

**UNIVERSIDAD DE JAÉN**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y AUTOMÁTICA**  
**GRUPO IDEA**



# **TESIS DOCTORAL**

**DE LA CUNA-A LA-CUNA (C2C)-FV:  
CONTRIBUCIÓN AL ANÁLISIS E INTEGRACIÓN DE UN  
CICLO CERRADO DE MATERIALES PARA LA  
TECNOLOGÍA FOTOVOLTAICA**

**AUTOR: RUBÉN ENRIQUE CONTRERAS LISPERGUER**

**DIRECTORES: DR. JUAN DE LA CASA HIGUERAS  
DR. EMILIO MUÑOZ CERÓN**

**DISERTACIÓN PRESENTADA PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE  
DOCTOR EN ENERGÍAS RENOVABLES**

JAÉN 2020

**UNIVERSIDAD DE JAÉN**  
**ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE JAÉN**

**TESIS DOCTORAL: De la Cuna-a la-Cuna (C2C)-FV: Contribución al análisis e integración de un ciclo cerrado de materiales para la tecnología fotovoltaica.**

*Autor:* **Rubén Enrique Contreras Lisperguer**

*Directores:* **Dr. Juan De La Casa Higuera**  
**Departamento de ingeniería electrónica y automática**

**Dr. Emilio Muñoz Cerón**  
**Departamento de Ingeniería Gráfica, Diseño y Proyectos**

**TRIBUNAL ENCARGADO DE JUZGAR LA TESIS DOCTORAL:**

**PRESIDENTE:** **Dr.**  
Catedrático. \_\_\_\_\_

**VOCALES:** **Dr.**  
Catedrático. \_\_\_\_\_

**Dr.**  
Catedrático. \_\_\_\_\_

**Dr.**  
Catedrático. \_\_\_\_\_

**SECRETARIO:** **Dr.**  
Profesor titular. Universidad de Jaén

**SUPLENTE:** **Dr.**  
Profesor titular. \_\_\_\_\_

**Dr.**  
Profesor titular. \_\_\_\_\_

**Acuerda otorgar la calificación de \_\_\_\_\_**

**Jaén, a \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de 2020**

# DECLARACIÓN

Esta Tesis Doctoral es el resultado de mi propio trabajo y no incluye nada realizado en colaboración con terceros. Además, esta tesis no ha sido presentada previamente, en parte o en su totalidad, a ninguna universidad o institución académica para obtener un título, diploma u otra calificación.

Ruben Enrique Contreras Lisperguer



Signature/Firma

*a mi madre y padre  
a mis hij@s  
a tod@s los que me Aman  
a tod@s los que Amo  
a tod@s los que me han ayuda a cruzar este largo sendero*

“Humankind cannot gain anything without first giving something in return. To obtain, something of equal value must be lost. That is Alchemy’s First Law of Equivalent Exchange.”

" El hombre no puede obtener nada sin antes dar algo a cambio. Para crear, algo de igual valor debe darse a cambio. Esa es la primera ley de la Alquimia, la ley del Intercambio equivalente.".

*Edward Elric*

¡Sí, conozco a mis enemigos!  
¡Son aquellos que me enseñaron a luchar contra mí!  
¡Ignorancia! ¡Hipocresía! ¡Sumisión! ¡Conformidad! ¡Brutalidad!  
¡Represión! ¡Asimilación! ¡Concesión! ¡La élite!  
¿Cuánto tiempo?  
No demasiado  
Porque lo que tú cosechas es lo que siembras

Yes, I know my enemies!  
They're the teachers who taught me to fight me!  
Ignorance! Hypocrisy! Submission! Conformity! Brutality!  
Repression! Assimilation! Compromise! The elite!  
How long?  
Not long  
Because what you reap is what you sow

*Zack de la Rocha*

# AGRADECIMIENTOS

Realizar el doctorado ha representado años de constante esfuerzo y lucha. En muchos momentos pensé en abandonar todo. Las horas en que estuve lejos de quienes amo, los momentos perdidos en el tiempo que no volverán. Nadie es culpable, excepto yo. Y a pesar de todo, existía algo impulsándome, un extraño deseo invisible al ojo humano...y continué...a pesar de todo. En este momento, *en mi actual presente*, sentado frente al computador escribo las líneas finales de un largo viaje.

Tal vez, es solamente la ilusión de que mi vida es más que una simple gota de lluvia cayendo en un océano... la ilusión de trascender.

Agradezco profundamente a mis padre, madre, hij@s y tod@s los que me aman y han apoyado en este proceso.

Nada de esto habría sido posible sin el gran apoyo de mi Tutor y Directores de Tesis. Gracias por creer en mí.

Me gustaría extender mi más sincero agradecimiento a Ricardo Díaz Martín, quien me brindó su apoyo desde mis inicios en esto de realizar un Doctorado.

Quisiera además agradecer la invaluable contribución de mis amigos y colegas Neil MacDonald, de la Agencia Internacional de Energía Renovable (IRENA) y Julia Lindberg, de la Universidad de Florida, por todo su apoyo, tanto técnico como en la mejora de la redacción de los artículos en inglés.

Para finalizar, quiero agradecer a mis sueños...por mantenerme vivo.

**A TOD@S GRACIAS**

# RESUMEN

La fabricación de productos, bienes y tecnología en general está actualmente dominada por un proceso industrial lineal que se inicia con la extracción de las materias primas para luego generar un producto, el cual siempre termina siendo depositado en un vertedero una vez que su ciclo de vida útil ha finalizado. Este paradigma actualmente domina nuestro modelo económico-social, y es conocido como de la *Cuna a la Tumba* o *Cradle-to-Grave* (C2G). Dentro de este escenario, la industria fotovoltaica no es la excepción. En las próximas décadas millones de toneladas de paneles fotovoltaicos van a alcanzar el fin de su vida operativa, convirtiéndose en un desafío ambiental, debido a que pueden potencialmente terminar como basura en un vertedero, perdiendo todo el valor positivo que tuvieron durante su vida operativa. Particular atención debe ser puesta en la tecnología fotovoltaica que domina actualmente el mercado mundial, la tecnología de Panel Fotovoltaico de Silicio Cristalino (PFV-SiC).

Por otro lado, existe una nueva propuesta de modelo de fabricación llamado de la *Cuna a la Cuna* o *Cradle-to-Cradle* (C2C), el cual busca reproducir el ciclo regenerativo de la naturaleza en el que los residuos se reutilizan (p. ej. un animal muere y crea residuos, esos residuos se descomponen y se convierten en nutrientes para otro proceso) (McDonough and Braungart 2000). Esta filosofía asegura –según sus autores- la posibilidad de continuar con nuestro actual modelo económico sin afectar el medioambiente (McDonough and Braungart 2002), y ha generado un gran interés en diversos sectores empresariales y académicos, tanto de Europa, como EE. UU. Particular interés ha surgido por parte de diseñadores, arquitectos e industriales, debido a la innovadora propuesta de continuar con los actuales niveles de producción y consumo, pero, sin dañar el medioambiente. Sin embargo, a la fecha, la filosofía C2C no pasa de ser un mero concepto filosófico que carece de una base tanto matemática como termodinámica. Esta realidad limita su aplicabilidad en la academia y la industria moderna.

Este Tesis Doctoral introduce un marco teórico original basado en principios matemáticos y termodinámicos, donde se ha definido la aplicabilidad y limitaciones teóricas de la filosofía C2C para un *Ciclo-Cerrado de Materiales* (CCM), cuyos resultados se aplicaron al estudio del flujo del Silicio (*Si*) utilizado en la tecnología de PFV-SiC. Para ello, se define y propone una escala espacial y temporal adecuada para un sistema CCM, y se introduce el concepto de *tiempo-circular* y sus diferentes componentes. Además, en base

a principios de la termodinámica se propone el límite teórico para la separación de materiales en un PFV-*SiC* diseñado según los principios de la filosofía C2C, encontrándose que el trabajo mínimo de separación de materiales puede teóricamente llegar a “cero” bajo ciertas condiciones.

Establecido el marco teórico, se introduce un método numérico que soluciona el sistema de CCM, basado en principios C2C (C2C-CCM) para un flujo de materiales unidimensional (1-D) de *Si* utilizado en la fabricación de PFV-*SiC*. Esto permite introducir una nueva teoría e identificar los desafíos más relevantes para implementar un sistema C2C-CCM. Finalmente, se discute la aplicabilidad de la metodología de análisis de *ciclo de vida* (ACV) en PFV-*SiC* diseñados según la filosofía C2C, enfocada en la recuperación de *Si*. Para ello, se construyen y comparan dos escenarios utilizando la metodología de evaluación ACV. El primer escenario evalúa los impactos ambientales de la tecnología PFV-*SiC* en un sistema de *Ciclo-Abierto de materiales* (CAM), mientras que en el segundo escenario se considera la tecnología de reciclaje disponible para PFV-*SiC* utilizada al *final de su vida útil* (EoL, por sus siglas en inglés). Utilizando datos experimentales de fuentes secundarias se modela, en lo posible, un sistema de CCM para los PFV-*SiC*.

Los resultados muestran que un sistema CCM es favorable para el medioambiente. Sin embargo, estos señalan la urgencia en reducir el impacto medioambiental de los actuales procesos termoquímicos utilizados para recuperar el *Si* y empezar a considerar el papel clave de la filosofía C2C para el diseño adecuado de los PFV-*SiC* con el fin de cerrar el ciclo de materiales sin dañar el ambiente y la salud humana. En conclusión, para lograr que la tecnología fotovoltaica sea totalmente sostenible se requieren normas y regulaciones coherentes y basadas en evidencias.

La presente Tesis Doctoral entrega los primeros lineamientos teóricos sobre un modelo de producción que se espera ayudará a avanzar hacia una tecnología fotovoltaica más sostenible a futuro.

# ABSTRACT

The manufacturing of products, goods and technology in general is currently dominated by a linear industrial process that begins with the extraction of raw materials and then generates a product, which always ends up being deposited in a landfill once its useful life cycle has ended. This paradigm currently dominates our economic-social model and is known as *Cradle-to-Grave* (C2G). Within this scenario, the photovoltaic industry is no exception. In the next decades millions of tons of photovoltaic panels will reach the end of their operational life, becoming an environmental challenge, because they can potentially end up as garbage in a landfill, losing all the positive value they had during their operational life. Particular attention should be paid to the photovoltaic technology that currently dominates the global market, the Crystalline Silicon Photovoltaic Panel (CSi-PV) technology.

On the other hand, there is a new model known as *Cradle to Cradle* (C2C), which has generated great interest in various business and academic sectors, both in Europe and the USA. Particular interest has emerged from designers, architects and industry, due to the innovative proposal to continue with current levels of production and consumption, but without damaging the environment. However, to date, the C2C philosophy is no more than a mere philosophical concept that lacks both a mathematical and thermodynamic basis. This reality limits its applicability in both academia and modern industry.

This Ph.D. Thesis introduces a novel theoretical framework based on mathematical and thermodynamic principles, where the applicability and theoretical limitations of the C2C philosophy for a *Closed-Loop-Material-Cycle* (CLMC) have been defined, whose results were applied to the study of Silicon (*Si*) flow used in CSi-PV technology. To this end, a spatial and temporal scale suitable for a C2C system is defined and proposed, and the concept of circular time and its different components is introduced. Furthermore, based on thermodynamic principles, the theoretical limit for material separation for a CSi-PV designed following C2C philosophy principles is proposed, finding out that the minimum material separation work can theoretically reach "zero" under specific conditions.

Having established the theoretical framework, a numerical method is introduced to solve a CLMC system, based on C2C principles (C2C-CLMC) for one-dimensional (1-D) flow of *Si* materials used in the manufacture of CSi-PV. This enables the introduction of a new theory and the identification of the most relevant challenges to implement a C2C-

CCM system. Finally, the suitability of the Life Cycle Assessment (LCA) methodology in CSi-PV designed under the C2C philosophy principles is discussed, focused on Si recovery is discussed. To this end, two scenarios are constructed and compared using the LCA assessment methodology. The first scenario assesses the environmental impacts of the CSi-PV technology in an *Open-Material-Cycle* (OMC) system, while a second scenario considers the currently available recycling technology for CSi-PV used at the End-of-Life (EoL). Relying in experimental data from secondary sources, an OMC system for CSi-PV is modeled, where possible.

The results reveal that an OMC system is environmentally friendly. However, they point out to the urgency in reducing the environmental impact of the current thermochemical processes used to recover Si and to start considering the key role of the C2C philosophy for the proper design of CSi-PV in order to close the materials cycle without harming the environment and human health. In conclusion, making PV technology fully sustainable requires consistent and evidence-based standards and regulations.

This Ph.D. Thesis provides the first theoretical guidelines on a production model that is expected to help move towards a more sustainable photovoltaic technology in the future.

# ÍNDICE GENERAL / INDEX

<b>Índice General / Index</b> .....	10
<b>Índice de figuras</b> .....	13
<b>Índice de tablas</b> .....	15
<b>Lista de Acrónimos</b> .....	16
<b>Lista de Símbolos</b> .....	18
<b>Estructura de la tesis</b> .....	20
<b>Parte I                    Disertación</b> .....	22
1 INTRODUCCIÓN.....	23
1.1 SITUACIÓN ACTUAL DEL MERCADO FOTOVOLTAICO .....	23
1.2 JUSTIFICACIÓN .....	28
1.3 HIPÓTESIS Y OBJETIVOS DE LA TESIS DOCTORAL.....	31
2 ANTECEDENTES .....	34
2.1 HACIA UN NUEVO PARADIGMA ECONÓMICO-INDUSTRIAL.....	34
2.2 DE LA CUNA A LA TUMBA (C2G) Y DE LA CUNA A LA CUNA (C2C): SU DEFINICIÓN Y PRINCIPIOS.....	37
2.2.1 DE LA CUNA A LA TUMBA.....	38
2.2.2 DE LA CUNA A LA CUNA .....	39
2.2.3 HERRAMIENTAS DE EVALUACIÓN: CERTIFICACIÓN C2C VERSUS ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA (ACV).....	42
2.3 CERRANDO EL FLUJO DE MATERIALES: PRINCIPALES DESAFÍOS.....	45
2.3.1 RECICLAJE DE PANELES FOTOVOLTAICOS Y SUS DESAFÍOS.....	46
2.4 EL ROL DE LA LOGÍSTICA INVERSA .....	50
2.5 MARCO POLÍTICO QUE FOMENTE UN CAMBIO DE PARADIGMA .....	52
3 FUNDAMENTO TEÓRICO .....	54
3.1 MODELO CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE FLUJO CERRADO DE MATERIALES BASADO EN PRINCIPIOS C2C .....	54
3.2 ESCALA DE ESPACIO-TIEMPO DE UN SISTEMA DE FLUJO CERRADO DE MATERIALES	57

3.3	IMPLICACIONES TERMODINÁMICAS Y ENERGÉTICAS DE UN SISTEMA DE FLUJO CERRADO DE MATERIALES .....	61
3.3.1	SEPARACIÓN DE LOS MATERIALES EN UN PRODUCTO C2C .....	62
3.4	FUNDAMENTOS PARA EL MODELAMIENTO DE UN SISTEMA DE FLUJO CERRADO DE MATERIALES.....	66
3.4.1	ESTIMACIÓN DE LA ESCALA TEMPORAL DE UN SISTEMA DE FLUJO CERRADO DE MATERIALES: TIEMPO CIRCULAR.....	68
3.5	PRINCIPIOS Y MODELO TEÓRICO MATEMÁTICO DE UN SISTEMA DE FLUJO CERRADO DE MATERIALES.....	70
3.6	SOLUCIÓN NUMÉRICA DEL MODELO TEÓRICO MATEMÁTICO DE UN SISTEMA DE FLUJO CERRADO DE MATERIALES .....	72
3.6.1	ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DEL ESQUEMA NUMÉRICO .....	73
4	CASO DE APLICACIÓN: ANÁLISIS DEL FLUJO DE SI DE UN PVF-SiC EN UN SISTEMA C2C-CCM .....	76
4.1	SUPOSICIONES PRELIMINARES .....	77
4.2	CONDICIONES INICIALES Y DE BORDE.....	77
4.3	ESTIMACIÓN DE TD PARA UN PANEL FOTOVOLTAICO CRISTALINO .....	80
4.4	RESULTADOS DEL EXPERIMENTO NUMÉRICO .....	81
4.4.1	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DEL EXPERIMENTO NUMÉRICO MEDIANTE EL USO DEL MÉTODO DE ENSAMBLADOS .....	87
5	FIN DE LA VIDA ÚTIL DE UN PANEL FOTOVOLTAICO DE SILICIO CRISTALINO: ANÁLISIS DE ESCENARIOS .....	89
5.1	APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DURANTE EL FIN DE LA VIDA ÚTIL DE UN PANEL FOTOVOLTAICO DE SILICIO CRISTALINO.....	90
5.2	ESTADO DEL ARTE DE LOS ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LAS ALTERNATIVAS DE RECICLAJE DE PANELES FOTOVOLTAICOS DE SILICIO CRISTALINO AL FINAL DE SU VIDA ÚTIL .....	90
5.3	EVALUACIÓN COMPARATIVA DEL CICLO DE VIDA DE PANELES FOTOVOLTAICOS CRISTALINOS EN EL FIN SU VIDA ÚTIL: <i>ESCENARIOS DE CICLO DE MATERIALES ABIERTO Y CERRADO</i> .....	93
5.3.1	METODOLOGÍA .....	94
5.3.2	OBJETIVO, ALCANCE Y UNIDAD FUNCIONAL .....	95



# ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 PRECIOS MEDIOS MENSUALES DE LOS PANELES FOTOVOLTAICOS SOLARES EUROPEOS POR TECNOLOGÍA Y FABRICANTE - 2010 A 2017. FUENTE: ADAPTADO DE IRENA 2019B.....	24
FIGURA 2 INVERSIÓN ANUAL POR TECNOLOGÍA EN MILES DE MILLONES DE USD- 2004 A 2017.....	25
FIGURA 3 ESTIMACIÓN DEL VOLUMEN DE BASURA GLOBAL ACUMULADA AL FINAL DE LA VIDA ÚTIL DE UN PANEL FOTOVOLTAICO .....	28
FIGURA 4 FLUJO LINEAL DE MATERIALES SIMPLIFICADO EN UN SISTEMA C2G .....	38
FIGURA 5 FLUJO SIMPLIFICADO EN UN SISTEMA C2C .....	40
FIGURA 6 CICLO CERRADO DE MATERIALES SIMPLIFICADO (CONTRERAS LISPERGUER ET.AL. 2017) .....	56
FIGURA 7 PRIORIDAD ACTUAL DE LOS PROCESO EN UN SISTEMA C2G VERSUS EL ENFOQUE DE C2C (CONTRERAS LISPERGUER ET. AL. 2017).....	57
FIGURA 8 ESCALA ESPACIAL Y TEMPORAL PARA LOS SIGUIENTES PRODUCTOS: ELC: ELECTRÓNICA (DISTRIBUCIÓN INTERNACIONAL), ORDENADORES; LHC: ELECTRODOMÉSTICOS LOCALES; IHC: ELECTRODOMÉSTICOS INTERNACIONALES; LM: MEDIOS LOCALES (EN PAPEL); IM: MEDIOS DE COMUNICACIÓN INTERNACIONALES (BASADOS EN PAPEL); LFP: ENVASADO LOCAL DE ALIMENTOS; IFP: ENVASADO INTERNACIONAL DE ALIMENTOS Y PV: PANELES FOTOVOLTAICOS CRISTALINOS (DISTRIBUCIÓN INTERNACIONAL). ADAPTADO DE CONTRERAS-LISPERGUER ET.AL 2017 .....	59
FIGURA 9 SISTEMA DE CICLO CERRADO DE MATERIAL 1-D A SER MODELADO EN EL EXPERIMENTO NUMÉRICO.....	76
FIGURA 10 SERIE TEMPORAL DEL PORCENTAJE DE DENSIDAD EN CADA NODO DE $T=0$ A $T=35$ AÑOS (EN EL EJE HORIZONTAL SUPERIOR DEL GRÁFICO) Y EN SEGUNDOS COMO UNIDAD DE TIEMPO INTERNACIONAL ESTÁNDAR (SI) EN EL EJE HORIZONTAL INFERIOR DEL GRÁFICO.....	82
FIGURA 11 SERIES TEMPORALES DEL PORCENTAJE DE DENSIDAD EN CADA NODO DE $T=0$ A $T=110$ AÑOS (EN EL EJE HORIZONTAL SUPERIOR DEL GRÁFICO) Y EN SEGUNDOS COMO UNIDAD INTERNACIONAL DE TIEMPO (SI) ESTÁNDAR EN EL EJE HORIZONTAL INFERIOR DEL GRÁFICO.....	84

FIGURA 12 RESULTADOS DE LOS <i>ENSAMBLADOS</i> PARA DIFERENTES $T_d$ (5, 10, 15, 20, 25, Y 30 AÑOS).....	88
FIGURA 13 CONDICIONES LÍMITE DEL ACV PARA EL ESCENARIO EoL DEL SISTEMA-DE-CICLO-ABIERTO-DE-MATERIALES .....	96
FIGURA 14 CONDICIONES LÍMITES DEL ACV PARA EL ESCENARIO EoL DEL SISTEMA DE CICLO-CERRADO-DE-MATERIALES.....	97
FIGURA 15 COMPARACIÓN DE LOS IMPACTOS NORMALIZADOS POR CADA CATEGORÍA EN LOS ESCENARIOS DE CICLO ABIERTO Y CERRADO .....	104
FIGURA 16 APORTACIÓN DE LOS DIFERENTES PROCESOS A LAS CATEGORÍAS SELECCIONADAS PARA EL ESCENARIO DE CICLO CERRADO.....	105
FIGURA 17 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LAS CATEGORÍAS DE IMPACTO NORMALIZADAS PARA LOS ESCENARIOS DE POTENCIA PARA EL SISTEMA CAM Y CCM AL EoL .....	107

# ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1 RESUMEN DE LA LITERATURA CIENTÍFICA SOBRE LOS PRINCIPALES ICV Y ACV DE LAS TECNOLOGÍAS DE RECICLAJE FOTOVOLTAICO .....	92
TABLA 2 VENTAJAS DE UN CICLO CERRADO DE MATERIALES (CCM) BASADO EN LOS PRINCIPIOS C2C .....	93
TABLA 3 RESUMEN DE LA DESCOMPOSICIÓN EN MASA DE UNA UF OBTENIDA DURANTE EL RECICLADO DEL PANEL DESMANTELADO (ADAPTADO DE LATUNUSSA ET.AL 2106) ....	98
TABLA 4 RESUMEN DEL ICV EN AMBOS ESCENARIOS (EXCLUYENDO DATOS DE LA BASE DE DATOS DE ECOINVENT) .....	101
TABLA 5 RESUMEN DE LAS CATEGORÍAS Y UNIDADES DE LA METODOLOGÍA DE IMPACTO DE PUNTO MEDIO DE ReCiPe.....	102
TABLA 6 CONTRIBUCIÓN TOTAL DEL TRANSPORTE A LAS CATEGORÍAS DE IMPACTO PARA EL ESCENARIO DE CICLO CERRADO DE MATERIALES (SE MANTUVO LA NOMENCLATURA UTILIZADA POR EL PROGRAMA SIMAPRO).....	105
TABLA 7 CONTRIBUCIÓN ESTIMADA EN ALGUNAS DE LAS CATEGORÍAS DE MAYOR IMPACTO PARA EL ESCENARIO DEL CICLO CERRADO DE MATERIALES A PARTIR DE: A) LA INCINERACIÓN DEL SÁNDWICH FOTOVOLTAICO Y LA ELIMINACIÓN DE CENIZAS VOLANTES Y B) EL TAMIZADO, LA LIXIVIACIÓN ÁCIDA, LA ELECTRÓLISIS Y LA NEUTRALIZACIÓN.....	106

# LISTA DE ACRÓNIMOS

ACV: Análisis de Ciclo de Vida

Ag: Plata

Al: Aluminio

C2C: Cradle-to-Cradle

C2G: Cradle-to-Grave

CAM: Ciclo Abierto de Materiales

CC: Climate change

CCM: Ciclo Cerrado de Materiales

CE: Circular Economy

CLMC: Closed Loop Material Cycle

CO<sub>2</sub>: Carbon Dioxide

Cu: Cobre

DSD: Department of Sustainable Development

EJ: exajulios

ELC: Electronics

EoL: End-of-life

EU: European Union

EVA: acetato de etileno y vinilo (EVA, por sus siglas en inglés)

FFD: Fossil fuel depletion

GW: Giga-Watt

HT: Human toxicity

ICV: Inventario de Ciclo de Vida

IFP: International food packaging

IHC: International household appliances

IM: International media (paper-based)

IR: Ionizing radiation

IRENA: International Renewable Energy Agency

KWh: Kilowatt Hora

LCA: Life Cycle Assessment

LFP: Local food packaging

LHC: Local household appliances

LM: Local media (paper-based)

MBDC: McDonough Braungart Design Chemistry

Mt: Millón de toneladas

MD: Metal depletion

OAS: Organization of American States

OMC: Open-Material-Cycle

OZ: Ozone depletion

PFV-SiC: Panel fotovoltaico de silicio cristalino

PMF: Particulate matter formation

POF: Photochemical oxidant formation

PV: Photovoltaic

RPANR: Recursos-Primarios-Abióticos-No-Renovables

SDG: Sustainable Development Goal

*Si*: Silicio

$T_c$ : Tiempo circular

$T_d$ : Tiempo de duración

TET: Terrestrial ecotoxicity

$T_{ind}$ : Tiempo industrial

$T_{rr}$ : Tiempo necesario para el retiro y recuperación de los paneles

$T_{rs}$ : Tiempo que los materiales recuperados pasarán en el reservorio

TWh: Tera Watt hora

UE: Unión Europea

UF: Unidad Funcional

WBCSD: World Business Council for Sustainable Development

WEEE: Waste Electrical and Electronic Equipment Directive

# LISTA DE SÍMBOLOS

- $\partial$ : Derivada parcial
- $\rho$ : Densidad material de RPANR en términos de  $\rho$  por unidades de longitud
- $\beta$ : Parámetro función de Weibull
- $\alpha$ : Parámetro función de Weibull
- $R(t)$ : Función de confiabilidad
- $\Omega$ : diagrama basada en la teoría de gráficos
- $\mathbf{Y}$ : Vector de velocidad tridimensional
- 1-D: Sistema unidimensional
- $\mu_{pi}$ : Potencial químico
- $P$ : Presión,
- $L$ : Longitud total del sistema
- $f(t)$ : Función de densidad de probabilidad
- $F(t)$ : Función de distribución acumulativa
- $dN_i$ : Número diferencial para el conjunto completo de moles en  $i$
- $\mathcal{N}$ : Conjunto finito de Nodos
- $\Lambda$ : Conjunto finito de arcos
- $A_m$ : Energía total libre de Helmholtz de la mezcla original
- $A$ : Energía libre de Helmholtz
- 3R: Reusar, Reducir, Reciclar
- $\mu_{pi}$ : Potencial químico de los materiales puros
- $\nabla$ : Operador Nabla
- $\Delta x$ : Delta de  $x$ , representa la variación del movimiento en  $x$
- $\Delta t$ : Delta de  $t$ , representa la variación del movimiento en  $t$
- $\frac{\partial}{\partial x}$ : Derivada parcial con respecto a  $x$
- $\frac{\partial}{\partial t}$ : Derivada parcial con respecto a  $t$
- $\tilde{\rho}$ : Densidad material promedio de RPANR en términos de  $\tilde{\rho}$  por unidades de longitud
- $\delta W_s$ : Trabajo del eje rodante
- $\delta W_{rev}$ : Trabajo isotérmico total reversible
- $\delta W_b$ : Trabajo en el límite
- $\tilde{\mathbf{Y}}$ : Vector de velocidad tridimensional medio
- $a_{pi}$ : Propiedad intensiva de  $A_{pi}^o$

$N_i$ : Número total de moles del componente  $i$

$A_{pi}^0$ : Energía molar de Gibbs

$A_i^0$ : Energía libre de Helmholtz molar

$N_{pi}$ : Número total de moles de los componentes puros,

$N_{mi}$ : Número total de moles en la mezcla,

$\tilde{\xi}_n$ : Tasa de procesamiento de las unidades promediadas de  $\tilde{\rho}$  en cada Nodo

$\tilde{u}_i$ : Vector de velocidad promedio en  $x$

# ESTRUCTURA DE LA TESIS

Esta memoria se divide en dos partes:

- **PARTE I: Disertación.**

La generación de basura al final del ciclo de vida útil de la tecnología de PFV-*SiC* es un desafío crucial que debe ser estudiado, con el fin de desarrollar e implementar soluciones que hagan de esta una tecnología totalmente sostenible.

Esta Tesis Doctoral tiene como primer objetivo: **contribuir al desarrollo de un marco teórica para un Ciclo-Cerrado de Materiales (CCM) basado en principios C2C (C2C-CCM) para la industria de PFV-*SiC*, mediante la definición y aplicación de un modelo termodinámico y matemático, que permita determinar las implicancias y limitaciones para la implementación del modelo de producción de un sistema C2C-CCM para la tecnología PFV-*SiC*.** Además, este marco teórico podrá ser empleado en otros campos de la ingeniería en general.

De este modo, se busca entregar una base teórica sólida que apoye a la industria y la academia a avanzar tanto en la investigación, como en la implementación de nuevas metodologías en pos de una reducción en la generación de basura y residuos por parte de la industria fotovoltaica.

Una vez aplicados estos conceptos y marco teórico a la tecnología PFV-*SiC*, el segundo objetivo de la Tesis es **proponer métodos de cálculo que permitan evaluar el ciclo de vida de un panel fotovoltaico para un caso C2C o C2G, desde una perspectiva dinámica, es decir considerando el tiempo, y a partir de sus resultados cuantificar posibles escenarios futuros para la tecnología** utilizando ensamblados estadísticos.

Para cumplir estos objetivos, la presente Tesis se ha estructurado en los siguientes capítulos. En el capítulo 2, se hará una revisión del contexto científico y tecnológico donde se enmarcan los trabajos realizados. Para ello, se realizará un repaso y revisión de los paradigmas C2G y C2C, y el rol de la logística inversa. Particular atención se da al análisis del contexto científico y tecnológico al *estado-del-arte* en la recuperación y reciclaje para la tecnología PFV-*SiC*. Para facilitar la comprensión del nuevo *marco teórico* propuesto en esta Tesis Doctoral, en esta sección se analizan las herramientas disponibles para la caracterización de los elementos de un *flujo cerrado de materiales* y que son utilizadas por especialistas y académicos.

Tras la revisión del contexto científico y tecnológico, en el capítulo 3, se introducen una serie de conceptos que definirán un sistema de *flujo cerrado de materiales* para la tecnología PFV-SiC utilizando principios de C2C. Luego, se introduce una *escala de espacio-tiempo original*, con la que es posible caracterizar el flujo de materiales. A continuación, se estudian las implicancias energéticas y termodinámicas de un sistema cerrado y se procede a introducir una teoría para estimar el mínimo de trabajo necesario para la separación de materiales para un PFV-SiC diseñado según los principios C2C, y este es comparado con el trabajo requerido para separar un producto que no ha seguido los principios C2C. Posteriormente, se define matemáticamente el *tiempo circular* para un sistema de flujo cerrado y en base a estos parámetros se introduce un modelo matemático para este sistema y se propone una solución numérica, para luego evaluar su estabilidad numérica. Este modelo se aplicará a la obtención de los valores numéricos para un sistema de flujo cerrado de materiales para la tecnología PFV-SiC.

En el capítulo 4, se aplicará el modelo introducido en el capítulo anterior de esta Tesis Doctoral. Con el objetivo de evaluar la funcionalidad y estabilidad del modelo, se realizará un experimento numérico, definiéndose las condiciones de borde e iniciales para un caso particular. Debido a la originalidad de este modelo, se ha desarrollado en el marco de esta Tesis, los experimentos numéricos se realizaron con un ordenador que ejecuta MATLAB®. Para finalizar el capítulo 4, se realizará un análisis de la sensibilidad, utilizando *ensamblados estadísticos*.

En el capítulo 5, utilizando la herramienta de *análisis de ciclo de vida* se estudian los impactos medioambientales que genera la tecnología PFV-SiC al finalizar su ciclo de vida útil. Se hace el esfuerzo para obtener modelos tanto para un *modelo de flujo cerrado de materiales* como para uno *abierto*. Se evalúa el último método de recuperación de materiales utilizado en el proyecto "Full Recovery End of Life Photovoltaic" (FRELP), único con una base de datos abierta, proponiéndose en base a los resultados obtenidos, alternativas a los procesos químicos más contaminantes.

En el capítulo 6 se indicarán las conclusiones más destacadas de la presente Tesis, se realizará un esbozo de la utilidad de las mismas en el campo fotovoltaico. Por último, en el capítulo 7 se sugieren las posibles líneas de investigación futuras.

- **PARTE II: Publicaciones.**

La Parte II de la memoria está constituida por la publicación que ha surgido como resultado de la realización de esta Tesis Doctoral.

# PARTE I

## DISERTACIÓN

En la Parte I introducimos la urgencia por abordar desde una perspectiva científica la problemática que conlleva el creciente volumen de basura proveniente de los paneles fotovoltaicos y sus consiguientes consecuencias negativas para el medio ambiente.

A continuación, se describe el desafío que implica la generación de basura por el sector fotovoltaico, describiéndose las proyecciones a futuro. Posteriormente, se expone la pertinencia y relevancia que justifica el desarrollo de esta Tesis Doctoral, conjuntamente con los objetivos que se plantean alcanzar y la metodología aplicada para lograr dichos objetivos. Luego, se introduce el modelo matemático y termodinámico, así como un experimento numérico, para luego realizar un ACV para el EoL de un PFV-SiC, evaluando sus impactos medioambientales en la recuperación del *Si* para los escenarios de ciclo abierto y cerrado de materiales. Finalmente, se presentan las principales conclusiones obtenidas tras la realización de esta Tesis Doctoral y algunas propuestas sobre las líneas futuras de trabajo a desarrollar.

# 1

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 SITUACIÓN ACTUAL DEL MERCADO FOTOVOLTAICO

La demanda de energía a escala global continúa creciendo aceleradamente. Hoy, la población mundial es de aproximadamente 7700 millones de habitantes (United Nations 2019) y su consumo de energía primaria durante el año 2018 fue del orden de 580.4 exajulios (EJ) (BP 2019). Se espera que la población mundial alcance los 8500 millones en 2030 y los 9700 millones de personas en 2050 (United Nations 2019), lo que implicará un aumento significativo de la demanda de energía a escala global. Además, la actual adicción al petróleo a nivel global en términos energéticos va a llegar a su fin, debido principalmente a que el petróleo es una fuente de energía finita y no renovable. Al actual ritmo de consumo, el progresivo agotamiento de reservas económicamente viables se hará sentir a nivel global, produciéndose un incremento en su precio de venta. Se estima que las mayores repercusiones, tanto, económicas como sociales, se harán sentir aproximadamente para el año 2050 (Campbell 2012).

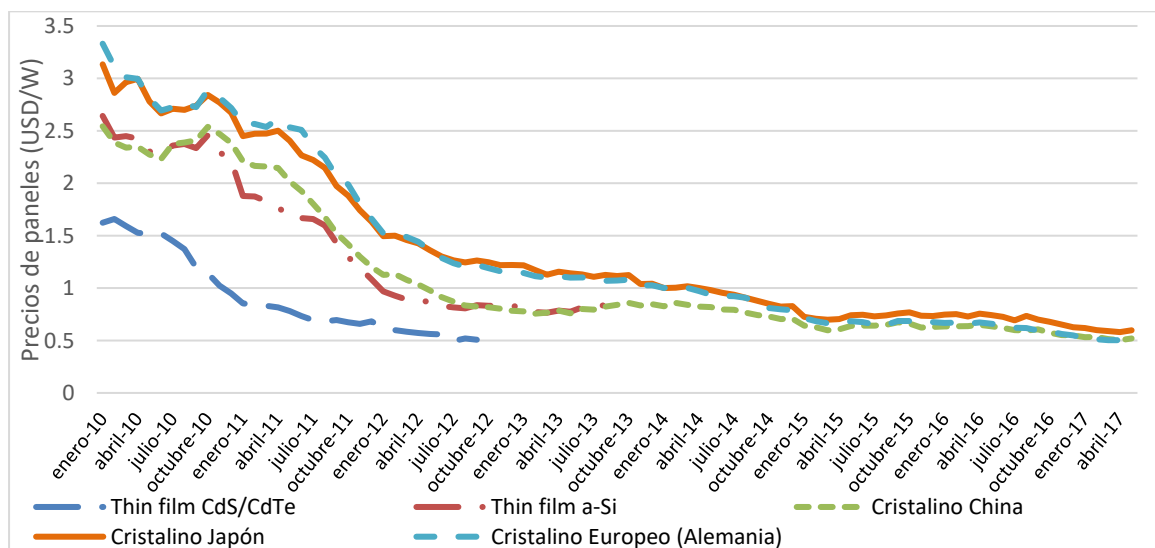
De la situación descrita en el párrafo anterior es posible concluir que, uno de los mayores desafíos y paradigmas que nos enfrentamos como humanidad durante el presente siglo, es lograr satisfacer la demanda energética futura a través de nuevas y sostenibles fuentes de energía. En este contexto, la energía solar surge como la mayor fuente de energía actualmente disponible para el uso humano.

La Tierra intercepta, en el límite de la atmósfera, aproximadamente  $1366 \text{ J/sm}^2$  – constante solar- de energía solar, de la cual, un 70% alcanza la superficie terrestre, lo que equivale a  $3850 \times 10^{21} \text{ J}$  en un año. Este valor, excede en aproximadamente ocho mil veces al actual consumo humano total de energía primaria. Aprovechar este flujo de radiación solar y convertirlo en energía utilizable mediante el uso de la tecnología fotovoltaica es

ciertamente una de las mejores opciones para satisfacer la creciente demanda por electricidad en el mundo, especialmente considerando la futura electrificación del transporte, calefacción y el sector industrial, tanto a medio como a largo plazo. Además, entre otras muchas cualidades, la energía solar es sostenible, renovable y de una reducida contaminación sobre el medio ambiente.

A escala mundial la energía fotovoltaica es uno de los mercados energéticos más dinámicos, logrando una tasa de crecimiento anual de instalaciones fotovoltaicas del 36.8% entre los años 2010 y 2018. Lo que se traduce en una capacidad acumulada al 2018 de 488 GW, la que generó 585 TWh (Fraunhofer ISE 2019). Sin embargo, es importante mencionar que la demanda del mercado solar mundial entre el 2017 y 2018 estuvo dominada, más que nunca, por parte de China, país que instaló más de la mitad de la potencia solar del mundo en un año (53.3%).

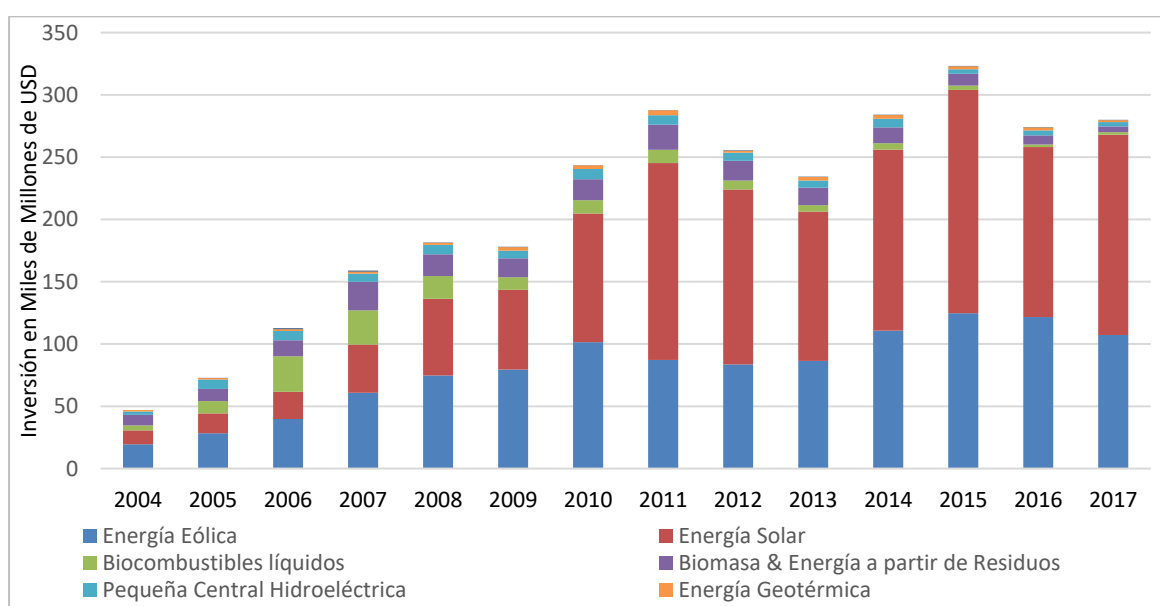
A nivel mundial, la expansión del mercado se ha debido en gran medida a la creciente competitividad de la tecnología fotovoltaica, junto con la creciente demanda de electricidad en los países en desarrollo. En la actualidad, en muchos países del planeta, las técnicas renovables son la fuente de generación de energía más barata, en particular, las tecnologías solares y eólicas son una fuente de electricidad menos costosa que la alternativa de combustible fósil menos costosa (i.e. carbón y gas natural), y esto es posible ya sin ayuda financiera (IRENA 2019a).



**Figura 1** Precios medios mensuales de los paneles fotovoltaicos solares europeos por tecnología y fabricante - 2010 a 2017. Fuente: Adaptado de IRENA 2019b

De acuerdo con los datos proporcionados por la Agencia Internacional de Energía Renovable (IRENA, por sus siglas en inglés), los precios de los paneles fotovoltaicos han caído cerca de un 90% desde finales de 2009. A modo de ejemplo, en el año 2018 los

precios de los paneles en Europa oscilaban entre 0.51/W USD para los módulos FV de tecnología cristalina fabricados en China, 0.50/W USD para los fabricados en Alemania, mientras que los módulos de origen japonés no bajaban de los 0.6/W USD. Respecto a la tendencia histórica de los precios medios para las diferentes tecnologías fotovoltaicas (ver Figura 1) se aprecia que los valores de referencia para todas las tecnologías de paneles fotovoltaicos cayeron, drásticamente entre 2010 y 2013, continuando este descenso del precio medio entre el 2013 al 2018, entre el 34% y el 61%, fundamentalmente en los mercados nacionales donde se ha llegado y/o superado el GW de capacidad instalada (IRENA 2019a).



**Figura 2** Inversión anual por tecnología en Miles de Millones de USD- 2004 a 2017

Fuente: Adaptado de IRENA 2019b

La constante reducción de los precios de la tecnología fotovoltaica, sumado a un mayor énfasis en la política energética hacia objetivos económicos, sociales y ambientales han modificado las condiciones para los nuevos participantes en el mercado y los nuevos proyectos de generación de energía. Es así como se destaca la aplicación del mecanismo de subasta como el instrumento regulador más popular para el despliegue de las energías renovables variables (i.e. solar y eólica), logrando con ese mecanismo precios bajos para la generación de electricidad. Gracias a este instrumento se ha subastado un volumen total de 97.5 GW de electricidad entre el 2017 y 2018, de los cuales un 55% (53.2 GW) del volumen total corresponden a la tecnología fotovoltaica, mientras que un 32% (31.4 GW) del volumen total fue de la eólica terrestre (IRENA 2019a). Lo anterior se refleja en las

altas inversiones que se han realizado, en particular, para la tecnología fotovoltaica que acumula del 2004 al 2017 un total de 1356.8 miles de millones de dólares (ver Figura 2).

En resumen, el coste total ponderado de los proyectos solares fotovoltaicos a escala mundial puestos en marcha el 2018 fue de 1210 USD/kW, frente a los 1389 USD/kW de 2017, lo que supone un descenso del 13%. Mientras que la media ponderada mundial del costo nivelado de la energía en proyectos fotovoltaicos a gran escala en 2010 fue de 0.371 USD/kWh, mientras que en 2018 llegó a 0.085 USD/kWh, un 77% menos que en 2010 (IRENA 2019a).

Por otro lado, a la fecha y según los últimos reportes disponibles, la tecnología de paneles monocristalinos posee la mayor eficiencia de célula solar con un 26.7%, mientras que las tecnologías CIGS / multi-Si / CdTe tiene eficiencia del 23.4 / 22.3 / 21.0% respectivamente (Fraunhofer ISE 2019).

Resulta importante destacar que los paneles cristalinos de silicio seguirán siendo sin duda la tecnología fotovoltaica líder en el mundo durante las próximas décadas. Sus índices de penetración en el mercado global representa alrededor del 92% del total de las diferentes tecnologías de paneles fotovoltaicos disponibles en el mundo en 2014, y se espera que su presencia en el mercado fotovoltaico sea de al menos un 73.3% para el 2030 (IRENA 2016a). Lo anterior se confirma al observar que durante el 2017 los paneles fotovoltaicos cristalinos representaron sobre el 95% de la producción mundial total del mercado global fotovoltaico (Fraunhofer ISE 2019).

En base al escenario descrito anteriormente, surge una pregunta: ¿cuál será la magnitud del impacto que tendrán esos millones de paneles cristalinos fotovoltaicos, ya instalados y por instalar, una vez que su ciclo de vida útil llegue a su fin (i.e. fin de la generación, tras 25 y 35 años operacionales)?

Sin duda, la generación y acumulación de basura es un problema a escala mundial. Hoy en día, la sociedad moderna está impulsada por el consumismo, donde un alto índice de consumo es considerado como la manera apropiada de impulsar el crecimiento del Producto Interno Bruto (PIB) en los países desarrollados y emergentes. Probablemente, este es el rasgo más característico de la civilización occidental actual.

Grandes cantidades de residuos generadas por las megaciudades imponen una enorme presión sobre el medio ambiente y las autoridades que los gestionan. Además, el aumento de la población mundial implica un crecimiento de las ciudades y por ende una ampliación del desarrollo urbano, que implica a su vez un mayor número de consumidores que demandarán más energía y productos. En consecuencia, más Recursos-Primarios-

Abióticos-No-Renovables (RPANR)<sup>1</sup> serán extraídos, transformados, consumidos y desechados. En la actualidad la generación global de residuos en las regiones urbanas es de alrededor de 2.01 mil millones de toneladas ( $2.01 \times 10^9$ ) y se prevé que aumente a 3.4 mil millones de toneladas ( $3.4 \times 10^9$ ) para el 2050, de las cuales una mínima fracción (19%) es recuperada mediante reciclaje (Kaza et al. 2018).

Como se expuso con anterioridad, en la última década la capacidad instalada de tecnología fotovoltaica ha crecido exponencialmente en aproximadamente un 49 por ciento (%) por año y se espera continúe creciendo a altos niveles al punto de llegar a satisfacer el 16 por ciento (%) de las necesidades energéticas del planeta hacia el año 2030 (IEA 2014). Además, la capacidad global instalada de paneles fotovoltaicos ha alcanzado una potencia estimada de 222 GW, y se espera que llegue a los 4.500 GW el 2050 (IRENA 2016a).

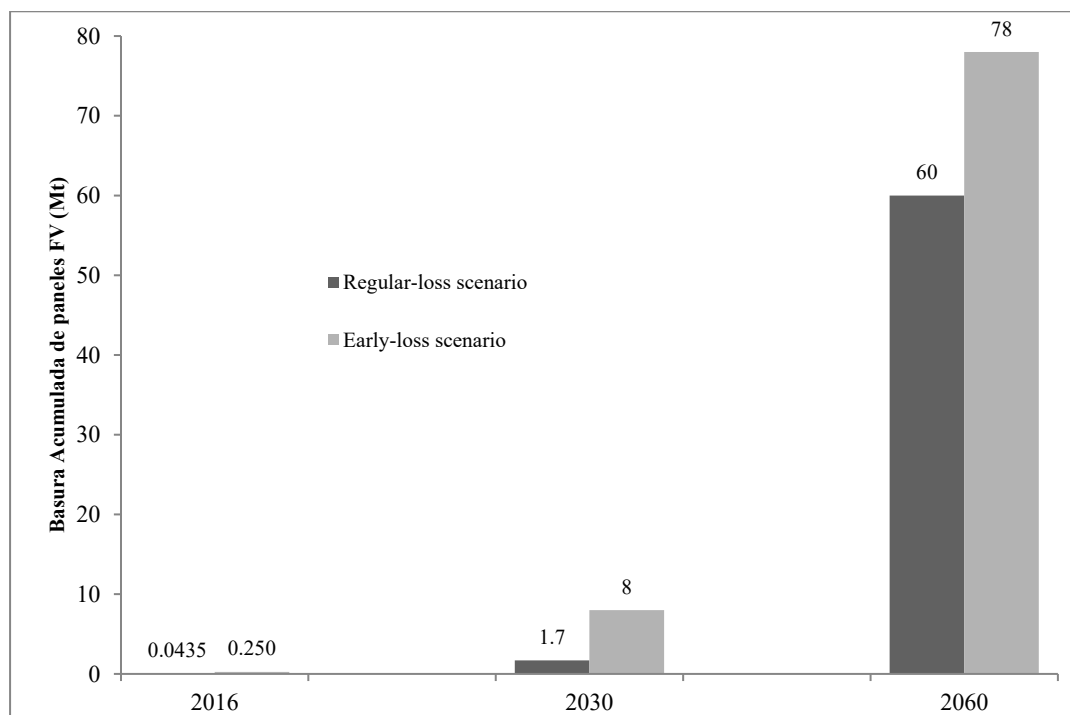
A pesar de los beneficios medioambientales de la generación de electricidad a partir de esta tecnología, el ciclo de vida lineal del PFV-SiC está impactando la disponibilidad de los RPANR, como el acero, el aluminio, el cobre y la plata, a la vez que produce contaminación química tóxica y residuos sustanciales al final del ciclo de vida operativo de un panel. Se espera que la cantidad de residuos del sector fotovoltaico (ver Figura 3) alcance entre 1,7 y 8 Mt en 2030 y entre 60 y 78 Mt en 2050 (IRENA 2016b). Actualmente, el reciclaje de la basura fotovoltaica al final de su vida operativa no supera el 10% en el mundo (Lunardi et al. 2018b).

Además, el desconocimiento científico sobre cuál es realmente el fin de la vida útil de los paneles fotovoltaicos, ya que su proceso de degradación está influenciado por una multitud de variantes, ofrece la posibilidad para reflexionar y estudiar las posibles soluciones para enfrentar la futura generación de basura por parte de esta tecnología que es supuestamente limpia. Entre las metodologías que abordan el desafío para reducir el uso de RPANR y el nivel de desechos, la filosofía "de la cuna a la cuna o cradle-to-cradle" (C2C, por sus siglas en inglés) afirma que podemos mantener nuestros niveles actuales de fabricación industrial y crecimiento económico sin dañar el medio ambiente, promoviendo un cambio positivo en el concepto del *reciclaje*. Por lo que la posibilidad de aplicar los principios de C2C en un sistema de *Ciclo-Cerrado de Materiales* (CCM), como una forma de reducir o eliminar la generación de basura al EoL de la tecnología fotovoltaica, si bien en principio parece prometedora, todavía requiere bastante investigación y mejoras, en

---

<sup>1</sup> Para un volumen imaginario de RPANR, no se puede dar una definición numérica precisa, sin embargo, un centímetro cúbico de RPANR podría encajar bien en la mayoría de los contextos en los que se discute un volumen de RPANR, particularmente aquellos relacionados con la industria fotovoltaica.

particular para apoyar decisiones industriales y el desarrollo de políticas sólidas. En por este motivo que en esta Tesis Doctoral se investigan los principales desafíos y oportunidades para la aplicación de los principios C2C en el diseño de los módulos solares fotovoltaicos basados en el silicio, y su aplicabilidad en un sistema de CCM.



**Figura 3** Estimación del volumen de basura global acumulada al final de la vida útil de un panel fotovoltaico  
Fuente: Adaptado de IRENA 2016.

## 1.2 JUSTIFICACIÓN

El mundo está hambriento de energía, y seguirá aumentando la demanda en las próximas décadas. Sin embargo, nuestra dependencia en las fuentes energéticas fósiles ha generado impactos que están degradando el medioambiente (Owusu and Asumadu-Sarkodie 2016). A nivel mundial la participación estimada de las energías convencionales no-renovables en el consumo total de energía final fue del 79.7% a fines del año 2017 (REN21 2019). Sin embargo, la volatilidad de precios, y su naturaleza finita, impactan negativamente la seguridad energética de todos los países que no son productores (i.e. la mayoría), lo que potencialmente impactará a nivel global con elevados precios y escasez aproximadamente a partir del 2050 (De Almeida and Silva 2011; Campbell 2012).

Por otro lado, la Tierra intercepta 170000 TW de energía solar. Esta cantidad de energía excede el consumo humano de energía primaria en varios órdenes de magnitud, por lo que aprovechar este flujo de energía y convertirlo en electricidad mediante el uso de

la tecnología fotovoltaica, es ciertamente una alternativa efectiva, altamente competitiva en términos de costo, a la par que reduce la emisión de Gases de Efecto Invernadero y la dependencia de los combustibles fósiles (IEA 2014). Pero, a pesar de ser una energía sostenible, renovable y que no emite CO<sub>2</sub> durante el proceso de conversión de fotones a electricidad, es necesario desarrollarla de manera sostenible, debido a lo cual, se hace urgente evitar la generación de millones de toneladas de basura una vez que el ciclo de vida útil haya finalizado.

Si consideramos que el ciclo de vida operativo actual de un PFV-*SiC* ronda en promedio los 30 años (Chowdhury et al. 2020), al final de su vida útil, nos enfrentaremos al desafío de la generación de basura, la que impactará negativamente a las generaciones futuras sino se toman las medidas adecuadas. Llegados a este punto debemos preguntarnos: ¿Es posible evitar que todo el material usado en un PFV-*SiC* y su infraestructura terminen depositados en un vertedero como basura? Reflexionemos: por un lado, se promueve a la tecnología de PFV-*SiC* como una alternativa energética renovable, respetuosa con el medio ambiente, principalmente si se compara con las tecnologías basadas en combustibles fósiles, particularmente en cuanto a la emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI). Sin embargo, se debe considerar también, que la PFV-*SiC* también hace uso intensivo tanto de energía (durante su fabricación), como de diversos minerales y otros componentes abióticos que son extraídos y usados en la manufacturación de dicha tecnología y que, sin las medidas adecuadas, al final de su vida útil, esta tecnología puede potencialmente terminar en un vertedero, reduciendo de esta manera todo el impacto positivo que tenía cuando era funcional. Sin embargo, la recuperación de estos materiales al final de su vida útil implicaría el desarrollo de nuevas capacidades y de infraestructura, que deben ser estudiados mediante el uso de herramientas con el Análisis de Ciclo de Vida (ACV).

Además, como se mencionó en la sección anterior, se espera que los paneles cristalinos de silicio van a seguir dominando el mercado de la tecnología fotovoltaica. Es en este punto resulta crucial estudiar y comprender las implicaciones y límites de las posibles soluciones, a fin de disminuir la generación de basura por parte de la tecnología fotovoltaica. Estas soluciones deben ser técnicamente viables y científicamente aceptadas, a fin de poder enfrentar la problemática que irrumpirá dentro de los próximos 10 a 30 años, cuando millones de paneles, junto con toda su infraestructura asociada, terminen su ciclo de vida operativo.

El actual sistema lineal de producción y consumo, basado en un flujo unidireccional desde la extracción de la materia prima, hasta la eliminación final de los paneles

fotovoltaicos en un vertedero, tiene como resultado un impacto ambiental negativo que podría reducir gravemente nuestras posibilidades de lograr una existencia sostenible para la sociedad humana. Este desafío toma aún más relevancia, cuando se comprende que el reciclaje, como se define hoy, no es capaz de evitar que millones de toneladas de materiales sean depositados en vertederos, porque no se sabe qué hacer con ellos, o porque se considera que los productos se han degradado a tal punto que ya no tienen ninguna otra utilidad. Esta situación da origen a un *ciclo-vicioso*, donde cada cierto número de años se deba resolver el dilema de dónde depositar los materiales procedentes de los PFV-SiC que hayan finalizado su ciclo de vida útil. Por lo tanto, se hace imperioso desarrollar soluciones que permitan continuar produciendo de manera sostenible PFV-SiC, evitando así que se desperdicien los RPANR, la energía y todo el trabajo utilizados en el proceso de manufacturación de estos, y terminen convertidos en basura.

En la última década han nacido diferentes líneas de pensamiento que de una u otra forma han buscado introducir nuevos modelos de acción y paradigmas con el fin de hacer frente a la problemática ya descrita. Es así como podemos encontrar literatura que describe en detalle estas nuevas líneas de pensamiento (p. ej. Movimiento Natural, Bio-mimetismo, Cero Basura, Ingeniería de la Resiliencia, Diseño Ecológico, Química Verde, Cuna-a la-Cuna, Auto-ensamblado, entre otros) (García-Serna et al. 2007). Estas nuevas tendencias en diseño, manufacturación, nuevos materiales y reciclaje + reúso, son el resultado de la búsqueda de conservar y utilizar de manera más eficiente los RPANR que dispone la tierra por parte de diversas ramas de la ciencia (García-Serna et al. 2007). Dentro de esta avalancha de nuevos conceptos, soluciones y metodologías nace a fines del siglo XX la filosofía C2C, la que busca reproducir el ciclo regenerativo de la naturaleza en el que los residuos se reutilizan (p. ej. un animal muere o crea residuos, esos residuos se descomponen y se convierten en nutrientes para otro proceso) (McDonough and Braungart 2000). Esta filosofía asegura –según sus autores- la posibilidad de continuar con nuestro actual modelo económico sin afectar el medioambiente (McDonough and Braungart 2002). Sin embargo, a pesar de los buenos augurios, es necesario comprender su verdadera viabilidad, limitaciones, posibles impactos, porcentaje efectivo de reúso de materiales, sus respectivos costes energéticos y económicos.

Además, es muy relevante destacar que diferentes investigadores ya han reconocido la importancia y la necesidad de un sistema de reciclaje a gran escala para el *Si* y *Al* (Goe and Gaustad 2014), en el que la viabilidad económica y las oportunidades de valor añadido de ese reciclaje deben ser aseguradas (Choi and Fthenakis 2010). Además, la fabricación

de una célula solar cristalina implica aproximadamente 200 pasos, comenzando por la minería de sílice, la mejora de la arena de sílice a silicio de grado metalúrgico y la mejora del silicio de grado metalúrgico a silicio de grado solar. Luego, después de un proceso de destilación de varias etapas (proceso Siemens), el polisilicio se transforma en lingotes cilíndricos de silicio monocristalino, que luego se forman y se cortan en finas obleas (Ferroni and Hopkirk 2016). Así, después de convertirse en una célula solar, el *Si* utilizado en un panel se convierte en un material altamente intensivo en términos energéticos, materiales, mano de obra y capital (Xu et al. 2014; Ferroni and Hopkirk 2016).

En las últimas décadas, la rápida expansión de la tecnología de PFV-*SiC* implica un aumento de la generación de residuos y emisiones de gases, no solo en su manufactura, sino también en las etapas de transporte, instalación y especialmente al final del ciclo de vida útil de esta tecnología. Lo anterior, representa un desafío que debe ser resuelto y se espera que esta Tesis Doctoral entregue herramientas que ayuden a dar los primeros pasos hacia su solución.

En este punto cabe señalar que no es posible concebir una política que busque resolver esta problemática en su totalidad, si no existe primero una adecuada investigación científica que proporcione las bases necesarias para la toma de decisiones al respecto. En este sentido, Europa<sup>2</sup>, Estados Unidos<sup>3</sup> y algunas empresas han iniciado esfuerzos desarrollando políticas y diseñando de mejor manera los paneles fotovoltaicos como es el caso de Sun Power<sup>4</sup>. Sin embargo, aún estamos lejos de que el tema sea resuelto a nivel global.

Por todos los razonamiento anteriormente descritos, en esta Tesis Doctoral, la investigación se centra principalmente en el EoL del *Si* confinado en un PFV-*SiC*.

### 1.3 HIPÓTESIS Y OBJETIVOS DE LA TESIS DOCTORAL

Lo expuesto en las secciones anteriores describe la importancia y urgencia de reflexionar sobre la temática abordada en la presente Tesis Doctoral. Uno de los nuevos paradigmas a los que debe enfrentarse la industria fotovoltaica, y en particular la de PFV-

---

<sup>2</sup> Información disponible en: <http://sinovoltaics.com/solar-basics/introduction-to-solar-panel-recycling/>, y <http://www.solarwaste.eu/>, sitio visitado el 24/1/2016

<sup>3</sup> End-of-life disposal of solar products in the US is governed by the Federal Resource Conservation and Recovery Act (RCRA), and state policies that govern waste. Información disponible en: <https://www.epa.gov/enforcement/resource-conservation-and-recovery-act-rcra-and-federal-facilities>, sitio visitado el 24/1/2016

<sup>4</sup> Información disponible en: <http://newsroom.sunpower.com/2016-06-24-SunPowers-Cradle-to-Cradle-Certified-Silver-Solar-Panels-Earn-Top-Product-of-the-Year-Award-from-Environmental-Leader>, sitio visitado el 24/1/2016

*SiC*, radica en la urgente necesidad de dar un paso cualitativo mirando hacia el futuro con el fin de conseguir un modelo productivo realmente sostenible, consolidándose como uno de los pilares en el desarrollo de la humanidad que permita un desarrollo social en verdadero equilibrio con el medio ambiente.

Por consiguiente, esta Tesis Doctoral, busca entregar una luz frente a la extensa problemática antes descrita, introduciendo una teoría que permita aplicar y reconocer los límites de la filosofía C2C, integrando todos los procesos involucrados en la cadena productiva de un PFV-*SiC* en un *Ciclo-Cerrado de Materiales* (CCM). Este nuevo paradigma hace hincapié en **re-pensar** la manera en que hacemos actualmente las cosas; desde el diseño, ingeniería, manufacturación, uso, recolección y posteriormente el reingreso de los materiales al ciclo productivo industrial, una vez finalizada la vida útil de un PFV-*SiC*. Este Tesis Doctoral se basa en la *hipótesis* fundamental de que, en un futuro próximo, y debido principalmente a la gran demanda energética futura, el auge y penetración de la tecnología fotovoltaica será imparable, por lo que llegará un momento en que la urgencia por reciclar los PFV-*SiC* se convertirá en una necesidad a escala global.

Se propone además que, la implementación de la metodología C2C en toda la cadena de producción de esta tecnología, podría ayudar a resolver o disminuir la generación de basura al final de la vida útil de un PFV-*SiC*. Por lo tanto, el principal objetivo de este trabajo es desarrollar un modelo teórico, basado en principios matemáticos y termodinámicos, que ayude a entender las implicaciones y limitaciones de la metodología C2C aplicada a un CCM desde una perspectiva crítica y científica, para que, ulteriormente, pueda ser aplicado en la industria de la tecnología de PFV-*SiC*.

El *objetivo principal* de esta propuesta de Tesis Doctoral se conseguirá mediante el logro de los siguientes objetivos secundarios, no resueltos aún de manera completamente satisfactoria ni por la academia ni la industria:

1. Desarrollar las bases teóricas de un *Ciclo-Cerrado de Materiales* (CCM) basado en principios C2C (C2C-CCM) para la industria de PFV-*SiC*.
2. Determinar las implicancias y limitaciones para la implementación del modelo de producción en *Ciclo-Cerrado de Materiales* (CCM) basada en principios de C2C en la industria de PFV-*SiC*.
3. Generar herramientas que permitan evaluar el ciclo de vida de un panel fotovoltaico para un caso C2C o C2G y, a partir de las mismas, cuantificar posibles escenarios futuros para la tecnología.

En resumen, la realización de la presente Tesis Doctoral ha contribuido de manera original a:

1. Dada la inexistencia de un marco teórico adecuado sobre la temática en cuestión, este estudio analítico aporte nuevas vías que permitan la realización de estudios empíricos del tema en cuestión.
2. Analizar los principios y limitaciones de la metodología C2C en la tecnología fotovoltaica basada en el silicio cristalino.
3. Proponer y desarrollar un modelo matemático que permita entender las implicaciones de la metodología C2C.
4. Cálculo del límite teórico que puede alcanzar un proceso productivo en ciclo cerrado basado en la metodología C2C.
5. Estudiar las bondades y limitaciones del ACV al estudiar un producto C2C.

# 2

## ANTECEDENTES

En este capítulo, se realizará una descripción de los paradigmas conocidos como *de la cuna a la tumba* o *Cradle-to-Grave* (C2G) y la propuesta de un paradigma circular que promueve la filosofía *de la cuna a la cuna* o *Cradle-to-Cradle* (C2C). Posteriormente se revisará el *estado del arte* de la tecnología de reciclaje y recuperación de materiales para la tecnología de paneles fotovoltaicos de silicio cristalino. Finalmente, se discute sobre el rol de la logística inversa y los marcos políticos que apuntan hacia la promoción de un flujo cerrado de materiales.

### 2.1 HACIA UN NUEVO PARADIGMA ECONÓMICO-INDUSTRIAL

La forma en la que hoy fabricamos y desechamos los productos está reduciendo las reservas de los RPANR de la Tierra. Sumado a lo anterior, la sociedad altamente consumista de hoy genera constantemente grandes cantidades de basura depositando los productos que han finalizado su ciclo de vida útil en vertederos, desperdiciando así, todos los recursos empleados en su fabricación. Este paradigma lineal, conocido como C2G, es el modelo predominante en el sector industrial hoy en día, que asume una vida útil lineal para los módulos fotovoltaicos cristalinos, desde la extracción del material utilizado en su fabricación (*cuna*) hasta el final de su vida útil, cuando se consideran desechos y son depositados en un vertedero(*tumba*). Este paradigma no es sostenible y es necesario estudiar nuevas alternativas para la industria manufacturera en general.

Por tanto, el mundo se enfrenta hoy una nueva paradoja: ¿Podemos seguir sosteniendo el actual estilo consumista de vida, el crecimiento económico y el desperdicio de las materias primas abióticas no renovables, sin poner en peligro nuestro futuro y el del medio ambiente en general?

En 1798, Malthus señaló que la disponibilidad física de los recursos limita la escala de las actividades humanas (Malthus 1798). La sobrepoblación, la posesión de bienes materiales y el volumen de negocios asociado a estos recursos, son los factores que favorecerán crisis de índole social y económica, al no poder satisfacer la demanda de recursos de una mayor población, generando a su vez una gran presión en todo el medio ambiente. Lo que indica Malthus se hace evidente si pensamos que la especie humana demoró más de 3 millones de años para llegar a ser mil millones ( $1 \times 10^9$ ) de habitantes a principios de 1800 y que en tan solo 300 años después, a principios del siglo XXI, la población mundial asciende a casi 7 mil millones de personas ( $7 \times 10^9$ ). Este problema toma niveles críticos si consideramos ciertas las estimaciones que indican que, para el año 2050, la población mundial superará los 9 mil millones (United Nations 2019), es decir, un aumento de 2 mil millones habitantes en tan sólo 40 años. Resulta intuitivo que lo anterior tiene impacto en todos los sectores, ya que no sólo se experimentará un aumento exponencial en términos de demanda energética, sino que también de los RPANR, lo que indudablemente provocará un explosivo aumento en términos de generación de basura al final de la vida útil de todos los bienes fabricados por el sector industrial.

La extracción creciente de RPANR, la manufacturación de bienes y tecnología, el alto consumo, la posterior generación de residuos y las emisiones del transporte en toda esta cadena de abastecimiento, son las etapas del ciclo industrial que de una u otra forma emiten sustancias tóxicas a la atmósfera, las cuencas hidrográficas y suelos, y todo ello, está perturbando los ciclos biogeoquímicos a escala global (Klee and Graedel 2004). Además, los países con economías emergentes y con grandes poblaciones como Brasil, Rusia, India y China (conocidos como economías BRIC por sus iniciales), en su proceso de desarrollo económico e industrial, están generando aún más presión al medioambiente y a la disponibilidad de recursos (Arnould 2010). Desde la Revolución Industrial, la ineficiente recuperación de los residuos y desechos hace aún mayor nuestra dependencia de los limitados RPANR, lo que resulta en un impacto mayor sobre el medioambiente e incremento de la difusión de residuos y desechos en los ecosistemas, afectando directa e indirectamente al ser humano (Klee and Graedel 2004).

Consecuentemente, se necesita el desarrollo y posterior implementación de un nuevo paradigma, que fomente el crecimiento económico, y que al mismo tiempo permita al medioambiente recuperarse de la extracción de recursos. En el modelo actualmente utilizado, tanto en el sector industrial y económico a nivel mundial, los flujos de materiales

son lineales, y es también conocido como de la cuna a la tumba o Cradle-to-Grave (C2G), a la que llaman la “filosofía de la basura”.

En general, en este sistema lineal, se han tratado de implementar prácticas ambientales en busca de una industria más limpia. Sin embargo, el problema de muchas de estas prácticas ambientales es que son motivadas simplemente por la reducción de las huellas de carbono (p. ej. utilizar menos energía en la fabricación y reducción los residuos pre-consumo). Los principios que guían las prácticas de una producción más limpia en un sistema C2G, son los siguientes (Geigrich 2003):

- (1) que los recursos son inagotables
- (2) reciclar materiales cuando es posible
- (3) recuperar energía, y
- (4) eliminación final de materias usadas en un vertedero.

A pesar de las buenas intenciones, este modelo-industrial ambiental solamente logra ser "menos malo" en vez de ser "verdaderamente bueno". No obstante, este modelo simplemente ayuda a perpetuar un paradigma de negocio "C2G", en el que solamente es posible recuperar una mínima fracción del total de materiales utilizados por la industria, dado que ningún producto ha sido diseñado pensando en el re-uso de sus materiales, por lo tanto, la mayoría de los productos que han llegado al final de su vida útil se consideran sin valor y son desechados a un vertedero, exacerbando los impactos ambientales y limitando la sostenibilidad de nuestra civilización, dado que los RPANR son finitos y no renovables para las escalas de tiempo humano (i.e. centenas y decenas de años).

En contraposición a este paradigma lineal y no sostenible que supone el C2G, y que actualmente domina la industria, en esta Tesis Doctoral se propone como alternativa la filosofía C2C, debido a que, a diferencia de otras propuestas metodológicas que solamente tienen como objeto el beneficio del medioambiente (ver sección 1.2 del capítulo 1), esta filosofía promete la posibilidad de continuar los actuales niveles de producción y consumo actual, sin comprometer la integridad del medio ambiente, con lo que, sería posible continuar y/o mantener el actual ritmo de crecimiento económico y lograr conservar nuestro actual estilo de vida.

Este tipo de paradigmas toma aún más relevancia cuando pensamos en productos tecnológicos que buscan satisfacer la creciente demanda de energía y que, como es el caso de las diferentes tecnologías de paneles fotovoltaicos, incurren en el uso de RPANR de alta demanda, tales como el galio (*Ga*), indio (*In*), plata (*Ag*), germanio (*Ge*), selenio (*Se*),

telurio (*Te*) y rutenio (*Ru*) (Resnick Institute Report 2011). La filosofía C2C aparece como una solución viable para evitar el agotamiento de los recursos que se utilizan en la industria fotovoltaica, y por tanto, impedir al final de su ciclo de vida útil que toda la materia prima y energía utilizada en la fabricación de esta tecnología sea desperdiciada como basura en un vertedero, impactando al medioambiente, la salud del ser humano y exacerbando el agotamiento de los RPANR.

Actualmente la Universidad de Twente<sup>5</sup> y la Rotterdam School of Management Erasmus University<sup>6</sup> en Holanda son las únicas universidades que están trabajando el tema de C2C a nivel académico. Es aquí donde, luego de haber realizado un estudio de la literatura disponible en el tema, es posible señalar fehacientemente que los estudios al momento realizados por estas entidades son principalmente de naturaleza descriptiva y en donde las discusiones son más bien de carácter subjetivo sobre el reemplazo de ciertos componentes de algunos productos, que son considerados poco o no saludables para el medioambiente y el ser humano. Sin embargo, no se aborda la temática desde una perspectiva científica basada en principios matemáticos y leyes termodinámicas, a fin de poder establecer los límites reales de esta filosofía y tener cimientos rigurosos que apoyen la investigación en esta nueva área del conocimiento.

### 2.2 DE LA CUNA A LA TUMBA (C2G) Y DE LA CUNA A LA CUNA (C2C): SU DEFINICIÓN Y PRINCIPIOS

El enfoque *de la cuna a la cuna* o *Cradle-to-Cradle* (C2C) afirma que el crecimiento económico puede lograrse de manera sostenible mediante el diseño y la fabricación de productos en un ecosistema industrial limpio, dentro de un ciclo cerrado de materiales, y que en última instancia, al final de su ciclo de vida útil, estos materiales vuelven a ser considerados materias primas de alto valor (McDonough and Braungart 2002). Es importante mencionar que el enfoque C2C es una visión avanzada que va más allá de los conceptos recogidos bajo la definición de reciclaje, dado que típicamente sólo una pequeña fracción de los materiales es recuperada durante la "fase de *reciclaje*" y sometido a un nuevo ciclo de vida, dado que el equipo no fue diseñado con esto en mente, y gran parte del material de un panel no es ni reciclable ni reutilizable. Por consiguiente,

---

<sup>5</sup> Programa de Maestría en Diseño Industrial de la Universidad de Twente. <https://www.utwente.nl/en/education/master/programmes/industrial-design-engineering/>

<sup>6</sup> Programa en C2C de la Rotterdam School of Management Erasmus University. <http://www.rsm.nl/research/departments/technology-and-operations-management/research/cradle-to-cradle-for-innovation-and-quality/>

incluso en un escenario de "producción más limpia", todos los materiales reciclados se degradan intrínsecamente en calidad y utilidad, de modo que finalmente terminan en un vertedero. Por lo tanto, la aplicación de la filosofía C2C supone una innovación para el sector de la tecnología fotovoltaica, en particular debido a la posibilidad de tener total control del flujo de materiales y reducir los costos de producción. Sin embargo, antes de definir en detalle lo que es C2C, es necesario entender claramente el paradigma *de la cuna a la tumba* o *Cradle-to-Grave* (C2G) que actualmente se impone en el sector industrial fotovoltaica.

### 2.2.1 DE LA CUNA A LA TUMBA

*De la cuna a la tumba* o *Cradle-to-Grave* (C2G) es el paradigma que domina actualmente en todo el sector industrial. En particular, C2G asume un ciclo de vida "lineal" para la tecnología de PFV-SiC (Figura 4), desde la extracción de materia prima utilizada en su fabricación (cuna) hasta el final de su vida útil y deben ser desechados a un vertedero (tumba). Típicamente, a escala global sólo un 10% de la basura fotovoltaica generada al final de la vida operativa de los paneles llega a la "fase de reciclaje" (Lunardi et al. 2018b). Como el PFV-SiC no es diseñado pensando en el reúso de sus materiales, gran parte de estos no son reciclables ni reutilizables. En consecuencia, en un sistema de flujo lineal, a pesar del reciclaje, todos los materiales reciclados se degradan intrínsecamente en calidad y usabilidad, de modo que finalmente terminan en un vertedero. En general, el proceso C2G puede considerarse como un "down-cycling" o ciclo de degradación.

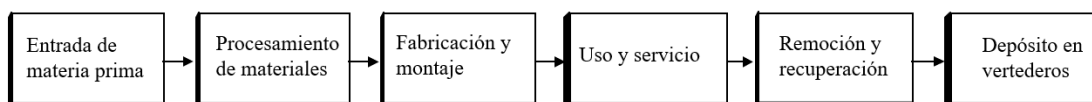


Figura 4 Flujo lineal de materiales simplificado en un sistema C2G

Con el fin de reducir la generación de basura y contaminación en la fabricación de productos C2G, el Consejo Empresarial Mundial para el Desarrollo Sostenible introdujo el concepto de "eficiencia" durante la Cumbre de la Tierra de 1992 en Río de Janeiro (Schott 1993). El factor de eficiencia se ha definido como el valor de los bienes o servicios suministrados o producidos para satisfacer una necesidad humana, dividido por su carga o impacto ambiental (Verfaillie and Bidwell 2000).

Los principios fundamentales que guían la eficiencia (The World Watch Institute et al. 2008) son:

- Reducción de la intensidad material de los bienes o servicios
- Reducción de la intensidad energética de bienes o servicios
- Dispersión reducida de materiales tóxicos, mejor reciclabilidad
- Máximo aprovechamiento de los recursos renovables
- Mayor durabilidad de los productos
- Aumento de la intensidad de los servicios de bienes y servicios.

Estos principios se asemejan a lo que hoy en día se denomina comúnmente como "producción más limpia". Aunque estos esfuerzos son valiosos como paso inicial, sólo proporcionan una solución temporal en lugar de una solución definitiva.

La aplicación de los principios de ecoeficiencia en el diseño de los productos C2G puede proporcionar un cierto alivio ambiental, junto con ciertos beneficios económicos, sin embargo, no aborda la necesidad de un **re-diseño** fundamental de los flujos de materiales y aborda de manera inadecuada la toxicidad en los productos actuales (Braungart et al. 2007). A pesar de su amplia aceptación mundial, la ecoeficiencia no ha reducido la contaminación, ni ha frenado el agotamiento de los RPANR o mitigado eficazmente el cambio climático (Braungart et al. 2007). Además, no hay pruebas claras, ni históricas ni teóricas, de que las mejoras en la eficiencia vayan a disminuir en última instancia la cantidad de recursos utilizados (Smil 2008). En consecuencia, la ecoeficiencia no es suficiente, sin embargo, puede ser vista como el puente necesario entre el obsoleto modelo ecoeficiente de C2G y un nuevo paradigma industrial sostenible de C2C, acoplado a una mayor eficiencia en el sector de consumo de electricidad.

### 2.2.2 DE LA CUNA A LA CUNA

El concepto de la filosofía C2C fue acuñado en el libro *Cradle-to-Cradle: Remaking the Way We Make Things* (McDonough and Braungart 2002), donde se definió un producto C2C como aquel que está diseñado y fabricado para evitar la contaminación del medio ambiente, no sólo durante su fase de creación, sino a lo largo de toda su vida útil y también al *final de su vida útil* (EoL, por sus siglas en inglés). La producción de bienes en un modelo C2C implica un sistema industrial circular, donde todos los materiales pueden ser utilizados indefinidamente (ver Figura 5). A este proceso de C2C puede considerarse como un "*up-cycling*" o *supra-reciclaje* (Braungart et al. 2007). En este flujo constante y circular de materiales, el modelo C2C posee dos ciclos o metabolismos análogos (ver Figura 5): el ciclo técnico, en el que los materiales utilizados para la fabricación de un producto se

reutilizan como materias primas para otro nuevo producto; y el ciclo biológico, en el que los materiales son absorbidos por la biosfera como nutrientes biológicos. En resumen, según los proponentes del C2C, todos los materiales, si se seleccionan adecuadamente, pueden reutilizarse al final como insumos industriales de alto valor a través del ciclo técnico (McDonough and Braungart 2002), por lo tanto, en teoría, todos los materiales utilizados en la fabricación de un PFV-SiC pueden convertirse en recursos primarios al EoL, sin pérdida de sus propiedades y calidad, pudiendo ser utilizado para fabricar el mismo producto u otro diferente.

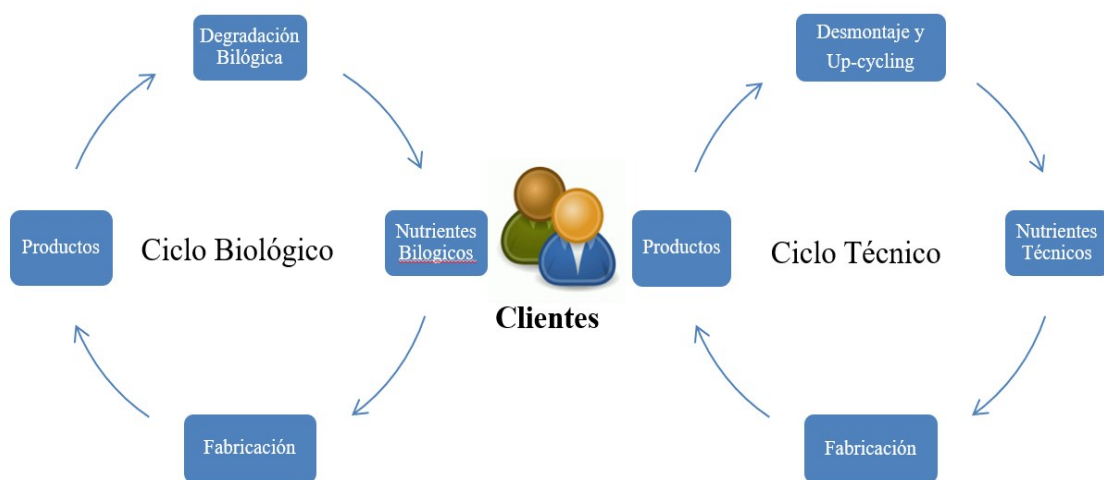


Figura 5 Flujo simplificado en un sistema C2C

C2C se basa en tres principios fundamentales (McDonough and Braungart 2002):

- Basura = alimento. Aquí y con el fin de poder ajustar el alcance de este principio al objeto de estudio de esta Tesis Doctoral, se ha ajustado y considerado lo siguiente; "*basura = recursos*", lo que en si sugiere es que se debe abandonar del todo el concepto de *basura*;
- Aprovechar la radiación solar: en general hace referencia al uso exclusivo de fuentes de energía de baja entropía (i.e. las renovables).
- Celebrar la diversidad: usar diferentes materiales con el fin de mejorar la sostenibilidad en las condiciones ambientales locales.

La única herramienta disponible para evaluar un producto dentro de este marco es la *C2C Certification*<sup>TM</sup> (MBDC LLC. 2012), que es implementada por el *Cradle-to-Cradle*

*Products Innovation Institute* (Cradle to Cradle Products Innovation Institute 2017). Esta herramienta puede ser utilizada por los fabricantes para evaluar sus productos bajo este concepto. La certificación tiene cinco categorías -Básica, Bronce, Plata, Oro o Platino- que representan los diferentes niveles de logro bajo el esquema de certificación. Sin embargo, esta herramienta solamente considera la toxicidad de los materiales utilizados y su posible reemplazo por alternativas no tóxicas, obviando otros impactos medioambientales que pueden acontecer en su ciclo de vida y los desafíos logísticos de las diferentes escalas de espacio-tiempo en los distintos materiales embebidos en un producto.

En síntesis, existe una substancial diferencia entre lo que es el reciclaje y la filosofía C2C. Esto se debe a que el reciclaje es en el fondo un infra-reciclaje (downcycling), es decir, que el material obtenido del proceso de reciclaje, si bien tiene funcionalidad, su calidad es intrínsecamente inferior al ser comparada con el material original, disminuyendo su tasa de reciclabilidad y limitando su re-uso a futuro, terminando inevitablemente en un vertedero. Un claro ejemplo sucede con el aluminio de las bebidas enlatas, donde si bien en su primer ciclo de vida es posible reciclar el 100%, el resultado es un aluminio híbrido de menor calidad, dada la mezcla aleatoria de diferentes tipos de aleaciones, que al ser recicladas se funden en una sola mezcla, que terminará ofreciendo prestaciones menores, limitando su potencial re-uso en un nuevo ciclo de vida, terminando convertido en basura. Por lo tanto, un producto que se convierte en basura es de mala calidad. Por lo tanto, podemos aseverar que el reciclaje per se es perjudicial para la innovación. El reciclaje ha ayudado a perfeccionar la industria de la basura en lugar de desarrollar mejores productos.

Mientras que un producto C2C, tiene como objetivo de diseñar y fabricar productos completamente reutilizables, tanto, tecnológica como biológicamente, eliminando los materiales tóxicos, utilizando solamente energías renovables, sin disminuir la calidad del agua utilizada en el proceso de manufacturación y porque los materiales pueden ser completamente utilizados en la biosfera o en la tecnosfera (i.e. industria).

En general, hoy la protección del medio ambiente significa prevenir, ahorrar, prescindir, reducir, por lo que este tipo de sustentabilidad finalmente convierte al cliente en un enemigo. La filosofía C2C no trata sobre ética medioambiental, sino de innovación y calidad: todo es útil (C2C) y no menos dañino (reciclaje) (McDonough and Braungart 2002; Braungart et al. 2007).

Luego de haber descrito los principios y conceptos relacionados con los paradigmas C2C y C2G, se hace fundamental aclarar que la metodología actual de gestión de residuos fotovoltaicos sólo se centra en los principios medioambientales de las 3R: Reducir,

reutilizar y reciclar (IRENA 2016a). El enfoque de las 3R *no* considera el *rediseño* de los paneles fotovoltaicos, el reemplazo de materiales tóxicos, el uso de renovables en su manufacturación, por lo que *no* resuelve el problema de la generación de residuos, ya que la eliminación se sigue considerando como una opción viable, limitando la reciclabilidad de los materiales involucrados. En síntesis el enfoque 3R, a pesar de sus buenas intenciones, promueve los principios del C2G, en lugar de los relacionados a un enfoque de C2C, ya promueve el infra-reciclaje de sólo alguno de los materiales utilizados en la fabricación de los paneles fotovoltaicos, especialmente para el vidrio y el aluminio que son altamente reciclables, con un índice de reciclabilidad de ~90%, mientras que el Silicio (*Si*) y la Plata (*Ag*), si bien tienen un índice de reciclabilidad alto (~90%), dado que actualmente no se reciclan a escala comercial, terminan simplemente en un vertedero o incinerados (Ardente et al. 2019).

### 2.2.3 HERRAMIENTAS DE EVALUACIÓN: CERTIFICACIÓN C2C VERSUS ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA (ACV)

En la academia se ha utilizado ampliamente la herramienta del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) para realizar análisis de flujo de materiales. Por otro lado, los especialistas que trabajan el tema de Cradle-to-Cradle (C2C) también han desarrollado su propio esquema de certificación para evaluar el nivel de C2C de un producto. En esta sección se describirá la certificación C2C; más adelante se dedicará una sección completa al ACV. Sin embargo, se debe mencionar que ambos modelos (ACV y certificación C2C) carecen de un carácter dinámico tanto a escala espacial y temporal, es decir son solamente una fotografía que describe algo en un determinado período de tiempo y espacio, lo que limita sus capacidades para pronosticar variaciones frente a diferentes escenarios y planificación de escenarios futuros. He aquí una de las aportaciones fundamentales del presente trabajo, recogida en el capítulo 3, donde se procede a introducir un modelo dinámico original, basado en ecuaciones diferenciales, que busca complementar al ACV y la certificación C2C.

Los profesionales del C2C han desarrollado una estructura de certificación que ofrece la designación C2C Certified™ (MBDC LLC. 2012). El programa de certificación, actualmente en su tercera versión (V3), es administrado, de manera independiente y sin fines de lucro, por el Cradle-to-Cradle Products Innovation Institute. Actualmente, este es el organismo responsable de otorgar dicha certificación, cuyo objetivo es mantener la transparencia y apertura de dicho proceso de certificación (MBDC LLC. 2012).

Con esta certificación se pretende permitir a las empresas demostrar sus logros en la fabricación de productos C2C y, por ende, que los productos C2C son viables y no causan daño a las personas ni al medio ambiente. Todos los materiales de un producto C2C se estudian a una escala de 100 partes por millón para verificar el cumplimiento de las normas de calidad y no toxicidad de los materiales utilizados según los principios C2C.

Durante el proceso de certificación, los productos son evaluados en base a los principios de C2C, en base al cumplimiento de cinco criterios (MBDC LLC. 2012), que pueden describirse como:

- **Salud material:** Los productos C2C están hechos con materiales *no* tóxicos. Si un componente tóxico no puede ser reemplazado, entonces debe estar bien encapsulado para ser reutilizado al final de la vida útil del producto.
- **Reutilización de material** (*supra-reciclaje*): Esto implica un ciclo cerrado, donde los materiales fluyen repetidamente sin pérdida de valor y calidad. La reciclabilidad del material es esencial para lograr tasas eficientes de reutilización.
- **Administración del agua:** El uso del agua en los procesos industriales debe ser controlado y eficiente a la par que debe evitarse su contaminación .
- **Gestión de Energías Renovables y Carbón:** Maximizar el uso de fuentes de energía y tecnología renovables y promover el uso eficiente de la energía, a fin de reducir y/o eliminar totalmente las emisiones de carbón<sup>7</sup>.
- **Justicia social:** La planificación y el diseño deben tener siempre en cuenta las condiciones sociales y económicas locales en las que están enclavadas las instalaciones industriales.

Por otro lado, se deben cumplir los requisitos mínimos para cada uno de los cuatro niveles de certificación disponibles: Básico, Plata, Oro y Platino. En lugar de una simple aprobación o rechazo, el esquema de certificación apoya los planes de implementación de desarrollo *en pos* de la mejora continua. En las condiciones definidas en la V3, la certificación de producto debe renovarse cada dos años previo pago correspondiente. Esta situación podría ser una fuente de conflicto en aquellos sectores proambientales que buscan herramientas y certificaciones gratuitas para todos, y que consideran a este tipo de

---

<sup>7</sup> En términos energéticos y descarbonización, merece ser mencionada la tecnología nuclear. Idealmente sólo la fusión puede ser considerada sustentable, dado que no genera basura radiactiva. Sin embargo aún no está en uso a nivel comercial.

certificaciones ambientales como la C2C un mero negocio más que una herramienta que ayuda a reducir el impacto ambiental de la industria en general.

En principio, la certificación C2C puede considerarse como una valiosa etiqueta ecológica y una herramienta útil para evaluar los compuestos tóxicos de un producto. Sin embargo, por si sola, esta herramienta no puede garantizar totalmente la calidad del producto, así como su sustentabilidad social y ambiental, por lo que debe ser mejorada y/o complementada por otras herramientas a fin de que pueda realmente cubrir todas las dimensiones de la filosofía C2C.

Por otro lado, la herramienta de Análisis del Ciclo de Vida (ACV) tiene una larga historia académica e industrial y un reconocimiento a nivel global amplio. Sin embargo, según un documento de posición de la Agencia Ambiental del Reino de los Países Bajos, la herramienta ACV no sería adecuada para evaluar y comunicar las cualidades beneficiosas de los productos C2C (NL Agency 2011).

Una crítica fundamental hecha a la certificación C2C señala que sus criterios están centrados solamente en un momento determinado, esto es, el presente, y no cubren todo el ciclo de vida de un bien en particular. Además, el esquema de certificación puede hacer demasiado hincapié en la categoría de salud material, lo que da como resultado bienes que sólo cumplen con el principio de que "los residuos son iguales a los alimentos", pero pierde efectividad en las áreas económicas, ambientales y sociales (Toxopeus et al. 2015).

A pesar de que puedan existir algunas discrepancias metodológicas y una falta de especificaciones respecto a la filosofía C2C, la herramienta ACV puede complementar de manera eficiente el proceso de diseño general de cualquier producto, incluyendo los dispositivos fotovoltaicos en su sentido amplio, mejorando los beneficios del diseño y la fabricación de cualquier producto en base a los principios de C2C. Además, el Análisis de Ciclo de Vida Sostenible (ACV-Sostenible), como nueva herramienta de evaluación, puede proporcionar datos cuantitativos (Finkbeiner et al. 2010), permitiendo una comunicación más abierta y transparente sobre los beneficios de los productos C2C.

En resumen, los temas mencionados anteriormente parecen reflejar un diálogo limitado entre los diferentes profesionales, actores, y organismos del ámbito del C2C y el ACV, más que una incompatibilidad crítica entre la certificación C2C y la metodología de ACV.

En este punto, resulta fundamental destacar que un sistema de Ciclo-Cerrado de Materiales (CCM) basado en principios C2C (C2C-CCM) es un tema de investigación complejo, multiparámetro y multidisciplinario, y que a pesar de lo atractivo que resultan

los principios C2C, la aplicación de una certificación C2C en un ciclo cerrado de materiales tiene viabilidad simplemente a nivel conceptual, mientras que la metodología de ACV está limitada debido a que sólo representa una fotografía temporal, no dinámica, ya que describe ciertas características de un sistema o producto y sus impactos en un período de tiempo y localización específico.

En cualquier caso, ambas metodologías carecen de un marco teórico que estimule la investigación de los límites termodinámicos y logísticos de un sistema de flujo de materiales real. Además, los modelos de cadena de suministro de ciclo cerrado utilizados hoy en día en la industria fotovoltaica (Kim and Jeong 2016), se basan principalmente en simulaciones matemáticas-probabilísticas que no tienen en cuenta todas las implicaciones dinámicas de los distintos regímenes de escala de tiempo de los materiales y productos involucrados en un bien final, ignorándose los aspectos termodinámicos de la implementación de un sistema de CCM. Sin embargo, es posible esperar que los potenciales beneficios ambientales y sociales del desarrollo de un modelo C2C-CCM justificarían un examen crítico, así como la adaptación y modificación de los modelos actuales junto con el desarrollo de modelos dinámicos.

Para lograr con éxito la introducción de los principios C2C a nivel comercial en el sistema económico global, este marco debe ir más allá del ámbito de la mera filosofía y análisis cualitativos. Urge una revisión y propuestas científicas rigurosas que ayuden a mejorar nuestra comprensión sobre las dinámicas de un sistema C2C-CCM, sus implicaciones y la interdependencia entre las actividades humanas y la naturaleza.

En la próxima sección se introduce un modelo conceptual basado en principios matemáticos-termodinámicos y una escala espacio-temporal aplicado a un sistema circular. Esta propuesta es crucial para poder explicar el flujo de materiales en un sistema C2C-CCM, ya sea a nivel local o global.

### 2.3 CERRANDO EL FLUJO DE MATERIALES: PRINCIPALES DESAFÍOS

El impacto medioambiental positivo del reciclaje de los paneles fotovoltaicos es bien reconocido, tanto por la reducción de emisiones, como del agotamiento de valiosos materiales (Müller et al. 2006). Dada la importancia del reciclaje para la implementación de un flujo cerrado de materiales fotovoltaico, en esta sección revisaremos el *estado del arte* de los métodos de reciclaje para la tecnología de PFV-SiC, dado que como se ha mencionado en el Capítulo 1, la mayor parte de la basura generada por la tecnología fotovoltaica vendrá del uso de módulos de Silicio cristalino.

### 2.3.1 RECICLAJE DE PANELES FOTOVOLTAICOS Y SUS DESAFÍOS

En las últimas décadas, varios estudios han considerado la posibilidad del implementar el reciclaje al EoL de los PFV-SiC, cubriendo áreas relacionados con temas políticos, coste y posibles tecnologías de reciclaje. Sin embargo, aún existe poco conocimiento sobre los impactos que pueda ocasionar la eliminación de los paneles en los vertederos, especialmente en términos de salud humana y de impacto ambiental (Latunussa et al. 2016a).

Si bien el reciclaje de paneles podría generar nuevas oportunidades de mercado, que van a requerir nuevas y eficaces tecnologías, junto con métodos económicamente viables para el proceso de la separación de los materiales embebidos en el panel fotovoltaico, así como con ayudar a la reducción de residuos y toxinas (Fthenakis and Moskowitz 1999). Lamentablemente, la ineficiencia del actual reciclaje de PFV-SiC, aumenta nuestra dependencia en las materias primas, exacerbando el agotamiento de los RPANR, y generando grandes cantidades de basura al EoL. Por lo tanto, la industria fotovoltaica necesita con urgencia una nueva forma de hacer las cosas a fin de reducir los impactos negativos y ser más sostenible. Por otro lado, las últimas tecnologías de reciclaje disponibles en el mercado se limitan a reciclar solamente algunos de los materiales utilizados en su estructura, recuperándose el 80 por ciento *solamente* del vidrio y aluminio utilizado, mientras que *todo* el resto de los materiales y componentes terminan en el vertedero o incinerados. Más importante aún, **no se están reciclando las células solares de silicio** (PV CYCLE, 2016), las que, como se ha mencionado anteriormente, son altamente intensivas, tanto en términos de energía y trabajo necesarios para producirlas. Además, hoy por hoy, sólo una cantidad insignificante de paneles fotovoltaicos es recuperada y logra llegar a una planta de reciclaje, la que usualmente ha sido diseñada para tratar residuos de la industria electrónica (Latunussa et al. 2016a).

Para avanzar hacia un ciclo cerrado de materiales (CCM) basado en los principios de C2C, la recuperación de materiales a través de tecnologías de reciclaje adecuadas y limpias es fundamental.

Actualmente se deben perfeccionar los métodos de recuperación para el *Si*, *Cu*, *Ag* y otros materiales valiosos. En particular, respecto a la célula solar y al *Si* que las compone, se han probado diversos métodos para recuperarlo de los PFV-SiC, principalmente se han desarrollado procesos químicos y térmicos, o una combinación de ambos, incluyendo además la trituración manual y mecánica (Latunussa et al. 2016a). Este tipo de reciclaje se

realiza en su mayor parte a escala de proyecto piloto y aún no está disponible a escala comercial (Latunussa et al. 2016a).

Sobre el reciclaje de paneles a nivel comercial, sólo Deutsche Solar y PV-CYCLE parecen estar reciclando PFV-*SiC* a escala comercial, sin embargo, sus procesos siguen dando lugar a la eliminación de residuos tóxicos y no recuperan el *Si* de las células solares (Kim and Jeong 2016).

En este contexto, SunPower ha sido la primera compañía en recibir una certificación *C2C Silver* (SunPower 2016). Sin embargo, se debe aclarar que una certificación *Silver* es una categoría intermedia de un total de cinco categorías, ya mencionadas en la sección 2.2.2, y que solamente permite la recuperación de hasta un 50 por ciento del total de los materiales utilizados. El 50 por ciento restante de los materiales *no son* reutilizables pese a la certificación *C2C*.

A pesar de todos los esfuerzos actuales, el reciclaje de PFV-*SiC* y en particular, la recuperación del *Si* son tecnologías que están aún en una etapa de infancia (Latunussa et al. 2016a).

### 2.3.1.1 TECNOLOGÍAS DE RECICLAJE DE SILICIO DE PFV-*SiC*

Deutsche Solar ha investigado formas de reciclar PFV-*SiC*, obteniendo resultados alentadores al utilizar una combinación de tratamientos térmico y químico (Müller et al. 2006). En Estados Unidos, SunPower y otros fabricantes de energía fotovoltaica han lanzado la Asociación de Industrias de Energía Solar (SEIA, por sus siglas en Inglés), en la que se están desarrollando nuevas tecnologías de reciclaje (SunPower 2017). Además, Fraunhofer IBP ha estado implementando un proceso mecánico en el que los paneles fotovoltaicos se trituran y separan y *sólo* se recuperan el aluminio y el vidrio para su reciclaje y re-uso posterior (Fraunhofer IBP 2012; Held 2013).

De acuerdo con la literatura más reciente disponible para paneles fotovoltaicos basados en silicio cristalino, las alternativas de reciclaje disponibles posterior a la recolección pueden clasificarse en: (a) tratamiento físico, (b) tratamiento térmico, (c) procesos químicos y (d) una combinación de estos tres tratamientos. En este sentido, la literatura científica sobre estos diferentes enfoques es bastante abundante. Un resumen de estos enfoques disponible en (Padoan et al. 2019) entrega una revisión completa de estos métodos. Por lo tanto, y con el fin de entender cómo se utilizan estos diferentes enfoques y sus combinaciones para el reciclaje de paneles fotovoltaicos, hemos dividido el proceso

de reciclaje en sus etapas principales y adaptado según literatura disponible (Tao and Yu 2015):

- a. **Deslaminado:** Aquí se retira el acetato de etileno y vinilo (EVA, por sus siglas en inglés) para acceder a los materiales y componentes del panel fotovoltaico. En esta etapa los paneles pueden someterse a muchos tratamientos alternativos para eliminar la capa de EVA. Las principales vías de tratamiento utilizadas son: pirólisis a alta temperatura (Doni and Dughiero 2012; Dias et al. 2017), disolventes orgánicos (Doi et al. 2001), ácidos (Bruton et al. 1994) y una combinación de disolventes orgánicos y tratamiento térmico que también puede lograrse mediante un método ultrasónico asistido para mejorar la tasa de disolución del EVA (Kim and Lee 2012). En esta revisión no hemos considerado los procesos físicos, dado que el *Si* recuperado queda altamente contaminado con impurezas e imposible de ser tratado de manera tradicional, lo que hace que el proceso de reciclaje sea más complejo y requiera tratamientos adicionales.

La delaminación puede considerarse el paso más crucial para el reciclaje de la tecnología de PFV-SiC, ya que siempre que se aplique un tratamiento adecuado, será posible recuperar una célula solar intacta que pueda ser reutilizada, evitando tratamientos complejos (Xu et al. 2018) y reduciendo los costes de reciclaje (Pagnanelli et al. 2017).

- b. **Separación de materiales:** Posteriormente, una vez que se ha retirado completamente el EVA, el vidrio, y el marco de aluminio, las células solares se separan manual o mecánicamente del panel. Según se indica en la literatura, este proceso es mayormente manual y en casos muy aislados se observa algún grado de automatización (Tao and Yu 2015; Xu et al. 2018; Padoan et al. 2019). En esta etapa, el vidrio y el aluminio se recuperan directamente y pueden ser enviados a instalaciones especializadas para su reciclaje y posterior reutilización.

En particular, las células solares recuperadas que no están dañadas pueden ser reutilizadas directamente, previo tratamiento y recuperación de la oblea de silicio, sin embargo, si durante la etapa de delaminación las células solares son expuestas a ácidos inorgánicos y a temperaturas superiores a

450°, estas se dañan y no pueden ser reutilizadas directamente después de la recuperación (Tao and Yu 2015). El resto de los metales, como el aluminio y vidrio, siguen sus procesos de reciclaje tradicional.

- c. **Recuperación de células solares y extracción de Silicio:** Si las células solares han sido recuperadas sin daños, son tratadas químicamente para recuperar metales valiosos (p. ej. Ag), remover impurezas, y eliminar la capa antirreflejos. Algunos tratamientos químicos comúnmente utilizados en los paneles fotovoltaicos cristalinos basados en *Si* se basan en una combinación de hidróxido de potasio para eliminar el revestimiento de Al y ácido nítrico para extraer Ag (Klugmann-Radziemska and Ostrowski 2010; Shin et al. 2017). Se ha sugerido que las células solares no dañadas pueden recuperarse completamente utilizando un disolvente de tricloroetileno a 80 °C durante 10 días (Doi et al. 2001).

Los principales procedimientos utilizados para eliminar la capa antirreflectante son el grabado de obleas con una aplicación secuencial combinada de ácido acético, ácido nítrico, ácido fluorhídrico y bromo (Klugmann-Radziemska and Ostrowski 2010). Otros autores sugieren el uso de una pasta de esmerilado que contenga ácido fosfórico (Shin et al. 2017) y una única solución de ácido fluorhídrico (Xu et al. 2018). En general, una vez que los paneles fotovoltaicos se han sometido al proceso descrito anteriormente, las obleas pueden reciclarse completamente y ser reutilizadas en la línea de producción de una fábrica de células solares.

Sin embargo, a veces no es posible recuperar integralmente una oblea de silicio, especialmente en aquellos casos donde se rompe un panel fotovoltaico y se daña la oblea (i.e. microfracturas, grietas, roturas, etc.). Cuando esto sucede, se requieren tratamientos más elaborados. Por ejemplo, los paneles fotovoltaicos pueden sumergirse en un solvente orgánico para separar el vidrio del panel fotovoltaico después de varios tratamientos de alta temperatura. Luego, el *Si* se recupera en la forma de partículas cristalizadas fragmentadas, para luego purificarse con un proceso de esmerilado químico que combina ácido fluorhídrico, ácido sulfúrico y ácido nítrico durante 20 minutos (Kang et al. 2012). Otro enfoque ha considerado el uso de un proceso termoquímico para separar las células solares de un

panel fotovoltaico dañado sumergiéndolo en una solución de anhídrido silícico en combinación con un tratamiento térmico, luego, las células solares dañadas siguen un proceso termoquímico para recuperar el silicio puro (Klugmann-Radziemska and Ostrowski 2010).

Por otro lado, con el fin de poder reducir el tamaño y facilitar el proceso en cuestión, los paneles son aplastados varias veces. Una vez reducido su tamaño, los fragmentos pasan por múltiples tratamientos térmicos para eliminar la capa de EVA. Después, los fragmentos son tratados termoquímicamente para recuperar *Si* y otros metales con una mezcla de cloruro de hidrógeno, peróxido de hidrógeno y ácido nítrico en un digestor de microondas a 220 °C, lo que permite separarlo de impurezas tales como el Boro, Fósforo y otras (Pagnanelli et al. 2017).

Usualmente, el *Si* recuperado es en la forma pura del elemento (> 99,8% Si), por lo que este se entrega a una planta que fabrique células solares. Sin embargo, lo anterior ocurre con un mínimo porcentaje de los módulos FV recuperados, debido principalmente a que las tecnologías de reciclaje son todavía relativamente nuevas y conllevan retos que deben aún ser resueltos (Padoan et al. 2019). Es importante mencionar que debido a que los actuales métodos de reciclaje de paneles fotovoltaicos utilizan procesos químicos y térmicos, se deben urgentemente considerar los impactos medioambientales asociados a estos procesos.

De esta sección, se concluye que la recuperación del *Si* y de otros materiales de los paneles fotovoltaicos cristalinos sigue siendo un reto por resolver. Mientras tanto, necesitamos *re-pensar* el diseño de los PFV-*SiC* para evitar mayores dificultades al momento de reciclar un panel, en especial se debe reducir la intensidad energética y uso de tóxicos químicos durante la separación de los materiales que componen el panel. Es en este punto, donde los principios de C2C pueden ayudar a dar forma al futuro diseño de los paneles, ayudando a sustituir los materiales tóxicos que los componen. Además, es necesario comprender otros desafíos, como es el caso de las escalas de espacio-tiempo donde se desarrollan estos procesos, y su impacto en la logística y cadena de suministro.

### 2.4 EL ROL DE LA LOGÍSTICA INVERSA

La implementación de un *ciclo cerrado de materiales* (CCM) requiere necesariamente de un fuerte apoyo logístico. En este caso, cuando pensamos en el supra-

reciclaje (esto es, . reciclaje+recuperación+re-uso, sin que los materiales pierdan sus cualidades o se degraden) para la reutilización de los materiales de un PFV-*Si* posterior a su EoL, debemos considerar la *logística inversa* como medio para mover, distribuir y recuperar dichos recursos para el sector industrial.

La logística inversa se concibió inicialmente para las ocasiones en que un producto es devuelto antes de su uso (por ejemplo, devoluciones comerciales), es decir, cuando los clientes devuelven un producto defectuoso (ej. para su reacondicionamiento, reparación, etc.), o cuando un producto no satisface las expectativas de un cliente por cualquier motivo particular. Sin embargo, a principios de la década de los 90, y en gran parte debido a las preocupaciones mundiales en materia de medio ambiente y desarrollo, el concepto de *logística inversa* fue ganado popularidad. Fue así como nace su primera definición general (Stock 1992), la que fue ajustada posteriormente, sin embargo, la esencia de la idea permaneció inalterada (Fleischmann et al. 1997). Hoy podemos definir a la *logística inversa* como "el proceso de planificación, implementación y control del flujo eficiente y rentable de materias primas, inventario en proceso, productos terminados e información relacionada desde el punto de consumo hasta el punto de origen con el fin de recuperar el valor o la eliminación adecuada" (Saysel et al. 2002).

En términos generales, la industria ha reconocido el rol de la logística inversa al momento de evaluar, en general, un proceso de ciclo cerrado de productos. Varios expertos declararon la importancia de aplicar la logística inversa como una parte esencial en la cadena de suministro de un ciclo cerrado de productos. Una de las razones es la de reducir los costos, la generación de desechos y las emisiones de gases de efecto invernadero, y hacer un mejor uso de los recursos (Krikke et al. 2001). Otra motivación fue la de desarrollar nuevos modelos de negocio que tengan en cuenta el ciclo de vida completo del producto (Guide et al. 2003). Sin embargo, a pesar de estos esfuerzos por fortalecer y avanzar el concepto de logística inversa, poco se ha hecho sobre la base de investigaciones empíricas (Álvarez-Gil et al. 2007). Por otro lado, la *logística inversa* no evita la "generación de basura", por lo que esta debe ser adaptada para su aplicación en un sistema de flujo cerrado de materiales a fin de evitar la *generación de basura*. Además, los principios de C2C como "*re-diseño*" y "*waste=food*" tienen el potencial de incrementar los beneficios de la *logística inversa*, facilitando así la implementación de un *supra-reciclaje*.

Para una efectiva implementación de la *logística inversa* en un sistema C2C-CCM, es importante considerar el transporte simultáneo de materiales hacia adelante y hacia atrás, esto es, desde la fabricación al usuario y viceversa, sin necesidad de considerar su

eliminación como una opción viable y menos aún como basura. En el caso de los paneles fotovoltaicos cristalinos, las tasas de fallo y los plazos de devolución de estos son variables importantes que considerar en la implementación de este tipo de sistema. Según la literatura disponible, los beneficios potenciales que se pueden encontrar son:

- a. Al tener un control total sobre el flujo de materiales, los fabricantes podrían lograr una mayor ventaja competitiva frente a aquellos que no lo tienen, lo que podría generar un aumento en el margen de ganancias (Meyer 1999).
- b. Beneficios ambientales, según lo requiera el marco regulatorio o lo dicte la creciente preocupación ambiental (Fleischmann et al. 1997). Algunos autores lo llaman Green Supply Chain Management (Srivastava 2008).

En nuestro caso particular, el plazo y el número de devoluciones de productos pueden, en principio, estimarse por adelantado, dado que se conoce la vida útil estándar de los Paneles Fotovoltaicos de Silicio Cristalino (PFV-SiC), particularmente cuando se empieza a reducir su eficiencia, que es de ~30 años (Chowdhury et al. 2020). Por lo tanto, cada fabricante del sector va a poder realizar sus estimaciones y producir datos que permitan asegurar la operación efectiva de este sistema de CCM en la industria fotovoltaica. Los principales métodos utilizados para estimar la vida útil de los PFV-SiC serían los estadísticos. Sin embargo, no cualquier método podría seleccionarse, ya que esto dependería de las características particulares de cada panel. Algunos investigadores han destacado la importancia y necesidad de seguir investigando en el desarrollo de una metodología más sólida para estimar los retornos previstos para los diferentes productos, más allá de las probabilidades básicas (Potdar 2009). Por lo tanto, la aplicación de los principios de C2C en el diseño de paneles debería ayudar a simplificar la estimación de los plazos de retorno en la industria fotovoltaica.

### 2.5 MARCO POLÍTICO QUE FOMENTE UN CAMBIO DE PARADIGMA

Es importante identificar cómo las políticas relacionadas con el EoL de los PFV-SiC van a potenciar la investigación y avance en los conceptos aquí descritos, facilitando la futura implementación de un ciclo cerrado de materiales en la industria fotovoltaica. Al respecto, los países de la Unión Europea (UE) son los únicos que cuentan con un marco político específico que promueve el tratamiento y reciclado de los residuos fotovoltaicos. Es de esperar que otros grandes mercados fotovoltaicos, como China, India y EE. UU., junto con otros países, consideren en algún momento políticas similares o mejores,

impulsadas por incentivos económicos y medioambientales. Además, los países en desarrollo tendrían que superar distintos retos antes de adoptar una política similar a la de la UE, incluida la insuficiencia de datos de los inventarios de EoL para diferentes tecnologías, infraestructuras, coordinación interna y falta de capacidades de investigación y desarrollo (I+D).

Las ventajas económicas deberían animar a la industria fotovoltaica a hacer que las tecnologías de paneles cristalinos y potencialmente otras tecnologías fotovoltaicas sean más sostenibles y limpias.

Para asegurar el máximo beneficio, las políticas referidas al *EoL* para paneles fotovoltaicos deben proporcionar indicaciones y directrices para la gestión de un sistema C2C-CCM. A largo plazo, este tipo de políticas pueden generar valor y asegurar beneficios socioeconómicos, incluyendo la creación de nuevas industrias y puestos de trabajo (IRENA 2016a), además de permitir el recuperación, reutilización y valorización de los RPANR, y la sustitución de sustancias tóxicas.

Un marco de planificación y diseño adecuado para un sistema C2C-CCM para PFV-SiC reduciría el consumo de RPANR y evitaría que las sustancias tóxicas dañen la salud humana y el medio ambiente. El tratamiento adecuado de los paneles en la fase de EoL permitiría su reutilización y recirculación, lo que sería un paso importante en el desarrollo de una economía circular totalmente sostenible.

También se necesitan políticas que garanticen mecanismos de financiación adecuados para el reciclaje de los paneles. Las ventajas económicas deberían animar a la industria fotovoltaica a hacer que las tecnologías fotovoltaicas y potencialmente otras tecnologías renovables sean más sostenibles y limpias. La industria, sin embargo, necesitaría desarrollar un nuevo modelo de negocio. Las políticas, los incentivos y los mecanismos financieros necesarios para ello son un ámbito que requiere más investigación.

A largo plazo, la sostenibilidad en el uso de los RPANR y la generación de residuos por parte de la industria fotovoltaica dependerá en parte de los avances tecnológicos y también en la comprensión de lo que impulsa los patrones de consumo. Todos estos factores deben ser considerados para introducir prácticas de consumo sostenible, minimizar el agotamiento de los recursos, prevenir la generación de desechos y proteger el medio ambiente y los medios de vida humanos.

Las políticas apropiadas ayudarán a promover los sistemas C2C-CCM, a identificar oportunidades de mercado, a superar la resistencia al cambio y a crear conciencia sobre los métodos de reciclaje de los paneles fotovoltaicos cristalinos.

## 3

## FUNDAMENTO TEÓRICO

En esta sección se introducen los fundamentos tanto el modelo conceptual como el teórico propuestos en esta Tesis Doctoral. Respecto al modelo conceptual, primero se define qué es un sistema de ciclo cerrado de materiales y cuáles deberían ser las características principales de este tipo de sistemas. Para ello, se introduce una escala de *espacio-tiempo* adecuada que ayuda a describir los procesos en un sistema circular y caracterizar adecuadamente dicho sistema. Posteriormente, se explica la necesidad de desarrollar un marco teórico para un sistema C2C-CCM. Se discuten las implicaciones energéticas de un sistema cerrado y se introduce una propuesta de separación de materiales, analizando sus correspondientes implicaciones termodinámicas, para un módulo FV diseñado según los principios C2C. Luego, se introduce el concepto de tiempo circular y sus componentes, finalizando con la descripción matemática dedicada al tratamiento del conjunto de ecuaciones que definen a un sistema C2C-CCM y su esquema numérico. Como paso último, se evalúa la estabilidad del modelo introducido en este trabajo.

### 3.1 MODELO CONCEPTUAL DE UN SISTEMA DE FLUJO CERRADO DE MATERIALES BASADO EN PRINCIPIOS C2C

Sin duda, un primer paso para abordar el problema sería pensar en el rediseño de los PFV-SiC, ya que sería un aspecto esencial que permitiría la implementación de un enfoque CCM basado en los principios de C2C en su producción. Cada aspecto del diseño, los materiales y el ciclo de vida completo del panel debe ser estudiado cuidadosamente para que el módulo fotovoltaico forme parte de un continuo flujo cerrado. El objetivo principal es diseñar un panel que eventualmente se convierta de nuevo en un recurso al llegar a su EoL, vinculando todos los procesos involucrados en el ciclo de vida de esta tecnología. Los principios C2C, aplicados a la C2C Certified™ descritas en la sección

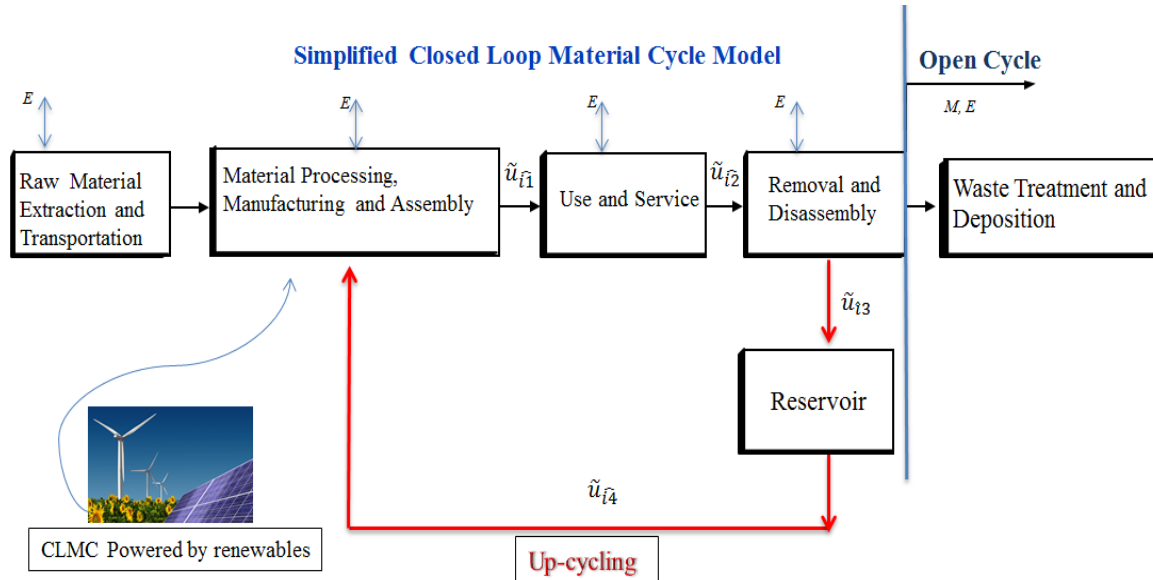
anterior, deben guiar el diseño de su ciclo de vida general complementado por la herramienta ACV. En base a lo anterior, se han delineado las siguientes directrices:

- Basándonos en los principios C2C, el diseño y fabricación PFV-SiC se debe considerar como un proceso natural, donde el flujo de materiales a nivel industrial se comporta como un metabolismo biológico, en el que los materiales utilizados siguen siendo seguros y saludables para el ecosistema en diferentes ciclos, aumentando la eficiencia general del sistema (Braungart et al. 2007). Esto debería aumentar el rendimiento en la recuperación de materiales para un efectivo *supra-reciclaje* y reutilización de materiales. Además, el uso de la herramienta ACV durante la fase de diseño, proporcionará una visión de los impactos potenciales sobre el ciclo de vida completo de un panel fotovoltaico, creando un ciclo virtual para los materiales del panel.
- De acuerdo con el enfoque C2C, se refuerza la importancia en repensar la intensidad con que se extrae la materia prima, así como los procesos de diseño y fabricación de un PFV-SiC en base a los principios C2C.

En esta Tesis Doctoral, primero se ha definido conceptualmente la estructura de un sistema C2C-CCM para la producción de paneles fotovoltaicos como una red basada en la teoría de grafos (Shirinivas et al. 2010) (ver Figura 6). En esta red, el sistema C2C-CCM puede describirse mediante un grafo dirigido conectado en el cual, un conjunto finito de Nodos ( $N$ ) son conectados a un conjunto finito de arcos dirigidos ( $\Lambda$ ), donde el Nodo final está conectado mediante un arco con el primer Nodo, es decir, el nodo inicial. Cada etapa es identificada de manera única por el conjunto de índices en las líneas de una grilla donde se intersecan en el par del diagrama  $\Omega = (N, \Lambda)$ . Es así como la Figura 6 ilustra esta red en un esquema simplificado para un sistema C2C-CCM, representando los flujos de materiales asociados a un PFV-SiC, y que potencialmente podría ser aplicada como un marco de referencia más amplio para la producción de cualquier otro bien. La red está compuesta por cuatro nodos que representan las subetapas de un sistema C2C-CCM, identificándose la dirección del flujo de material (flechas), la fuente de energía ideal para el proceso de fabricación, y las pérdidas de masa del flujo abierto.

En principio, un sistema C2C-CCM, expresado como una red de procesos, debe de proporcionar una alternativa eficiente y efectiva para monitorear los flujos de materiales y los contribuyentes de residuos a nivel de constituyentes discretos; esto permitirá cerrar el

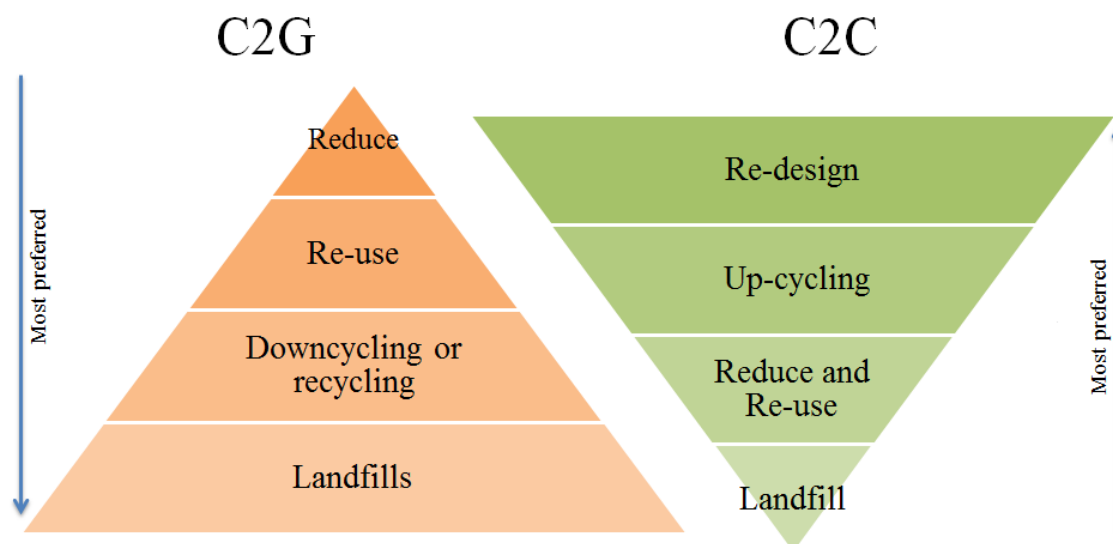
ciclo de los materiales utilizados en la fabricación de paneles fotovoltaicos mediante el uso del *supra-reciclaje*. Además, el sistema CCM, debería estar impulsado idealmente por energías renovables para mejorar los beneficios del sistema en su totalidad.



**Figura 6** Ciclo cerrado de materiales simplificado (Contreras Lisperguer et.al. 2017)

Las flechas muestran la secuencia del flujo de masa a través del sistema;  $\tilde{u}_i$ : representa la velocidad media del flujo de materiales y/o de un producto;  $E$ : representa la transferencia de energía dentro y fuera del sistema;  $M$ : representa las pérdidas de masa en un ciclo abierto.

Con el objeto de presentar un modelo verdaderamente sostenible, la propuesta C2C-CCM, debe considerar la importancia de las prioridades en las opciones de manejo de desechos. Los esfuerzos más importantes deben centrarse en *rediseñar* los paneles fotovoltaicos, *sustituir* los materiales tóxicos por alternativas saludables para el ambiente e incorporar los beneficios sociales, económicos y ambientales para lograr la recuperación y re-uso (*supra-reciclaje*) de todos los materiales utilizados (Braungart et al. 2007). En la Figura 7, se presenta este nuevo enfoque, donde la base es que el rediseño y el supra-reciclaje tienen la máxima prioridad.



**Figura 7** Prioridad actual de los procesos en un sistema C2G versus el enfoque de C2C (Contreras Lisperguer et. al. 2017)

En este nuevo modelo conceptual, el diseño del producto y la selección de materiales son pasos cruciales para facilitar el posterior desmontaje y supra-reciclaje del producto, para ello, los nuevos materiales deben cumplir con los principios de C2C y los fabricantes deben prever los impactos en todo el ciclo de vida del producto.

### 3.2 ESCALA DE ESPACIO-TIEMPO DE UN SISTEMA DE FLUJO CERRADO DE MATERIALES

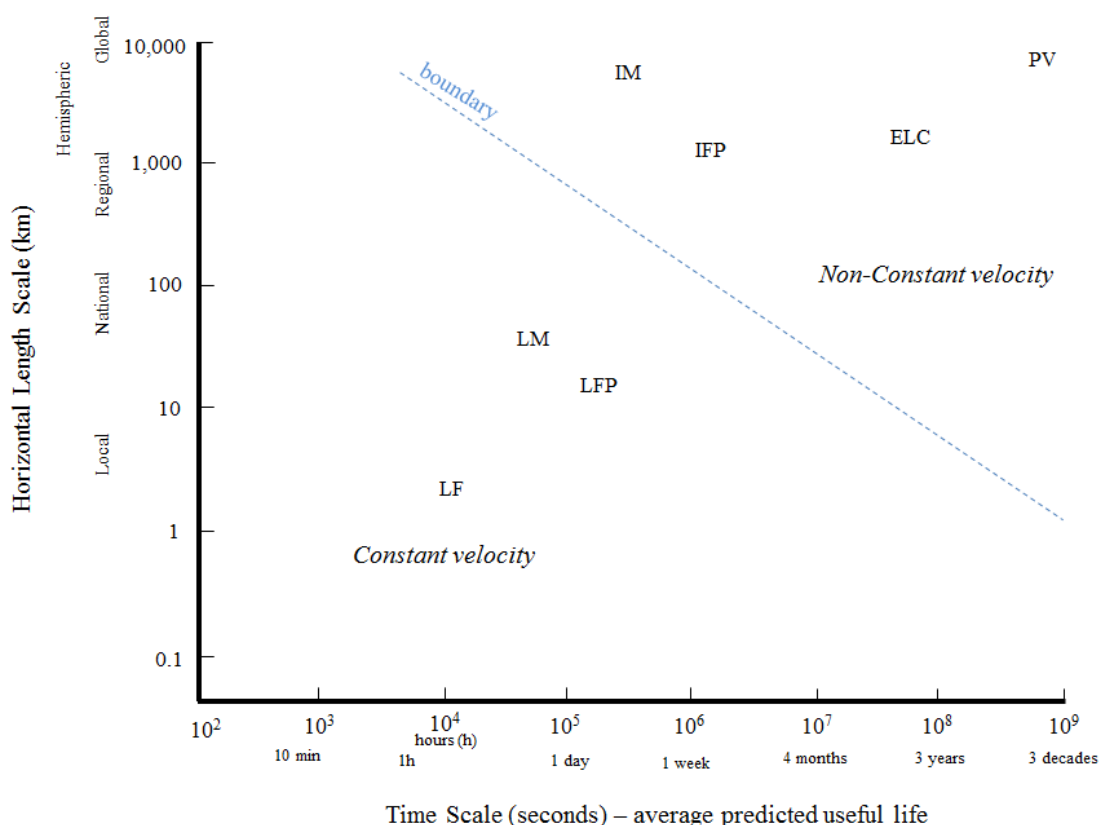
En el estudio de un sistema de Ciclo-Cerrado de Materiales (CCM), el problema de la integración de diferentes escalas de tiempo y espacio se complica enormemente por las interacciones dinámicas simultáneas entre materiales y productos que poseen diferentes escalas de tiempo y espacio. Por lo tanto, para poder entender estas implicaciones a lo largo del ciclo de vida de un PFV-SiC, tenemos que distinguir los aspectos espacio-temporales desde su fabricación, desmantelamiento, hasta su posterior recuperación y re-uso. A continuación se procede a identificar y definir los conceptos de la escala espacio-temporal desarrollada en esta Tesis Doctoral, que influyen en un proceso CCM y que deben ser detallados para el estudio de un sistema CCM:

- *Las fases industriales de los PFV-SiC* (p. ej. extracción de RPANR, transformación de estos recursos, fabricación, transporte, almacenamiento, suministro, etc.) se producen en una serie de dimensiones horizontales (escala espacial) a lo largo de un período de tiempo específico (escala temporal). La extensión espacial y temporal

de toda la actividad industrial para fabricar el producto final y su posterior ciclo de vida debe ser establecido para entender el impacto de los diferentes procesos de reutilización de los materiales del producto en un sistema CCM.

- La *escala espacial* se subdivide según el orden de magnitud del rango horizontal de influencia de los componentes de los productos fabricados en cada proceso industrial, es decir, la distancia en que se desplazan los materiales del producto y/o producto a lo largo de un determinado proceso. Esta definición nos permite describir el rango horizontal de influencia de la transformación de los RPANR. Dado que todos los procesos dependen en gran medida de la escala de longitud horizontal, esta escala puede facilitar el desarrollo de un sistema de clasificación simple pero eficaz. Las clasificaciones se han denominado en base a subdivisiones jurisdiccionales y geopolíticas, como se indica a continuación: Local (subdividido en subcategorías locales, comunales y municipales), Provincial, Nacional, Continental, Hemisférica y Global. Por ejemplo, un producto o bien fabricado con un RPANR extraído a unos pocos kilómetros de la instalación de fabricación y luego vendido y utilizado en la misma ciudad o municipio se considerará que su área de influencia es la *escala local*.
- Por *escala temporal* se entiende el "período de tiempo" a lo largo del cual, el volumen de RPANR que compone un producto, tiene una vida útil específica (en este caso prevista) en un marco de referencia que se mueve junto con el producto. Por ejemplo, los RPANR como el *Al*, *Si* y *Cu* son elementos que componen un PFV-SiC que tiene una vida útil media de 30 años.

Los esquemas de clasificación presentados anteriormente, tiene el potencial de describir las escalas espaciales y temporales de cualquier material, producto y proceso industrial.



**Figura 8** Escala espacial y temporal para los siguientes productos: ELC: Electrónica (distribución internacional), ordenadores; LHC: Electrodomésticos locales; IHC: Electrodomésticos internacionales; LM: Medios locales (en papel); IM: Medios de comunicación internacionales (basados en papel); LFP: Envasado local de alimentos; IFP: Envasado internacional de alimentos y PV: Paneles fotovoltaicos cristalinos (distribución internacional). Adaptado de Contreras-Lisperguer et.al 2017

A modo de ejemplo, se ha desarrollado en la Figura 8 una muestra de la capacidad de representación de la escala espacio-tiempo propuesta, donde se grafica la longitud horizontal y el tiempo para algunos productos, incluyendo un PFV-SiC. Curiosamente, los productos que se desplazan por grandes distancias (p. ej. escala regional, hemisférica y global) tienden a tener también una vida útil larga (con altos valores en la escala de tiempo), como es el caso de un PFV-SiC, y viceversa.

En efecto, la escala de tiempo equivale al tiempo que el producto va a permanecer en un determinado espacio, es decir, la vida útil del PFV-SiC. Por consiguiente, utilizando una escala de tiempo adecuada (que será introducida en la sección 3.4.1), en combinación con la escala espacial correspondiente, será posible estimar velocidades medias aproximadas para un flujo particular de material o producto. Este análisis puede llevarse a cabo con diferentes niveles de detalle, ya sea para materiales específicos, productos o para ambos. Cualquier componente de un producto (es decir, material), en particular, puede haber viajado previamente a través de una amplia gama de escalas espaciales y temporales,

previo a ser un componente en particular, por lo que es posible aumentar el grado de complejidad de estos análisis para cada material que compone un PFV-SiC.

A pesar de la correlación general entre los valores de tiempo y espacio, es posible identificar dos tipos básicos de regímenes en la vida útil de un producto: (1) productos de amplio alcance y relativamente duraderos (por ejemplo: PFV-SiC); y (2) productos locales, efímeros o desechables (p. ej. envoltorios de alimentos). En el primer caso, cuando el valor de tiempo excede el valor espacial, la velocidad tiende a variar en diferentes fases del ciclo de vida. Por ejemplo, los paneles fotovoltaicos cristalinos constituyen partes y materiales de fuentes muy dispersas y pueden ensamblarse lejos de donde se instalan. Sin embargo, una vez instalados, lo más probable es que los paneles pasen toda su vida útil de ~30 años en un solo lugar. En el caso de productos con valores de tiempo bajos (p. ej. en cuestión de días), al igual que en el caso de los envases de alimentos locales, la velocidad del flujo de estos productos puede considerarse en la práctica como una constante. Esto nos permite trazar un límite imaginario entre los dos regímenes, uno de *velocidad-constante* y otro de *velocidad no-constante*, tal y como se describe en la Figura 8.

Considerando lo anterior, la aplicación de esta escala *espacio-tiempo* en un sistema CCM (Figura 6), en combinación con modelos matemáticos dinámicos (ecuaciones diferenciales parciales en función del tiempo y espacio), puede ayudar a clarificar y evaluar los retos y oportunidades para el desarrollo de un sistema de CCM para los PFV-SiC.

En principio, esta escala espacio-tiempo nos indica que, el cierre de un flujo de materiales debería, en principio, ser más simple y efectivo de implementar a escalas espacial de nivel local y de tiempo de días/semanas. Esto se aclara al considerar que el ciclo de vida de productos complejos, como los PFV-SiC y sistemas electrónicos, implica la interrelación de múltiples escalas de tiempo y espacio entre todos los materiales que componen dicho producto, además de las escalas del producto mismo, las cuales se deben tener en cuenta para apreciar los costes y la logística necesaria durante el EoL y el supra-reciclaje. Mientras que el nivel de complejidad crece a medida que aumentamos el nivel de detalle, en especial si incluimos todos los materiales que componen un PFV-SiC, este tipo de análisis de escala puede proporcionar un primer paso para comprender la fabricación, re-uso y re-fabricación de productos industriales en un CCM.

### 3.3 IMPLICACIONES TERMODINÁMICAS Y ENERGÉTICAS DE UN SISTEMA DE FLUJO CERRADO DE MATERIALES

Previo a la presentación del modelo matemático desarrollado para esta Tesis Doctoral, debemos tener evidencia teórica de las restricciones de un sistema CCM basado en los principios de C2C. Dado que un C2C-CCM es un sistema termodinámico cerrado, el principal interés se centra en la conservación de la masa, más que en la transformación e intercambio de energía dentro del sistema y su entorno. Si bien es cierto que los aspectos energéticos de un sistema C2C-CCM son importantes, los mismos se escapan de los objetivos planteados en el plan de investigación original que han dado origen a este trabajo. Sin embargo, en esta Tesis Doctoral se introducen algunos conceptos que son necesarios para entender las interrelaciones entre la energética del sistema y las restricciones termodinámicas de la separación de materiales al EoL. Lo anterior cobra sentido cuando, al rediseñar los PFV-SiC teniendo en cuenta el futuro de los materiales del producto en un supra-reciclaje, podemos evitar el desperdicio de grandes cantidades de energía durante la fase de desmontaje y recuperación de materiales. Sin embargo, sobre este aspecto es importante señalar que las fuentes de energía de baja entropía son cada vez más accesibles (como es la energía solar) y pueden satisfacer eficazmente la mayoría de las necesidades energéticas futuras de un sistema C2C-CCM. Ayres demostró que un sistema de CCM no está limitado ni por sus necesidades energéticas ni por la segunda ley de la termodinámica (Ayres 1999). Sin embargo, en esta Tesis Doctoral estudiaremos el trabajo necesario para separar los materiales en EoL que potencialmente puede ser significativamente menor con los productos C2C en comparación con los productos C2G, ya que estos últimos requieren un tratamiento especial, consumen grandes cantidades de energía durante su reciclaje y generan residuos tóxicos en el proceso de recuperación de materiales.

Idealmente, un producto C2C debe diseñarse teniendo en cuenta la fase de *supra-reciclaje* (esto es, recuperación y re-uso) para todos los materiales utilizados en el producto. La puesta en práctica de este sistema requiere una mejora substancial de la eficacia en la selección de materiales, su recuperación y reutilización<sup>8</sup>. Por lo tanto, un producto C2C debe cumplir con algunos requisitos que facilitan su futuro reciclaje:

- Los materiales deben ser cuidadosamente seleccionados durante la fase de diseño, teniendo en consideración el EoL.

---

<sup>8</sup> De los cinco principios C2C, este trabajo se enfoca principalmente en la reutilización de materiales.

- Se debe combinar las fortalezas de la certificación C2C y la herramienta ACV (Contreras-Lisperguer et al. 2017). Además, los expertos en C2C deben considerar el valor de la metodología de ACV, abordando los compromisos que puedan existir entre la conservación de los recursos y el uso de la energía (Bjørn and Hauschild 2013).
- Todos los materiales tóxicos deben ser reemplazados con alternativas no tóxicas. También estos podrían encapsularse eficazmente (situación poco ideal).
- La fase de desmontaje del producto debe ser lo más eficiente y eficaz posible.

Los requisitos mencionados anteriormente no nos dicen mucho acerca de las restricciones físicas que un producto C2C, en nuestro caso un PFV-SiC C2C, puede enfrentar durante la fase de EoL y que podrían impactar su propia fabricación. Para explorar estas restricciones, el trabajo necesario para separar los materiales contenidos en un panel C2C en la EoL merece un análisis más detallado que se presentará a continuación.

### 3.3.1 SEPARACIÓN DE LOS MATERIALES EN UN PRODUCTO C2C

Desde un punto de vista termodinámico, un PFV-SiC diseñado bajo los principios C2C puede considerarse como una mezcla no aleatoria de diferentes componentes puros. Si estos bloques de construcción se distribuyen sistemáticamente y mantienen idealmente el mismo volumen, reduciríamos significativamente cualquier aumento de la entropía de la mezcla de componentes. Por ello, proponemos la siguiente hipótesis:

*Conjetura:* El trabajo necesario para separar los componentes de un PFV-SiC diseñado bajo los principios C2C puede considerarse menor en comparación con la cantidad de trabajo necesaria para separar los materiales de un PFV-SiC diseñado sin considerar los principios C2C. A continuación procedemos a verificar nuestra suposición.

*Prueba:* Considere dos componentes puros, en este caso dos gases ideales. Suponemos que cada uno de estos componentes está restringido a un volumen equivalente que es regular. Si entonces consideramos la ecuación reversible para el trabajo isotérmico total para un sistema no reactivo, se puede escribir de la siguiente manera para dos componentes,

$$\delta W_{rev} = \frac{\partial A}{\partial P} dP + \sum \mu_{pi} dN_i + \sum A_i^o dN_i \quad (1)$$

donde  $A$  es energía libre de Helmholtz,  $P$  es presión,  $\mu_{pi}$  es el potencial químico de los materiales puros,  $A_i^o$  es la energía libre molar de Helmholtz, y  $dN_i$  es la diferencial para el conjunto completo de moles de los componentes  $i$ . Además, consideramos que el total de moles permanece fijo.

En este sistema  $\delta W_{rev} = \delta W_b + \delta W_s$ , donde  $\delta W_b$  es el trabajo en la frontera del sistema y  $\delta W_s$  es el trabajo a lo largo de un eje rotante en la frontera del sistema (shaft work), sin embargo, dado que el sistema es cerrado y no cambia en el proceso de separación, podemos asumir que el trabajo en la frontera del sistema es igual a cero, por lo tanto, el trabajo total es sólo el shaft work. Por lo tanto, podemos reescribir la ecuación (1) como

$$\delta W_s = \frac{\partial A}{\partial P} dP + \sum \mu_{pi} dN_i + \sum A_i^o dN_i \quad (2)$$

Puesto que sabemos que para un componente puro, el potencial químico ( $\mu_{pi}$ ) es la energía molar de Gibbs ( $A_{pi}^o$ ) (Burghardt and Harbach 1993), entonces podemos reescribir la ecuación (2) como

$$\delta W_s = \frac{\partial A}{\partial P} dP + \left[ \sum A_{pi}^o + \sum A_i^o \right] dN_i \quad (3)$$

Por lo tanto, usando la ecuación de los gases ideales y aplicando la regla de la cadena en  $\frac{\partial A}{\partial P} dP$ , entonces, el primer término de la ecuación (1) se convierte en

$$\frac{\partial A}{\partial P} dP = \sum RT dN_i = 0 \quad (4)$$

Consecuentemente, puesto que (4) es igual a cero, entonces, la ecuación (3) se vuelve

$$\delta W_s = \left[ \sum A_{pi}^o + \sum A_i^o \right] dN_i \quad (5)$$

Si los componentes se extraen a lo largo de la separación, entonces la ecuación (5) puede integrarse directamente para producir

$$W_s = \sum_i \left[ A_{pi}^o(T, V, N_{pi}) - A_i^o(T, V, N_{mi}) \right] N_i \quad (6)$$

Donde  $N_{pi}$  es el número total de moles de los componentes puros,  $N_{mi}$  es el número total de moles en la mezcla, y  $N_i$  representa el número total de moles del componente  $i$  en

el recipiente al comienzo del proceso de separación. Aquí, usando la ecuación de Gibbs-Duhem (Astarita 1993) para la mezcla, entonces, podemos definir:

$$A_m = \sum_i N_i A_i^o \quad (7)$$

Donde  $A_m$  es la energía total libre de Helmholtz de la mezcla original. Introduciendo la ecuación (7) sobre la ecuación (6), podemos reescribirla como:

$$W_s = \sum_i N_i A_{pi}^o(T, V, N_i) - A_m(T, V, N_{mi}) \quad (8)$$

Si definimos la propiedad intensiva de  $A_{pi}^o$  como  $a_{pi} = \frac{A_{pi}^o}{N}$ , donde N es el total de moles en la mezcla, introduciendo  $a_{pi}$  en la ecuación (8), entonces, podemos reescribir (8) como:

$$W_s = \sum_i a_{pi}(T, V, N_i) - A_m(T, V, N_{mi}) \quad (9)$$

Adoptando este último punto de vista, obtenemos la solución a (9) sustituyendo  $A_m$  por la suma del correspondiente  $a_{pi}$  de los constituyentes puros (Guggenheim 1986).

$$A_m(T, V, N_{mi}) = \sum_i a_{pi}(T, V, N_i) \quad (10)$$

y, por tanto:

$$W_s = 0 \quad (11)$$

La demostración anterior ofrece una solución formal (11), entregando un apoyo convincente para poder afirmar que es posible reducir la energía necesaria para separar los materiales incrustados en un *producto C2C*.

Se comprueba que la cantidad de trabajo necesario para separar los materiales en un PFV-SiC basado en los principios C2C es menor en comparación con la cantidad de trabajo necesario para separar los materiales en un panel que *no es C2C*, debido a la mezcla

aleatoria de sus materiales, donde el trabajo mínimo para una eventual separación de sus materiales está dado por  $W_m = RT \left[ \ln \frac{1}{x} \right]$  (Gutowski 2008).

Nuestra solución, sin embargo, revela una limitación fundamental para un sistema C2C-CCM. Para conseguir que el trabajo durante la fase de separación de materiales sea lo más bajo posible, *los materiales utilizados en el producto deben ser altamente puros*, algo que casualmente no es una gran limitante para los PFV-SiC.

Los resultados ponen de manifiesto la falta de previsión en el diseño de los PFV-SiC y en la recuperación de sus materiales al EoL. Sólo algunos de sus componentes pueden ser recuperados en el desmontaje (Choi and Fthenakis 2014). Actualmente, la industria está intentando recuperar materiales para su reutilización mediante la aplicación de una combinación de procesos físicos (Granata et al. 2014) y termoquímicos (Latunussa et al. 2016b). Sin embargo, *a priori*, estos procesos termoquímicos no están resolviendo el problema, sino más bien aumentando la ineficiencia y la toxicidad de las actuales prácticas de reciclaje en la industria fotovoltaica.

Inicialmente sugerimos que, para que la tecnología de los PFV-SiC sea más sostenible, la industria tendría que cumplir con tres principios fundamentales:

1. Aplicar la filosofía C2C durante la fase de diseño de los paneles, cumpliendo con los requisitos de la certificación C2C y utilizar la herramienta de ACV-Sostenible;
2. Los PFV-SiC deben fabricarse con materiales de alta pureza;
3. Una planta de supra-reciclaje debe ser energizada con fuentes de baja entropía.

Siguiendo estas directrices, es viable minimizar los diferentes impactos medioambientales provenientes de los PFV-SiC. De esta forma, se facilita la fase del desmontaje y recuperación de materiales, incentivándose el desarrollo de nuevos modelos de negocio para el re-uso de estos materiales. Sin embargo, se debe también prestar atención a la falta de una infraestructura adecuada y necesaria si se quiere pasar del reciclaje al supra-reciclaje.

Junto con la misión de reducir la cantidad de trabajo necesario para separar los materiales de un panel en el EoL, es importante considerar el rol de una escala de espacio-tiempo para las diferentes etapas implicadas en el ciclo de vida de un PFV-SiC, esto ayudaría a comprender las necesidades logísticas en un sistema de flujo circular de materiales, como es el caso para un sistema C2C-CCM.

#### 3.4 FUNDAMENTOS PARA EL MODELAMIENTO DE UN SISTEMA DE FLUJO CERRADO DE MATERIALES

En este punto, resulta prudente preguntarse por qué es necesario desarrollar un marco teórico de un sistema de flujo cerrado de materiales basado en principios C2C. Para responder esta pregunta se ha realizado un detallado análisis de la literatura disponible.

Como se ha destacado con anterioridad, la intensiva industria manufacturera de hoy en día está agotando los RPANR, y en su lugar, está generando masivas cantidades de desechos al EoL de estos bienes y productos manufacturados. Estos residuos provocan una amplia gama de impactos ambientales, tales como: eutrofización, erosión del suelo, pérdida de biodiversidad y calentamiento global. En posteriores capítulos, se darán pruebas fehacientes de este hecho realizando un ACV con el objetivo de evaluar y cuantificar el impacto de la generación de basura y de los métodos de reciclaje y recuperación aplicados a los paneles en su etapa de EoL.

De igual modo, si no innovamos en el uso sostenible de los RPANR disponibles, éstos se convertirán en medios menos rentables para ser utilizados (Chermak and Patrick 2001; Tilton 2001). Por ello, es imperativo promover el uso sostenible de los RPANR asegurando el suministro de recursos y reduciendo los impactos ambientales negativos. En Ecología Industrial, "el flujo cerrado de materiales y la reducción de las emisiones" son presentados como los principios para lograr la sostenibilidad en la explotación y uso de RPANR (Erkman and Ramaswamy 2003; Eckelman et al. 2009). Por ende, la modelización de los ciclos y flujos de materiales se puede considerar como un paso crítico para la gestión y uso eficiente de estos recursos en general, reduciendo así la competencia en el acceso a las materias primas y su abastecimiento. Además, el análisis del flujo de materiales puede proporcionar información útil para los responsables políticos del desarrollo legislativo de los países.

Algunas de las metodologías que se utilizan para modelización están basadas en los siguiente métodos: (a) el flujo de materiales y sustancias, (b) la evaluación del ciclo de vida, (c) la simbiosis industrial, (d) los modelos input-output, (e) los modelos basados en agentes, (f) los modelos econométricos, (g) los modelos de equilibrio general computable, (h) los modelos de optimización, (i) las redes bayesianas y (j) los modelos de dinámica de sistemas. Sin embargo, pocos de estos modelos realizan simulaciones para predecir un valor en el tiempo (pronóstico) y, la mayoría de ellos, utilizan métodos estadísticos (ej. Queueing theory) (Hoher et al. 2012; Negahban and Smith 2014). Además, una revisión

reciente señala que estos modelos son principalmente estáticos y descriptivos, como una fotografía, donde se describe una *situación estática* de un momento dado. Esto deja a este tipo de modelos incapaces de explicar los comportamientos futuros del flujo de materiales, además, en su mayoría, están enfocados principalmente a modelar la etapa de producción (Jahangirian et al. 2010) y sólo unos pocos están considerando un enfoque de modelamiento dinámico durante el ciclo de vida completo del material o producto (Reck and Graedel 2012).

También se encuentra una amplia literatura que examina el uso de modelos dinámicos basados en ecuaciones diferenciales parciales (EDP). Sin embargo, estos modelos se han utilizado principalmente para: (a) describir el flujo de materiales y productos en fábricas (Jahangirian et al. 2010; Bohacs et al. 2012; Klug 2014; Göttlich et al. 2014; Nyemba and Mbohwa 2017), o (b) modelos de cadenas de suministro (Nagatani and Helbing 2004; D'Apice et al. 2010; Armbruster et al. 2011; Herty et al. 2013). En conclusión: la mayoría de los trabajos previos sobre flujo de materiales ha utilizado los modelos dinámicos sólo para modelar el flujo de materiales en pequeñas instalaciones, a escala espacial local (esto es, fábricas, cintas transportadoras, procesos de fabricación) y en escalas de tiempo locales (p. ej. segundos, horas y días de algunos procesos de fabricación). A pesar del interés en este tipo de modelos, nadie, hasta donde se ha podido comprobar, ha estudiado hasta la fecha el tema de las simulaciones dinámicas de flujo de materiales para productos con una larga vida útil a escala global, como es el caso de los paneles fotovoltaicos.

La incapacidad para realizar experimentos reales con el flujo de materiales para el problema que se plantea justifica la necesidad de desarrollar una herramienta software que nos ayude a tener una comprensión más profunda de este tema. En este escenario, los métodos de simulación de flujo de materiales basados en ecuaciones diferenciales son la base que ha permitido la implementación de un sistema de CCM complejo basado en principios C2C a escala global. Se estima que una herramienta de este tipo sería de gran utilidad para la toma de decisiones estratégicas ya que, los patrones de flujo de materiales proporcionan información vital para la logística, planificación y control de materiales de cualquier industria.

En resumen, los sistemas de modelización dinámicos pueden ayudar a mejorar el conocimiento sobre los desafíos que conllevaría la implementación de nuevos paradigmas en nuestros sistemas económico-industriales (p.ej. economía circular y sus medidas, almacenamiento, balance del material, escalas temporales y espaciales, etc.). Una

transición adecuada de un sistema económico lineal a uno circular requiere el desarrollo de un modelo teórico robusto basado en este tipo de herramientas.

#### 3.4.1 ESTIMACIÓN DE LA ESCALA TEMPORAL DE UN SISTEMA DE FLUJO CERRADO DE MATERIALES: TIEMPO CIRCULAR

En primer lugar hay que recalcar que, en el marco teórico propuesto y desarrollado en esta Tesis Doctoral, se ha prestado especial atención a la circularidad incorporada en las escalas de tiempo relacionadas con un sistema de *Ciclo-Cerrado de Materiales* (CCM) basado en principios *C2C* (C2C-CCM). En esta sección definimos el tiempo en función de la circularidad del sistema, lo que ayuda a la implementación de un estudio cuantitativo para un sistema C2C-CCM.

Un sistema C2C-CCM esencialmente denota el flujo de materiales en círculos, por lo tanto, debe introducirse y definirse el concepto de tiempo circular ( $T_c$ ) para denotar la dimensión temporal particular del flujo de material en un sistema C2C-CCM. A efectos de este análisis,  $T_c$  consta de dos componentes principales: tiempo industrial y tiempo de permanencia.

- El **tiempo industrial** ( $T_{ind}$ ) mide el tiempo transcurrido desde la extracción de los RPANR, su transformación y el procesamiento, hasta el momento en que es terminada la fabricación de un producto, y previo a la venta al consumidor. En general,  $T_{ind}$  es y/o puede ser conocido, dado que es una variable que poseen los sectores industriales establecidos (en el caso que nos atañe, la industria fotovoltaica).
- El **tiempo de permanencia** ( $T_d$ ) describe el tiempo que el producto terminado permanece con el consumidor antes de que este sea devuelto al ciclo técnico como recurso primario. En el caso de los PFV-SiC,  $T_d$  representa la vida útil del panel.

Además, debemos considerar el tiempo necesario para la remoción y recuperación ( $T_{rr}$ ) del producto así como de sus componentes y el tiempo que los materiales pasarán en el reservorio ( $T_{rs}$ ), que representa un tipo de bodega donde se almacenan los materiales recuperados, previo a regresar al sector industrial para su reutilización final. El proceso descrito es al que identificamos como "*supra-reciclaje*" (up-cycling).

En consecuencia, se puede definir el tiempo circular para ciclo completo y representado por  $T_c$  como:

$$T_c = T_{ind} + T_d + T_{rr} + T_{rs} \quad (12)$$

La ecuación (12) cubre el ciclo completo de vida de un sistema circular, desde la extracción inicial de recursos hasta el inicio del *supra-reciclaje*, y que marca el inicio de un nuevo ciclo. En principio todos los componentes de  $T_c$  deberían ser conocidos por el sector industrial, sin embargo,  $T_d$  no es totalmente conocido, dado que tiene una naturaleza altamente probabilística. Si bien sabemos que el EoL es entre 25 a 30 años, es necesario tener certeza del momento en el que serán decomisados al EOL, de lo contrario se pierde control en el flujo de materiales, aumentando su incerteza. Por lo tanto, es necesario tener un mecanismo robusto que permita estimar el tiempo de permanencia ( $T_d$ ).

Dada su definición,  $T_d$  representa el tiempo que los materiales permanecen en funcionamiento o con el consumidor antes de ser reintroducidos como recurso primario en el ciclo de fabricación. Si definimos a  $T_d$  como al tiempo transcurrido entre (a) el inicio del uso y el servicio y (b) retiro o recuperación, entonces,  $T_d$  no puede determinarse de manera directa, variando de panel en panel, lo que reduce la confiabilidad de este tipo de datos. En realidad, la estimación de la vida útil de los PFV-SiC sólo puede ser aproximada. Generalmente, los modelos matemáticos (p.ej. análisis de tendencias, probabilidades, etc.) pueden proporcionar una cierta estimación. Sin embargo, en el caso de los PFV-SiC, podemos suponer que  $T_d$  está estrechamente relacionada con el tiempo que transcurre entre que se instala y hasta que deja de ser operacional. Este supuesto facilita la estimación de esta variable y satisface la definición de  $T_d$ . En este punto es importante aclarar que en esta Tesis Doctoral se ha omitido a los paneles que fallan, dado que la tasa media de fallo es extremadamente baja, siendo de apenas un 0.05% anual por cada  $1 \times 10^4$  paneles instalados en un sistema fotovoltaico (Lillo-Bravo et al.). Por lo tanto, su peso dentro de un sistema de flujo cerrado de materiales puede ser considerado despreciable dado un análisis de escala para un modelo a escala global o regional.

Con esto dicho,  $T_d$  puede ser representada como una variable aleatoria continua no negativa que tiene una función de densidad de probabilidad (*pdf*) denotada por  $f(t)$ . La función de distribución acumulativa (*cdf*) de  $F(t)$  es entonces la integral de *pdf*. Aquí,  $F(t)$  representa la probabilidad de que un sistema sea funcional en el intervalo de tiempo 0 a  $t$ , y puede escribirse como:

$$F(t) = P(T_d \leq t) = \int_0^t f(s) ds \text{ for } t \in \mathbb{R}^+ \quad (13)$$

En el caso de los PFV-*SiC*,  $T_d$  es el tiempo que transcurre desde que el PFV-*SiC* comienza a funcionar, que coincide con el momento en que es instalado, hasta que el mismo panel es retirado de uso por múltiples circunstancias que se escapan de los objetivos perseguidos en esta Tesis. Así, usando la ecuación (13) es posible expresar la función de fiabilidad como:

$$R(t) = 1 - F(t) = P(T_d > t) \text{ for } t > 0 \quad (14)$$

donde  $R(t)$  es la probabilidad de que el panel fotovoltaico siga funcionando en el tiempo  $t$ . Por lo tanto,  $T_d$  puede representarse como el tiempo medio antes del fallo (Pierrat 2017) del panel fotovoltaico, y puede escribirse como sigue:

$$T_d = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (15)$$

En resumen, aunque el valor de  $T_d$  para un módulo individual puede considerarse una variable cuasi estocástica (calidad del proceso de fabricación y control de calidad del producto, condiciones de operación, etc.), se estima que lo anteriormente propuesto sería el medio matemático más fiable para calcular  $T_d$ .

### 3.5 PRINCIPIOS Y MODELO TEÓRICO MATEMÁTICO DE UN SISTEMA DE FLUJO CERRADO DE MATERIALES

En un sistema C2C-CCM, los materiales deben fluir formando un flujo cerrado. Por ende, la restricción física para un flujo cerrado de materiales puede expresarse en términos de la ecuación para la conservación de la masa. Esta ecuación determina la tasa temporal de cambios en la densidad de cualquier volumen dado de un RPANR al pasar por cada fase industrial.

Como aproximación inicial se ha asumido que el flujo de masa de RPANR en cualquier escala espacio-temporal y en cualquier fase de fabricación observada en  $T_c$  se comportará como un continuo, no como partículas discretas; esto es cierto a escalas globales y regionales. Análogamente, este supuesto inicial puede ser interpretado como una extensión de los flujos de material industrial simbiótico a través de las redes de diferentes negocios a distintas escalas de tiempo y espacio (Chertow 2004).

Consideremos un volumen imaginario de RPANR<sup>9</sup> finito con dimensiones  $\delta x$ ,  $\delta y$ ,  $\delta z$ , que contiene una colección fija de materia desplazada mediante una propiedad de campo  $\varepsilon(x,y,z,t)$  a través de cualquiera de las etapas o fases en la fabricación arbitraria de algo. Como el sistema se compone de una cantidad fija de materia, la forma del volumen finito de material -RPANR- se verá distorsionada por las diversas fuerzas aplicadas durante los procesos de fabricación. Sin embargo, como la densidad no cambia con el tiempo, podemos escribir la conservación de la ecuación de masa como:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{Y}) = 0 \quad (16)$$

La ecuación (16) es la forma de Euler de una ecuación hiperbólica de primer orden (Craik 2013), que describe la ecuación de conservación de masa para determinados cuerpos de RPANR, donde  $\rho$  representa el RPANR o su densidad material en términos de  $\rho$  por unidades de longitud y  $\mathbf{Y}$  representa el vector de velocidad tridimensional. Sin embargo, un paso más es necesario para cumplir con la primera suposición de que en cualquier momento y escala espacial, el flujo de una masa de RPANR observada en  $T_c$  puede considerarse como un continuo. Dado que el flujo de materiales está contenido a diferentes escalas temporales y espaciales, es posible definir una componente promedio y otra estocástica. Por lo tanto, es posible derivar la ecuación de conservación de la masa en su forma promedio. Para evitar complejidades innecesarias, optamos por el enfoque de Favre (Chen et al. 1991) en lugar del enfoque de Reynolds (Ruffin et al. 1997).

Después de descomponer las variables en una parte caótica y una promedio, aplicamos la descomposición de Favre del campo de movimiento en la ecuación (16) y obtenemos la ecuación de conservación de  $\rho$  promedio en el tiempo según Favre:

$$\frac{\partial \tilde{\rho}}{\partial t} + \tilde{\mathbf{Y}} \nabla \cdot \tilde{\rho} = 0 \quad (17)$$

Donde  $\tilde{\mathbf{Y}} = \tilde{u}_i + \tilde{v}_j + \tilde{w}_z$  representa el vector de velocidad tridimensional promedio en cada etapa del ciclo de vida de un producto. El límite de aplicación de la

---

<sup>9</sup> Para un volumen imaginario de RPANR, no se puede dar una definición numérica precisa, sin embargo, un centímetro cúbico de RPANR podría encajar bien en la mayoría de los contextos en los que se discute un volumen de RPANR, particularmente aquellos relacionados con la industria fotovoltaica

ecuación (17) se reduce a la determinación de las cantidades medias a escala global/regional; en ningún caso se propone su uso para el cálculo de valores instantáneos.

### 3.6 SOLUCIÓN NUMÉRICA DEL MODELO TEÓRICO MATEMÁTICO DE UN SISTEMA DE FLUJO CERRADO DE MATERIALES

Debido a la complejidad de un sistema C2C-CCM, no es posible el uso de métodos analíticos para la resolución de la ecuación (17). Sin embargo, una simulación computacional basada en métodos numéricos ha permitido encontrar una solución al modelo matemático propuesto en esta Tesis Doctoral.

Por simplicidad numérica y a modo de primer experimento, el esquema numérico se definirá como un sistema unidimensional (1-D). Basado en la ecuación (17), se puede escribir como:

$$\frac{\partial \tilde{\rho}}{\partial t} + \tilde{u}_i \frac{\partial \tilde{\rho}}{\partial x} = 0 \quad (18)$$

Para resolver numéricamente la ecuación (18), se ha utilizado una técnica explícita de aproximación de diferencia finita de células donantes para derivar su representación discreta y se ha escogido un esquema regresivo para resolverla numéricamente para la derivada espacial  $\frac{\partial}{\partial x}$ , porque se considera más estable para  $\tilde{u} > 0$  (Durrant 2010).

El esquema de discretización para la ecuación (18) puede ser descrito de la siguiente forma:

$$\frac{\tilde{\rho}_i^{n+1} - \tilde{\rho}_i^n}{\Delta t} + \frac{\tilde{\rho}_i^n \tilde{u}_i - \tilde{\rho}_{i-1}^n \tilde{u}_{i-1}}{\Delta x} = 0 \quad (19)$$

Si definimos:

$$\mathcal{F}(x, t) = \tilde{\rho}(x, t) \tilde{u}(x, t) = \tilde{\rho} \tilde{u}_i(x, t) = \tilde{\rho} \tilde{u}(x, t) \quad (20)$$

Al reemplazar la ecuación (20) en la ecuación (19), podemos reescribir el esquema como:

$$\frac{\tilde{\rho}_i^{n+1} - \tilde{\rho}_i^n}{\Delta t} + \frac{\mathcal{F}_i^n - \mathcal{F}_{i-1}^n}{\Delta x} = 0 \quad (21)$$

En la ecuación (21)  $x$  y  $t$  son discretizados con valores uniformes de  $\Delta x$  y  $\Delta t$ , respectivamente. A continuación, y con el fin de reducir el tamaño de las ecuaciones, a continuación usaremos la siguiente notación  $\tilde{\rho}_i^n = \tilde{\rho}(i\Delta x, n\Delta t)$  with  $i, n \in \{0, 1, 2, \dots\}$

Ahora, si decimos que  $\beta = \frac{\Delta t}{\Delta x}$ , entonces es posible reescribir la ecuación (21) como:

$$\tilde{\rho}_i^{n+1} = \tilde{\rho}_i^n - \beta(\mathcal{F}_i^n - \mathcal{F}_{i-1}^n) \quad (22)$$

El esquema numérico resultante en la ecuación (22) sirve para modelar el flujo de un volumen imaginario y arbitrario de Silicio ( $Si$ ) en un sistema C2C-CCM. Sin embargo, para completar el esquema numérico, es necesario cerrar el flujo de materiales. La solución numérica propuesta en esta Tesis Doctoral para cerrar el ciclo de materiales del modelo C2C-CCM se ha resuelto introduciendo un punto de unión. El punto de unión representa en el esquema numérico el proceso de transporte de los materiales recuperados desde el reservorio hasta la instalación industrial para su reutilización. Por lo tanto, la estrategia aquí es conectar la fase del EoL con la instalación de procesamiento de material recuperado en términos de flujo de material. El punto de unión tiene la siguiente forma:

$$\tilde{\rho}_2^{n+1} = \tilde{\rho}_2^n - \beta[\tilde{\rho}_2^n \tilde{u}_2 - (\tilde{\rho}_1^n \tilde{u}_1 + \tilde{\rho}_{end}^n \tilde{u}_{end})] \quad (23)$$

Las ecuaciones (22) y (23) son la solución numérica de la ecuación de gobierno del sistema C2C-CCM. Su solución se puede encontrar resolviendo numéricamente para  $\frac{\partial \tilde{\rho}}{\partial t}$  y extrapolando el movimiento hacia adelante en el tiempo del flujo de material, aunque, en primer lugar, será necesario establecer las condiciones iniciales y de contorno. Con posterioridad, se realizará un análisis de estabilidad del modelo propuesto, para luego introducir las condiciones iniciales y de contorno y un experimento numérico que ayudará a probar la confiabilidad y estabilidad del modelo propuesto a una escala global y hemisférica.

### 3.6.1 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DEL ESQUEMA NUMÉRICO

Un esquema numérico presentado en la ecuación (19) debe ser estable si se pretende modelar con éxito un sistema C2C-CCM. Este esquema puede considerarse estable si no

se amplifican los errores numéricos generados durante la solución de la ecuación discretizada (LeVeque 1992). Dado que la ecuación que define el sistema en cuestión es una ecuación lineal de diferencia finita con coeficientes constantes (Durrant 2010), hemos utilizado el análisis de estabilidad de Von Newman para evaluar la estabilidad del esquema. Se ha considerado un solo componente de Fourier para examinar el crecimiento del error en el tiempo en un armónico individual de la siguiente forma:

$$\psi_i^n = \psi(x_i, t_n) = \alpha^n e^{i\theta i \Delta x} \quad (24)$$

donde  $\alpha$  es el factor de amplificación. El esquema numérico es inestable si  $|\alpha| > 1$ . Por lo tanto, para la estabilidad necesitamos satisfacer el requisito  $|\alpha| \leq 1$

Si entonces introducimos  $\psi_i^n$  en nuestra ecuación de esquema numérico (19), entonces, podemos reescribir dicha ecuación como:

$$(\alpha^{n+1} - \alpha^n)e^{i\theta i \Delta x} + \nu \alpha^n (e^{i\theta i \Delta x} - e^{i\theta(i-1)\Delta x}) = 0 \quad (25)$$

donde  $\nu = \tilde{u} \frac{\Delta t}{\Delta x}$ .

Se elimina la potencia para  $\alpha$  y se utiliza  $e^{i\theta i \Delta x}$  como un factor común, obtenemos:

$$\alpha = 1 - \nu + \nu e^{i\theta \Delta x} \quad (26)$$

Entonces, aplicando la identidad para la forma exponencial podemos reescribir  $\alpha$  como:

$$\alpha = 1 - \nu + \nu (\cos(\theta \Delta x) - i \sin(\theta \Delta x)) \quad (27)$$

Podemos encontrar la magnitud de  $\alpha$  tomando la raíz cuadrada de la multiplicación de  $\alpha$  por su complejo conjugado  $\alpha^*$ :

$$|\alpha| = \sqrt{\alpha \alpha^*}$$

Consecuentemente,

$$|\alpha| = 1 - 2\nu + \nu^2 + 2\nu \cos\theta - 2\nu^2 \cos\theta + \nu^2 \cos^2 + \nu^2 \sin^2 \quad (28)$$

$$|\alpha| = 1 - 2\nu(1 - \cos\theta) + 2\nu^2(1 - 2\cos\theta) - 1 + 2\nu(1 - \cos\theta)(\nu - 1) \quad (29)$$

Utilizando identidades trigonométricas se simplifica la expresión (29), y obtenemos:

$$|\alpha| = 1 + 4\nu(\nu - 1) \quad (30)$$

De este modo, la ecuación (30) sólo cumple los criterios de estabilidad si y sólo si  $\nu \leq 1$  entonces,  $|\alpha| \leq 1$ .

$$|\alpha| = 1 + 4\nu(\nu - 1) \leq 1 \quad (31)$$

Puesto que  $\nu \leq 1$  es suficiente para demostrar una condición de estabilidad y  $\nu = \tilde{u} \frac{\Delta t}{\Delta x}$ , entonces, la *condición de estabilidad de Von Neumann* es representada por la forma de la condición de *Courant-Friedrichs-Lewy* (CFL), ya que:

$$\tilde{u} \frac{\Delta t}{\Delta x} \leq 1 \quad (32)$$

y un  $\Delta t$  y  $\Delta x$  no negativo denota:

$$\tilde{u} \frac{\Delta t}{\Delta x} \geq 0 \quad (33)$$

A fin de satisfacer ambas condiciones (32) y (33) a la vez, podemos reescribir la condición de estabilidad como:

$$0 \leq \tilde{u} \frac{\Delta t}{\Delta x} \leq 1 \quad (34)$$

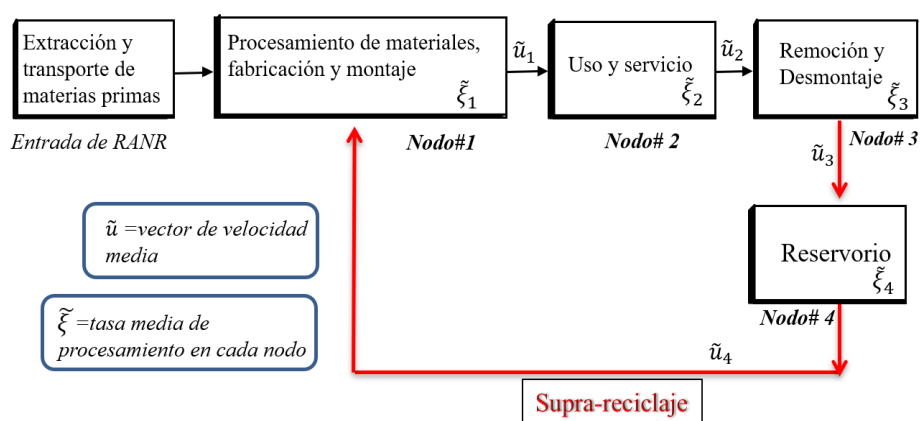
Para considerar la simulación satisfactoria y estable, el experimento numérico debe satisfacer (34).

# 4

## CASO DE APLICACIÓN: ANÁLISIS DEL FLUJO DE SI DE UN PVF-SiC EN UN SISTEMA C2C-CCM

A fin de poder evaluar el modelo teórico descrito en la sección anterior, y a partir de las necesarias suposiciones de partida, se presenta en este capítulo un experimento numérico en una dimensión (1-D) para el flujo de Si en un sistema C2C-CCM (Figura 9). Como ya ha sido explicado en la sección 1.2, para este experimento numérico se ha considerado solamente el flujo del Si contenido en los PVF-SiC, desde la entrada del material extraído de un proceso minero, la fabricación de paneles fotovoltaicos, construcción del sistema, uso, desmantelamiento, recuperación, depósito y reutilización del Si como materia prima (supra-reciclaje) en un sistema CCM.

El caso de aplicación se realizó con un ordenador que ejecuta MATLAB® (The MathWorks Inc. 2013).



**Figura 9** Representación esquemática del sistema de ciclo cerrado de material 1-D modelado en el experimento numérico (adaptada de la Figura 5)

A continuación, se detallan las condiciones de borde, de límite así como las suposiciones realizadas para la simulación que se detalla durante este capítulo.

## 4.1 SUPOSICIONES PRELIMINARES

En esta sección hemos establecido las condiciones que definen las principales características del sistema C2C-CCM. Los supuestos preliminares para este experimento numérico son los siguientes:

- Se ha reducido el costo computacional, considerando el  $Si$  utilizado en paneles fotovoltaicos como un único RPANR en una dimensión (1-D) a fin de poder evaluar numéricamente el flujo de  $Si$  en un sistema C2C-CCM a escala hemisférica.
- Todos los paneles fotovoltaicos se fabrican de acuerdo con la filosofía C2C, y poseen la certificación C2C más alta posible. Por lo tanto, los paneles fotovoltaicos en cuestión fueron diseñados para ser finalmente reciclados.
- Todo el sistema de la cadena de valor y suministro de los paneles fotovoltaicos es un sistema de fabricación verticalmente integrado y automatizado que produce un panel fotovoltaico típico de 250 watts a un ritmo de 180000 al año (Spath et al. 2008; Fthenakis and Kim 2011; Castellanos et al. 2018).
- Todos los nodos están en un sistema de procesamiento continuo (24/7);
- La planta de fabricación y los distribuidores son filiales del mismo grupo empresarial;
- Todo el  $Si$  retornado/recuperado se acepta para ser inventariado, ya sea de forma activa (volviendo directamente al proceso de fabricación después del EoL) o pasiva (en el reservorio, a la espera de volver a la planta de fabricación, dependiendo de la demanda). En la Figura 9 se identifican los nodos correspondientes.

## 4.2 CONDICIONES INICIALES Y DE BORDE

Las condiciones de borde son clave para la funcionalidad de un modelo numérico. En particular, en un sistema C2C-CCM estamos tratando con límites que no son dados naturalmente por el movimiento geométrico del volumen de  $Si$  y no es inmediatamente obvio cuáles son estas condiciones. Por lo tanto, establecer las condiciones de borde para sistemas reales es un proceso complejo y sutil.

Primero, se define que  $R$  es la región del planeta limitada por una curva cerrada de longitud finita (esto es, curva rectificable)  $R_C$ . Si  $\Delta x$  se conoce en  $R$  y  $x$  se da en  $R_C$ , entonces las condiciones límite se prescriben de tal manera que  $x$  siempre es conocida en  $R_C$ , y  $\Delta x$  se conoce en  $R$ , y por lo tanto, la solución de la ecuación (18) para la región  $R$  será posible de determinar. Por lo tanto, como  $x$  es una función del tiempo en  $R_C$ , la velocidad es también

conocida en el sistema C2C-CCM. En consecuencia, la distribución de  $\tilde{\rho}(x, t)$  después de un  $\partial t$  será conocida en todas partes en  $R$ . En conclusión, se puede afirmar que el flujo de  $Si$  está determinado por la especificación de  $x$  en el límite, y el de  $\tilde{\rho}$  en la parte del borde o límite donde el flujo de  $Si$  está inicialmente ingresando al interior de la región  $R$ .

Procedemos a definir la densidad ( $\tilde{\rho}_i$ ) como las unidades promedio de  $\tilde{\rho}$  por longitud en  $x_i$  y el flujo ( $\tilde{\rho}_i \tilde{u}_i$ ) se define como la unidades promediadas de  $\tilde{\rho}$  por tiempo en  $x_i$ . De acuerdo a lo anterior y en función de la literatura disponible, se asigna que una unidad promedio de  $\tilde{\rho}$  equivale aproximadamente a 1.5 kg de  $Si$  por panel fotovoltaico (Fthenakis and Kim 2011) por unidad de longitud, dada por  $x_i$ . En base a lo anterior, y con el fin de poder implementar los experimentos numéricos, se han aplicado las siguientes *condiciones iniciales y de borde* para un sistema de flujo cerrado de  $Si$  a escala hemisférica:

- Para minimizar la complejidad matemática, hemos asumido la curvatura de la Tierra puede ser ignorada.
- La longitud (L) del sistema C2C-CCM para una escala hemisférica tiene un valor típico de aproximadamente  $L=4000$  km (Contreras-Lisperguer et al. 2017). Por lo tanto, para este experimento numérico se supone que la distancia entre cada nodo es de 1000 km (ver Figura 9).
- La condición de borde inicial para la densidad de  $Si$  se define cuando el sistema está inicialmente vacío en  $t=0$  en el nodo# 1, por lo tanto,  $\tilde{\rho}(x, 0) = 0$ .
- En esta simulación se ha utilizado una discretización adecuada con una rejilla uniforme  $i\Delta x = 10$  km y con un total de 404 puntos de discretización de espacio (101 por nodo). Por lo tanto, hemos calculado la estabilidad numérica del modelo en base a los datos de  $\Delta x$  y  $\Delta t$  seleccionados. La condición de estabilidad calculada es  $\tilde{u}_i \frac{\Delta t}{\Delta x} = 0.0003$ . Esto satisface el requisito de estabilidad de Von Neumann descrito en la sección 3.6.1.
- Se consideró que un número finito de  $\tilde{\rho}$  de  $Si$  llega al sistema en  $\tilde{\rho}(0, t)$  para  $t > 0$ . Por lo tanto, una entrada arbitraria de  $Si$  entra en el sistema. Para este experimento se eligió una entrada inicial aleatoria. Inicialmente 5 unidades de  $\tilde{\rho}$  entraron al sistema, de un total de 180000 unidades de  $\tilde{\rho}$  que entraron al sistema a una tasa promedio de 1000 unidades de  $\tilde{\rho}$  por paso de tiempo de la cuadrícula  $\Delta t = \frac{0.0003 \cdot \Delta x}{\tilde{u}_i}$  ( $\Delta t$  se estima con base en los criterios de estabilidad descritos en la sección 3.6.1).

- El flujo de  $Si$  es una función de  $x$  y  $t$  y está determinado por la densidad media ( $\tilde{\rho}$ ). Por lo tanto, el flujo puede definirse como  $\tilde{\rho}_i \tilde{u}_i$ , donde  $\tilde{\rho}_i$  es conocido y  $\tilde{u}_i$  es una función de  $\tilde{\rho}$  y representa la velocidad promedio de las partículas de  $Si$ , e  $i$  representa la celda dentro del dominio computacional  $\in \{1, 2, \dots, i\}$  para el dominio periódico  $x \in [0, L]$ , donde  $L$  representa la longitud total del sistema. Por consiguiente, el vector de velocidad media puede definirse como  $\tilde{u}_i = \tilde{u}_{(\tilde{\rho}_i)} + \tilde{u}_{(\tilde{\rho}_{i+1})}$ . Aquí,  $\tilde{\rho}$  se propaga hacia la derecha en  $x$ .
- La tasa de procesamiento de las unidades promediadas de  $\tilde{\rho}$  en cada nodo ( $\tilde{\xi}_n$ ) del sistema (nodos# 1, 2, 3, y 4 como se muestra en la Figura 9), se representa como una tasa constante que es específica para cada nodo ya que la tasa de procesamiento depende en gran medida de la tecnología disponible en cada nodo. Por lo tanto, en este experimento, debido a la alta incertidumbre de las diferentes tasas de procesamiento en cada nodo, se utiliza un argumento heurístico para demostrar que lo siguiente es probablemente correcto: cuando la unidad de  $\tilde{\rho}$  está entrando en el área delimitada por el nodo, se debe imponer el  $\tilde{\xi}_n$ . El movimiento en cada nodo está determinado por la especificación de  $\tilde{\xi}_n$  en todas partes en el límite en el que el volumen de  $Si$  está entrando en dicho nodo. Por lo tanto, basándonos en la escala de tiempo ya definida ( $T_c$ ), hemos estimado el orden de magnitud de la tasa de procesamiento constante para cada nodo. Los valores impuestos para  $\tilde{\xi}_n$  son los siguientes:
  - Para el Nodo#1 y usando la definición de  $T_c$ , hemos estimado  $T_{ind}$  basándonos en nuestra suposición inicial de una tasa de fabricación de 180000 por año, hemos estimado un valor de  $\tilde{\xi}_1 \sim 1 \cdot 10^{-2}$  unidades de  $\tilde{\rho}$  por segundo.
  - Para el Nodo#3, basándose en los datos disponibles del proyecto FRELP (Full Recovery End of Life Photovoltaic) (FRELP Project 2018; Latunussa et al. 2016b), se estima que en una planta de reciclaje fotovoltaica se pueden recuperar aproximadamente unos 38 kg de  $Si$  por hora. Como  $\tilde{\rho}$  es conocido, estimamos el orden de magnitud como  $\tilde{\xi}_3 \sim 18 \cdot 10^{-3}$  unidades de  $\tilde{\rho}$  por segundo.
  - Para el Nodo# 4, no existe un ‘reservorio’ o infraestructura similar para extrapolar información o evidencia empírica, por lo tanto, hemos estimado la magnitud de  $\tilde{\xi}_4$  asumiendo que la magnitud de la demanda de  $Si$  recuperado de la industria solar y electrónica es similar a la del  $Si$  proveniente de la extracción

minera. Por lo que se ha impuesto el mismo orden de magnitud al usado en el Nodo #1. En consecuencia,  $\xi_4 \sim 1 \cdot 10^{-2}$  unidades de  $\tilde{\rho}$  por segundo.

- Para el Nodo #2, se ha procedido a estimar primero  $T_d$ . La estimación de  $T_d$  se describe a continuación.

#### 4.3 ESTIMACIÓN DE TD PARA UN PANEL FOTOVOLTAICO CRISTALINO

Para estimar  $T_d$  consideramos que la degradación y fallo de un panel fotovoltaico puede ser representado por una función Weibull (Pregelj et al. 2001; Charki et al. 2013). Por lo que esta función representa la distribución de  $T_d$  para los PFV-SiC en la forma:

$$f(t) = \left(\frac{\alpha}{\beta}\right) \left(\frac{t}{\beta}\right)^{\alpha-1} e^{-\left(\frac{t}{\beta}\right)^\alpha} \quad (35)$$

donde,

$$F(t) = P(T_d \leq t) = \begin{cases} 1 - e^{-\left(\frac{t}{\beta}\right)^\alpha} & \text{para } t > 0 \\ 0 & \text{de otra manera} \end{cases}$$

entonces,

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\beta}\right)^\alpha} \quad t > 0 \quad (36)$$

Aplicando la ecuación (36) en la ecuación (35), es posible estimar  $T_d$  como

$$T_d = \int_0^t R(t) = \beta \Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) \quad (37)$$

Por lo tanto, la media de  $T_d$  puede escribirse como

$$\bar{T}_d = \beta (\ln 2)^{\frac{1}{\alpha}} \quad (38)$$

A fin de poder realizar este experimento numérico, la estimación de los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  se realizó en base a los datos estadísticas de degradación y muestras de fallas aleatorias disponibles en la literatura (Pregelj et al. 2001; Ramadan 2015; Lillo-Bravo et al.), para ello, los datos fueron ingresados a la herramienta de confiabilidad de Weibull disponible en el

software *R* (Weibull-based reliability toolkit for R 2013). Como resultado se obtuvieron los siguientes parámetros  $\alpha = 5.376$  y  $\beta = 32.062$ . Introduciendo  $\alpha$  y  $\beta$  en la ecuación (38), obtenemos  $T_d = 29.949$  años  $\approx 9 \cdot 10^8$  s, que coincide con el ciclo de vida medio de un módulo fotovoltaico típico. Como se conocen  $T_d$  y  $\tilde{\rho}$ , estimamos que el orden de magnitud de  $\tilde{\xi}_2 \sim 1 \cdot 10^{-9}$  unidades de  $\tilde{\rho}$  por segundo, lo que representa la tasa de desmantelamiento de las unidades de  $\tilde{\rho}$  una vez que el panel fotovoltaico se considere no operativo.

#### 4.4 RESULTADOS DEL EXPERIMENTO NUMÉRICO

Para esta aplicación concreta,  $T_d$  tiene un valor de aproximadamente 30 años, como prueba inicial y con el fin de ver que ocurre pasado esos 30 años, la simulación de este sistema C2C-CCM se realizará con un valor para  $T_d$  de 35 años ( $\sim 1.1 \cdot 10^9$  s), esperando poder ilustrar el ciclo de vida completo del flujo de *Si* descrita en la Figura 9. El objetivo final de esta simulación es confirmar que, si después de 35 años, las unidades de  $\tilde{\rho}$  que ingresaron al sistema inicialmente, han sido capaces de regresar a su punto de origen como materia prima, es decir, una planta de fabricación, cumpliendo su propósito como sistema C2C-CCM. Los perfiles simulados representan el porcentaje del flujo del total de unidades de  $\tilde{\rho}$  en el tiempo para cada nodo del sistema C2C-CCM modelado. Los resultados son presentados en la Figura 10.

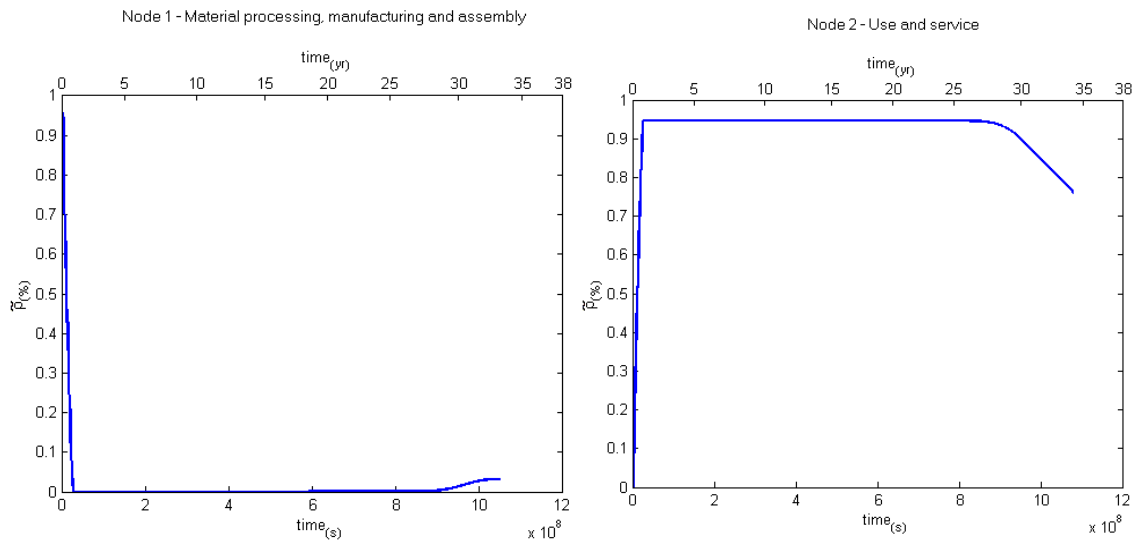
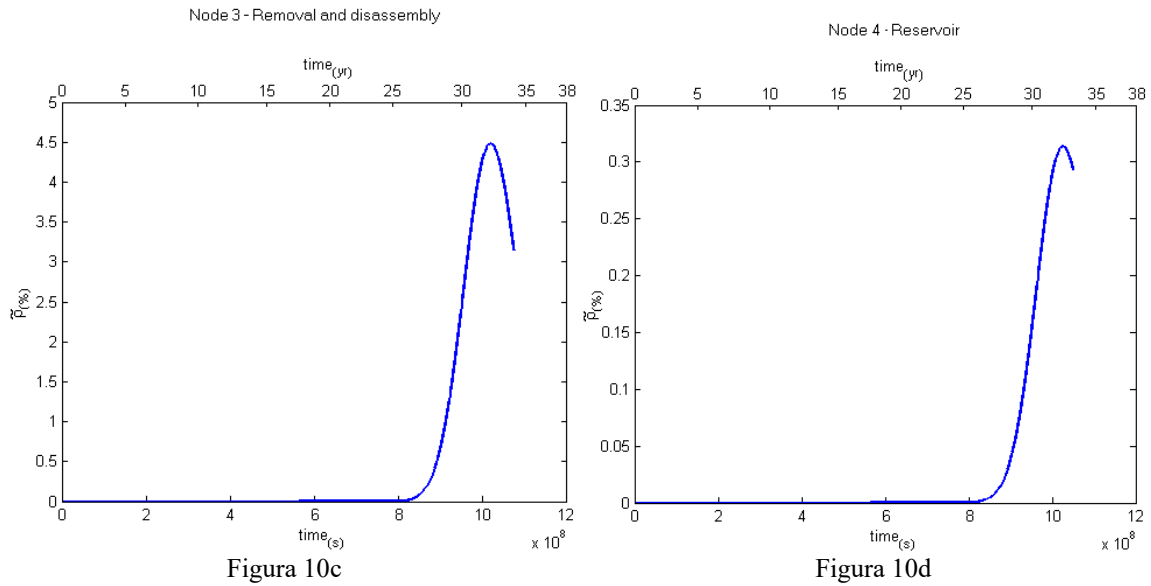


Figura 10a

Figura 10b



**Figura 10** Serie temporal del porcentaje de densidad en cada nodo de  $t=0$  a  $t=35$  años (en el eje horizontal superior del gráfico) y en segundos como unidad de tiempo internacional estándar (SI) en el eje horizontal inferior del gráfico.

Los resultados son presentados para cada Nodo del sistema según lo descrito en el sistema en la Figura 9, estos muestran el flujo de  $\tilde{\rho}$  en un sistema de 1-D. Estos resultados nos ayudarán a estudiar las respuestas dinámicas que presenta en el tiempo el flujo de  $Si$  en cada nodo (Figura 10- a, b, c y d), en base a las condiciones de borde e inicio impuestas. En primer lugar, la materia prima ingresa al Nodo# 1 (entrada inicial de las unidades de  $\tilde{\rho}$  de  $Si$ ), aquí las unidades de  $\tilde{\rho}$  de  $Si$  son utilizadas para fabricar células solares, las que posteriormente pasan a convertirse en parte integral de un PFV- $SiC$ . Como era de esperar, el porcentaje de unidades de  $\tilde{\rho}$  disminuyó con el paso del tiempo, en la medida que los paneles fotovoltaicos manufacturados salían de la planta de fabricación (véase la Figura 10a) para ser luego utilizados en una planta FV para generar electricidad en el Nodo #2. Posteriormente, en el Nodo #2 las unidades de  $\tilde{\rho}$  aumentaron exponencialmente, hasta llegar a un máximo de  $\tilde{\rho}$ , esto es posible atribuirlo al hecho que los paneles están operativos por unos 30 años, fijos en un solo lugar generando electricidad (ver Figura 10b). Una vez que el panel fotovoltaico finaliza su vida útil, este se desmantela y se envía a una instalación de reciclaje (Node-3), donde se recuperan las unidades de  $Si$  para ser utilizadas como materia prima (ver Figura 10c). El material recuperado se almacena en el “reservorio” (Nodo #4), para posteriormente ser transportado al Nodo #1 como materia prima (véase la figura 10d).

Al analizar los resultados de la Figura 10a, es posible inferir que el flujo promedio de unidades de  $Si$  representadas  $\tilde{\rho}$  no logró retornar íntegramente al sector industrial, luego de que finalizará la vida útil de los PFV- $SiC$ . Además, es posible observar en la Figura 10a que aproximadamente a los  $1 \cdot 10^9$  s, el sistema había recuperado menos del 10% del total

de unidades de  $\tilde{\rho}$  ingresadas inicialmente en el sistema. Inicialmente, y para este caso, se puede concluir que el flujo de materiales de este sistema no fue capaz de cerrarse con el  $Si$  disponible después de un ciclo de vida de 35 años.

Nuestra hipótesis inicial para explicar este enigma es asumir que el máximo de  $\tilde{\rho}$  observado en el Nodo# 2 (ver Figura 10b) representa una zona de alta convergencia de unidades de  $\tilde{\rho}$  atribuidas, en principio, a la larga duración de  $T_d$ . Esto, al parecer habría desencadenado una *onda de choque* que actuó como un *límite* entre la alta densidad observada en el Nodo #2 y la baja densidad observada en el Nodo #3. Es de esperar que este fenómeno afectará indirectamente a lo largo de los Nodos #3 y #4.

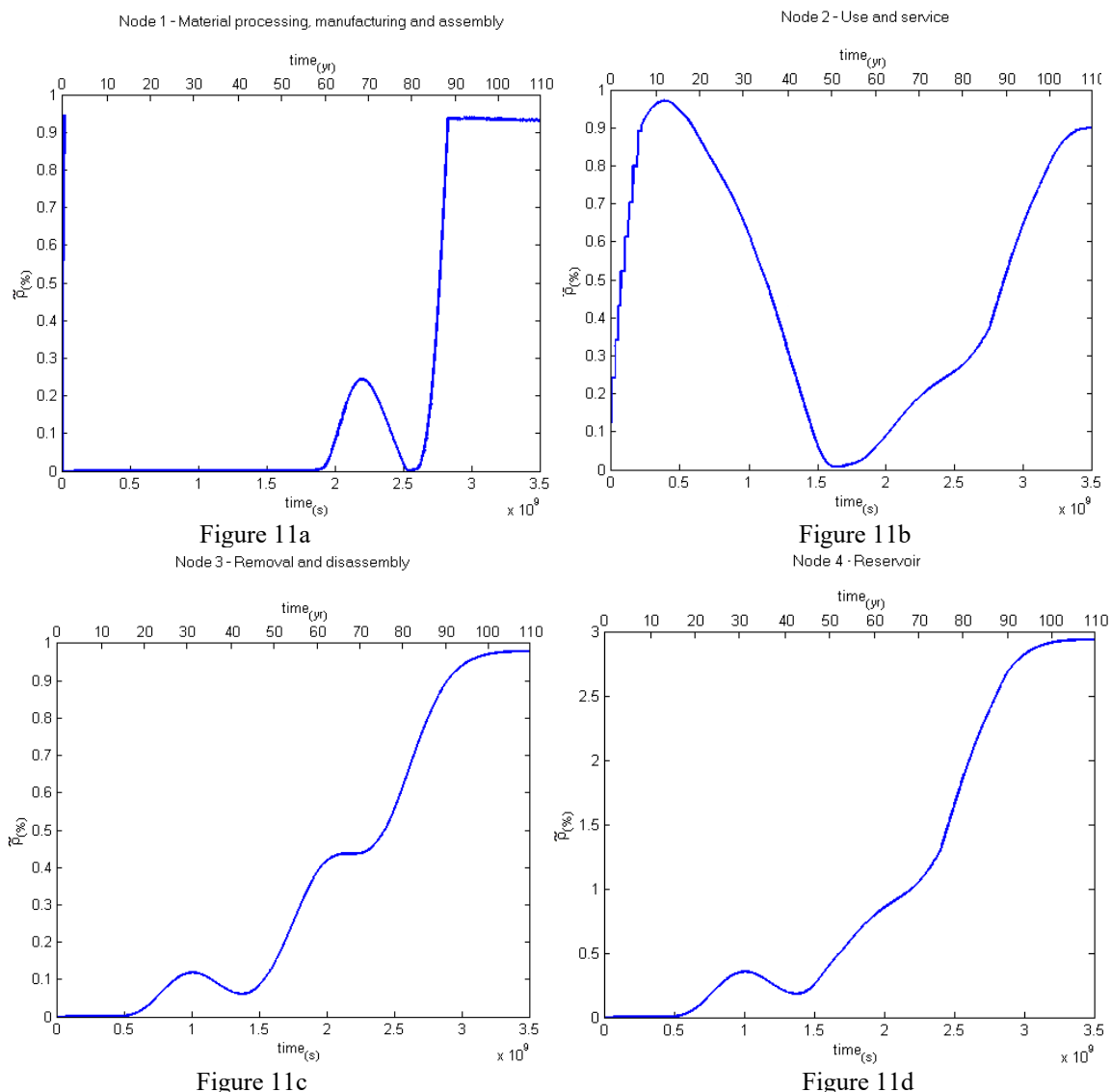
Esta *onda de choque* se aprecia claramente en la brusca variación temporal del porcentaje de las unidades de  $\tilde{\rho}$  entre el Nodo# 2 (alto porcentaje de unidades de  $\tilde{\rho}$ ) y Nodo# 3 (bajo porcentaje de unidades de  $\tilde{\rho}$ ), por lo tanto, la variación temporal de las unidades de  $\tilde{\rho}$  requiere también una variación espacial del campo de velocidad  $\tilde{u}_i$ , ya que debido al teorema de continuidad se concluye que la divergencia de  $\tilde{u}_i$  debe ser 0. Evidentemente, esta *onda de choque* perturbó todo el sistema, limitando el flujo de unidades de  $\tilde{\rho}$  al Nodo# 3, restringiendo la capacidad del sistema para almacenar unidades de  $Si$  en el reservorio del Nodo# 4.

Además, otra característica interesante observada en las figuras 10c y 10d es la “*cuasi-simetría*” en la distribución de  $\tilde{\rho}$  para los Nodos #3 y #4, sin embargo, se ha considerado que se trata de una simetría trivial, debido a que la restricción impuesta por la onda de choque, la que suma a la forzada simetría geométrica del sistema modelado aquí, dando la impresión de un flujo simétrico. Sin embargo, es posible observar en las gráficas que los porcentajes de las unidades de  $\tilde{\rho}$  (ver Figura 10c y 10d) son totalmente diferentes, lo que nos lleva a concluir que esta similitud sólo puede atribuirse a este experimento numérico en particular.

La aplicabilidad del modelo desarrollado en esta Tesis Doctoral es evidente y se demuestra a partir de los resultados del modelo anteriormente expuestos, ya que proporcionan un enfoque efectivo para la simulación de flujo de materiales a escala hemisférica en un sistema de flujo cerrado de materiales.

A partir de estos resultados iniciales surge la siguiente pregunta: ¿es posible que el sistema sea capaz a futuro de cerrar el ciclo sin la necesidad de introducir nueva materia prima? Para responder a esta pregunta, y como medio de verificación de los hallazgos iniciales y de la consistencia del modelo, se ha efectuado una segunda simulación con las

mismas condiciones pero por tres ciclos, totalizando 110 años ( $\sim 3.5 \cdot 10^9$  s). Estos resultados se presentan en la Figura 11.



**Figura 11** Series temporales del porcentaje de densidad en cada nodo de  $t=0$  a  $t=110$  años (en el eje horizontal superior del gráfico) y en segundos como unidad internacional de tiempo (SI) estándar en el eje horizontal inferior del gráfico.

Los resultados observados en la Figura 11 demuestran la consistencia y estabilidad del modelo para entregar resultados. El flujo calculado de  $\tilde{\rho}$  en cada Nodo (Figura 11- a, b, c y d) es consistente con los resultados anteriores presentados en la Figura 10, algo notable para modelos de sistemas no-lineales.

Nuevamente y siguiendo la lógica anterior, se observa la entrada inicial de materia prima al sistema, es decir, el ingreso de las unidades de  $Si$  ( $\tilde{\rho}$ ) al Nodo# 1. Posteriormente, los paneles fotovoltaicos salen de la planta de fabricación hacia el usuario, observándose que el porcentaje de unidades de  $\tilde{\rho}$  disminuye a cero, como se detalla en la Figura 11a. A continuación se puede observar aproximadamente a los  $\sim 1.6 \cdot 10^9$  s ( $\sim 45$  años) el reingreso

de material ( $\tilde{\rho}$ ) a la planta de fabricación (Nodo# 1), que corresponde a alrededor del 25% del total de la materia prima originalmente ingresada. Finalmente, es posible observar que a los  $\sim 2.6 \cdot 10^9$  s ( $\sim 80$  años) las unidades de  $\tilde{\rho}$  regresan de forma constantemente al Nodo# 1, alcanzándose un máximo retorno desde los  $\sim 2.7 \cdot 10^9$  s ( $\sim 85$  años) hacia adelante.

Es posible observar, al igual que la simulación anterior, que en el Nodo #2,  $\tilde{\rho}$  aumentó drásticamente, llegando a una convergencia máxima entre los  $\sim 0.2 \cdot 10^9$  s ( $\sim 5$  años) y  $\sim 1 \cdot 10^9$  s ( $\sim 30$  años), para posteriormente comenzar a disminuir (ver Figura 11b). La alta convergencia de unidades de  $\tilde{\rho}$  apoyan la hipótesis inicial respecto al impacto de  $T_d$  sobre el funcionamiento de un sistema cerrado ( $T_d \sim 29.949$  años en una ubicación fija generando electricidad). En consecuencia, inicialmente se sugiere que un  $T_d$  grande genera un impacto en la forma de una *onda de choque* que perturba al sistema C2C-CCM, haciendo que la reutilización del *Si* sea ineficaz al EoL. Esta *onda de choque* puede ser comparada por analogía como un atasco en el tráfico vehicular, pero en vez de ser unos minutos o horas debido a una luz roja o un accidente, los paneles están fijos en un solo lugar durante  $\sim 30$  años o más con el único propósito de generar electricidad, generando una inercia que afecta el sistema de flujo cerrado en su totalidad, la que se puede observar claramente en los resultados del experimento numérico.

Continuando con el análisis del Nodo #2, observamos que en  $\sim 1 \cdot 10^9$  s ( $\sim 30$  años, EoL para un panel fotovoltaico), el porcentaje de unidades de  $\tilde{\rho}$  comienza a disminuir debido al proceso de recuperación y desmantelamiento de los sistemas fotovoltaicos. Siguiendo la tendencia observada anteriormente en el Nodo# 3 (ver Figura 11c), se estima que a  $\sim 1 \cdot 10^9$  s ( $\sim 30$  años) el sistema fue capaz de absorber alrededor del 25% de las unidades de  $\tilde{\rho}$  provenientes del Nodo# 2, lo que es coherente con la cantidad de material reutilizado en el Nodo #1 (ver Figura 11a). Finalmente, a los  $2.8 \cdot 10^9$  s ( $\sim 90$  años) se aprecia que el sistema fue capaz de reutilizar el total de unidades de  $\tilde{\rho}$  de *Si*, ganando estabilidad y cerrando finalmente el ciclo (ver Figura 11a).

Respeto a los Nodos# 3 y 4, es posible observar nuevamente una “*cuasi-simetría*” en la distribución de  $\tilde{\rho}$ . Sin embargo, al confirmar las escalas en las gráficas de las Figuras 11c y 11d, se aprecia una diferencia en varios órdenes de magnitud, confirmando nuestra hipótesis inicial.

Como se ha mostrado en los resultados de este experimento numérico, la evolución temporal de  $\tilde{\rho}$  en cada Nodo sugiere inicialmente que un sistema C2C-CCM a escala global puede ser considerado como un sistema en *estado estacionario*, donde la velocidad del flujo de  $\tilde{\rho}$  fuera de las regiones del Nodo puede ser más rápida que en el mismo Nodo, lo que

puede ser el resultado de un flujo de elevado *momentum*. Sin embargo, el flujo de menor *momentum* también es transportado por el flujo de  $\tilde{\rho}$  una vez que está fuera de los Nodos. Este es un atributo muy importante para cualquier sistema C2C-CCM, porque el reciclaje y el supra-reciclaje no pueden ser instantáneos. Por lo tanto, el Nodo #4 desempeña un papel clave para ayudar al sistema a alcanzar la estabilidad después de la onda de choque desencadenada en el Nodo #2, especialmente en los casos en que las capacidades de reciclaje en el Nodo #3 son limitadas. En consecuencia, el Nodo #4 puede proporcionar una capacidad de amortiguación para el sistema, especialmente cuando hay materiales de poca pureza o poco reciclables (p. ej. mezclas de materiales altamente aleatorias) presentes en el sistema.

De los resultados anteriores se extraen algunas conclusiones iniciales:

1. El esquema numérico utilizado resulta ser efectivo. La simulación es estable y capaz de proporcionar resultados convergentes para la simulación del flujo de  $Si$  en un sistema cerrado durante todo su ciclo de vida a escala hemisférica dado un  $T_d$ .
2. El modelo fue capaz de predecir efectivamente  $\frac{\partial \tilde{\rho}}{\partial t}$ , entregando la dirección y magnitud del flujo de  $Si$ .
3. El modelo fue capaz de predecir e identificar una *onda de choque*. Esta onda afecta a todo el sistema. Inicialmente sugerimos que  $T_d$  es el principal responsable de este fenómeno.
4. Los resultados muestran que la densidad (unidades promediadas de  $\tilde{\rho}$  por longitud a  $x_i$ ) detrás de la *onda de choque* es diferente a la densidad delante de la misma. Esta es la razón principal del porqué las partículas tienen suficiente tiempo para experimentar un retardo bajo una velocidad de proceso constante. Se necesita más investigación para profundizar sobre la propagación de las ondas de choque durante el flujo de material en un sistema cerrado y comprender mejor el rol del Nodo #4 (reservorio) en la atenuación de estas ondas.
5. Aunque los experimentos numéricos fueron implementados originalmente para evaluar la funcionalidad y estabilidad del modelo matemático propuesto, inicialmente creemos que los resultados obtenidos en la presente Tesis Doctoral pueden ser considerados como prometedores. Estos, pueden apoyar a una mejor comprensión sobre los sistemas CCM como parte de una Economía Circular. Son

necesarios mayores esfuerzos que permitan un análisis más profundo en términos de una simulación capaz de funcionar en tiempo real.

6. Los resultados muestran desempeño alentador del modelo presentado aquí, principalmente en la captura de la dinámica del flujo de materiales a escala hemisférica. Estos prometedores resultados indican la posible aplicabilidad del modelo propuesto a otros sistemas físicos complejos a escala hemisférica y global para un determinado  $T_d$ .

Finalmente, debido a la naturaleza no-lineal de un sistema CCM, y como alternativa al análisis de sensibilidad clásico, en la siguiente sección se incluye una breve nota en la que utilizando *Ensamblados* se han evaluado las variaciones del sistema para diferentes  $T_d$ .

#### 4.4.1 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DEL EXPERIMENTO NUMÉRICO MEDIANTE EL USO DEL MÉTODO DE ENSAMBLADOS

Aunque los aspectos de incertidumbre del modelo numérico y su impacto en un conjunto particular de supuestos no han sido cubiertos directamente y están más allá del alcance de esta Tesis Doctoral, de los resultados anteriormente presentados, destaca el impacto que tiene  $T_d$  en todo el sistema. Por lo tanto, a fin de entender mejor los posibles impactos en su variación sobre el sistema modelado se ha desarrollado esta sección.

El sistema C2C-CCM es un sistema no-lineal descrito por un conjunto de ecuaciones diferenciales. Existen al menos dos sistemas de primer orden en el modelo propuesto, en donde, dos o más procesos son equivalentes a un sistema de segundo orden (Ingham et al. 2007). Los resultados obtenidos de nuestro modelo concuerdan con un sistema no lineal de orden superior. Además, considerando que la modificación de los parámetros dentro de este sistema específico de operaciones tiene poco impacto en los resultados del sistema (Forrester 1987; Tjøstheim 2012), se debe concluir que para los sistemas no lineales de alto orden, el análisis tradicional de sensibilidad lineal puede proporcionar estimaciones incorrectas (Saltelli 1999).

En su lugar, tratamos de entender cómo se propaga una incertidumbre dada por  $T_d$  a lo largo del tiempo en este sistema dinámico. En esta Tesis Doctoral, se ha abordado este punto utilizando la Teoría de Sistemas Ensamblados. El modelo de ensamblados es un interesante método estadístico que surgió en la última década. Se utiliza en muchos campos, tales como: modelación de yacimientos petrolíferos (Jahanbakhshi et al. 2018), dinámica oceánica (Nadiga et al. 2013), ciencias atmosféricas (Baran and Lerch 2018), e hidrología (Seo et al. 2014), por nombrar algunos.

En esta sección, utilizamos un análisis de *ensamblados* simplificado para evaluar la sensibilidad de un sistema C2C-CCM en  $T_d$ . Se construyó un modelo de *ensamblados* ejecutando formulaciones del modelo antes expuesto con diferentes valores para  $T_d$  (Fuentes and Foley 2013). Para este experimento numérico de *ensamblados*, realizamos una serie de simulaciones para diferentes ciclos para  $T_d$  [5, 10, 15, 20, 25, 30] (años) en el Nodo #1, donde  $T_d=30$  es utilizado como el escenario de base, posteriormente se comparan los resultados del conjunto entre sí para  $T_d=5,10,15,20,25$ . La Figura 12 muestra los resultados y la estructura de los diferentes perfiles de  $\tilde{\rho}$  con el tiempo para cada  $T_d$ .

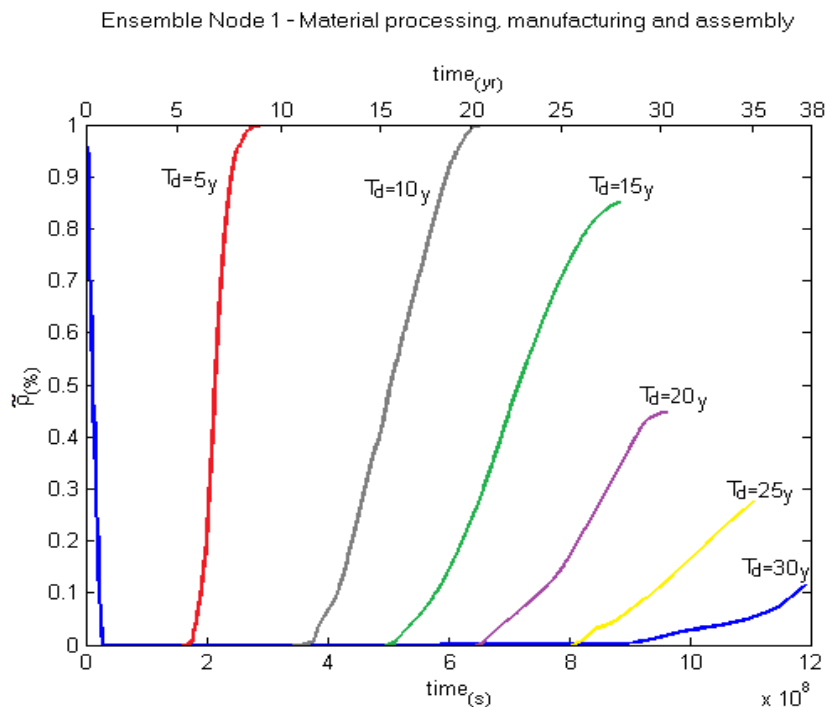


Figura 12 Resultados de los *ensamblados* para diferentes  $T_d$  (5, 10, 15, 20, 25, y 30 años)

Se observa que la variabilidad espacial en los perfiles de distribución de  $\tilde{\rho}$  evidencian una gran dependencia a los cambios de  $T_d$  y confirma su rol clave en los sistemas de flujo cerrado de materiales y/o productos, en especial en aquellos con una gran  $T_d$  a escala espacial hemisférica y global, como es el caso de los de los PVF-SiC. Además, los resultados del *ensamblado* muestran que el  $T_d$  óptima para cerrar efectivamente el ciclo de materiales a escala hemisférica en un sistema C2C-CCM es de aproximadamente entre 5 a 10 años de vida útil para los paneles fotovoltaicos.

# 5

## FIN DE LA VIDA ÚTIL DE UN PANEL FOTOVOLTAICO DE SILICIO CRISTALINO: ANÁLISIS DE ESCENARIOS

Como ya se ha descrito en anteriores capítulos, el ciclo de vida completo de un PFV-*SiC* está dominado por un paradigma lineal de flujo de materiales abierto, también conocido como de la Cuna-a-la-Tumba (C2G, de sus siglas en inglés por Cradle-to-Grave). A su vez, en capítulos anteriores se ha evidenciado que puede ser posible la reducción de residuos utilizando los principios de la filosofía de la Cuna-a-la-Cuna (C2C, de sus siglas en inglés), aplicada a un sistema de Ciclo Cerrado de Materiales (CCM). En principio, y en base a lo ya discutido, este modelo parece ser una prometedora propuesta para avanzar hacia una Economía Circular (CE) Sostenible (ECS). Sin embargo, como primer paso es clave determinar cuáles son los impactos ambientales asociados al *final de su vida útil* (EoL, por sus siglas en inglés) de los PFV-*SiC*, en particular para un sistema de CCM, en base a las tecnologías de recuperación de *Si* actualmente disponibles.

Por lo tanto, a fin de poder estudiar los posibles impactos ambientales en un sistema CCM basado en principios C2C, en este trabajo se ha realizado un intento de comparación entre dos escenarios utilizando la metodología de análisis de ciclo de vida (ACV). El primer escenario evalúa los impactos ambientales de un PFV-*SiC* que es desmantelado al EoL en un sistema lineal o ciclo abierto de materiales (CAM), y el segundo escenario evalúa los impactos ambientales al fin de la vida útil de la PFV-*SiC*, pero en un sistema circular o ciclo cerrado de materiales (CCM), aplicando para la recuperación del *Si* la última tecnología disponible, proveniente de datos experimentales de fuentes secundarias, a fin de implementar un ACV sobre este nuevo sistema CCM.

## 5.1 APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DURANTE EL FIN DE LA VIDA ÚTIL DE UN PANEL FOTOVOLTAICO DE SILICIO CRISTALINO

En las últimas décadas se ha observado un creciente despliegue de la tecnología de PFV-SiC en todo el mundo, de la mano de la promesa de un futuro limpio y sostenible. Esta tecnología continuará liderando el mercado mundial del sector fotovoltaico durante las próximas décadas (IRENA 2016a). Sin embargo, la ineficiente recuperación de materiales procedentes de esta industria al final de su vida útil (EoL) (Contreras-Lisperguer et al. 2017) contribuirá en las próximas décadas a la generación masiva de residuos y emisiones tóxicas, por lo tanto, pierde sustentabilidad y aumenta nuestra dependencia en los RPANR (Klee and Graedel 2004). Estos impactos nos afectarán muy negativamente si no se es capaz de cambiar el paradigma actual de fabricación, donde el flujo lineal de materiales en la cual esta tecnología termina su *EoL* como residuos en un vertedero, lo que ese ha definido en esta Tesis Doctoral como un ciclo de vida C2G (McDonough and Braungart 2002), que está basado en un sistema económico que “toma materia prima y produce finalmente sólo residuos”. Finalmente, el hecho que los actuales paneles fotovoltaicos sean diseñados sin considerar el reemplazo de sus materiales tóxicos, el uso de renovables en su fabricación y la reutilización total de sus materiales al EoL, lo hace intrínsecamente menos reciclables y muy poco reutilizables (Contreras-Lisperguer et al. 2017).

En este sentido, es clave estudiar cuál es el *estado del arte* de las diferentes alternativas de reciclaje para paneles fotovoltaicos de silicio cristalino, a fin de comprender que procesos se deben mejorar a fin de poder llegar a un verdadero *supra-reciclaje*.

## 5.2 ESTADO DEL ARTE DE LOS ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LAS ALTERNATIVAS DE RECICLAJE DE PANELES FOTOVOLTAICOS DE SILICIO CRISTALINO AL FINAL DE SU VIDA ÚTIL

Con carácter general, el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es una herramienta que ha avanzado bastante rápido en la última década y se ha convertido en la preferida por investigadores y la academia para evaluar el flujo de recursos e impactos ambientales asociados con la entrega de servicios y productos (Poudelet et al. 2012). Además, la importancia de temas relacionados al Cambio Climático y la reducción de gases de efecto

invernadero han hecho que el uso de ACV sea aún más relevante debido a su capacidad para evaluar una amplia variedad de procesos, sectores e industrias. Por tanto, el ACV se considera como una herramienta altamente efectiva que permite evaluar la huella ecológica de la industria fotovoltaica sobre el medioambiente (Fthenakis and Kim 2011).

A pesar de que los impactos medioambientales provenientes de los PFV-*SiC* han sido ampliamente objeto de estudio mediante la metodología de ACV, hasta la fecha, la mayoría de estos estudios se han enfocado desde una perspectiva C2G y han centrado su atención principalmente en las fases de producción, instalación y uso (IRENA 2016a). Solo un limitado número de estos estudios se ha enfocado en el EoL (Fthenakis and Kim 2011; Fu et al. 2015; Tsang et al. 2016). Adicionalmente, algunas tecnologías de reciclaje de PFV-*SiC* afirman generar impactos medioambientales mínimos (Huang et al. 2017). Lastimosamente, estos últimos, no entregan información desagregada o inventarios validados que permitan la evaluación de dichas afirmaciones mediante el uso de la metodología de ACV.

Una revisión de la literatura científica disponible en ACV aplicados a la tecnología de PFV-*SiC*, confirma la aseveración anterior y demuestra que muy pocos estudios consideran el impacto medioambiental proveniente de las actuales tecnologías de reciclaje de PFV-*SiC* al EoL (Gerbinet et al. 2014). Consecuentemente, los mayores desafíos al momento de evaluar los impactos medioambientales de la tecnología de PFV-*SiC* al llegar al EoL a través de la metodología de ACV, es la falta de Inventarios de Ciclo de Vida (ICV) confiables y el limitado número de estudios de ACV que modelan la etapa EoL con datos desagregados.

La mayoría de las tecnologías actuales de reciclaje de PFV-*SiC* carecen de ICV desagregados, dado que, mayoritariamente, no es posible revelarlos debido a problemas de propiedad intelectual o secreto industrial (patentes). Además, muchas de las instalaciones donde se realiza actualmente el reciclaje de PFV-*SiC* se encuentran todavía en una fase piloto y es muy reducida la información que existe sobre sus impactos ambientales. Un resumen de la literatura científica sobre ICV y ACV de tecnologías de reciclaje fotovoltaico está disponible en la Tabla 1.

## 5 FIN DE LA VIDA ÚTIL DE UN PANEL FOTOVOLTAICO DE SILICIO CRISTALINO: ANÁLISIS DE ESCENARIOS

**Tabla 1** Resumen de la literatura científica sobre los principales ICV y ACV de las tecnologías de reciclaje fotovoltaico

Referencia	Proceso	Dato
(Müller et al. 2006)	Estudio de ACV del proceso de reciclaje de módulos solares basado en la tecnología de reciclaje térmica y química de Deutsche Solar.	No se proporcionan datos desagregados ni inventarios del ciclo de vida de la tecnología de reciclado.
(Bayod-Rújula et al. 2011)	Estudio de ACV con un escenario de EoL donde los impactos ambientales han sido vinculados a los procesos de tratamiento de residuos de Ecoinvent (disposición en vertedero).	No se proporcionan datos desagregados ni inventarios del ciclo de vida de la tecnología de reciclado.
(Zhong et al. 2011)	Estudio de ACV con un escenario de EoL que no describe tanto la tecnología como los procesos implicados en el reciclaje de paneles fotovoltaicos. No se suministra ninguna unidad funcional.	No se proporcionan datos desagregados ni inventarios del ciclo de vida de la tecnología de reciclado.
(Proietti et al. 2012)	El estudio de ACV con un escenario de fin de vida útil es modelado considerando la tecnología de reciclaje térmica y química de Deutsche Solar.	No se proporcionan datos desagregados ni inventarios del ciclo de vida de la tecnología de reciclado.
(Latunussa et al. 2016a)	Estudio de ACV con un escenario de fin de vida modelado a partir del proyecto FRELP. Este estudio no considera el retorno del material al ciclo industrial y su reutilización.	Sí se proporcionan datos desagregados e inventarios completos del ciclo de vida de la tecnología de reciclado.
(Lunardi et al. 2018a)	Estudio de ACV con un escenario de EoL que no describe la tecnología de reciclaje evaluada. No se proporciona el porcentaje de desglose de materiales.	No se proporcionan datos desagregados ni inventarios del ciclo de vida de la tecnología de reciclado.

De lo anterior se concluye que hay poca o ninguna investigación con respecto a los impactos ambientales para un sistema de Ciclo Cerrado de Materiales (CCM) de PFV-SiC. Aquí, es importante mencionar que estos temas son relevantes si queremos describir completamente las implicaciones y los beneficios de la reutilización de los materiales de los PFV-SiC. Al respecto, algunos autores han sugerido la importancia de un CCM, particularmente cuando los principios C2C son considerados.

En la Tabla 2 se ofrece una descripción de estos beneficios según la literatura revisada. Sin embargo, aún hoy no existe claridad sobre el nivel al cual se debe cerrar el ciclo (a nivel de producto o material) y quién será el responsable final de cerrarlo (el usuario final, el fabricante, el proveedor, etc.) (Niero and Hauschild 2017). Por consiguiente, es necesario seguir investigando, en particular, para poder entregar un apoyo concreto, tanto al sector empresarial, como a los desarrolladores de políticas.

**Tabla 2** Ventajas de un ciclo cerrado de materiales (CCM) basado en los principios C2C

Referencia	Beneficio(s)
(Braungart et al. 2007)	Define los principios de un CCM y proporciona una clasificación para el ciclo cerrado técnico y biológico.
(Bridgens et al. 2017)	Se reconoce que un sistema CCM facilita la recuperación de valiosos componentes funcionales y metales de los desechos electrónicos y reduce la cantidad de desechos electrónicos.
(Contreras-Lisperguer et al. 2017)	Se identifica el valor de un sistema CCM como una nueva alternativa para controlar el flujo de materiales, una nueva oportunidad de negocios y potencial para proporcionar sostenibilidad. Los autores sugieren el uso de los principios de C2C.
(Niero and Hauschild 2017)	Identificó que un sistema CCM basado en los principios C2C, es hoy el marco de trabajo más completo y operativo, además de ser útil para prevenir el desplazamiento de las responsabilidades entre los diferentes actores en la cadena de valor.
(Hahladakis and Iacovidou 2018)	Identificó que un sistema CCM permite la recirculación de los materiales de vuelta a la economía.
(Kalmykova et al. 2018)	Basado en los principios de C2C, se afirma que un sistema CCM debe necesariamente apuntar a la eco-efectividad más que a la eco-eficiencia (aquí un sistema CCM está simbolizado como la Economía Circular).

En esta capítulo, se plantea el imperativo de evaluar los beneficios e impactos ambientales para el EoL de los PFV-SiC (Perez-Gallardo et al. 2018). Para ello, se han utilizado los datos de ICV abiertos y desagregados disponibles para la tecnología de reciclaje fotovoltaico, y en conjunto con la literatura disponible, ha permitido modelar un sistema CCM innovador que permite evaluar los posibles impactos ambientales desde el punto de vista de la Economía Circular (EC).

### 5.3 EVALUACIÓN COMPARATIVA DEL CICLO DE VIDA DE PANELES FOTOVOLTAICOS CRISTALINOS EN EL FIN SU VIDA ÚTIL: *ESCENARIOS DE CICLO DE MATERIALES ABIERTO Y CERRADO*

El cambio de un flujo lineal a uno circular para la industria fotovoltaica no es una tarea trivial. Aunque, en términos generales, el metal y el vidrio utilizados para fabricar un panel fotovoltaico pueden ser infinitamente reciclables (Reck and Graedel 2012), sin embargo, en la industria fotovoltaica, la reutilización de materiales fotovoltaicos y la generación de residuos en el EoL son retos que aún deben superarse para implementar plenamente un ciclo cerrado de materiales para la industria fotovoltaica.

Los apartados posteriores se centrarán principalmente en la evaluación de los principales impactos ambientales asociados con un ciclo cerrado de materiales (CCM) basado en los principios de C2C (Contreras-Lisperguer et al. 2017). Por otro lado, y como ya se mencionó, no se han transparentado públicamente los inventarios detallados de estas

tecnologías. Sin embargo, a pesar de este limitante, y luego de una amplia búsqueda de literatura y estudios, se ha verificado que los únicos datos experimentales con un inventario públicamente disponible y desagregado para la tecnología de PFV-SiC, es la disponible del proyecto "Full Recovery End of Life Photovoltaic" (FRELP) (FRELP Project 2018).

Considerando la información anterior, este estudio se ha realizado en base a las últimas tecnologías de reciclaje disponibles para los PFV-SiC, incluyéndose además una etapa que valore el transporte desde las instalaciones donde se ha realizado la recuperación de los materiales que componen a un PFV-SiC hasta las instalaciones industriales donde dichos materiales van a ser reutilizados, cerrando de este modo completamente el ciclo.

En resumen, se estima que el modelo teórico introducido es innovador y representa fielmente el ciclo de vida para un sistema de CCM y que ayudará a sentar las bases para comprender los retos futuros de una sociedad basada en una economía circular.

### 5.3.1 METODOLOGÍA

Se ha utilizado la metodología ACV para evaluar los impactos ambientales al final de la vida útil de los PFV-SiC para los escenarios de un sistema de ciclo abierto de materiales (CAM) y otro de ciclo cerrado de materiales (CCM). Este estudio de ACV se realizó de acuerdo con las normas ISO 14040 (ISO 14040 2006) e ISO 14044 (ISO 14044 2006). El ACV ha sido modelado usando el software SimaPro versión 8.0.

Para la evaluación de impacto de ambos escenarios se utilizó la metodología de evaluación de impacto ReCiPe. Esta metodología es ampliamente aceptada y utilizada en el mundo académico (Hauschild et al. 2011), y representa una solución intermedia entre las diferentes metodologías de evaluación, logrando mantener las ventajas y reduciendo a la vez los inconvenientes de los otros métodos (Goedkoop et al. 2009). Con el fin de evaluar las puntuaciones de impacto, en el presente estudio se ha utilizado el método de evaluación del punto medio (H) de ReCiPe (ReCiPe normalization factors 2010). Finalmente, se han comparado los resultados de ambos escenarios para las categorías de impacto elegidas y por último, se presentan los resultados obtenidos y su interpretación

Aquí, los datos del ICV sobre el FRELP se obtuvieron de los informes del proyecto (Latunussa et al. 2016b, 2016a) y de la literatura científica más reciente disponible. Como datos complementarios se utilizaron los últimos informes internacionales disponibles (IRENA 2016a; Lee and Komoto 2017; Wambach 2017), y cuando los datos no estaban disponibles en las fuentes mencionadas anteriormente, se utilizó la información procedente

de Ecoinvent 3, reconocida mundialmente como una de las bases de datos disponibles de ICV más consistentes del mundo (Ecoinvent 2013).

### 5.3.2 OBJETIVO, ALCANCE Y UNIDAD FUNCIONAL

El objetivo de este ACV es evaluar y comparar los impactos ambientales para el EoL de los paneles fotovoltaicos en el marco de un sistema de ciclo abierto y cerrado de materiales, además de evaluar las bondades y limitaciones de la metodología ACV para un sistema C2C-CCM:

- a. En el escenario del sistema de ciclo abierto de materiales (CAM), no hay reciclaje, recuperación y re-uso de materiales. En este caso, los paneles fotovoltaicos se incineran como residuos municipales y los restos de la incineración se eliminan en un vertedero como último paso de la fase del EoL.
  
- b. En el escenario de ciclo cerrado de materiales (CCM), se ha intentado modelar un sistema basado en los principios de C2C. Es importante destacar, que este tipo de sistema es algo único e innovador, debido a que un CCM representa un círculo donde los materiales se reutilizan continuamente. Además, la utilización de los principios C2C en un sistema CCM implica que debe existir un equilibrio entre la cantidad de lo que se considera residuo y la cantidad de recursos, ambos deben tener magnitudes similares, aunque deberían ser iguales en un escenario ideal. Además, un sistema CCM basado en principios C2C debe estar potenciado exclusivamente por fuentes de energía renovables, apoyando la biodiversidad y la diversidad sociocultural (Ankrah et al. 2015). Para modelar un sistema de este tipo, hemos construido un escenario en el que los paneles fotovoltaicos se desensamblan, se reciclan y luego se recuperan para su reutilización como paso final de su fase de EoL.

Sin embargo, es importante aclarar que, a pesar de los esfuerzos realizados para poder implementar el ACV de un sistema CCM basado en los principios C2C, esto sólo se ha conseguido parcialmente, dado que a la fecha no existe un panel fotovoltaico certificado con el nivel *Platinum*, que es el máximo en la certificación C2C. Por otro lado, ha sido imposible evitar la generación de residuos después del proceso de recuperación de materiales. El método de reciclaje utilizado en el proyecto FRELP genera basura, dado que, en la actualidad, todos los procesos de reciclaje incluyen una fase de eliminación de

residuos después de que todos los materiales fotovoltaicos recuperables son extraídos (Latunussa et al. 2016a). Por lo que el escenario CCM de este ACV, puede ser considerado como un sistema cuasi-cerrado que aplica reciclaje. Este ejercicio resulta ser muy importante, puesto que permite identificar los desafíos que implica implementar un sistema CCM.

En resumen, son necesarios nuevos estudios y propuestas de métodos de recuperación de materiales para el PFV-SiC, que permitan modelar fidedignamente un sistema CCM basado en principios C2C. Se opina que este hecho no debe desalentarnos, dado que éste es el primer intento para modelar dicho sistema utilizando este principio y los resultados pueden dar claras indicaciones de hacia dónde debe avanzar la actual tecnología de recuperación de Si a fin de reducir su generación de basura.

Con el objeto de cerrar el ciclo en el flujo de materiales, se ha incluido una fase de transporte desde la instalación donde se realiza la recuperación de materiales hacia la planta industrial donde será reutilizado como materia prima. La Figura 13 y Figura 14 muestran los límites del sistema de ACV propuestos en el trabajo.

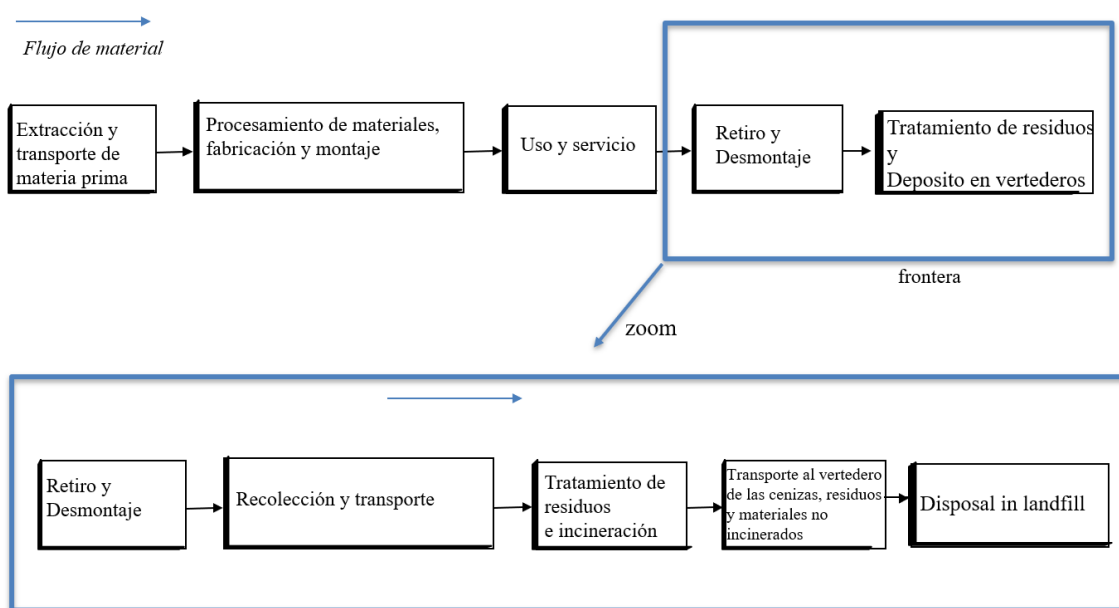
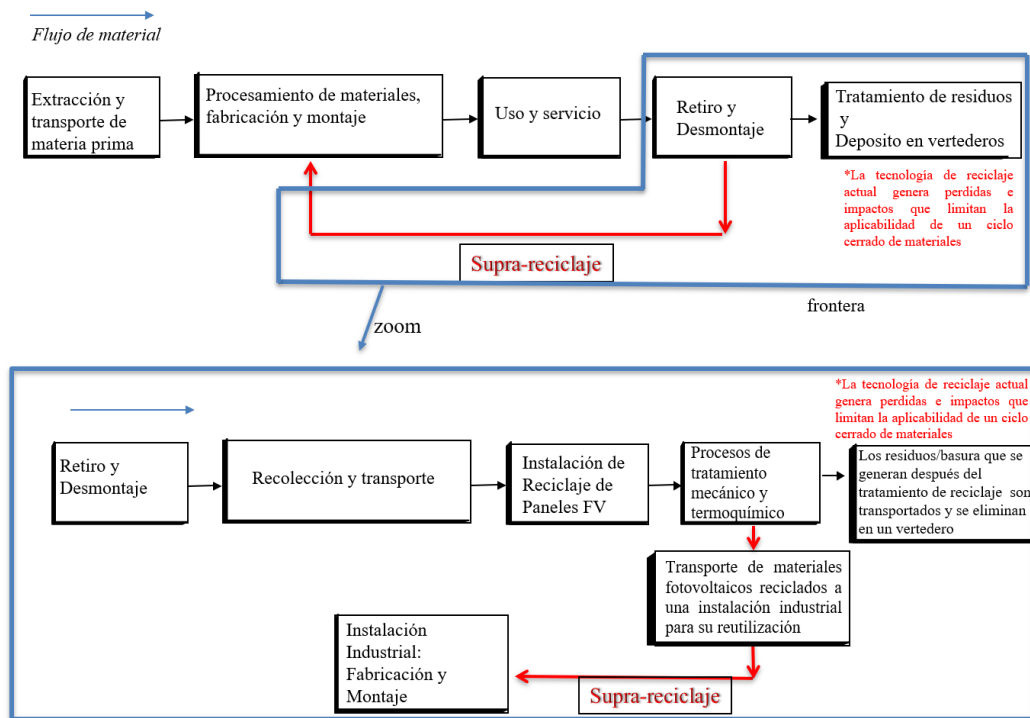


Figura 13 Condiciones límite del ACV para el escenario EoL del Sistema-de-Ciclo-Abierto-de-Materiales

## 5 FIN DE LA VIDA ÚTIL DE UN PANEL FOTOVOLTAICO DE SILICIO CRISTALINO: ANÁLISIS DE ESCENARIOS



**Figura 14** Condiciones límites del ACV para el escenario EoL del sistema de ciclo-cerrado-de-materiales

Además de los dos escenarios descritos anteriormente, se desarrollaron dos escenarios energéticos para el EoL de los PFV-SiC, estos se han designado como *Escenarios de energía-EoL* para el ciclo abierto (CAM) y cerrado (CCM). Para el sistema de CCM basado en los principios C2C, se han utilizado PFV-SiC para generar la electricidad necesaria para la planta de reciclaje. Sin embargo, este escenario no puede ser totalmente renovable debido a que en la actual tecnología de reciclaje FRELP, tanto en su fase de incineración como de transporte, dependen totalmente de los combustibles fósiles.

Para el escenario CAM, y en base a los datos de ICV disponibles, la energía requerida en sus distintas etapas es generada por combustibles fósiles. Para el caso de la electricidad consumida por el sistema CAM, el estudio utiliza la matriz eléctrica promedio en Europa a media tensión (24 países interconectados en una red síncrona de la Europa continental), cuyos datos están disponibles en Ecoinvent 3.

Finalmente, en todo estudio de ACV es fundamental definir la unidad funcional (UF). En esta Tesis Doctoral la UF utilizada es: 1000 kg de material fotovoltaico. En el caso del sistema de CCM, la UF representa 1000 kg de materiales que son reciclados en la fase de EoL. Mientras que para el sistema de CAM, la UF representa 1000 kg de material fotovoltaico que es depositado a un vertedero y/o incinerada en la fase de EoL. Para

mantener la integridad de ambos escenarios, en este estudio los resultados obtenidos no incluyeron ningún tipo de crédito.

#### 5.4 INVENTARIOS DEL CICLO DE VIDA PARA LOS ESCENARIOS DEL FIN LA VIDA ÚTIL DE LOS PANELES FOTOVOLTAICOS

Como se ha descrito anteriormente, los inventarios del ciclo de vida (ICV) de los escenarios de las fases del EoL estudiados en esta Tesis Doctoral se basan en datos desagregados de la literatura científica más reciente disponible (Latunussa et al. 2016b, 2016a), y los datos de referencia se basan en los datos desagregados disponibles en los informes y estudios de índole más general (Stolz and Frischknecht 2016; Wambach 2017; IRENA 2016a; Lee and Komoto 2017). Cuando algunos datos de referencia (p. ej. transporte, incineración, eliminación en vertederos, tratamiento de residuos municipales, uso de electricidad, etc.) no estaban disponibles en la literatura mencionada anteriormente, estos se recolectaron de la base de datos Ecoinvent 3 (Ecoinvent 2013) y/o de procesos similares, o de datos más antiguos si fuera necesario (European Commission 2010). La composición en masa de los residuos fotovoltaicos se describe en el Tabla 3. En cuanto al ICV, ambos escenarios se describen en la Tabla 4.

**Tabla 3** Resumen de la descomposición en masa de una UF obtenida durante el reciclado del panel desmantelado (adaptado de Latunussa et.al 2106)

Material	Masa (kg)	Reciclado (%)
Vidrio	700	70
Aluminio (marco + conductor interno)	185.3	18.53
EVA	51	5.1
Célula solar (Silicio)	36.5	3.65
Lámina trasera	15	1.5
Plata	0.53	0.053
Estaño	0.18	0.018
Plomo	0.35	0.035
Cobre (cable y conductor interno)	11.14	1.114

##### 5.4.1 DETALLE DE LOS INVENTARIOS DEL CICLO DE VIDA PARA LOS ESCENARIOS DE CICLO DE MATERIALES ABIERTO Y CERRADO AL FIN LA VIDA ÚTIL DE PANELES FOTOVOLTAICOS

- a. En el *escenario de ciclo abierto*, los paneles fotovoltaicos no son recuperados ni reusados, sino que van directamente desde la planta de energía fotovoltaica a una instalación de incineración para luego ser eliminados como residuos municipales. Se modeló siguiendo un proceso de flujo de residuos adecuado según la base de

datos Ecoinvent 3 (incineración y eliminación en un vertedero). El transporte desde la planta fotovoltaica desmantelada hasta la instalación donde se implementa la incineración se realiza mediante un camión (7,5-16t/EURO 5) que se utiliza para recoger y transferir los residuos, además para montar y desmontar los paneles, se utiliza un montacargas (camión de carga/descarga) según la información disponible en la base de datos de Ecoinvent 3. La distancia entre la planta fotovoltaica a la instalación donde se realiza la incineración se asume como una distancia media de 200 km (para este estudio esa distancia puede considerarse apropiada, ya que normalmente las grandes plantas fotovoltaicas se encuentran en zonas rurales). Por último, el transporte desde la instalación de incineración hasta el vertedero municipal se realiza a través de un camión (7,5-16t/EURO 5), el cual recorre una distancia media de 50 km.

Las necesidades energéticas, como se ha explicado anteriormente, se modelan para el Escenario de energía-EoL para el ciclo abierto. En este escenario, toda la electricidad consumida proviene de la matriz eléctrica promedio europea a media tensión según los datos disponibles de Ecoinvent 3.

- a. En el *escenario de ciclo cerrado*, los paneles fotovoltaicos se recogen y se transportan a una instalación para su desmontaje. El diésel consumido por el camión (7,5-16t/EURO 5) está basado según la base de datos de Ecoinvent 3. Con el fin de mantener la consistencia entre los escenarios, hemos asumido una distancia promedio de 200 km desde el sitio de recolección hasta la instalación donde se realiza la recuperación de los materiales, según la tecnología de reciclaje FRELP. El montacarga utilizado para transferir materiales en este escenario utiliza combustible diésel como en el escenario de ciclo abierto. La descomposición de materiales se describe en la Tabla 3.

Como se explicó anteriormente, nuestra intención es la de modelar un sistema de materiales de ciclo cerrado con un enfoque C2C, sin embargo, de acuerdo con las limitaciones ya explicadas, esto todavía no es posible. Por otro lado, existe una importante limitante a la hora de medir cuantitativamente la '*C2C-ness*' de los PFV-SiC (*C2C-ness* puede definirse como “cuánto” o “qué tan poco” se adhiere un producto a los principios de C2C). Por ahora solamente se dispone de la escala disponible en la certificación C2C, ya explicada en el capítulo 2.

Los datos disponibles para simular el escenario de ciclo abierto limitan el alcance del presente ACV, debido a que es imposible evitar la incineración y eliminación de materiales al vertedero (p.ej. la incineración de la encapsulación fotovoltaica, la eliminación de las cenizas volátiles, etc.). Técnicamente, esta práctica contradice el concepto de ciclo cerrado basado en los principios de C2C.

Por otro lado, en este escenario se ha considerado que la planta de incineración utilizada para recuperar los materiales de la célula fotovoltaica se encuentra en la misma instalación de reciclaje. Como resultado, las cenizas volátiles son transportadas a un vertedero situado a 50 km de la planta de reciclaje y las cenizas que se han depositado son tratadas en la instalación de reciclaje a fin de poder recuperar los materiales sobrantes en ellas. Una vez que los materiales terminan este proceso, todos los materiales recuperados son transportados desde la instalación de reciclaje a una instalación industrial para su reutilización. En este estudio, se considera razonable una distancia media de 50 km entre ambas instalaciones. Se espera que en el futuro se pueda reducir la distancia una vez que las instalaciones de reciclaje sean universalmente accesibles.

La energía necesaria para el *Escenario de energía-EoL para el ciclo cerrado* incluye todas las necesidades eléctricas de la instalación de reciclaje, que en este caso es alimentada por energía solar proveniente de PFV-SiC (excluyendo la instalación para la incineración). Este escenario tiene como objetivo maximizar los esfuerzos para emular los principios de C2C en este sistema. La energía eléctrica se modeló como una planta de energía fotovoltaica (el sistema representa un conjunto de paneles fotovoltaicos montados en un techo y componentes estándar de BOS) capaz de satisfacer los 114 kWh necesarios para cubrir las necesidades eléctricas que se requieren para procesar una UF (i.e. 1000 kg de material fotovoltaico) en la instalación de reciclaje. Para este escenario se ha utilizado la información de la base de datos SimaPro Ecoinvent (paneles fotovoltaicos, el Balance del Sistema (BOS), el sistema de almacenamiento y la generación de electricidad). En el caso de los módulos fotovoltaicos, los datos han sido complementados con datos adicionales encontrados en la literatura científica disponible (Eitner et al. 2017; Fraunhofer ISE 2019; Held 2013). En la Tabla 4 se entregan la información correspondiente al ICV del escenario de ciclo abierto.

**Tabla 4** Resumen del ICV en ambos escenarios (excluyendo datos de la base de datos de Ecoinvent)

Escenario Abierto			Escenario Cerrado		
Entrada	Cantidad	Unidad	Entrada	Cantidad	Unidad
Basura PV	1000	kg	Basura PV	1000	kg
Diesel	1.14	l	Diesel	1.14	l
			Electricidad	114	kWh
			Agua	309.71	kg
			HNO <sub>3</sub>	7.08	kg
			Ca (OH) <sub>2</sub>	36.5	kg
			<b>Emisiones</b>		
			<b>Salidas</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>
			NO <sub>x</sub>	2	kg
<b>Basura directa al vertedero</b>			<b>Basura resultado del proceso de reciclaje que va al vertedero</b>		
<b>Salidas</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Salidas</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>
Basura PV (incinerada* 1000 y depositada en el vertedero**)		kg	Vidrio Contaminado	14	kg
<b>*Incineración:</b>				2	kg
• Eliminación de plásticos, mezclas, 15.3% agua, a la incineración municipal. Eliminación de aluminio, 0% agua, a la incineración municipal. Eliminación, vidrio, 0% agua, a la incineración municipal			Cenizas Volátiles (basura peligrosa)	306.13	kg
<b>**Vertedero:</b>			Desechos líquidos	50.25	kg
• Eliminación de escoria de la producción de silicio de grado metalúrgico (MG), 0% de agua, material inerte al vertedero. Eliminación de residuos, oblea de Si, inorgánicos, 9,4% de agua, al vertedero de material residual. Eliminación de aluminio, 0% de agua, al vertedero sanitario; disposición de material inerte, vidrio, 0% de agua, al vertedero; plásticos, mezcla, 15,3% de agua, al vertedero			Lodo (basura peligrosa)		

La información descrita anteriormente debe ser interpretada con cautela, ya que no representa fielmente a un sistema de CCM. Por lo tanto, el presente análisis representa el prototipo de un ciclo de vida de un nuevo sistema teórico. En la siguiente sección se presentan y discuten los resultados, lo que será crucial para explicar porque la circularidad *per se* no es necesariamente sostenible.

## 5.5 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS: INTERPRETACIÓN Y DISCUSIÓN

El ACV de la UF modelado para esto escenarios se implementó utilizando la metodología ReCiPe. Las categorías de impacto evaluadas con esta metodología son: cambio climático, agotamiento de la capa de ozono, acidificación terrestre, eutrofización del agua dulce, toxicidad humana, formación de partículas, ecotoxicidad del agua dulce, radiación ionizante, agotamiento de metales, agotamiento de combustibles fósiles, eutrofización marina, formación de oxidantes fotoquímicos, ecotoxicidad terrestre y ecotoxicidad marina (ver Tabla 5). Debido a la falta de datos consistentes en el ICV, no se consideraron las siguientes categorías de impacto: ocupación de tierras urbanas, transformación natural de tierras, agotamiento del agua y ocupación de tierras agrícolas.

**Tabla 5** Resumen de las categorías y unidades de la metodología de impacto de punto medio de ReCiPe (se mantuvo la nomenclatura utilizada por el programa Simapro)

Categorías de impacto del ReCiPe midpoint	Abreviatura	Unidad
Cambio climático	CC	kg CO2 eq/a
Agotamiento del ozono	OZ	kg CFC-11 eq/a
Acidificación terrestre	TA	kg SO2 eq/a
Eutrofización de agua dulce	FE	kg P eq/a
Toxicidad en humanos	HT	kg 1,4-DB eq
Formación de partículas	PMF	kg PM10 eq/a
Ecotoxicidad de agua dulce	FET	kg 1,4-DB eq/a
Radiación ionizante	IR	kg U235 eq/a
Agotamiento del metal	MD	kg Fe eq/a
Agotamiento de los combustibles fósiles	FFD	kg oil eq/a
Eutrofización marina	ME	kg N eq/a
Formación de oxidantes fotoquímicos	POF	kg NMVOC/a
Ecotoxicidad terrestre	TET	kg 1,4-DB eq/a
Ecotoxicidad marina	MET	kg 1,4-DB eq/a

### 5.5.1 COMPARACIÓN DE RESULTADOS DEL ACV PARA LOS IMPACTOS-AMBIENTALES: CICLO DE MATERIALES ABIERTO Y CERRADO

Sobre la base de los escenarios construidos, se normalizaron los resultados del inventario para la UF en ambos escenarios con base en la metodología del punto medio H para el ReCiPe Europeo (The ReCiPe Team 2010). Este paso facilita la comparación entre los diferentes indicadores de categorías de impacto (PRé 2014). La normalización se calcula dividiendo las puntuaciones calculadas por un valor de referencia, previamente establecido para la metodología ReCiPe. Una vez realizada esta operación en cada categoría de impacto se obtienen los resultados ya "normalizados". Los factores de normalización utilizados en esta Tesis Doctoral están disponibles en el sitio web de ReCiPe (ReCiPe normalization factors 2010).

En el ACV desarrollado para esta Tesis Doctoral se ha evaluado el impacto normalizada correspondiente al impacto anual para un solo europeo (esto es, una persona) en cada categoría (Sleeswijk et al. 2008).

La Figura 15 muestra la comparación del impacto normalizada para las categorías de seleccionadas en los dos escenarios. Como era de esperar, la evaluación de las categorías de impacto para los escenarios de ciclo abierto de materiales (CAM) y ciclo cerrado de materiales (CCM) muestra que el escenario para el CCM posee los mayores beneficios ambientales. Sin embargo, los resultados *normalizados* muestran que algunas categorías para el escenario CAM tienen una magnitud de impacto muy similar a la del escenario CCM. De acuerdo con estos resultados, en el escenario CAM, los principales impactos se observan en las categorías de agotamiento de los combustibles fósiles, agotamiento de los

metales, ecotoxicidad del agua dulce, formación de partículas, toxicidad humana y cambio climático. Los impactos de estas categorías mencionadas anteriormente se deben principalmente al transporte, la incineración de plásticos, los materiales fotovoltaicos depositados en el vertedero y la energía consumida durante los procesos de EoL. Basándose en estos resultados, se puede concluir que el escenario CAM no es una solución viable para enfrentar los desafíos que presenta la fase de EoL de la tecnología fotovoltaica, debido a los impactos negativos que se generan sobre el medioambiente y salud de los humanos.

Sin embargo, el escenario CCM tiene impactos negativos sobre el medioambiente que son relevantes y que deben ser estudiados y minimizados, si es que se desea realmente hacer de la tecnología fotovoltaica una industria sostenible en el largo plazo. El transporte, la incineración de los plásticos y células fotovoltaicos, y la eliminación de lodos y cenizas volátiles en un vertedero a partir del proceso termoquímico utilizado durante el proceso de recuperación de materiales de los PFV-SiC con el proceso FRELP, son los principales contribuyentes a los posibles impactos observados en las siguientes categorías: formación de material particulado, agotamiento de combustibles fósiles, ecotoxicidad de agua dulce, cambio climático, agotamiento de metales y formación de oxidantes fotoquímicos. Es notable cómo el transporte es uno de los elementos que contribuye más a los impactos potenciales en cada una de las categorías analizadas para ambos escenarios.

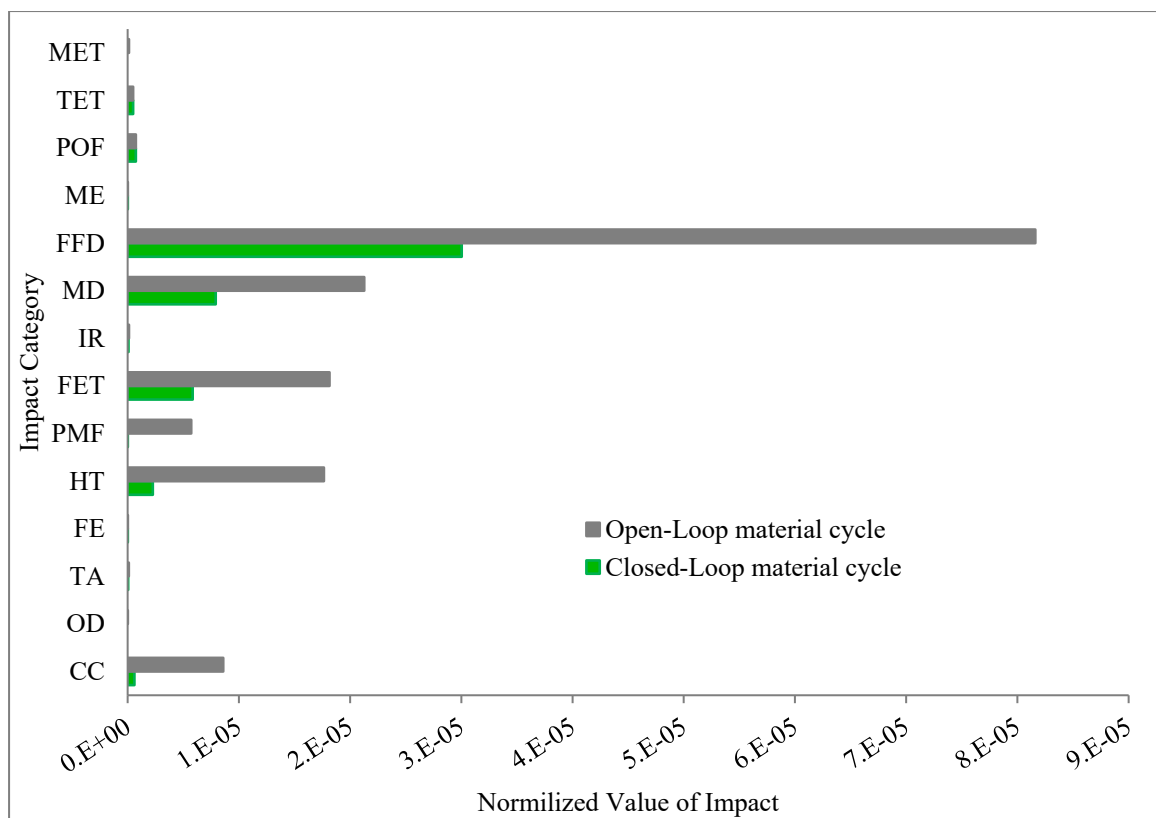


Figura 15 Comparación de los impactos normalizados por cada categoría en los escenarios de ciclo abierto y cerrado

Sin embargo, la comparación inicial entre los dos escenarios (ver Figura 15) obliga a cuestionarse respecto a la sustentabilidad del escenario CCM, en especial, a cuán sustentable es la metodología utilizada para recuperar materiales.

En comparación con el escenario CAM, los impactos atribuidos al escenario CCM merecen un análisis exhaustivo para identificar los principales desafíos en materia de residuos que deben abordarse y requieren ser resueltos. En particular poder entender cómo las nuevas tecnologías emergentes para la recuperación de materiales de los PFV-SiC están impactando el medio ambiente y la salud humana es un paso esencial para guiar las nuevas áreas de investigación, las inversiones y las políticas para hacer de los PFV-SiC una tecnología totalmente sostenible.

Para identificar estos desafíos, se ha evaluado la contribución relativa del impacto ambiental para cada uno de los procesos de las subunidades involucrados en el escenario CCM (ver ). Los desafíos identificados son una información valiosa que permitirá enviar algunos mensajes clave a los responsables de desarrollar políticas y al sector fotovoltaico en general.

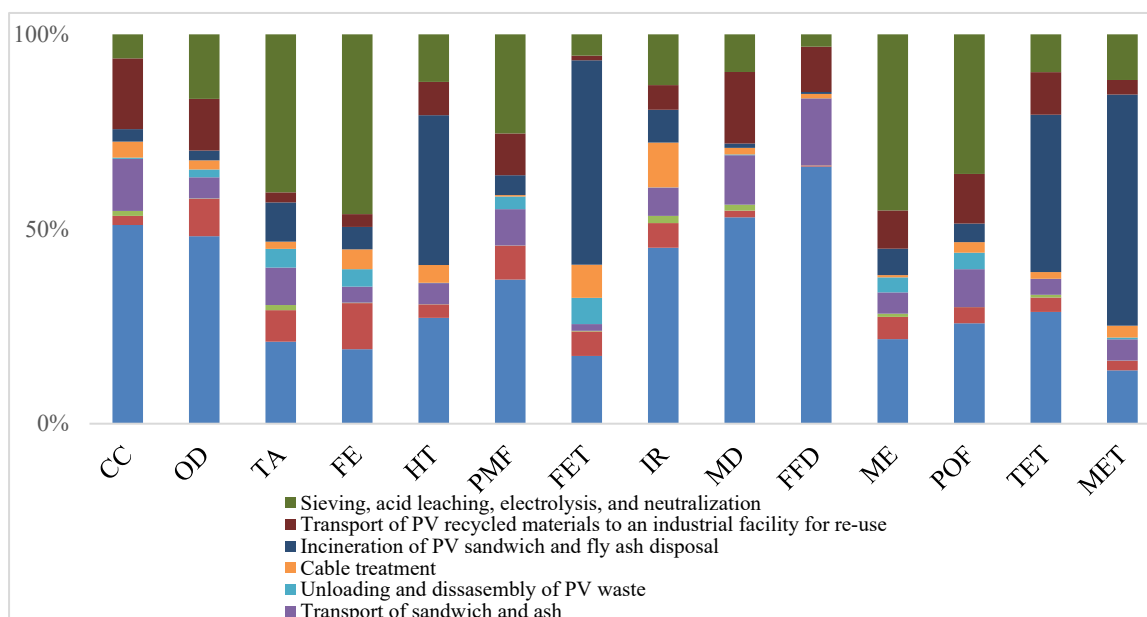


Figura 16 Aportación de los diferentes procesos a las categorías seleccionadas para el escenario de ciclo cerrado

La Figura 16 muestra que la mayoría de los impactos están vinculados a las diferentes fases del transporte incluidas en el escenario CCM. Los resultados obtenidos son comparables en términos de su orden de magnitud a los pocos estudios disponibles sobre este tema (Latunussa et al. 2016b, 2016a). De acuerdo con estos resultados, los impactos más relevantes se registran en las siguientes categorías en la Tabla 6:

Tabla 6 Contribución total del transporte a las categorías de impacto para el escenario de ciclo cerrado de materiales (se mantuvo la nomenclatura utilizada por el programa Simapro)

Categorías de impacto	Abreviaturas	Porcentaje (%)
Cambio climático	CC	82.58%
Agotamiento del ozono	OZ	66.81%
Toxicidad en humanos	HT	41.19%
Formación de partículas	PMF	57.04%
Radiación ionizante	IR	58.85%
Agotamiento del metal	MD	84.08%
Agotamiento de los combustibles fósiles	FFD	94.86%
Formación de oxidantes fotoquímicos	POF	48.27%
Ecotoxicidad terrestre	TET	43.67%

Basándose en los resultados presentados en la Tabla 6, el cambio climático y el agotamiento de combustibles fósiles y metales son las categorías más impactadas. Además, para las otras categorías de impacto, la contribución oscila entre 41.19% (toxicidad humana) y 66.81% (agotamiento de la capa de ozono), lo que sugiere un impacto importante también en esas categorías. Sin duda, es importante empezar a considerar nuevas tecnologías de transporte, más limpias y sostenibles, lo que junto a una mejor planificación para el diseño y ubicación de futuras plantas de recuperación de materiales,

será crucial a la hora de reducir los impactos ambientales globales generados al EoL del escenario CCM.

Por otro lado, la incineración de la célula fotovoltaico, la eliminación de cenizas volátiles, el tamizado, la lixiviación ácida, la electrólisis y la neutralización también son ampliamente responsables por los significativos impactos ambientales observados en muchas de las categorías incluidas en este estudio. Sobre la base de los resultados obtenidos, es posible estimar la contribución de estos procesos y sus impactos en las siguientes categorías en la Tabla 7:

**Tabla 7** Contribución estimada en algunas de las categorías de mayor impacto para el escenario del ciclo cerrado de materiales a partir de: a) la incineración del sándwich fotovoltaico y la eliminación de cenizas volantes y b) el tamizado, la lixiviación ácida, la electrólisis y la neutralización (se mantuvo la nomenclatura utilizada por el programa Simapro).

(a) Categorías de impacto	Abreviaciones	Porcentaje (%)	(b) Categorías de impacto	Abreviaciones	Porcentaje (%)
Toxicidad en humanos	HT	38.47%	Acidificación terrestre	TA	40.58%
Ecotoxicidad de agua dulce	FET	52.52%	Eutrofización de agua dulce	FE	46.15%
Ecotoxicidad terrestre	TET	40.40%	Formación de partículas	PMF	25.47%
Ecotoxicidad marina	MET	59.39%	Eutrofización marina	ME	45.21%
			Formación de oxidantes fotoquímicos	POF	35.86%

En la Tabla 7 se muestra que, el método evaluado (FRELPE) es también responsable de muchos de los impactos ambientales, siendo el segundo factor más importante después del transporte. Se puede concluir que el uso de químicos y la incineración del sándwich fotovoltaico deben ser reevaluados cuidadosamente y buscar nuevas alternativas a fin de reducir su impacto medioambiental.

Una vía alternativa a la incineración para eliminar el EVA podría ser el uso de un método ultrasónico con disolventes orgánicos (Kim and Lee 2012). Este método ofrece una alternativa viable más amigable con el medio ambiente. Adicionalmente, los residuos líquidos orgánicos pueden ser tratados en un proceso de conversión por oxidación húmeda a dióxido de carbono y agua, evitando el uso de procesos térmicos (Ojovan and Lee 2014), y/o utilizando otros métodos alternativos de reciclaje (Lau and Koenig 2001; García et al. 2013). Es en este punto donde se debe insistir en que la implementación adecuada de los principios C2C y el diseño adecuado son esenciales, enfocándose por ejemplo en la búsqueda de materiales de encapsulación alternativos para el reemplazo de la EVA, lo que permitiría una reducción de los impactos ambientales y evitaría el uso de una incineración energéticamente intensiva, como la actualmente utilizada en el proceso FRELPE.

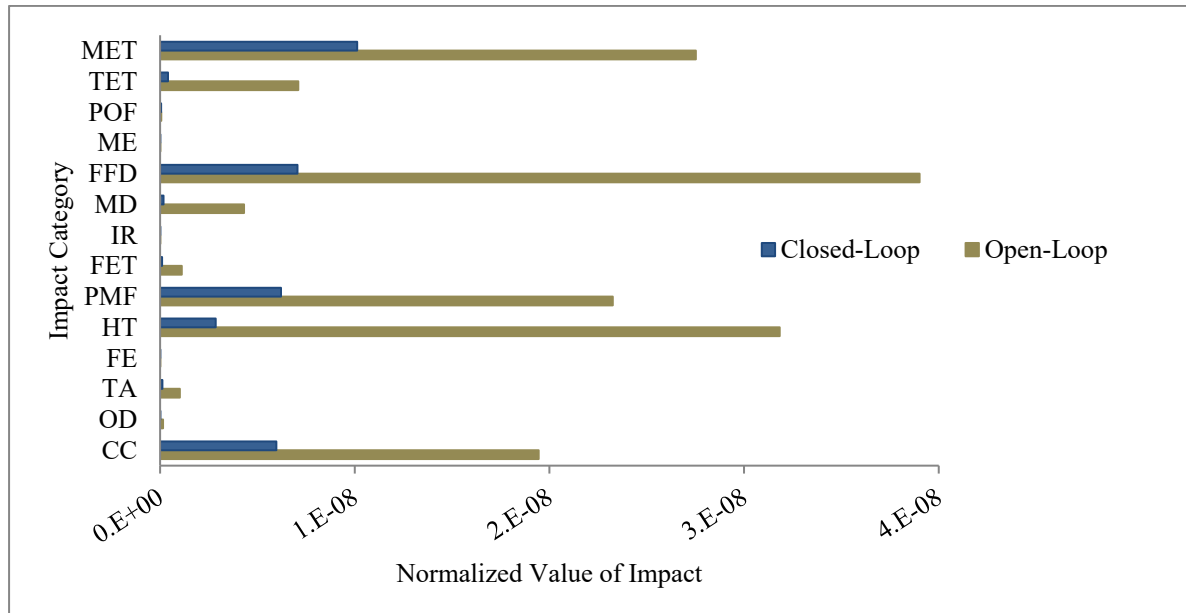
Por último, se espera que los sectores del transporte restrinjan los límites legales de emisiones en el futuro y que la transformación de la actual matriz eléctrica a una más

sostenible y renovable pueda facilitar la reducción de la mayoría de los impactos ambientales derivados de la EoL de los PFV-*SiC*.

### 5.5.2 COMPARACIÓN: ESCENARIOS DE ENERGÍA PARA LOS SISTEMAS DE CAM Y CCM

Como se ha mencionado anteriormente, un sistema de CCM basado en los principios de C2C debe ser impulsado por fuentes de energía renovables. Con el fin de poder incluir este principio en el modelo propuesto en esta Tesis Doctoral, se ha desarrollado un escenario tal que la componente eléctrica la planta de reciclaje en el escenario CCM está totalmente energizada por tecnología fotovoltaica clásica.

Sin embargo, a pesar del uso de PFV-*SiC*, los tratamientos térmicos de alta temperatura utilizados por la tecnología FREL P siguen dependiendo en gran medida de los combustibles fósiles. Además, el transporte en el escenario de CCM es totalmente dependiente en combustibles fósiles. Para conocer las diferencias y similitudes en los impactos ambientales de los sistemas CAM y CCM desde el punto de vista energético, se realizó una comparación de sus impactos normalizados según la metodología Europe ReCiPe Midpoint H para ambos escenarios. Los resultados se pueden ver en la Figura 17.



**Figura 17** Comparación de los resultados de las categorías de impacto normalizadas para los escenarios de potencia para el sistema CAM y CCM al EoL

A partir de estos resultados, es posible identificar que el uso de centrales térmicas para el suministro de electricidad a la red es uno de los principales responsables de los impactos ambientales observados en los *Escenarios de energía-EoL* para el ciclo abierto

(CAM) y cerrado (CCM). Aquí, las centrales térmicas son responsables de los impactos ambientales en las siguientes categorías: agotamiento de combustibles fósiles, toxicidad humana, formación de partículas, ecotoxicidad marítima y terrestre, y cambio climático. El combustible diésel utilizado para el montacargas y el proceso de incineración también es responsable de la formación de partículas, la toxicidad humana y el agotamiento de combustibles fósiles. En general, el uso de un combustible como el diésel libera grandes cantidades de gases tales como el monóxido de carbono (CO), hidrocarburos (HC), partículas (PM) y óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), componentes responsables de varios problemas de salud humana y medioambiente.

En el *Escenario de energía-EoL* para el CCM, las puntuaciones de impacto normalizadas se reducen en comparación con el *escenario del CAM*. Sin embargo, el uso de la incineración y el uso de diésel para el montacargas son los principales contribuyentes a los impactos ambientales en las siguientes categorías de impacto: ecotoxicidad marítima, agotamiento de los combustibles fósiles, formación de partículas, toxicidad humana, cambio climático y ecotoxicidad terrestre. Por otro lado, a pesar de los beneficios de utilizar PFV-SiC para alimentar la instalación de reciclaje, basado en los impactos normalizados en el *Escenario de energía-EoL* para el CCM, se confirma que el uso de la incineración para recuperar metales de la célula fotovoltaico *no* es el camino apropiado a seguir. La fase de incineración en la tecnología FRELP no sólo libera gases nocivos a la atmósfera, sino que también produce cenizas volátiles que se eliminan como residuos altamente tóxicos a un vertedero. Esta alternativa es especialmente inapropiada si el objetivo principal es desarrollar un sistema de CCM basado en principios de C2C, donde se deben evitar y reemplazar aquellos elementos y procesos tóxicos.

Como se indicó anteriormente, uno de los obstáculos más importantes en el *Escenario de energía-EoL* para el CCM es el uso de la pirólisis para separar el EVA de las células solares. En base a los resultados obtenidos, destaca que los fabricantes de paneles fotovoltaicos deben centrarse en el uso de materiales alternativos para promover un desmontaje de bajo consumo energético para los PFV-SiC en el EoL. Además, considerando que la cantidad de trabajo necesaria para separar una mezcla aleatoria de materiales, como el EVA y los adhesivos utilizadas en un PFV-SiC, viene dada por  $W_m = RT \left[ \ln \frac{1}{x} \right]$  (Gutowski 2008), es claro que cuanto más aleatoria sea la mezcla de los materiales utilizados, mayor será la cantidad de energía necesaria para separarlos, que puede aumentar infinitamente. Esto puede ser solucionado si se siguen los principios del

análisis termodinámico introducido en esta Tesis Doctoral en la sección 3.3.1. Además, los principios de C2C pueden proporcionar directrices claras en el diseño de futuros PFV-*SiC*, mejorando el proceso de desmontaje, la reciclabilidad de los materiales utilizados y la sustitución de componentes tóxicos por otros no tóxicos, pudiendo reducir significativamente la energía necesaria para separar los materiales de este, según se ya se demostró en esta Tesis Doctoral.

Finalmente, la implementación de políticas adecuadas ayudará a promover e identificar las diferentes oportunidades de mercado, a reducir el impacto ambiental de la industria del reciclaje y a superar la resistencia al cambio, así como a concienciar sobre la necesidad de mejores métodos de reciclaje a fin de poder avanzar hacia un verdadero supra-reciclaje.

### 5.5.3 LIMITACIONES DEL ACV

Basándose en los resultados iniciales del ACV que se ha presentado en los anteriores apartados, se confirma que la fase de EoL de los PFV-*SiC* está emergiendo, sin duda, como un nuevo desafío medioambiental. Incluso las últimas tecnologías de reciclaje disponibles generan impactos medioambientales que deben eliminarse urgentemente si es que se desea tener una tecnología fotovoltaica realmente sostenible. A continuación, se presentan algunas sugerencias y limitaciones del presente ACV.

Los resultados obtenidos aquí ayudan a delinear las siguientes recomendaciones:

- Los datos obtenidos en el ACV implementado en esta Tesis Doctoral revelan la urgencia de acelerar el despliegue de instalaciones de recuperación de materiales para los PFV-*SiC* y otras tecnologías fotovoltaicas, con el objetivo de poder reducir el impacto medioambiental de los residuos eliminados y quemados en la fase de EoL. Esto es especialmente cierto en países donde la tecnología está ampliamente difundida y el reciclaje *no* existe como una alternativa real en forma de legislación o tecnología disponible.
- No hay duda de que la recuperación de materiales en la fase de EoL tiene impactos ambientales positivos, tanto en términos de reducción de emisiones como en la recuperación de materiales valiosos. Sin embargo, el reciclaje fotovoltaico y la recuperación de *Si* están todavía en una etapa incipiente y es necesario proponer nuevos procesos y métodos. Por lo tanto, urge más I+D para mejorar las tecnologías y metodologías actuales de recuperación de materiales, a fin de evitar los impactos

ambientales negativos derivados de los procesos de reciclaje actuales. Además, en la fase de EoL, el uso de pirolisis y de sustancias tóxicas e inflamables durante el reciclado de materiales fotovoltaicos deben evitarse en las futuras tecnologías de reciclado. Por consiguiente, un diseño adecuado de los PFV-SiC para el EoL, junto con un proceso de reciclaje más respetuoso con el medio ambiente, son claves para desarrollar e implantar un verdadero sistema de CCM y lograr a futuro implementar el supra-reciclaje.

- Hoy en día, los paneles fotovoltaicos no están diseñados para lograr un supra-reciclaje. Todos los materiales reciclados en la actualidad son esencialmente degradados en su calidad después de los procesos termoquímicos que se utilizan actualmente. Así, incluso después del proceso de reciclaje, algunos materiales terminan en un vertedero, creando un impacto negativo en el medio ambiente y la salud humana.
- El transporte de materiales tiene una responsabilidad significativa y negativa en los impactos ambientales observados en los dos escenarios analizados. Se espera que, en el futuro, la electrificación del sistema de transporte ayude a reducir el impacto medioambiental negativo de la industria fotovoltaica. Además, la planificación de la ubicación de las futuras plantas de reciclaje o la implementación de una instalación de reciclaje múltiple para aumentar la eficacia del proceso en su conjunto debe ser estudiada en detalle, ya que esto será clave para facilitar la implementación de un *verdadero ciclo cerrado de materiales*.

Es importante destacar que este estudio realizado en el marco de la presente Tesis Doctoral tiene varias limitaciones. En primer lugar, aparte del caso FRELP analizado aquí, existen muchas otras tecnologías de reciclaje y cadenas de suministro utilizadas por los fabricantes de sistemas fotovoltaicos, sin embargo, se ha elegido el caso FRELP, debido principalmente al limitado acceso a los datos e inventarios de otras tecnologías propietarias de reciclaje fotovoltaico. Se necesita más investigación, desarrollo y verificación de bases de datos. Además, es necesario tener una mayor transparencia en la información técnica de todas las tecnologías de reciclaje.

## 6

## CONCLUSIONES / CONCLUSIONS

En esta sección se presenta una síntesis de las principales aportaciones llevadas a cabo durante el desarrollo de la presente Tesis Doctoral. Se estima que las mismas son de utilidad tanto para la industria como para el mundo académico, proporcionando una profundidad analítica a la retórica actualmente utilizada para tratar los temas de C2C y Economía Circular en la Industria Fotovoltaica.

Esta Tesis Doctoral tenía como objetivo principal lograr el *desarrollo de un modelo teórico basado en principios matemáticos y termodinámicos, que ayude a entender las implicaciones y limitaciones de la filosofía C2C desde una perspectiva crítica y científico, para ulteriormente introducirlo en la industria de la PFV-SiC.*

Para ello se llevó a cabo una detallada revisión bibliográfica, donde se confirma que *no existe* un marco teórico basado en matemáticas y termodinámica para dicho sistema. En líneas generales, todo lo publicado se pueden resumir como sólo un compendio de buenas intenciones e ideas medioambientalistas, pero sin sustento científico, por tanto, la motivación principal de este trabajo ha sido la de aportar claridad científica sobre el particular, sustentándose en una base matemática firme que permita la realización de futuros estudios sobre esta temática, lo que a la vez es necesario para la consecución tanto del objetivo principal como de los secundarios que se planteaban al inicio de la presente Tesis Doctoral.

La aportación principal de esta Tesis Doctoral han sido el desarrollo de un marco teórico y la aplicación de la metodología ACV para un sistema de Ciclo Cerrado de Materiales (CCM) basado en los principios C2C (C2C-CCM). En principio un C2C-CCM ofrece una perspectiva importante para maximizar la reducción de residuos en la industria fotovoltaica, particularmente al final de la vida útil (EoL) de los PFV-SiC, suponiendo que esta tecnología ha seguido los principios de diseño de la filosofía. Resultados directos de esta Tesis Doctoral son:

- La creación de un modelo conceptual *original* para un sistema CCM-C2C aplicado a la tecnología de PFV-SiC.
- La introducción de una escala *espacio-tiempo original* apropiada para un sistema CCM-C2C.
- La propuesta de un modelo termodinámico original para un PFV-SiC diseñado según los principios C2C.
- La propuesta de un marco teórico-científico *original* de un sistema CCM-C2C aplicado a la tecnología de PFV-SiC.
- La definición del concepto de *Tiempo Circular* ( $T_c$ ) para este tipo de sistemas
- El desarrollo de un método numérico que ofrezca solución a un sistema CCM-C2C sobre un área finita para el flujo unidimensional (1-D) a escala hemisférica del *Si* utilizado en la tecnología de PFV-SiC.
- La aplicación de la metodología de ACV a la tecnología de PFV-SiC para los escenarios de CCM y CAM, detalla los impactos y desafíos de las actuales tecnologías de reciclaje y propone soluciones que incluyen el integración de las metodologías de ACV y Certificación C2C.

Además, con el fin de validar el marco teórico propuesto, se realizaron experimentos numéricos a escala regional para un  $T_c$  arbitrario, simulando el flujo de material en un sistema CCM-C2C para el *Si* contenido en la tecnología de PFV-SiC. A la luz de los resultados, se ha demostrado la aplicabilidad, validez y estabilidad del modelo teórico que se propone.

Los hallazgos iniciales señalan claramente los desafíos a la hora de implementar un sistema de CCM-C2C para la tecnología de PFV-SiC.

Además, la técnica de modelamiento utilizado en esta Tesis Doctoral no sólo podría ayudar a mejorar nuestra comprensión del flujo de materiales en un sistema CCM-C2C para la tecnología de PFV-SiC, también permitirá la experimentación sin la necesidad de interrumpir las actividades industriales y la cadena de suministro de la industria fotovoltaica.

Desde un punto de vista termodinámico, se propone una *nueva teoría*, en la que un PFV-SiC, basado en los principios C2C, puede ser considerado como una mezcla *no-aleatoria* de diferentes componentes puros. Si estos bloques de componentes puros se distribuyen sistemáticamente, es teóricamente posible reducir significativamente la

entropía y, por ende, reducir la energía necesaria para la separación de sus materiales. Esta hipótesis ha sido matemáticamente demostrada en esta Tesis Doctoral y se ofrece una solución formal que establece la posibilidad de reducir teóricamente a cero el trabajo necesario para separar la mezcla de materiales en un panel fotovoltaico basado en principios C2C. Por tanto, se ha establecido un límite teórico al trabajo necesario en un sistema de CCM basado en principios C2C, convirtiéndose en un resultado altamente relevante de este trabajo. Un resultado opuesto se encontraría en los productos formados por mezclas aleatorias, en los cuales, la cantidad de trabajo necesario para separar los materiales crece de manera exponencial.

En conclusión, para lograr una sostenibilidad real en el sector de la tecnología fotovoltaica, la industria tendrá que adoptar alternativas que eviten el uso de materiales mezclados de manera aleatoria, los que normalmente se encuentran en todos los productos C2G. Para ello, los paneles del futuro deberán contener consistentemente mezclas de alto grado de pureza no aleatorias, condición que en principio es posible de lograr en la tecnología de PFV-SiC, por tanto, un re-diseño del proceso de fabricación de los mismos es clave para la exitosa implementación de un sistema CCM en la industria fotovoltaica. Sólo entonces será posible pasar del limitado reciclaje actual a un *supra-reciclaje* más eficaz e integral.

Finalmente, en esta Tesis Doctoral se realizó un Análisis de Ciclo de Vida (ACV) comparando dos escenarios. El primer escenario evalúa los impactos ambientales de la tecnología fotovoltaica al final de su vida útil en un modelo de flujo lineal de materiales o *Ciclo-Abierto de materiales* (CAM), y el segundo escenario considera un escenario al final de su vida útil en un modelo *Ciclo-Cerrado de materiales* (CCM). A fin de cerrar el ciclo en este ACV se consideraron las últimas tecnologías de reciclaje de Si disponible y, se utilizaron sus datos experimentales como fuentes secundarias de información, lo que permitió modelar un sistema CCM para la tecnología PFV-SiC disponibles en el mercado.

Los resultados del ACV demuestran que un sistema CCM es favorable para el medioambiente comparado con un sistema CAM, donde los paneles son eliminados en un vertedero, sin embargo, es imperativo reducir el impacto medioambiental de los actuales procesos termoquímicos utilizados para recuperar el Si ya que son potencialmente tóxicos.

Una de las conclusiones extraída del ACV desarrollado durante esta Tesis Doctoral confirma el potencial rol que tiene la actual tecnología reciclaje para reducir la huella medioambiental de la industria fotovoltaica, sin embargo, en un sistema de CCM, los resultados confirman que el proceso utilizado (FRELPA) tiene impactos ambientales

significativos debido a la incineración, uso de ácidos sobre las células fotovoltaicas y la posterior eliminación de la basura generada a un vertedero. En este caso, se propone primero potenciar la recuperación de las obleas de silicio no dañadas como el método óptimo inicial para recuperar *Si* de los paneles fotovoltaicos en su EoL. Además, los resultados recomiendan evitar los procesos termoquímicos durante el proceso de delaminación. En este caso, el uso de solventes orgánicos puede considerarse como una vía alternativa para reducir la emisión de gases tóxicos y la generación de cenizas y lodos, evitando de esta manera dañar los materiales de las células solares durante la fase de delaminación. En consecuencia, si queremos que la tecnología fotovoltaica sea totalmente sostenible, debemos evitar el uso de la incineración, la pirólisis y los ácidos tóxicos ya que son los procesos que generan mayores impactos ambientales.

Además, se concluye que la falta de un marco de diseño adecuado en la actual tecnología de PFV-*SiC*, implica una demanda excesiva de energía en los procesos de recuperación de materiales debido a que estos *nunca fueron diseñados para ser reciclados, y mucho menos reutilizados.*

Por lo tanto, dado que el reciclaje fotovoltaico y la recuperación de *Si* es una tecnología aún en infancia, se hace necesario invertir más I+D para mejorar dichas tecnologías y metodologías a fin de evitar los impactos ambientales negativos derivados de los procesos de recuperación de materiales actuales. Finalmente hay que indicar que el transporte de materiales tiene una responsabilidad significativa y sus impactos ambientales negativos son observables en los dos escenarios, CAM y CCM, analizados durante este trabajo.

# CONCLUSIONS

In this section a synthesis of the main research activities carried out during the development of this Ph.D. Thesis are presented. They are deemed to be useful for both the industry and the academic world, providing a high-quality analytical depth to the rhetoric currently used to address the issues of C2C and Circular Economy in the Photovoltaic Industry.

The main objective of this Ph.D. Thesis was to achieve *the development of a theoretical model based on mathematical and thermodynamic principles, which will help to understand the implications and limitations of the C2C philosophy from a critical and scientific perspective, in order to later introduce it into the CSi-PV industry.*

A detailed bibliographic review was carried out to confirm that there is no current theoretical framework based on mathematics and thermodynamics for such a system. In summary, everything published can be summarized as only a compendium of good intentions and environmentalist ideas, but without scientific support. Therefore, the main motivation of this work has been to impose scientific clarity on the subject, supported by a strong mathematical foundation that allows the realization of future studies on this topic, which is necessary for the achievement of both the main objective and the secondary ones that were outlined at the beginning of this Ph.D. Thesis.

The main contribution of this Ph.D. thesis has been the development of a theoretical framework and application of the LCA methodology for a C2C-CLMC system. In particular, a C2C-CLMC offers an important approach to maximize waste reduction in the photovoltaic industry, principally at the EoL phase of the CSi-PV technology, assuming that this technology has adopted the design principles of this philosophy. Key results of this Ph.D. Thesis are:

- The development of a novel conceptual model for a C2C-CLMC system applied to CSi-PV technology.
- The introduction of a novel *space-time* scale suitable for a C2C-CLMC system.
- The proposal of a novel thermodynamic model for a CSi-PV technology designed according to the C2C principles.
- The proposal of a novel theoretical framework for a C2C-CLMC system applied to CSi-PV technology.

- The definition of the concept of Circular Time ( $T_c$ ) for such a system
- The development of a numerical method that provides a solution to a C2C-CLMC system over a finite area for the one-dimensional (1-D) hemispheric scale flow of  $Si$  used by the CSi-PV technology.
- The application of the LCA methodology to CSi-PV technology for a CLMC and OMC scenarios, details the impacts and challenges of current recycling technologies and proposes solutions that include the integration of LCA and C2C certification methodologies.

In addition, in order to validate the proposed theoretical framework, numerical experiments were carried out on a regional scale for an arbitrary  $T_c$ , simulating the material flow in a C2C-CLMC system for the  $Si$  contained in the CSi-PV technology. In the light of the results, the applicability, validity and stability of the proposed theoretical model have been established.

The initial findings clearly outline the challenges when implementing a C2C-CLMC system for CSi-PV technology.

Furthermore, the modeling technique used in this Ph.D. Thesis could not only contribute to improve our understanding on the material flow in a C2C-CLMC system for the CSi-PV technology, it will also allow for experimentation without the need to disrupt industrial activities and the supply chain of the PV industry.

From a thermodynamic point of view, a *new theory* is proposed, in which a CSi-PV based on C2C principles, can be considered as a non-random mixture of different pure components. If these blocks of pure components are systematically distributed, it is theoretically possible to significantly reduce entropy and thus reduce the energy required for separation of its materials. This hypothesis has been mathematically proven in this Ph.D. Thesis and a formal solution is presented that establishes the possibility of theoretically reduce to zero the work required to separate the mixture of materials in a photovoltaic panel based on C2C principles. Therefore, a theoretical limit to the work required in a CLMC system based on C2C principles has been established, becoming a highly significant result of this work. An opposite result would be found in products formed by random mixtures, in which the amount of work needed to separate the materials grows exponentially.

In conclusion, to achieve real sustainability in the photovoltaic technology sector, the industry should have to adopt alternatives that avoid the use of randomly mixed materials, which are normally found in all C2G products. In order to achieve this, the panels of the future should have to consistently contain high-purity, non-random mixtures, a condition that is in principle possible to achieve with the *CSi*-PV technology. Therefore, a re-design of the manufacturing process is key to the successful implementation of a CLMC system in the PV industry. Only then will it be possible to move from the current limited recycling to a more efficient and comprehensive up-recycling.

Finally, in this Ph.D. Thesis a Life Cycle Assessment (LCA) was performed comparing two scenarios. The first scenario evaluates the environmental impacts of *CSi*-PV technology at the EoL for an OMC system, and the second scenario considers an EoL scenario for a CLMC system. In order to close the cycle in this LCA, the latest available recycling technologies to recover *Si* were considered, and their experimental data were used as secondary sources of information, which allowed the modelling of a CLMC system for the *CSi*-PV technology available in the market.

The results of the LCA show that a CLMC system is environmentally friendly compared to an OMC system, where the panels end up in a landfill, however, it is imperative to reduce the environmental footprint of the current thermochemical processes used to recover *Si* as they are potentially toxic.

One of the conclusions drawn from the LCA conducted during this Ph.D. Thesis confirms the potential role that current recycling technology has in reducing the environmental footprint of the photovoltaic industry. However, in a CLMC system, the results confirm that the process used (FREL<sub>P</sub>) has significant environmental impacts due to incineration, the use of acids on the photovoltaic cells and the subsequent disposal of the waste generated to a landfill. In this case, it is first proposed to enhance the recovery of undamaged silicon wafers as the optimal initial method to recover *Si* from PV panels at the EoL. Furthermore, the results suggest that thermochemical processes should be avoided during the delamination process. In this case, the use of organic solvents can be considered as an alternative route to reduce the emission of toxic gases and the generation of ash and sludge, thus avoiding damage to the solar cell materials during the delamination phase. Consequently, if we want a fully sustainable *CSi*-PV technology, we must avoid the use of incineration, pyrolysis and toxic acids as these are the processes that generate the greatest environmental impacts.

Furthermore, it is concluded that the lack of an adequate design framework in the current CSi-PV technology, implies an excessive demand of energy in the material recovery processes due to the fact that *these were never designed to be recycled, let alone reused*.

Therefore, since photovoltaic recycling and recovery of Si is a technology still in its infancy, it is necessary to invest more R&D to improve such technologies and methodologies in order to avoid the negative environmental impacts derived from the current material recovery processes. Finally, it should be noted that the transport of materials has a significant responsibility and its negative environmental impacts are observable in the two scenarios, OMC and CLMC, analyzed during this work.

# 7

## LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

Atendiendo a la línea de trabajo tratada durante esta Tesis Doctoral y en vista del alcance y relevancia de los resultados obtenidos, se proponen algunas líneas de investigación para trabajos futuros.

En primer lugar, se debe reconocer que el desarrollo de un marco teórico científico para un sistema C2C-CCM representa solamente un primer paso. En el futuro, incluso si todos los paneles y otros bienes son diseñados según los principios de C2C, es necesario un alto grado de madurez del mercado para apreciar plenamente el valor de un sistema de esta naturaleza, además de una nueva conciencia social, junto con sistemas e infraestructura de recolección de materiales especializada y efectiva. Por lo tanto, la industria necesitaría desarrollar un nuevo modelo de negocio. Las políticas, incentivos y mecanismos financieros necesarios para ello son temáticas que requieren de una investigación profunda que no han sido abordadas en este trabajo.

Si bien estos resultados contribuirán a una mejor comprensión de un sistema C2C-CCM, los experimentos numéricos para evaluar el modelo matemático desarrollado en esta Tesis Doctoral han utilizado sólo un tipo de condición de borde y de parametrización. En este sentido se propone, como posible línea futura de investigación, ampliar las pruebas numéricas con diferentes condiciones de borde y parametrizaciones para la tasa de procesamiento en cada nodo, a fin de poder obtener simulaciones que represente de manera fidedigna este tipo de sistemas. Además, estos experimentos numéricos podrían ser el sustento que permita el diseño de políticas más adecuadas, que son necesarias para transformar la actual economía fundamentalmente lineal en una economía circular sostenible.

De la misma forma, se plantea la posibilidad de aplicar el modelo teórico propuesto para paneles fotovoltaicos de silicio cristalino a otros tipos de tecnologías fotovoltaicas

(i.e. CIGS, CdTe, etc.) y evaluar el flujo cerrado de otros materiales a fin de ampliar el conocimiento sobre las mismas y añadir generalidad a las conclusiones obtenidas en esta Tesis Doctoral.

El modelo termodinámico desarrollado en esta Tesis Doctoral confirma la posibilidad de reducir el trabajo necesario para separar los materiales de un producto basado en los diseños C2C. Por lo que es necesario a futuro estudiar las implicancias de este modelo sobre los aspectos energéticos de un sistema C2C-CCM.

El resultado obtenido al utilizar el método de *ensamblados* para diferentes  $T_d$ , propone una reducción de la vida operativa para la tecnología de PFV-SiC, con el fin de poder cerrar el ciclo de materiales, sin embargo, este resultado debe ser evaluada en mayor detalle, dado que en la actualidad la industria fotovoltaica está avanzando decididamente hacia paneles que tenga un mayor ciclo de vida con respecto a los actuales paneles, por lo tanto, este resultado inicial debe ser evaluado desde perspectivas económicas y energéticas en futuras investigaciones.

Finalmente, y con relación al estudio de ACV, se debe destacar la carencia de datos actualizados sobre el EoL de los paneles fotovoltaicos. En este sentido, se propone como posible línea futura de investigación, el desarrollo de inventarios internacionalmente comparables, públicos y armonizados a fin de poder desarrollar nuevas técnicas de separación de materiales, que eventualmente podrían revolucionar la industria fotovoltaica.

## 8

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, P. De and P.D. Silva. 2011. Timing and future consequences of the peak of oil production. *Futures* 43(10): 1044–1055. <http://dx.doi.org/10.1016/j.futures.2011.07.004>.
- Álvarez-Gil, M.J., P. Berrone, F.J. Husillos, and N. Lado. 2007. Reverse logistics, stakeholders' influence, organizational slack, and managers' posture. *Journal of Business Research* 60(5): 463–473. [linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0148296306002359](http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0148296306002359). Accessed March 7, 2017.
- Ankrah, N.A., E. Manu, and C. Booth. 2015. Cradle to Cradle Implementation in Business Sites and the Perspectives of Tenant Stakeholders. *Energy Procedia* 83: 31–40. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610215028581>. Accessed January 21, 2019.
- Ardente, F., C.E.L. Latunussa, and G.A. Blengini. 2019. Resource efficient recovery of critical and precious metals from waste silicon PV panel recycling. *Waste Management* 91: 156–167.
- Armbruster, D., S. Göttlich, and M. Herty. 2011. A Scalar Conservation Law with Discontinuous Flux for Supply Chains with Finite Buffers. *SIAM Journal on Applied Mathematics* 71(4): 1070–1087. <http://epubs.siam.org/doi/10.1137/100809374>. Accessed March 5, 2019.
- Arnould, E.J. 2010. Society, Culture, and Global Consumer Culture. In *Wiley International Encyclopedia of Marketing*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, December 15. <http://doi.wiley.com/10.1002/9781444316568.wiem06001>. Accessed January 1, 2017.
- Astarita, G. 1993. Thermodynamics: a view from outside. *Fluid Phase Equilibria* 82: 1–14. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/037838129387123I?via%3Dihub>. Accessed April 2, 2019.
- Ayres, R.U. 1999. The second law, the fourth law, recycling and limits to growth. *Ecological Economics* 29(3): 473–483. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921800998000986?via%3Dihub>. Accessed September 14, 2017.
- Baran, S. and S. Lerch. 2018. Combining predictive distributions for the statistical post-processing of ensemble forecasts. *International Journal of Forecasting* 34(3): 477–496. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016920701830030X?via%3Dihub>. Accessed March 24, 2019.
- Bayod-Rújula, Á.A., A.M. Lorente-Lafuente, and F. Cirez-Oto. 2011. Environmental assessment of grid connected photovoltaic plants with 2-axis tracking versus fixed

- modules systems. *Energy* 36(5): 3148–3158. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544211001605>. Accessed January 13, 2019.
- Bjørn, A. and M.Z. Hauschild. 2013. Absolute versus Relative Environmental Sustainability. *Journal of Industrial Ecology* 17(2): 321–332. <http://doi.wiley.com/10.1111/j.1530-9290.2012.00520.x>. Accessed March 9, 2019.
- Bohacs, G., D. Gaspar, and A. Rinkacs. 2012. Adaptive simulation techniques for modeling material flow systems. In *2012 IEEE 10th Jubilee International Symposium on Intelligent Systems and Informatics*, 559–564. IEEE, September. <http://ieeexplore.ieee.org/document/6339480/>. Accessed March 4, 2019.
- BP. 2019. *Full report – BP Statistical Review of World Energy 2019*. <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2019-full-report.pdf>. Accessed November 3, 2019.
- Braungart, M., W. McDonough, and A. Bollinger. 2007. Cradle-to-cradle design: creating healthy emissions - a strategy for eco-effective product and system design. *Journal of Cleaner Production* 15(13–14): 1337–1348. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652606002587>. Accessed March 4, 2017.
- Bridgens, B., K. Hobson, D. Lilley, J. Lee, J.L. Scott, and G.T. Wilson. 2017. Closing the Loop on E-waste: A Multidisciplinary Perspective. *Journal of Industrial Ecology* 23(1): 169–181. <http://doi.wiley.com/10.1111/jiec.12645>. Accessed November 4, 2018.
- Bruton, T.M., R.D.W. Scott, J.P. Nagle, and M.C.M. Man. 1994. Re-Cycling of High Value, High Energy Content Components of Silicon PV Modules. In *European Photovoltaic Solar Energy Conference; 12th; 1994; Amsterdam*, 303–304. Bedford: H.S. Stephens & Associates. <https://www.tib.eu/en/search/id/BLCP%3ACN013780988/Re-Cycling-of-High-Value-High-Energy-Content-Components/>. Accessed January 16, 2019.
- Burghardt, D. and J. Harbach. 1993. *Engineering Thermodynamics*. Fourth edi. HarperCollins College.
- Campbell, C.J. 2012. Recognition of peak oil. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment* 1(1): 114–117. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/wene.7>. Accessed November 10, 2016.
- Castellanos, S., J.E. Santibañez-Aguilar, B.B. Shapiro, D.M. Powell, I.M. Peters, T. Buonassisi, D.M. Kammen, and A. Flores-Tlacuahuac. 2018. Sustainable silicon photovoltaics manufacturing in a global market: A techno-economic, tariff and transportation framework. *Applied Energy* 212: 704–719. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261917317622>. Accessed March 17, 2019.
- Charki, A., R. Laronde, and D. Bigaud. 2013. Accelerated degradation testing of a photovoltaic module. *Journal of Photonics for Energy* 3(1): 033099. <http://photonicsforenergy.spiedigitallibrary.org/article.aspx?doi=10.1117/1.JPE.3.033099>. Accessed March 12, 2018.
- Chen, C., J.J. Riley, and P.A. McMurtry. 1991. A study of Favre averaging in turbulent flows with chemical reaction. *Combustion and Flame* 87(3–4): 257–277.
- Chermak, J.M. and R.H. Patrick. 2001. A Microeconomic Test of the Theory of Exhaustible Resources. *Journal of Environmental Economics and Management* 42(1): 82–103. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0095069600911525>. Accessed January 27, 2019.

- Chertow, M.R. 2004. Industrial Symbiosis. In *Encyclopedia of Energy*, 407–415. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B012176480X00557X>. Accessed September 6, 2017.
- Choi, J.-K. and V. Fthenakis. 2010. Economic Feasibility of Recycling Photovoltaic Modules. *Journal of Industrial Ecology* 14(6): 947–964. <http://doi.wiley.com/10.1111/j.1530-9290.2010.00289.x>. Accessed February 12, 2018.
- Choi, J.K. and V. Fthenakis. 2014. Crystalline silicon photovoltaic recycling planning: Macro and micro perspectives. *Journal of Cleaner Production* 66: 443–449. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.11.022>.
- Chowdhury, M.S., K.S. Rahman, T. Chowdhury, N. Nuthammachot, K. Techato, M. Akhtaruzzaman, S.K. Tiong, K. Sopian, and N. Amin. 2020. An overview of solar photovoltaic panels' end-of-life material recycling. *Energy Strategy Reviews*. Elsevier Ltd, January 1.
- Contreras-Lisperguer, R., E. Muñoz-Cerón, J. Aguilera, and J. de la Casa. 2017. Cradle-to-cradle approach in the life cycle of silicon solar photovoltaic panels. *Journal of Cleaner Production* 168: 51–59. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652617319479>. Accessed August 30, 2017.
- Cradle to Cradle Products Innovation Institute. 2017. Homepage Cradle to Cradle Products Innovation Institute. [www.c2ccertified.org/](http://www.c2ccertified.org/). Accessed June 10, 2017.
- Craik, A.D.D. 2013. “Continuity and change”: representing mass conservation in fluid mechanics. *Archive for History of Exact Sciences* 67(1): 43–80. <http://link.springer.com/10.1007/s00407-012-0108-7>. Accessed March 11, 2019.
- D’Apice, C., R. Manzo, and B. Piccoli. 2010. Existence of solutions to Cauchy problems for a mixed continuum-discrete model for supply chains and networks. *Journal of Mathematical Analysis and Applications* 362(2): 374–386. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022247X0900626X?via%3Dihub>. Accessed March 5, 2019.
- Dias, P., S. Javimczik, M. Benevit, and H. Veit. 2017. Recycling WEEE: Polymer characterization and pyrolysis study for waste of crystalline silicon photovoltaic modules. *Waste Management* 60: 716–722. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X16305001?via%3Dihub>. Accessed January 15, 2019.
- Doi, T., I. Tsuda, H. Unagida, A. Murata, K. Sakuta, and K. Kurokawa. 2001. Experimental study on PV module recycling with organic solvent method. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 67(1–4): 397–403. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927024800003081>. Accessed January 15, 2019.
- Doni, A. and F. Dughiero. 2012. Electrothermal heating process applied to c-Si PV recycling. In *Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 757–762. IEEE, June. <http://ieeexplore.ieee.org/document/6317715/>. Accessed January 15, 2019.
- Durrant, D.R. 2010. *Numerical Methods for Fluid Dynamics*. Vol. 32. Texts in Applied Mathematics. New York, NY, USA: Springer New York. [link.springer.com/10.1007/978-1-4419-6412-0](http://link.springer.com/10.1007/978-1-4419-6412-0). Accessed September 9, 2017.
- Eckelman, M.J., M.R. Chertow, and M.J. Eckelman. 2009. Using material flow analysis to illuminate long-term waste management solutions in oahu, Hawaii. *Journal of Industrial Ecology* 13(5): 758–774. <http://doi.wiley.com/10.1111/j.1530-9290.2009.00159.x>. Accessed December 2, 2016.

- Ecoinvent. 2013. Differences between ecoinvent 2 & 3. <https://www.ecoinvent.org/support/faqs/differences-between-ecoinvent-2-and-3/ecoinvent-2-there-were-datasets-representing-ucte-production-mix-of-electricity-why-cant-i-find-these-datasets-in-ecoinvent-3-anymore.html>. Accessed September 19, 2018.
- Eitner, U., S. Nold, and M. Mittag. 2017. Fraunhofer PV Module Technologies – Concepts and Challenges. In *Future PV Forum Intersolar Munich*. [www.ise.fraunhofer.de](http://www.ise.fraunhofer.de). Accessed April 6, 2018.
- Erkman, S. and R. Ramaswamy. 2003. *Applied industrial ecology : a new platform for planning sustainable societies : focus on developing countries with case studies from India*. Bangalore: Aicra Publishers.
- European Commission. 2010. *International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance*. Publications Office of the European Union. Luxembourg. <http://eplca.jrc.ec.europa.eu/uploads/ILCD-Handbook-General-guide-for-LCA-DETAILED-GUIDANCE-12March2010-ISBN-fin-v1.0-EN.pdf>.
- Ferroni, F. and R.J. Hopkirk. 2016. Energy Return on Energy Invested (ERoEI) for photovoltaic solar systems in regions of moderate insolation. *Energy Policy* 94: 336–344. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421516301379>. Accessed March 4, 2019.
- Finkbeiner, M., E.M. Schau, A. Lehmann, and M. Traverso. 2010. Towards Life Cycle Sustainability Assessment. *Sustainability* 2(10): 3309–3322. [www.mdpi.com/2071-1050/2/10/3309/](http://www.mdpi.com/2071-1050/2/10/3309/). Accessed June 10, 2017.
- Fleischmann, M., J.M. Bloemhof-Ruwaard, R. Dekker, E. van der Laan, J.A.E.E. van Nunen, and L.N. Van Wassenhove. 1997. Quantitative models for reverse logistics: A review. *European Journal of Operational Research* 103(1): 1–17. [linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0377221797002300](http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0377221797002300). Accessed March 7, 2017.
- Forrester, J.W. 1987. Nonlinearity in high-order models of social systems. *European Journal of Operational Research* 30(2): 104–109. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0377221787900865>. Accessed March 24, 2019.
- Fraunhofer IBP. 2012. Life Cycle Assessment ( LCA ) screening of the Maltha recycling process for Si-PV modules. <http://www.pvcycle.org.uk/wp-content/uploads/Exec-Summary-LCA-Screening-of-a-Recycling-process-of-silicon-based-PV-modules-2012-07.pdf>.
- Fraunhofer ISE. 2019. *Photovoltaics Report 2019*. <https://www.ise.fraunhofer.de/en/publications/studies/photovoltaics-report.html>. Accessed November 3, 2019.
- FREL Project. 2018. FREL Project. [http://www.sasil-life.com/index.php?option=com\\_content&view=article&id=85&Itemid=83&lang=en.html](http://www.sasil-life.com/index.php?option=com_content&view=article&id=85&Itemid=83&lang=en.html). Accessed January 13, 2019.
- Fthenakis, V.M. and H.C. Kim. 2011. Photovoltaics: Life-cycle analyses. *Solar Energy* 85(8): 1609–1628. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X09002345>. Accessed September 29, 2018.
- Fthenakis, V.M. and P.D. Moskowitz. 1999. The Value and Feasibility of Proactive Recycling. In . AIP Conference Proceedings.
- Fu, Y., X. Liu, and Z. Yuan. 2015. Life-cycle assessment of multi-crystalline photovoltaic (PV) systems in China. *Journal of Cleaner Production* 86: 180–190. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652614007859>. Accessed

- January 13, 2019.
- Fuentes, M. and K. Foley. 2013. Ensemble Models. In *Encyclopedia of Environmetrics*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, January 15. <http://doi.wiley.com/10.1002/9780470057339.vnn066>. Accessed March 24, 2019.
- García-Serna, J., L. Pérez-Barrigón, and M.J. Cocero. 2007. New trends for design towards sustainability in chemical engineering: Green engineering. *Chemical Engineering Journal* 133(1): 7–30.
- García, V., E. Pongrácz, P.S. Phillips, and R.L. Keiski. 2013. From waste treatment to resource efficiency in the chemical industry: recovery of organic solvents from waters containing electrolytes by pervaporation. *Journal of Cleaner Production* 39: 146–153. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652612004428>. Accessed January 21, 2019.
- Geigrich, J. 2003. Modern Times and Imperfect Cycles. *Journal of Industrial Ecology* 7(3–4): 10–12. <http://doi.wiley.com/10.1162/108819803323059352>. Accessed January 1, 2017.
- Gerbinet, S., S. Belboom, and A. Léonard. 2014. Life Cycle Analysis (LCA) of photovoltaic panels: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 38: 747–753. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403211400495X>. Accessed January 13, 2019.
- Goe, M. and G. Gaustad. 2014. Strengthening the case for recycling photovoltaics: An energy payback analysis. *Applied Energy* 120: 41–48. [www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261914000555](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261914000555). Accessed November 20, 2017.
- Goedkoop, M., R. Heijungs, M. Huijbregts, A. De Schryver, J. Struijs, and R. Van Zelm. 2009. *ReCiPe 2008 First edition Report I: Characterisation*. [https://www.leidenuniv.nl/cml/ssp/publications/recipe\\_characterisation.pdf](https://www.leidenuniv.nl/cml/ssp/publications/recipe_characterisation.pdf). Accessed April 20, 2018.
- Göttlich, S., S. Hoher, P. Schindler, V. Schleper, and A. Verl. 2014. Modeling, simulation and validation of material flow on conveyor belts. *Applied Mathematical Modelling* 38(13): 3295–3313. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0307904X13007750>. Accessed March 5, 2019.
- Granata, G., F. Pagnanelli, E. Moscardini, T. Havlik, and L. Toro. 2014. Recycling of photovoltaic panels by physical operations. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 123(2014): 239–248. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2014.01.012>.
- Guggenheim, E.A. (Edward A. 1986. *Thermodynamics: an advanced treatment for chemists and physicists*. Amsterdam, The Netherlands: North-Holland. <https://catalog.hathitrust.org/Record/000359822>. Accessed September 7, 2017.
- Guide, V.D.R., T.P. Harrison, and L.N. Van Wassenhove. 2003. The Challenge of Closed-Loop Supply Chains. *Interfaces* 33(6): 2–6. [pubsonline.informs.org/doi/abs/10.1287/inte.33.6.3.25182](http://pubsonline.informs.org/doi/abs/10.1287/inte.33.6.3.25182). Accessed March 7, 2017.
- Gutowski, T.G. 2008. Thermodynamics and recycling, a review. In *2008 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment*, 1–5. IEEE, May. <http://ieeexplore.ieee.org/document/4562912/>. Accessed September 8, 2017.
- Hahladakis, J.N. and E. Iacovidou. 2018. Closing the loop on plastic packaging materials: What is quality and how does it affect their circularity? *Science of The Total Environment* 630: 1394–1400. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969718307307>. Accessed November 4, 2018.
- Hauschild, G. Mark, G. Jerome, H. Reinout, H. Mark, J. Olivier, M. Manuele, and D.S.

- An. 2011. *International reference life cycle data system (ILCD) handbook general guide for life cycle assessment: provisions and action steps*. Publications Office, October 5. <http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC61049>. Accessed September 18, 2018.
- Held, M. 2013. LCA screening of a recycling process for silicon based PV modules. *PV Cycle Conference*. [www.pvcycle.org/wp-content/uploads/Fraunhofer\\_3rd-RC\\_2013.pdf](http://www.pvcycle.org/wp-content/uploads/Fraunhofer_3rd-RC_2013.pdf).
- Herty, M., C. Jörres, and B. Piccoli. 2013. Existence of solution to supply chain models based on partial differential equation with discontinuous flux function. *Journal of Mathematical Analysis and Applications* 401(2): 510–517. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022247X12009766>. Accessed March 5, 2019.
- Hoher, S., P. Schindler, S. Göttlich, V. Schleper, and S. Röck. 2012. System Dynamic Models and Real-time Simulation of Complex Material Flow Systems. In *Enabling Manufacturing Competitiveness and Economic Sustainability*, 316–321. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. [http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-23860-4\\_52](http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-23860-4_52). Accessed March 5, 2019.
- Huang, W.-H., W.J. Shin, L. Wang, W.-C. Sun, and M. Tao. 2017. Strategy and technology to recycle wafer-silicon solar modules. *Solar Energy* 144: 22–31. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X17300105>. Accessed January 19, 2019.
- IEA. 2014. *Technology Roadmap Solar Photovoltaic Energy. Technology Roadmap Solar Photovoltaic Energy 2014 Edition, International Energy Agency*. [http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TechnologyRoadmapSolarPhotovoltaicEnergy\\_2014edition.pdf](http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TechnologyRoadmapSolarPhotovoltaicEnergy_2014edition.pdf).
- Ingham, J., J.E. Penosil, J.B. Snape, E. Heinzle, and I.J. Dunn. 2007. Process Dynamics Fundamentals. In *Chemical Engineering Dynamics*, 51–92. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH. <http://doi.wiley.com/10.1002/9783527614103.ch2>. Accessed March 24, 2019.
- IRENA. 2016a. *End-of-life management: Solar photovoltaic panels*. Abu Dhabi, UAE. [http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA\\_IEAPVPS\\_End-of-Life\\_Solar\\_PV\\_Panels\\_2016.pdf](http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_IEAPVPS_End-of-Life_Solar_PV_Panels_2016.pdf).
- IRENA. 2016b. *End-of-life management: Solar photovoltaic panels*. [http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA\\_IEAPVPS\\_End-of-Life\\_Solar\\_PV\\_Panels\\_2016.pdf](http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_IEAPVPS_End-of-Life_Solar_PV_Panels_2016.pdf).
- IRENA. 2019a. *Renewable energy auctions: Status and trends beyond price*.
- IRENA. 2019b. *Renewable Power Generation Costs in 2018*. [/Publications/2019/May/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2018](http://www.irena.org/publications/2019/May/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2018). <https://www.irena.org/publications/2019/May/Renewable-power-generation-costs-in-2018>. Accessed November 3, 2019.
- ISO 14040. 2006. ISO 14040:2006 - Environmental management -- Life cycle assessment -- Principles and framework. *ISO 14040*. <https://www.iso.org/standard/37456.html>. Accessed March 15, 2018.
- ISO 14044. 2006. ISO 14044:2006(en), Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines. <https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:14044:ed-1:v1:en>. Accessed March 15, 2018.
- Jahanbakhshi, S., M.R. Pishvaie, and R.B. Boozarjomehry. 2018. Impact of initial ensembles on posterior distribution of ensemble-based assimilation methods. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 171: 82–98. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920410518305977?via%3Di>

- b. Accessed March 24, 2019.
- Jahangirian, M., T. Eldabi, A. Naseer, L.K. Stergioulas, and T. Young. 2010. Simulation in manufacturing and business: A review. *European Journal of Operational Research* 203(1): 1–13. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221709004263>. Accessed January 27, 2019.
- Kalmykova, Y., M. Sadagopan, and L. Rosado. 2018. Circular economy – From review of theories and practices to development of implementation tools. *Resources, Conservation and Recycling* 135: 190–201. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344917303701>. Accessed November 4, 2018.
- Kang, S., S. Yoo, J. Lee, B. Boo, and H. Ryu. 2012. Experimental investigations for recycling of silicon and glass from waste photovoltaic modules. *Renewable Energy* 47: 152–159. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148112002716>. Accessed January 19, 2019.
- Kaza, S., L. Yao, P. Bhada-Tata, and F. Van Woerden. 2018. *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*. The World Bank, December 6.
- Kim, S. and B. Jeong. 2016. Closed-Loop Supply Chain Planning Model for a Photovoltaic System Manufacturer with Internal and External Recycling. *Sustainability* 8(7): 596. [www.mdpi.com/2071-1050/8/7/596](http://www.mdpi.com/2071-1050/8/7/596). Accessed February 25, 2017.
- Kim, Y. and J. Lee. 2012. Dissolution of ethylene vinyl acetate in crystalline silicon PV modules using ultrasonic irradiation and organic solvent. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 98: 317–322. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927024811006362>. Accessed January 16, 2019.
- Klee, R.J. and T.E. Graedel. 2004. Elemental Cycles: A Status Report on Human or Natural Dominance. *Annual Review of Environment and Resources* 29(1): 69–107. <http://www.annualreviews.org/doi/10.1146/annurev.energy.29.042203.104034>. Accessed March 4, 2017.
- Klug, F. 2014. Modelling and analysis of synchronised material flow with fluid dynamics. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications* 393: 404–417. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378437113008157>. Accessed January 10, 2018.
- Klugmann-Radziemska, E. and P. Ostrowski. 2010. Chemical treatment of crystalline silicon solar cells as a method of recovering pure silicon from photovoltaic modules. *Renewable Energy* 35(8): 1751–1759. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148109005199>. Accessed January 19, 2019.
- Krikke, H.R., C.P. Pappis, G.T. Tsoufas, and J.M. Bloemhof-Ruwaard. 2001. *Design Principles for Closed Loop Supply Chains*. ERIM Report Series Research in Management. Erasmus Research Institute of Management. [hdl.handle.net/1765/128](http://hdl.handle.net/1765/128). Accessed March 7, 2017.
- Latunussa, C., F. Ardente, G.A. Blengini, and L. Mancini. 2016a. Life Cycle Assessment of an innovative recycling process for crystalline silicon photovoltaic panels. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 156: 101–111. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927024816001227>. Accessed December 8, 2016.
- Latunussa, C., L. Mancini, G.A. Blengini, F. Ardente, and D. Pennington. 2016b. *Analysis*

- of Material Recovery from Silicon Photovoltaic Panels*. <https://ec.europa.eu/jrc/en/publication/analysis-material-recovery-silicon-photovoltaic-panels>. Accessed September 23, 2018.
- Lau, P.K. and A. Koenig. 2001. Management, disposal and recycling of waste industrial organic solvents in Hong Kong. *Chemosphere* 44(1): 9–15. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653500003787>. Accessed January 21, 2019.
- Lee, J.-S. and K. Komoto. 2017. *End-of-Life Management of Photovoltaic Panels : Trends in PV Module Recycling Technologies End-of-Life Management of Photovoltaic Panels : Trends in PV Module Recycling Technologies*.
- LeVeque, R.J. 1992. *Numerical Methods for Conservation Laws*. Basel, Switzerland: Birkhäuser Basel. [link.springer.com/10.1007/978-3-0348-8629-1](http://link.springer.com/10.1007/978-3-0348-8629-1). Accessed September 9, 2017.
- Lillo-Bravo, I., P. González-Martínez, M. Larrañeta, and J. Guasumba-Codena. Impact of Energy Losses Due to Failures on Photovoltaic Plant Energy Balance. [www.mdpi.com/journal/energies](http://www.mdpi.com/journal/energies). Accessed April 20, 2020.
- Lunardi, M., J. Alvarez-Gaitan, J. Bilbao, R. Corkish, M.M. Lunardi, J.P. Alvarez-Gaitan, J.I. Bilbao, and R. Corkish. 2018a. Comparative Life Cycle Assessment of End-of-Life Silicon Solar Photovoltaic Modules. *Applied Sciences* 8(8): 1396. <http://www.mdpi.com/2076-3417/8/8/1396>. Accessed January 13, 2019.
- Lunardi, M.M., J.P. Alvarez-Gaitan, J.I. Bilbao, and R. Corkish. 2018b. A Review of Recycling Processes for Photovoltaic Modules. In *Solar Panels and Photovoltaic Materials*. InTech, July 11.
- Malthus, T.R. 1798. An essay on the principle of population, as it affects the future improvement of society. *Contemporary Sociology* 2(3): 340.
- MBDC LLC. 2012. MBDC Cradle to Cradle Design. *Cradle to Cradle Certified Product Standard – Version 3.0*. [www.c2c-centre.com/sites/default/files/C2CCertifiedProductStandardV3\\_121112.pdf](http://www.c2c-centre.com/sites/default/files/C2CCertifiedProductStandardV3_121112.pdf). Accessed March 3, 2017.
- McDonough, W. and M. Braungart. 2000. A World of Abundance. *Interfaces* 30(3): 55–65. <http://pubsonline.informs.org/doi/10.1287/inte.30.3.55.11668>. Accessed December 22, 2016.
- McDonough, W. and M. Braungart. 2002. *Cradle to Cradle: Remaking the Way We Make Things*. New York City, NY, USA: Farrar, Straus and Giroux.
- Meyer, H. 1999. Many Happy Returns. *Journal of Business Strategy* 20(4): 27–31. [emeraldinsight.com/doi/abs/10.1108/eb040015](http://emeraldinsight.com/doi/abs/10.1108/eb040015). Accessed March 7, 2017.
- Müller, A., K. Wambach, and E. Alsema. 2006. Life Cycle Analysis of Solar Module Recycling Process. *Materials Research Society Symposia Proceedings* 895(February): 0895-G03-07. [http://journals.cambridge.org/abstract\\_S1946427400045000](http://journals.cambridge.org/abstract_S1946427400045000). Accessed February 24, 2017.
- Nadiga, B.T., W.R. Casper, and P.W. Jones. 2013. Ensemble-based global ocean data assimilation. *Ocean Modelling* 72: 210–230. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1463500313001649>. Accessed March 24, 2019.
- Nagatani, T. and D. Helbing. 2004. Stability analysis and stabilization strategies for linear supply chains. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications* 335(3–4): 644–660. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378437103011269?via%3Dihub>. Accessed March 5, 2019.
- Negahban, A. and J.S. Smith. 2014. Simulation for manufacturing system design and

- operation: Literature review and analysis. *Journal of Manufacturing Systems* 33(2): 241–261. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0278612513001301>. Accessed March 5, 2019.
- Niero, M. and M.Z. Hauschild. 2017. Closing the Loop for Packaging: Finding a Framework to Operationalize Circular Economy Strategies. *Procedia CIRP* 61: 685–690. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212827116313786>. Accessed November 4, 2018.
- NL Agency. 2011. *Position paper- Usability of Life Cycle Assessment for Cradle to Cradle purposes*. Ministry of Economic Affairs, Agriculture and Innovation, Netherlands. Utrecht, The Netherlands. [www.rvo.nl/sites/default/files/bijlagen/Position\\_paper\\_Usability\\_of\\_LCA\\_for\\_C2C\\_purposes-.pdf](http://www.rvo.nl/sites/default/files/bijlagen/Position_paper_Usability_of_LCA_for_C2C_purposes-.pdf). Accessed March 3, 2017.
- Nyemba, W.R. and C. Mbohwa. 2017. Modelling, Simulation and Optimization of the Materials Flow of a Multi-product Assembling Plant. *Procedia Manufacturing* 8: 59–66. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978917300112>. Accessed November 29, 2019.
- Ojovan, M.I. and W.E. Lee. 2014. Treatment of Radioactive Wastes. *An Introduction to Nuclear Waste Immobilisation*: 171–203. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780080993928000140>. Accessed January 21, 2019.
- Owusu, P.A. and S. Asumadu-Sarkodie. 2016. A review of renewable energy sources, sustainability issues and climate change mitigation. Ed. by Shashi Dubey. *Cogent Engineering* 3(1). <https://www.cogentoa.com/article/10.1080/23311916.2016.1167990>. Accessed December 8, 2019.
- Padoan, F.C.S.M., P. Altimari, and F. Pagnanelli. 2019. Recycling of end of life photovoltaic panels: A chemical prospective on process development. *Solar Energy* 177: 746–761. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0038092X18311794>. Accessed January 15, 2019.
- Pagnanelli, F., E. Moscardini, G. Granata, T. Abo Atia, P. Altimari, T. Havlik, and L. Toro. 2017. Physical and chemical treatment of end of life panels: An integrated automatic approach viable for different photovoltaic technologies. *Waste Management* 59: 422–431. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0956053X16306699>. Accessed January 19, 2019.
- Perez-Gallardo, J.R., C. Azzaro-Pantel, and S. Astier. 2018. A Multi-objective Framework for Assessment of Recycling Strategies for Photovoltaic Modules based on Life Cycle Assessment. *Waste and Biomass Valorization* 9(1): 147–159. <http://link.springer.com/10.1007/s12649-017-9878-0>. Accessed November 3, 2018.
- Pierrat, L. 2017. The Objectives of Reliability. In *Reliability of High-Power Mechatronic Systems 1*, 77–96. Elsevier.
- Potdar, A. 2009. Methodology to forecast product returns for the consumer electronics industry. Arlington, TX, USA: The University of Texas at Arlington. [uta-ir.tdl.org/uta-ir/bitstream/handle/10106/2001/Potdar\\_uta\\_2502D\\_10410.pdf?sequence=1](http://uta-ir.tdl.org/uta-ir/bitstream/handle/10106/2001/Potdar_uta_2502D_10410.pdf?sequence=1).
- Poudelet, V., J.-A. Chayer, M. Margni, R. Pellerin, and R. Samson. 2012. A process-based approach to operationalize life cycle assessment through the development of an eco-design decision-support system. *Journal of Cleaner Production* 33: 192–201. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652612001928>. Accessed April 20, 2018.
- PRé. 2014. The Normalisation Step in LCIA | PRé Sustainability. <https://www.pre->

- sustainability.com/news/the-normalisation-step-in-lcia. Accessed September 19, 2018.
- Pregelj, A., M. Begović, A. Rohatgi, and A. Ristow. 2001. Estimation of PV System Reliability Parameters. In . Georgia Institute of Technology. <https://smartech.gatech.edu/handle/1853/26161>. Accessed May 18, 2018.
- Proietti, S., F. Zepparelli, P. Sdringola, and S. Bini. 2012. Life Cycle Assessment of a ground-mounted 1778 kWp photovoltaic plant and comparison with traditional energy production systems. *Applied Energy* 97: 930–943. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030626191200061X>. Accessed January 13, 2019.
- Ramadan, S.Z. 2015. Estimating the Life-Distribution Parameters of Weibull-Life PV Systems Utilizing Non-Parametric Analysis. *World Academy of Science, Engineering and Technology* 9(6): 964–968. <https://zenodo.org/record/1106793#.XODnP6QpDIU>. Accessed April 19, 2019.
- ReCiPe normalization factors. 2010. ReCiPe Normalisation factors. <https://sites.google.com/site/lciarecipe/normalisation>. Accessed January 21, 2019.
- Reck, B.K. and T.E. Graedel. 2012. Challenges in metal recycling. *Science (New York, N.Y.)* 337(6095): 690–5. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22879508>. Accessed October 14, 2018.
- REN21. 2019. *Renewables 2019: Global Status Report*. [https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/gsr\\_2019\\_full\\_report\\_en.pdf](https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/gsr_2019_full_report_en.pdf). Accessed November 28, 2019.
- Resnick Institute Report. 2011. Critical Materials For Sustainable Energy Applications. [http://resnick.caltech.edu/docs/R\\_Critical.pdf](http://resnick.caltech.edu/docs/R_Critical.pdf). Accessed December 14, 2016.
- Ruffin, E., R. Schiestel, and F. Anselmet. 1997. Second Order Modelling of Variable Density Jets: Favre Averaged Closures Versus Reynolds Averaged Closures. In , 93–100. Springer, Dordrecht. [http://www.springerlink.com/index/10.1007/978-94-011-5474-1\\_12](http://www.springerlink.com/index/10.1007/978-94-011-5474-1_12). Accessed September 8, 2017.
- Saltelli, A. 1999. Sensitivity analysis: Could better methods be used? *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 104(D3): 3789–3793. <http://doi.wiley.com/10.1029/1998JD100042>. Accessed March 24, 2019.
- Saysel, A.K., Y. Barlas, and O. Yenigün. 2002. Environmental sustainability in an agricultural development project: a system dynamics approach. *Journal of Environmental Management* 64(3): 247–260. [www.business.unr.edu/faculty/ronlembke/reverse/book.html](http://www.business.unr.edu/faculty/ronlembke/reverse/book.html). Accessed March 5, 2017.
- Schott, J. 1993. Changing course: A global business perspective on development and the environment. Stephen Schmidheiny, Business Council for Sustainable Development Cambridge: MIT Press. *Business Strategy and the Environment* 2(1): 51–52. <http://doi.wiley.com/10.1002/bse.3280020108>. Accessed August 19, 2017.
- Seo, D.-J., Y. Liu, H. Moradkhani, and A. Weerts. 2014. Ensemble prediction and data assimilation for operational hydrology. *Journal of Hydrology* 519: 2661–2662. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169414009470>. Accessed March 24, 2019.
- Shin, J., J. Park, and N. Park. 2017. A method to recycle silicon wafer from end-of-life photovoltaic module and solar panels by using recycled silicon wafers. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 162: 1–6. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927024816305591>. Accessed January 19, 2019.
- Shirinivas, S.G., S. Vetrivel, and N.M. Elango. 2010. Applications of Graph Theory in

- Computer Science. *International Journal of Engineering Science and Technology* 2(9): 4610–4621.
- Sleeswijk, A.W., L.F.C.M. van Oers, J.B. Guinée, J. Struijs, and M.A.J. Huijbregts. 2008. Normalisation in product life cycle assessment: An LCA of the global and European economic systems in the year 2000. *Science of The Total Environment* 390(1): 227–240.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969707010522?via%3Dihub>. Accessed March 11, 2018.
- Smil, V. 2008. *Energy in Nature and Society, General Energetics of Complex Systems*. First Edit. Cambridge, MA, USA: MIT Press. [mitpress.mit.edu/books/energy-nature-and-society](http://mitpress.mit.edu/books/energy-nature-and-society). Accessed December 14, 2016.
- Spath, M., P.C. de Jong, I.J. Bennett, T.P. Visser, and J. Bakker. 2008. A novel module assembly line using back contact solar cells. In *2008 33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 1–6. IEEE, May. <http://ieeexplore.ieee.org/document/4922528/>. Accessed March 17, 2019.
- Srivastava, S.K. 2008. Network design for reverse logistics. *Omega* 36(4): 535–548.
- Stock, J.R. 1992. *Reverse logistics : white paper*. Oak Brook, IL, USA: Council of Logistics Management.
- Stolz, P. and R. Frischknecht. 2016. *Life Cycle Assessment of Photovoltaic Module Recycling*. Treeze Ltd. , Commissioned by Swiss Federal Office of Energy SFOE. [http://treeze.ch/fileadmin/user\\_upload/downloads/Publications/Case\\_Studies/Energy/174-LCA-Recycling-PV-Modules-v1.1.pdf](http://treeze.ch/fileadmin/user_upload/downloads/Publications/Case_Studies/Energy/174-LCA-Recycling-PV-Modules-v1.1.pdf). Accessed September 19, 2018.
- SunPower. 2016. SunPower’s Cradle to Cradle Certified™ Silver Solar Panels Earn Top Product of the Year Award from Environmental Leader - Jun 24, 2016. 2016. [newsroom.sunpower.com/2016-06-24-SunPowers-Cradle-to-Cradle-Certified-Silver-Solar-Panels-Earn-Top-Product-of-the-Year-Award-from-Environmental-Leader](http://newsroom.sunpower.com/2016-06-24-SunPowers-Cradle-to-Cradle-Certified-Silver-Solar-Panels-Earn-Top-Product-of-the-Year-Award-from-Environmental-Leader). Accessed June 13, 2017.
- SunPower. 2017. SunPower No. 1 for Sustainable Solar | SunPower Solar Blog. <https://us.sunpower.com/blog/2017/10/02/sunpower-earns-top-score-sustainability-scorecard/>. Accessed January 13, 2019.
- Tao, J. and S. Yu. 2015. Review on feasible recycling pathways and technologies of solar photovoltaic modules. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 141: 108–124. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092702481500210X>. Accessed January 13, 2019.
- The MathWorks Inc. 2013. MATLAB. Natick, Massachusetts, United States. [mathworks.com/products/matlab.html](http://mathworks.com/products/matlab.html).
- The ReCiPe Team. 2010. ReCiPe Normalisation. <https://sites.google.com/site/lciarecipe/normalisation>. Accessed May 4, 2018.
- The World Watch Institute, G.T. Gardner, T. Prugh, and L. Starke. 2008. *The State of the World Innovations for a Sustainable Economy: A Worldwatch Institute Report On Progress Toward a Sustainable Society*. 25th ed. New York City, NY, USA: W.W. Norton. [www.well.com/conf/inkwell.vue/topics/343/Bruce-Sterling-State-of-the-World-page01.html](http://www.well.com/conf/inkwell.vue/topics/343/Bruce-Sterling-State-of-the-World-page01.html).
- Tilton, J.E. 2001. *Depletion and the Long-run Availability of Mineral Commodities*. Washington, DC. <http://pubs.iied.org/G01035/?k=Depletion+of+Mineral+Commodities>. Accessed January 27, 2019.
- Tjøstheim, D. 2012. Modelling Nonlinear and Nonstationary Time Series. *Handbook of Statistics* 30: 67–97. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780444538581000041>.

- Accessed March 24, 2019.
- Toxopeus, M.E.E., B.L.A.L.A. de Koeijer, and A.G.G.H.G.G.H. Meij. 2015. Cradle to cradle: Effective vision vs. Efficient practice? In *Procedia CIRP*, 29:384–389. Elsevier, January 1. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827115001110>. Accessed August 19, 2017.
- Tsang, M.P., G.W. Sonnemann, and D.M. Bassani. 2016. Life-cycle assessment of cradle-to-grave opportunities and environmental impacts of organic photovoltaic solar panels compared to conventional technologies. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 156: 37–48. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2016.04.024>. Accessed January 13, 2019.
- United Nations. 2019. *World Population Prospects 2019 Highlights*. [https://population.un.org/wpp/Publications/Files/WPP2019\\_Highlights.pdf](https://population.un.org/wpp/Publications/Files/WPP2019_Highlights.pdf). Accessed November 3, 2019.
- Verfaillie, H.A. and R. Bidwell. 2000. *Measuring eco-efficiency: a guide to reporting company performance*. Conches, Geneva, Switzerland: World Business Council for Sustainable Development. [www.econbiz.de/Record/measuring-eco-efficiency-a-guide-to-reporting-company-performance-verfaillie-hendrik/10001626580](http://www.econbiz.de/Record/measuring-eco-efficiency-a-guide-to-reporting-company-performance-verfaillie-hendrik/10001626580). Accessed March 4, 2017.
- Wambach, K. 2017. *Life Cycle Inventory of Current Photovoltaic Module Recycling Processes in Europe*. <http://www.iea-pvps.org/index.php?id=460>. Accessed September 19, 2018.
- Weibull-based reliability toolkit for R. 2013. Weibull-based reliability toolkit for R. [sourceforge.net/p/weibulltoolkit/wiki/Home/](https://sourceforge.net/p/weibulltoolkit/wiki/Home/). Accessed September 9, 2017.
- Xu, J., Z. Meng, L. Yao, and X. Jing. 2014. The simulation and optimization of the polysilicon production process using system dynamics: A case study in China. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* 15(12): 2521–2532. <http://link.springer.com/10.1007/s12541-014-0623-3>. Accessed March 4, 2019.
- Xu, Y., J. Li, Q. Tan, A.L. Peters, and C. Yang. 2018. Global status of recycling waste solar panels: A review. *Waste Management* 75: 450–458. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0956053X18300576>. Accessed January 19, 2019.
- Zhong, Z.W., B. Song, and P.E. Loh. 2011. LCAs of a polycrystalline photovoltaic module and a wind turbine. *Renewable Energy* 36(8): 2227–2237. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2011.01.021>.

# PARTE II

## PUBLICACIONES/PUBLICATIONS

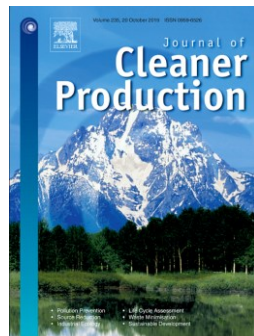
En la Parte II, y última, se presentan las contribuciones que han realizado en forma de publicaciones en revistas durante el desarrollo de la presente Tesis Doctoral. Esta contribución se presenta en las siguientes categorías:

PUBLICACIONES EN REVISTAS RECOGIDAS EN LISTADOS POR ÁMBITOS CIENTÍFICOS EN EL "SUBJECT CATEGORY LISTING" DEL "JOURNAL CITATION REPORTS (SCIENCE CITATION INDEX)" DEL "WEB OF KNOWLEDGE (WOK)".

[I] RUBÉN CONTRERAS-LISPERGUER, EMILIO MUÑOZ-CERÓN, JORGE AGUILERA, JUAN DE LA CASA

CRADLE-TO-CRADLE APPROACH IN THE LIFE CYCLE OF SILICON SOLAR PHOTOVOLTAIC PANELS

JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION, VOLUME 168, 2017, PAGES 51-59, ISSN 0959-6526, [HTTPS://DOI.ORG/10.1016/J.JCLEPRO.2017.08.206](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.206)



**Estado / Status:** Publicado / Published.

**Índice de Impacto / Impact Factor (Clarivate analytics 2018):** 6.395

**Categoría / Subject Category:** Environmental Science. **Ranking:** 7 / 192 (Q1).

**Categoría / Subject Category:** Engineering. **Ranking:** 11 / 323 (Q1).

**Categoría / Subject Category:** Energy. **Ranking:** 13 / 153 (Q1).

**Categoría / Subject Category:** Business, Management and Accounting. **Ranking:** 14 / 397 (Q1).

Además, a la fecha de entrega de esta Tesis Doctoral, dos artículos se encuentran en proceso de revisión.

a. Computers & Industrial Engineering



A SET OF PRINCIPLES FOR APPLYING CIRCULAR ECONOMY TO THE PV INDUSTRY: MODELING A CLOSED-LOOP MATERIAL-CYCLE SYSTEM FOR CRYSTALLINE PHOTOVOLTAIC PANELS BASED ON THE CRADLE-TO-CRADLE PHILOSOPHY

*RUBÉN CONTRERAS-LISPERGUER, EMILIO MUÑOZ-CERÓN, JORGE AGUILERA AND JUAN DE LA CASA*

b. Journal of Waste Management



ENVIRONMENTAL IMPACT ASSESSMENT OF CRYSTALLINE SOLAR PHOTOVOLTAIC PANELS' END-OF-LIFE PHASE: OPEN AND CLOSED-LOOP MATERIAL FLOW SCENARIOS

*RUBÉN CONTRERAS-LISPERGUER, EMILIO MUÑOZ-CERÓN, JUAN DE LA CASA, AND RICARDO DÍAZ MARTIN*