinario	0.0015	0.43	0.010	6.6	0.44	0.0076
<b>PSS<sub>3</sub>(FS+BS<sub>1</sub>+BS<sub>2</sub>)</b>	<b>0.501</b>	<b>8.83</b>	<b>0.373</b>	<b>0.744</b>	<b>7.04</b>	<b>0.079</b>

Tabla 4.7. Producción de leche. Indicadores de sostenibilidad aplicando estrategias 1 y 2.

En los gráficos de la Figura 4.3 se muestran las variaciones que experimentan los indicadores de sostenibilidad entre el PSS de partida ( $PSS_0$ ) y el PSS en el que se aplican las estrategias 1 y 2 de manera combinada ( $PSS_3$ ). Los resultados son los siguientes:

- Mejora muy significativa de los indicadores de ambientales con una reducción del 22.3% en  $GWP_{100}$  y del 33.5% en Ac. Por tanto, las estrategias planteadas han sido muy efectivas en la reducción del impacto ambiental del sistema.
- Incremento de los costes de producción en un 14.4%. Este indicador no mejora con las estrategias propuestas. Sin embargo, la eco-eficiencia mejora (48.8%).
- Pequeñas variaciones en  $T_w$  y en  $S_w$  que se reducen, respectivamente, 1.26 y 2.47%.

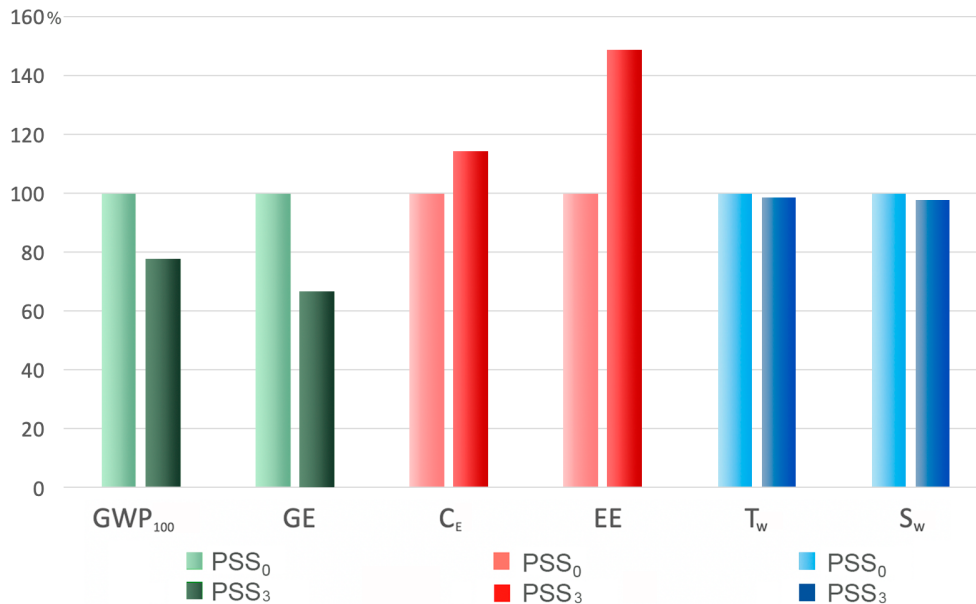


Figura 4.4. Producción de leche – Comparación indicadores entre  $PSS_0$  y  $PSS_3$ .

Se comprueba que no se logra una mejora simultánea de los indicadores de sostenibilidad en las tres dimensiones. La mejora global de la sostenibilidad del sistema se puede determinar aplicando diferentes ponderaciones a cada dimensión. Se han considerado 4 posibilidades de acuerdo con las siguientes hipótesis:

- Caso 1: se da la misma importancia a las tres dimensiones. Por tanto, a cada uno de los indicadores de sostenibilidad se le asigna un coeficiente de ponderación de 0.33.
- Casos 2, 3 y 4: en cada uno de estos casos se establece una dimensión dominante a la que se le asigna un coeficiente de 0.5, mientras que al resto de dimensiones se le asigna un coeficiente de 0.25.



La Tabla 4.8 recoge los resultados obtenidos. Los valores positivos indican resultados favorables y los valores negativos resultados desfavorables. En cada caso, se obtiene un porcentaje de mejora de acuerdo a los coeficientes de ponderación asignados a cada indicador. Los resultados en los Casos 1, 2 y 4 son favorables, pero en el Caso 3 no se lograría una mejora global de la sostenibilidad del sistema.

		C1	C2	C3	C4
Indicador	Variación (%)	Coeficientes de ponderación			
GWP <sub>100</sub>	22.3	0.33	0.50	0.25	0.25
C <sub>E</sub>	-14.4	0.33	0.25	0.50	0.25
T <sub>w</sub>	0	0.33	0.25	0.25	0.50
		Mejora de la sostenibilidad (%)			
		2.6	7.5	-1.6	1.9

Tabla 4.8. Producción de leche. Mejora de la sostenibilidad según coef. de ponderación de indicadores.

### Caso 1 - 5. Conclusiones

Se parte de los resultados de sostenibilidad previos basados en unas condiciones de alimentación de las vacas y de desarrollo de las actividades en la granja y se comparan con los resultados obtenidos después de implementar unas estrategias de mejora.

Se propone una mezcla alternativa para alimentación que aporta los nutrientes adecuados y tiene una masa global sensiblemente menor. La masa de alimento se reduce un 26,6% y el consumo de energía en la explotación se reduce 10,3%. Por otra parte, la masa de estiércol (co-producto) aumenta 6%. La aplicación de esta estrategia de rediseño ha permitido reducir los indicadores ambientales GWP<sub>100</sub> (22%) y Ac (32.3%) pero no favorece al indicador de costes de producción ya que aumenta 15.3%. Con una alimentación formada por una mezcla de paja, pienso y alfalfa se reduce el impacto ambiental, pero disminuye el rendimiento económico.

También se ha puesto en práctica como estrategia de mejora la reducción del número de visitas a la granja por parte del veterinario. Esta estrategia ha permitido mejorar los indicadores ambientales (reducción de 0.15% en GWP<sub>100</sub> y 1.1% en Ac), debido a la reducción del consumo

de combustible, los costes de producción (reducción de 0.9%), el tiempo de trabajo (reducción de 1.2%) y el salario de los trabajadores (reducción 2.4%).

Finalmente, la aplicación conjunta de las dos estrategias conlleva variaciones significativas en la sostenibilidad del PSS, notables en la dimensión ambiental y económica y más pequeñas en la dimensión social. Los indicadores ambientales  $GWP_{100}$  y  $Ac$  se reducen, respectivamente, 22.3% y 33.5%. El indicador económico de costes se incrementa un 14.4% pero la eco-eficiencia mejora un 48.8%. En cuanto a los indicadores sociales,  $T_w$  y  $S_w$  se reducen, respectivamente, 1.26 y 2.47%.

Puesto que no se logra una mejora simultánea de los indicadores de sostenibilidad en las tres dimensiones, la mejora global de la sostenibilidad del sistema depende de las diferentes ponderaciones que se den a cada dimensión. En este caso se han considerado cuatro posibilidades y en tres de ellas se obtiene una mejora global de la sostenibilidad del PSS.

## **CASO 2 – SERVICIO DE VENTA DE PRENDAS**

A partir de los datos de sostenibilidad del sistema y de la distribución de factores de impacto obtenidos en el capítulo anterior, se plantea la mejora actuando sobre dos factores: el revestimiento final del espacio de venta y la provisión de prendas. Se evalúa la sostenibilidad del nuevo sistema y se compara con la del sistema anterior.

### **Caso 2 - 1. Especificaciones del sistema**

Tres especificaciones del sistema deben mantenerse especialmente: la estética del espacio de venta, la atención personalizada a cada cliente y la calidad de las prendas que se ofrecen.

### **Caso 2 - 2. Estrategias de mejora**

Se plantean dos estrategias de mejora: 1) reducir el impacto que produce la pintura aplicada en la tienda proponiendo otros tipos de pinturas diferentes y 2) reducir el impacto causado por las prendas de ropa adquiridas proponiendo dos tipos de aprovisionamiento diferentes.

En primer lugar, se proponen varias alternativas a la partida de pintura al silicato. Esta partida es una de las que más impacto tienen en las dimensiones medioambiental (4.4%) y económica (20.4%) en la etapa de creación de la tienda (BS) (detalles de la distribución porcentual de las actividades de construcción en Anexo 1). Las alternativas ofrecen la misma estética al espacio de venta que el sistema inicial. La primera alternativa consiste en cambiar la aplicación de pintura al silicato por pintura plástica. La segunda alternativa consiste en la aplicación de pintura a la cal en lugar de la pintura al silicato.

En la Tabla 4.9, se muestran los indicadores de  $GWP_{100}$ ,  $C_E$  y  $T_W$  para cada una de las alternativas de revestimiento. Los datos son expresados por  $m^2$ . La alternativa 1 solo mejora los indicadores económico y social, así que se opta por la segunda alternativa que reduce el impacto en las tres dimensiones de la sostenibilidad.

Revestimiento	Tipo	GWP <sub>100</sub> (Kg CO <sub>2</sub> -eq)	C <sub>E</sub> (€)	T <sub>w</sub> (h)
Sistema inicial	Pintura al silicato	1.36	10.80	0.34
Alternativa 1	Pintura plástica	1.63	5.02	0.21
Alternativa 2	Pintura a la cal	0.49	7.99	0.26

Tabla 4.9. Servicio de venta de prendas. Alternativas de revestimiento.

Por otra parte, para reducir el impacto del servicio de venta se propone cambiar el aprovisionamiento de las prendas. Para ello se proponen dos alternativas muy diferentes. La primera alternativa se basa en el hecho de que un 20% de las prendas adquiridas no llegan a venderse y tienen que ser comercializadas por otros medios. Por esta razón, se propone disminuir el número de prendas adquiridas manteniendo el mismo proveedor. La segunda alternativa consiste en cambiar el proveedor de prendas por otro más económico pero que asegure mantener la calidad de las prendas.

En la Tabla 4.10 se observan los indicadores de GWP<sub>100</sub> y C<sub>E</sub> para cada una de las alternativas. Se opta por la alternativa 1 que mejora los indicadores medioambiental y económico, a diferencia de la alternativa 2 que sólo mejora el indicador económico.

Provisión de prendas	Cantidad (uds.)	GWP <sub>100</sub> (Kg CO <sub>2</sub> -eq/año)	C <sub>E</sub> (€/año)
Sistema inicial	1,600	8,220.80	136,000
Alternativa 1	1,280	6,576.64	108,800
Alternativa 2	1,600	8,220.80	122,00

Tabla 4.10. Servicio de venta de prendas. Alternativas de la provisión de prendas.

## Caso 2 - 3. Evaluación de la sostenibilidad aplicando estrategias de mejora

### 3.1. Estrategia 1: cambio del tipo de pintura aplicada en la tienda

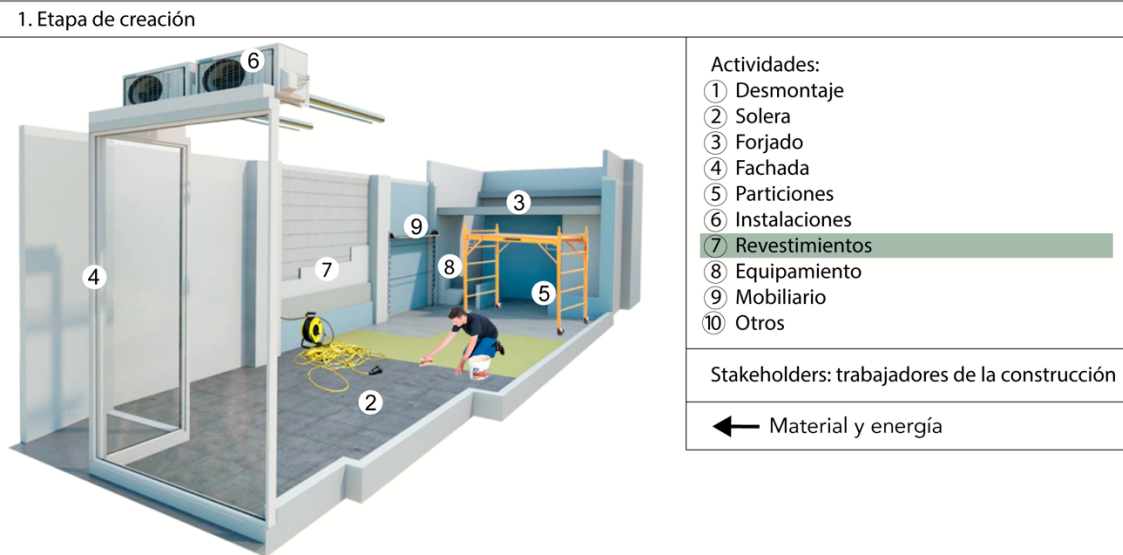
#### 3.1.1. Objetivo y alcance

El objetivo es evaluar los indicadores de sostenibilidad en el PSS una vez implementada la estrategia de mejora que consiste en cambiar el tipo de pintura aplicada en la tienda. El sistema

se compone de un sistema principal (servicio de venta de prendas) y un sistema secundario (tienda). Las etapas del ciclo de vida que se evalúan son: las etapas de creación y provisión en el caso del sistema servicio de venta y la etapa de creación en el caso de la tienda.

### 3.1.2. Inventario

Se recopilan las entradas y salidas generadas en el sistema con el cambio de revestimiento introducido. En la Figura 4.5 se muestra el inventario del nuevo revestimiento. Se muestran los valores del indicador GE en las etapas de producto (A1-3) y construcción (A4-5), el tiempo de trabajo y el salario de los trabajadores en la fase A5 y, por último, el coste total de la partida. Datos expresados por m<sup>2</sup>.



Actividad de construcción	Med.	Unid	GE		Trabajadores (A5)			Coste A1-5 (€)
			A1-2-3 (MJ)	A4-5 (MJ)	Nº	Tt (h)	St (€)	
Aplicación de pintura a la cal	236.51	m <sup>2</sup>	3.57	0.058	2	0.26	4.38	7.99

Figura 4.5. Servicio de venta de prendas. Esquema e inventario de la nueva partida.

Con respecto al revestimiento inicial, se observa que la energía incorporada disminuye un 61.2% debido principalmente al cambio de materia prima. El tiempo y el salario de los trabajadores se reduce, respectivamente, 23.5 y 22.8% a causa del mayor rendimiento en la nueva alternativa. Los costes descienden un 26% debido al descenso de los costes de materia prima y mano de obra.

### 3.1.3 Evaluación de indicadores

Se obtienen los indicadores de sostenibilidad del PSS y de cada sistema involucrado. De la misma manera que en el sistema inicial, se utiliza el software Cype para obtener los impactos de las actividades de construcción. Se producen ligeras variaciones en los indicadores del sistema tienda (BS) con respecto al caso inicial y, dada la baja incidencia del BS en el PSS, las variaciones en los indicadores globales del PSS son casi imperceptibles. Los resultados se muestran en la Tabla 4.11 de acuerdo con la unidad funcional que es 1 visita de un cliente. Los indicadores de calentamiento global y energía incorporada son, respectivamente 0.486 kgCO<sub>2</sub>-eq y 10.54 MJ. El indicador de costes de ejecución se mantiene constante, y la eco-eficiencia global es 21.10 €/kgCO<sub>2</sub>-eq. El tiempo de los trabajadores y el salario que obtienen es, respectivamente, 0.178 h y 0.709 €.

FU: 1 visita de un cliente						
Sistema	Dimensión medioambiental		Dimensión económica		Dimensión social	
	GWP <sub>100</sub> (kg CO <sub>2</sub> -eq)	GE (MJ)	C <sub>E</sub> (€)	EE (€/kg CO <sub>2</sub> -eq)	T <sub>w</sub> (h)	S <sub>w</sub> (€)
(FS) Servicio	0.454	10.18	10.13	22.31	0.176	0.683
(BS) Tienda	0.032	0.36	0.125	3.87	0.0015	0.026
<b>PSS<sub>1</sub> (FS+BS)</b>	<b>0.486</b>	<b>10.54</b>	<b>10.25</b>	<b>21.10</b>	<b>0.178</b>	<b>0.709</b>

Tabla 4.11. Servicio de venta de prendas. Indicadores de sostenibilidad aplicando la estrategia 1.

### 3.1.4. Interpretación de resultados

La incidencia del sistema tienda tras aplicar la estrategia de mejora de cambio del tipo de pintura tiene una incidencia significativa en el PSS en el indicador de GWP<sub>100</sub> (6.6%), pero sin embargo en los indicadores de C<sub>E</sub> (1.21%) y T<sub>w</sub> (0.84%) su incidencia es casi nula.

## 3.2. Estrategia 2: cambio en la provisión de prendas del servicio

### 3.2.1. Objetivo y alcance

El objetivo es evaluar los indicadores de sostenibilidad en el PSS una vez implementada la estrategia de mejora que consiste en un cambio en la provisión de las prendas de ropa del servicio. El sistema se compone de un sistema principal (servicio de venta de prendas) y un

sistema de fondo (tienda). Las etapas del ciclo de vida que se evalúan son: las etapas de creación y provisión en el caso del sistema servicio de venta y la etapa de creación en el caso de la tienda.

### 3.2.2. Inventario

Los cambios que se producen en el inventario están relacionados con la provisión de prendas del servicio de venta. La estrategia consiste en reducir el número de prendas que se adquieren manteniendo el mismo proveedor que en el caso inicial. La reducción es de un 20%, lo que significa que se adquieren 1,280 prendas, que suponen un coste de 108,800€ y unas emisiones de 6,576.64 kgCO<sub>2</sub>-eq. Datos expresados por año de operación del servicio.

### 3.2.3. Evaluación de indicadores

Se obtienen los indicadores de sostenibilidad del PSS y de cada sistema involucrado. De la misma manera que en el sistema inicial, se utiliza la base de datos The International EPD System (EPD, 2020) para obtener los impactos ambientales unitarios de las diferentes prendas. Los indicadores de sostenibilidad del PSS se muestran en la Tabla 4.12 de acuerdo con la unidad funcional establecida que es 1 visita de un cliente. Los indicadores de calentamiento global y energía incorporada son 0.405 kgCO<sub>2</sub>-eq y 8.67 MJ respectivamente. Los costes de producción son 9.01€ y la eco-eficiencia global es 22.24€/kgCO<sub>2</sub>-eq. Los indicadores de tiempo de trabajo y salario de los trabajadores son, respectivamente, 0.171h y 0.71€.

FU: 1 visita de un cliente						
Sistema	Dimensión medioambiental		Dimensión económica		Dimensión social	
	GWP <sub>100</sub> (kg CO <sub>2</sub> -eq)	GE (MJ)	C <sub>E</sub> (€)	EE (€/kg CO <sub>2</sub> -eq)	T <sub>w</sub> (h)	S <sub>w</sub> (€)
(FS) Servicio	0.367	8.30	8.89	24.22	0.17	0.683
(BS) Tienda	0.033	0.37	0.127	3.84	0.0016	0.027
<b>PSS<sub>2</sub> (FS+BS)</b>	<b>0.405</b>	<b>8.67</b>	<b>9.01</b>	<b>22.24</b>	<b>0.171</b>	<b>0.71</b>

Tabla 4.12. Servicio de venta de prendas. Indicadores de sostenibilidad aplicando estrategia 2.

3.2.4. Interpretación de resultados

En la Figura 4.6 se muestra la incidencia de los factores de sostenibilidad del PSS tras aplicar como estrategia de mejora el cambio en la provisión de las prendas. En las Figuras 4.6a, 6b y 6c se representan, respectivamente, la distribución porcentual de emisiones de efecto invernadero, costes de producción y tiempo de trabajo.

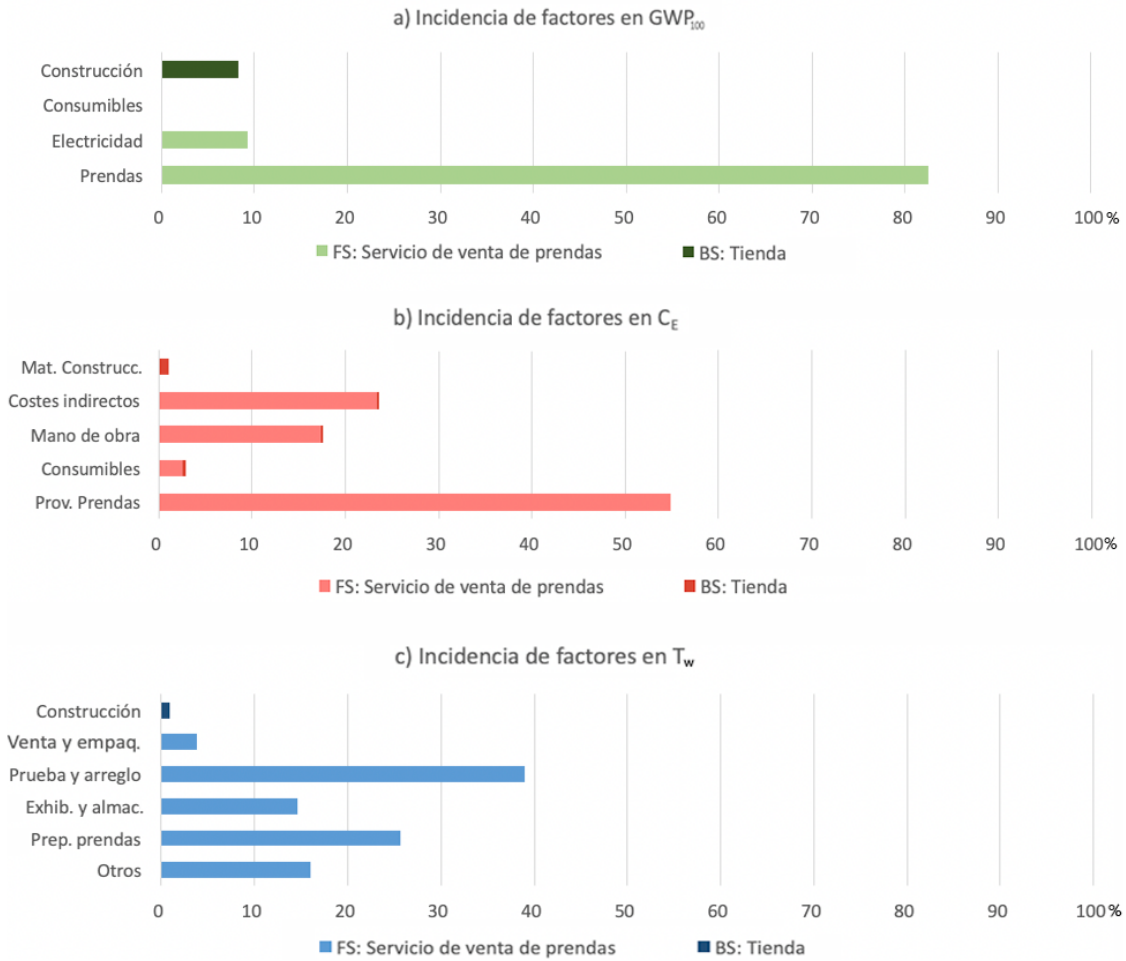


Figura 4.6. Servicio de venta de prendas. Distribución porcentual de los factores de impacto.

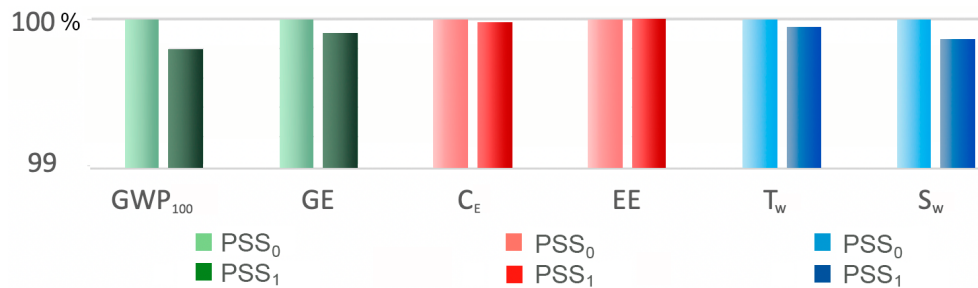
Tras aplicar la estrategia de mejora, el factor prendas reduce su incidencia en los indicadores  $GWP_{100}$  (2.2%) y  $C_e$  (5.4%) pasando a ser de 82.45 y 54.84%, respectivamente. En el indicador social de  $T_t$  las actividades de preparación de prendas, exhibición y almacenaje se reducen pasando a tener una incidencia de 23.7 y 13.4%, respectivamente.



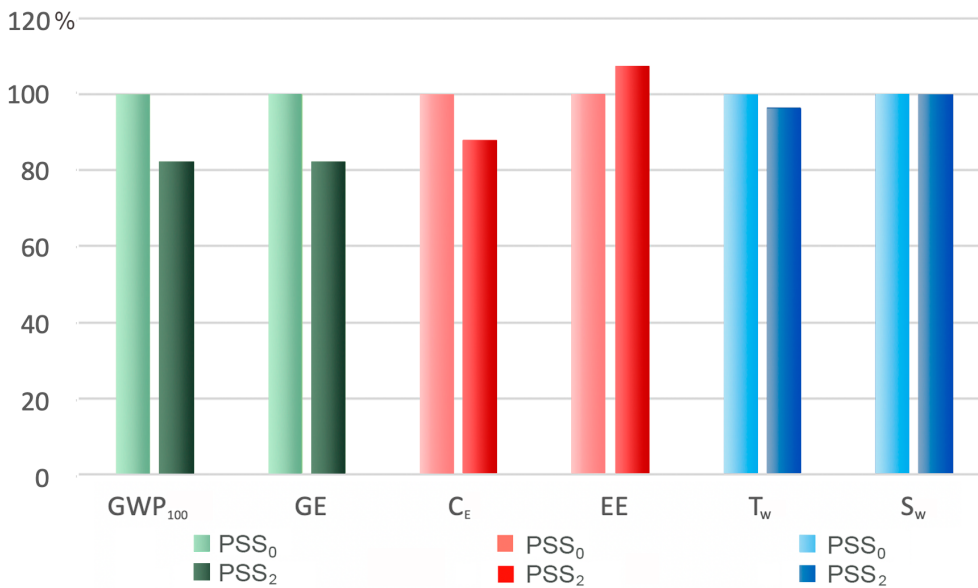
## Caso1 – 4. Comparación de sistemas

### 4.1. Estrategias independientes

En la Figura 4.7a y 7b se muestran, respectivamente, las variaciones que experimentan los indicadores de sostenibilidad del PSS de partida ( $PSS_0$ ) con respecto al PSS aplicando la estrategia 1 ( $PSS_1$ ) y al PSS aplicando la estrategia 2 ( $PSS_2$ ).



a) Comparación PSS<sub>0</sub> y PSS<sub>1</sub>



b) Comparación PSS<sub>0</sub> y PSS<sub>2</sub>

Figura 4.7. Servicio de venta de prendas – Comparación de indicadores.

Se obtienen los siguientes resultados tras aplicar la estrategia 1:

- Pequeña variación en los indicadores ambientales con una reducción de 0.2% en GWP<sub>100</sub> y de 0.1% en GE. Esta pequeña mejora se debe al cambio de material utilizado en el nuevo revestimiento.

- Apenas existe una mejora en los indicadores económicos con una reducción del 0.019% en los costes de ejecución y del 0.28% en la eco-eficiencia. Esto es debido a que los costes se mantienen prácticamente igualados al caso inicial.
- Se producen pequeñas variaciones en los indicadores sociales, que reducen en 0.05% el indicador de  $T_W$  y 0.14% el indicador  $S_W$ .

Se obtienen los siguientes resultados tras aplicar la estrategia 2:

- Gran mejora en los indicadores ambientales con una reducción de un 17.8% en  $GWP_{100}$  y de 17.8 % en GE. Esta mejora se debe a la reducción del consumo de energía en la producción de prendas y en las actividades de preparación de prendas, exhibición y almacenaje.
- Gran reducción de los costes de ejecución en 12% y aumento de la eco-eficiencia en 7.1%. Se reducen los costes de provisión de las prendas y de la energía necesaria para prepararlas.
- Leve mejora en el tiempo de trabajo con una reducción de un 3.3% debido a la reducción del tiempo de preparación, exhibición y almacenaje de prendas. El indicador de salario de trabajo no varía.

#### 4.2. Estrategias combinadas

En este apartado se obtienen los indicadores de sostenibilidad tras aplicar en el sistema las estrategias 1 y 2 (PSS<sub>3</sub>). Los resultados se muestran en la Tabla 4.13, de acuerdo con la unidad funcional que es una visita de un cliente. Los indicadores de calentamiento global y energía incorporada son, respectivamente, 0.399 kgCO<sub>2</sub>-eq y 8.66 MJ. Los costes de ejecución son 9.01€ y la eco-eficiencia global es 22.59 €/kgCO<sub>2</sub>-eq. En la dimensión social, el tiempo acumulado de trabajo por los trabajadores de la construcción y los dependientes es 0.172h y el salario acumulado es de 0.709€. La incidencia de la tienda (BS) en los indicadores del PSS es la siguiente: 8.0% en  $GWP_{100}$ , 4.2% en GE, 1.4% en  $C_E$ , 0.9% en  $T_W$  y 3.7% en  $S_W$ .

FU: 1 visita de un cliente

Sistema	Dimensión medioambiental		Dimensión económica		Dimensión social	
	GWP <sub>100</sub> (kg CO <sub>2</sub> -eq)	GE (MJ)	C <sub>E</sub> (€)	EE (€/kg CO <sub>2</sub> -eq)	T <sub>w</sub> (h)	S <sub>w</sub> (€)
(FS) Servicio	0.367	8.30	8.89	24.22	0.17	0.683
(BS) Tienda	0.032	0.36	0.12	3.87	0.0015	0.026
<b>PSS<sub>3</sub> (FS+BS)</b>	<b>0.399</b>	<b>8.66</b>	<b>9.01</b>	<b>22.59</b>	<b>0.172</b>	<b>0.709</b>

Tabla 4.13. Servicio de venta de prendas. Indicadores de sostenibilidad aplicando estrategias 1 y 2.

En los gráficos de la Figura 4.8 se muestran las variaciones que experimentan los indicadores de sostenibilidad entre el PSS de partida (PSS<sub>0</sub>) y el PSS en el que se aplican las estrategias 1 y 2 de manera combinada (PSS<sub>3</sub>). Los resultados son los siguientes:

- Mejora muy significativa de los indicadores ambientales con una reducción del 18% en GWP<sub>100</sub> y del 17.9% en GE.
- Gran reducción de los costes de ejecución y aumento de la eco-eficiencia, 12.2 y 7.4%, respectivamente.
- Leves variaciones en T<sub>w</sub> que se reduce 3.43% y en S<sub>w</sub> 0.14%.

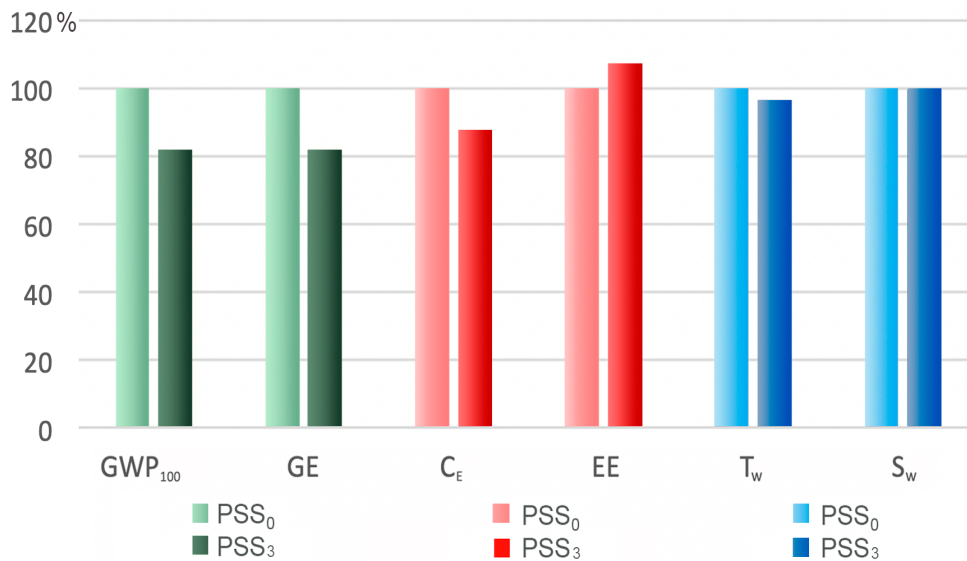


Figura 4.8. Servicio de venta de prendas - Variación de indicadores aplicando estrategias 1 y 2.

Se comprueba que se logra una mejora simultánea de los indicadores de sostenibilidad en las tres dimensiones. La mejora global de la sostenibilidad del sistema se puede determinar aplicando diferentes ponderaciones a cada dimensión. Se han considerado 4 posibilidades de acuerdo con las siguientes hipótesis:

- Caso 1: se da la misma importancia a las tres dimensiones. Por tanto, a cada uno de los indicadores de sostenibilidad se le asigna un coeficiente de ponderación de 0.33.
- Casos 2, 3 y 4: en cada uno de estos casos se establece una dimensión dominante a la que se le asigna un coeficiente de 0.5, mientras que al resto de dimensiones se le asigna un coeficiente de 0.25.

La Tabla 4.15 recoge los resultados obtenidos. En todos los casos los valores son positivos lo que indica resultados favorables. En cada caso, se obtiene un porcentaje de mejora de acuerdo a los coeficientes de ponderación asignados a cada indicador.

		C1	C2	C3	C4
Indicador	Variación (%)	Coeficientes de ponderación			
GWP <sub>100</sub>	18.07	0.33	0.5	0.25	0.25
C <sub>E</sub>	12.11	0.33	0.25	0.5	0.25
T <sub>w</sub>	3.43	0.33	0.25	0.25	0.5
		Mejora de la sostenibilidad (%)			
		11.1	12.9	11.4	9.3

Tabla 4.14. Servicio de venta de prendas. Mejora de la sostenibilidad según coef. de ponderación de indicadores.

## Caso 2 - 5. Conclusiones

Se parte de los resultados de sostenibilidad previos basados en unas condiciones específicas del punto de venta y del producto que ofrece el servicio y se comparan con los resultados obtenidos después de implementar unas estrategias de mejora.

Se propone aplicar un tipo de pintura alternativa que ofrece la misma estética que la pintura del caso inicial y supone un impacto menor en la sostenibilidad. Aunque los indicadores de sostenibilidad del revestimiento experimentan una mejora con respecto a la del caso inicial, se aprecian sólo ligeras variaciones en los indicadores del PSS ya que el sistema tienda (BS) tiene una incidencia pequeña en el PSS. El empleo de esta estrategia de rediseño ha permitido reducir ligeramente los indicadores ambientales (0.2% en GWP<sub>100</sub> y 0.1% en GE) y los sociales (0.05% en T<sub>w</sub> y 0.14% en S<sub>T</sub>).

Por otro lado, se aplica una estrategia de mejora en la que se reduce la cantidad de prendas adquiridas en el servicio de venta. Esta estrategia de rediseño produce una gran mejora tanto en los indicadores ambientales  $GWP_{100}$  (reducción del 17.8%) y GE (reducción del 17.8%), como en los indicadores económicos (con una reducción del 12.08% en CE y un aumento de la eco-eficiencia de 7.14%), y una leve mejora en el indicador  $T_w$  (reducción de 3.37%).

Por último, se observa que la aplicación conjunta de las dos estrategias conlleva variaciones importantes en la sostenibilidad del PSS, principalmente en las dimensiones medioambiental y económica. Los indicadores ambientales  $GWP_{100}$  y GE se reducen, respectivamente, 18 y 17.9%. El indicador económico de costes se reduce en un 12.1% y la eco-eficiencia mejora un 7.3%. En cuanto a los indicadores sociales, se reducen 3.43% y 0.14% en  $T_w$  y  $S_w$ , respectivamente.

Se consigue una mejora simultánea de los indicadores de sostenibilidad en las tres dimensiones, por lo que las cuatro posibilidades de ponderación consideradas son favorables. La mejora de la sostenibilidad del PSS se produce principalmente en las dimensiones medioambiental y económica, por lo que los casos que asignan mayores ponderaciones a estas dimensiones obtienen mejores resultados de sostenibilidad del PSS.

## Capítulo 5

# Conclusiones

---

En este capítulo se presenta un resumen de los resultados obtenidos, se exponen las contribuciones de la tesis y se propone una serie de líneas de trabajo futuro que den continuidad a la investigación.

En primer lugar, se muestran los resultados derivados de la amplia revisión de literatura científica que se ha realizado y que incluyen estudios de sostenibilidad en diferentes tipos de sistemas y estudios dedicados al análisis de Sistemas Producto-Servicio. A continuación, se presentan los resultados obtenidos a partir del desarrollo de un esquema metodológico para realizar la evaluación y mejora de la sostenibilidad en PSS. Se aplica LCSA como método de evaluación y se utilizan procedimientos clásicos de diseño. Finalmente, se exponen los resultados obtenidos después de la aplicación de estos métodos en dos casos de estudio diferentes.

El apartado de contribuciones de la tesis expone los principales logros alcanzados con este trabajo de investigación y el apartado trabajo de investigación futuro, los temas que requieren ser completados o desarrollados con más profundidad y las nuevas líneas que se abren.

### 5.1. Resumen de resultados

Se ha llevado a cabo una amplia revisión de estudios de sostenibilidad en diferentes tipos de sistemas. En cada trabajo revisado, se ha analizado el tipo de producto o servicio objeto de estudio, los objetivos de la investigación, el alcance del trabajo, los métodos y herramientas aplicadas y las principales conclusiones obtenidas. Los resultados de este trabajo de revisión han sido los siguientes:

- Los estudios de sostenibilidad se centran principalmente en sistemas producto. En los últimos años se empiezan a estudiar sistemas servicio y los Sistemas Producto-Servicio se encuentran todavía en una fase muy prematura.
- La sostenibilidad se evalúa generalmente desde una dimensión ambiental y de acuerdo con un enfoque de ciclo de vida. A partir del desarrollo de la metodología LCSA, son más numerosos los estudios que incluyen también la evaluación de impactos socio-económicos. El estudio de aspectos sociales es complejo ya que requiere que diferentes tipos de agentes sean considerados.
- El objetivo de muchos trabajos es el de comparar diferentes alternativas de producto o escenarios de desarrollo. Son bastante menos numerosos los estudios que proyectan mejoras y proponen evaluarlas y compararlas con el producto inicial.
- En muchos trabajos el análisis se centra en una parte del ciclo de vida. De esta forma se limita la complejidad de un estudio que implicaría disponer de un inventario completo de datos en todo el ciclo de vida.

Se ha revisado también la literatura científica relacionada con la definición, el análisis y el diseño de Sistemas Producto-Servicio (PSS), obteniendo los siguientes resultados:

- Estos sistemas son actualmente de gran interés para diferentes actividades empresariales y modelos de negocio. Consideran que, a través de la combinación de productos y servicios, se puede satisfacer adecuadamente las necesidades de usuarios y consumidores.
- Se consideran también como opciones prometedoras frente el desafío de la sostenibilidad, ya que la integración de servicios permite dar soluciones con menor consumo de materiales y recursos.
- La evaluación de la sostenibilidad de PSS se enfrenta al desafío de tener que integrar diferentes ciclos de vida. Sin embargo, no se proporcionan esquemas que faciliten esta integración y que permitan establecer relaciones entre sistemas.

Se ha desarrollado un esquema metodológico para realizar la evaluación y mejora de la sostenibilidad en PSS, que se basa en identificar la estructura de estos sistemas, aplicar LCSA como método de evaluación y utilizar procedimientos clásicos de diseño.

Las conclusiones que se obtienen de su puesta en práctica son las siguientes:

- Aplicando un enfoque de flujos entre sistemas, la estructura inicial de este tipo sistemas ha podido ser definida, se han identificado sistemas principales y sistemas secundarios, se pueden establecer relaciones entre sistemas y se pueden detallar las etapas del ciclo de vida en las que cada sistema interviene.
- El desarrollo secuencial de fases de un LCSA para realizar la evaluación de la sostenibilidad en PSS ha sido completado con aspectos específicos como la identificación de los límites de estudio del PSS, la utilización de una unidad funcional referida a productos y servicios y el desglose de los impactos generados por cada sistema.
- Se ha desarrollado un procedimiento que incluye la mejora de la sostenibilidad, que se compone de tres fases principales: la evaluación de la sostenibilidad en el PSS inicial, la aplicación de estrategias de mejora justificando el cumplimiento de las especificaciones iniciales y la comparación de resultados tras evaluar la sostenibilidad en el nuevo sistema.

El esquema metodológico propuesto es un proceso secuencial y sistemático, en el que el desarrollo de cada fase está condicionado por la finalización de la fase anterior, de tal manera que el objetivo último es proyectar la mejora de la sostenibilidad de un PSS. Para ello:

- Proyectar una mejora supone aplicar estrategias adecuadas y evaluar los indicadores de sostenibilidad que caracterizan el sistema.
- Proponer estas estrategias conlleva obtener la distribución de factores de impacto e identificar los factores más influyentes.
- Seleccionar una alternativa en la mejora de un sistema implica comprobar que las especificaciones iniciales se cumplen.
- Evaluar la sostenibilidad del sistema requiere conocer su estructura y realizar un detallado análisis de inventario de entradas y salidas.
- Obtener el inventario de datos supone integrar diferentes ciclos de vida, establecer relaciones entre etapas y conocer cómo intervienen en ellas los sistemas que forman parte del PSS.



Su aplicación a dos casos de estudio ha permitido obtener los siguientes resultados:

#### Caso 1 - Producción de leche

- PSS formado por un sistema principal (leche) y dos sistemas secundarios (servicio veterinario y estiércol). El sistema estiércol es un co-producto.
- En la incidencia de los sistemas secundarios en la sostenibilidad del PSS, destacar:
  - El servicio veterinario influye significativamente en los indicadores de acidificación (4.3%), costes de producción (3.9%) y tiempo de trabajo (7.4%).
  - La incidencia del sistema estiércol se ha obtenido teniendo en cuenta criterios económicos de asignación (contribución a los ingresos de la explotación: 13.7%).
- El factor de impacto más importante es la materia prima utilizada en la alimentación de los animales ya que supone el 86.8% de las emisiones de gases de efecto invernadero y el 46.7% de los costes de producción. El análisis de sensibilidad en el consumo de alimento revela que estos indicadores pueden variar, respectivamente,  $\pm 7.6$  y  $\pm 4.2\%$ .
- En la dimensión social, las actividades de ordeño suponen el 53.1% del tiempo de trabajo y en la dimensión económica, los costes de mano de obra generan 27.2% de los costes de producción.
- Al aplicar como estrategia de mejora un cambio en la alimentación, disminuye el impacto ambiental pero disminuye también el rendimiento económico, ya que se reducen los indicadores ambientales,  $GWP_{100}$  (22%) y  $Ac$  (32.3%), pero aumentan los costes de producción (15.3%).
- La estrategia de mejora de cambio en el régimen de vistas del veterinario, permite mejorar ligeramente los indicadores ambientales y los costes de producción. En la dimensión social supone una reducción de 1.2% en  $T_w$ .
- Una aplicación simultánea de las dos estrategias causaría variaciones significativas en la sostenibilidad del PSS, muy notables en la dimensión ambiental y económica, ya que  $GWP_{100}$  se reduciría 22.3% y  $C_e$  se incrementaría un 14.4%, y más pequeñas en la dimensión social ( $T_w$  se reduce 1.26%).
- La mejora global de la sostenibilidad del sistema depende de las ponderaciones que se den a cada dimensión.

**Caso 2 - Servicio de venta de prendas**

- PSS formado por un sistema principal (servicio de venta de prendas) y un sistema secundario (local comercial). Entre las etapas del ciclo de vida de estos sistemas se detecta una estrecha relación.
- La incidencia del sistema secundario en la sostenibilidad del PSS es muy baja en la mayor parte de los indicadores (<1.2%), excepto en el indicador  $GWP_{100}$  donde supone el 6.77% de las emisiones.
- El factor de impacto más importante en la sostenibilidad del PSS es la adquisición de prendas de vestir, ya que supone el 84.7% de las emisiones de gases de efecto invernadero y el 60% de los costes de operación.
- En el análisis de sensibilidad de los indicadores  $GWP_{100}$  y  $C_E$  a este factor se obtienen variaciones de  $\pm 15.2$  y  $\pm 12.1\%$ , respectivamente.
- En la dimensión social, las actividades de prueba y arreglo de ropa y la de preparación de prendas son las más destacadas ya que suponen el 37.5% y el 27.1% del tiempo de trabajo.
- Al proyectar un PSS más sostenible aplicando como estrategia de mejora un cambio en la cantidad de prendas adquiridas (según cantidad de prendas vendidas), se obtiene una notable reducción de los indicadores ambientales (17.8% en  $GWP_{100}$  y 17.8% en GE), y también una importante reducción en el indicador económico de costes de operación (12%).
- La estrategia de mejora cambio en la aplicación de acabados en el producto de construcción solo permitiría reducir ligeramente el impacto (0.2% en  $GWP_{100}$ , 0.019% en  $C_E$  y 0.05% en  $T_W$ ).
- Si se propone la aplicación conjunta de las dos estrategias se obtienen variaciones importantes en la sostenibilidad del PSS. Los indicadores ambientales  $GWP_{100}$  y GE se reducen, respectivamente, 18 y 17.9%, el indicador económico de costes se reduce 12.2% y la eco-eficiencia se incrementa 7.4%. Los indicadores sociales,  $T_W$  y  $S_W$ , se reducen 3.43% y 0.14%.
- Puesto que las estrategias aplicadas suponen una mejora simultánea de los indicadores de las tres dimensiones, se obtiene una mejora global de la sostenibilidad del PSS.

## 5.2. Contribuciones de la tesis

Teniendo en cuenta que el marco teórico-práctico de la investigación se centra en el estudio de la sostenibilidad en Sistemas Producto-Servicio, la realización de esta tesis ha contribuido al conocimiento de la materia de la siguiente forma:

- 1) Se ha logrado representar la estructura de Sistemas Producto-Servicio (PSS) y detallar las relaciones que se establecen entre los diferentes sistemas componentes, planteando y aplicando un enfoque de flujos entre sistemas.

La mayoría de estudios asociados a PSS lo hacen desde una perspectiva económica, considerándolos como sistemas innovadores de modelos de negocio, pero no lo hacen desde una perspectiva analítica que permita comprender su estructura.

- 2) Los PSS son también considerados por muchos autores como potenciales soluciones al desafío de la sostenibilidad. Sin embargo, no se han desarrollado trabajos que apliquen métodos y proporcionen pautas para realizar la evaluación de la sostenibilidad de una manera sistemática.

Esta tesis propone la utilización de la metodología LCSA (Life Cycle Sustainability Assessment) aportando aspectos específicos al desarrollo de la metodología que permiten su aplicación en PSS.

- 3) En la literatura científica, los estudios que aplican este tipo de metodología de evaluación de la sostenibilidad son realizados principalmente en sistemas producto. Los estudios en sistemas servicio son bastante menos numerosos y los estudios en PSS prácticamente inexistentes.

En este trabajo de investigación se logra evaluar la sostenibilidad de dos PSS constituidos por la combinación de sistemas muy diferentes, y se logra determinar, de forma simultánea, impactos de tipo ambiental, económico y social.

- 4) La realización de este trabajo contribuye a integrar los requerimientos de sostenibilidad en la metodología proyectual propia de la ingeniería y dentro del ámbito del diseño. Para ello, se trabaja con parámetros medibles, se identifican especificaciones, se analizan factores, se proponen alternativas y se utilizan herramientas para evaluar y mejorar la sostenibilidad.

- 5) Los estudios que abordan la sostenibilidad de un sistema (principalmente producto) se centran en obtener su evaluación a través de una serie de indicadores. En pocos casos se aportan alternativas de mejora, se proyectan soluciones, se evalúan y se comparan con el diseño inicial.

Este trabajo, además de evaluar la sostenibilidad, pone en práctica un planteamiento global que incluye evaluación y mejora de la sostenibilidad de PSS. Para ello, incluye la aplicación de estrategias de reducción de impactos, evalúa los cambios sobre el sistema inicial y los muestra de forma comparativa.

- 6) La tesis expone cómo la sostenibilidad puede ser incluida en proyectos de diseño y desarrollo de PSS, lo que puede ser utilizado desde un punto de vista académico y desde un punto de vista profesional y empresarial.

Se han realizado dos estudios muy diferentes que abordan casos reales, a través de los cuales se puede comprobar cómo se puede realizar la evaluación de la sostenibilidad de este tipo de sistemas, los efectos de diferentes factores y la incidencia de cada uno de los sistemas implicados.

Se ha proyectado también la mejora de estos sistemas incluyendo una serie de estrategias y teniendo en cuenta las especificaciones requeridas inicialmente.

- 7) La sostenibilidad es un concepto amplio, en el que intervienen múltiples factores y que tiene diferentes interpretaciones. Sostenible en muchos ámbitos empresariales e industriales se asocia a ecológico o se vincula a los aspectos económicos que se exponen con preferencia en las memorias de sostenibilidad.

En la tesis se aborda este concepto de una forma integradora, conectándolo con diferentes actividades económicas y contribuyendo a poner en práctica métodos que faciliten su comprensión y tratamiento.

### 5.3. Trabajo de investigación futuro

El trabajo de investigación desarrollado ha permitido realizar una serie de contribuciones significativas en el estudio de la sostenibilidad de PSS, pero también genera nuevas preguntas y abre nuevas vías de trabajo. A continuación, se indican algunas de las posibles líneas de estudio que podrían seguir siendo investigadas.

- 1) La metodología LCSA analiza y evalúa la sostenibilidad de un sistema con un enfoque de ciclo de vida. En este trabajo ha sido aplicada solamente en algunas de las etapas del ciclo de vida de los sistemas objeto de estudio.

Se considera que los resultados obtenidos permiten ampliar progresivamente el alcance hasta evaluar la sostenibilidad de todas las etapas del ciclo de vida de un PSS.

- 2) En cada PSS analizado, se han establecido unos límites de estudio dentro de los que se incluyen solo algunos de los sistemas involucrados. Sin embargo, cada PSS es una combinación extensa de sistemas que intervienen en diferentes etapas del ciclo de vida. Aplicando el enfoque de flujos entre sistemas, el trabajo desarrollado en esta tesis podría ser ampliado con el objetivo de lograr un esquema general que incluya en su estructura todos los sistemas secundarios potencialmente significativos.

- 3) Los indicadores empleados en este trabajo de investigación cuantifican impactos específicos de cada caso de estudio. Por tanto, solamente proporcionan una limitada información de la sostenibilidad de cada PSS.

Realizar un análisis completo y detallado de la sostenibilidad requiere utilizar en su caracterización el mayor número posible de categorías de impacto y de indicadores.

En particular, los PSS muestran elevada interacción entre agentes sociales, por lo que se propone profundizar en el estudio y evaluación de la dimensión social seleccionando indicadores apropiados que tengan en cuenta todos los agentes implicados.

- 4) La mejora de la sostenibilidad se proyecta a partir de la distribución de impactos obtenida de acuerdo con los límites y alcance de los estudios realizados y de los indicadores seleccionados en su análisis.

Realizar estudios en todo el ciclo de vida y con un listado completo de indicadores permitiría plantear estrategias de mejora más eficaces.

## Referencias

---

- A69/L.85, 2015. Proyecto de documento final de la cumbre de las Naciones Unidas para la aprobación de la agenda para el desarrollo después de 2015. Asamblea General.
- Akasaka, F., Nemoto, Y., Kimita, K., Shimomura, Y., 2012. Development of a knowledge-based design support system for product-service systems. *Comput. Ind.* 63 (4), 309-318.
- Andriankaja, H., Vallet, F., Le Duigou, J., Eynard, B., 2015. A method to ecodesign structural parts in the transport sector based on product life cycle management. *Journal of Cleaner Production* 94, 165-176.
- Asadi, S., Babaizadeh, H., Foster, N., Broun, R., 2016. Environmental and economic life cycle assessment of PEX and copper plumbing systems: A case study. *J Clean Prod* 137, 1228-1236.
- Ashford, N.A. and Hall, R.P., 2011. The importance of Regulation-Induced Innovation for Sustainable Development. *Sustainability* 3, 270-292.
- Aurich, J.C., Fuchs, C., Wagenknecht, C., 2006a. Life cycle oriented design of technical product-service systems. *J. Clean. Prod.* 14 (17), 1480-1494.
- Aurich, J.C., Mannweiler, C., Schweitzer, E., 2010. How to design and offer services successfully. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 2 (3), 136-143.

- Babaizadeh, H., Haghighi, N., Asadi, S., Broun, R., Riley, D., 2015. Life cycle assessment of exterior window shadings in resident buildings in different climate zones. *Building and environment* 90, 168-177.
- Baden, D., Prasad, S., 2016. Applying behavioural theory to the challenge of sustainable development: using hairdressers as diffusers of more sustainable hair-care practices. *J Bus Ethics* 133, 335-349.
- Baines, T.S., Lightfoot, H.W., Evans, S., Neely, A., Greenough, R., Peppard, J., Roy, R., Shehab, E., Braganza, A., Tiwari, A., Alcock, J.R., Angus, J.P., Bastl, M., Cousens, A., Irving, P., Johnson, M., Kingston, J., Lockett, H., Martinez, V., Michele, P., Tranfield, D., Walton, I.M., Wilson, H., 2007. State-of-the-art in product-service systems. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 221 (10), 1543-1552.
- Bartolozzi, I., Baldereschi, E., Daddi, T., Iraldo, F., 2018. The application of life cycle assessment (LCA) in municipal solid waste management: A comparative study on street sweeping services. *J Clean Prod* 182, 55-465.
- Benoît-Norris, C., Vickery-Niederman, G., Valdivia, S., Franze, J., Traverso, M., Cirotto, A., Mazijn, B., 2011. Introducing the UNEP/SETAC methodological sheets for subcategories of social LCA. *International Journal of Life Cycle Assessment* 16, 682-690.
- Bermejo, R., Arto, I., Hoyos, D., Garmendia, E., 2010. Menos es más. Del desarrollo sostenible al decrecimiento sostenible. *Cuadernos de trabajo de Hegoa* 52.
- Beuren, F.H., Gomes, M. G., Cauchick, P. A., 2013. Product-service systems: a literature review on integrated products and services. *J. Clean. Prod.* 47, 222-231.
- Boër, C.R., Pedrazzoli, P., Bettoni, A., Sorlini, M., 2013. *Mass Customization and Sustainability. An Assessment Framework and Industrial Implementation.* Springer-Verlag, London.
- Bohem, M., Thomas, O., 2013. Looking beyond the rim of one's teacup: a multidisciplinary literature review of Product-Service Systems in Information Systems, Business Management, and Engineering & Design. *Journal of Cleaner Production* 51, 245-260.
- Bortolini, M., Cascini, A., Gamberi, M., Mora, C., Regattieri, A., 2014. Sustainable design and life cycle assessment of an innovative multi-functional haymaking agricultural machinery. *Journal of Cleaner Production* 82, 23-36.

- 
- Bovea, M.D. and Pérez-Belis, V., 2012. A taxonomy of eco-design tools for integrating environmental requirements into the product design process, *Journal of Cleaner Production* 20:1, 61-71.
- Brandstötter, M., Haberl, M., Knoth, R., Kopacek, B., Kopacek, P., 2003. IT on demand towards an environmental conscious service system for Vienna. In: *Proceedings of EcoDesign'03: Third International Symposium on Environmentally Conscious Design and inverse Manufacturing*. Japan, 799-802.
- Brezet, J.C. and Van Hemel C.G., 1997. *Ecodesign: a promising approach to sustainable production and consumption*. UNEP, United Nations Publications, Paris.
- Brezet, J.C., Bijma, A.S., Ehrenfeld, J., Silvester, S., 2001. *The design of eco-efficient services*. TU Delft for the Dutch Ministry of Environment, Delft, Netherlands.
- Budzinski, M., Sisca, M., Thrän, D., 2019. Consequential LCA and LCC using linear programming: an illustrative example of biorefineries. *International Journal of Life Cycle Assessment* 24, 2191-2205.
- Burchart-Korol, D., Jursova, S., Folega, P., Pustejovska, P., 2020. Life cycle impact assessment of electric vehicle battery charging in European Union countries. *Journal of Cleaner Production* 257, 120476.
- Capitano, C., Traverso, M., Rizzo, G., Finkbeiner, M., 2011. Life cycle sustainability assessment: an implementation to marble products. *Life Cycle Management Conference, LCM*, Berlin, Germany.
- Cerutti, K., Ardente, F., Contu, S., Donno, D., Beccaro, G.L., 2018. Modelling, assessing and ranking public procurement options for a climate-friendly catering service. *Int J Life Cycle Assess* 23, 95-115.
- Ceschin, F., 2013. Critical factors for implementing and diffusing sustainable product-service systems: insights from innovation studies and companies' experiences. *J Clean Prod* 45, 74-88.
- Ciroth, A., Franze, J., 2011. *LCA of an Ecolabeled Notebook. Consideration of Social and Environmental Impacts Along the Entire Life Cycle*. GreenDelta TC GmbH, Berlin.
- Cype Ingenieros, 2018. Disponible en: <http://www.generadordeprecios.info>



- 
- Clayton, R.J., Backhouse, C.J., Dani, S., 2012. Evaluating existing approaches to product-service system design: a comparison with industrial practice. *J. Manuf. Technol. Manag.* 23 (3), 272-298.
- Clow, K. E., Kurtz, D. L., 1998. A longitudinal study of the stability of consumer expectations of services. *Journal of Business Research* 42, 1, 63-73.
- Crul, M. and Diehl, J.C., 2009. Design for sustainability. A step-by-step approach. United Nations Environment Programme (UNEP), United Nations Publications, Paris, France.
- Chang, Y., Sproesser, G., Neugebauer, S., Wolf, K., Scheumann, R., Pittner, A., Rethmeier, M., Finkbeiner, M., 2015. Environmental and social life cycle assessment of welding technologies. 12th Global Conference on Sustainable Manufacturing. *Procedia CIRP* 26, 293-298.
- Chen, W.T., Hsu, C.I., 2015. Greenhouse gas emission estimation for temperature-controlled food distribution systems. *J Clean Prod* 104, 139-147.
- Chobtang, J., Ledgard, S.F., McLaren, S.J., Donaghy, D.J., 2017. Life cycle environmental impacts of high and low intensification pasture-based milk production systems: A case study of the Waikato region, New Zealand. *Journal of Cleaner Production* 140, 664-674.
- Chun, Y.Y., Lee, K.M., 2017. Environmental impacts of the rental business model compared to the conventional business model: a Korean case of water purifier for home use. *Int J Life Cycle Assess* 22, 1096-1108.
- Dalal-Clayton, D.B. and Bass, S., 2002. Sustainable development strategies: A resource book. Earthscan publications Ltd., England.
- De Luca, A.I., Falcone, G., Stillitano, T., Iofrida, N., Strano, A., Gulisano, G., 2018. Evaluation of sustainable innovations in olive growing systems: A life cycle sustainability assessment case study in southern Italy. *Journal of Cleaner Production* 171, 1187-1202.
- Del Borghi, A., Strazza, C., Gallo, M., Messineo, S., Naso, M., 2013. Water supply and sustainability: life cycle assessment of water collection, treatment and distribution. *Int J Life Cycle Assess* 18, 1158-1168.
- Del Pero, F., Delogu, M., Pierini, M., Bonaffini, D., 2015. Life cycle assessment of a heavy metro train. *Journal of Cleaner Production* 87, 787-799.
- Diehl, J. C., Crul, M., Ryan, C., 2009. Design for sustainability: A Step-by-Step Approach. United Nations Environment Program. ISBN: 92-807-2711-7. Disponible en: [www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:26000:ed-1:v1:es](http://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:26000:ed-1:v1:es)
-

- Djellal, F., Gallouj, F., 2013. The productivity challenge in services: measurement and strategic perspectives. *Serv Ind J* 33 (3-4), 282-299.
- Doualle, B., Medini, K., Boucher, X., Laforest, V., 2015. Investigating Sustainability Assessment Methods of Product-service Systems. *Procedia CIRP*, 30, 161–166.
- Duane, B., Taylor, T., Stahl-Timmins, W., Hyland, J., Mackie, P., Pollard, A., 2014. Carbon mitigation, patient choice and cost reduction - triple bottom line optimisation for health care planning. *Public Health* 128, 920-924.
- Durlinger, B.; Koukouna, E.; Broekema, R.; van Paassen, M.; Scholten, J. 2017. *Agri-footprint 3.0*. Gouda: Blonk consultants, NL.
- Eastwood, M.D. and Haapala, K.R., 2015. A unit process model based methodology to assist product sustainability assessment during design for manufacturing. *Journal of Cleaner Production* 108, 54-64.
- Ediger, V.S., Hosgor, E., Surmeli, A.N., Tathdil, H.T., 2007. Fossil fuel sustainability index: an application of resource management. *Energy Policy* 35, 2969-2977.
- Elduque, D., Javierre, C., Pina, C., Martinez, E., Jimenez, E., 2014. Life cycle assessment of a domestic induction hob: electronic boards. *Journal of Cleaner Production* 76, 74-84.
- EN 15804:2012+A2:2019 , 2019. Sustainability of construction works - Environmental product declarations - Core rules for the product category of construction products
- EPD Database, 2020. Available online: [www.environdec.com/EPD-Search/](http://www.environdec.com/EPD-Search/) (accessed on 4th February 2020).
- European Environment Agency (EEA) - Global and European Temperature, 2020. Disponible en: [www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/global-and-european-temperature-4/assessment](http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/global-and-european-temperature-4/assessment)
- Fargnoli, M., De Minicis, M., Tronci, M., 2014. Design management for sustainability: an integrated approach for the development of sustainable products. *Journal of engineering and technology management* 34, 29-45.
- Farreny, R., Oliver, J., Escuder, S., Roca, M., Sevigné, E., Gabarrell, X., Rieradevall, J., 2012. The metabolism of cultural services. Energy and water flows in museums. *Energy and Buildings* 47, 98-106.
- FEDNA, 2010. Fundación Española para el Desarrollo de la Nutrición Animal. Disponible en: [www.fundacionfedna.org/tablas-fedna-composicion-alimentos-valor-nutritivo](http://www.fundacionfedna.org/tablas-fedna-composicion-alimentos-valor-nutritivo)

- 
- Ferrari, A. M., Volpi, L., Pini, M., Siligardi, C., García-Muiña, F. E., & Settembre-Blundo, D., 2019. Building a sustainability benchmarking framework of ceramic tiles based on life cycle sustainability assessment (LCSA). *Resources*, 8:1, 11.
- Fiksel, J., McDaniel, J., Spitzley, D., 1998. Measuring product sustainability. *Journal of Sustainable Product Design* 6, 7-18.
- Finkbeiner, M., Schau, E.M., Lehmann, A., Traverso, M., 2010. Towards life cycle sustainability assessment. *Sustainability* 2, 3309 - 3322.
- Fisk, R.P., Brown, S.W., Bitner, M.J., 1993. Tracking the evolution of the services marketing literature. *J. Retailing* 69 (1), 61-103.
- Foolmaun, R. K., Ramjeawon, T., 2008. Life Cycle Assessment (LCA) of PET bottles and comparative LCA of the three disposal options in Mauritius. *International Journal Environment and Waste Management* 2: 1-2. 125-138.
- Foolmaun, R.K. and Ramjeawon, T. 2013. Life cycle sustainability assessments (LCSA) of four disposal scenarios for used polyethylene terephthalate (PET) bottles in Mauritius. *Environ Dev Sustain* 15: 3, 783-806.
- Fourcroy, C., Gallouj, F., Decellas, F., 2012. Energy consumption in service industries: challenging the myth of non-materiality. *Ecol Econ* 81, 155-164.
- Gadrey, J., 2002. The misuse of productivity concepts in services: lessons from a comparison between France and the United States. In: Gadrey, J., Gallouj, F. (Eds.) *Productivity, Innovation and Knowledge in Services: New Economic and Socio-economic Approaches*. Edward Elgar, Cheltenham.
- Gagnon, B., Leduc, R., Savard, L., 2012. From a conventional to a sustainable engineering design process: different shades of sustainability. *Journal of Engineering Design* 23:1, 49-74.
- Gao, J., Yao, Y., Zhu, V.C.Y., Sun, L., Lin, L., 2009. Service-oriented manufacturing: a new product pattern and manufacturing paradigm. *Journal of Intelligent Manufacturing* 22 (3), 435-446.
- Geng, X., Chu, X., Xue, D., Zhang, Z., 2010a. An integrated approach for rating engineering characteristics' final importance in product-service system development. *Comput. Ind. Eng.* 59 (4), 585-594.

- Geng, X., Chu, X., Xue, D., Zhang, Z., 2010b. Prioritizing engineering characteristics of product-service system using analytic network process and data envelopment analysis. In: Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference, p. 909.
- Geng, X., Chu, X., Xue, D., Zhang, Z., 2011. A systematic decision-making approach for the optimal product-service system planning. *Expert Syst. Appl.* 38 (9), 11849-11858.
- Geum, Y., Park, Y., 2010. Development of technology roadmap for product-service system (TRPSS). In: IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, pp. 410-414.
- Goedkoop, M. and Spriensma, R., 2000. The Eco-indicator 99. A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment. Methodology report. PRé Consultants B.V., Amersfoort, The Netherlands.
- Goedkoop, M.J., van Hale, C.J.G., te Riele, H.R.M. Rommens, P.J.M., 1999. Product Service Systems, Ecological and Economic Basics, Report of Pi!MC, Storm C.S. and Pré consultants, in assignment of the Dutch ministries of Environmental and Economical affairs.
- Gómez, N., Cadarso, M.A., Monsalve, F., 2016. Carbon footprint of a university in a multiregional model: the case of the University of Castilla-La Mancha. *J Clean Prod* 138, 119-130.
- Guinée, J., Gorrée, M., Heijungs, R., Huppes, G., Kleijn, R., de Koning, A., et al., 2001. Life cycle assessment - an operational guide to the ISO standards. Centre of Environmental Sciences (CML), Leiden University.
- Hannouf, M., Assefa, G., 2017. Life Cycle Sustainability Assessment for sustainability improvements: a case study of high-density polyethylene production in Alberta, Canada. *Sustainability* 9, 12.
- Hetherington, A.C., McManus, M.C., Gray, D.A., 2011. Comparison of allocation and impact assessment methodologies on the life cycle assessment of rape and sunflower seed oils. 5th International Conference in Life Cycle Management, Berlin, Germany.
- Hilty, L. and Aebischer, B., 2014. ICT for sustainability: An emerging research field. Springer International Publishing Swatzerland.
- Hockerts, K., Weaver, N., 2002. Are Service Systems Worth Our Interest? Assessing the Eco-efficiency of Sustainable Service Systems. Working Document INSEAD, Fontainebleau, France.

- 
- Horowitz, N., Frago, J., Mu, D., 2018. Life cycle assessment of bottled water: A case study of Green20 products. *Waste Management* 76, 734-743.
- Hospidio, A., Moreira, M., Feijoo, G., 2002. Simplified life cycle assessment of galician milk production. *International dairy Journal* 13, 783-796.
- Hossain, M.D., Poon, C.S., 2018. Comparative LCA of wood waste management strategies generated from building construction activities. *J Clean Prod* 177, 387-397.
- IHOBE, S. A. Sociedad pública de gestión ambiental, 2000. Manual práctico de ecodiseño, operativa de implantación en 7 pasos. Gobierno Vasco.
- Iriarte, A., Gabarrell, X., Rieradevall, J., 2009. LCA of selective waste collection systems in dense urban areas. *Waste Management* 29, 903-914.
- Iritani, D., Silva, D., Saavedra, Y., Graell, P., Ometto, A., 2015. Sustainable strategies analysis through life cycle assessment: a case study in a furniture industry. *Journal of Cleaner Production* 96, 308-318.
- ISO, 2006a. ISO 14040 International Standard. In: *Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework*. International Organisation, Geneva, Switzerland.
- ISO, 2006b. ISO 14040 International Standard. In: *Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and Guidelines*. International Organisation, Geneva, Switzerland.
- Keoleian, G., Menerey, D., 1993. A life cycle approach to product system design. *Pollution Prevention Review* 3:3, 293-306.
- Kloepffer, W., 2007. Life-cycle based sustainability assessments as part of LCM. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Life Cycle Management*, Zurich, Switzerland, 27-29 August, 2007.
- Kloepffer, W., 2008. Life cycle sustainability assessment of products (with comments by Helias A. Udo de Haes, p. 95). *International Journal of Life Cycle Assessment* 13 (2), 89-95.
- Kuo, T.C., Wu, H.H., 2003. Green products development by applying grey relational analysis and green quality function deployment. *International Journal of Fuzzy Systems* 5 (4), 229-238.

- Lacasa, E. 2018. Planteamiento y puesta en práctica de una metodología para proyectar el desarrollo de productos sostenibles. Tesis Doctoral. Universidad de Zaragoza – Departamento de ingeniería de Diseño y Fabricación.
- Lacasa, E., Santolaya, J.L., Biedermann, A., 2016. Obtaining sustainable production from the product design analysis. *Journal of Cleaner Production* 139, 706-716.
- Lagerstedt, J., Luttrupp, C., Lindfors, L.G., 2003. Functional priorities in LCA and design for environment. *International Journal of Life Cycle Assessment* 8:3, 160-166.
- Lay, G., Schroeter, M., Biege, S., 2009. Service-based business concepts: a typology for business-to-business markets. *Eur. Manag. J.* 27 (6), 442-455.
- Leff, E., 2010. Globalización, ambiente y sustentabilidad (6ª ed.). Saber Ambiental, Siglo XXI Editores, México.
- Lehtinen, H., Saarentaus, A., Rouhiainen, J., Pitts, M., Azapagic, A. 2011. A review of LCA methods and tools and their suitability for SMEs. *Europe Innova*.
- Lenzo, P., Traverso, M., Mondello, G., Salomone, R., Ioppolo, G., 2018. Sustainability performance of an Italian textile product. *Economies* 6, 17.
- Li, H., Ji, Y., Gu, X., Qi, G., Tang, R., 2012. Module partition process model and method of integrated service product. *Comput. Ind.* 63 (4), 298-308.
- Li, P., Bai, W., Ma, K., 2014. Accommodation services- A case of four-star hotels in Kunming city of China. In: *International Conference on Management and Engineering (CME)*, Shanghai, China, 1400-1418.
- Luttrupp, C. and Lagerstedt, J., 2006. Ecodesign and the ten golden rules: generic advice for merging environmental aspects into product development. *Journal of Cleaner Production* 14, 1396-1408.
- Manzini, E., Vezzoli, C., 2003. A strategic design approach to develop sustainable product service systems: examples taken from the 'environmentally friendly innovation' Italian prize. *Journal of Cleaner Production* 11 (8), 851-857.
- Manzini, E., Vezzoli, C., Clark, G., 2001. Product service systems: using an existing concept as a new approach to sustainability. *Journal of Design Research* 1 (2).
- Mapama, 2018. Spain Government. [Online] [www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/mitigacion-politicas-y-medidas/factores\\_emision\\_tcm30-446710.pdf](http://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/mitigacion-politicas-y-medidas/factores_emision_tcm30-446710.pdf)

- 
- Martínez-Blanco, J., Lehmann, A., Muñoz, P., Antón, A., Traverso, M., Rieradevall, J., Finkbeiner, M., 2014. *Journal of Cleaner Production* 69, 34-48.
- Martínez, E., Sanz, F., Pellegrini, S., Jiménez, S., Blanco, J., 2009. Life cycle assessment of a multi-megawatt wind turbine. *Renewable energy* 34, 667-673.
- Masruroh, N., Klemes, B., 2006. Life cycle analysis of a solar thermal system with thermochemical storage process. *Renewable energy* 31, 537-548.
- Maxwell, D., Van der Vorst, R., 2003. Developing sustainable products and services. *Journal of Cleaner Production* 11, 883-895.
- Meadows, D., Meadows, D., Randers, J., Behrens, W., 1972. *The limits to growth*. Universe Books.
- Metcalfe, J.S., Miles, I., 2000. Introduction, overview and reprise. In: Metcalfe, J.S., Miles, I. (Eds.), *Innovation Systems in the Service Economy: Measurement and Case Study Analysis*. Nova Iorque. Springer Science & Business Media, 1-12.
- Mittermeyer, S.A., Njuguna, J.A., Alcock, J.R., 2010. Product-service systems in health care: case study of a drug-device combination. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 52 (9-12), 1209-1221.
- Mont, O., 1999. Product-Service Systems, Shifting corporate focus from selling products to selling product-services: a new approach to sustainable development, AFR-report nr. 288.
- Mont, O., 2000. *Product Service-System*. Swedish Environmental Protection Agency, Sweden.
- Mont, O., 2002. Clarifying the concept of product-service system. *The Journal of Cleaner Production* 10 (3), 237-245.
- Morelli, N., 2006. Developing new product service systems (PSS): methodologies and operational tools. *J. Clean. Prod.* 14, 1495-1501.
- Nazar, H., Nazar, Z., 2019. Community pharmacy minor ailment services: Pharmacy stakeholder perspectives on the factors affecting sustainability. *Research in Social and Administrative Pharmacy* 15, 292-302.
- Ng, R., Yeo, Z., Sze Choong Low, J., Song, B., 2015. A method for relative eco-efficiency analysis and improvement: case study of bonding technologies. *J Clean Prod* 99:320–332.
- Normann, R., 1984. *Service Management - Strategy and Leadership in the Service Industry*. Chichester, UK: John Wiley and Sons.

- O'born, R., 2018. Life cycle assessment of large scale timber bridges: A case study from the world's longest timber bridge design in Norway. *Transportation Research Part D* 59, 301-312.
- Pezzotta, G., Cavalieri, S., Gaiardelli, P., 2012. A spiral process model to engineer a product service system: an explorative analysis through case studies. *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.* 5 (3), 214-225.
- Pigosso, D.C.A., McAlloone, T., 2016. Maturity-based approach for the development of environmentally sustainable product/service-systems. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 15, 33-41.
- Probas Database. German Environmental Protection Agency. Umweltbundesamt (UBA). Available online: <https://www.probas.umweltbundesamt.de/php/index.php> (accessed on 13 April 2017).
- Rabbitt, N., Ghosh, B., 2016. Economic and environmental impacts of organised car sharing services: a case study of Ireland. *Research in Transportation Economics* 57, 3-12.
- Reginald, B., Khoo, H., 2005. Life cycle assessment of EPS and CPB inserts: design considerations and end of life scenarios. *Journal of environmental management* 74, 195-205.
- Ren, J., Manzardo, A., Mazzi, A., Zuliani, F., Scipioni, A., 2015. Priorization of bioetanol production pathways in China based on life cycle sustainability assessment and multicriteria decision-making. *International Journal Life Cycle Assessment* 20, 842-853.
- Rexfelt, O., Ornäs, V.H., 2009. Consumer acceptance of product-service systems: designing for relative advantages and uncertainty reductions. *Journal of Manufacturing Technology Management* 20 (5), 674-699.
- Sachs, J., 2015. *The age of sustainable development*. Columbia University Press.
- Sakao, T., Sandström, G.Ö., Matzen, D., 2009a. Framing research for service orientation of manufacturers through PSS approaches. *Journal of Manufacturing Technology Management* 20 (5), 754-778.
- Sanjuán, D., Petit, A., Martínez, J., Rieradevall, J., 2016. Environmental metabolism of educational services. Case study of nursery schools in the city of Barcelona. *Energy Efficiency* 9, 981-992.



- 
- Santolaya, J.L., Lacasa, E., Biedermann, A., Muñoz, N., 2019. A practical methodology to project the design of more sustainable products in the production stage. *Research in Engineering Design* 30:4, 539-558.
- Scheepens, A.E., Vogtländer, J.G., Brezet, J.C., 2016. Two life cycle assessment (LCA) based methods to analyse and design complex (regional) circular economy systems. Case: making water tourism more sustainable. *J Clean Prod* 114, 257-268.
- Siddiqui, O., Dincer, I., 2017. Comparative assessment of the environmental impacts of nuclear, wind and hydro-electric power plants in Ontario: a life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production* 164, 848-860.
- Song, Q., Wang, Z., Li, J., Zeng, X., 2012. Life cycle assessment of TV sets in China: a case study of the impacts of CRT monitors. *Waste management* 32, 1926-1936.
- Sousa-Zomer, T.T., Cauchick, P.A., 2018. Sustainable business models as an innovation strategy in the water sector: An empirical investigation of a sustainable product-service system. *J. Clean. Prod.* 171, S119-S129.
- Sousa-Zomer, T.T., Cauchick, P.A., 2018. The main challenges for social life cycle assessment (SLCA) to support the social impacts analysis of product-service systems. *International Journal Life Cycle Assessment* 23, 607-616.
- Stahel, W., 2000. *From Products to Services: Selling Performance instead of Goods*, Helsinki, Editor., February, 18, 2000: Gaia Group.
- Sundin, E., Sandström, G.O., Lindahl, M., Rönnbäck, A.O., 2009. Using company-academia networks for improving product/service systems at large companies. In: Sakao, T., Lindahl, M. (Eds.), *Introduction to Product/Service-system Design*. Springer, London, 185-196.
- Traverso, M., Asdrubali, F., Francia, A., Finkbeiner, M., 2012. Towards life cycle sustainability assessment: an implementation to photovoltaic modules. *International Journal of Life Cycle Assessment* 17, 1068-1079.
- Tukker, A., 2004. Eight types of product-service system: eight ways to sustainability? *Bus. Strat. Environ.* 13 (4), 246-260.
- Tukker, A., 2015. Product services for a resource-efficient and circular economy - a review. *J Clean Prod* 97, 76-91.

- 
- Tukker, A., Tischner, U., 2006. *New Business for Old Europe: Product Service Development, Competitiveness and Sustainability*. Greenleaf Publishing, Sheffield, UK.
- Tukker, A., Tischner, U., 2006b. *New Business for Old Europe. Product-service Development as a Means to Enhance Competitiveness and Eco-efficiency*. Greenleaf Publishing, Sheffield, UK.
- UNCED, 1992, *Agenda 21, United Nations Conference on Environment and Development*, Rio de Janeiro, June 1992.
- UNEP (2015) *Using product-service systems to enhance sustainable public procurement*. <http://www.unep.org/10yfp/Portals/50150/10YFP%20SPP/3ATechnical%20report.pdf>  
Accessed 18 Aug 2015
- UNEP/SETAC 2011. *Towards a Life Cycle Sustainability Assessment. Making informed choices on products*. United Nations Environment Programme, Paris.
- UNEP/SETAC, 2009. *Guidelines for Social Life Cycle Assessment of Products*. United Nations Environment Programme, Paris.
- Valdivia, S., Ugaya, C.M.L., Hildenbrand, J., Traverso, M Mazijn, B, Sonneman, G., 2013. A UNEP/SETAC approach towards a life cycle sustainability assessment-our contribution to Rio+20. *International Journal of Life Cycle Assessment* 18, 1673-1685.
- Vezzoli, C., Kohtala, C., Srinivasan, A., Diehl, J.C., Fusakul, S.M., Xin, L., Sateesh, D., 2014. *Product-service system design for sustainability*. Greenleaf Publishing, Sheffield.
- Vinyes, E., Oliver-Solà, J., Ugaya, C., Rieradevall, J., Gasol, C.M., 2013. Application of LCSA to used cooking oil waste management. *Int J Life Cycle Assess* 18, 445-455.
- Wang, J.J., Sun, Y.W., Tingley, D.D., Zhang, Y.R., 2017. Life cycle sustainability assessment of fly ash structures. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 80, 1162-1174.
- Wang, P.P., Ming, X.G., Li, D., Kong, F.B., Wang, L., Wu, Z.Y., 2011a. Modular development of product service systems. *Concurr. Eng. Res. Appl.* 19 (1), 85-96.
- WCED (World Commission on Environment and Development), 1987. *Our common future*. Oxford University Press.
- Weidema, B.P., 1999. Avoiding Co- Product Allocation in Life Cycle. *J. Ind. Ecol.* 4, 11–34.
- Wenzel, H., Hauschild, M., Alting, L., 1997. *Environmental Assessment of Products, Vol 1: Methodology, Tools and Case Studies in Product Development*. Chapman & Hall, London.

- Zabalza, I. 2010. Adaptación de la metodología del análisis de ciclo de vida para la evaluación y la mejora del impacto energético y ambiental de la edificación en España. Tesis Doctoral. Universidad de Zaragoza – Departamento de ingeniería mecánica.
- Zamagni, A., Pesonen, H., Swarr, T., 2013. From LCA to Life Cycle Sustainability Assessment: concept, practice and future directions. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 18, 1637-1641.
- Zhang X, Jiang W, Deng S, Peng K 2009. Emergy evaluation of the sustainability of Chinese steel production during 1998–2004. *J Clean Prod* 17, 1030–1038.
- Zhou, Z., Jiang, H., Qin, L., 2007. Life cycle sustainability assessment of fuels. *Fuel* 86, 256-263.
- Zhang, X., Easa, S.M., Yang, Z., Ji, T., Jiang, Z., 2019. Life-cycle sustainability assessment of pavement maintenance alternatives: Methodology and case study. *Journal of Cleaner Production* 213, 659-672.



# Anexos

---

**ANEXO 1 - Casos de estudio – Tablas de Datos**

---

## CASO 1 - PRODUCCIÓN DE LECHE

## Caso 1- 1. Cálculo de indicadores ambientales

En el cálculo de indicadores ambientales se han utilizado las Bases de Datos Agri-footprint (Durlinger et al., 2017) y Probas (UBA, 2007) y el trabajo de Hospidio et al (2002). En la Tabla A1.1 se muestran los indicadores unitarios de GWP<sub>100</sub>, Ac (Acidificación) y Eu (Eutrofización) para cada entrada del sistema objeto de estudio.

Entrada	GWP <sub>100</sub> (Kg CO <sub>2</sub> -eq/Kg)	Ac (g SO <sub>2</sub> -eq/Kg)	Eu (g PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> eq/Kg)	Base de datos
Paja cebada	0.15	$5 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-5}$	Agri footprint
Silo maíz	0.35	$5.6 \cdot 10^{-3}$	$1.8 \cdot 10^{-4}$	Agri footprint
Silo cebada	0.53	$5.7 \cdot 10^{-3}$	$1.8 \cdot 10^{-4}$	Agri footprint
Pienso	0.36	$2.4 \cdot 10^{-3}$	$5.2 \cdot 10^{-3}$	Agri footprint
Alfalfa	0.63	$6.8 \cdot 10^{-3}$	$1.8 \cdot 10^{-3}$	Agri footprint
Productos limpieza	0.0029	$3.1 \cdot 10^{-5}$	$1.5 \cdot 10^{-5}$	Hospidio et al., (2002)
Gasóleo	4.33	0.75	0.32	Probas
Electricidad (Kw·h)	0.35	$6.2 \cdot 10^{-4}$	-	Probas

Tabla A1.1. Producción de leche. Indicadores ambientales unitarios.

A partir de los indicadores unitarios y de los datos de inventario se calculan los indicadores de impacto ambiental. En la Tabla A1.2 se muestran separados en dos bloques: materia prima para alimentación y consumibles.

Entrada	Masa (Kg)	GWP <sub>100</sub> (Kg CO <sub>2</sub> eq)	Ac (g SO <sub>2</sub> eq)	Eu (g PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> eq)
Silo de maíz	0.786	0.275	0.0044	0.00014
Pienso	0.357	0.129	0.0008	0.00185
Alfalfa	0.250	0.156	0.0017	0.00044
Alimentación	Total	0.560	0.0069	0.00243
Prod. de limpieza	0,0029 Kg	$8 \cdot 10^{-6}$	-	$4 \cdot 10^{-9}$
Electricidad	0,0705 Kwh	0,025	-	-
Gasóleo	0.009 l	0,039	-	$2 \cdot 10^{-7}$
Consumible	Total	0,083	$1 \cdot 10^{-4}$	$2,1 \cdot 10^{-7}$
	<b>TOTAL</b>	<b>0,643</b>	<b>0,007</b>	<b>0,0024</b>

Tabla A1.2. Producción de leche. Indicadores ambientales del sistema inicial.

## Caso 1- 2. Alternativas de alimentación

En la Tabla A1.3 se muestran los componentes de diferentes mezclas para alimentación del ganado y las cantidades correspondientes de alimentos por vaca y día. En cada alimento se indica el porcentaje de humedad, de materia seca y de los principales nutrientes. Cada mezcla contiene los nutrientes adecuados que se requieren para la producción de leche.

Materia prima	Cantidad (Kg)	Humedad (%)	Materia seca (%)	Fibra det. ácida (%)	Fibra det. neutra (%)	Proteína (%)	Ca (%)	Mg (%)	P (%)
<b>ALIMENTACIÓN INICIAL</b>									
Silo maíz	22	63	37	32,9	50,9	10,5	0,20	0,15	0,18
Pienso	10	20,5	79,5	2,71	13,7	11,7	0,23	0,60	0,40
Alfalfa	7	9,1	90,9	32,8	42,9	17,6	1,71	0,25	0,27
<b>Total (Kg)</b>	<b>39</b>	<b>16,55</b>	<b>22,45</b>	<b>9,8</b>	<b>15,6</b>	<b>4,71</b>	<b>0,19</b>	<b>0,11</b>	<b>0,09</b>
<b>ALTERNATIVA 1</b>									
Silo cebada	22	65	35	31,3	54,2	9,29	0,45	0,18	0,26
Pienso	10	20,5	79,5	2,71	13,7	11,7	0,23	0,60	0,40
Alfalfa	7	9,1	90,9	32,8	42,9	17,6	1,71	0,25	0,27
<b>Total (Kg)</b>	<b>39</b>	<b>16,9</b>	<b>22,01</b>	<b>9,45</b>	<b>16,3</b>	<b>4,45</b>	<b>0,24</b>	<b>0,12</b>	<b>0,12</b>
<b>ALTERNATIVA 2</b>									
Paja cebada	4	8	92	46,4	67,1	5,1	0,30	0,10	0,07
Pienso	14	20,5	79,5	2,71	13,7	11,7	0,23	0,60	0,40
Alfalfa	10	9,1	90,9	32,8	42,9	17,6	1,71	0,25	0,27
<b>Total (Kg)</b>	<b>28</b>	<b>4,11</b>	<b>23,9</b>	<b>5,52</b>	<b>8,9</b>	<b>3,60</b>	<b>0,22</b>	<b>0,11</b>	<b>0,09</b>

Tabla A1.3. Producción de leche. Composición de diferentes mezclas para alimentación.

Se indican los datos que corresponden a las mezclas de alimentación inicial y de las dos alternativas propuestas. En la alternativa 2, se puede observar que la masa total de alimento se reduce considerablemente y que contiene un porcentaje de humedad mucho menor.

## CASO 2 – SERVICIO DE VENTA DE PRENDAS

## Caso 2- 1. Etapa de creación. Datos de inventario

En el cálculo de indicadores de la etapa de creación se ha utilizado el Generador de precios de España del software CYPE Ingenieros (**CYPE, 2018**) que facilita información vinculada a cada unidad de obra. En las Figuras de la A1.1 a la A1.4 se muestran los datos unitarios obtenidos relativos a las partidas de obra más representativas: 4.3 Puerta enrollable automática, 5.3 Trasdoso autoportante arriostrado, 7.6 Aplicación de pintura al silicato y 7.8 Falso techo.

FDC010 Ud Cierre metálico. 1.664,37€

Cierre enrollable de lamas de chapa de acero galvanizado, panel perforado, acabado lacado color blanco, 350x250 cm, apertura automática.

Código	Unidad	Descripción	Rendimiento	Precio unitario	Importe
<b>1 Materiales</b>					
mt26cec010r	m <sup>2</sup>	Cierre metálico enrollable de lamas de chapa de acero galvanizado, panel perforado, de 0,8 mm de espesor, acabado lacado color blanco. Incluso cajón recogedor, ejes, guías, muelles y accesorios. Según UNE-EN 13241-1.	10,063	82,61	831,30
mt26eem020	Ud	Cerradura de seguridad al suelo para cierre enrollable.	1,000	149,25	149,25
mt26eem010	Ud	Equipo de motorización para apertura y cierre automático, de cierre enrollable, incluso kit electrofreno, cuadro básico, placa electrónica receptora, emisor monocanal y accesorios.	1,000	560,89	560,89
<b>Subtotal materiales:</b>					<b>1.541,44</b>
<b>2 Mano de obra</b>					
mo020	h	Oficial 1ª construcción.	0,117	17,54	2,05
mo113	h	Peón ordinario construcción.	0,117	16,16	1,89
mo018	h	Oficial 1ª cerrajero.	0,273	17,82	4,86
mo059	h	Ayudante cerrajero.	0,273	16,49	4,50
mo003	h	Oficial 1ª electricista.	2,230	18,13	40,43
mo102	h	Ayudante electricista.	2,230	16,40	36,57
<b>Subtotal mano de obra:</b>					<b>90,30</b>
<b>3 Costes directos complementarios</b>					
%	Costes directos complementarios		2,000	1.631,74	32,63
Coste de mantenimiento decenal: 366,16€ en los primeros 10 años.			<b>Costes directos (1+2+3): 1.664,37</b>		

Consumo	Etapa del ciclo de vida						
	Fabricación		Construcción				
	A1-A2-A3		A4		A5		
	Peso (kg)	Energía incorporada (MJ)	Emissiones CO <sub>2</sub> eq. (kg)	Energía incorporada (MJ)	Emissiones CO <sub>2</sub> eq. (kg)	Energía incorporada (MJ)	Emissiones CO <sub>2</sub> eq. (kg)
Materiales	Peso (kg)						
Acero galvanizado.	181,134	7.064,226	508,624	61,120	4,523		
Envases	Peso (kg)						
Poliestireno.	0,736	55,936	2,461	0,248	0,018		
Medios auxiliares						0,568	0,082
<b>Energía total y emisiones:</b>		<b>7.120,162</b>	<b>511,085</b>	<b>61,368</b>	<b>4,541</b>	<b>0,568</b>	<b>0,082</b>

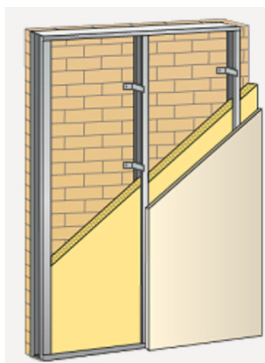
A1. Suministro de materias primas  
A2. Transporte de materias primas  
A3. Fabricación del producto

A4. Transporte del producto

A5. Proceso de instalación del producto y construcción

Figura A1.1. Servicio de venta de prendas. Puerta enrollable automática.





RRY070 m<sup>2</sup> Trasdosado autoportante de placas de yeso laminado, sistema "PLACO".

22,37€

Trasdosado autoportante arriostrado, sistema Placo Prima "PLACO", realizado con una placa de yeso laminado A / UNE-EN 520 - 1200 / 3000 / 15 / con los bordes longitudinales afinados, BA 15 "PLACO", atornillada directamente a una estructura autoportante de perfiles metálicos de acero galvanizado formada por canales R 48 "PLACO" y montantes M 48 "PLACO", con una separación entre montantes de 600 mm; 63 mm de espesor total. El precio incluye la resolución de encuentros y puntos singulares y las ayudas de albañilería para instalaciones, pero no incluye el aislamiento a colocar entre las placas y el paramento.

Código	Unidad	Descripción	Rendimiento	Precio unitario	Importe
<b>1 Materiales</b>					
mt12plj020a	m	Banda estanca autoadhesiva, Banda 45 "PLACO", de espuma de polietileno de celdas cerradas, de 3 mm de espesor y 45 mm de anchura, para la estanqueidad de la base y el aislamiento acústico del perímetro en tabiques y trasdosados de placas.	0,450	0,40	0,18
mt12plp070b	m	Canal de perfil metálico de acero galvanizado, R 48 "PLACO", fabricado mediante laminación en frío, de 3000 mm de longitud, 48x30 mm de sección y 0,55 mm de espesor, según UNE-EN 14195.	1,000	1,59	1,59
mt12plp060b	m	Montante de perfil metálico de acero galvanizado, M 48 "PLACO", fabricado mediante laminación en frío, de 3000 mm de longitud, 46,5x36 mm de sección y 0,6 mm de espesor, según UNE-EN 14195.	2,100	1,93	4,05
mt12pek020fa	Ud	Anclaje directo de 125 mm, para maestra 60/27.	0,700	0,59	0,41
mt12plk010aaex	m <sup>2</sup>	Placa de yeso laminado A / UNE-EN 520 - 1200 / 3000 / 15 / con los bordes longitudinales afinados, BA 15 "PLACO", formada por un alma de yeso de origen natural embutida e íntimamente ligada a dos láminas de cartón fuerte.	1,050	6,50	6,83
mt12plt010a	Ud	Tornillo autorroscante TTPC 25 "PLACO", con cabeza de trompeta, de 25 mm de longitud, para instalación de placas de yeso laminado sobre perfiles de espesor inferior a 6 mm.	11,000	0,01	0,11
mt12plt030b	Ud	Tornillo autopercutor rosca-chapa, TRPF 13 "PLACO", de 13 mm de longitud.	5,000	0,02	0,10
mt12plj010	m	Cinta microperforada de papel, "PLACO", para acabado de juntas de placas de yeso laminado.	1,400	0,06	0,08
mt12plj010	m	Cinta microperforada de papel, "PLACO", para acabado de juntas de placas de yeso laminado.	1,400	0,06	0,08
mt12plm010a	kg	Pasta de secado en polvo SN "PLACO"; Euroclase A2-s1, d0 de reacción al fuego, según UNE-EN 13501-1, rango de temperatura de trabajo de 5 a 30°C, para aplicación manual con cinta de juntas, según UNE-EN 13963; para el tratamiento de las juntas de las placas de yeso laminado.	0,330	1,27	0,42
<b>Subtotal materiales:</b>				<b>13,77</b>	
<b>2 Mano de obra</b>					
mo053	h	Oficial 1º montador de prefabricados interiores.	0,236	18,13	4,28
mo100	h	Ayudante montador de prefabricados interiores.	0,236	16,43	3,88
<b>Subtotal mano de obra:</b>				<b>8,16</b>	
<b>3 Costes directos complementarios</b>					
%		Costes directos complementarios	2,000	21,93	0,44
Coste de mantenimiento decenal: 2,46€ en los primeros 10 años.			<b>Costes directos (1+2+3): 22,37</b>		

Consumo		Etapa del ciclo de vida					
		Fabricación		Construcción			
		A1-A2-A3		A4		A5	
	Peso (kg)	Energía incorporada (MJ)	Emisiones CO <sub>2</sub> eq. (kg)	Energía incorporada (MJ)	Emisiones CO <sub>2</sub> eq. (kg)	Energía incorporada (MJ)	Emisiones CO <sub>2</sub> eq. (kg)
<b>Materiales</b>							
Acero galvanizado.	1,751	68,289	4,917	0,591	0,044		
Yeso.	11,519	40,432	2,264	3,887	0,288		
<b>Total:</b>	<b>13,270</b>	<b>108,721</b>	<b>7,181</b>	<b>4,478</b>	<b>0,332</b>		
<b>Envases</b>							
Plástico.	0,021	1,470	0,218	0,007	0,001		
<b>Medios auxiliares</b>						0,051	0,007
<b>Residuos</b>							
Transporte a vertedero.	0,496					0,009	0,001
<b>Energía total y emisiones:</b>		<b>110,191</b>	<b>7,399</b>	<b>4,485</b>	<b>0,333</b>	<b>0,060</b>	<b>0,008</b>

Figura A1.2. Servicio de venta de prendas. Trasdosado arriostrado autoportante.

RIS030 m<sup>2</sup> Pintura al silicato sobre paramento interior de yeso o escayola.

10,57€

Aplicación manual de dos manos de pintura al silicato color blanco, acabado mate, textura lisa, la primera mano diluida con un 10% de agua y la siguiente sin diluir, (rendimiento: 0,14 l/m<sup>2</sup> cada mano); previa aplicación de una mano de imprimación no orgánica, a base de soluciones de silicato potásico, sobre paramento interior de yeso o escayola, vertical, de hasta 3 m de altura. El precio incluye la protección de los elementos del entorno que puedan verse afectados durante los trabajos y la resolución de puntos singulares.

Código	Unidad	Descripción	Rendimiento	Precio unitario	Importe
<b>1 Materiales</b>					
mt27pir120a	l	Imprimación no orgánica, a base de silicato potásico, aplicado con brocha o rodillo.	0,100	5,61	0,56
mt27pir110g	l	Pintura para exterior, a base de silicato potásico, carbonato cálcico, áridos micronizados y aditivos especiales, color blanco, acabado mate, textura lisa, transpirable y resistente a los rayos UV; para aplicar con brocha, rodillo o pistola.	0,280	14,10	3,95
				<b>Subtotal materiales:</b>	<b>4,51</b>
<b>2 Mano de obra</b>					
mo038	h	Oficial 1ª pintor.	0,172	17,54	3,02
mo076	h	Ayudante pintor.	0,172	16,43	2,83
				<b>Subtotal mano de obra:</b>	<b>5,85</b>
<b>3 Costes directos complementarios</b>					
% Costes directos complementarios			2,000	10,36	0,21
Coste de mantenimiento decenal: 17,97€ en los primeros 10 años.			<b>Costes directos (1+2+3): 10,57</b>		

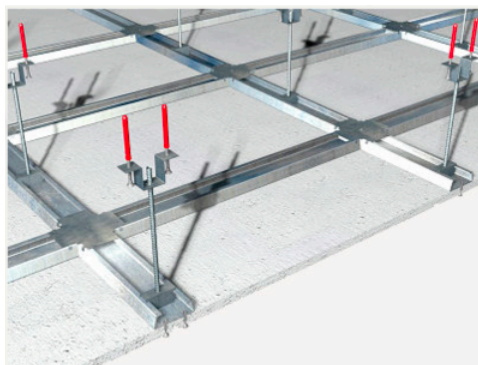
Consumo		Etapa del ciclo de vida					
		Fabricación			Construcción		
		A1-A2-A3		A4		A5	
	Peso (kg)	Energía incorporada (MJ)	Emisiones CO <sub>2</sub> eq. (kg)	Energía incorporada (MJ)	Emisiones CO <sub>2</sub> eq. (kg)	Energía incorporada (MJ)	Emisiones CO <sub>2</sub> eq. (kg)
Materiales	Peso (kg)						
Pintura.	0,420	8,400	1,243	0,142	0,010		
Envases	Peso (kg)						
Acero.	0,004	0,140	0,011	0,001	0,000		
Plástico.	0,009	0,630	0,093	0,003	0,000		
	<b>Total:</b>	<b>0,013</b>	<b>0,770</b>	<b>0,104</b>	<b>0,004</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>
Medios auxiliares						0,037	0,005
<b>Energía total y emisiones:</b>		<b>9,170</b>	<b>1,347</b>	<b>0,146</b>	<b>0,010</b>	<b>0,037</b>	<b>0,005</b>

A1. Suministro de materias primas  
A2. Transporte de materias primas  
A3. Fabricación del producto

A4. Transporte del producto

A5. Proceso de instalación del producto y construcción

Figura A1.3. Servicio de venta de prendas. Pintura al silicato.



RTC015 m<sup>2</sup> Falso techo continuo de placas de yeso laminado.

23,57€

Falso techo continuo suspendido, situado a una altura menor de 4 m, liso con estructura metálica (12,5+27+27), formado por una placa de yeso laminado A / UNE-EN 520 - 1200 / longitud / 12,5 / con los bordes longitudinales afinados. El precio incluye la resolución de encuentros y puntos singulares.

Código	Unidad	Descripción	Rendimiento	Precio unitario	Importe
<b>1 Materiales</b>					
mt12psg160a	m	Perfil de acero galvanizado, en U, de 30 mm.	0,400	1,26	0,50
mt12psg220	Ud	Fijación compuesta por taco y tornillo 5x27.	2,000	0,06	0,12
mt12psg210a	Ud	Cuelgue para falsos techos suspendidos.	1,200	0,80	0,96
mt12psg210b	Ud	Seguro para la fijación del cuelgue, en falsos techos suspendidos.	1,200	0,13	0,16
mt12psg210c	Ud	Conexión superior para fijar la varilla al cuelgue, en falsos techos suspendidos.	1,200	0,98	1,18
mt12psg190	Ud	Varilla de cuelgue.	1,200	0,44	0,53
mt12psg050c	m	Maestra 60/27 de chapa de acero galvanizado, de ancho 60 mm, según UNE-EN 14195.	3,200	1,44	4,61
mt12pek020ka	Ud	Conector, para maestra 60/27.	0,600	0,31	0,19
mt12pek020da	Ud	Conector tipo caballete, para maestra 60/27.	2,300	0,27	0,62
mt12psg010a	m <sup>2</sup>	Placa de yeso laminado A / UNE-EN 520 - 1200 / longitud / 12,5 / con los bordes longitudinales afinados.	1,050	4,95	5,20
mt12psg081b	Ud	Tornillo autoperforante 3,5x25 mm.	17,000	0,01	0,17
mt12psg041b	m	Banda autoadhesiva desolidarizante de espuma de poliuretano de celdas cerradas, de 3,2 mm de espesor y 50 mm de anchura, resistencia térmica 0,10 m <sup>2</sup> K/W, conductividad térmica 0,032 W/(mK).	0,400	0,30	0,12
mt12psg030a	kg	Pasta para juntas, según UNE-EN 13963.	0,700	1,26	0,88
mt12psg040a	m	Cinta de juntas.	0,450	0,03	0,01
<b>Subtotal materiales:</b>					<b>15,25</b>
<b>2 Mano de obra</b>					
mo015	h	Oficial 1º montador de falsos techos.	0,325	18,13	5,89
mo082	h	Ayudante montador de falsos techos.	0,120	16,43	1,97
<b>Subtotal mano de obra:</b>					<b>7,86</b>
<b>3 Costes directos complementarios</b>					
%		Costes directos complementarios	2,000	23,11	0,46
Coste de mantenimiento decenal: 4,01€ en los primeros 10 años.			<b>Costes directos (1+2+3): 23,57</b>		

Consumo		Etapa del ciclo de vida					
		Fabricación			Construcción		
		A1-A2-A3		A4		A5	
	Peso (kg)	Energía incorporada (MJ)	Emissiones CO <sub>2</sub> eq. (kg)	Energía incorporada (MJ)	Emissiones CO <sub>2</sub> eq. (kg)	Energía incorporada (MJ)	Emissiones CO <sub>2</sub> eq. (kg)
<b>Materiales</b>	<b>Peso (kg)</b>						
Acero galvanizado.	1,836	71,604	5,155	0,620	0,046		
Yeso.	11,967	39,491	3,515	4,038	0,299		
Poliuretano.	0,004	0,280	0,041	0,003	0,000		
	<b>Total:</b>	<b>13,807</b>	<b>111,375</b>	<b>8,711</b>	<b>4,661</b>	<b>0,345</b>	
<b>Envases</b>	<b>Peso (kg)</b>						
Plástico.	0,037	2,590	0,383	0,012	0,001		
<b>Medios auxiliares</b>						0,048	0,007
<b>Residuos</b>	<b>Peso (kg)</b>						
Transporte a vertedero.	0,548					0,010	0,001
<b>Energía total y emisiones:</b>		<b>113,965</b>	<b>9,094</b>	<b>4,673</b>	<b>0,346</b>	<b>0,058</b>	<b>0,008</b>

Figura A1.4. Servicio de venta de prendas. Falso techo continuo.

En la Tabla A1.4 se muestran los indicadores de  $GWP_{100}$ , GE (Global Energy),  $C_E$  (Costes de ejecución), EE (Eco-Eficiencia),  $T_w$  (Working Time) y  $S_w$  (Working Salary) de cada una de las actividades necesarias en la etapa de creación.

Actividades de construcción y montaje	Dim. medioambiental		Dimensión económica		Dimensión social	
	$GWP_{100}$ (kgCO <sub>2</sub> -eq)	GE (MJ)	$C_E$ (€)	EE (€/kgCO <sub>2</sub> -eq)	$T_w$ (h)	$S_w$ (€)
1.Desmontaje	0.17	2.12	19.87	119.70	1.15	19.48
2.Solera	825.46	9,008.19	309.47	0.37	5.22	78.34
3.Forjado altillo	496.98	5,327.47	475.65	0.96	14.05	250.27
4.Fachada	1,047.95	14,353.20	3,298.28	3.15	20.77	297.30
5.Particiones	1,461.45	17,805.87	3,224.10	2.21	99.65	1,652.50
6.Instalaciones	1,338.24	9,475.65	8,860.37	6.62	74.74	744.20
7.Revestimientos	1,518.14	16,396.95	6,377.02	4.20	159.89	2,637.59
8.Equipamiento	55.16	752.99	736.10	13.34	2.62	46.59
9.Mobiliario	509.00	7,533.65	3,803.50	7.47	16.00	286.65
10.Otros	45.47	539.02	875.04	29.50	2.46	21.70
<b>Total</b>	<b>7,298.02</b>	<b>81,195.11</b>	<b>27,979.40</b>	<b>3.83</b>	<b>396.55</b>	<b>6,018.47</b>

Tabla A1.4. Servicio de venta de prendas. Indicadores de la etapa de creación.

### Caso 2- 2. Etapa de creación. Distribución de impacto de actividades

En la Figura A1.5 se muestra la distribución de los impactos ambientales, económicos y sociales generados por las actividades que forman parte del proceso de construcción del local comercial.



Figura A1.5. Servicio de venta de prendas. Impacto causado por las actividades de construcción.

## Caso 2- 3.Etapa de operación. Indicadores ambientales unitarios. Factores de emisión

En el cálculo de indicadores ambientales de las prendas de vestir se ha utilizado la base de datos EDP System (**EDP, 2019**). En las Figuras A1.6 y A1.7 se muestran los datos unitarios de los indicadores GWP<sub>100</sub> y GE de los dos tipos de prendas consideradas (pantalones ISKO26632 y camiseta 7046THV).

### Resource Use for 1 sqm of ISKO26632 Finished

Resource Use						
Parameter	Unit	Upstream	Core	Downstream	Total	
Primary energy resources – Renewable	Use as energy carrier	MJ, net calorific value	15.6	0.752	0.003	16.4
	Used as raw materials	MJ, net calorific value	0	0	0	0
	TOTAL	MJ, net calorific value	15.6	0.752	0.003	16.4
Primary energy resources – Nonrenewable	Use as energy carrier	MJ, net calorific value	38.8	13.1	0.213	52.1
	Used as raw materials	MJ, net calorific value	0	0	0	0
	TOTAL	MJ, net calorific value	38.84	13.1	0.213	52.1
Secondary material	kg	0	0	0	0	
Renewable secondary fuels	MJ, net calorific value	0	0	0	0	
Non-renewable secondary fuels	MJ, net calorific value	0	0	0	0	
Net use of fresh water	m <sup>3</sup>	0.419	0.061	3.80E-05	0.480	

### Potential Environmental Impacts for 1 sqm of ISKO26632 Finished

Environmental Impacts						
Parameter	Unit	Upstream	Core	Downstream	Total	
Global warming Potential (GWP100a)	Fossil	kg CO <sub>2</sub> eq	2.50	0.949	0.014	3.46
	Biogenic	kg CO <sub>2</sub> eq	0.380	0.005	8.52E-05	0.385
	Land use and land transformation	kg CO <sub>2</sub> eq	0.007	0.003	5.34E-06	0.010
	Total	kg CO <sub>2</sub> eq	2.88	0.957	0.014	3.86
Ozone layer depletion (ODP)	kg CFC <sup>11</sup> eq	3.74E-07	5.67E-08	2.37E-09	4.33E-07	
Abiotic depletion	kg Sb eq	7.55E-06	3.48E-07	4.80E-08	7.95E-06	
Abiotic depletion (fossil fuels)	MJ	33.3	11.68	0.197	45.2	
Photochemical oxidation	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq	8.27E-03	3.05E-03	2.97E-05	0.011	
Acidification	kg SO <sub>2</sub> eq	0.016	0.004	3.26E-05	0.020	
Eutrophication	kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> eq	0.006	0.003	7.19E-06	0.009	
Land use	m <sup>2</sup> a crop eq	1.81	0.005	4.80E-04	1.82	
Human toxicity, cancer	cases	1.39E-07	6.46E-08	4.57E-10	2.04E-07	
Human toxicity, non-cancer	cases	6.09E-07	1.61E-07	1.89E-09	7.71E-07	
Freshwater ecotoxicity	PAF.m <sup>3</sup> .day	16126	5333	21.46	21481	
Water Scarcity	m <sup>3</sup>	0.287	0.032	1.71E-05	0.318	
Carbon Uptake	kg CO <sub>2</sub> eq	1.293	0.003	9.11E-05	1.297	

Figura A1.6. Servicio de venta de prendas. Indicadores ambientales unitarios (pantalones).

**T-SHIRT 7046 THV**

MATERIALS	UNIT	%	ENVIRONMENTAL / HAZARDOUS PROPERTIES
Main fabric THV		94%	55% cotton, 45% polyester
Rib THV		3%	55% cotton, 45% polyester
Thread polyester		0,2%	100% polyester
Care and size labels		1%	100% polyester
Paper trims		1%	100% paper

**POTENTIAL ENVIRONMENTAL IMPACT**

PARAMETER	UNIT	T-SHIRT	UPSTREAM	CORE	TOTAL	
Global warming potential (GWP)	Fossil	kg CO <sub>2</sub> eq.	7520 GRK	1.06	2.98	4.11
		7046 THV	1.35	4.24	5.67	
	Biogenic	kg CO <sub>2</sub> eq.	7520 GRK	0.14	0.16	0.31
		7046 THV	0.06	0.23	0.29	
	Land use and land transformation	kg CO <sub>2</sub> eq.	7520 GRK	0.002	0.007	0.009
		7046 THV	0.005	0.060	0.064	
	<b>TOTAL</b>	kg CO <sub>2</sub> eq.	7520 GRK	1.21	3.15	4.43
			7046 THV	1.42	4.53	6.03

**USE OF RESOURCES**

PARAMETER	UNIT	T-SHIRT	UPSTREAM	CORE	TOTAL	
Primary energy resources – Renewable	Use as energy carrier	MJ, net calorific value	7520 GRK	1.66	3.56	5.24
		7046 THV	9.89	5.48	15.40	
	Used as raw materials	MJ, net calorific value	7520 GRK	0	0	0
		7046 THV	0	0	0	
	<b>TOTAL</b>	MJ, net calorific value	7520 GRK	1.66	3.56	5.24
			7046 THV	9.89	5.48	15.40
Primary energy resources – Non-renewable	Use as energy carrier	MJ, net calorific value	7520 GRK	15.47	28.17	44,82
		7046 THV	25.97	101.76	128,90	
	Used as raw materials	MJ, net calorific value	7520 GRK	1.02	0.31	1,33
		7046 THV	7.61	0	7,61	
	<b>TOTAL</b>	MJ, net calorific value	7520 GRK	19.81	35.60	56.63
			7046 THV	53.37	112.72	167.30

Figura A1.7. Servicio de venta de prendas. Indicadores ambientales unitarios (camiseta).

En el cálculo del indicador de GWP100 relativo a la energía eléctrica consumida se ha utilizado el factor de emisión de la compañía comercializadora de Endesa Energía del año 2017 (Figura A1.8)

Comercializadora	Factor Mix 2017 (kg CO <sub>2</sub> /kWh)
DRK ENERGY, S.L.	0,02
ECOFUTURA LUZ ENERGÍA, S.L.	0,00
EDP COMERCIALIZADORA, S.A.U.	0,26
EDP ENERGÍA S.A.U.	0,25
ELECNOVA SIGLO XXI, S.L.	0,00
ELECTRA CALDENSE ENERGIA, S.A.	0,00
ELECTRA DEL CARDENER ENERGIA, S.A.	0,00
ELÉCTRICA ALBATERENSE, S.L.	0,00
ELÉCTRICA CATRALENSE, S.L.	0,00
ELÉCTRICA DE CHERA, S.C.V.	0,00
ELÉCTRICA DE GUADASSUAR COOP. V.	0,00
ELÉCTRICA DE GUIXES ENERGÍA, S.L.	0,30
ELÉCTRICA DIRECTA ENERGÍA, S.L.	0,06
ELÉCTRICA SOLLERENSE, S.A.	0,00
ELÉCTRICA DE MELIANA, S.C.V.	0,00
ELÉCTRICA DE SOT DE CHERA S. COOP.V.	0,00
ELÉCTRICA DE VINALESA, S.L.U.	0,06
EMASP, S. COOP.	0,00
EMPRESA DE ALUMBRADO ELÉCTRICO DE CEUTA, S.A.	0,42
ENARA GESTIÓN Y MEDIACIÓN, S.L.	0,00
<b>ENDESA ENERGÍA, S.A.</b>	<b>0,39</b>
ENERCOLUZ ENERGÍA, S.L.	0,00

Figura A1.8. Servicio de venta de prendas. Indicador ambiental unitario de energía eléctrica.



## **ANEXO 2 – Publicaciones y Congresos**

---

## 1- Publicaciones asociadas al trabajo de investigación

- Muñoz López, Natalia; Santolaya Sáenz, José Luis; Biedermann, Anna; Serrano Tierz, Anna. **Sustainability Assessment of Product–Service Systems Using Flows between Systems Approach.** SUSTAINABILITY 2020, Volume 12, Issue 8, 3415
- Santolaya, J.L.; Lacasa, E.; Biedermann, A.; Munoz, N. **A practical methodology to project the design of more sustainable products in the production stage.** RESEARCH IN ENGINEERING DESIGN 2019, Volume 30, Issue 4, 539-558
- Muñoz, Natalia; Santolaya Sáenz, José Luis; Biedermann, Anna María. **Estudio de la sostenibilidad de un Sistema Producto-Servicio. Creación de un pequeño espacio comercial de venta de ropa.** REVISTA INTERNACIONAL DE SOSTENIBILIDAD 2020, Volumen 3, Número 1, 1-16
- Muñoz Lopez, Natalia; Santolaya Sáenz, José Luis; Biedermann, Anna; Molina Sánchez-Migallón, Javier. **Sustainability Assessment in the Implementation Phase of a Retail Space.** LECTURE NOTES IN MECHANICAL ENGINEERING. 2020

## 2- Participación en Congresos Internacionales

- XVI Congreso Internacional sobre Sostenibilidad ambiental, Cultural, Económica y Social. 29-31 de enero de 2020. Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile. **Estudio de la sostenibilidad de un Sistema Producto-Servicio. Creación de un pequeño espacio comercial de venta de ropa.** Participación mediante Póster.
- 29<sup>th</sup> International Conference on Graphics Engineering. 19<sup>th</sup>-21<sup>th</sup> June 2019. Universidad de La Rioja, Spain. **Sustainability Assessment in the Implementation Phase of a Retail Space.** Participación mediante Póster.

### 3- Ponencias enviadas y aceptadas

- Congreso Latinoamericano de Enseñanza del Diseño. 27-29 junio 2020. Universidad de Palermo, Argentina. **Diseñando soluciones más sostenibles: evaluación de sostenibilidad de un servicio cultural.**
- International Joint Conference on Mechanics, Design Engineering and Advanced Manufacturing (JCM). 2nd-4th June 2020. Aix-en-Provence, France. **Methodology of product sustainable redesign. Case study: furniture of a clothing retail store.**

Article

# Sustainability Assessment of Product–Service Systems Using Flows between Systems Approach

Natalia Muñoz López , Jose Luis Santolaya Sáenz, Anna Biedermann  and Ana Serrano Tierz

Design and Manufacturing Engineering Department, University of Zaragoza. C/María de Luna 3, 50018 Zaragoza, Spain; jlsanto@unizar.es (J.L.S.S.); anna@unizar.es (A.B.); anatiez@unizar.es (A.S.T.)

\* Correspondence: nmunoz@unizar.es

Received: 24 March 2020; Accepted: 21 April 2020; Published: 22 April 2020



**Abstract:** The development of product–service systems (PSS) is currently considered a promising solution to the challenge of sustainability. Nevertheless, the sustainability of these systems has not been systematically assessed and there is a need to develop more guiding principles. In this work, an approach based on the flows between product and service systems is used to facilitate both the definition of PSS boundaries and the identification of links between the systems involved. In addition, the life cycle sustainability assessment (LCSA) method is applied to simultaneously quantify environmental, economic and social impacts. Two cases are analysed. First, the production process of cow’s milk, in which a veterinary service is required, is studied using data measured from a dairy farm. Next, the sustainability of a clothing retail service taking, into account that a construction product is involved in its creation stage, is evaluated. In each PSS specific life cycle, stages are analysed, a functional unit referred to both products and services is defined, and quantitative indicators are selected to assess each sustainability dimension. The category of workers is selected to evaluate social aspects. The relative incidence of each system is evaluated and the impacts of different factors on the PSS sustainability are analysed.

**Keywords:** product–service system; life cycle sustainability assessment; product–service flow

## 1. Introduction

Products have been the traditional focus of production and commercialization activities while services have been usually considered as a complement to the products value. Hence, sustainability studies have been carrying out in product systems and design for sustainability has been focused in methods to design sustainable products. In the last years, considerable attention has been put in service systems and product–service systems (PSS), since they are considered an innovative business approach and a possible answer to the sustainability challenge [1].

This approach shifts the traditional business focus from mass consumption to the behaviours and highly personalised needs [2,3] of individuals, and from selling only physical products to selling a mix of products and services that are jointly capable of fulfilling specific consumers’ needs (e.g., from selling a washing machine to selling cleaning services) [4]. According to this approach, three PSS main categories can be considered [5]:

- Product-oriented services: the consumer will be the owner of the product so that the business model is still mainly geared towards selling products. Nevertheless, some additional services are provided by the company (e.g., insurance or maintenance).
- Use-oriented services: service provider owns the product, selling only the function to customer. Thus, a change in product availability is produced. Product can be sometimes shared by a number of users (e.g., car rental).

- Result-oriented services: the profit centre is result delivered, which client and provider firstly agree on (e.g., activity management-outsourcing such as catering services). There is no predetermined product involved. All materials products and consumables used to deliver the result now become cost factors, creating an incentive to minimize their use.

Ashford and Hall [6] consider that requirements of users and consumers can be fulfilled in two different modes: the use of products or the provision of services. The difference between them lies in the material nature of products and the immaterial character of services, as well as the timeline of the consumption, which is usually shorter in the case of services. In both cases, different actors are involved, and some sort of infrastructure is needed. Nevertheless, products and services are not completely independent systems. Service provision is based on products, and products require services to obtain a final utility. Thus, broader systems resulting from the combination of products and services are generated. PSS are defined by Boehm and Thomas [7] as an “integrated bundle of products and services which aims at creating customer utility and generating value”.

The design of PSS that provide more sustainable solutions to the current demands of society is the goal of a number of researchers [2,8,9]. Vezzoli et al. [8], consider PSS design for sustainability as the design of systems able to deliver a ‘unit of satisfaction’ looking for economic interest from providers, as well as environmental and socio-ethical beneficial results. To address the sustainable design of a PSS, the sustainability performance of the system, taking into account environmental, economic and social dimensions, should be quantified. However, the studies in relation to PSS sustainability assessment are still in the early phase, and criteria, methods and tools to support the assessment process are required [10,11].

The life cycle sustainability assessment (LCSA) method is considered by numerous authors [12–15] as an adequate framework to evaluate impacts and consider interdependencies between different sustainability dimensions. Nevertheless, LCSA has been mainly product-oriented and are hardly applied in other systems. A subject that adds complexity to the study of PSS is the need to consider various life cycles due to the combination of different products and services. The distinction between product and service life cycle and the system boundaries establishment in relation with the analysed PSS are significant challenge [16,17].

This work aims at quantitatively assessing the sustainability of PSS in two case studies using an approach based on the flows between product and service systems. This approach is intended to facilitate the definition of PSS boundaries and to identify connections between different systems. Two very different case studies are discussed in order to show how this approach can be implemented. In the first case, sustainability assessment is focused on the milk production process, taking into account that a veterinary service is required to ensure the animal health and manure is also obtained as a coproduct. In the second case, the sustainability of a clothing retail service is evaluated considering the construction of the store in which the service is provided. In order to evaluate PSS sustainability, the LCSA method is applied focusing on specific life cycle stages to adjust to the objective of the study and using a limited number of quantifiable indicators in each sustainability dimension. The following section examines a number of works, in which this methodology is already applied to both products and services systems. Section 3 exposes how flows between systems approach and the LCSA method can be jointly applied in the context of PSS. In Section 4, the sustainability of two different PSS is assessed, and the results are finally analysed.

## 2. LCSA Applied in Product and Service Systems

Most sustainability studies of product and service systems are based on a life cycle perspective, since including the whole life cycle trade-offs associated with all stages are identified. ISO standard [18] defines the life cycle as sequential and interconnected phases of a product system beginning from raw material acquirement or creation from natural resources to final disposal including activities of reuse, recycling or waste processing.

To obtain a more precise description, successive product transformations and intermediate processes can be considered in each stage of the product life cycle. Intermediate products (outputs from a unit process that represent inputs to other unit processes requiring further transformation within the system) as well as intermediate flows (products, materials or energy flows taking place between unit processes of the system) can be also defined. Different stages and phases within each stage can be identified in a product life cycle. The scope of an LCA, including the system boundary and level of detail, depends on the subject and objectives of the study.

In order to assess the environmental impact of a system, the life cycle assessment (LCA) methodology is frequently used. LCA structure was clearly established through the joint work of SETAC and ISO [18,19]. It complies and evaluates the elementary flows of the system: inputs (drawn from the environment without previous human transformation) and outputs (released to environment without subsequent human transformation). In addition, different tools that consider a wide number of impact categories and specific indicators can be used to assess environmental effects [20,21].

Besides the environmental protection, economic and social issues should also be considered in an approach of sustainability based on a triple bottom line (also referred to as planet, profit and people). According to this approach [22,23], the life cycle sustainability assessment (LCSA) methodology analyses environmental issues, economic aspects and social concerns to effectively achieve the sustainability assessment of a system [12,13]. LCSA evaluates impacts and provides guidelines for sustainable products and services development, combining environmental life cycle assessment (E-LCA), life cycle costing (LCC) and social life cycle assessment (S-LCA) techniques. To value social issues, UNEP's guidelines [24] propose five stakeholder categories: workers, local community, society, consumers and value chain actors. In addition, for each stakeholder group, different social impact subcategories are identified.

LCSA methodology is based on the development of four phases:

- (i) Goal and scope definition. FU is identified and the system boundaries are established according to the depth and breadth of the study.
- (ii) Life cycle sustainability inventory (LCSI). Inputs and outputs of the system are collected to obtain a detailed data inventory.
- (iii) Life cycle sustainability impact assessment (LCSIA). Impacts of each sustainability dimension are evaluated using a set of suitable indicators. Quantitative indicators are preferred, although qualitative indicators are also used to value social aspects.
- (iv) Interpretation of results. Results are analysed and recommendations for decision making process can be proposed.

A critical issue is the selection of the most appropriate indicators to assess the sustainability in each dimension [25] and the difficulty of integrating the interrelationships between the three dimensions of LCSA results [26]. Since three different techniques (E-LCA, LCC, S-LCA) are used, indicators of each technique can be combined by means of aggregation and weighting methods to obtain a simplified index that allows communicating a final sustainability result [27,28]. Nevertheless, if a composite index is evaluated, weighting and aggregation of indicators can considerably affect the measured sustainability of a system. Thus, the parallel presentation of results obtained in each sustainability dimension is recommended by authors as Valdivia et al. [29], and Santolaya et al. [30], in order to effectively identify real impacts and to achieve a better understanding of the impact causes.

A significant number of works are making use of LCSA as assessment method to support decision making on sustainability. This methodology has been progressively implemented in the study of product systems and has been much less applied in the study of service systems. Several investigations performed over the last years, in which the sustainability of both products and services is object of study, are summarized in Table 1. Authors of these research works, the system object of study, the objectives and scope of the investigation, the method to assess sustainability as well as the main results obtained are indicated in each case.

We can observe in Table 1 that very different products, usually associated to industrial activity, and services, related to both public and private sector, are analysed. Predominant studies are those focused on comparing the sustainability of different alternatives or scenarios (comparative studies). Other works aim at identifying the hot spots of a selected system (descriptive studies). In this case, major impacts should be identified, and well-targeted strategies should also be applied to obtain significant improvements in the sustainability of the system [14]. Nevertheless, the effectiveness of the strategies applied is not usually determined due to the difficulty of evaluating the sustainability of the redesigned system.

A full analysis of the life cycle in a product or service system entails all the stages related. However, it is possible to circumscribe the assessment focusing on specific stages to adjust to the objective or to limit the complexity of the study. According to an objective focused on evaluating different alternatives or scenarios, a large number of studies are found in literature that address only some stages of the life cycle. Regarding those works collected in Table 1, we observe that Capitano et al. [31], analyse the production phase of marble products in two different industrial plants, and Foolmaun and Ramjeawon [32] compare four scenarios in regard to the final disposition of PET bottles. In service studies, Cheng and Hsu [33] analyse two temperature control systems in refrigerated food distribution service and Bartolozzi et al. [34], compare manual and mechanical systems in the operative stage of a street sweeping municipal service. Works like those of Asadi et al. [35], and Hossain and Poon [36], evaluate the sustainability of different alternatives along the entire life cycle of the product. In service studies, the entire life cycle is not usually analysed.

It is also observed in Table 1 that the combination of different techniques (LCA, LCC, S-LCA) is carried out to quantify the sustainability of a system. In a number of product studies, the three sustainability dimensions are assessed to support decision-making on the best alternative or scenario [31,37,38]. Meanwhile, environmental data are mainly obtained in service studies, economic data are also obtained in some cases [39], and social issues are almost never evaluated.

In each case, FU is defined to express and compare sustainability results. It should be noted that a time period of service provision is also required in FU definition of service studies. However, common FU is not always chosen in studies conducted on the same system. For instance, in the analysis of buildings and construction products, both 'one square meter over a period of 50 years' and 'the entire building' are selected as FU in different studies [40]. In the case of milk production, some authors chose 'the volume of raw milk' and other authors prefer to emphasize the nutritional function of milk and correct the raw production according to its energy content [41]. In the case of a service system, FU is usually selected to quantify the provision stage, in which two main stakeholders, service receivers (customers) and service providers (workers), are usually involved. For instance, Bartolozzi et al. [34], select one hour and one worker to analysis the operation stage of a street sweeping service and Millán et al. [42], define FU in a day-care service taking into account one child and one year of service provision. In all cases, selecting FU to facilitate the comparison of different sustainability studies is very convenient. On the contrary, the results can only be used for the development of one single study. In addition, it is considered that FU should be the same in the three techniques (LCA, LCC and S-LCA) of a LCSA.

On the other hand, although weighted index is used in some works [27,43], single indicators are preferred by researchers to show results of the sustainability performance. In addition, a multicriteria decision-making framework is used in various product studies [32,37] to determine the most sustainable system.

**Table 1.** Product and service sustainability studies.

	Authors	System	Objective	Scope	Assessment Method	Results
<b>Product sustainability studies</b>	Ciroth and Franze [44] (2011)	Notebook for office use	Detection of main impacts in environment and social dimensions	Entire life cycle	E-LCA; S-LCA; Single indicators; FU: 1 notebook	The development of a more sustainable product (environmental and social) is possible
	Capitano et al., (2011)	Marble products	Evaluation and comparison of two production industrial plants	Stages of extraction, production and distribution	LCSA; Single indicators; FU: 1 m <sup>3</sup>	The identification of hot spots in the two production processes
	Traverso et al., (2012)	Photovoltaic module	Study of three different scenarios of production	Production stage (assembly process)	LCSA; LCSD; Aggregated index; FU: 1 m <sup>2</sup>	The best sustainability performance is detected by an aggregated index
	Foolmaun and Ramjeawon (2012)	PET bottles	Comparative analysis of four scenarios for used bottles	Final disposition stage	LCSA; Multi-criteria; AHP; Single indicators; FU: 1 t	A scenario that combines flake production and landfilling causes less impact.
	Chang et al. [45], (2015)	Welding technology	Study of four different welding processes	Production stage	LCA; SLCA; Single indicators; FU: 1 m weld seam	The technology with the higher impact and higher health risk for welders is identified
	Ren et al., (2015)	Bioethanol	Comparing three production alternatives	Crop and bioethanol production stages	LCSA; MCDM; AHP; Single indicators; FU: 1 t	The selection of an alternative is carried out by the decision-makers.
	Asadi et al., (2016)	Plumbing system	Effects of the use of two materials in piping	Entire life cycle	LCA; LCC; Single indicators; FU: 1000 m	PEX piping reduce the effect of environmental impacts and reduce the total cost
	Wang et al., (2017)	Structures of concrete	Study of different substitution percentage of fly ash	Material acquisition and production	LCSA; Sustainable Value; Aggregated index; FU: 1 m <sup>3</sup>	Impacts are considerably reduced if cement is replaced by fly ash
	Hossain and Poon (2018)	Wood waste from construction activities	To evaluate the potential of four different management systems	Entire life cycle	LCA; Single indicators; Sensitivity analysis; FU: 1 t	The use of wood waste instead of virgin wood is preferable in production of particleboard
Ferrari et al. [46], (2019)	Ceramic tiles	Construction of a reference benchmarking in this ambit	Entire life cycle including internal production costs	LCA; LCC and S-LCA; FU: 1 m <sup>2</sup> porcelain stoneware	The logistics system presents critical issues and opportunities for improvement	
<b>Service sustainability studies</b>	Iriarte et al. [47], (2009)	Collection of municipal solid waste	To compare three selective collection services	Waste storage, urban and inter-city transport	LCA; Single indicators; FU: 1500 t in 1 month	The multi-container system has the least impact. Inter-city transport is a critical stage in all cases
	Vinyes et al., (2013)	Collection of domestic used cooking oil	To compare three systems of collection in a big city	Collection and transport to the plant by tanker	LCSA; Aggregated index; FU: 10000 hab in 1 year	A multi-waste collection service is preferred. The transport stage has a high influence
	Li et al. [48], (2014)	Hotel accommodation	Emissions assessment due to service provision in six hotels	Construction, operation and post-operation	LCA; CFT model; FU: 1 room and 1 night	Operation phase has high impact due mainly to the energy consumption
	Chen and Hsu, (2015)	Refrigerated food distribution	Analysis of two temperature control techniques	Transport from terminal to retailers	Numerical model; Single indicators; FU: 1 kg in 1 day	A multi-temperature joint distribution system reduces emissions by lowering fuel consumption
	Rabbitt and Ghosh, (2016)	Organized car sharing service	Study of potential impacts of switching to car sharing	Service operation within an area	Statistical data; Surveys; Single indicators; FU: geographic area in 1 year	Significant savings in travel costs and CO <sub>2</sub> emissions could be obtained Introducing car sharing service
	Sanjuán et al. [49], (2016)	Early education of children	Environmental profile of 12 public nursery schools	Travel to the nursery school and child-care	E-LCA; Surveys; Single indicators; FU: 1 m <sup>2</sup> in 1 year	Energy consumption in facilities and car use in transport show high potential for improvement
	Chun and Lee [50] (2017)	Home water purifier rental	To compare rental model with a product-oriented model	Operation and maintenance	LCA; Single indicators; FU: 10 l/day for 15 years	Rental model shows high potential for the improvement if consumers are educated
	Bartolozzi et al., (2018)	Municipal service of street sweeping	To compare manual and mechanical street sweeping	Activities directly related in operational phase	LCA; PEF; Single indicators; FU: 1 h and one worker	Fuel consumption is the largest contributor in all environmental impact categories
	Cerutti et al. [51], (2018)	Public restoration—school catering	To assess and rank the effect of different strategies	From production of food to waste management	LCA; Single indicators; FU: average meal for 1 year	The production of food is the dominant stage. A change in diet is the most effective strategy



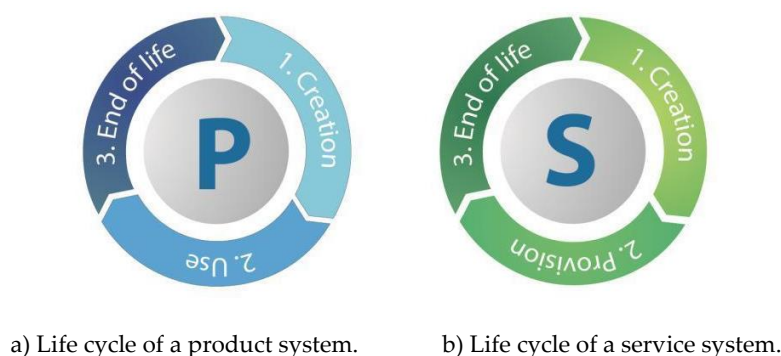
Thus, the LCSA method is increasingly used to assess the sustainability of product systems, but is hardly applied in the assessment of service systems. The review of sustainability assessment approaches carried out by Wulf et al. [52] confirm that an increased number of studies applying LCSA have been published, but many questions concerning the methodology are still open and there is a need to develop more guiding principles. In order to apply LCSA to PSS, an approach that simultaneously considers aspects of products and services is required. This approach is developed in the following section.

### 3. Methodology

#### 3.1. Flows between Systems Approach

Since both products and services are involved in a PSS, various life cycles should be taken into account to effectively assess sustainability. A simplified scheme, in which phases of the product life cycle can be grouped into phases prior to use, phases associated with use, and phases after use, is proposed in this work as elementary description of the life cycle. Phases such as raw materials extraction, manufacture and distribution, usually considered in the product life cycle, are included in the creation stage.

Thus, three main stages: 1. Creation, 2. Use and 3. End of life, can be differentiated in a product system, as shown in Figure 1a. Taking into account that both products and services aim at delivering satisfaction or creating utility, a similar scheme of three stages is proposed to describe the life cycle of a service system: 1. Creation; 2. Provision; 3. End of life, as displayed in Figure 1b. The service provision stage, which is based on satisfying the customer demands by the service provider, is the stage usually analysed in service development studies. Activities required for the service provision under optimal conditions are carried out in the creation stage. As the service provision is finished, the end of life stage includes the activities for a satisfactory treatment of all materials and resources that have been used.

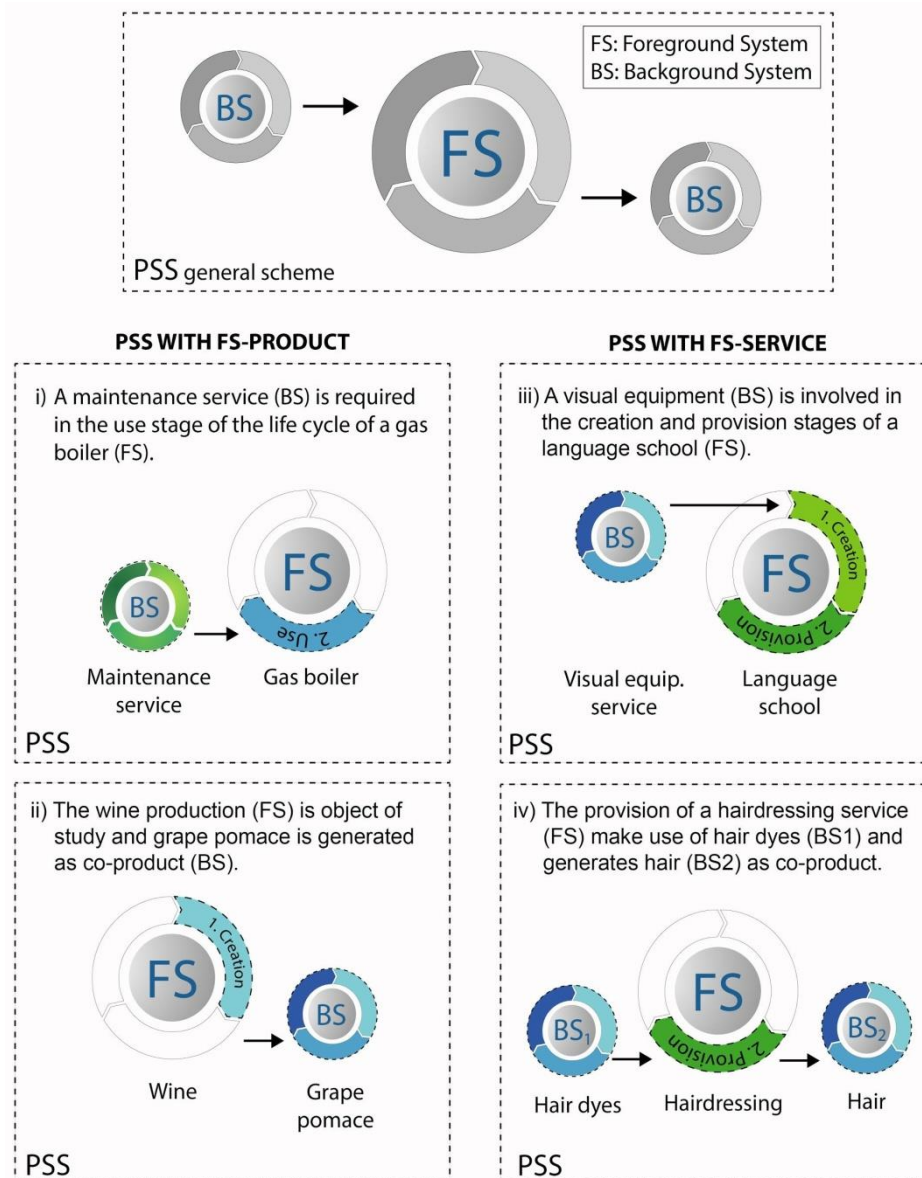


**Figure 1.** Life cycle schemes.

A wide number of works regard PSS as a mix of products and services that are jointly capable of fulfilling specific consumers' needs [4]. Thus, an approach focused on the business development to boost the sales of a product is provided. In this work, a wider perspective based on the flows between systems is proposed. Use and provision are, respectively, the main purpose of products and services, which leave from or enter another product or service system, generating a product–service flow. Two kinds of systems can be differentiated: the foreground system (FS), which refers to the main system object of study, and the background systems (BS), which refer to the systems supporting FS throughout its life cycle. Thus, a PSS is integrated by a bundle of product and service systems, in which a number of BS is involved in different stages of the FS life cycle.

A general scheme to show the flows between FS and BS as well as some examples of PSS, in which products and services are combined, are shown in Figure 2 (examples of PSS are, respectively, designated as i, ii, iii and iv). In each PSS, FS and BS are differentiated, and the life cycle stages of FS in

which the BS is required or generated are highlighted. The general scheme has been used to describe PSS composed by a product of FS, in which different BS are involved as well as PSS composed by a service of FS in which a number of BS are identified. This graphic representation is proposed in this work to facilitate the definition of PSS boundaries and to identify connections between different systems. Thus, all systems involved in the study and the specific stages of each system to be analysed could be established according to the depth and the breadth of the study.



**Figure 2.** Flows between systems involved in a product–service system (PSS). General scheme and examples.

An important point in the analysis, comparison and characterization of the system's performance is the definition of the functional unit (FU) as the reference unit that quantifies the primary function of the system. Doualle et al. [53], indicates that FU has to describe the functionality of the system including products and services when it is applied to PSS. In addition, to assess the impacts related to a main product in systems that generate coproducts, the allocation or partition of the flows between the studied system and one or more other systems should be established. For example, in dairy farms produces, milk and manure or wheat grains are simultaneously processed into flour and bran

during the milling process. The allocation depends on whether or not the coproducts are fully utilised in the economy, and requires a good knowledge of utilisation proportions [54]. The ISO 14040-series [19] recommends using allocation to limit the system expansion. Thus, allocation applying physical and economic weights should be used for setting the proportions in which a system is involved in a PSS. These parameters or dimensions which are useful in a definition of a specific allocation and its assessment should be established.

A number of issues should be particularly addressed in each phase of the LCSA methodology according to the previously exposed approach based on the flows between systems, and taking into account that the FU identification and the allocation use are relevant to conveniently assess PSS sustainability. These issues are:

- (i) Goal and scope definition. Identification of the FS and BSs involved in PSS and detection of links between systems. FU definition so that it is referred to both products and services, to describe and compare the sustainability of the PSS.
- (ii) Life cycle sustainability inventory for each system included in the PSS. Inventory data can be expressed in accordance to the reference unit that quantifies each process or activity.
- (iii) Life cycle sustainability impact assessment in PSS. Sustainability results of the PSS should be expressed in accordance to the FU defined. Allocation could be applied in systems that generate coproducts.
- (iv) Interpretation of results. Analysis of PSS sustainability results. Relative impact of different systems and recommendations for decision-making process.

### 3.2. Sustainability Indicators

A set of suitable indicators should be selected in order to effectively assess the sustainability of PSS. In this work, the quantitative measure of the impacts in each sustainability dimension and the presentation of results without aggregation are respectively proposed in the selection of indicators and subsequent results interpretation. Thus, data can be easily compared with those obtained in other systems, and the improvement of a system can be effectively addressed.

Environmental dimension can be measured by the use of midpoint indicators [21]. Environmental unit indicators for a variety of products and basic services can be obtained from different data bases, which have been developed in the last decades based mostly on average data representing average production and supply conditions [55]. The global warming potential ( $GWP_{100}$ ), Acidification (Ac) and global energy (GE) indicators are used in this work to assess the environmental dimension.  $GWP_{100}$  represents total emissions of the greenhouse gases and it is the most used indicator in sustainability studies. Ac is an indicator commonly used to show the environmental impact of farming and livestock activities, and GE is an indicator frequently used in transport, manufacture and construction activities. These indicators are defined in Table 2.

**Table 2.** Indicators selected to assess PSS sustainability.

Environmental Dimension		
$GWP_{100}$ (kgCO <sub>2</sub> -eq)	Global Warming Potential. Total emissions of the greenhouse gases calculating the radiative forcing over a time horizon of 100 years.	
Ac (gSO <sub>2</sub> -eq)	Acidification. It indicates the pH reduction due to emissions of acid gases like the nitrogen oxides (NO <sub>x</sub> ) and sulphur oxides (SO <sub>x</sub> ).	
GE (MJ)	Global Energy. Energy consumption considering electricity as well as net calorific value of resources used.	
Economic Dimension		
$C_E$ (€)	Execution cost. It expresses the total cost to develop an activity.	
EE (€/kg CO <sub>2</sub> -eq)	Eco-efficiency. Ratio between economic and environmental impacts. $C_E$ and $GWP_{100}$ indicators can be used.	
Social Dimension		
$T_w$ (h)	Working time. Time required by the workers to develop an activity.	
$S_w$ (€)	Salary of the workers involved in the development of an activity.	
		Workers category

An environmental indicator can be calculated using the corresponding unit indicator, which is obtained from different data bases. The following databases are used in this work. The Agri-footprint [56] and Probas [57] databases were applied to obtain unit impacts of a wide number of raw materials. In addition, the environmental module of Cype software was used to evaluate impacts in construction projects, the International Environmental Product Declaration (EPD) System [58] programme was applied to determinate energy consumptions in clothes production and the emission factors of electric commercial companies operating in Spain [59] were used to obtain greenhouse emissions due to energy consumption or fuel use.

For the economic and social dimension, different indicators to report and quantify overall data of each system object of study are proposed (Table 2). Particularly, the following economic indicators are used: the execution cost ( $C_E$ ) that expresses the total costs to develop an activity and the eco-efficiency (EE) that combines the economic and the environmental aspects [60]. On the other hand, the category of workers is selected to evaluate the social dimension of the sustainability and the working time ( $T_w$ ) and the salary of the workers ( $S_w$ ), are the quantifiable indicators considered to value social impacts. Nevertheless, an exhaustive sustainability assessment would require the study of other stakeholder groups.

#### 4. Case Studies

Two different PSS are analysed, in which the FS objects of study are a product and a service, respectively. First, the production process of cow's milk is studied using data measured in a dairy farm. Next, the sustainability of a clothing retail service, which is currently operated in the centre of a big city, is evaluated.

##### 4.1. Case 1: Milk Production

The following phases are usually considered in the supply chain of the milk: (i) production of feed for cows; (ii) milk production; (iii) milk transport from farm to processing companies; (iv) processing and packaging; (v) distribution to retailers, (vi) use by the consumer. This study is focused on a limited number of phases in the product creation stage. Milk processing, packaging and distribution phases are not analysed. It is carried out in an intensive type farm with 38 cows. An average milk production of 1064 l is obtained each day.

Other systems are involved in the milk production process. A veterinary service is required to ensure the animal health and manure is also obtained as a coproduct. Figure 3 shows a scheme of the resulting PSS, in which two BS, (veterinary service,  $BS_1$ , and manure,  $BS_2$ ) are involved in FS (milk).

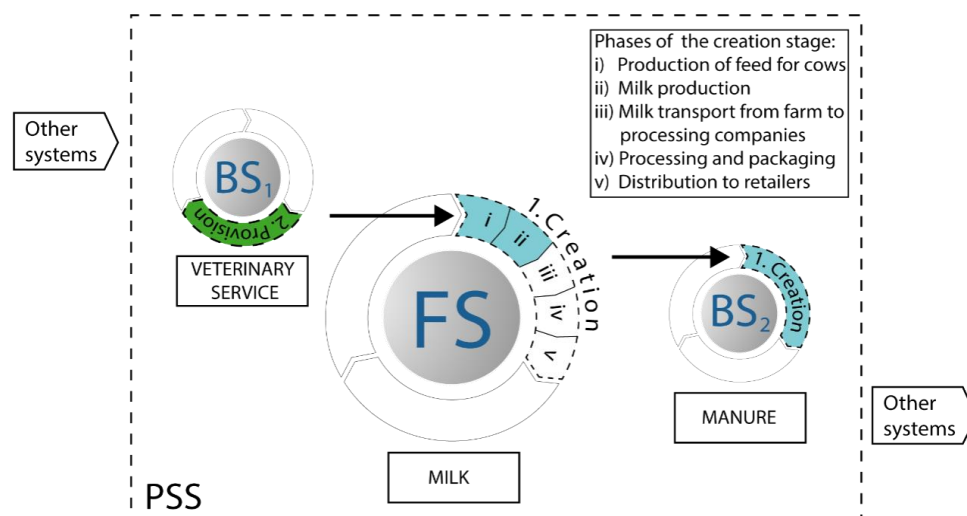


Figure 3. Case 1: Milk production. Systems involved and life cycle stages object of study.

Inventory for each system is obtained. Data of material inputs and energy consumptions in the dairy farm were gathered for one year [61]. Each cow consumes per day around 40 kg of food and between 80 and 100 L of water, depending on the season of the year. Feeding consists in three main components: corn silage, feed and alfalfa. Water is required in the feeding of animals and is also used in cleaning processes along with other products such as detergent, acid and protector. Medicines, which are periodically administered to the cows, straw that is used for conditioning the animals stay area and diesel for vehicles operation constitute the material inputs. Data expressed per litre of milk, are summarized in Table 3. These data are consistent with those measured in other studies [62,63].

**Table 3.** Case 1: Milk production. Inventory data (expressed per litre of milk).

Material inputs and Outputs		Units	Meas.
Feeding	Corn silage	kg	0.786
	Feed	kg	0.357
	Alfalfa	kg	0.250
	Water	l	3.496
Other material inputs	Water	l	0.282
	Detergent	l	0.0014
	Acid	l	0.0008
	Protector	l	0.0007
	Medicines	g	0.150
	Straw	kg	0.125
Outputs	Diesel	l	0.009
	Milk	l	1
	Manure	kg	2.44
Activities within the dairy farm		Energy (MJ)	$T_w$ (h)·10 <sup>-3</sup>
Mixing and distribution of food		0.343	1.65
Water heating		0.129	-
Stables cleaning		0.171	0.94
Milking		0.050	3.76
Milk cooling		0.081	-
Animal health		-	0.23
Money inputs and outputs		(€)	
Revenues	Milk	0.310	
	Manure	0.049	
Production costs	Feeding	0.158	
	Consumable	0.058	
	Labour	0.072	
	Indirect costs	0.025	

The milk price in the region in which the study is carried out is 0.31 €/l [59]. Nevertheless, money inputs in the system do not only proceed from milk production. Other revenues are obtained by the sale of manure fertilizer. In particular, 2.44 kg of manure are obtained as a co-product per each litre of milk. Revenues due to both milk and manure production are shown in Table 3. The proportion in which each system is economically involved is, respectively, 86.3 and 13.7%. On the other hand, the main production costs in the dairy farm are due to the purchase of components for cows feeding, consumable (acquisition of other materials and electricity), labour and indirect costs (insurance payments and taxes). Other revenues such as those due to the commercialization of cows and young animals not destined for milk production and other costs such as those due to amortization of the dairy farm equipment, have not been considered in this analysis.

The activity of the veterinarian was also reviewed to obtain a number of significant data. A total of ten dairy farms are regularly visited within an extensive territory and each farm is usually visited

once a week. Taking into account the average milk production, a total of  $1.3 \times 10^{-4}$  visits per litre of milk are obtained. The average distance that the veterinarian drives per visit is 110 km, which requires a fuel consumption of 6.8 l using a diesel van. The total working time includes both driving time, which is approximately 1.5 h and service delivery time in the farm, which is around 2.5 h. Its tariff is 99.1 € per visit, which includes labour (70.6 €) and other costs such as fuel and consumable.

The productive process within the dairy farm was analysed taking into account the following group of activities: mixing and distribution of food, water heating, milking, stables cleaning, milk cooling and activities associated with cow health. Energy consumptions and working times in these activities are shown in Table 3. All activities are carried out by only one worker in almost 50 weekly working hours.

The PSS sustainability was measured using those indicators shown in Table 2. In particular,  $GWP_{100}$  and  $Ac$ , commonly used in the dairy sector, are the indicators selected to assess the environmental impact, and the Agri-footprint [56] database is used to obtain unit impacts of raw materials. Sustainability indicators, expressed per functional unit, are shown in Table 4. In accordance with the PSS studied, FU is one litre of milk. In the environmental dimension, total values of 0.645 kgCO<sub>2</sub>-eq and  $13.28 \times 10^{-3}$  gSO<sub>2</sub>-eq are, respectively, obtained. In the economic dimension, PSS execution cost of 0.326 € and a global ecoefficiency of 0.5 €/kgCO<sub>2</sub>-eq are calculated. Finally, in the social dimension, accumulated working times and salaries by the farmer and veterinarian are  $7.13 \times 10^{-3}$  h and 0.081 €, respectively.

**Table 4.** Case 1: Milk production. Sustainability indicators. FU: 1 litre of milk.

System	Environmental Dimension		Economic Dimension		Social Dimension	
	$GWP_{100}$ (kg CO <sub>2</sub> -eq)	$Ac$ (g SO <sub>2</sub> -eq)·10 <sup>-3</sup>	$C_E$ (€)	$EE$ (€/kg CO <sub>2</sub> -eq)	$T_w$ (h)·10 <sup>-3</sup>	$S_w$ (€)
(FS) Milk	0.557	10.9	0.270	0.53	5.7	0.062
(BS <sub>2</sub> ) Manure	0.086	1.8	0.043	0.53	0.9	0.010
(FS+BS <sub>2</sub> )	0.643	12.7	0.313	0.53	6.6	0.072
(BS <sub>1</sub> ) Veterinary	0.002	0.58	0.013	6.5	0.53	0.009
<b>PSS</b> (FS+BS <sub>1</sub> +BS <sub>2</sub> )	<b>0.645</b>	<b>13.28</b>	<b>0.326</b>	<b>0.50</b>	<b>7.13</b>	<b>0.081</b>

Reviewing the sustainability indicators of the veterinary service (BS<sub>1</sub>), we observe that the incidence of this BS is relatively small in the case of greenhouse emissions (0.31%) but significant in other PSS indicators such as acidification (4.3%), production costs (3.9%) and working time (7.4%). On the other hand, total greenhouse emissions of 0.643 kgCO<sub>2</sub>-eq, production costs of 0.313 € and working times of  $6.6 \times 10^{-3}$  h are obtained for both milk and manure production. Allocation applying economic weights is used to separately value indicators in product and coproduct. These are also shown in Table 4.

The most significant factors affecting PSS sustainability indicators are shown in Figure 4. Environmental, economic and social aspects are analysed. The percentage distribution of greenhouse emissions, production costs and working times is represented in Figure 4a–c, respectively. In each diagram, we can also observe the percentage contribution of each system (FS, BS<sub>1</sub> and BS<sub>2</sub>) involved in the PSS.

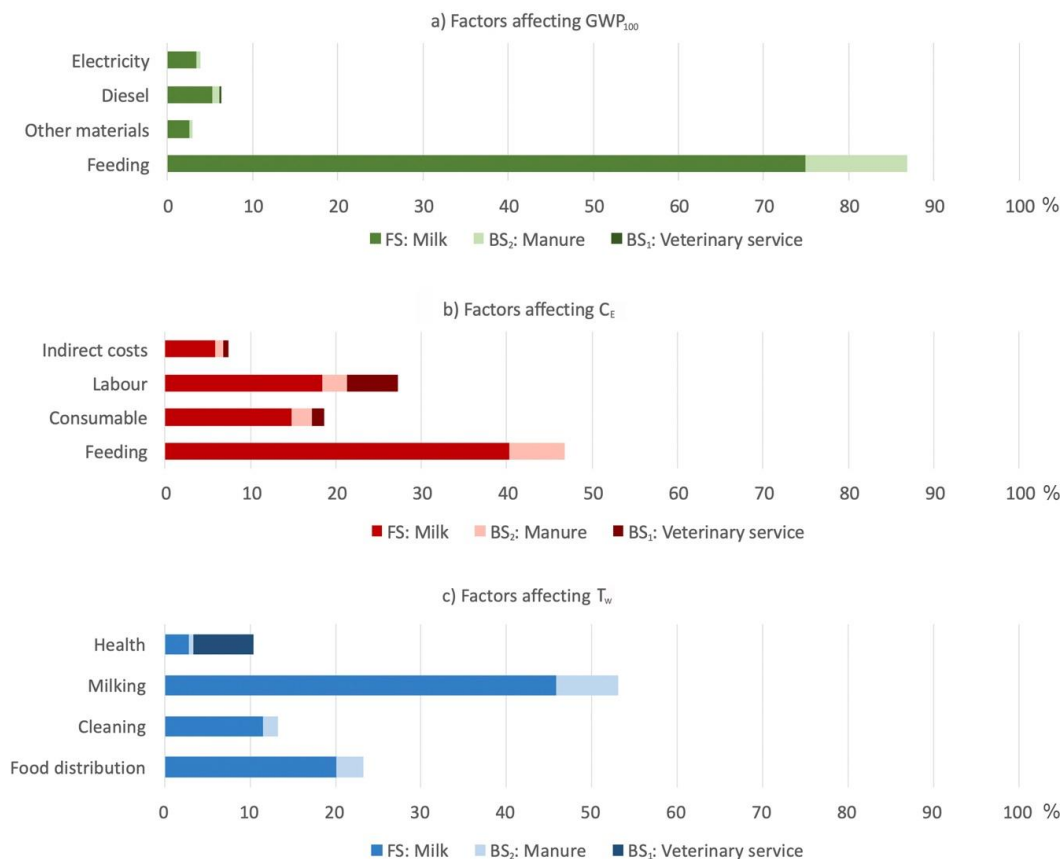


Figure 4. Case 1: Milk production. Percentage distribution of impact factors.

It is noted that emissions due to feeding components (86.8%) are much higher than emissions due to other materials, diesel or electricity. Food also accounts for 46.7% of PSS costs but other costs as those due to labour are relatively high (27.2%). While, milking is the most time-consuming activity (53.1%), other activities such as the food distribution (23.4%) and stables cleaning (13.2%) are also notable.

A sensitivity analysis is also carried out to assess the uncertainty associated with two different factors: the amount of food consumed by animals and the distance that the veterinarian has to drive in order to visit the dairy farm. First, variation of  $\pm 9\%$  in food mass was considered. The effects on  $GWP_{100}$ ,  $C_E$  and  $T_w$  indicators are shown in Figure 5a. The results are compared with those obtained in the base case (40 Kg of food per cow and per day). Significant variations of  $\pm 7.6$  and  $\pm 4.2\%$  are, respectively, obtained in  $GWP_{100}$  and  $C_E$  indicators, while  $T_w$  is practically unaffected.

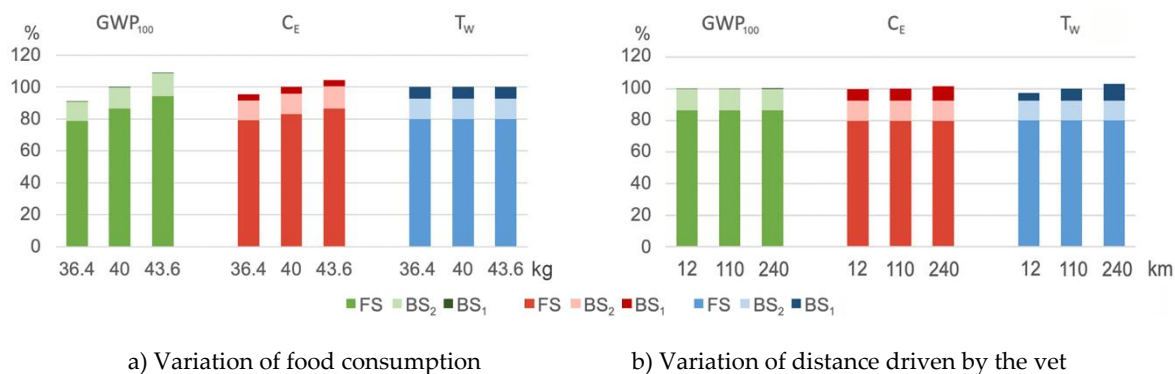


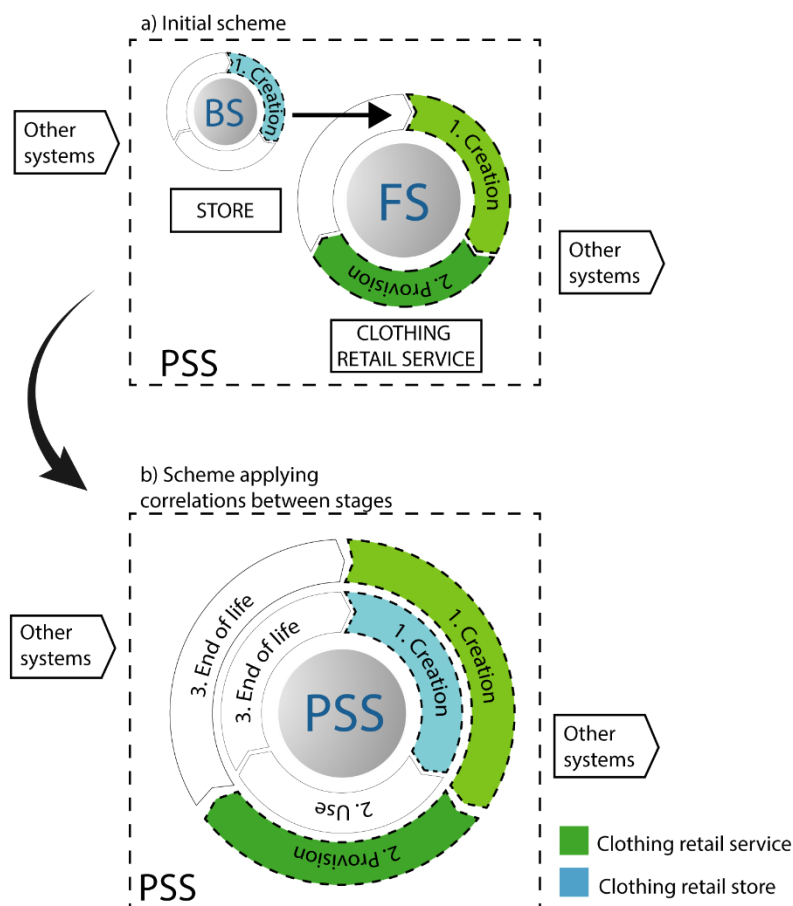
Figure 5. Case 1: Milk production. Sensitivity of the PSS sustainability indicators to different factors.

On the other hand, the sensitivity to the distance driven by the vet was studied considering a distance range of 12–240 Km. The effects on  $GWP_{100}$ ,  $C_E$  and  $T_w$  indicators are shown in Figure 5b. In relation to the base case (110 Km), only small variations can be detected in  $C_E$  (−0.3 and +1.4%) and  $T_w$  (−2.5 and +3.2%) indicators. The  $GWP_{100}$  indicator is practically unaffected.

#### 4.2. Case 2: Clothing Retail Service

In this case, the sustainability of a clothing retail service located in the centre of a big city is evaluated. People with a medium–high purchase power that seek a personalized attention are regular customers of this service. This study is focused on the creation and provision stages of the service life cycle.

The transformation of an empty area into a well-equipped store of 65.3 m<sup>2</sup> was carried out in the creation stage. Thus, a construction product (BS) is involved in the service development (FS) such as is shown in Figure 6a. The life cycle stages of both service and construction product are particularly linked in this case. The product creation is required in the service creation stage, use of the construction product happens during the service provision stage, and finally, the deconstruction process and management of wastes generated should be carried out in the service's end-of-life stage. A scheme that describes the correlation between the life cycle stages of each system is proposed in Figure 6b.



**Figure 6.** Case 2: Clothing retail service. Systems involved and life cycle stages in object of study.

The inventory data in the creation and provision stages of the service life cycle were collected. In the creation stage, different materials are used, and a set of construction activities are developed to achieve well-equipped clothing retail store. Standard EN 15804:2012+A2:2019 [64] is applied to identify the life cycle stages of the construction product. Thus, phases refer to the extraction of materials,



transport and manufacture, as well as those associated to the transport of manufactured materials to the construction site and construction or installation processes are taken into account. Data of materials required, energy consumptions, execution costs and working times were obtained by means of Cype software, which is used in construction projects. Details of all activities required, as well as extensive inventory data associated to the construction process of the clothing retail store can be consulted in Muñoz et al. [65]. A summary of these data, in which a total of six groups of activities are considered, is presented in Table 5.

**Table 5.** Case 2: Clothing retail service. Inventory data in the creation stage (expressed per m<sup>2</sup>).

Material	Mass (t)	Material	Mass (t)
Wood	0.33	Plaster	2.99
Metal	0.61	Concrete	20.7
Plastic	0.19	Ceramic	1.23
Glass	0.35	Others	0.03
Activities	GE (MJ)	C <sub>E</sub> (€)	T <sub>w</sub> (h)
Facades	219.8	50.5	0.28
Partitions	272.6	49.3	1.53
Facilities	145.1	135.6	0.60
Coatings	251.1	97.6	2.46
Furniture	115.3	58.2	0.24
Others	239.1	36.8	0.38

On the other hand, the service provision performance was analysed. Operation of the clothing retail service is carried out by two workers, each working 38.5 hours weekly. Their activities were classified in the following groups: (i) clothes preparation, which includes reception and unpacking of the merchandise supplied from the textile industry, classification, ironing and labelling of the clothes received; (ii) storage and display; (iii) test and fix of clothes, in which personalized attention to customers in the selection and trying-on of clothes is carried out; (iv) sale and packaging of the clothes and customer charge; (v) others activities such as cleaning of the store and service management. Working times and energy consumptions in each group of activities due to the use of different equipment, as well as the consumptions of different materials are shown in Table 6. Data were collected over one year and are expressed per customer visit. A total number of 336 visits were registered in the clothing retail service during the reference year. Four types of customers were differentiated: seasonal, monthly, on offers and special event customers.

In addition, the costs associated to the service operation were determined. Operating costs were classified into four groups: clothes provision, labour, consumable and indirect costs. Clothes provision counts the initial expenditure carried out by the service provider to buy merchandise. Two clothing collections of around 800 items are purchased each year. Costs due to energy consumption and acquisition of materials used in packaging, sewing or cleaning activities are included in consumable. Indirect costs take into account insurance payments and taxes. Data are summarized in Table 6.

The database of the International EPD System [58] was used to assess the environmental impact in clothes. The EPD for ISKO26632 finished denim fabric jeans in accordance with ISO 14025 was applied to the half of the clothes acquired, and the EPD for t-shirt 7046 THV was applied to the other half of clothes. Final PSS sustainability indicators expressing per functional unit are shown in Table 7. In this case, FU is one customer visit. Only customer visits in which clothes are acquired were computed. A total operation time of ten years was also considered.

**Table 6.** Case 2: Clothing retail service. Inventory data in the operation stage (expressed per customer visit).

Material inputs		Units
Clothes		3.6
Other material inputs		(g)
Packaging		320
Management		9.6
Sewing		1.5
Cleaning products		29.6
Activities	Energy (MJ)	T <sub>w</sub> (h)
Clothes preparation	24.44	3.14
Exhibition and storage	7.96	1.78
Test and fix of clothes	19.27	4.34
Sale and packaging	1.95	0.42
Others	8.29	1.79
Operation costs		(€)
Clothes provision		404.7
Labour		102.1
Consumable		16.79
Indirect costs		137.8

**Table 7.** Case 2: Clothing retail service. Sustainability indicators. FU: 1 customer visit.

System	Environmental Dimension		Economic Dimension		Social Dimension	
	GWP <sub>100</sub> (kg CO <sub>2</sub> -eq)	GE (MJ)	C <sub>E</sub> (€)	EE (€/kg CO <sub>2</sub> -eq)	T <sub>w</sub> (h)	S <sub>w</sub> (€)
(FS) Service	0.454	10.18	10.13	22.31	0.176	0.683
(BS) Store	0.033	0.37	0.127	3.86	0.0016	0.027
<b>PSS (FS+BS)</b>	<b>0.487</b>	<b>10.55</b>	<b>10.25</b>	<b>21.04</b>	<b>0.177</b>	<b>0.71</b>

If environmental indicators are reviewed, total greenhouse emissions of 0.487 kgCO<sub>2</sub>-eq and energy consumption of 10.55 MJ are obtained. In the economic dimension, total costs of 10.25 € and a global ecoefficiency of 21.04 €/kg CO<sub>2</sub>-eq are obtained. The accumulated working times and salaries of both service providers and workers involved in the store construction are 0.152 h and 0.71 €, respectively. We can observe that indicators calculated in the service operation are much higher than those obtained in the store construction. In all dimensions, more than 93% of the PSS impacts are caused by the clothing retail service.

The incidence of FS and BS on the PSS sustainability considering different impact factors is shown in Figure 7. The percentage distribution diagrams of GWP<sub>100</sub>, C<sub>E</sub> and T<sub>w</sub> indicators are represented in Figure 7a–c, respectively. It is observed that clothes provision is the most important impact factor in both environmental and economic dimension, since it accounts for 84.7% of greenhouse emissions and 60% of execution costs. In contrast, in the social dimension, the activities associated to test and fix clothes (36.3%) and clothes preparation (26.3%) have high incidence in the working time indicator. Store construction only accounts for 6.7% of GWP<sub>100</sub>, 1.2% of C<sub>E</sub> and 1% of T<sub>w</sub>.

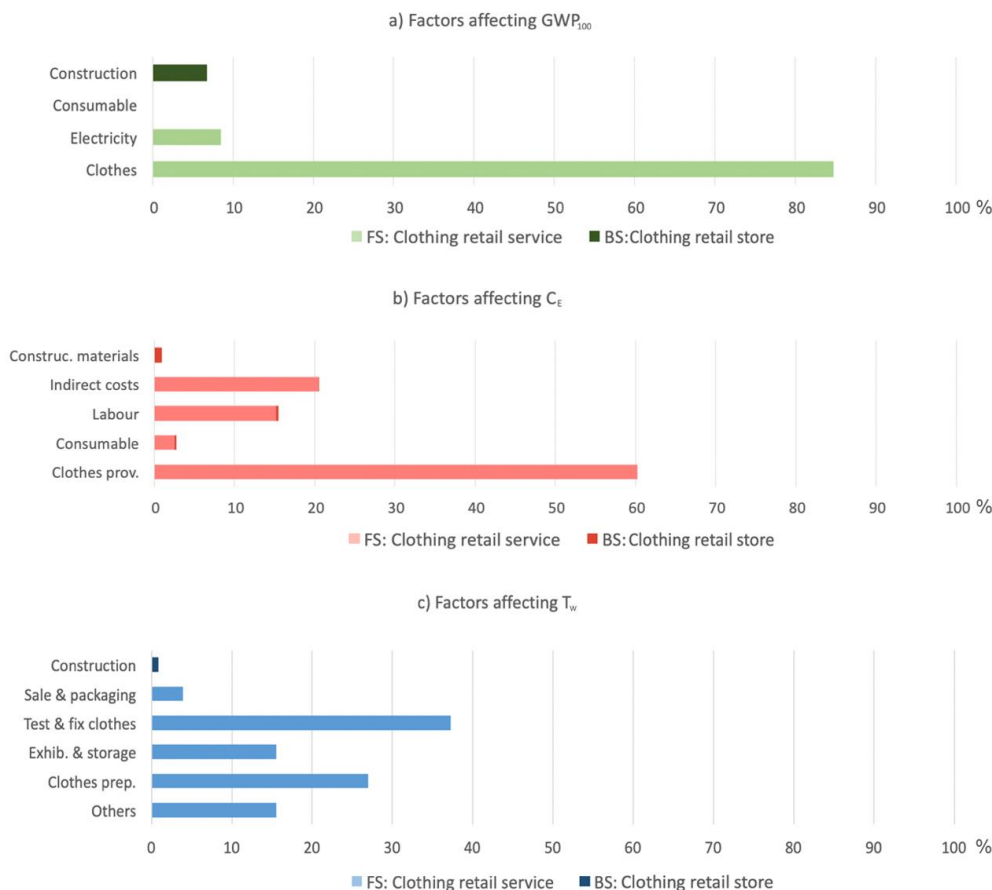


Figure 7. Case 2: Clothing retail service. Percentage distribution of impact factors.

The assessment of the PSS sustainability is based on the assumption that the clothing retail service is operating over ten years. Other scenarios of five and fifteen years, respectively, can be also considered. Sensitivity of the PSS sustainability to the total operation time is presented in Figure 8a. Results show that impacts reduce if service operation time increases. In the scenario in which the service operates for fifteen years in comparison to five years, the  $GWP_{100}$ ,  $C_E$  and  $T_w$  decrease by, 9.6, 1.6 and 4.1%, respectively. In addition, the sensitivity of the PSS sustainability due to the variation of  $\pm 20\%$  in the number of clothes acquired was analysed. We observe in Figure 8b that a substantial variation of  $\pm 15.2$  and  $\pm 12.1\%$  (compared to the base case) is produced in the  $GWP_{100}$  and  $C_E$  indicators, respectively. Social indicator is hardly affected.

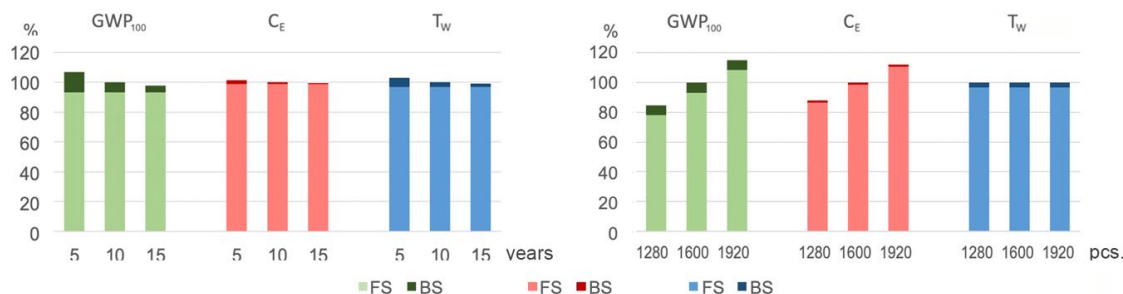


Figure 8. Case 2: Clothing retail service. Sensitivity of the PSS sustainability indicators to different factors.

## 5. Conclusions

In this work, the sustainability assessment of PSS was addressed, giving special attention to adequately defining the initial structure of these systems. An approach based on the flows between product and service systems was proposed to facilitate the comprehensive study of the links between the systems involved. This perspective, in which products and services leave from or enter another product and service system, subsequently generating a product–service flow, allowed for the identification of the distinction between the foreground system (FS) and background systems (BS), which support FS along its life cycle. In order to simultaneously evaluate environmental, economic and social aspects of the sustainability, the LCSA methodology was applied. In each phase of the LCSA method, specific PSS aspects such as the FU definition referring to product and service systems, the identification of PSS boundaries, and the analysis of the sustainability results, taking into account the relative incidence of each system, were included.

Two different cases were the objects of study. In the first case, the milk production process was studied, taking into account that manure is also obtained as a coproduct and a veterinary service is required. In the second case, the development of a clothing retail service was analysed, including the store construction process. In both cases, FS and BS were identified, PSS boundaries were defined and links between involved systems were established using flows between systems approach. A quantitative assessment of the sustainability was obtained in each case by applying a set of indicators referring to each sustainability dimension. In particular, the global warming potential ( $GWP_{100}$ ), the execution cost ( $C_E$ ) and the working time ( $T_W$ ) indicators have been used to analyse sustainability results.

The incidence of each system on the PSS sustainability were evaluated in each case study. In the milk production case, the economic proportion allocation of 86.3 and 13.7% was applied to separately evaluate impacts of milk and manure. The veterinary service accounts, respectively, for 4% and 7.4% of the cost and working time indicators, and its incidence on the environmental indicators is less than 1%. In the clothing retail case, the store construction accounts for 6.7% of  $GWP_{100}$ , 1.2% of  $C_E$  and 3.2% of  $T_W$ .

Furthermore, the identification of factors affecting PSS sustainability and the determination of their relative impact was carried out in each case object of study. In the milk production case, the results show that cow feeding is a very relevant impact factor in environmental (86.8% of  $GWP_{100}$ ) and economic (46.7% of  $C_E$ ) indicators. Labour is also a notable impact factor in  $C_E$  (27.2%). In the social dimension, milking is the most time-consuming activity (53.1% of  $T_W$ ). Sensitivity of the PSS sustainability indicators to both amount of food consumed by animals and distance driven by the veterinarian were also reviewed. Variations of  $\pm 7.6$  and  $\pm 4.2\%$  were obtained in  $GWP_{100}$  and  $C_E$  indicators, respectively, due to variations of  $\pm 9\%$  in cow feeding.  $C_E$  and  $T_W$  indicators range 1.7 and 5.7%, respectively, if the distance driven by the vet is modified.

In the clothing retail case, results show that clothes provision is the most important impact factor in greenhouse emissions (84.7%) and execution costs (60%). While, test and fix of clothes (36.3%) and clothes preparation (26.3%) are the most influential activities in the working time distribution. In addition, the sensitivity of the PSS sustainability due to uncertainties in two different factors was analysed. Variations of  $\pm 20\%$  in the clothes provision factor cause variations of  $\pm 15.2$  and  $\pm 12.1\%$  in the  $GWP_{100}$  and  $C_E$  indicators, respectively. In contrast, variations of  $\pm 50\%$  in the operation time of the service generation, and variations of  $\pm 4.8$ ,  $\pm 0.8$  and  $\pm 2.1\%$  in  $GWP_{100}$ ,  $C_E$  and  $T_W$  indicators, respectively, were observed.

Thus, the sustainability of two different PSS was assessed and the incidence of different factors was analysed. Future research works should expand the PSS study boundaries, adding other involved background systems, and the entire life cycle of products and services should be considered for a complete sustainability assessment of systems. Finally, a more sustainable design of PSS or the redesign of existing systems could be addressed using results of the most important factors affecting PSS sustainability.

**Author Contributions:** Conceptualization, J.L.S.S.; data curation, N.M.L.; investigation, N.M.L., J.L.S.S., A.B. and A.S.T.; methodology, N.M.L. and J.L.S.S.; software, N.M.L., A.B. and A.S.T.; supervision, A.B.; validation, J.L.S.S. and A.S.T.; visualization, A.B. and A.S.T.; writing—original draft, J.L.S.S.; writing—review and editing, N.M.L., J.L.S.S. and A.B. All authors have read and agree to the published version of the manuscript.

**Funding:** This research received no external funding.

**Conflicts of Interest:** The authors declare no conflict of interest.

## References

- Pigosso, D.C.A.; McAloone, T.C. Maturity-based approach for the development of environmentally sustainable product/service-systems. *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.* **2016**, *15*, 33–41. [CrossRef]
- Morelli, N. Developing new product service systems (PSS): methodologies and operational tools. *J. Clean. Prod.* **2006**, *14*, 1495–1501. [CrossRef]
- Tukker, A.; Tischner, U. Product-services as a research field: past, present and future. Reflections from a decade of research. *J. Clean. Prod.* **2006**, *14*, 1552–1556. [CrossRef]
- United Nations Environment Programme (UNEP). 2015. Using Product-Service Systems to Enhance Sustainable Public Procurement. Available online: [http://www.unep.org/10yfp/Portals/50150/10YFP%20SPP/3A\\_Technical%20report.pdf](http://www.unep.org/10yfp/Portals/50150/10YFP%20SPP/3A_Technical%20report.pdf) (accessed on 15 August 2015).
- Tukker, A. Product services for a resource-efficient and circular economy – a review. *J. Clean. Prod.* **2015**, *97*, 76–91. [CrossRef]
- Ashford, N.; Hall, R. The Importance of Regulation-Induced Innovation for Sustainable Development. *Sustainability* **2011**, *3*, 270–292. [CrossRef]
- Boehm, M.; Thomas, O. Looking beyond the rim of one’s teacup: a multidisciplinary literature review of Product-Service Systems in Information Systems, Business Management, and Engineering & Design. *J. Clean. Prod.* **2013**, *51*, 245–260. [CrossRef]
- Vezzoli, C.; Kohtala, C.; Srinivasan, A. *Product-Service System Design for Sustainability*; Greenleaf Publishing: Sheffield, UK, 2014.
- Chen, C.-W. Guidance on the Conceptual Design of Sustainable Product–Service Systems. *Sustainability* **2018**, *10*, 2452. [CrossRef]
- Nasiri, M.; Rantala, T.; Saunila, M.; Ukko, J.; Rantanen, H. Transition towards Sustainable Solutions: Product, Service, Technology, and Business Model. *Sustainability* **2018**, *10*, 358. [CrossRef]
- Sousa-Zomer, T.; Cauchick-Miguel, P.A. Sustainable business models as an innovation strategy in the water sector: An empirical investigation of a sustainable product-service system. *J. Clean. Prod.* **2018**, *171*, S119–S129. [CrossRef]
- Kloepffer, W. Life-cycle based sustainability assessments as part of LCM. In Proceedings of the 3rd LCM Conference, Zurich, Switzerland, 27–29 August 2007.
- Finkbeiner, M.; Schau, E.; Lehmann, A.; Traverso, M. Towards Life Cycle Sustainability Assessment. *Sustainability* **2010**, *2*, 3309–3322. [CrossRef]
- Lacasa, E.; Santolaya, J.; Biedermann, A. Obtaining sustainable production from the product design analysis. *J. Clean. Prod.* **2016**, *139*, 706–716. [CrossRef]
- Fauzi, R.T.; Lavoie, P.; Sorelli, L.; Heidari, M.D.; Amor, B. Exploring the Current Challenges and Opportunities of Life Cycle Sustainability Assessment. *Sustainability* **2019**, *11*, 636. [CrossRef]
- Tan, A.R.; McAloone, T.C.; Andreasen, M.M. What happens to integrated product development models with product/service-system approaches? In Proceedings of the 6th Workshop on Integrated Product Development, Magdeburg, Germany, 18–20 September 2006.
- Kjaer, L.L.; Pagoropoulos, A.; Schmidt, J.; McAloone, T.C.; Kjær, L.L. Challenges when evaluating Product/Service-Systems through Life Cycle Assessment. *J. Clean. Prod.* **2016**, *120*, 95–104. [CrossRef]
- ISO, 2006a. ISO 14040 International Standard. In *Environmental Management - Life Cycle Assessment - Principles and Framework*; International Organisation: Geneva, Switzerland, 2006.
- ISO, 2006b. ISO 14040 International Standard. In *Environmental Management - Life Cycle Assessment - Requirements and Guidelines*; International Organisation: Geneva, Switzerland, 2006.
- Goedkoop, M.; Priensma, R. *The Eco-indicator 99. A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment*; Methodology Report; PRé Consultants B.V.: Amersfoort, The Netherlands, 2001.

21. Guinée, J.; Gorrae, M.; Heijungs, R.; Huppes, G.; Kleijn, R.; de Koning, A.; van Oers, L.; Sleeswijk, A.; Suh, S.; Udo de Haes, H. Life Cycle Assessment - an Operational Guide to the ISO Standards. Centre of Environmental Sciences (CML), Leiden University, 2001. Available online: <https://pdfs.semanticscholar.org/83a8/8111da022a55b5045da17e5480ddaa754b26.pdf> (accessed on 9 April 2020).
22. WCED (World Commission on Environment and Development). *Our Common Future*; Oxford University Press: Oxford, UK, 1987.
23. UNCED, Agenda 21. In Proceedings of the United Nations Conference on Environment and Development, Rio de Janeiro, Brazil, 3–14 June 1992.
24. UNEP/SETAC. *Guidelines for Social Life Cycle Assessment of Products*; United Nations Environment Programme: Paris, France, 2009.
25. Kloepffer, W. Life cycle sustainability assessment of products (with comments by Helias A. Udo de Haes, p. 95). *Int. J. Life Cycle Assess.* **2008**, *13*, 89–95. [[CrossRef](#)]
26. Hannouf, M.; Assefa, G. A Life Cycle Sustainability Assessment-Based Decision-Analysis Framework. *Sustainability* **2018**, *10*, 3863. [[CrossRef](#)]
27. Traverso, M.; Asdrubali, F.; Francia, A.; Finkbeiner, M. Towards life cycle sustainability assessment: an implementation to photovoltaic modules. *Int. J. Life Cycle Assess.* **2012**, *17*, 1068–1079. [[CrossRef](#)]
28. Bernier, E.; Wang, L.; Samson, R. Life cycle optimization of energy-intensive processes using eco-costs. *Int. J. Life Cycle Assess.* **2013**, *18*, 1747–1761. [[CrossRef](#)]
29. Valdivia, S.M.; Ugaya, C.M.L.; Hildenbrand, J.; Traverso, M.; Mazijn, B.; Sonnemann, G. A UNEP/SETAC approach towards a life cycle sustainability assessment—our contribution to Rio+20. *Int. J. Life Cycle Assess.* **2012**, *18*, 1673–1685. [[CrossRef](#)]
30. Santolaya, J.L.; Lacasa, E.; Biedermann, A.M.; Muñoz, N. A practical methodology to project the design of more sustainable products in the production stage. *Res. Eng. Des.* **2019**, *30*, 539–558. [[CrossRef](#)]
31. Capitano, C.; Traverso, M.; Rizzo, G.; Finkbeiner, M. Life cycle sustainability assessment: an implementation to marble products. In Proceedings of the LCM Conference, Berlin, Germany, 28–31 August 2011.
32. Foolmaun, R.K.; Ramjeawon, T. Life cycle sustainability assessments (LCSA) of four disposal scenarios for used polyethylene terephthalate (PET) bottles in Mauritius. *Environ. Dev. Sustain.* **2012**, *15*, 783–806. [[CrossRef](#)]
33. Chen, W.-T.; Hsu, C.-I. Greenhouse gas emission estimation for temperature-controlled food distribution systems. *J. Clean. Prod.* **2015**, *104*, 139–147. [[CrossRef](#)]
34. Bartolozzi, I.; Baldereschi, E.; Daddi, T.; Iraldo, F. The application of life cycle assessment (LCA) in municipal solid waste management: A comparative study on street sweeping services. *J. Clean. Prod.* **2018**, *182*, 455–465. [[CrossRef](#)]
35. Asadi, S.; Babaizadeh, H.; Foster, N.; Broun, R. Environmental and economic life cycle assessment of PEX and copper plumbing systems: A case study. *J. Clean. Prod.* **2016**, *137*, 1228–1236. [[CrossRef](#)]
36. Hossain, U.; Poon, C.S. Comparative LCA of wood waste management strategies generated from building construction activities. *J. Clean. Prod.* **2018**, *177*, 387–397. [[CrossRef](#)]
37. Ren, J.; Manzardo, A.; Mazzi, A.; Zuliani, F.; Scipioni, A. Prioritization of bioethanol production pathways in China based on life cycle sustainability assessment and multicriteria decision-making. *Int. J. Life Cycle Assess.* **2015**, *20*, 842–853. [[CrossRef](#)]
38. Wang, J.; Wang, Y.; Sun, Y.; Tingley, D.D.; Zhang, Y. Life cycle sustainability assessment of fly ash concrete structures. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2017**, *80*, 1162–1174. [[CrossRef](#)]
39. Rabbitt, N.; Ghosh, B. Economic and environmental impacts of organised Car Sharing Services: A case study of Ireland. *Res. Transp. Econ.* **2016**, *57*, 3–12. [[CrossRef](#)]
40. Vilches, A.; Garcia-Martinez, A.; Sanchez-Montañes, B. Life cycle assessment (LCA) of building refurbishment: A literature review. *Energy Build.* **2017**, *135*, 286–301. [[CrossRef](#)]
41. Baldini, C.; Gardoni, D.; Guarino, M. A critical review of the recent evolution of Life Cycle Assessment applied to milk production. *J. Clean. Prod.* **2017**, *140*, 421–435. [[CrossRef](#)]
42. Millán, I.; Lacasa, E.; Sánchez, A.; Diago, L.; Santolaya, J.L. Methodology for a sustainable design of Product-Service Systems. In *Advances on Mechanics, Design Engineering and Manufacturing II*; Springer Nature: Basel, Switzerland, 2019; pp. 13–22.
43. Vinyes, E.; Oliver-Solà, J.; Ugaya, C.; Rieradevall, J.; Gasol, C.M. Application of LCSA to used cooking oil waste management. *Int. J. Life Cycle Assess.* **2012**, *18*, 445–455. [[CrossRef](#)]

44. Ciroth, A.; Franze, J. *LCA of an Ecolabeled Notebook. Consideration of Social and Environmental Impacts along the Entire Life Cycle*; GreenDeltaTC GmbH: Berlin, Germany, 2011.
45. Chang, Y.-J.; Sproesser, G.; Neugebauer, S.; Wolf, K.; Scheumann, R.; Pittner, A.; Rethmeier, M.; Finkbeiner, M. Environmental and Social Life Cycle Assessment of Welding Technologies. *Procedia CIRP* **2015**, *26*, 293–298. [[CrossRef](#)]
46. Ferrari, A.; Volpi, L.; Pini, M.; Siligardi, C.; García-Muñia, F.E.; Settembre-Blundo, D. Building a Sustainability Benchmarking Framework of Ceramic Tiles Based on Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA). *Resources* **2019**, *8*, 11. [[CrossRef](#)]
47. Iriarte, A.; Gabarrell, X.; Rieradevall, J.; Durany, X.G. LCA of selective waste collection systems in dense urban areas. *Waste Manag.* **2009**, *29*, 903–914. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
48. Li, P.; Bai, W.; Ma, K. Life cycle assessment based carbon footprint calculation and analysis of Accommodation services — A case of four-star hotels in Kunming city of China. In Proceedings of the International Conference on Management and Engineering (CME), Shanghai, China, 24–25 May 2014; pp. 1400–1418.
49. Sanjuan-Delmás, D.; Petit-Boix, A.; Martínez-Blanco, J.; Rieradevall, J. Environmental metabolism of educational services. Case study of nursery schools in the city of Barcelona. *Energy Effic.* **2015**, *9*, 981–992. [[CrossRef](#)]
50. Chun, Y.-Y.; Lee, K.M. Environmental impacts of the rental business model compared to the conventional business model: a Korean case of water purifier for home use. *Int. J. Life Cycle Assess.* **2016**, *22*, 1096–1108. [[CrossRef](#)]
51. Cerutti, A.; Ardente, F.; Contu, S.; Donno, D.; Beccaro, G.L. Modelling, assessing, and ranking public procurement options for a climate-friendly catering service. *Int. J. Life Cycle Assess.* **2017**, *23*, 95–115. [[CrossRef](#)]
52. Wulf, C.; Werker, J.; Ball, C.; Zapp, P.; Kuckshinrichs, W. Review of Sustainability Assessment Approaches Based on Life Cycles. *Sustainability* **2019**, *11*, 5717. [[CrossRef](#)]
53. Doualle, B.; Medini, K.; Boucher, X.; Laforest, V. Investigating Sustainability Assessment Methods of Product-service Systems. *Procedia CIRP* **2015**, *30*, 161–166. [[CrossRef](#)]
54. Weidema, B.P. Avoiding Co- Product Allocation in Life Cycle. *J. Ind. Ecol.* **2000**, *4*, 11–34. [[CrossRef](#)]
55. Boër, C.R.; Pedrazzoli, P.; Bettoni, A.; Sorlini, M. *Mass Customization and Sustainability. An Assessment Framework and Industrial Implementation*; Springer: London, UK, 2013.
56. Durlinger, B.; Koukouna, E.; Broekema, R.; van Paassen, M.; Scholten, J. *Agri-footprint 3.0*; Blonk consultants: Gouda, The Netherlands, 2017.
57. Probas Database. *German Environmental Protection Agency. Umweltbundesamt (UBA)*. Available online: <https://www.probas.umweltbundesamt.de/php/index.php> (accessed on 13 April 2017).
58. EPD Database, 2020. Available online: [www.environdec.com/EPD-Search/](http://www.environdec.com/EPD-Search/) (accessed on 4 February 2020).
59. Mapama, 2018. Spain Government. Available online: [www.miteco.gob.es/ca/cambio-climatico/temas/mitigacion-politicas-y-medidas/factores\\_emision\\_tcm34-446710.pdf](http://www.miteco.gob.es/ca/cambio-climatico/temas/mitigacion-politicas-y-medidas/factores_emision_tcm34-446710.pdf) (accessed on 23 January 2018).
60. Ng, R.; Yeo, Z.; Low, J.S.C.; Song, B. A method for relative eco-efficiency analysis and improvement: case study of bonding technologies. *J. Clean. Prod.* **2015**, *99*, 320–332. [[CrossRef](#)]
61. Lacasa, E. Approach and Implementation of a Methodology to Project the Development of Sustainable Products. Ph.D. Thesis, University of Zaragoza, Zaragoza, Spain, 2018.
62. De Vries, M.; De Boer, I.J.M. Comparing environmental impacts for livestock products: A review of life cycle assessments. *Livest. Sci.* **2010**, *128*, 1–11. [[CrossRef](#)]
63. Fantin, V.; Buttol, P.; Pergreffi, R.; Masoni, P. Life cycle assessment of Italian high quality milk production. A comparison with an EPD study. *J. Clean. Prod.* **2012**, *28*, 150–159. [[CrossRef](#)]
64. EN 15804:2012+A2:2019. *Sustainability of Construction Works - Environmental Product Declarations - Core rules for the Product Category of Construction Products*; CEN/TC: Brussels, Belgium, 2019.
65. Muñoz, N.; Santolaya, J.L.; Biedermann, A.; Molina, J. Sustainability assessment in the implementation phase of a retail space. *Adv. Des. Eng.* **2020**, 31–39. [[CrossRef](#)]





# A practical methodology to project the design of more sustainable products in the production stage

J. L. Santolaya<sup>1</sup> · E. Lacasa<sup>1</sup> · A. Biedermann<sup>1</sup> · N. Muñoz<sup>1</sup>

Received: 3 July 2018 / Revised: 18 December 2018 / Accepted: 16 July 2019 / Published online: 29 July 2019  
© Springer-Verlag London Ltd., part of Springer Nature 2019

## Abstract

Methods and tools to develop sustainable products are ever more required by companies to balance the efficiency of its operations with its responsibilities for environmental and social actions. This work aims at achieving improved products along its production stage by the application of a methodology, which consists of three different phases: (i) sustainability assessment; (ii) product redesign; (iii) comparing designs. Different impacts are assessed, sustainability strategies are proposed and more sustainable design alternatives are projected. The procedure is supported by the use of engineering metrics and sustainability indicators, conveniently selected to quantitatively measure the three dimensions of the sustainability: environmental, economic and social. The methodology is implemented in two case studies. First, the manufacturing process of an airbrush is analyzed. Next, the cow milk production in a dairy farm is studied. Strategies to reduce impacts and to achieve an improvement in the sustainability performance of the product are addressed in each case. Both, environmental and socio-economic improvements, are obtained. Thus, a practical method to carry out sustainability-oriented decision making in production processes is developed.

**Keywords** Sustainable design · Methodology · Engineering metrics · Indicators

## 1 Introduction

Promoting sustainability means taking into account socio-ethical principles and a model of production and consumption economically feasible (UNCED 1992). In order to produce both sustainable and competitive products, companies need to identify sustainability aspects in the early product requirement list as well as integrate tools and methods for sustainable product development in the overall decision-making process (McAloone and Tan 2005; Hallstedt et al. 2010). Throughout the past decades, many works have investigated how to achieve sustainable products, but practical methods and tools to address the quantitative assessment and improvement of the product sustainability are still lacking. Thus, the development of methods and guidelines for more sustainable production processes is required.

Design for sustainability (DfS) has been mostly focused on the product level and mainly on the design of products with low environmental impact, usually referred as product life cycle design, eco-design or design for the environment. Eco-design methodology can be defined as the activity aimed at the integration of environmental aspects into product design during its whole life-cycle without compromising other criteria and specifications like operation, mode of use or appearance (Brezet and Van Hemel 1997). A fairly complete set of principles, guidelines and tools was developed to support eco-design. Specific tools can be divided in three main types: environmental assessment, environmental improvement and integrating requirements tools (Table 1). Environmental assessment tools are generally based on a life cycle assessment (LCA) method, which counts, on the one hand, all the energy and material inputs and, on the other hand, the associated emissions and waste outputs at each stage of the product life cycle. Its structure was clearly defined by the harmonization-standardization work by SETAC and ISO (ISO 2006a, b). Environmental improvement tools provide guidelines and rules for helping designers to identify potential actions to improve the environmental performance of products. An

✉ J. L. Santolaya  
jlsanto@unizar.es

<sup>1</sup> Design and Manufacturing Engineering Department, EINA, University of Zaragoza, C/Maria de Luna 3, 50018 Saragossa, Spain



**Table 1** Tools used in Eco-design methodology

Environmental assessment tools			
Full LCA	GaBi (PE International); SimaPro (Pré consultants)	Matrix-based tools	Qualitative and simplified life cycle analysis (ESQCV) Materials, Energy and Toxicity matrix (MET) (Brezet and Van Hemel 1997)
LCA-based tools	MECO (Wenzel and Hauschild 2001) MIPS (Ritthoff et al. 2002) IMPULSIO (Quantis 2009)	Checklists	Environmental Objectives Deployment (EOD) (Karlsson 1997) Ecoconcept spider web (Tischner et al. 2000)
Environmental improvement tools			
Guidelines	The Ten Golden Rules (Luttropp and Lagerstedt 2006)	Parametric tools	Eco-PaS (Eco-efficiency Parametric Screening), (Dewulf 2003)
Eco-design guides	LiDS wheel, (Brezet and Van Hemel 1997) Ecodesign Pilot (Wimmer and Züst 2003) Information/inspiration (Lofthouse 2006)	Decision-making tools	EcoTRIZ (Jones and Harrison 2000) QFDE (Sakao 2007)
Integrating requirements tools			
Design matrix	Requirements Matrix (Keoleian et al. 1995) DFE Matrix (Johnson and Gay 1995) Eco-functional Matrix (Lagerstedt et al. 2003)	VA	Eco-Value Analysis (Eco-VA) (Oberender and Birkhofer 2004) Eco-Re-Design (Bovea and Wang 2007)
QFD	Green Quality Function Deployment (G-QFD) (Kuo and Wu 2003) Quality Function Deployment for Environment (QFDE) (Sakao 2009)	FMEA	Environmental Failure Mode Effects Analysis (E-FMEA) (Nielsson et al. 1998) Eco-FMEA (Dannheim et al. 1998)

overview of both environmental assessment and environmental improvement tools can be consulted in the work of Andriankaja et al. (2015). Additionally, different tools for integrating environmental requirements and balancing them against other traditional requirements can be used (Bovea and Pérez-Belis 2012). The design process is largely driven by product requirements and the identification and integration of sustainability requirements in the early phases of the design process are determinants to guide strategic decisions (Watz and Hallstedt 2018).

Eco-design was mainly done from a technical perspective. Nevertheless, sustainability does not only consist of the environmental impact; it also consists of the three dimensions: environmental (planet), economy (profit) and social well-being (people) according to a worldwide approach (WCED 1987; UNCED 1992). Thus, the economic aspects, environment issues and social concerns should be simultaneously considered to effectively integrate sustainability in product design.

The life cycle sustainability assessment (LCSA) framework (Kloepffer 2007; Finkbeiner et al. 2010; Valdivia et al. 2013) is a perspective to consider interdependencies between ecological and socio-economic systems. LCSA evaluates both negative and positive impacts and provide guiding principles to achieve sustainable products and services by the combination of E-LCA, LCC and S-LCA techniques. Environmental Life Cycle Assessment (E-LCA), also referred as Life Cycle Assessment (LCA), focuses on the environmental

aspects of a product throughout its life cycle and its use is widespread. Life Cycle Costing (LCC) compiles and assesses all money flows at each stage of the product life cycle and it can be used in economic aspects of decision-making process (Hunkeler et al. 2008). The manufacturing costs are usually evaluated from a business perspective and the total costs form the customer perspective. LCC and E-LCA are interlinked through the study of material flows over the whole life cycle of the product. Finally, Social Life Cycle Assessment (S-LCA) aims at assessing the impact on society to improve performance of organizations and different social stakeholders. According to UNEP's guidelines (UNEP/SETAC 2009) the socio-economic impacts can be divided into five stakeholder categories: workers, local community, society, consumers and value chain actors. Another alternative classification is based on social issues such as human rights, working conditions, health and safety, cultural heritage, governance and socio-economic repercussions (Benoît-Norris et al. 2011).

LCSA can be applied using the same structure considered in a LCA. Thus, four phases are developed: (i) goal and scope definition; (ii) Life Cycle Sustainability Inventory (LCSI); (iii) Life Cycle Sustainability Impact Assessment (LCSIA); (iv) interpreting LCSA results. The selection of the system boundaries and functional unit in the three techniques should be consistent and ideally the same. When a process generates more than one output, it is suggested to apply physical and economic proportions in the allocation of

resources, as it is used in the practice of each technique separately. The type of data to be analyzed can be quantitative, semi-quantitative or qualitative. In general, LCA and LCC use quantitative data; however, in S-LCA, semi-quantitative and qualitative information are also often used because the social issues are not easy to quantify.

Kloepffer (2008) indicates as critical issue to establish which set of indicators should be used in each impact category and underlines the importance of reading the results of each technique in combination with the results of the other technique rather than summing them up. Valdivia et al. (2013) recommend making a parallel representation of the three techniques to identify potential and real impacts and benefits as well as trade-offs among the outcomes, the use of sensitivity analysis to evaluate the uncertainty of qualitative data and not performing the aggregation and weighting of the results. Nevertheless, different initiatives to develop simplified indicators that facilitate the communication of sustainability results to the decision-makers were performed. Traverso et al. (2012), implement the Life Cycle Sustainability Dashboard (LCSD) to compare results of different products and use an aggregated sustainability performance index, which is obtained by a weighted average of all included indicators' values. Bernier et al. (2013) propose the use of eco-costs as a method to provide a single-score impact assessment combining LCA and LCC results. If composite index are used, weighting and aggregation of indicators are essential steps in the formulation process and can radically impact the measured sustainability of a system (Wilson and Wu 2017). Methods for weighting indicators can be categorized into three main groups: equal weighting; statistic-based weighting and public/expert opinion-based weighting (Gan et al. 2017). Weights determined by public/expert opinion reflect the value judgments of the participants regarding different aspects of sustainability. In any case, a composite sustainability index that quantifies complex data about a product should provide transparent results to facilitate design engineers and decision-makers to entirely understand the problem and to select the most sustainable option.

Ren et al. (2015) distinguish two sustainability assessment indicators type: single indicator and multiple indicators. The multiple indicators type means that multidimensional criteria (environmental-economic-social) are used for sustainability assessment. Additionally, multiple alternatives or scenarios are typically analyzed in sustainability problems and authors propose a Multi-Criteria Decision Making (MCDM) method to determine the most sustainable industrial system. Thus, LCSA and MCDM are combined to examine three scenarios of bioethanol production. A decision-making framework is also used in other works. Onat et al. (2016) analyse optimal distribution of alternative passenger cars and Azapagic et al. (2016) evaluate the sustainability of different future technologies and scenarios

for electricity generation. For addressing data uncertainties, which are the result of variations associated with physical systems or caused by the lack of information, different methods can be used. Ren (2018) advises the interval approach because the users just need to know the upper and lower limits of the data.

On the other hand, sustainability assessment tools should be used in conjunction with existing approaches associated with the state-of-the-art in design and engineering practice. Maxwell et al. (2006) collect some of the most important sustainable product development initiatives to that moment and provide the “Guide for Developing Sustainable Products and Services in industry” (SPSD). Authors explicitly incorporate a functional need as the first life cycle stage and determine the most sustainable way of providing that function through a product or service. Products and services are usually treated as parts of systems that are referred to as product service systems (PSS). In current economy, PSS is considered as a business and design strategy with the potential of enabling a more sustainable society (Vezzoli et al. 2014). Kjaer et al. (2018) indicate that PSS solutions are promising solutions to enable a transition from a linear to a circular economy, where the aim is to think in circular product and system life cycles, rather than the existing linear paradigm based on “take-make-waste”.

To integrate sustainability aspects in PSS design process, Crul and Diehl (2009) propose the design for sustainability (D4S) guide that is supported in four main activities: policy formulation, idea generation, strict development and realisation. A typical D4S approach consists of ten steps, such as is shown in Fig. 1. First, a work team is created and the goals of the project are established according to company strategies and business plans. In addition, a product is selected in line with the project goals and the most relevant internal and external drivers are determined. Next, product impacts are assessed on the three sustainability dimensions and priorities are identified. Several strategies are proposed to improve the product sustainability. The team draws up a detailed design brief and ideas for improving are generated. Afterwards, the most promising are selected and developed in detail. Thus, a new design is obtained. Comparing the product profile of the new design with that of the previous enables an estimate of the sustainability merits of the new product. Finally, production and follow-up of the new product is carried out.

With a closer approach to the practice of engineering, Gagnon et al. (2012) point out the importance of using appropriate tools, especially for the analysis of potential solutions and the synthesis of the data gathered, to transform a Conventional Design Process into a sustainable design process. They also identify several critical tasks to achieve completeness of any design process dealing with sustainability and propose the use of the integrated sustainable engineering design process (ISED). These tasks are related to the

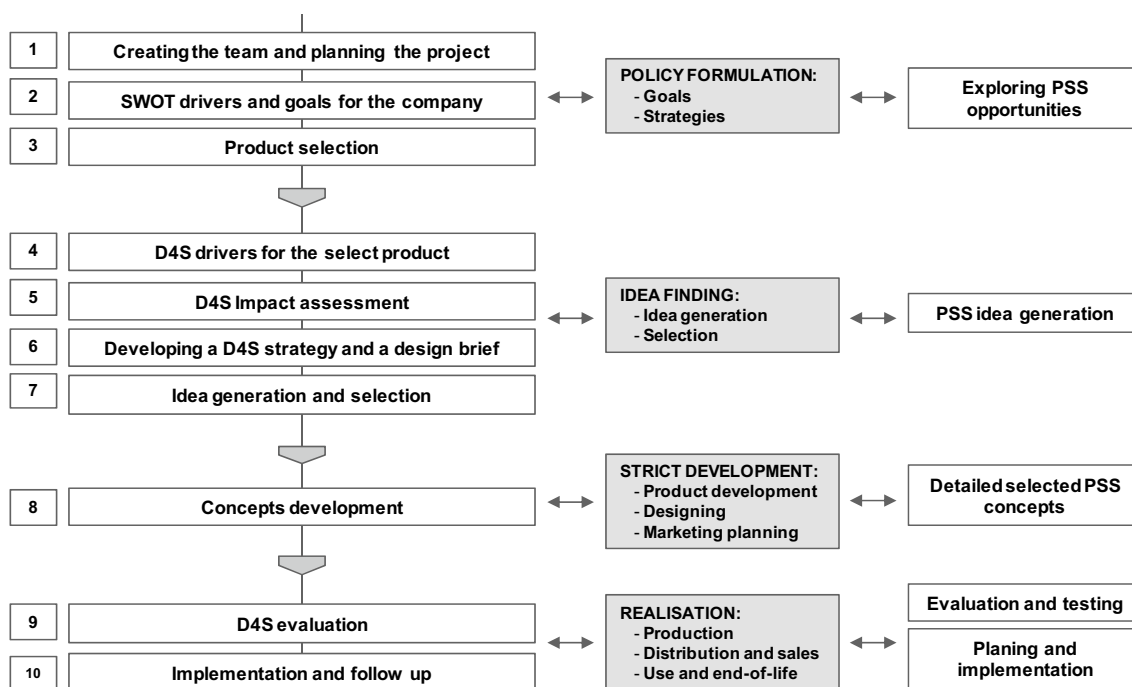


Fig. 1 Steps of D4S guide (Cruel and Diehl 2009)

definition of a conceptual framework to address the sustainability in design projects.

A wide number of studies have been carried out over the past years to put into practice methods and tools to carry out sustainable product design. Table 2 shows some of them, in which very different products are analyzed. If product eco-design is examined three main objectives can be observed in most studies (Lacasa et al. 2016): (i) comparing different stages of the entire life cycle of a product with respect to its environmental impacts; (ii) comparing the relative environmental impacts of different alternatives; (iii) assessment of the product environmental impact and application of improvements. Regarding those studies in which three sustainability dimensions are analysed, we observe that different techniques (LCA, LCC, S-LCA) are combined to quantify the product sustainability performance and compare different alternatives or scenarios. Additionally, sustainability inventory is obtained from data measured in activities developed in existent industrial plants. Other studies, in which the product sustainability is evaluated through its design project and a new sustainable product design is proposed, are usually not carried out. This work aims at projecting more sustainable products by the application of a methodology which assesses impacts not only from an environmental point of view but also from a socio-economic perspective and includes a redesign phase integrating sustainability strategies consistent with the initial product design specifications. Methodology applied and results obtained in two case studies are shown in the following sections.

## 2 Methodology

The method, which combines Eco-design and LCSA approaches, is focused on the quantitative assessment and improvement of the product sustainability in the production stage. A set of engineering metrics defined in parallel with technical aspects and sustainability indicators that allow us evaluating each sustainability dimension are used. As Fig. 2 shows, the proposed methodology consists of three phases.

### Phase 1: Sustainability assessment

The system boundaries are established in the production stage of the product life cycle. A method based on the LCSA approach is used to assess the product sustainability.

The production inventory, which involves the identification of inputs and outputs associated with the system, is obtained in this phase. Manufacturing operations are analysed in detail to value material transformations, energy consumptions, resources allocation, process times and economic costs. Thus, the engineering metrics that allow us to characterize the production process are determined and the indicators to measure the three dimensions of sustainability are evaluated. Additionally, the most significant impact sources are detected to help designer to implement effective redesign strategies.

### Phase 2: Redesign process

In this phase, product redesign alternatives are proposed taking into account sustainability issues. The application of sustainability strategies should be carried out without

**Table 2** Product eco-design studies and product sustainability studies

Authors	Product	Objective	Scope	Assessment method	Results
<b>Product eco-design studies</b>					
Benetto et al. (2004)	Electric power	Comparing six scenarios of electricity production	Obtaining materials and production	Midpoint approach	Responsible scenarios include biomass co-combustion and gas treatment techniques
Reginald and Hsien (2005)	Packaging materials: EPS and CPB	Packaging with less material. Analysis of five waste scenarios	Entire life cycle	EI99 method	To consume less material is beneficial. The worst scenario is landfilling
Masruroh et al. (2006)	Solar thermal system (thermo-chemical unit)	Comparing four heating systems	Obtaining, production and distribution stages	Midpoint approach	Solar thermal system reduces environmental impacts
Martínez et al. (2009)	Wind turbine	Study of four components: nacelle, tower, rotor, foundation	Entire life cycle	CML (midpoint) EI99 (endpoint)	The foundation is the component which most affects the environment
Song et al. (2012)	CRT TV-set monitor	Comparing different stages and different end-of-life scenarios	All life cycle stages	CML and EI99	The use stage has the highest environmental impact
Elduque et al. (2014)	Electronic board of a domestic induction hob	Analysis of two power and one-touch control electronic boards	Entire life cycle	CML method	The most relevant impact is caused by the use stage and by ring core inductors
Babaizadeh et al. (2015)	Exterior window shadings	Impact in five climates and use of three different shading materials	All life cycle stages	BEES model	Guidance to decision about the design of shading systems for different facilities
Iritani et al. (2015)	Wardrobe from MDF	Study of three scenarios for the production of the particle board	Obtaining, production and distribution	EDIP-97 (midpoint)	High impact at the stage of raw materials' supply. Use of wood waste
Tagliaferri et al. (2017)	Liquefied natural gas (fu: 1 MJ)	Impact of natural gas import from extraction point	Extraction, transport and distribution	Indicators of the CML method	Long-distance transport affects notably the impacts. Methane emissions are also critical
<b>Product sustainability studies</b>					
Zhou et al. (2007)	Fuels (fu: 200,000 km)	Analysis of six different fuels	All life cycle stages	LCA; LCC; Multi-criteria; Single index	Analysis of individual criteria; identification of problematic and priority areas
Ciroth and Franze (2011)	Notebook for office use	Identification of social and environmental hot spots	Entire life cycle	LCI; E-LCA; S-LCA;	It is possible to develop a socially and environmentally acceptable product
Capitano et al. (2011)	Marble products (fu: 1 m <sup>3</sup> )	Comparing production in two different industrial plants	Extraction, production and distribution	LCSA; CML in E-LCA	Strengths and weaknesses of the products in each production process are identified
Traverso et al. (2012)	Photovoltaic module (fu: 1 m <sup>2</sup> )	Study of two companies and three different scenarios	Assembly step of the production stage	LCSA; LCSD	The aggregate LCSD results show the best sustainability performance

Table 2 (continued)

Authors	Product	Objective	Scope	Assessment method	Results
Foolmaun and Ramjeawon (2012)	PET bottles (fu: 1 t.)	Comparing four scenarios for used bottles	Final disposition stage	LCSA; Multi-criteria; AHP	75% flake production and 25% landfilling is the best scenario
Chang et al. (2015)	Welding technology (fu: 1 m weld seam)	Four different welding processes	Production stage	LCA—CML—SLCA	MMAW technology has high impact and leads to higher health risk of welders
Eastwood and Haapala (2015)	Bevel gear	Analysis of three alternative bevel gear designs	Manufacturing stage	Aggregation methods; Metrics	Each metric requires different aggregation method
Ren et al. (2015)	Bioethanol (fu: 1 t.)	Comparing three production alternatives	Crop and bioethanol production stages	LCSA; MCDM; AHP	An alternative is selected by the decision-makers. MCDM is difficult to users
Asadi et al. (2016)	Plumbing system (fu: 1000 m)	Study of two piping alternatives: polyethylene and copper	All life cycle stages	LCA; LCC	PEX piping reduce the total cost and reduce the effect of environmental impacts
Wang et al. (2017)	Structures of concrete (fu: 1 m <sup>3</sup> )	Study of different substitution percentage of fly ash	Material acquisition and production	LCSA; Sustainable Value	The replacement of cement with fly ash can reduce impacts significantly

compromising specifications already established in the initial product design.

The Life Cycle Design Strategy (LiDS) wheel (Brezet and Van Hemel 1997) distinguishes a number of eco-design strategies in all stages of the product life cycle. Regarding the production stage, the selection of low-impact materials, the reduction of materials quantity and the optimization of production techniques are considered appropriate strategies to improve environmentally a product. Considering that sustainability also implies a socio-economic approach, redesign strategies are applied by the identification of the most relevant impact factors in each sustainability dimension.

A new production inventory associated with the new product design is undertaken to obtain the corresponding metrics and sustainability indicators of the redesign.

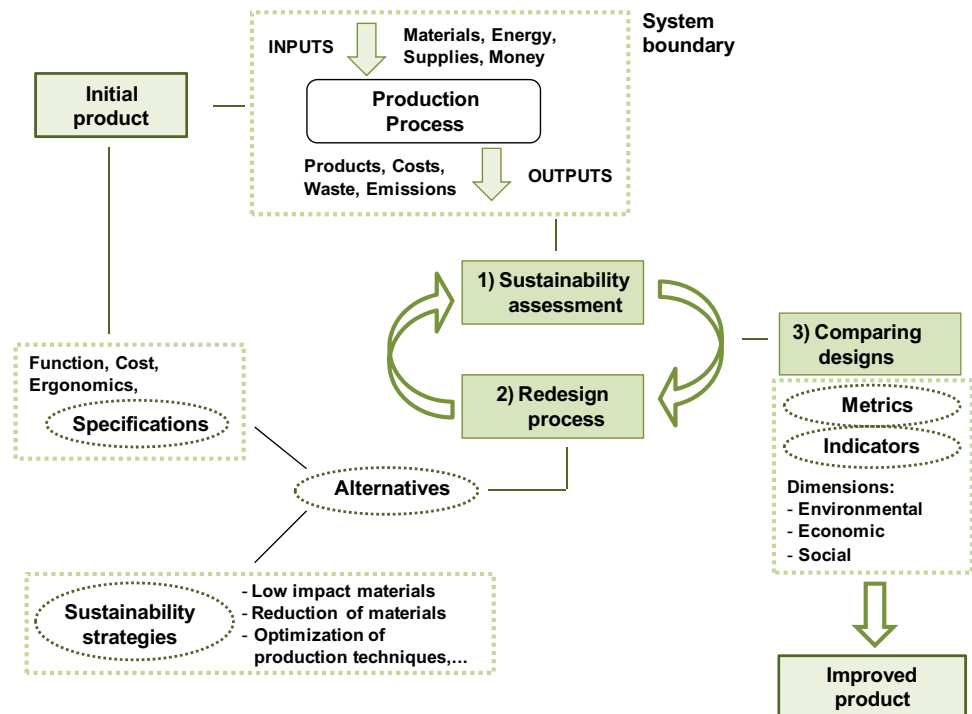
### Phase 3: Comparing designs

The comparative presentation of the sustainability performance of both initial design and redesign is performed to detect if improvements have been achieved. The simultaneous analysis of environmental, economic and social indicators is carried out. Parallel representation of indicators (Valdivia et al. 2013) instead of an aggregated sustainability index is chosen to obtain a comprehensive interpretation of results. While a reduction of the environmental indicators is considered positive, according to the nature of the indicator used in the analysis, an improvement in sustainability may be also associated with the increase the indicator in economic and social dimensions.

If improvements in environmental, economic and social indicators are respectively obtained, an improvement of the product sustainability will be achieved. In another case, criteria to value each sustainability dimension will be determinant (Ren 2018). These criteria can be significantly different in each product analyzed, according to the particular interests and preferences of the stakeholders and decision makers. Thus, different weights in sustainability indicators can be used to reflect the relative importance of the three sustainability dimensions. A sensitivity analysis assigning different weights to the indicators can be undertaken.

A set of engineering metrics and sustainability indicators are selected in this work in order to assess the product sustainability. To achieve an effective comparison of designs, quantitative evaluation of the initial and projected designs must be carried out. Consequently, metrics and indicators are selected to provide quantitative information, particularly in the social dimension. Metrics should describe technical and economically the production activity. They should also facilitate the evaluation of indicators in the three sustainability dimensions and guide the implementation of effective strategies of redesign. To achieve these objectives, the following metrics are used:

**Fig. 2** Phases to obtain a more sustainable product in the production stage



- Product mass ( $M_p$ ): it can be obtained by the difference of the mass of raw materials and the masses of both, material removed and by-products generated in the production process. The total mass of the product could also include the packaging mass.
- Energy consumed in production ( $E_{pr}$ ): it can be determined by three different ways, in which the sum of the following energy consumptions is, respectively, carried out: (i) energy utilized in each different manufacturing process, (ii) energy consumed in the manufacture of each product component, (iii) energy required to process each different material.
- Waste (W): it expresses the efficient use of raw materials in the production process. Both, the mass of raw materials and the mass of material removed can be calculated considering either each product component or each material used in the manufacturing process.
- Production costs ( $C_{pr}$ ): it represents the economic cost for manufacturing the product. Costs are divided in the following groups: raw materials, labour, consumables, indirect and amortisation. Tables providing the price of products and services as well as salary tables are used to value the production costs.
- Production (Pr): it indicates the units of product manufactured throughout a time period. Production depends on the available resources in the industrial plant and how these are allocated (completely or partially). Average production is obtained from the working times involved in each productive operation.

Additionally, a set of indicators are proposed to report overall data of the product within the system boundaries, which are established in the production stage. They intend to identify the materials or processes that cause the most important impacts and to help in the selection of improvements.

In order to assess the environmental dimension, different impact categories can be selected according to the problem to be analysed and midpoint or endpoint assessment methods can be used. A midpoint method (Guinée et al. 2001) uses a different indicator for each impact category. An endpoint method analyses the final effect aggregating different impact categories in a single indicator. In this work, the Global Warming Potential ( $GWP_{100}$ ) and Acidification (Ac) midpoint indicators and the Eco-Indicator 99 (EI99), which is an endpoint indicator, are selected.  $GWP_{100}$  represents total emissions of the greenhouse gases calculating the radiative forcing over a time horizon of 100 years. It is the most used indicator in sustainability studies. Ac indicates the pH reduction due to emissions of acid gases like the nitrogen oxides ( $NO_x$ ) and sulphur oxides ( $SO_x$ ). It is an indicator frequently used to show the environmental impact of farming and livestock activities. EI99 weighs different impact categories into a single score (Goedkoop and Spriensma 2000). This is a particularly useful indicator to communicate results in product design because it shows an overall environmental impact using easy and friendly units. An environmental indicator can be calculated using the corresponding unit indicator ( $Ind_{env,unit}$ ), which is obtained from

different data bases. A number of databases were developed in the past decades based mostly on average data representing average production and supply conditions for a variety of products and basic services (Boër et al. 2013). In this work, Probas database (UBA 2007), MEEuP Methodology report (Kemna et al. 2005) and Agri-footprint database (Durlinger et al. 2017) are used to determine the midpoint indicators. EI99 was obtained from the manual for designers developed for the Eco-indicator 99 method (VROM 2000).

In the case of the economic dimension, the value added (VA), the return on assets (ROA) and the eco-efficiency (EE) are the indicators proposed. The value added expresses the net operating profit of the company before taxes (Azapagic and Perdan 2000). It is a practical indicator to show the economic viability of any manufacturing process. ROA represents how profitable a company is relative to its total assets. Although it is usually applied for comparing competing companies, in this work it is

proposed to economically assess required investments to manufacture a new product design. EE is obtained by the ratio of the net operating profit and the environmental impact measured by EI99 (Ng et al. 2015). It allows comparing easily economic benefits versus environmental impacts. On the other hand, the category of workers, which is the most affected stakeholder group in the production stage, is selected to analyse the social dimension of sustainability and quantifiable indicators as the working time ( $T_w$ ) and the hourly wage ( $W_h$ ) are used to carry out its assessment. The working time is the average time required by the company workers to manufacture one product unit and the hourly wage is the labour cost per unit of time worked (1 h).

Expressions used to the calculus of the engineering metrics and sustainability indicators used in this work are, respectively, summarized in Tables 3 and 4.

**Table 3** Engineering metrics

ENGINEERING METRICS			
<b>Product mass (<math>M_P</math>)</b>			(Kg)
$M_P = M_{RM} - M_{MR} - M_{BP}$		$M_{RM}$ : Mass of raw materials $M_{MR}$ : Mass of material removed in the production process $M_{BP}$ : Mass of by-products generated in the production process	
$M_T = M_P + M_{Pack}$		$M_T$ : Mass of the final product including packaging $M_{Pack}$ : Mass of the packaging	
<b>Energy consumed in production (<math>E_{Pr}</math>)</b>			(Kw·s)
$E_{Pr} = \sum_{proc} E_{proc}$	$E_{Pr} = \sum_{comp} E_{comp}$	$E_{Pr} = \sum_{mat} E_{mat}$	
$E_{proc}$ : Energy consumed in each manufacturing process of the product $E_{comp}$ : Energy consumed in the manufacture of each component of the product $E_{mat}$ : Energy consumed to process each material different from the product			
<b>Waste (<math>W</math>)</b>			(%)
$W = \frac{M_{MR}}{M_{RM}} \times 100$		$M_{MR}$ : Mass of material removed in the production process $M_{RM}$ : Mass of raw materials	
$M_{MR} = \sum_{comp} M_{MR,comp}$	$M_{MR} = \sum_{mat} M_{MR,mat}$	$M_{RM} = \sum_{comp} M_{RM,comp}$	$M_{RM} = \sum_{mat} M_{RM,mat}$
$M_{MR,comp}$ : Mass of material removed in the manufacture of each component of the product $M_{MR,mat}$ : Mass of material removed for each material different from the product $M_{RM,comp}$ : Mass of raw materials used in the manufacture of each component of the product $M_{RM,mat}$ : Mass of raw materials for each material different from the product			
<b>Production costs (<math>C_{Pr}</math>)</b>			(€)
$C_{Pr} = C_{RM} + C_L + C_{EC} + C_{ind} + C_{am}$			
$C_{RM}$ : Costs of raw materials used in the manufacture of the product $C_L$ : Labour costs $C_{EC}$ : Costs due to energy consumption and consumables $C_{ind}$ : Indirect costs $C_{am}$ : Amortization costs			
<b>Production (<math>Pr</math>)</b>			(units/h)
$Pr = \frac{N_{pr}}{t_{proc}}$			
$N_{pr}$ : Number of products produced $t_{proc}$ : Time used in the manufacture of the products			

**Table 4** Sustainability indicators

SUSTAINABILITY INDICATORS					
<b>Environmental indicators</b>					
<b>GWP<sub>100</sub></b>	(Kg CO <sub>2</sub> -eq)	<b>Acidification (Ac)</b>	(Kg SO <sub>2</sub> -eq)	<b>Eco-indicator 99 (EI99)</b>	pt
$Ind_{amb} = \sum [(Ind_{env})_{unit} \cdot inp]$					
$(Ind_{env})_{unit}$	Unit environmental indicator				
inp:	Input to the system				
<b>Economic indicators</b>					
<b>Value added (VA)</b>	(€)	<b>Eco-Efficiency (EE)</b>	(€/pt)	<b>Return on assets (ROA)</b>	(%)
$VA = Re - C_{Pr}$		$EE = \frac{VA}{EI99}$		$ROA = \frac{VA}{Ass}$	
Re:	Input money due to product sales				
C <sub>Pr</sub> :	Production costs				
Ass:	Average value of the company assets for a given period (usually, an annual period)				
<b>Social indicators</b>					
<b>Working time (T<sub>w</sub>)</b>		(s)	<b>Hourly wage (W<sub>h</sub>)</b>		(€/h)
$T_w = \frac{\sum t_{worker}}{N_w}$			$W_h = C_L \cdot Pr$		
t <sub>worker</sub> :	Time required by each worker in the manufacture of the product				
N <sub>w</sub> :	Number of workers				
C <sub>L</sub> :	Labour costs				
Pr:	Production				

### 3 Case studies

The methodology exposed before is applied in two case studies. Two products with very different characteristics are reviewed. First, the manufacturing process of an airbrush is studied in detail. Data are obtained from the product development project (Lacasa et al. 2015). Next, the cow’s milk production process is analysed using data measured in a dairy farm. In both cases, the objective is to obtain a more sustainable product along its production stage. The level of the achieved improvement considering the three sustainability dimensions is measured through convenient indicators.

#### 3.1 Case 1: airbrush

The manufacturing process of a conventional airbrush used in model painting jobs is studied in detail. An airbrush needs of a compressed air flow of high velocity to atomize liquid paint into fine droplets and to throw it over a surface. All components that make up the device and its technical specifications are shown in Fig. 3. Paint is supplied by gravity and the user controls both, air and paint flows, through the trigger located on upper of the airbrush. Accuracy in shapes and dimensions of components is required to obtain an optimal operation. In addition, materials of high resistance to aggressive fluids should be used.

#### 3.1.1 Sustainability assessment

An industrial installation with the necessary equipment to develop the production process of the airbrush is projected. Manufacturing operations are carried out by a total number of 8 workers and resource allocation is not partitioned. The functional unit is one manufactured product. Inputs and outputs as well as data of the operations developed, in reference to one functional unit, are indicated in Fig. 4. The following materials are used: stainless steel (AISI-304 N): brass (CW614 N), Teflon (PTFE), low-density rubber (EPDM) and Chromium. Most of the airbrush components are manufactured in AISI-304 N; CW614 N is used in some threaded parts; PTFE is specifically utilized to obtain the packing washer (component 6); different seals are made of EPDM and Chromium is deposited in the outer surface of the airbrush as a thin protective layer.

Manufacturing times and energy consumptions in each stage of the production process are also indicated in Fig. 4. The product is completely assembled and finally tested. We can observe that manufacturing times are particularly elevated in machining operations and the highest energy consumption is found in the finishing process. Calculations of material removed are also carried out to obtain the final waste percentage generated throughout manufacturing process. In addition, revenues due to product sales and production costs due to raw materials, labour, energy consumption and others are indicated.



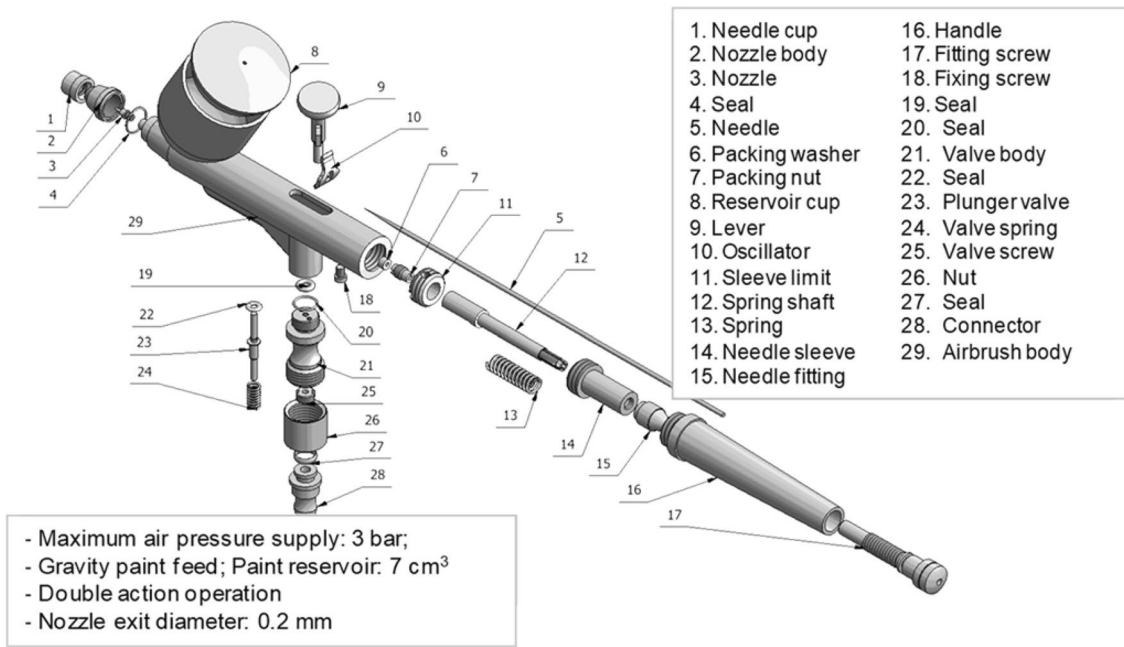


Fig. 3 Airbrush. Components and technical characteristics

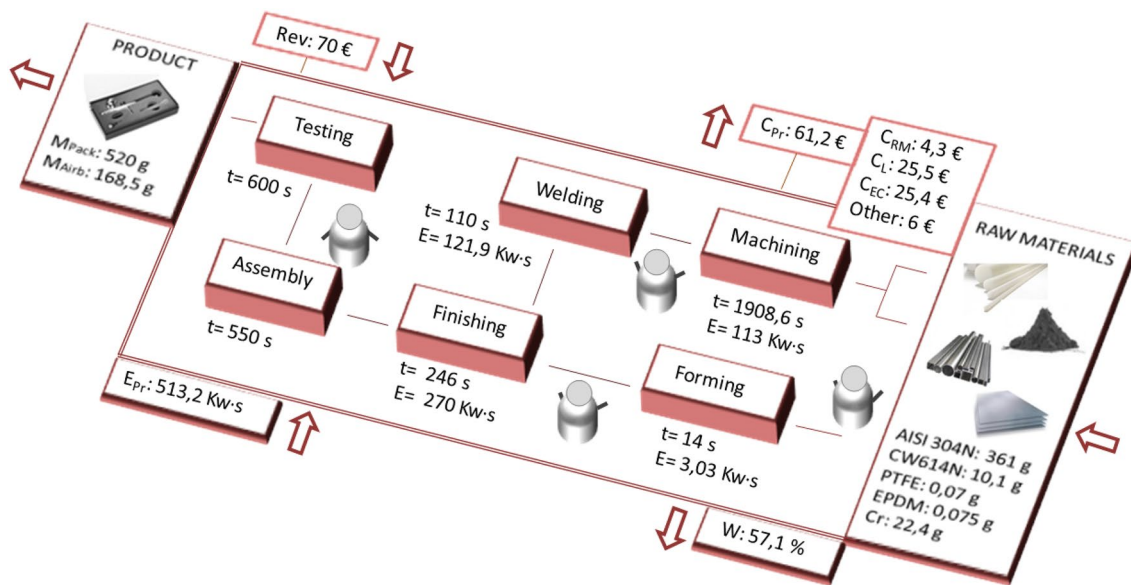


Fig. 4 Airbrush—Initial design. Scheme of the manufacturing process and flows exchanged

A set of engineering metrics to characterize the airbrush production process are assessed and summarized in Table 5. The final mass of the airbrush is 168.5 g (without packaging) and the total mass of the product that will be transported and distributed is 520 g. A total energy consumption of 513.2 Kw-s is required to manufacture one unit. It can be noted that a very high waste percentage (57.1%) is generated. The total production costs are 61.2 €. According to the manufacturing

times calculated and resources used, a production of 6.25 units/h is planned.

In order to assess the product sustainability, the indicators shown in Table 5 are used. In the case of the environmental dimension, 1.68 kg of CO<sub>2</sub>-eq and 465.1 pt are, respectively, obtained for the midpoint indicator GWP<sub>100</sub> and the endpoint indicator EI99. Regarding the economic dimension, a net operating profit of 8.8 € and an eco-efficiency of 0.018 €/pt

**Table 5** Airbrush—Initial design. Engineering metrics and sustainability indicators

$M_{\text{Airb}}$ (g)	$M_T$ (g)	$E_{\text{Pr}}$ (Kw·s)	W (%)	$C_{\text{Pr}}$ (€)	Pr (units/h)
168.5	520	513.2	57.1	61.2	6.25
Environmental dimension		Economic dimension		Social dimension	
$GWP_{100}$ (Kg CO <sub>2</sub> -eq)	EI99 (pt)	VA (€)	EE (€/pt)	$T_w$ (h)	$W_h$ (€/h)
1.68	465.1	8.8	0.018	0.13	159.1

are obtained. If the social dimension is examined, a working time of 0.13 h and a hourly wage of 159.1 €/h are calculated.

Next, different impact factors are reviewed and those which have the highest incidence on product sustainability are determined. Figure 5 shows the impact of the materials used in the manufacturing process of the airbrush. The effect of each material on the greenhouse emissions ( $GWP_{100}$ ) and its relative contribution to the production costs ( $C_{\text{Pr}}$ ) are simultaneously analysed. In addition, four factors are taken into account: material in the final product, material removed, labour and energy consumption. Two main aspects can be observed: (i) the materials with the highest environmental impact are AISI304 N and Chromium. In each case, the material removed during the manufacturing process causes around 50% of the total impact; (ii) more than 80% of the total costs are due to the AISI304 N processing and production costs obtained from labour and energy consumption are much higher than costs due to material acquisition. These results help us to implement effective redesign strategies.

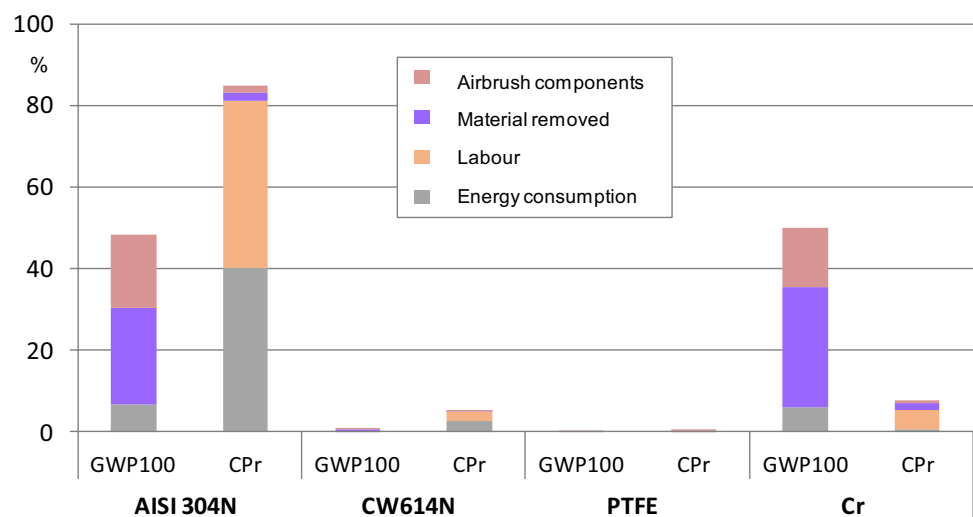
### 3.1.2 Redesign process

Some changes in raw materials’ selection as the use of convenient calibrated bars and tubes are proposed with the aim of reducing the high percentage of the generated waste. It

is expected that the number of machining operations can be simplified as well. Results due to raw materials adjust are shown in Table 6. The following information for both, initial design (Di) and redesign (R) is shown for a number of components: size of raw materials, machining operations that can be eliminated, energy consumption and mass of material to be removed along the manufacturing process. If the first component (needle cup) is analysed, we observe that some operations as contour turning of 0.5 mm and drilling of 4 mm could be avoided in the redesign by the use of 7 mm diameter and 1.5 mm thickness tube. Thus, a significant reduction of 0.46 Kw s in energy consumption and 1.18 g in material removed could be achieved for this component. Additionally, the time of machining operations reduces 258 s due to a simplification of a number of operations.

On the other hand, it is proposed to carry out a polishing process on the outer surface of the airbrush instead of applying an electrolytic plating process. The functional specifications of the product are not modified, since stainless steel has excellent mechanical properties including resistance to corrosion. In addition, those risks for workers health related with inhalation or dermal exposure to the concentration of hexavalent chromium into the air can be avoided. An increase of 160 s is expected for the time of finishing operations. Taking into account the overall manufacturing

**Fig. 5** Airbrush—initial design. Effect of different factors on product sustainability



**Table 6** Changes in the manufacturing process of different components of the airbrush

Airbrush component		Raw materials' size (mm)	Machining operations removed (mm)	$E_{comp}$ (Kw s)	$M_{MR,comp}$ (g)
1. Needle cup	Di	Ø8		1.40	1.72
AISI 304	R	Ø7×1.5	Turning (0.5); Drilling (Ø4)	0.94	0.54
2. Nozzle body	Di	Ø10		2.74	5.15
AISI 304	R	Ø9	Contour turning (0.5)	2.30	3.99
6. Packing washer	Di	Ø4		0.11	0.05
PTFE	R	Ø3	Contour turning (0.5)	0.01	0.02
9. Trigger	Di	Ø12		19.04	15.6
AISI 304	R	Ø11	Contour turning (0.5)	17.82	13.3
11. Sleeve limit	Di	Ø10		0.65	2.36
CW614 N	R	Ø10×2.5	Drilling (Ø5)	0.51	1.39
12. Spring shaft	Di	Ø5.5		2.37	4.58
AISI 304	R	Ø5	Contour turning (0.25)	1.76	3.29
14. Needle sleeve	Di	Ø10		1.80	4.07
AISI 304	R	Ø10×4	Drilling (Ø2.8); Reaming (0.8)	1.51	3.38
16. Handle	Di	Ø13		21.70	44.2
AISI 304	R	Ø12×4	Contour turning (0.5) Drilling (Ø4.7) Reaming (0.8)	16.13	29.1
17. Fitting screw	Di	Ø9		6.01	13.4
AISI 304	R	Ø8	Contour turning (0.5)	4.50	9.43
21. Valve body	Di	Ø11		5.22	11.21
AISI 304	R	Ø10	Contour turning (0.5)	3.96	7.99
26. Nut	Di	Ø11		2.88	5.64
AISI 304	R	Ø11×2	Drilling (Ø7). Reaming (0.1)	1.44	2.27
29. Airbrush body	Di	Ø13		28.51	48.3
AISI 304	R	Ø12	Contour turning (0.5)	23.18	35.8

*Di* initial design, *R* redesign

process, an improvement of the average time is obtained and an increase of the production could be achieved.

A new production inventory is carried out for the redesign. Engineering metrics and sustainability indicators resulting of applying previous sustainability strategies are summarized in Table 7. Regarding metrics, it should be noted that a waste of 49.6% is now obtained and a total energy consumption of 251.9 Kw·s is calculated: the production costs are 58 € and a production of 7 units/h is expected. If environmental indicators are reviewed, 0.93 kg of CO<sub>2</sub>-eq and 396 pt are assessed for the GWP<sub>100</sub> and EI99. In the

economic dimension, results obtained for VA and EE are, respectively, 12 € and 0.03 €/pt. Finally, in the social dimension, an average working time of 0.118 h and an hourly wage of 178.2 €/h are calculated. All indicators are reported per unit of product.

### 3.1.3 Comparing designs

The percentage variation of the engineering metrics is shown in Fig. 6. Considerable changes are observed between the values obtained in the redesign and those calculated in

**Table 7** Airbrush—redesign. Engineering metrics and sustainability indicators

$M_{Airb}$ (g)	$M_T$ (g)	$E_{Pr}$ (Kw·s)	W (%)	$C_{Pr}$ (€)	Pr (units/h)
161.1	512.6	251.9	49.6	58	7
Environmental dimension		Economic dimension		Social dimension	
GWP <sub>100</sub> (Kg CO <sub>2</sub> -eq)	EI99 (pt)	VA (€)	EE (€/pt)	T <sub>w</sub> (h)	W <sub>h</sub> (€/h)
0.93	396	12	0.03	0.118	178.2

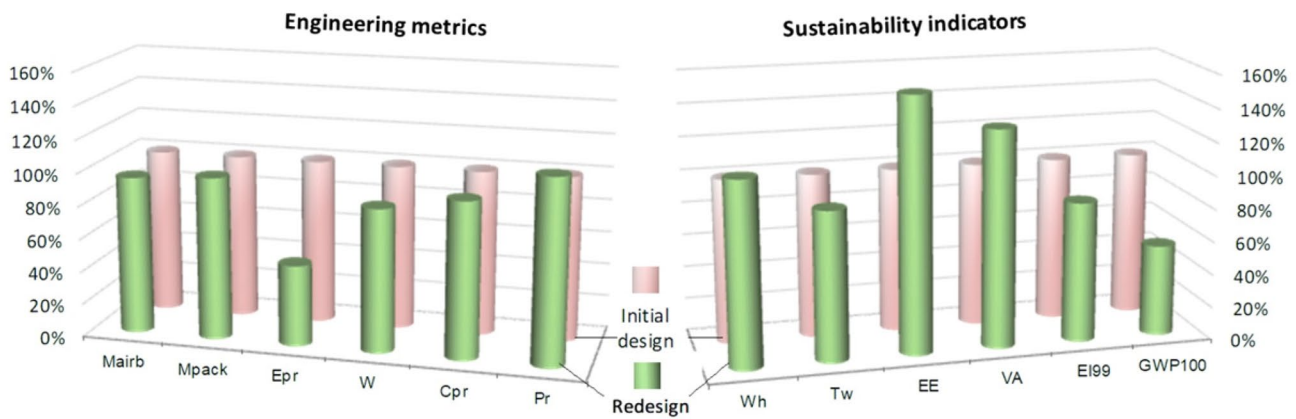


Fig. 6 Airbrush production. Comparison of metrics and indicators

the initial design. In particular, the energy consumption decreases 51% due to the changes introduced in machining and finishing processes and a reduction of 13.2% of waste is achieved selecting conveniently raw materials' sizes. At the same time, the mass of the airbrush reduces by 4.4% because the chromium layer is not applied; the production costs decrease by 5.3% due to costs of raw material acquisition and energy consumption are minor. In addition, significant improvements in manufacturing times are obtained and production can be increased by 12%.

If sustainability indicators are compared (Fig. 6), we observe that the environmental impact is substantially improved.  $GWP_{100}$  and  $EI99$  decrease, respectively, by 44.7 and 15%. A significant improvement is obtained in economic dimension given that  $VA$  increases by 3.2 € and  $EE$  grows by 0.012 €/pt. Social indicators also improve considerably. The average working time reduces by 9.2% and the hourly wage increases by 12%.

Thus, an appropriate selection of raw materials and the replacement of the chromed layer by a polishing process allow obtaining improvements in environmental, economic and social indicators. Since all sustainability dimensions are improved a more sustainable airbrush could be manufactured.

### 3.2 Case 2: milk production

In this case, the production of cow milk in an existent dairy farm is studied. It can be considered a medium–low size and intensive type farm, with 38 cows in production phase. Milk provides essential nutrients and is an important source of dietary energy, high-quality proteins and fats. Whole cow's milk is composed mainly of water, ions such as salt, minerals and calcium, carbohydrates such as lactose, proteins such as casein and some vitamins. The feeding of the cows

has a critical influence on the final proportion of nutrients in the milk.

#### 3.2.1 Sustainability assessment

Production inventory and subsequent sustainability analysis were carried out considering 1 litre of milk as functional unit. Figure 7 shows a scheme of the milk production process. Inputs and outputs involved in the system are indicated. Operation time and energy consumption in each productive activity and the global consumption of energy throughout the process are shown. All data are expressed per litre of produced milk.

Inputs can be classified as raw material needed in the cow's feeding (corn silage, feed, alfalfa and water); products for cleaning the equipment used in extraction and milk storage (water, detergent, acid and protector), medicines, straw for conditioning the cows stay area and diesel for vehicles' operation. On the other hand, the dairy farm has the following outputs: milk (main product), manure (by-product), cattle (cows and calves), wastewater and medication waste, which is collected every 6 months by a specialized company. The average daily production of milk per cow is 28 l. Each animal requires per day around 40 kg of food and between 80 and 100 L of water, depending on the season of the year. Mixing and distribution of food and cleaning of the stay area are activities in which high energy consumption is required due to the use of two tractors. All activities are carried out by only one worker.

Money inputs in the system do not only come from milk production. Other revenues as those from the manure sold as fertilizer and the commercialization of both, cows and young animals not destined for milk production, are considered. Each year around 6 cows and 20 calves are sold. It should be also considered that a subsidy from the administration is received by farms of these characteristics. On the other hand,

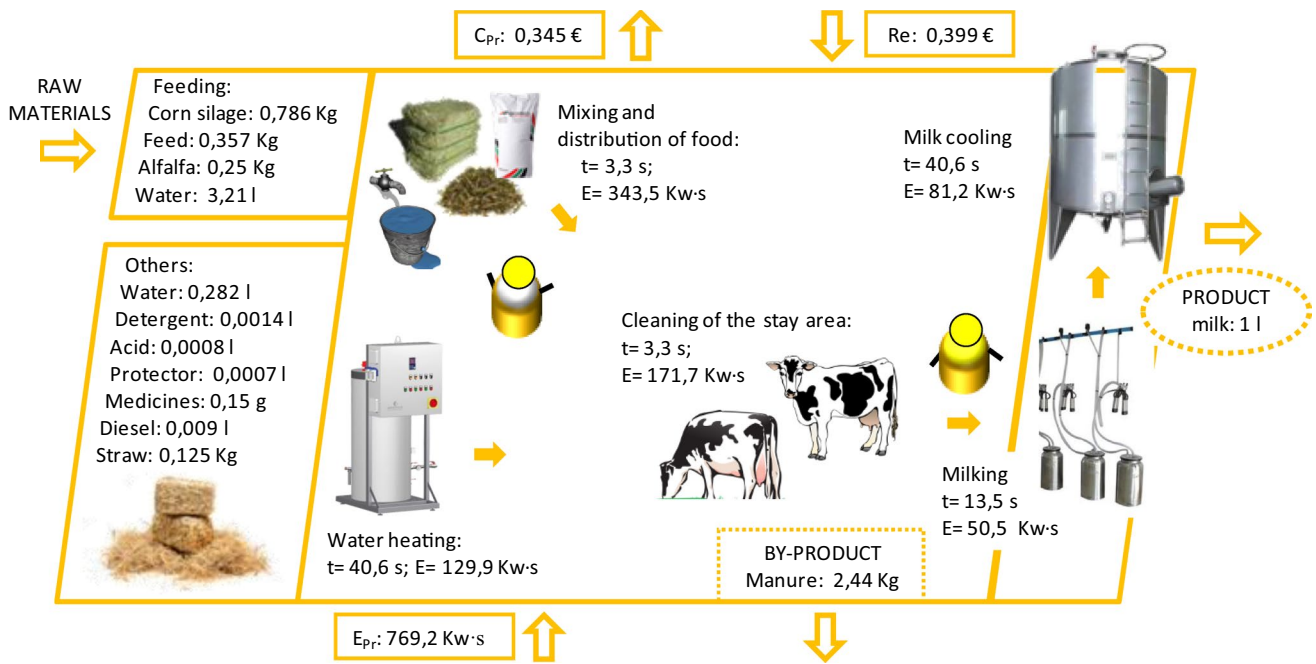


Fig. 7 Scheme of the milk production process

Table 8 Initial milk production process. Money inputs and outputs

Revenue (€)		Production costs (€)	
Milk	0.3107	Raw materials	0.158
Manure	0.049	Labour	0.072
Cow sales	0.015	Consumables	0.058
Calves sales	0.009	Indirect	0.025
Subvention	0.015	Amortization	0.032
Total	0.399	Total	0.345

production costs are determined. Particularly important are the costs due to raw materials' acquisition, which are nearly 50% of the total costs. Table 8 summarizes money inputs and outputs per each litre of milk obtained. The milk price is 0.31 €/l, (data obtained from MAPAMA 2018).

In this case, metrics to characterize the raw material use and the by-product generated are selected. Energy consumption, production costs and daily production are

also used. In order to assess the environmental impact the  $GWP_{100}$  and  $Ac$  indicators are used, which are commonly used in this sector (Baldini et al. 2017);  $VA$  and  $ROA$  are used as economic indicators and  $T_w$  and  $W_h$  are used in the social dimension. Results are shown in Table 9. To obtain a litre of milk, 1393 kg of food and 3496 l of water are required (3214 l are consumed by animals and 0.282 l are used in cleaning processes) whereas 2446 kg of manure is obtained as a by-product. The energy consumption is 769.2 Kw-s and the production costs are 0.345 €. An average production of 1064 l is obtained each day (28 l per cow). Reviewing the sustainability indicators, values of 0.643 kg  $CO_2$ -eq and 0.007 g  $SO_2$ -eq are obtained, respectively, for the greenhouse emissions and acidification environmental indicators; a value addition of 0.054 € and a return on assets of 0.069 are calculated in the economic dimension; finally, the average working time required to obtain a litre of milk is 0.0066 h and the hourly wage is 10.91 €/h.

Table 9 Initial milk production process. Engineering metrics and sustainability indicators

$M_{feeding}$ (kg)	Water (l)	$E_{Pr}$ (Kw-s)	$M_{manure}$ (Kg)	$C_{Pr}$ (€)	Pr (l/day)
1.393	3.496	769.2	2.446	0.345	1064
Environmental dimension		Economic dimension		Social dimension	
$GWP_{100}$ (Kg $CO_2$ -eq)	$Ac$ (g $SO_2$ -eq)	VA (€)	ROA	$T_w$ (h)	$W_h$ (€/h)
0.643	0.007	0.054	0.069	0.0066	10.91

Different impact factors are analysed and those which have the highest contribution are determined. Figure 8 shows how the impact of the raw materials used in the milk production is distributed. We observe that environmental impact, evaluated from the  $GWP_{100}$ , is mainly caused by feeding components and, particularly, corn silage (42%) and alfalfa (24%) are the components with the greatest contribution. It is also noted that raw materials have a relatively high cost. This is especially elevated for the feed (53%). Figure 9 shows the distribution of the times and costs associated with different productive activities. Thus, socio-economic aspects are considered. We observe that milking is a critical activity since a single worker is responsible for carrying it out. Other activities as the mixing and distribution of food and the cleaning of the stay area have a notable contribution (around 15% each one) and the animal health care supposes a high relative cost

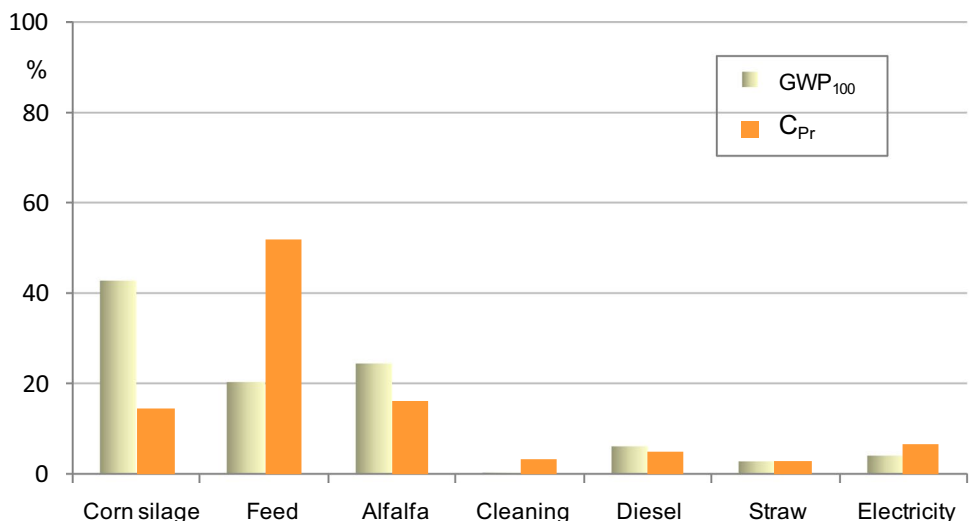
due to the medicine purchase and payment of veterinarian fees.

### 3.2.2 Redesign process

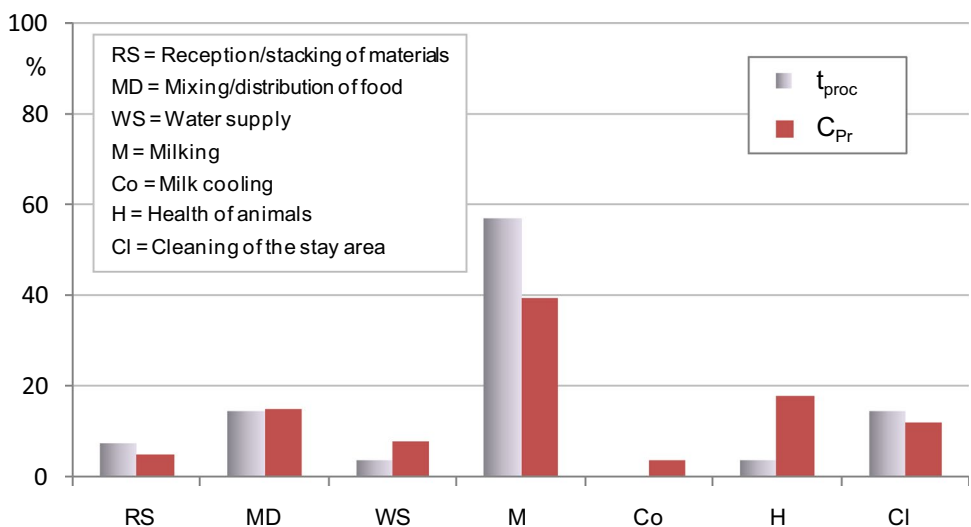
According to the study of impact factors, two redesign strategies are addressed. First, composition of the cow’s feeding is reviewed and different alternatives are proposed to decrease the high impact of the raw materials. In addition, the incorporation of a new worker, 50% allocated, is proposed to reduce the time involved in milking tasks. Two specifications should be preserved: the total milk daily production (1064 l) and the protein content of the milk obtained (> 3.2%).

In order to achieve a correct feeding, which provides to the cows the appropriate content in nutrients, the advice of a nutritionist was requested. As a result, two different

**Fig. 8** Initial milk production process. Greenhouse emissions and production costs of different inputs



**Fig. 9** Initial milk production process. Times and costs associated with different processes



alternatives for feeding are considered. In the first alternative the corn silage is replaced by the barley silage. The mass of components is not modified. In the second alternative, the corn silage is replaced by barley straw and to balance the nutrient content in the mixture, the feed and alfalfa masses are increased. Nevertheless, the total mass reduces with respect to the initial design. Table 10 shows components and masses of each feeding alternative.

The  $GWP_{100}$  and  $Ac$  indicators, which are used to assess the environmental impact, show, respectively, a reduction of 24% and 45% in alternative 2. In addition, some activities such as transport, mixing and distribution of food, whose energy consumption depends on the mass to be handled, can also reduce consumptions. Thus, this alternative is implemented in the dairy farm for a period of 6 months. Production inventory and subsequent sustainability assessment were carried out for the redesign. Metrics and indicators finally obtained are summarized in Table 11. To obtain a litre of milk in the redesign, 1 kg of food and 3496 l of water are required, 2605 kg of manure is obtained and the energy consumption is 686.8 Kw·s. Production costs are 0.395 € and the daily production is 1064 l. The calculation of indicators shows that to obtain a litre of milk, emissions of 0.5 kg of  $CO_2$ -eq and 0.004 g of  $SO_2$ -eq are generated, VA decreases to 0.007 € per litre of milk produced. ROA of the dairy farm

is 0.009. The average time of work is 0.0056 h and the hour wage of 16.97 €/h.

### 3.2.3 Comparing designs

Percentage variations of the engineering metrics used in the study are shown in Fig. 10. Changes introduced in the composition of the cows' feeding suppose a substantial decrease of the feeding mass (26.6%) in redesign. The water consumption is not modified. The energy consumed in production reduces 10.7% due to two factors: a lighter feeding requires less power in food preparation and distribution tasks and the incorporation of an additional worker allows reducing the time of milking process. The mass of manure increases by 6% because the new feeding contains a higher percentage of dry matter. Production costs increase by 14.5% since both raw material costs and labour costs increase. Finally, the average production of milk per day does not vary.

If sustainability indicators are compared (Fig. 10), we observe the following results:

- Environmental dimension:  $GWP_{100}$  and  $Ac$  decrease, respectively, by 22% and 43%.

**Table 10** Milk production

Cows' feeding	Components	Mass (kg)	$GWP_{100}$ (kg $CO_2$ -eq)	$Ac$ (g $SO_2$ -eq)	$C_{RM\_mat}$ (€)
Initial design	Corn silage	0.786	0.275	0.0044	0.027
	Feed	0.357	0.129	0.0008	0.096
	Alfalfa	0.251	0.156	0.0017	0.030
	Total	1.394	0.560	0.0069	0.153
Alternative 1	Barley silage	0.786	0.418	0.0045	0.023
	Feed	0.357	0.129	0.0008	0.096
	Alfalfa	0.251	0.156	0.0017	0.030
	Total	1.394	0.703	0.0070	0.149
Alternative 2	Barley straw	0.143	0.021	0.0001	0.006
	Feed	0.500	0.180	0.0012	0.135
	Alfalfa	0.357	0.223	0.0024	0.043
	Total	1	0.424	0.0037	0.184

Study of feeding alternatives

**Table 11** Milk production process—redesign. Engineering metrics and sustainability indicators

$M_{feeding}$ (kg)	Water (l)	$E_{Pr}$ (Kw·s)	$M_{manure}$ (Kg)	$C_{Pr}$ (€)	Pr (l/day)
1	3.496	686.8	2.605	0.395	1064
Environmental dimension		Economic dimension		Social dimension	
$GWP_{100}$ (Kg $CO_2$ -eq)	$Ac$ (g $SO_2$ -eq)	VA (€)	ROA	$T_w$ (h)	$W_h$ (€/h)
0.5	0.004	0.007	0.009	0.0056	16.97

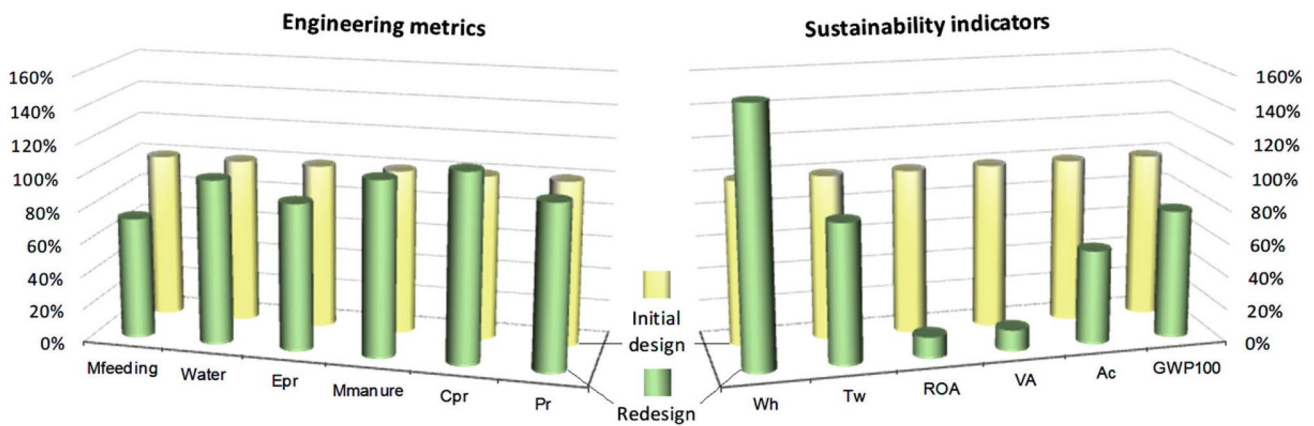


Fig. 10 Milk production. Comparison of metrics and indicators

- Thus, a cow’s feeding in which corn silage is replaced by straw and the proportions of both, feed and alfalfa are increased has a minor environmental impact in the milk production process.
- Economic dimension: VA and ROA indicators reduce practically by 87%.
- Revenues in redesign slightly increase due only to manure sales. However, production costs substantially increase. Consequently, economic indicators experience a notable reduction.
- These results show that the milk production based on the use of straw, feed and alfalfa in the cows’ feeding has a lower economic profit than a production process in which corn silage, feed and alfalfa are used.
- Social dimension:  $T_w$  reduces by 15% and  $W_h$  increases by 55%.
- An improvement of the social indicators is observed in redesign due to the increase in the number of workers. Labour costs have also increased affecting the net operating profit of the dairy farm.

It is noted that the simultaneous improvement of the three sustainability dimensions is not achieved. Thus, weights assigned to each dimension will be determinant to consider if a final improvement is obtained in the redesigned product. In this work, four cases are analysed according to the following assumptions:

- case 1: equal importance of each sustainability dimension. An equal weight of 0.166 to each of the six indicators selected is assigned.
- cases 2–4: one dominant sustainability dimension is established and equal importance is proposed to the rest. A weight of 0.5 is assigned to the dominant dimension (0.25 to each indicator) and 0.25 is assigned to the other two dimensions (0.125 to each indicator).

Table 12 summarises the results obtained. For each sustainability indicator, the percentage variation between initial design and redesign is first shown. Positive values indicate improvement, whereas that negative values indicate worsening. The final sustainability improvement is calculated in each case with the weights assigned to each indicator. We observe that cases 1 and 3, in which equal importance and dominant economic dimension are considered, do not generate a final sustainability improvement in redesign. On the other hand, in cases 2 and 4, in which the environmental and social dimensions are dominant, more sustainable milk production can be achieved.

### 4 Conclusions

This work shows how sustainability requirements are integrated in product design projects to obtain a more sustainable production. In most of the studies carried out to date, the product sustainability is mainly addressed from an environmental point of view and if three dimensions of

Table 12 Milk production

Indicator	Change (%)	Weights			
		Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
GWP <sub>100</sub>	22	0.166	0.250	0.125	0.125
Ac	43	0.166	0.250	0.125	0.125
VA	−87	0.166	0.125	0.250	0.125
ROA	−87	0.166	0.125	0.250	0.125
$T_w$	15	0.166	0.125	0.125	0.250
$W_h$	55	0.166	0.125	0.125	0.250
Sustainability improvement (%)		−6.5	3.2	−26.6	3.8

Sensitivity to the weighting of the sustainability indicators



sustainability are considered, a design improvement is not projected. In this research, environmental, economic and social impacts of the initial design are analysed and compared with those obtained after a redesign process.

Methodology is based on the systematic development of three phases. First, a detailed analysis of the existent flows is carried out to obtain the production inventory, and sustainability is assessed by the use of suitable metrics and indicators. Next, a product redesign process is carried out by the application of sustainability strategies while initial specifications are fulfilled. After obtaining metrics and indicators of the redesigned product, initial design and redesign are compared to detect if sustainability improvements are achieved.

The identification of the materials or processes that cause the most important impacts and the effective comparison of the product sustainability are carried out through the selection of appropriate engineering metrics and quantitative indicators. A functional group of metrics is used to obtain technical and economic data of the production activity. Additionally, a number of significant quantitative indicators are used to synthesize, assess and compare sustainability aspects in each dimension. The category of workers is selected to analyse the social dimension of sustainability because it is the most affected stakeholder group in the production stage. Metrics and indicators applied in this work are considered practical to the study of a wide number of cases but it is not intended to be a closed group. According to the problem to be analysed other indicators could be also considered.

Two very different cases were analysed in this work: the manufacturing process of an airbrush and the cow milk production. In both cases, sustainability strategies were focused on reducing the highest impact sources detected after evaluating initial design sustainability. In the case of the airbrush, these are the material removed and the chromed layer applied in the finishing process. In the case of cow milk production, the highest impacts were detected in the raw materials required for the cows' feeding and in milking activities. Taking into account the initial specifications of the product, a redesign process was carried out in two cases. Consequently, changes in the sustainability of the airbrush manufacture and milk production were obtained. In the case of the airbrush, a considerable sustainability improvement could be achieved if the projected design is performed. In the case of milk production, redesign was put effectively into practice and sustainability showed notable improvements in environmental and social dimensions. Nevertheless, economic indicators considerably reduced with respect to the initial design.

Methodology is implemented in the production stage of the product life cycle. Considering that sustainability consists of three interrelated dimensions (environmental, economic and social), results obtained in this work allow us to

confirm that a practical method to assess the sustainability performance and to carry out sustainability-oriented decision making in production processes is developed. Future research work should expand the system boundaries and apply the methodology to other stages of the product life cycle and to the entire life cycle. Thus, strategies to improve product sustainability should involve all stages in order to achieve a global improvement.

## References

- Andriankaja H, Vallet F, Le Duigou J, Eynard B (2015) A method to ecodesign structural parts in the transport sector based on product life cycle management. *J Clean Prod* 94:165–176
- Asadi S, Babaizadeh H, Foster N, Broun R (2016) Environmental and economic life cycle assessment of PEX and copper plumbing systems: a case study. *J Clean Prod* 137:1228–1236
- Azapagic A, Perdan S (2000) Indicators of sustainable development for industry: a general framework. *Trans IChemE Process Saf Environ Protect Part B* 78(4):243–261
- Azapagic A, Stamford L, Youds L, Barteczko-Hibbert C (2016) Towards sustainable production and consumption: a novel decision-support framework integrating economic, environmental and social sustainability (DESIREs). *Comput Chem Eng* 91:93–103
- Babaizadeh H, Haghghi N, Asadi S, Broun R, Riley D (2015) Life cycle assessment of exterior window shadings in resident building in different climate zones. *Build Environ* 90:168–177
- Baldini C, Gardoni D, Guarino M (2017) A critical review of the recent evolution of Life Cycle Assessment applied to milk production. *J Clean Prod* 140:421–435
- Benetto E, Rousseaux P, Blondin J (2004) Life cycle assessment of coal by-products based electric power production scenarios. *Fuel* 83:957–970
- Benoit-Norris C, Vickery-Niederman G, Valdivia S, Franze J, Traverso M, Ciroth A, Mazijn B (2011) Introducing the UNEP/SETAC methodological sheets for subcategories of social LCA. *Int J Life Cycle Assess* 16:682–690
- Bernier E, Maréchal F, Samson R (2013) Life cycle optimization of energy-intensive processes using eco-costs. *Int J Life Cycle Assess* 18(9):1747–1761
- Boër CR, Pedrazzoli P, Bettoni A, Sorlini M (2013) Mass customization and sustainability. An assessment framework and industrial implementation. Springer, London
- Bovea MD, Pérez-Belis V (2012) A taxonomy of eco-design tools for integrating environmental requirements into the product design process. *J Clean Prod* 20(1):61–71
- Bovea MD, Wang B (2007) Redesign methodology for developing environmentally conscious products. *Int J Prod Res* 45(18):4057–4072
- Brezet JC, Van Hemel CG (1997) Ecodesign: a promising approach to sustainable production and consumption. UNEP. United Nations Publications, Paris
- Capitano C, Traverso M, Rizzo G, Finkbeiner M (2011) Life cycle sustainability assessment: an implementation to marble products. In: *Proceedings of the LCM Conference, Berlin*
- Chang Y, Sproesser G, Neugebauer S, Wolf K, Scheumann R, Pittner A, Rethmeier M, Finkbeiner M (2015) Environmental and social life cycle assessment of welding technologies. *Procedia CIRP* 26:293–298
- Ciroth A, Franze J (2011) LCA of an Ecolabeled Notebook. Consideration of social and environmental Impacts along the entire life cycle. GreenDeltaTC GmbH, Berlin

- Crul M, Diehl JC (2009) Design for sustainability. A step-by-step approach. UNEP. United Nations Publications, Paris
- Dannheim F, Grüner C, Birkhofer H (1998) Human Factors in Design for Environment. In: proceedings of the 5th international seminar on life cycle engineering stockholm
- DeWulf W (2003) A proactive approach to ecodesign: framework and tools, PhD thesis, Katholieke universiteit Leuven, Leuven
- Durlinger B, Koukouna E, Broekema R, van Paassen M, Scholten J (2017) Agri-footprint 3.0. Blonk Consultants, Gouda, NL
- Eastwood MD, Haapala KR (2015) A unit process model based methodology to assist product sustainability assessment during design for manufacturing. *J Clean Prod* 108:54–64
- Elduque D, Javierre C, Pina C, Martínez E, Jiménez E (2014) Life cycle assessment of a domestic induction job: electronic boards. *J Clean Prod* 76:74–84
- Finkbeiner M, Schau EM, Lehmann A, Traverso M (2010) Towards life cycle sustainability assessment. *Sustain* 2(10):3309–3322
- Foolmaun RK, Ramjeawon T (2012) Life cycle sustainability assessments (LCSA) of four disposal scenarios for used polyethylene terephthalate (PET) bottles in Mauritius. *Environ Dev Sustain* 14(6):783–806
- Gagnon B, Leduc R, Savard L (2012) From a conventional to a sustainable engineering design process: different shades of sustainability. *J Eng Des* 23(1):49–74
- Gan X, Fernández IC, Guo J, Wilson M, Zhao Y, Zhou B, Wu J (2017) When to use what: methods for weighting and aggregating sustainability indicators. *Ecol Indi* 81:491–502
- Goedkoop M, Spriensma R (2000) The Eco-indicator 99. A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment. Methodology report. PRÉ Consultants B.V., Amersfoort
- Guinée J, Gorrée M, Heijungs R, Huppes G, Kleijn R, de Koning A et al (2001) Life cycle assessment—an operational guide to the ISO standards. Centre Environ Sci (CML), Leiden University, Leiden
- Hallstedt S, Ny H, Robèrt K-H, Broman G (2010) An approach to assessing sustainability integration in strategic decision systems. *J Clean Prod* 18:703–712
- Hunkeler D, Rebitzer G, Lichtenwort K (eds) Ciroth A, Hunkeler D, Huppes G, Lichtenwort K, Rebitzer G, Rüdener I, Steen B (2008) Environmental life cycle costing. SETAC Publications, New York
- Iritani DR, Silva DAL, Saavedra YMB, Grael PFF, Ometto AR (2015) Sustainable strategies analysis through life cycle assessment. A case study in a furniture industry. *J Clean Prod* 96:308–318
- ISO (2006a) ISO 14040 International Standard. In: Environmental management—life cycle assessment—principles and framework. International Organisation for Standardization, Geneva
- ISO (2006b) ISO 14040 International Standard. In: Environmental management—life cycle assessment—requirements and guidelines. International Organisation for Standardization, Geneva
- Johnson EF, Gay A (1995) A practical, customer-oriented DFE methodology. In: Proceedings of the IEEE international symposium on electronics and the environment. IEEE, Orlando
- Jones E, Harrison D (2000) Investing the use of TRIZ in Eco-innovation, TRIZCON2000. Altshuller Institute, Egham
- Karlsson M (1997) Green concurrent engineering: assuring environmental performance in product development. Licentiate Thesis, IIEEE. Lund University, Lund
- Kemna R, van Elburg M, Li W, van Holsteijn R (2005) MEEuP methodology report. VHK for European Commission, Delft
- Keoleian GA, Koch JE, Menerey D (1995) Life cycle design framework and demonstration projects. Profiles of AT&T and Alliedsignal. EPA/600/R-95/107. United States Environmental Protection Agency Ed., Cincinnati
- Kjaer LL, Pigosso DCA, Niero M, Bech NM, McAloone TC (2019) Product/service-systems for a circular economy: the route to decoupling economic growth from resource consumption? *J Ind Ecol* 23(1):22–35
- Kloepffer W (2007) Life-cycle based sustainability assessments as part of LCM. In: Proceedings of the 3rd international conference on life cycle management, Zurich
- Kloepffer W (2008) Life cycle sustainability assessment of products (with comments by Helias A. Udo de Haes, p. 95). *Int J Life Cycle Assess* 13(2):89–95
- Kuo TC, Wu HH (2003) Green products development by applying grey relational analysis and green quality function deployment. *Int J Fuzzy Syst* 5(4):229–238
- Lacasa E, Santolaya JL, Fuentes L, Majarena AC (2015) Implementing sustainability criteria in product development. *Procedia Eng* 132:1029–1036
- Lacasa E, Santolaya JL, Biedermann A (2016) Obtaining sustainable production from the product design analysis. *J Clean Prod* 139:706–716
- Lagerstedt J, Luttrupp C, Lindfors LG (2003) Functional priorities in LCA and design for environment. *Int J Life Cycle Assess* 8(3):160–166
- Lofthouse V (2006) Ecodesign tools for designers: defining the requirements. *J Clean Prod* 14:1386–1395
- Luttrupp C, Lagerstedt J (2006) Ecodesign and the ten golden rules: generic advice for merging environmental aspects into product development. *J Clean Prod* 14:1396–1408
- Martínez E, Sanz F, Pellegrini S, Jiménez E, Blanco J (2009) Life cycle assessment of a multi-megawatt wind turbine. *Renew Energy* 34:667–673
- Masruroh NA, Li B, Klemes J (2006) Life cycle analysis of a solar thermal system with thermochemical storage process. *Renew Energy* 31:537–548
- Maxwell D, Sheate W, Van der Vorst R (2006) Functional and systems aspects of the sustainable product and service development approach for industry. *J Clean Prod* 14:1466–1479
- McAloone T, Tan A (2005) Sustainable product development through a life-cycle approach to product and service creation: an exploration of the extended responsibilities and possibilities for product developers. In: Proceedings of Eco-X conference: ecology and economy in electronix, Kerp, Vienna, pp 1–12
- Ng R, Yeo Z, Sze Choong Low J, Song B (2015) A method for relative eco-efficiency analysis and improvement: case study of bonding technologies. *J Clean Prod* 99:320–332
- Nielsson J, Lindahl M, Jensen C (1998) The information flow for efficient design for environmental: analysis of preconditions and presentation of a new tool. in: proceedings of cirp, 5th international seminar on life-cycle engineering, Stockholm, Sweden
- Oberender C, Birkhofer H (2004) The eco-value analysis. An approach to assigning environmental impacts and costs to customers' demands. In: proceedings of the international design conference. DESIGN 2004, Dubrovnik
- Onat NC, Kucukvar M, Tatari O, Zheng QP (2016) Combined application of multi-criteria optimization and life-cycle sustainability assessment for optimal distribution of alternative passenger cars in US. *J Clean Prod* 112:291–307
- Quantis, Ernst & Young, UTT (2009). [Online] [www.quantis-intl.com/waterdatabase/fr/index.php](http://www.quantis-intl.com/waterdatabase/fr/index.php). Accessed Jan 2018
- Reginald BHT, Hsien HK (2005) Life cycle assessment of EPS and CPB inserts: design considerations and end of life scenarios. *J Env Manag* 74:195–205
- Ren J (2018) Life cycle sustainability index for the prioritization of industrial systems under data uncertainties. *Comput Chem Eng* 113:253–263
- Ren J, Manzardo A, Mazzi A, Zuliani F, Scipioni A (2015) Prioritization of bioethanol production pathways in China based on life cycle sustainability assessment and multicriteria decision-making. *Int J Life Cycle Assess* 20:842–853

- Ritthoff M, Rohn H, Liedtke C (2002) Calculating MIPS: resource productivity for products and services. Wuppertal Spezial 27e, Wuppertal Institute for Climate, Environment and Energy, Science Centre North Rhine-Westphalia
- Sakao T (2007) A QFD-centered design methodology for environmentally conscious product design. *Int J Prod Res* 45:4143–4162
- Sakao T (2009) Quality engineering for early stage of environmentally conscious design. *Total Qual Manag J* 21(2):182–193
- Song Q, Wang Z, Li J, Zeng X (2012) Life cycle assessment of TV sets in China: a case of study of the impacts of CRT monitors. *Waste Manag* 32:1926–1936
- Tagliaferri C, Clift R, Lettieri P, Chapman C (2017) Liquefied natural gas for the UK: a life cycle assessment. *Int J Life Cycle Assess* 22:1944–1956
- Tischner U, Schmincke E et al (2000) How to do ecodesign? A guide for environmentally and economically sound design. German Federal Environmental Agency, Berlin
- Traverso M, Asdrubali F, Francia A, Finkbeiner M (2012) Towards life cycle sustainability assessment: an implementation to photovoltaic modules. *Int J Life Cycle Assess* 17:1068–1079
- UBA (2007) Umweltbundesamt (UBA). German Environmental Protection Agency. PROBAS Database. [Online] <http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/index.php>. Accessed Apr 2017
- UNCED (1992) Agenda 21. The Rio Declaration on Environment and Development. United Nations Conference on Environment and Development, Rio de Janeiro
- UNEP-SETAC (2009) Guidelines for social life cycle assessment of products. United Nations Environment Programme, Paris
- Valdivia S, Ugaya CML, Hildenbrand J, Traverso M, Mazijn B, Sonnetman G (2013) A UNEP/SETAC approach towards a life cycle sustainability assessment—our contribution to Rio + 20. *Int J Life Cycle Assess* 18:1673–1685
- Vezzoli C, Kohtala C, Srinivasan A (2014) Product-service system design for sustainability. Greenleaf Publishing, Sheffield
- VROM (2000) Eco-indicator 99. Manual for designers. A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment. Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment, The Hague
- Wang JJ, Sun YW, Tingley DD, Zhang YR (2017) Life cycle sustainability assessment of fly ash structures. *Renew Sustain Energy Rev* 80:1162–1174
- Watz M, Hallstedt SI (2018) Integrating sustainability in product requirements. In: DS92 proceedings of the DESIGN 2018, 15th international design conference, 1405–1416
- WCED (1987) Our common future. Report of World Commission on Environment and Development. Oxford University Press, New York
- Wenzel H, Hauschild MZ (2001) Environmental assessment of products. Methodology, tools and case studies in product development. Kluwer Academic Publishers, Hingham
- Wilson MC, Wu J (2017) The problems of weak sustainability and associated indicators. *Int J Sustain Dev World Ecol* 24(1):44–51
- Wimmer W, Züst R (2003) Ecodesign PILOT: Product Investigation. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Learn Optim Tool Sustain Product Dev
- Zhou Z, Jiang H, Qin L (2007) Life cycle sustainability assessment of fuels. *Fuel* 86:256–263

**Publisher's Note** Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



VOLUMEN 2 NÚMERO 1

Revista Internacional de

# Sostenibilidad

---

Estudio de la sostenibilidad de un Sistema  
Producto-Servicio. Creación de un pequeño  
espacio comercial de venta de ropa

NATALIA MUÑOZ, JOSÉ LUIS SANTOLAYA Y ANNA BIEDERMANN

## **REVISTA INTERNACIONAL DE SOSTENIBILIDAD**

Primera Edición Common Ground Research Networks 2020  
University of Illinois Research Park  
2001 South First Street, Suite 202  
Champaign, IL 61820 USA  
Tel.: +1-217-328-0405  
[www.cgspanol.org](http://www.cgspanol.org)

ISSN: 2642-2719 (versión impresa)

ISSN: 2642-2700 (versión electrónica)

© 2020 (artículos individuales), autor(es)

© 2020 (selección y contenido editorial), Common Ground Research Networks

Todos los derechos reservados. Excepto propósitos de estudio, investigación, crítica o revisión permitidos bajo la legislación de derechos de autor, ninguna parte de este trabajo puede ser reproducida, en ningún formato, sin el consentimiento explícito por escrito del editor. Para otros tipos de permisos y dudas, por favor, escriba a: [soporte@cgspanol.org](mailto:soporte@cgspanol.org).

*La Revista Internacional de Sostenibilidad*

es una publicación académica arbitrada bajo el proceso de revisión por pares.

# Estudio de la sostenibilidad de un Sistema Producto-Servicio. Creación de un pequeño espacio comercial de venta de ropa

(Sustainability Assessment of a Product-Service System. Creation of a Small Clothing Store)

Natalia Muñoz,<sup>1</sup> Universidad de Zaragoza, España  
José Luis Santolaya, Universidad de Zaragoza, España  
Anna Biedermann, Universidad de Zaragoza, España

*Resumen:* La creciente preocupación global sobre problemas medioambientales y sociales ha fomentado la aplicación de enfoques de sostenibilidad por parte de la industria. Actualmente, los Sistemas Producto-Servicio (SPS) están recibiendo la atención de investigadores y diseñadores debido a su potencial para alcanzar mejoras en la sostenibilidad en un amplio número de actividades económicas y modelos de negocios. Sin embargo, los métodos y herramientas existentes para evaluar la sostenibilidad son principalmente orientados a producto y difícilmente aplicables para analizar la sostenibilidad en el desarrollo de un servicio. Se localizan diferentes retos en la aplicación de la metodología de Análisis de la Sostenibilidad del Ciclo de Vida (ASCV): la identificación de la unidad funcional, el establecimiento de los límites del sistema teniendo en cuenta que están involucrados diferentes ciclos de vida, de productos y de servicios, y la selección de los indicadores apropiados para evaluar cuantitativamente tres dimensiones de la sostenibilidad: la medioambiental, la económica y la social. En este trabajo, el ASCV ha sido aplicado a la fase de implementación de un servicio de venta al por menor de prendas de vestir para evaluar su sostenibilidad. Se han identificado las relaciones entre las etapas del ciclo de vida del servicio y de la tienda de ropa donde operará el servicio. Para medir la sostenibilidad del sistema y conseguir una representación global de los resultados se han utilizado unos indicadores apropiados. Los resultados revelan las actividades que causan el impacto más alto y, por lo tanto, deberían ser revisadas convenientemente para alcanzar una mejora efectiva de la sostenibilidad del servicio.

*Palabras clave:* diseño sostenible, sostenibilidad medioambiental y social, ASCV

*Abstract:* The growing global concern about environmental and social problems has increased sustainability approaches from the industry. Nowadays, Product-Service Systems are currently receiving the attention of researchers, designers, and designers-makers due to their potential to achieve sustainability improvements in a wide number of economic activities and business models. Nevertheless, the existing methods and tools to assess sustainability are mainly product-oriented and are hardly applied to assess the sustainability in service development. Different challenges are found in the application of Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA): identifying the functional unit, establishing the system boundaries taking into account that the life cycles of different products and services are involved and selecting the suitable indicators to quantitatively assess each of the three dimensions of the sustainability: environmental, economic and social. In this work, LCSA approach has been applied to assess the sustainability of the implementation stage of a retail clothing service. Links between life cycle stages of the service and the clothing retail store in which service will be operated were identified. A number of appropriate indicators were used to measure sustainability performance and to achieve a comprehensive presentation of the results. Results revealed the activities that cause the highest impact and should be conveniently reviewed to achieve an effective improvement of service sustainability.

*Keywords:* Sustainable Design, Environmental and Social Sustainability, LCSA

## Introducción

**N**os encontramos ante un periodo de profundas transformaciones en múltiples campos afrontando un auténtico cambio de época. Los análisis multidisciplinares apuntan que el presente y el futuro serán distintos y que el ciclo actual está históricamente agotado

<sup>1</sup> Corresponding Author: Natalia Muñoz, Edificio Torres Quevedo, Calle María de Luna 3, Departamento de Diseño y Fabricación, Universidad de Zaragoza, Zaragoza, 50008, España. email: nataliam@unizar.es

(Prats et al. 2016). Las principales élites institucionales, empresariales y académicas son conscientes de que los patrones de desarrollo vigentes conducen a la humanidad hacia un colapso eco-social y reconocen la extraordinaria importancia de llevar a cabo los 17 objetivos de desarrollo sostenible que se adoptaron en la convención mundial de la Cumbre de París sobre el Clima (COP 2015) que reunió a 195 países debatiendo sobre la amenaza del cambio climático. Este conjunto de objetivos globales forma parte de la nueva agenda de desarrollo sostenible para erradicar la pobreza, proteger el planeta y asegurar la prosperidad para todos. Para ello deben actuar conjuntamente los gobiernos, el sector privado y la sociedad civil.

### *Crisis eco-social*

Existe una urgencia en la cuestión ecológica que se explica porque los sistemas ambientales y climáticos que sustentan la vida actual en el planeta están en riesgo y, por lo tanto, nuestra propia sociedad y nuestras vidas (desde la producción de alimentos y la obtención de energía y agua dulce hasta la eliminación de residuos). El origen y las soluciones relacionadas con este problema provienen y requieren transformaciones integrales que afectan a cuestiones estructurales de los modelos socioeconómicos y culturales actuales. Además, los plazos de tiempo para realizar dichas transformaciones son tan cortos y los lastres del pasado tan fuertes que existen muchas dudas sobre si todavía se está a tiempo de evitar alteraciones irreversibles que podrían afectar gravemente al clima, los ciclos y los ecosistemas que sostienen nuestra civilización. Por esto, es fundamental afrontar el desafío ecológico actuando de manera inmediata y con una visión más amplia y de mayor contundencia de lo que se ha hecho hasta ahora.

Por otro lado, a pesar de que se produjo un crecimiento económico excepcional desde la Segunda Guerra Mundial, donde el PIB mundial pasó de los 20 billones de dólares de 1989 a los 71 billones de dólares en 2016 (Mason 2012), las desigualdades han seguido creciendo y, pese a la acumulación de riqueza, aún subsisten millones de seres humanos en estado de extrema pobreza. Según informes de la Agenda 2030 de Naciones Unidas (“Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible” 2015), el 13% de la población sigue desnutrido y el 21% vive en situaciones de extrema pobreza. El informe “Gobernar para las élites, secuestro democrático y desigualdades sociales” presentado por Oxfam en 2014 desvela cómo casi la mitad de la riqueza mundial se acumula en un 1% de la población (Fuentes-Nieva 2014).

Las dinámicas de crecimiento poblacional y, muy especialmente, de acumulación de capital y de consumo en las sociedades más ricas han provocado una expansión extraordinaria y desigual de la huella ecológica. Hoy necesitaríamos 1,5 planetas como la Tierra para poder compensar el exceso de impacto inducido por la acción humana (WWF 2010). Esto explica la multiplicación de problemas medioambientales que afronta la humanidad; desde la gravedad del cambio climático hasta la contaminación atmosférica de las ciudades, pasando por la crisis de los ecosistemas y ciclos vitales en la biosfera.

De acuerdo con el informe *Consensus Statement From Global Scientists* (MAHB 2013) sobre los sistemas que soportan la vida en el siglo XXI, la humanidad se está aproximando rápidamente a puntos clave de no retorno y las condiciones de vida pueden sufrir degradaciones sustanciales a mediados del presente siglo. Nos enfrentamos a un problema multidimensional y sistémico que, por una parte, encuentra unas limitaciones ecológicas claras y alarmantes y, por otra, se enfrenta a la obligación de intentar solucionar los problemas sociales. Por tanto, es esa interdependencia entre las cuestiones medioambientales, sociales, económicas y políticas la que obliga a que los requerimientos ambientales se renueven y amplíen para poder afrontar un auténtico cambio civilizatorio en clave de bienestar, justicia social y sostenibilidad ambiental. No es concebible pensar en una sociedad saludable en un entorno de ecosistemas degradados y tampoco es posible regenerar, con dinero o tecnología, el deterioro de unos sistemas naturales que suministran alimentos, agua y aire limpio imprescindibles para la vida.

La rapidez del crecimiento de las actividades humanas y sus impactos ecológicos y climáticos obligan a reflexionar sobre los escenarios inmediatos y los de medio plazo. La

posibilidad de alcanzar un colapso eco-social por la forma en la que se producen y consumen los bienes es de un calado tal, que incluso las propias organizaciones empresariales, que tan comprometidas están con los patrones de desarrollo vigentes, empiezan a ser conscientes de ello y a tomar cartas en el asunto. En 2010, veintinueve grandes compañías privadas del *World Business Council for Sustainable Development* (WBCSD 2010) realizaron el informe “Visión 2050” en el que se reconoce que los *business-as-usual* no conducen a situaciones sociales y económicas viables y que son necesarios cambios radicales para conseguir corregir el continuo crecimiento de las extralimitaciones ecológicas.

### ***Hacia los servicios sostenibles***

El concepto de desarrollo sostenible se aplica al desarrollo socio-económico y a la sostenibilidad ambiental y fue formalizado por primera vez en el documento conocido como Informe Brundtland en 1987 (Brundtland 1987), fruto de los trabajos de la Comisión Mundial de Medio Ambiente y Desarrollo de Naciones Unidas. Se define como: “Satisfacer las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer las posibilidades de las del futuro para atender sus propias necesidades”.

El desarrollo sostenible global, la seguridad, el bienestar y la supervivencia del planeta dependen de cambios en el modelo económico (Bermejo et al. 2010), por lo tanto, también de cambios fundamentales en la forma en que las sociedades producen y consumen (McHarry et al. 2005). Actualmente las estructuras actuales de consumo y producción no son sostenibles pese a los grandes esfuerzos realizados por empresas de todo tipo en lo que concierne a aspectos de sostenibilidad con un enfoque en el resultado final. Por medio del manejo de cadenas de suministro, informes corporativos y adoptando estándares internacionales relacionados, las empresas están mejorando la eficiencia de la producción actual y el diseño de nuevos productos y servicios para satisfacer las necesidades del consumidor.

Tradicionalmente, el foco de las actividades de producción y comercialización se había puesto en los productos, mientras los servicios se habían propuesto, en muchos casos, como un complemento a la utilidad de los productos. A lo largo de las últimas décadas, los servicios están recibiendo la atención de modelos de negocios y sistemas productivos que buscan una posible respuesta al desafío de la sostenibilidad, ya que éstos pueden satisfacer las necesidades de los consumidores eficientemente. Se propone proporcionar utilidad a los consumidores a través del uso de servicios más que de productos como una estrategia de desmaterialización y una posible respuesta el reto de la sostenibilidad.

Muchas actividades económicas se basan en la combinación de ambos, lo que es considerado como Sistema Producto-Servicio (SPS), definido como “una mezcla de productos tangibles y servicios intangibles diseñados y combinados para que juntos sean capaces de satisfacer las necesidades del consumidor final” (Tukker 2006a, 1552–56). O también, como “un conjunto integrado de productos y servicios cuyo objetivo es crear utilidad para el consumidor y generar valor” (Boehm 2013, 245–60).

Algunos trabajos tratan este tipo de Sistemas Producto-Servicio como un enfoque de negocio innovador que cambia el foco de negocio tradicional desde el consumo de masas a los comportamientos individuales y a las necesidades altamente personalizadas (Morelli 2006, 1495–1501) y, desde la venta de productos físicos únicamente, a la venta de una mezcla de productos y servicios que combinados son capaces de satisfacer las necesidades específicas de los consumidores (por ejemplo, de la venta de una máquina de lavar a la venta de servicios de limpieza).

Los principales agentes que están involucrados en un SPS son: los clientes o usuarios finales, el proveedor del servicio, los actores que participan como intermediarios y otros agentes sociales, internos o externos, propios del funcionamiento de la organización. Para interpretar la actividad de un servicio, se propone una estructura triangular, en cuyos vértices se encuentran el proveedor del servicio, el consumidor o usuario y un mediador. Estos agentes interactúan entre sí



(Gadrey 2002, 26–53) generando mapas de interacción (Morelli 2006, 1495–1501). Por otro lado, los servicios generalmente están peor diseñados y de una manera menos eficiente comparados con el desarrollo de productos, ya que las empresas normalmente utilizan métodos sin una perspectiva del ciclo de vida completo a la hora de diseñar soluciones de SPS (Cavalieri 2012, 278–88).

Las investigaciones ligadas al desarrollo de SPS están aumentando en los últimos años debido a que son considerados como una estrategia viable y prometedora de la sostenibilidad (Vezzoli et al. 2014; Tukker 2015, 1552–56; Pigosso 2016, 33–41). Se considera que los SPS tienen el potencial de proporcionar soluciones a las demandas económicas de la sociedad actual. Sin embargo, el desarrollo de SPS no es sostenible intrínsecamente. El uso de técnicas cuantitativas facilita la medición y la validez de la sostenibilidad.

Además, la Producción Más Limpia (PmL) puede ser aplicada a estos sistemas como una estrategia integrada de prevención ambiental en los productos y los servicios, con el objetivo de reducir riesgos para los seres humanos y el medio ambiente, incrementar la competitividad de las empresas y garantizar la viabilidad económica según el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). De esta manera surge el reto de compatibilizar esta estrategia de PmL con sostenibilidad ambiental, consumo y producción, que solo podrá ser viable si las empresas abren sus fronteras para entender lo que está sucediendo en el mundo exterior en términos de innovación, asociación e integración de mercados para aunar esfuerzos buscando que toda una cadena de producción se fortalezca permitiendo el crecimiento de cada una de las empresas que hacen parte del ciclo de vida del producto (Cañón 2013).

### ***Evaluación de la sostenibilidad de un servicio***

El ACV constituye una de las más importantes metodologías de evaluación ambiental. Según la Comisión Europea (COM 2003), el ACV proporciona el mejor marco disponible en la actualidad para evaluar los impactos ambientales de los productos. Los primeros estudios de ACV datan de finales de los años 60 y principios de los 70 realizados en distintos sectores industriales obteniendo gran cantidad de datos sobre procesos industriales (Boustead 1979). Pero, no fue hasta la década de los 90, cuando la metodología de ACV se desarrolló, siendo su aplicación bastante limitada hasta entonces. En este desarrollo hay que destacar el trabajo en el año 1993 de la publicación de referencia del ACV: *Guidelines for Life Cycle Assessment: A “Code of Practice”* elaborada por la SETAC - *Society of Environmental Toxicology and Chemistry*. Esta asociación estableció la primera definición oficial del ACV como:

un proceso objetivo para evaluar cargas ambientales asociadas a un producto, proceso o actividad identificando y cuantificando el uso de materia y energía y los vertidos al entorno; para determinar su impacto en el medioambiente y evaluar y poner en práctica estrategias de mejora medioambiental. (Consoli et al. 1993)

A diferencia de otras metodologías que se centran en la mejora de los impactos medioambientales de los procesos, el ACV estudia los aspectos medioambientales y los impactos potenciales a lo largo de toda la vida de los productos y/o servicios, ‘desde la cuna hasta la tumba’, es decir, desde la extracción de las materias primas y la energía necesaria hasta la producción, uso y disposición de los productos desde una perspectiva global, sin ningún tipo de límites geográficos, funcionales o temporales. En el año 1996, SETAC elaboró el informe *Towards a Methodology for Life Cycle Impact Assessment*, que sirvió de base para la elaboración de las primeras normas sobre ACV (ISO 14040-14043) publicadas entre 1997 y 1998.

Utilizar el ACV en el contexto de servicio implica importantes retos. Se identifican tres: definir el sistema de referencia para que el servicio pueda ser comparado, definir la unidad funcional y establecer los límites del sistema. Dependiendo del servicio analizado se establecerán unos límites del sistema coherentes. Además, la combinación de productos y servicios en un SPS

requiere la consideración de varios ciclos de vida, los cuales incrementan en gran medida la complejidad de los análisis. Algunos autores introducen una distinción entre los ciclos de vida de productos y servicios, pero no analizan el ciclo de vida completo del servicio (Tan 2006). Consecuentemente, para conseguir una evaluación de la sostenibilidad es necesario una especificación gradual de los ciclos de vida, así como su integración efectiva.

Por otro lado, la sostenibilidad no consiste solamente en el impacto medioambiental. El enfoque del ACV es ampliado atendiendo a la triple “P” para contemplar la sostenibilidad globalmente: *people* (social)- *planet* (ambiental)- *profit* (económica) (WCED 1987; UNCED 1992). De esta manera, los aspectos económicos, los temas medioambientales y los asuntos sociales deben ser analizados simultáneamente para evaluar de una manera efectiva la sostenibilidad de un servicio. Acorde con esta perspectiva se propone el marco del Análisis de la Sostenibilidad del Ciclo de Vida (ASCV) para considerar interdependencias entre sistemas medioambientales y socio-económicos (Kloepffer 2007, 89–95; Finkbeiner et al. 2010, 3309–22; Valdivia et al. 2013, 1673–85).

ASCV permite la evaluación de impactos y proporciona una guía para lograr productos y servicios sostenibles por la combinación de técnicas, tales como: la de Análisis del Ciclo de Vida Medioambiental (ACV-M) que se centra en aspectos medioambientales de cada etapa del ciclo de vida, la de Ciclo de Vida de los Costes (CV-C) que informa acerca de aspectos económicos recopilando y evaluando flujos de dinero y la de Análisis del Ciclo de Vida Social (ACV-S) que se centra en el tratamiento del impacto en la sociedad para mejorar la actuación de organizaciones y diferentes agentes sociales. De acuerdo con las directrices de UNEP (UNEP/SETAC 2009), los impactos socioeconómicos se pueden dividir en cinco categorías de agentes: trabajadores, comunidad local, sociedad, consumidores y actores de la cadena de valor. También se pueden encontrar otras clasificaciones alternativas basadas en temas sociales (Benoit et al. 2011, 682–90).

El ASCV puede ser aplicado utilizando la misma estructura de cuatro fases considerada en un ACV: i) Objetivo y definición del alcance; ii) Inventario de la Sostenibilidad del Ciclo de Vida (ISCV); iii) Análisis del Impacto de la Sostenibilidad del Ciclo de Vida (AISCV); iv) Interpretación de los resultados de ASCV. La selección de los límites del sistema y de la unidad funcional en las tres técnicas debe ser consistente e idealmente la misma. El tipo de datos analizados pueden ser cuantitativos, semicuantitativos o cualitativos.

La elección y establecimiento del conjunto de indicadores que deben ser utilizados en cada categoría de impacto es un punto crítico y es importante realizar una lectura de los resultados de una técnica en combinación con otra más que la suma total de ellas (Kloepffer 2008). Se recomienda realizar una representación paralela de las tres técnicas para identificar impactos potenciales y reales, así como intercambios entre los resultados, y el uso de análisis de sensibilidad para evaluar la incertidumbre de los datos cualitativos (Valdivia et al. 2013). Sin embargo, existen diferentes iniciativas para desarrollar indicadores simplificados que faciliten la comunicación de los resultados de la sostenibilidad para los responsables en la toma de decisiones: Traverso, en 2012, implementa el Tablero de la Sostenibilidad del Ciclo de Vida (*Life Cycle Sustainability Dashboard, LCSD*) para comparar los resultados de productos diferentes y utiliza un índice agregado de actuación de la sostenibilidad, que es obtenido por una media ponderada de todos los valores de los indicadores (Traverso et al. 2012). Se propone el uso de los eco-costes como un método que proporciona una puntuación sencilla de la evaluación del impacto combinando los resultados de ACV-M y CV-C (Bernier et al. 2013).

Se distinguen dos tipos de indicadores para la evaluación de la sostenibilidad: indicador simple e indicador múltiple. Éste último indica que se utiliza un criterio multidimensional (medioambiental-económico-social) para la evaluación de la sostenibilidad. Además, es habitual analizar varias alternativas o escenarios en temas de sostenibilidad y a menudo se propone un método de Toma de Decisiones Multi-Criterio (*Multi-Criteria Decision Making, MCDM*) para determinar el sistema más sostenible (Ren et al. 2015).

Teniendo en cuenta que el sector de la construcción es el mayor generador de residuos en la UE-28, un 34% sobre el total (European Commission 2013), se cree de vital importancia dedicar este trabajo al análisis de la sostenibilidad de la etapa de implementación o construcción de una tienda bien equipada que será utilizada por un servicio dedicado a la venta de prendas de vestir. Esta evaluación se realiza no solo desde una dimensión medio medioambiental, sino también desde una perspectiva socio-económica a través de la recopilación de costes de producción y el uso de indicadores que reflejan el impacto social en los agentes involucrados.

## Metodología

En el ciclo de vida de un servicio se han identificado tres etapas: 1. Implementación o creación, 2. Operación o provisión y 3. Desmantelamiento o fin de vida. En este trabajo se estudia la primera de las etapas. Normalmente, la mayoría de los servicios que están basados en la venta de productos se realizan en un espacio de venta físico abierto al público, por lo que su creación consiste principalmente en la transformación de un espacio vacío en una tienda totalmente equipada para poder satisfacer las necesidades del consumidor y proveer el servicio. De esta manera, la transformación de este local se considera la construcción de un producto y está involucrado en el desarrollo del servicio.

La Figura 1 muestra las etapas del ciclo de vida del servicio y de la construcción del producto y las relaciones entre ellas. En el ciclo de vida de la construcción de un producto asociado a los trabajos de edificios e ingeniería civil se identificaron las siguientes etapas (UNE-EN 15804:2012): A) Producto y proceso de construcción, B) Uso y C) Final de vida. Las fases de producto, A1-3, se refieren a la extracción de materiales, el transporte a la fábrica y su manufactura. Y las fases del proceso de construcción, A4-5, se asocian al transporte de los materiales manufacturados al lugar de construcción y los procesos de construcción o instalación.

Se observa la relación entre la etapa de implementación del servicio y las etapas de producto y proceso de construcción del producto, que, en este caso, es el local vacío inicial transformado en una tienda equipada y preparada para proveer el servicio. Además, también se observa relación entre la etapa de uso del producto y la etapa de operación del servicio. Por último, se identifica la relación entre la etapa de fin de vida del producto y la etapa de desmantelamiento del servicio prestado.

Se aplicó la metodología de Análisis de la Sostenibilidad del Ciclo de Vida (ASCV) para evaluar las dimensiones medioambientales, económicas y sociales de la sostenibilidad. La aplicación del ASCV está estructurada en cuatro fases: la primera consistió en definir el objetivo y el alcance del estudio, así como identificar la unidad funcional y establecer los límites del sistema. Después se llevó a cabo un análisis del inventario a través de la recogida de datos y los procedimientos de cálculo. Además, también se identificaron y cuantificaron las salidas y entradas en relación a la unidad funcional, así como los recursos utilizados en los procesos de transformación. En la siguiente fase fueron obtenidos los impactos medioambientales, económicos y sociales utilizando un conjunto de indicadores apropiados (Tabla 1). Los indicadores seleccionados fueron considerados particularmente útiles puesto que pueden ser utilizados para estudiar sistemas muy diferentes y proporcionar una evaluación cuantitativa. Finalmente, en la fase de interpretación se obtuvieron los resultados de la evaluación del impacto y se propusieron las recomendaciones para el proceso de toma de decisiones.

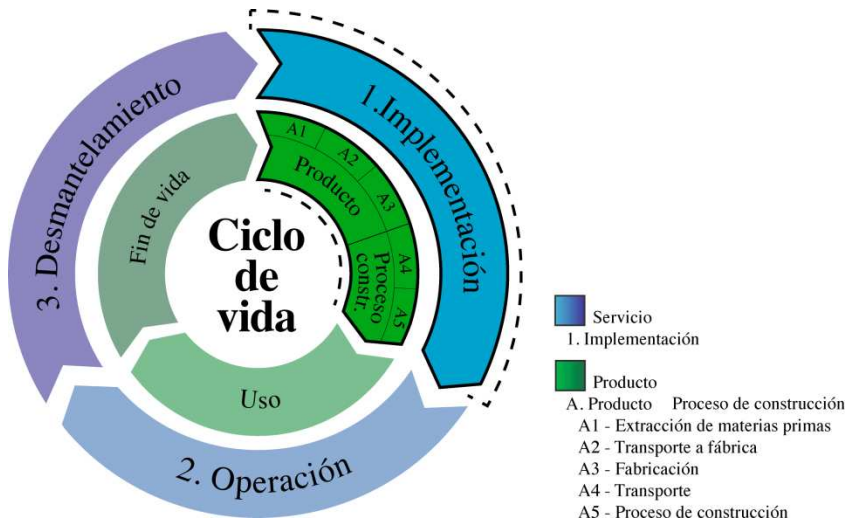


Figura 1: etapas del ciclo de vida del servicio y del producto construido en el desarrollo del servicio  
 Fuente: elaboración propia, 2019.

Los indicadores utilizados para evaluar la sostenibilidad en las dimensiones medioambiental, económica y social están definidos en la Tabla 1. La dimensión medioambiental de la sostenibilidad fue evaluada por los indicadores de Potencial de Calentamiento Global ( $GWP_{100}$ ), que mide las emisiones totales de gases de efecto invernadero en un horizonte de tiempo de 100 años (este indicador puede determinarse aplicando diferentes horizontes temporales pero ha sido elegido el horizonte de 100 años por ser utilizado también en el Protocolo de Kyoto (ESU-Services Ltd. 2019)) y la Energía Global (GE), que cuantifica el consumo de energía considerando el uso de la electricidad como valor calorífico de recursos. Para determinar estos indicadores han sido utilizadas diferentes bases de datos que están basados principalmente en datos medios representando una producción y unas condiciones de suministro medias para una variedad de productos y servicios básicos. En este trabajo han sido utilizados el módulo medioambiental del software CYPE Ingenieros, la base de datos Probas (UBA 2007), los factores de emisiones de compañías eléctricas comerciales y de plantas de reciclaje de residuos de construcción y demolición que operan en España (Conama, 2014). En la dimensión económica fueron propuestos los siguientes indicadores: el Presupuesto de Ejecución Material (PEM) que expresa los costes necesarios para desarrollar una actividad y la Eco-Eficiencia (EE) que combina los aspectos económicos y medioambientales, permitiendo una comparación sencilla entre éstos. Los agentes involucrados, seleccionados para analizar la dimensión social de la sostenibilidad fueron los trabajadores de la construcción de acuerdo con las guías de UNEP (UNEP/ SETAC 2009). Los indicadores utilizados fueron el tiempo requerido por los trabajadores para desarrollar la actividad ( $T_i$ ) y el salario de los trabajadores involucrados en el desarrollo de cada actividad ( $S_i$ ).

Tabla 1: indicadores de sostenibilidad

<i>Dimensión medioambiental</i>	
$GWP_{100}$ (KgCO <sub>2</sub> -eq)	Potencial de Calentamiento Global. Emisiones totales de gases de efecto invernadero calculando la fuerza radiactiva a lo largo de un horizonte de tiempo de 100 años.
$GE$ (MJ)	Energía Global. Consumo de energía considerando el uso de la electricidad como valor calorífico neto de recursos.
<i>Dimensión económica</i>	
$PEM$ (€)	Presupuesto de Ejecución Material. Expresa el coste total del desarrollo de una actividad.
$EE$ (€/KgCO <sub>2</sub> -eq)	Eco-eficiencia. Ratio entre PEM y $GWP_{100}$ . Permite una comparación sencilla entre los impactos económicos y ambientales.
<i>Dimensión social</i>	
$T_i$ (h)	Tiempo de trabajo. Tiempo requerido por los trabajadores para desarrollar una actividad.
$S_i$ (€)	Salario de los trabajadores involucrados en el desarrollo de una actividad.

*Fuente: elaboración propia, 2019.*

### Caso de estudio

Se analiza un servicio de venta de prendas de vestir al por menor que está actualmente operativo. Se desarrolla en un local comercial de 65 m<sup>2</sup>, situado en el centro de una ciudad de tamaño medio. El servicio prestado consiste en el asesoramiento y venta de prendas de vestir a mujeres de un nivel adquisitivo medio-alto. El local es de una planta entre medianeras con un pequeño altillo y una fachada que sirve de escaparate y entrada.

La sostenibilidad de la fase de implementación del servicio ha sido analizada teniendo en cuenta las dimensiones medioambiental, económica y social. Para ello se identificaron los principales agentes involucrados, así como la secuencia de actividades desarrolladas, la utilización de los recursos y los flujos económicos resultantes (Figura 2).

1.Etapa de implementación

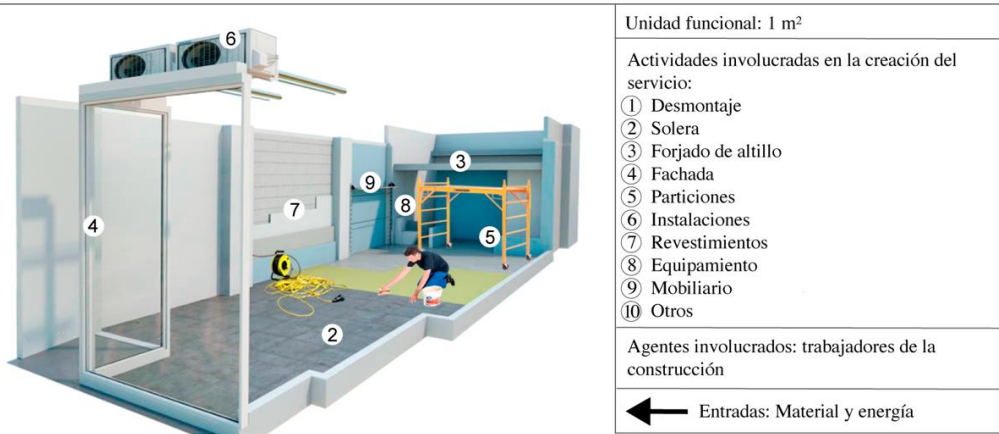


Figura 2: etapa de implementación del servicio de venta de ropa.  
 Fuente: elaboración propia, 2019.

**Objetivo y alcance**

La etapa de implementación del servicio se establece como los límites del sistema. El objetivo de este trabajo es la cuantificación de los impactos medioambientales, económicos y sociales teniendo en cuenta todas las actividades y materiales necesarios para crear el servicio. Como se muestra en la Figura 1, en el proceso de creación del servicio están involucradas dos etapas del ciclo de vida de la tienda de ropa: producto y proceso de construcción, donde pueden ser diferenciadas las fases desde la A1 a la A5. La unidad funcional es 1 m<sup>2</sup>.

**Inventario**

Las principales actividades involucradas en la creación del servicio fueron organizadas en un total de 10 grupos (1. Desmontaje, 2. Solera, 3. Forjado de altillo, 4. Fachada, 5. Particiones, 6. Instalaciones, 7. Revestimientos, 8. Equipamiento, 9. Mobiliario y 10. Otros). Se resumen en la Tabla 2 los datos asociados a cada una de las actividades. En particular se han indicado los valores del indicador de GE en las fases de construcción (A1-3) y producto (A4-5), el tiempo de trabajo y el salario de los trabajadores en la fase A5 y los costes totales. Todos los datos están expresados por unidad, la cual es utilizada para medir el progreso de la actividad. Si revisamos el grupo 6. Instalaciones, conlleva las actividades de 6.1. Tubería de distribución de Agua Caliente Sanitaria (ACS), 6.2. Unidad de tratamiento de aire, 6.3. Instalación de fontanería, 6.4. Extintor portátil de polvo y 6.5. Luminarias fijas y móviles. Si observamos la actividad 6.1. Tubería de distribución de ACS en detalle, ésta supone una medición de 1,10 m y un consumo de energía de 9,45 y 0,09 MJ/m en las fases de producto y proceso de construcción respectivamente, también son necesarios 2 trabajadores en esa actividad que trabajan 0,24 h/m y reciben un salario de 4,15 €/m y el coste total de la actividad es de 15,2 €/m.

**Evaluación del impacto**

Para evaluar la sostenibilidad de la etapa de implementación se utilizan los indicadores definidos en la Tabla 1. Los resultados obtenidos de las actividades involucradas en la creación del servicio son resumidos en la Tabla 3, además de los valores totales. Si revisamos el grupo de actividades número 6 destinado a las instalaciones, se obtienen 1.338,24 kg CO<sub>2</sub>-eq y 9.475,65MJ en los indicadores medioambientales de GWP y GE, respectivamente. Además, se obtiene un PEM de 8.806,37 € y una EE de 6,62 €/kgCO<sub>2</sub>-eq en cuanto a los indicadores de la dimensión económica.

Y en la dimensión social se obtienen 74,74 h como el tiempo que dedican los trabajadores en ese grupo de actividades y por el que reciben un salario de 744,20 €, obteniendo los valores de los indicadores de  $T_t$  y  $S_t$ , respectivamente. Considerando las 10 actividades de construcción y montaje se obtienen un total de 7.298,02 kg CO<sub>2</sub>-eq y 81.195,11 MJ de los indicadores de GWP y GE respectivamente. En la dimensión económica, el PEM total es de 27.979,40 € y la EE total es de 3,83 €/kgCO<sub>2</sub>-eq. Además, se obtienen 396,55 h y 6.018,47 € de  $T_t$  y  $S_t$  respectivamente en los indicadores sociales.

Tabla 2: información de las actividades necesarias para la creación del servicio de venta de ropa

Actividades de construcción y montaje	Med.	Unid.	GE		Trabajadores (A5)			Coste
			A1-2-3 (MJ/unid.)	A4-5 (MJ/unid.)	Nº	Tt (h/unid)	St (€/unid)	A1-5 (€/unid)
<b>1. Desmontaje</b>								
1.1. Desmontaje de puerta garaje	1,00	pc.	0,00	2,12	3	1,15	19,48	19,87
<b>2. Base</b>								
2.1. Solera de hormigón	65,29	m²	130,19	7,78	3	0,08	1,20	4,74
<b>3. Estructura de altillo</b>								
3.1. Estructura de hormigón armado	9,43	m²	553,63	11,31	6	1,49	26,54	50,44
<b>4. Fachadas</b>								
4.1. Carpintería acero escarapate	1,00	pc.	5.581,18	53,48	2	0,38	6,60	643,58
4.2. Rejilla metálica de ventilación	1,75	m²	21,97	0,13	2	0,61	10,61	114,45
4.3. Puerta enrollable aut. de acero	1,00	pc.	3.097,24	30,16	6	5,46	94,06	1641,06
4.4. Puerta de acero templado	1,00	pc.	15,13	0,28	2	2,12	34,38	269,80
4.5. Vidrio laminado de seguridad	9,23	m²	589,53	10,35	2	0,96	15,57	58,89
<b>5. Particiones</b>								
5.1. Tabiquería interior	33,29	m²	268,17	21,95	4	1,93	33,01	43,31
5.2. Puerta interior abatible	1,00	pc.	158,45	4,77	2	2,00	34,42	187,31
5.3. Trasdosoado autoport. arriostrado	69,59	m²	126,51	4,68	2	0,48	7,46	22,92
<b>6. Instalaciones</b>								
6.1. Tubería distribución de ACS	1,10	m	9,45	0,09	2	0,24	4,15	15,20
6.2. Unidad de tratamiento de aire	1,00	pc.	112,91	1,37	2	7,94	137,09	4.084,21
6.3. Instalación de fontanería	1,00	pc.	157,06	1,82	2	5,40	162,29	265,38
6.4. Extintor portátil de polvo	1,00	pc.	754,44	3,45	1	0,10	1,62	44,32
6.5. Luminarias fijas y móviles	31,00	pc.	127,07	0,35	2	0,82	14,15	143,54
<b>7. Revestimientos</b>								
7.1. Alicatado con azulejo en aseo	10,16	m²	208,06	8,40	2	0,70	11,89	23,64
7.2. Guarnizado de yeso	33,85	m²	61,06	0,86	2	0,51	8,73	10,78
7.3. Base para rampa de entrada	1,20	m²	363,28	6,89	2	0,50	8,43	20,01
7.4. Pavimento laminado de HDF	58,61	m²	44,10	3,22	2	0,18	2,83	24,17
7.5. Rodapié de MDF	29,30	m²	1,66	0,17	1	0,09	1,37	8,33
7.6. Aplicación manual de pintura	236,51	m²	9,17	0,18	2	0,34	5,68	10,80
7.7. Enfoscado de cemento	10,16	m²	39,89	1,38	2	1,01	17,07	18,73
7.8. Falso techo continuo	36,80	m²	113,96	4,73	2	0,45	7,14	22,58
7.9. Aislamiento termoacúst. suelo	51,74	m²	33,97	1,38	2	0,28	4,36	9,89
<b>8. Equipamientos</b>								
8.1. Inodoro de porcelana sanitaria	1,00	pc.	1.020,04	12,48	1	1,26	22,84	250,97
8.2. Lavabo de porcelana sanitaria	1,00	pc.	743,99	8,85	1	1,31	23,75	485,13
<b>9. Mobiliario</b>								
9.1. Mobiliario en almacén	5,00	pc.	79,08	4,77	2	1,06	18,03	175,73
9.2. Mobiliario en espacio de venta	10,00	pc.	706,67	4,77	2	1,06	18,03	292,48
<b>10. Otros</b>								
10.1. Transporte de residuos	20,00	m³	-	55,13	-	-	-	3,32
10.2. Seguridad y Salud	1,00	pc.	761,08	3,79	4	1,34	21,66	715,85

Fuente: elaboración propia, 2019.

### Interpretación de los resultados

Para facilitar el análisis y la interpretación de los resultados se muestra la distribución porcentual del impacto generado por los grupos de actividades involucrados en la creación del servicio en la Figura 3 donde se han analizado los indicadores  $GWP_{100}$ , PEM, y Tt. En el indicador medioambiental, los grupos de actividades 7. Revestimientos (20,7%), 5. Particiones (20,2%) y



6. Instalaciones (18,7%) son los que producen un mayor impacto. En el indicador económico, los grupos 6. Instalaciones (31,4%) y 7. Revestimientos (22,9%) son los que causan un mayor impacto.

En cuanto al indicador social, los grupos que crean mayor impacto son 7. Revestimientos, 5. Particiones (25,1%) y 6. Instalaciones (19,3%). Se puede observar que los grupos de actividades 5. Particiones, 6. Instalaciones y 7. Revestimientos acumulan más del 60% del impacto total en los indicadores de GWP<sub>100</sub> y PEM y más del 80% en el indicador Tt. Además, se muestran en detalle las actividades de los grupos con un impacto más alto en cada caso. Las actividades que causan un impacto más alto entre los indicadores analizados son la 7.8. Falso techo continuo (4,8%) y la 7.6. Aplicación manual de pintura (4,4%) en la dimensión medioambiental, las actividades 6.5. Luminarias fijas y móviles (15,8%) y 6.2. Unidad de tratamiento de aire (14,5%) en la dimensión económica y la actividad 7.6 Aplicación manual de pintura (20,4%) en la dimensión social. De esta manera se han identificado las actividades que tienen mayor efecto en la sostenibilidad de la etapa de implementación del servicio.

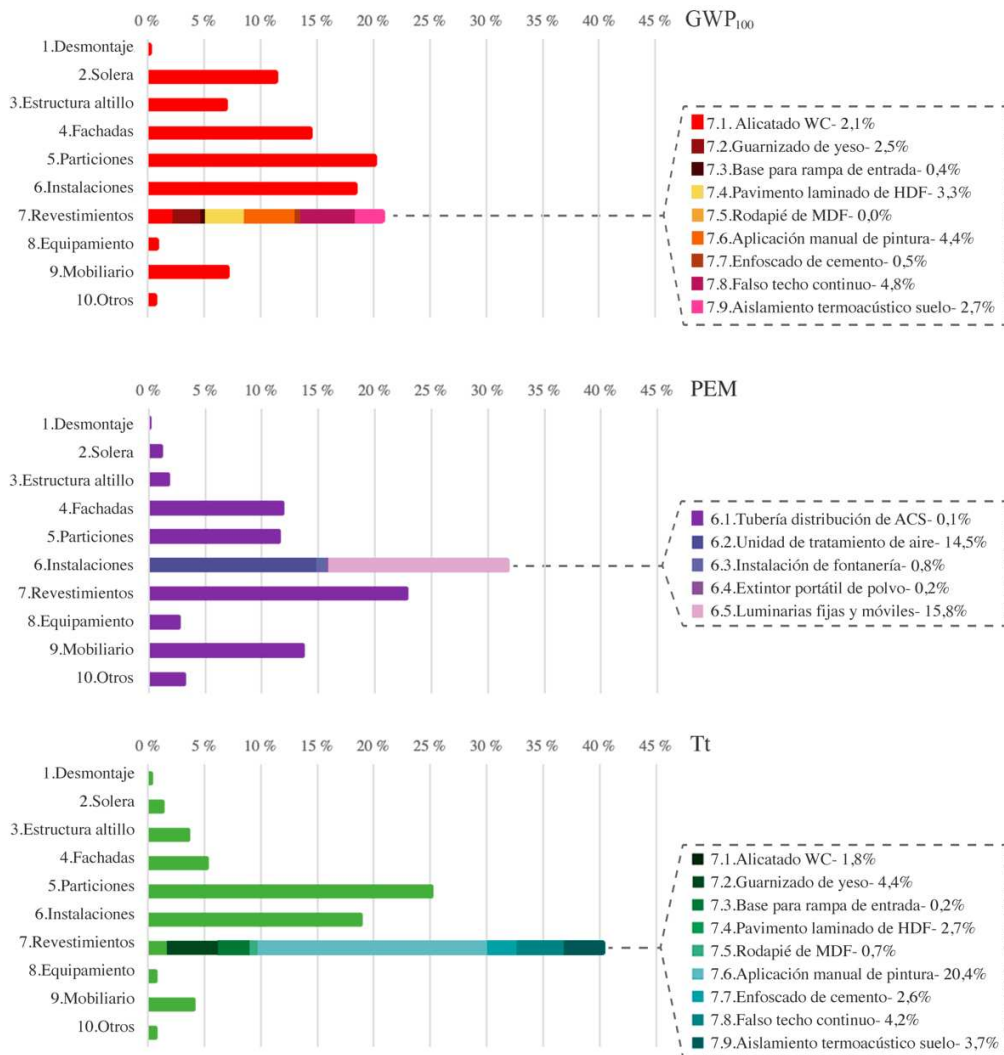


Figura 3: impacto causado por las actividades  
Fuente: elaboración propia, 2019.

En la Tabla 4 se muestran los indicadores de la sostenibilidad tratados en la etapa de implementación del servicio de ropa, expresados por unidad funcional. Un total de 111,7 kg CO<sub>2</sub>-eq y un total de 1.243,4 MJ fueron obtenidos respectivamente en los indicadores de emisiones de gases de efecto invernadero y energía incorporada por metro cuadrado. Los costes de ejecución fueron 428,4 €/m<sup>2</sup>, por lo que se obtienen 3,8 €/kgCO<sub>2</sub>-eq en el indicador de eco-eficiencia. El tiempo de trabajo y el salario de los trabajadores implicados en la fase de construcción fueron 6,07 h/m<sup>2</sup> and 92,1 €/m<sup>2</sup> respectivamente.

Tabla 4: indicadores de sostenibilidad de las actividades

Dimensión medioambiental		Dimensión económica		Dimensión social	
GWP <sub>100</sub> (KgCO <sub>2</sub> -eq/m <sup>2</sup> )	GE (MJ/m <sup>2</sup> )	PEM (€/m <sup>2</sup> )	EE (€/KgCO <sub>2</sub> -eq)	Tt (h/m <sup>2</sup> )	St (€/m <sup>2</sup> )
111,7	1.243,4	428,4	3,8	6,07	92,1

Fuente: elaboración propia, 2019.

## Conclusiones

En este trabajo se ha analizado la sostenibilidad de la etapa de implementación de un servicio que se dedica a la venta al por menor de prendas de vestir. Las dimensiones medioambiental, económica y social han sido evaluadas aplicando una metodología de ASCV. Se han identificado las relaciones entre las diferentes etapas del ciclo de vida del servicio y las etapas del producto en construcción, que en este caso se considera la tienda como lugar físico donde se va a proporcionar el servicio. Los límites del sistema se han establecido en la fase de implementación del servicio (y, por tanto, en la fase de construcción de la tienda) y se han seleccionado a los trabajadores de la construcción como los principales agentes involucrados para evaluar la dimensión social.

Se han seleccionado una serie de indicadores que pueden ser utilizados para estudiar y comparar diferentes sistemas y proporcionar una evaluación cuantitativa de los aspectos medioambientales y socio-económicos. Estos indicadores han sido obtenidos mediante un estudio detallado y de acuerdo a las actividades llevadas a cabo en la etapa de implementación. Al realizar la evaluación de la sostenibilidad se han identificado las fuentes de impacto más importantes. De este modo, es posible proponer una mejora en la sostenibilidad del servicio y progresar en el estudio de diseño de servicios y sistemas producto-servicio sostenibles.

El análisis de la etapa de implementación del servicio de venta de ropa ha permitido obtener una serie de conclusiones relativas a los principales focos de impacto: las actividades asociadas a la aplicación de revestimientos son especialmente importantes en los resultados obtenidos en los indicadores medioambientales y sociales, y las actividades asociadas al desarrollo de las instalaciones causan el impacto económico más alto. Estas actividades deberán ser revisadas para lograr una mejora efectiva de los indicadores de sostenibilidad. El objetivo de un trabajo futuro será la evaluación de la sostenibilidad del ciclo de vida completo teniendo en cuenta también las etapas de uso y de final de vida del servicio, y el desarrollo de estrategias para obtener una mejora en la sostenibilidad.

## REFERENCIAS

- Benoît-Norris, Catherine., Gina Vickery-Niederman, Sonia Valdivia, Juliane Franze, Marzia Traverso, Andreas Ciroth and Bernard Mazijn. 2011. "Introducing the UNEP/SETAC Methodological Sheets for Subcategories of Social LCA." *Int J Life Cycle Assess* 16: 682–90. <http://dx.doi.org/10.1007/s11367-011-0301-y>
- Bermejo, Roberto., Iñaki Arto, David Hoyos y Eneko Garmendia. 2010. *Menos Es Más: del Desarrollo Sostenible al Decrecimiento Sostenible*. Vitoria-Gasteiz: Cuadernos de Trabajo de Hegoa.
- Bernier, Etienne, Francois Maréchal and Réjean Samson. 2013. "Life Cycle Optimization of Energy-Intensive Processes Using Eco-Costs." *Journal of Life Cycle Assessment* 18 (9): 1747–61.  
<https://www.researchgate.net/deref/http%3A%2F%2Fdx.doi.org%2F10.1007%2Fs11367-013-0560-x>
- Boehm, Matthias and Oliver Thomas. 2013. "Looking Beyond the Rim of One's Teacup: A Multidisciplinary Literature Review of Product-Service Systems in Information Systems, Business Management, and Engineering Design." *J. Clean. Prod.* 51: 245–260. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.01.019>
- Boustead, Ian. 1979. *Handbook of Industrial Energy Analysis*. United Kingdom: Ellis Horwood Ltd.
- Brundtland, Gro. 1987. *Our Future Common. World Commission on Environment and Development*. Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Cañón, Dora M. 2013. "Protocolo para Identificación de Criterios de Producción Más Limpia en la Selección de Estudios de Caso en Empresas del Sector Manufacturero Competitivas y Altamente Contaminantes". *Revista Questionar* 1(1) enero-diciembre: 7–17. <http://hdl.handle.net/20.500.11839/6322>
- Cavaliere, Sergio, and Giuditta Pezzotta. 2012. "Product-Service Systems Engineering: State of the Art and Research Challenges." *Computers in Industry* 63 (4): 278–88. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2012.02.006>
- Comisión de las Comunidades Europeas, COM/2003/0302 final. "Communication from the Commission to the Council and the European Parliament - Integrated Product Policy - Building on Environmental Life-Cycle Thinking." Bruselas. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52003DC0302>
- ESU-Services Ltd. 2019. "Description of Life Cycle Impact Assessment Methods". Schaffhausen, SH, Switzerland.
- European Commission. 2013. "Eurostat statistics for waste flow generation". Accessed 12/2013. <https://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/eurostat/home/>
- Finkbeiner, Matthias., Erwin M. Schau, Lehmann Annekatrin, and Marzia Traverso. 2010. "Towards Life Cycle Sustainability Assessment". *Sustain* 2(10): 3309–22. <https://doi.org/10.3390/su2103309>
- Fuentes-Nieva, Ricardo y Nick Galaso. 2014. *Gobernar para las Élités, Secuestro Democrático y Desigualdades Sociales*. United Kingdom: Oxfam GB.
- Gadrey, Jean, and Faiz Gallouj. 2002. "The Misuse of Productivity Concepts in Services: Lessons from a Comparison Between France and the United States". In: Gadrey, J., Gallouj, F. (Eds.) *Productivity, Innovation and Knowledge in Services: New Economic and Socio-economic Approaches* 26–53.
- Government of Spain. 2018. "Emission factors of electric companies." Accessed June 3, 2019. [https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/mitigacion-politicas-y-medidas/factores\\_emision\\_tcm30-446710.pdf](https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/mitigacion-politicas-y-medidas/factores_emision_tcm30-446710.pdf)
- UNCED (United Nations Conference on Environment and Development). 1992. Agenda 21. <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/Agenda21.pdf>

- UNEP/SETAC. 2009. *Guidelines for Social Life Cycle Assessment of Products*. Paris: United Nations Environment Programme UNEP/SETAC
- ISO, 2006a. ISO 14040 “International Standard.” In: *Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework*. International Organisation, Geneva, Switzerland.
- ISO, 2006b. ISO 14040 International Standard. In: *Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and Guidelines*. International Organisation, Geneva, Switzerland.
- Kloepffer, Walter. 2007. “Life-Cycle Based Sustainability Assessments as Part of LCM.” In: *Proceedings of the 3rd LCM Conference*, Zurich, Switzerland.
- . 2008. “Life Cycle Sustainability Assessment of Products” (with comments by Helias A. Udo de Haes, p. 95). *Int J Life Cycle Assessment* 13(2): 89–95.
- MAHB. 2013. “Consensus Statement from Global Scientists”. <https://mahb.stanford.edu/consensus-statement-from-global-scientists/>
- Mason, Paul. 2012. *Postcapitalismo. Hacia un Nuevo Futuro*. Barcelona: Paidós.
- McHarry, Jan., Rosalie Callway, Janet Strachan and Georgina Ayre. 2005. *The Plain Language Guide to the World Summit on Sustainable Development*. Londres: Taylor and Francis Ltd.
- Morelli, Nicola. 2006. “Developing New Product Service Systems (PSS): Methodologies and Operational Tools.” *J. Clean. Prod.* 14(17): 1495–1501.
- Pigosso, Daniela C.A, and Tim C. McAloone. 2016. “Maturity-Based Approach for the Development of Environmentally Sustainable Product/Service-Systems.” *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 15: 33–41. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2016.04.003>
- Prats, Fernando, Yayo Herrero, y Alicia Torrego. 2016. *La Gran Encrucijada: Sobre la Crisis Eco-Social y el Cambio de Ciclo Histórico*. Madrid: Libros en Acción.
- Ren, Jingzheng., Alessandro Manzardo, Anna Mazzi, Filippo Zuliani and Antonio Scipioni. 2015. “Prioritization of Bioethanol Production Pathways in China Based on Life Cycle Sustainability Assessment and Multicriteria Decision-Making.” *Journal of Life Cycle Assessment* 20 (6): 842–53. <https://doi.org/10.1007/s11367-015-0877-8>
- Tan, Adrian., Timothy C. McAloone and Mogens M. Andreasen. 2006. “What Happens to Integrated Product Development Models with Product/Service-System Approaches?” *Proceedings of the 6th Workshop on Integrated Product Development*. Magdeburg, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg.
- Traverso, Marcia, and Laura Schneider. 2012. “Life Cycle Sustainability Dashboard.” *Journal of Industrial Ecology* 16 (5): 680–88.
- Tukker, Arnold, and Ursula Tischner. 2006. “Product-services as a research field: past, present and future. Reflections from a decade of research.” *J Clean Prod* 14 (17): 1552–56.
- UBA (Umweltbundesamt) (German Environmental Protection Agency). 2007. PROBAS Database. <http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/index.php>
- Valdivia, Sonia., Cassia M. L. Ugaya, Jutta Hildenbrand, Marzia Traverso, Bernard Mazijn, and Guido Sonnemann. 2013. “A UNEP/SETAC Approach Towards a Life Cycle Sustainability Assessment—Our Contribution to Rio+20.” *Int J Life Cycle Assess* 18(9):1673–85.
- Vezzoli, Carlo., Cindy Kohtala, Amrit Srinivasan, Liu Xin, Moi Fusakul, Deepta Sateesh and J. C. Diehl. 2014. *Product-Service System Design for Sustainability*. London: Routledge.
- WBCSD (World Business Council for Sustainable Development). 2010. “Vision 2050: The new agenda for business”. <https://www.wbcsd.org/Overview/About-us/Vision2050/Resources/Vision-2050-The-new-agenda-for-business>
- WCED (World Commission on Environment and Development). 1987. “Our Common Future”. <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/5987our-common-future.pdf>

WWF Internacional. 2010. “Informe Planeta Vivo 2010: Biodiversidad, biocapacidad y desarrollo”. WWF Internacional. <https://sinia.minam.gob.pe/documentos/informe-planeta-vivo-2010-biodiversidad-biocapacidad-desarrollo>

## SOBRE LOS AUTORES

**Natalia Muñoz:** Profesora asociada, Departamento de Diseño y Fabricación, Universidad de Zaragoza, Zaragoza, España

**José Luis Santolaya:** Profesor Contratado Doctor, Departamento de Diseño y Fabricación, Universidad de Zaragoza, Zaragoza, España

**Anna Biedermann:** Profesora asociada, Departamento de Diseño y Fabricación, Universidad de Zaragoza, Zaragoza, España

*La Revista Internacional de Sostenibilidad* busca crear un marco intelectual de referencia y de diálogo interdisciplinar a través de teorías innovadoras y prácticas de sostenibilidad.

*La Revista Internacional de Sostenibilidad* emplea un sistema de revisión por pares, apoyado en rigurosos procesos de clasificación de artículos conforme a criterios académicos y comentarios cualitativos, para asegurarse de que sólo los trabajos intelectuales de gran sustancia e impacto sean publicados.

*La Revista Internacional de Sostenibilidad* es una publicación académica sujeta a revisión por pares.

Lecture Notes in Mechanical Engineering

Francisco Cavas-Martínez ·  
Félix Sanz-Adan · Paz Morer Camo ·  
Ruben Lostado Lorza ·  
Jacinto Santamaría Peña *Editors*

# Advances in Design Engineering

Proceedings of the XXIX International  
Congress INGEGRAF, 20–21 June 2019,  
Logroño, Spain

 Springer



# Sustainability Assessment in the Implementation Phase of a Retail Space

Natalia Muñoz López<sup>(✉)</sup>, José Luis Santolaya Saénz,  
Anna Biedermann, and Javier Molina Sánchez-Migallón

Department of Design and Manufacturing Engineering,  
Universidad de Zaragoza, María Luna 3, 50018 Saragossa, Spain  
nataliam@unizar.es

**Abstract.** Design for sustainability has progressively evolved from the product level, usually referred as product Life Cycle Design or Ecodesign, towards a more complex approach, in which Product-Service Systems (PSS) are considered, and from an analysis only focused on the environmental impact to the simultaneous study of the three dimensions of sustainability: environmental, economic and social. In this work, the sustainability assessment of a PSS is addressed. A small clothing store is projected and all products and activities needed to create the retail space in which commodity is delivered, stored, displaced and tried out by the buyers are analyzed. Sustainability assessment is focused on the implementation phase of the service life cycle. A set of appropriate indicators are used to quantitatively evaluate each sustainability dimension. The greenhouse gas emissions indicator is used to assess the environmental impact, the budget of material execution is selected to evaluate the economic dimension and the working time associated to the category of workers, which is the most affected stakeholder group, is used to value the social dimension.

**Keywords:** Sustainable design · Product-Service System · Sustainability indicators

## 1 Introduction

Initiatives to adopt more sustainable approaches in industrial and economic activities have been evolving throughout the last decades. Design methods that do not only focus on the improvement of the environmental impacts associated to products, as Ecodesign [1] are required by the companies. Several authors have proposed providing utility to consumers through the use of services rather than products as a strategy of dematerialization and a possible answer to the sustainability challenge [2]. Since every product offers some kind of service and every service is based on the use of one or several support products, services and products are usually treated as parts of systems that are often referred to as Product Service Systems (PSS) [3]. Tukker and Tischner [4] define PSS as “a mix of tangible products and intangible services designed and combined so that they are jointly capable of fulfilling final customer needs”.

In this perspective, it is necessary to develop criteria, methods and tools to support the PSS design process. Although PSS have been recognized as a sustainable solution,



its effects have not been systematically assessed. In fact, the literature regarding PSS sustainability assessment is still in the early phase and it requires criteria to define whether a PSS is sustainable [5]. In order to ensure PSS sustainability through its life cycle, sustainability assessment is a critical question that needs to be carefully addressed.

On the other hand, a rigorous sustainability assessment requires that three simultaneous dimensions (environmental, economic and social) be considered. This model to address the sustainability is known like Triple Bottom Line (TBL) [6]. The environmental dimension refers to the management of the planet resources, the economic dimension to the control and distribution of benefits and the social dimension to the well-being of living creatures.

The investigations of different authors [7, 8] to evaluate the three sustainability dimensions along the entire life cycle of a product, allowed developing the Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA) framework (Fig. 1). It combines three techniques of life cycle assessment: E-LCA, LCC y S-LCA. E-LCA (Environmental Life Cycle Assessment), also called LCA, is focused on environmental aspects. LCC (Life Cycle Costing) assess economic issues and S-LCA (Social Life Cycle Assessment) studies the impacts on organizations and social agents. Thus, three simultaneous life cycles are analyzed, which can be expressed as:  $LCSA = LCA + LCC + S-LCA$ . In addition, a set of criteria and indicators are used to evaluate each dimension.

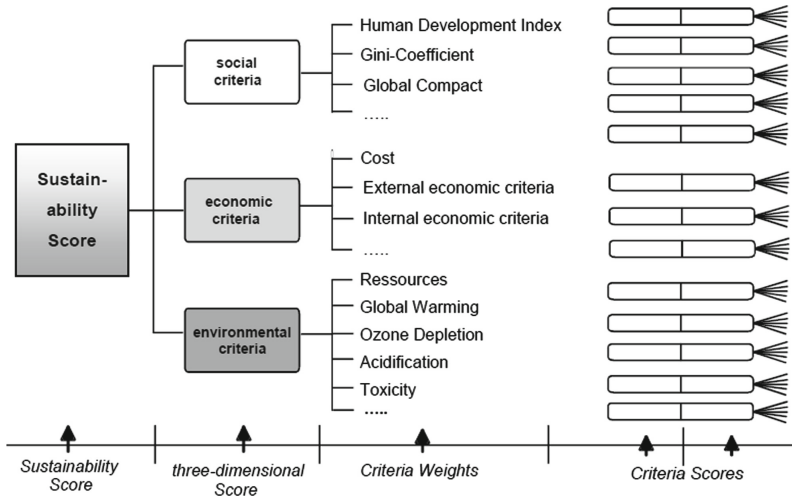


Fig. 1. LCSA diagram addressing three dimensions of sustainability [8].

LCSA methodology is already being applied in product design [9] but it is hardly applied to analyze the sustainability performance in service delivery and Product-Service Systems. In this work, the implementation phase of a clothing retail service is analyzed and its sustainability is assessed using a set of appropriate indicators.

## 2 Methodology

In this work, LCSA approach has been applied using the same structure of four phases considered in a LCA [10]: goal and scope definition, inventory analysis, impact assessment and interpretation.

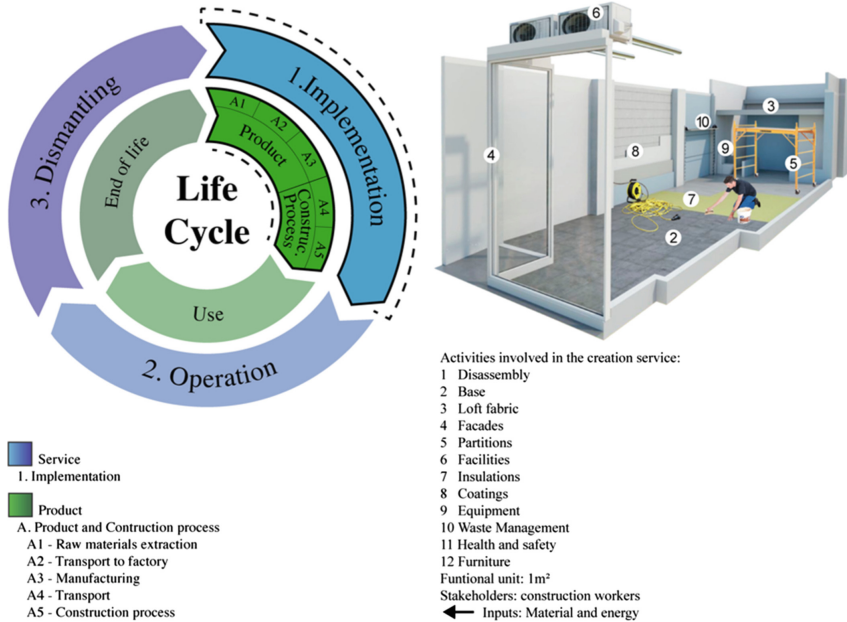
First, goal and scope of the study are defined, the functional unit is identified and the system boundaries are established. Next, inventory analysis is carried out through data collection and calculation procedures. Inputs and outputs related with the functional unit, as well as the resources used in the transformation processes are identified and quantified. Environmental, economic and social impacts are obtained in the following phase using the indicators shown in Table 1. The indicators defined are considered particularly useful to develop the suggested methodology in two ways: they can be used to study very different systems and provide quantitative information. The Generator of Construction Prices database of CYPE Engineers software of Spain in 2018 version was used to calculate indicators selected because it enables the evaluation of environmental and socio-economics aspects [11]. Finally, the interpretation phase combines the results of inventory analysis with impact assessment to obtain the required conclusions and recommendations for decision making process. It allows determining the system impact spots and thus, which of them should be improved.

**Table 1.** Sustainability indicators used to asses PSS sustainability.

Environmental indicators	
GWP <sub>100</sub> (Kg CO <sub>2</sub> -eq)	Global Warming Potential. Total emissions of the greenhouse gases calculating the radiative forcing over a time horizon of 100 years
GE (MJ)	Global Energy. Energy consumption considering electricity as well as net calorific value of resources used
Economic indicators	
BME (€)	Budget of Material Execution. It expresses the total cost to develop a project
EE (€/KgCO <sub>2</sub> -eq)	Eco-efficiency. Ratio between BME and GWP <sub>100</sub> . It allows comparing easily economic and environmental impacts of individual or global activities
Social indicators (workers category)	
Wt (h)	Working time. Average time required by the workers to develop an activity
Lc (€)	Labour cost. Average cost associated to the workers labour

### 3 Case Study

A clothing retail service is studied. Three stages are considered in its life cycle: implementation or creation, operation or delivery and dismantling or end-of-life. On the other hand, the stages of product, construction, use and end-of-life constitute the life cycle of the clothing retail store, in which the service will be developed. Both, service and product life cycles are shown in Fig. 2.



**Fig. 2.** Life cycle stages of service and product built to develop the service.

#### 3.1 Goal and Scope

The service implementation stage is established as system boundaries. The quantification of environmental, economic and social impacts, taking into account all activities and materials required to create the service, is the objective of this work. As is shown in Fig. 2, two stages in the life cycle of the clothing retail store: product and construction process, are involved in the service creation process. Phases from A1 to A5 can be differentiated within these stages. Obtaining a well-conditioned commercial space of 65 m<sup>2</sup>, which will be located in the center of a big city, is the functional unit.

#### 3.2 Inventory

All activities required to create the clothing retail service are shown in Table 2. A total of 12 groups of activities are considered, from 1. Disassembly to 12. Furniture. The

**Table 2.** Data of the activities required in the creation of the clothing retail service.

Activities	Measure	Units	GE/unit		Workers (A5)			Cost/unit A1-5 (€)
			A1-2-3 (MJ)	A4-5 (MJ)	N° (units)	Wt/unit (h)	Lc/unit (€)	
1. Disassembly								
1.1. Disassembly of swivelling garage gate	1,00	pc.	0,00	2,12	3,00	1,15	19,48	19,87
2. Base								
2.1. Mass concrete base	65,29	m <sup>2</sup>	130,19	7,78	3,00	0,08	1,20	4,74
3. Loft fabric								
3.1. Reinforced concrete fabric	9,43	m <sup>2</sup>	553,63	11,31	6,00	1,49	26,54	50,44
4. Facades								
4.1. Galvanized steel fixed carpentry to window	1,00	pc.	5.581,18	53,48	2,00	0,38	6,60	643,58
4.2. Fixed metal grid to ventilation	1,75	m <sup>2</sup>	21,97	0,13	2,00	0,61	10,61	114,45
4.3. Zinc plated steel automatic rolling shutter	1,00	pc.	3.097,24	30,16	6,00	5,46	94,06	1.641,06
4.4. Tempered glass door enclosure	1,00	pc.	15,13	0,28	2,00	2,12	34,38	269,80
4.5. Laminated safety glass	9,23	m <sup>2</sup>	589,53	10,35	2,00	0,96	15,57	58,89
5. Partitions								
5.1. Partitioning	33,29	m <sup>2</sup>	268,17	21,95	4,00	1,93	33,01	43,31
5.2. Bling folding interior door	1,00	pc.	158,45	4,77	2,00	2,00	34,42	187,31
5.3. Braced self-supporting plasterboard	69,59	m <sup>2</sup>	126,51	4,68	2,00	0,48	7,46	22,92
6. Facilities								
6.1. General pipe of distribution SHW	1,10	m	9,45	0,09	2,00	0,24	4,15	15,20
6.2. Air handling unit in false ceilings	1,00	pc.	112,91	1,37	2,00	7,94	137,09	4.084,21
6.3. Plumbing interior installation to toilet	1,00	pc.	157,06	1,82	2,00	5,40	162,29	265,38
6.4. Powder extinguishers	1,00	pc.	754,44	3,45	1,00	0,10	1,62	44,32
6.5. Fixed and movable luminaires	31,00	pc.	127,07	0,35	2,00	0,82	14,15	143,54
7. Insulations								
7.1. Thermoacoustic insulation under the floor	51,74	m <sup>2</sup>	33,97	1,38	2,00	0,28	4,36	9,89
8. Coatings								
8.1. Tiling	10,16	m <sup>2</sup>	208,06	8,40	2,00	0,70	11,89	23,64
8.2. Plaster in vertical surfaces	33,85	m <sup>2</sup>	61,06	0,86	2,00	0,51	8,73	10,78
8.3. Pavement base to ramp	1,20	m <sup>2</sup>	363,28	6,89	2,00	0,50	8,43	20,01
8.4. Laminated pavement of HDF board	58,61	m <sup>2</sup>	44,10	3,22	2,00	0,18	2,83	24,17

*(continued)*

**Table 2.** (continued)

Activities	Measure	Units	GE/unit		Workers (A5)			Cost/unit A1-5 (€)
			A1-2-3 (MJ)	A4-5 (MJ)	N <sup>o</sup> (units)	Wt/unit (h)	Lc/unit (€)	
8.5. Skirting of MDF board	29,30	m <sup>2</sup>	1,66	0,17	1,00	0,09	1,37	8,33
8.6. Application manual of paint	236,51	m <sup>2</sup>	9,17	0,18	2,00	0,34	5,68	10,80
8.7. Cement rendering in vertical surfaces	10,16	m <sup>2</sup>	39,89	1,38	2,00	1,01	17,07	18,73
8.8. Suspended continuous false ceilings	36,80	m <sup>2</sup>	113,96	4,73	2,00	0,45	7,14	22,58
9. Equipment								
9.1. Sanitary porcelain toilet	1,00	pc.	1.020,04	12,48	1,00	1,26	22,84	250,97
9.2. Sanitary porcelain basin	1,00	pc.	743,99	8,85	1,00	1,31	23,75	485,13
10. Waste management								
10. 1. Transport of mix of waste without sort	20,00	m <sup>3</sup>	0,00	55,13	0,00	0,00	0,00	3,32
11. Health and safety								
11. 1. Pair of gloves against mechanical risks	2,00	pc.	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,41
11. 2. Pair of shoes of security	2,00	pcs.	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	89,38
11. 3. Mobile scaffolding tower	1,00	pc.	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	251,58
11. 4. Portable lamp	1,00	pc.	0,00	0,01	1,00	0,11	1,78	5,49
11. 5. General electrical board	1,00	pc.	6,64	0,33	2,00	1,12	18,10	321,51
11. 6. Powder extinguishers	1,00	pc.	754,44	3,45	1,00	0,11	1,78	44,48
12. Furniture								
12. 1. Warehouse furniture	5,00	pc.	79,08	4,77	2,00	1,06	18,03	175,73
12. 2. Sales space furniture	10,00	pc.	706,67	4,77	2,00	1,06	18,03	292,48

following data are indicated for each activity: measurement and units, energy consumption for the A1-3 and A4-5 phases, workers number required in the A5 phase (construction process), working time and labour cost of the workers in this phase and finally, the total cost of each activity. All data are expressed per unit of measurement.

### 3.3 Impact Assessment

Indicators defined in Table 1 are used to assess the sustainability performance. Results obtained for the activities involved in the service creation are summarized in Table 3. Global values are also indicated. A total of 7.298,02 kgCO<sub>2</sub>-eq and 81.195,11 MJ are obtained for the GWP<sub>100</sub> and GE environmental indicators respectively. In the economic dimension, the global BME is 27.979,40 € and the global EE is 3,83 €/kgCO<sub>2</sub>-eq. In addition, 396,55 h and 6.018,47 € are, respectively, obtained for the W<sub>t</sub> and L<sub>c</sub> social indicators.

**Table 3.** Indicators obtained for each sustainability dimension.

Construction and assembly activities	Environmental		Economic		Social	
	GWP <sub>100</sub> (kg CO <sub>2</sub> -eq)	GE (MJ)	BME (€)	EE (€/kg CO <sub>2</sub> -eq)	Tw (h)	Sw (€)
1. Dissassembly	0,17	2,12	19,87	119,70	1,15	19,48
2. Base	825,46	9.008,19	309,47	0,37	5,22	78,34
3. Loft fabric	496,98	5.327,47	475,65	0,96	14,05	250,27
4. Facades	1.047,95	14.353,20	3.298,28	3,15	20,77	297,30
5. Partitions	1.461,45	17.805,87	3.224,10	2,21	99,65	1.652,50
6. Facilities	1.338,24	9.475,65	8.860,37	6,62	74,74	744,20
7. Insulations	200,54	1.829,58	511,71	2,55	14,49	225,59
8. Coatings	1.317,60	14.567,37	5.865,31	4,45	145,40	2.412,00
9. Equipment	55,16	752,99	736,10	13,34	2,62	46,59
10. Waste manag.	11,00	275,68	66,40	6,04	0,00	0,00
11. Health and safety	34,47	263,34	808,64	23,46	2,46	21,70
12. Furniture	509,00	7.533,65	3.803,50	7,47	16,00	270,50
Total	7.298,02	81.195,11	27.979,40	3,83	396,55	6.018,47

### 3.4 Results Interpretation

In order to facilitate the analysis and interpretation of results, the percentage distribution of the impact generated by the activities involved in the service creation are shown in Fig. 3. GWP<sub>100</sub>, BME and W<sub>t</sub> indicators are analyzed. We observe that activities associated to the groups 5. Partitions, 6. Facilities and 8. Coatings have the most noteworthy impact in each sustainability dimension. These activities accumulate more than 60% of the GWP<sub>100</sub> and BME indicators and more than 80% of the W<sub>t</sub> indicator.

Additionally, those activities with the highest impact in each indicator are shown in detail. It is observed that the impact of specific activities denominated 5.1. Partitioning (13,5%); 6.5. Fixed and movable luminaries (18,3%) and 8.6. Application manual of paint (21,1%), is particularly elevated. Thus, activities that have the greatest effect on the sustainability of the service implementation stage are identified. These activities should be reviewed to achieve an effective improvement of the sustainability indicators. The sustainability assessment of the entire service life cycle as well as the development of strategies to achieve its improvement will be the object of future work.

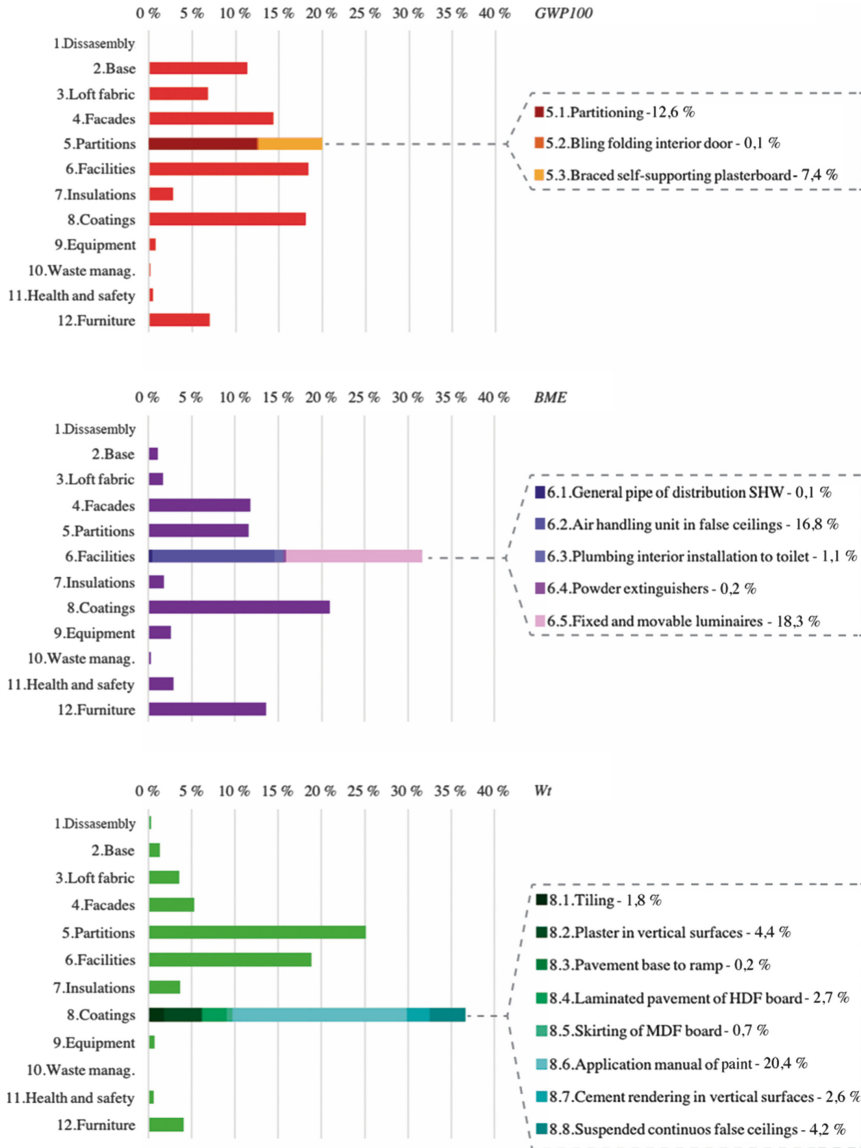


Fig. 3. Percentage distribution of the impact caused by the activities involved in the service creation.

## 4 Conclusions

In this work, the sustainability performance of a Product-Service System was addressed using LCSA approach. Links between life cycle stages of a clothing retail service and the clothing retail store in which service will be operated, were identified. The study

was focused on the service implementation stage, which is coupled to the product and construction stages of the clothing retail store.

A set of appropriate indicators were selected to assess each sustainability dimension. Results showed that activities associated to Partitions, Facilities and Coatings accumulate the highest impact and should be conveniently reviewed to achieve an effective improvement of the PSS sustainability.

This method could be applied to assess the sustainability of other similar services in which a space is conveniently transformed in a store within the implementation stage. A wider list of indicators can be selected if a closer impact knowledge is required.

The activities and resources used during the implementation stage will be different depending of the sale product and the service provided, but is proposed the sequential development of stages which had been described in this work.

## References

1. Brezet, J.C., van Hemel, C.G.: *Ecodesign: a promising approach to sustainable production and consumption*. UNEP, United Nations Publications, Paris (1997)
2. Mont, O.K.: Clarifying the concept of product-service system. *J. Clean. Prod.* **10**, 237–245 (2002)
3. Brezet, J.C., Bijma, A.S., Ehrenfeld, J., Silvester, S.: *The design of eco-efficient services*. Design for Sustainability Program. Delft University of Technology (2001)
4. Tukker, A., Tischner, U.: Product-services as a research field: past, present and future. Reflections from a decade of research. *J. Clean. Prod.* **14**(17), 1552–1556 (2006)
5. Sousa-Zomer, T.T., Cauchick, P.A.: Sustainable business models as an innovation strategy in the water sector: an empirical investigation of a sustainable product-service system. *J. Clean. Prod.* **171**, 119–129 (2018)
6. Székely, F., Knirsch, M.: Responsible leadership and corporate social responsibility: metrics for sustainable performance. *Eur. Manag. J.* **23**, 628–647 (2005)
7. Kloepffer, W.: Life cycle sustainability assessment of products (with comments by Helias A. Udo de Haes, p. 95). *Int. J. Life Cycle Assess.* **13**(2), 89–95 (2008)
8. Finkbeiner, M., Schau, E.M., Lehmann, A., Traverso, M.: Towards life cycle sustainability assessment. *Sustainability* **2**, 3309–3322 (2010)
9. Lacasa, E., Santolaya, J.L., Biedermann, A.: Obtaining sustainable production from the product design analysis. *J. Clean. Prod.* **139**, 706–716 (2016)
10. ISO: ISO 14040 International standard. In: *Environmental Management - Life Cycle Assessment - Principles and Framework*. International Organisation, Geneva (2006)
11. CYPE Ingenieros. <http://www.cype.es>



# ESTUDIO DE LA SOSTENIBILIDAD DE UN SISTEMA PRODUCTO-SERVICIO

## CREACIÓN DE UN PEQUEÑO ESPACIO COMERCIAL DE VENTA DE ROPA

Natalia Muñoz López, Profesora asociada, Zaragoza, España - José Luis Santolaya Sáenz, Profesor Contratado Doctor, Zaragoza, España - Anna Biedermann, Profesora asociada, Zaragoza, España  
Universidad de Zaragoza

### 1 INTRODUCCIÓN

- Los servicios y los Sistemas Producto-Servicio (SPS) presentan cada vez más interés para todo tipo de actividades económicas.
- Los servicios son capaces de proveer utilidad a los consumidores de la misma manera que lo hacen los productos.
- Se requieren métodos de diseño sostenible que no cuantifiquen solamente los impactos ambientales asociados a productos.

### 2 METODOLOGÍA

Se propone un enfoque basado en el ciclo de vida y se identifican las etapas que lo componen tanto en el producto como en el servicio. Las etapas de: 1. Implementación, 2. Operación y 3. Desmantelamiento representan el ciclo de vida de un servicio y las etapas de Producto, Construcción, Uso y Final de vida son las consideradas en el ciclo de vida de un producto. Este planteamiento se aplica en un sistema formado por un servicio de venta de ropa y un producto que es el resultante de la construcción del local comercial donde se desarrollará el servicio.

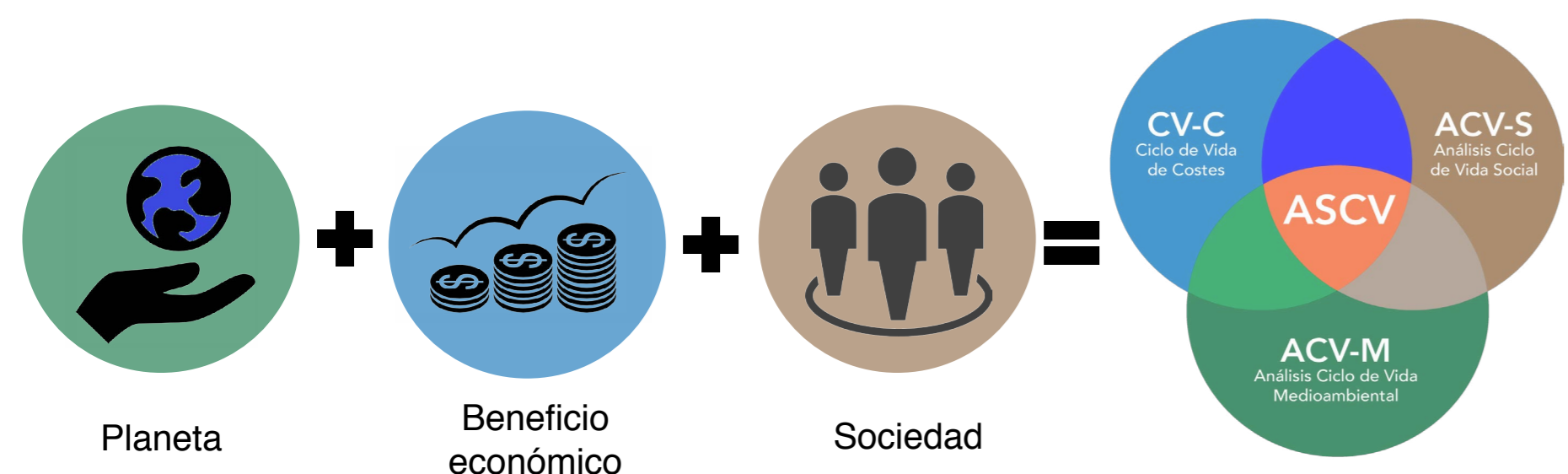
En la siguiente Figura se muestran las relaciones identificadas entre los ciclos de vida de ambos, producto y servicio.



Se ha aplicado la metodología de Análisis de la Sostenibilidad del Ciclo de Vida (ASCV) para evaluar las dimensiones medioambiental, económica y social de la sostenibilidad.

ASCV = ACV-M + CV-C + ACV-S.

En cada dimensión se han seleccionado una serie de indicadores para medir la sostenibilidad



### 3 CASO DE ESTUDIO

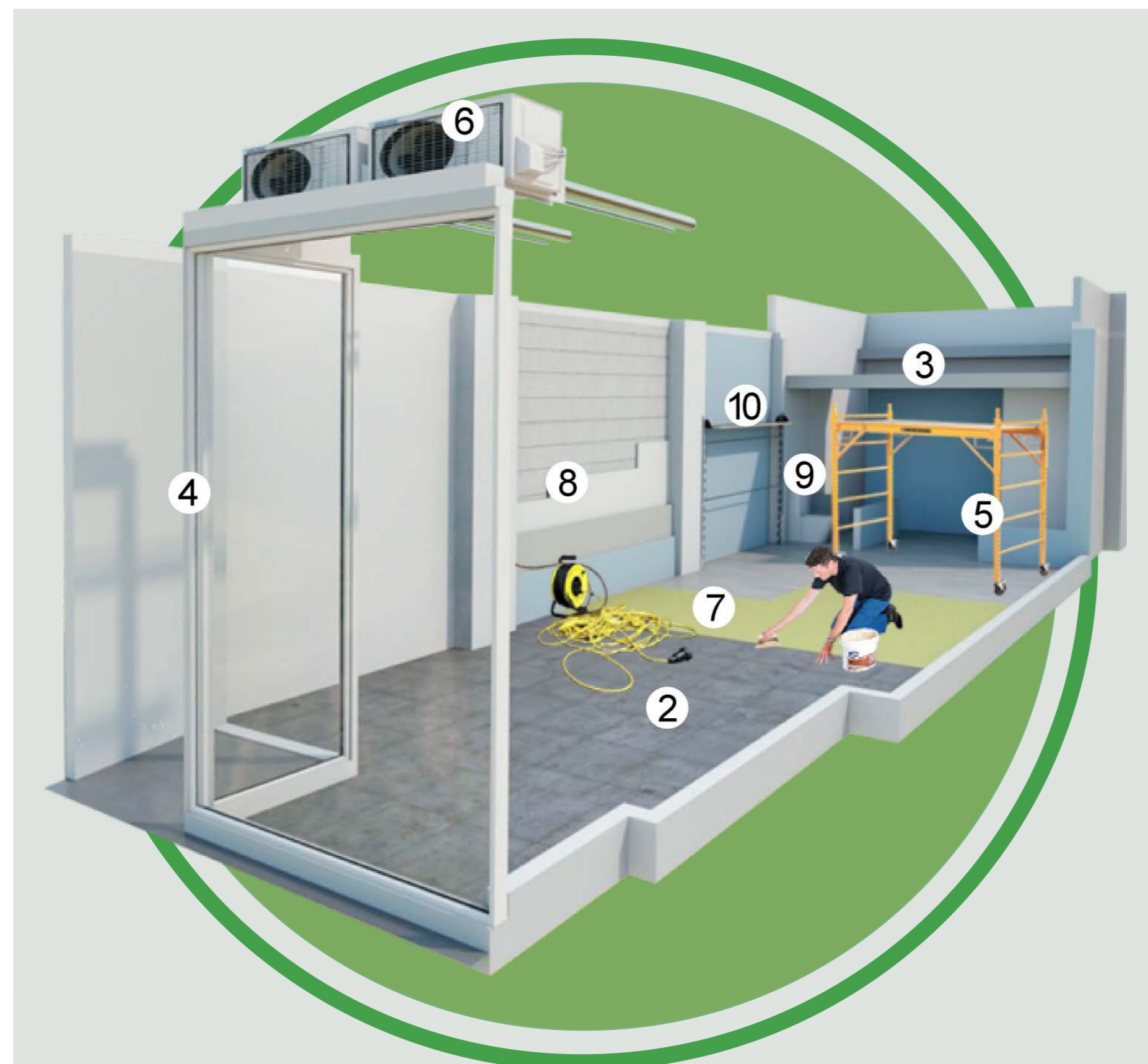
Se analiza un servicio de asesoramiento y venta de ropa al por menor para mujeres de un nivel adquisitivo medio-alto que se desarrolla en un local de 65 m<sup>2</sup> situado en el centro de una ciudad mediana.

#### 3.1 Objetivo y alcance

Dentro del ciclo de vida del servicio, el estudio se centra en la fase de implementación. En el proceso de creación del servicio están involucradas dos etapas del ciclo de vida de la tienda: producto y proceso de construcción. Se tienen en cuenta todas las actividades y materiales necesarios para la creación del servicio. La unidad funcional es 1 m<sup>2</sup>.

#### 3.2 Inventario

Las actividades se organizan en diez grupos. En cada caso, se determinan datos de consumo de energía y de emisiones de CO<sub>2</sub>, costes asociados a materiales, máquinas y mano de obra, trabajadores que intervienen en la fase de construcción, tiempos de trabajo y salarios



Creación de la tienda donde se va a desarrollar el servicio

#### INDICADORES DE SOSTENIBILIDAD:

##### Dimensión medioambiental:

GWP<sub>100</sub> (KgCO<sub>2</sub>-eq) - Potencial de Calentamiento Global  
GE (MJ) - Energía Global

##### Dimensión económica:

PEM (€) - Presupuesto de Ejecución Material  
EE (€/KgCO<sub>2</sub>-eq) - Eco-eficiencia

##### Dimensión Social:

Tt (h) - Tiempo de trabajo

#### ACTIVIDADES DE LA CREACIÓN:

1 Desmontaje  
2 Solera  
3 Estructura de altillo  
4 Fachadas  
5 Particiones  
6 Instalaciones  
7 Revestimientos  
8 Equipamiento  
9 Mobiliario  
10 Otros

#### ENTRADAS:

Materiales y energía

#### STAKEHOLDERS:

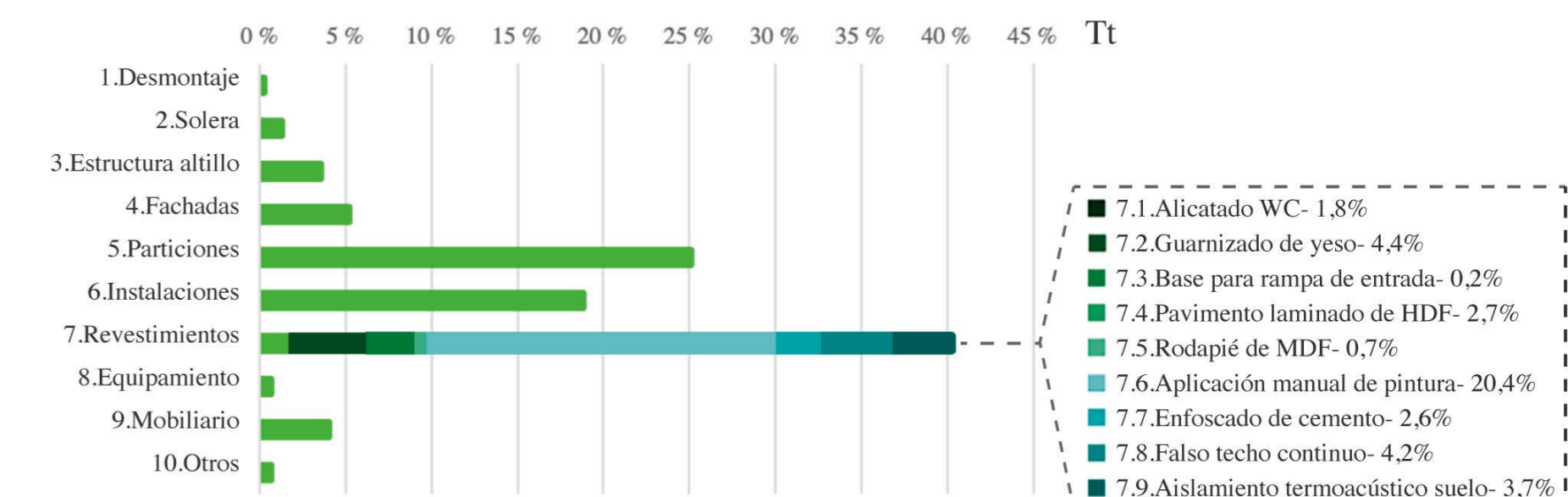
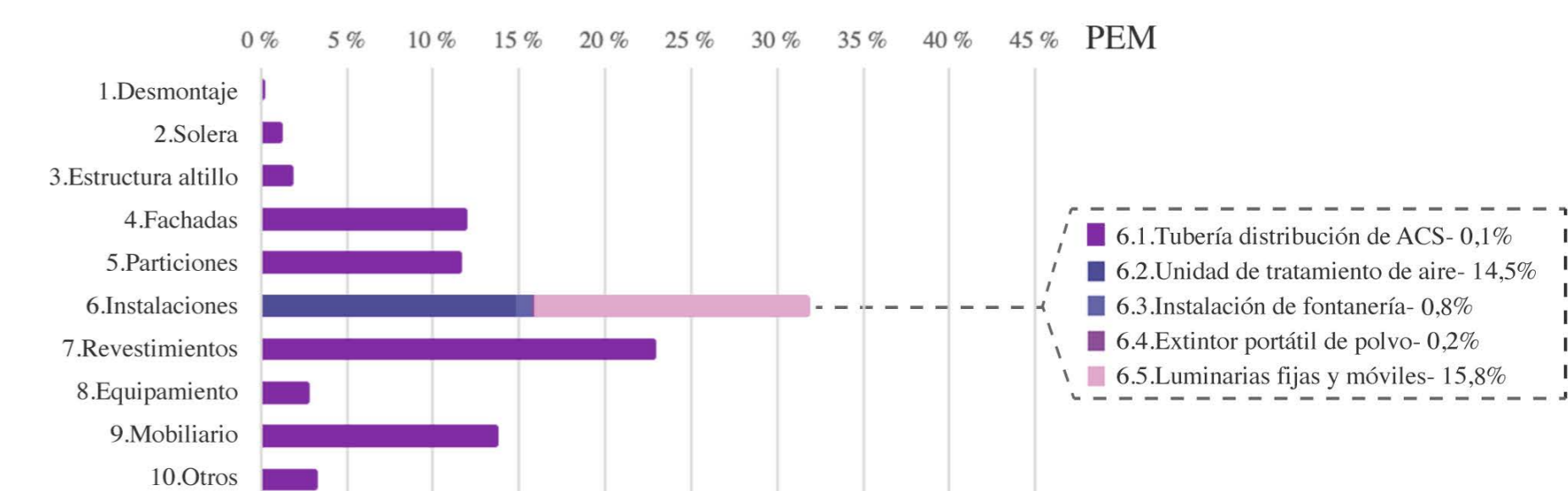
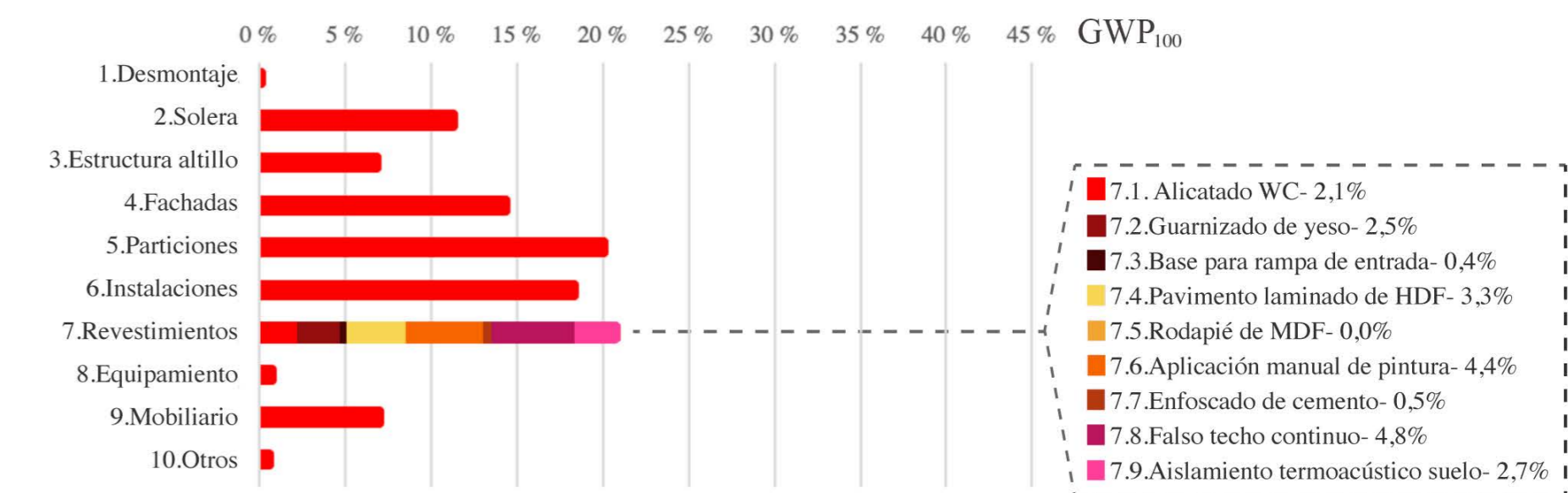
Trabajadores de la construcción

#### 3.3 Evaluación del impacto

Dimensión medioambiental		Dimensión económica		Dimensión social	
GWP <sub>100</sub> (kg CO <sub>2</sub> -eq/ m <sup>2</sup> )	GE (MJ/ m <sup>2</sup> )	PEM (€/ m <sup>2</sup> )	EE (€/kg CO <sub>2</sub> -eq)	Tt (h/ m <sup>2</sup> )	St (€/ m <sup>2</sup> )
111,7	1243,4	428,4	3,8	6,1	92,1

#### 3.4 Interpretación de los resultados

Los grupos de actividades asociadas a 5. Particiones, 6. Instalaciones y 7. Revestimientos acumulan más del 60% del impacto total en los indicadores de GWP<sub>100</sub> y PEM y más del 80% en el indicador Tt.



### 4 CONCLUSIONES

- Aplicando la metodología ACSV, se ha logrado evaluar la sostenibilidad de la fase implementación de un servicio de venta de ropa.
- La fase de implementación está estrechamente vinculada a la de construcción del local comercial donde se realizará el servicio.
- Se seleccionaron una serie de indicadores apropiados para evaluar cada dimensión de la sostenibilidad.
- Los resultados mostraron que las actividades asociadas a las particiones, instalaciones y revestimientos causaron el impacto más alto y deberían ser revisadas convenientemente para alcanzar una mejora efectiva de la sostenibilidad del SPS.

# SUSTAINABILITY ASSESSMENT IN THE IMPLEMENTATION PHASE OF A RETAIL SPACE

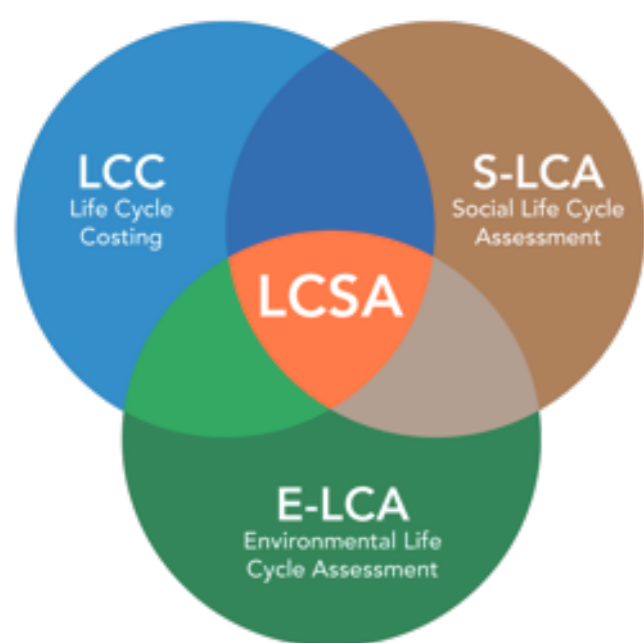
Natalia Muñoz López, José Luis Santolaya Sáenz, Anna Biedermann, Javier Molina Sanchez-Migallón

Department of Design and Manufacturing Engineering, María Luna 3, Zaragoza, 50018, Spain

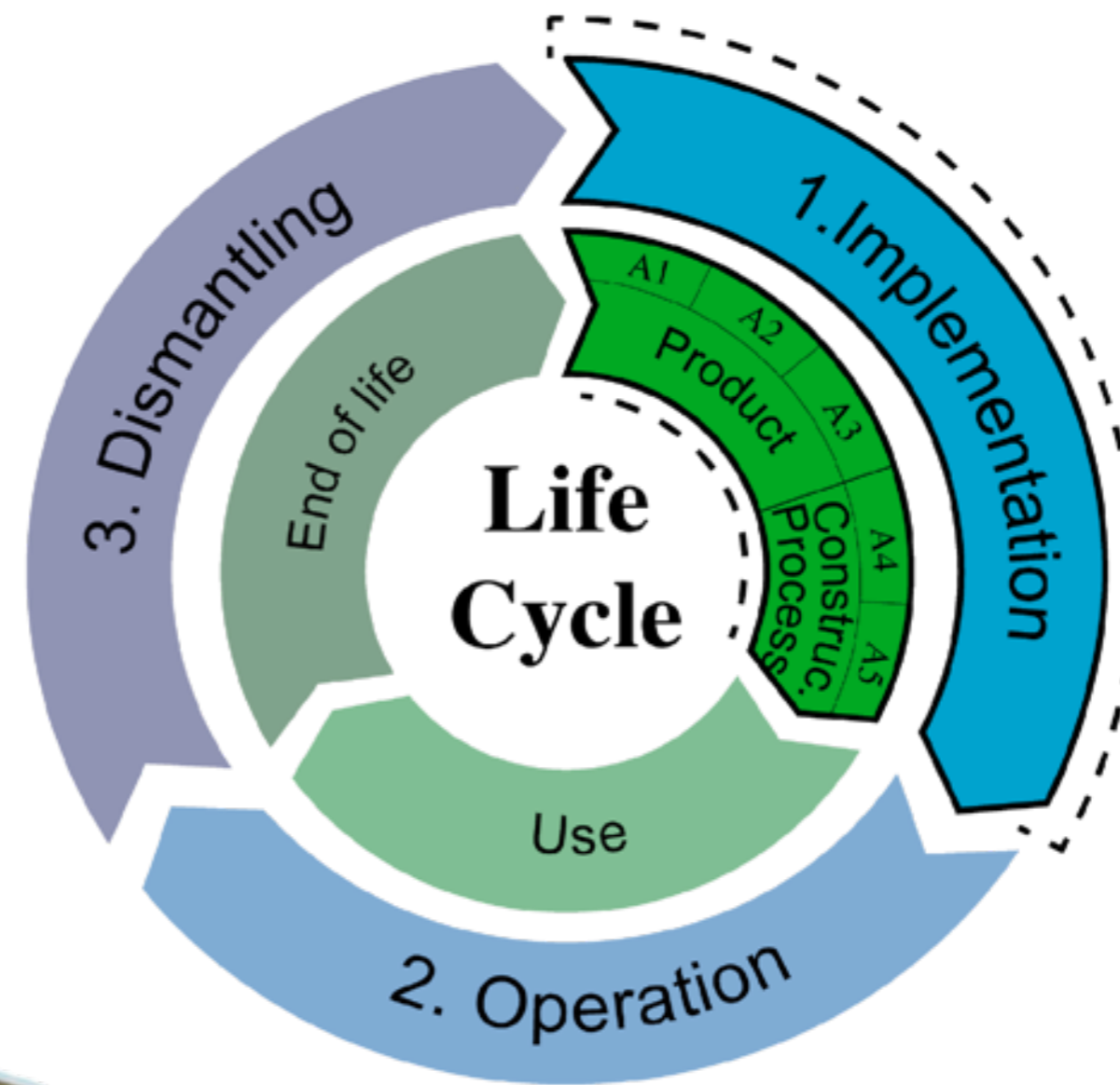
## 1 INTRODUCTION

- Companies and economic activities show a clear trend to provide from products to services
- The services are able to provide utility to consumers in the same way like the products
- Design methods that do not only focus on the environmental impacts associated to products are required

## 2 METHODOLOGY



In order to simultaneously evaluate environmental, economic and social dimensions of the sustainability, LCSA methodology was applied.  
LCSA = LCA + LCC + S-LCA.



The links between life cycle stages of service and product are identified. A construction product (the store) is developed in the service implementation stage.

- Service
- 1. Implementation
- Product
- A. Product and Construction process
- A1 - Raw materials extraction
- A2 - Transport to factory
- A3 - Manufacturing
- A4 - Transport
- A5 - Construction process

### SUSTAINABILITY INDICATORS:

#### Environmental dimension:

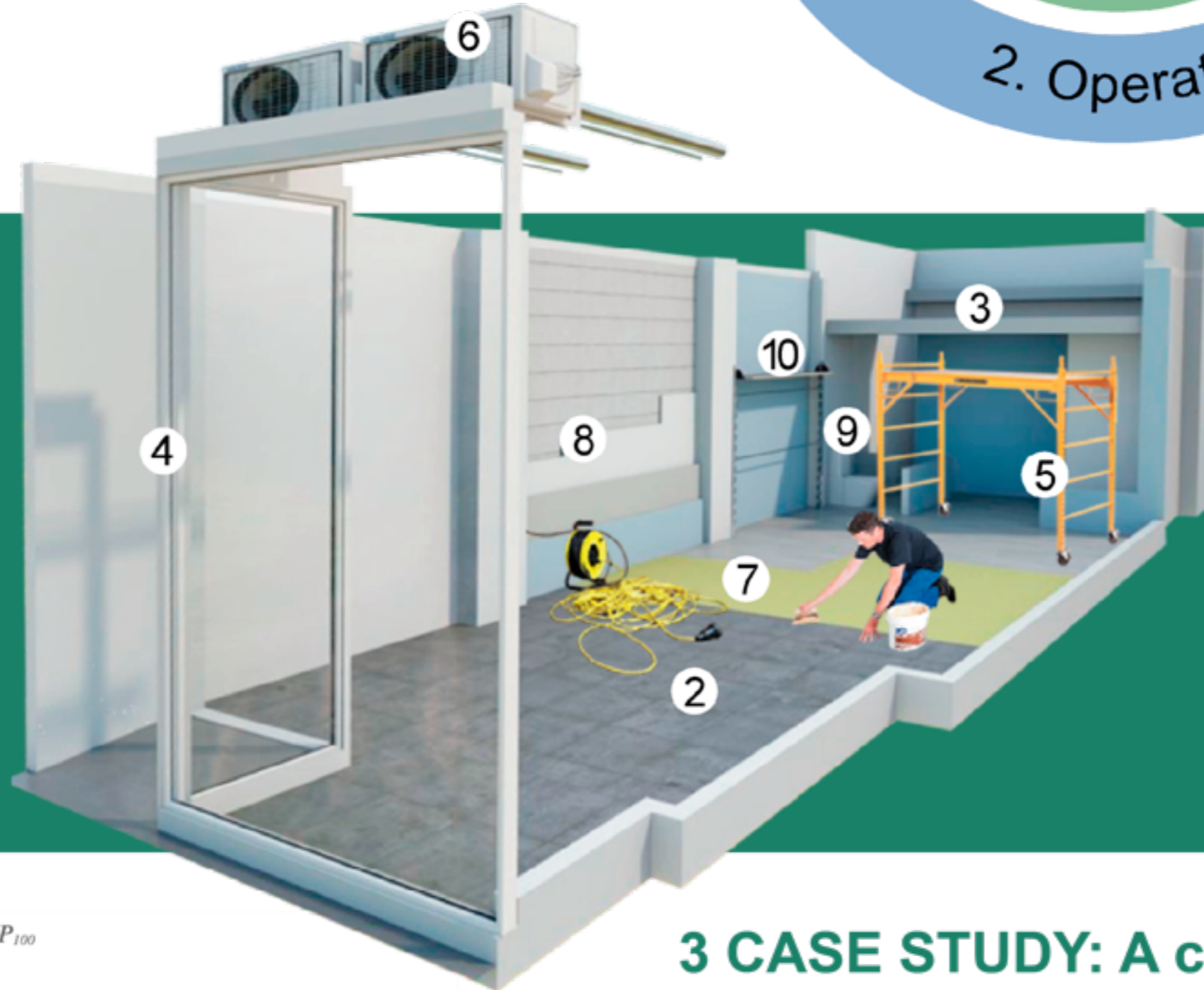
GWP<sub>100</sub> (KgCO<sub>2</sub>-eq) - Global Warming Potential  
GE (MJ) - Global Energy

#### Economic dimension:

BME (€) - Budget of Material Execution  
EE (€/KgCO<sub>2</sub>-eq) - Eco-efficiency

#### Social dimension:

Tw (h) - Working time  
Sw (€) - Salary of the workers



### ACTIVITIES IN CREATION SERVICE STAGE:

- |               |              |
|---------------|--------------|
| 1 Disassembly | 6 Facilities |
| 2 Base        | 7 Coatings   |
| 3 Loft fabric | 8 Equipment  |
| 4 Facades     | 9 Furniture  |
| 5 Partitions  | 10 Others    |

### INPUTS:

Material and energy

### STAKEHOLDERS:

Construction workers

## 3 CASE STUDY: A clothing retail service

Stages considered in the life cycle of the service: implementation, operation and dismantling.  
Stages considered in the life cycle of the clothing retail store: product, construction, use and end-of-life.

### 3.1 Goal and scope

The service implementation stage is established as system boundaries, taking into account all activities and materials required to create the service. Two stages in the life cycle of the clothing retail store: product and construction process, are involved in the service creation process. The functional unit is 1m<sup>2</sup>.

### 3.2 Inventory

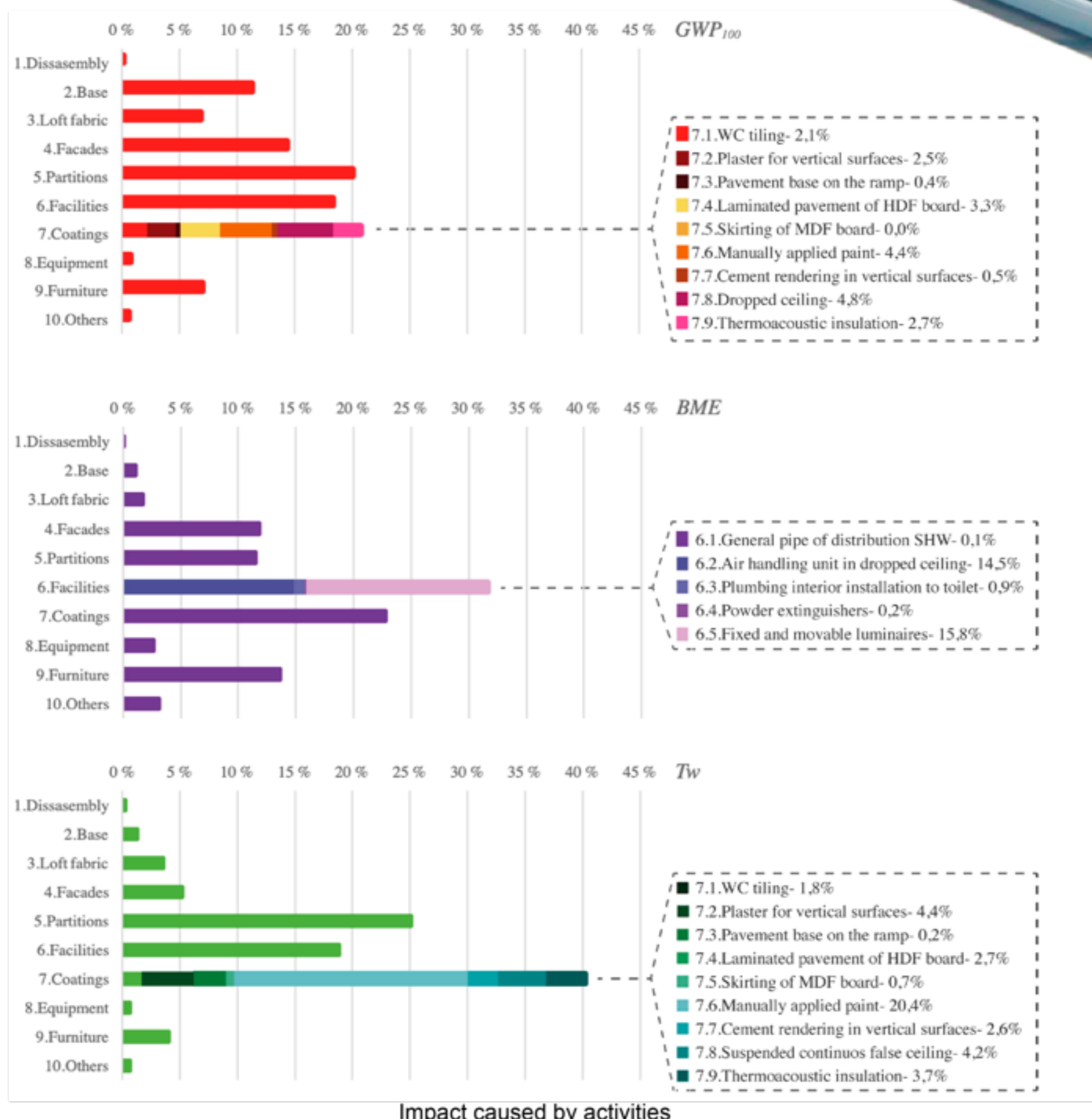
The following data are indicated for each activity: measurement and units, energy consumption for the A1-3 and A4-5 phases, workers number required in the A5 phase (construction process), working time and labour cost of the workers in this phase and finally, the total cost of each activity.

### 3.3 Impact assessment

Environmental dimension	Economic dimension		Social dimension			
	GWP <sub>100</sub> (KgCO <sub>2</sub> -eq/m <sup>2</sup> )	GE (MJ/m <sup>2</sup> )	BME (€/m <sup>2</sup> )	EE (€/KgCO <sub>2</sub> -eq)	Tw (h/m <sup>2</sup> )	Sw (€/m <sup>2</sup> )
	111,7	1243,4	428,4	3,8	6,1	92,1

### 3.4 Results interpretation

The activities associated to 5. Partitions, 6. Facilities and 7. Coatings accumulate more than 60% of the total impact in GWP<sub>100</sub> and BME indicators and more than 80% in Tw indicators.



## 4 CONCLUSIONS

- The sustainability of a clothing retail service was evaluated applying LCSA methodology in the implementation stage of the service.
- Links between the different life cycle stages of the service and construction product were identified.
- A set of appropriate indicators were selected to assess each sustainability dimension.
- Results showed that activities associated to Partitions, Facilities and Coatings accumulate the highest impact and should be conveniently reviewed to achieve an effective improvement of the PSS sustainability.

**PONENCIA NO PRESENCIAL**

XI CONGRESO  
LATINOAMERICANO  
DE ENSEÑANZA DEL  
**DISEÑO**

● **Natalia Muñoz López, Anna Biedermann  
Olalla Díez Pérez, José Luis Santolaya  
y Ana Serrano Tierz**

● *Diseñando soluciones más sostenibles:  
evaluación de sostenibilidad de un servicio cultural*

**27 • 28 • 29 DE JULIO DE 2020**

Inscripción gratuita:   

**[www.palermo.edu/congreso](http://www.palermo.edu/congreso)**



Facultad de Diseño  
y Comunicación

# **Diseñando soluciones más sostenibles: evaluación de sostenibilidad de servicio cultural**

Natalia Muñoz López, Anna Biedermann, Olalla Díez Pérez,  
José Luis Santolaya, Ana Serrano Tierz

## **Resumen**

El diseño con criterios sostenibles es actualmente aplicado no sólo a sistemas producto, sino también al diseño de servicios y Sistemas Producto-Servicio (SPS). En este trabajo, se evalúa la sostenibilidad de la etapa de implementación de un servicio cultural dedicado a la realización de exposiciones. Además de los aspectos medioambientales, se estudian aspectos económicos y sociales a través de un conjunto de indicadores apropiados. Se analizan todos los productos, actividades y procesos necesarios para acondicionar un espacio expositivo de 2500 m<sup>2</sup> en el que los visitantes puedan aprender y disfrutar del contenido de la exposición.

## **Contenido**

Los Sistemas Producto-Servicio (SPS) son actualmente objetivo de estudio por parte de diseñadores, investigadores y responsables de un amplio número de actividades económicas, ya que se presentan como soluciones prometedoras para alcanzar sistemas más sostenibles.

Evaluar impactos y analizar los factores que afectan la sostenibilidad de este tipo de sistemas es esencial para afrontar su diseño. Sin embargo, los métodos existentes para evaluar la sostenibilidad están principalmente orientados a producto y apenas son aplicados a otros sistemas. Y, en muchos casos, solo abordan los aspectos medioambientales, sin tener en cuenta un estudio simultáneo de las tres dimensiones que integran la sostenibilidad: ambiental, económica y social.

En este trabajo, se evalúa la sostenibilidad de la etapa de implementación de un servicio cultural dedicado a la realización de muestras y exposiciones. Para ello se utiliza el método de Análisis de la Sostenibilidad del Ciclo de Vida (ASCV). Se analizan todos los productos, actividades y procesos necesarios para crear un espacio expositivo de 2500 m<sup>2</sup> en el que los visitantes puedan aprender y disfrutar del contenido de la exposición.

Para evaluar cada una de las dimensiones de la sostenibilidad se han seleccionado y determinado un conjunto de indicadores: las emisiones de gases de efecto invernadero (indicador de calentamiento global) en la dimensión ambiental, el presupuesto de ejecución material en la dimensión económica y el tiempo de trabajo en la dimensión social. Dentro de los grupos de stakeholders que intervienen en esta etapa del ciclo de vida del servicio, se ha seleccionado la categoría de los trabajadores.

# Methodology of product sustainable redesign.

## Case study: furniture of a clothing retail store

---

Muñoz-López Natalia\*, Santolaya-Sáenz José Luis, Biedermann Anna

Department of Design and Manufacturing Engineering, University of Zaragoza,  
María de Luna 3, 50018, Zaragoza

\*nataliam@unizar.es

### **ABSTRACT**

Companies awareness of the impact generated by its products increases and motivates them to develop initiatives in order to improve their sustainability. In this work, a methodology consisting of three main phases: sustainability assessment, redesign process and comparison of designs, is proposed to obtain more sustainable product designs. Methodology is based on the Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA) approach, which is applied to simultaneously evaluate environmental, economic and social aspects. In addition, the sustainability improvement of the furniture of a clothing retail store is addressed. A set of indicators are considered to evaluate the sustainability performance of both initial design and redesign. The study concludes that the application of different sustainability strategies allows a significant enhancement of the environmental and economic indicators.

**KEYWORDS:** Sustainable design, Life Cycle Sustainability Assessment, Sustainability indicators





**Universidad**  
Zaragoza

