

2019

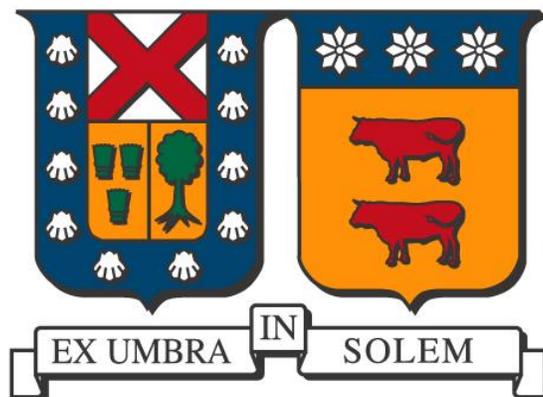
APLICACIÓN DE METODOLOGÍA PARA INDICADORES DE CIRCULARIDAD EN FASE DE CONSTRUCCIÓN DE PLANTAS GENERADORAS DE ENERGÍA ELÉCTRICA

MEZA LARA, ALEJANDRO IGNACIO

<https://hdl.handle.net/11673/46963>

Repositorio Digital USM, UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AMBIENTAL
VALPARAÍSO – CHILE



**APLICACIÓN DE METODOLOGÍA PARA INDICADORES DE
CIRCULARIDAD EN FASE DE CONSTRUCCIÓN DE PLANTAS
GENERADORAS DE ENERGÍA ELECTRICA**

ALEJANDRO IGNACIO MEZA LARA

**MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL AMBIENTAL**

Profesora Guía:

Dra. Aldonza Jaques

Profesores Co-Referentes

Dr. Leonardo Guerra

Msc. Rodrigo Garrido

07 de junio de 2019

Agradecimientos

Termina un ciclo mas dentro de mi vida y no hubiera sido posible con tanta satisfacción de no ser por todas las personas que me han acompañado durante este viaje de crecimiento y desarrollo. Comenzando por mi familia, Luis, Michael, María, Eduardo, Matías por su apoyo constante en los momentos difíciles y por celebrar conmigo en los pequeños y grandes triunfos y por supuesto Jacqueline, sin tus enseñanzas y guías en mis primeros años de formación yo no estaría aquí, estoy seguro de que estarás muy orgullosa de lo que he alcanzado y no puedo mas que seguir honrando tu nombre y conocimientos.

También agradecer a mis amigos y compañeros, que si los comienzo a nombrar tendría mas páginas de agradecimientos que de trabajo. Están todos en mi corazón, gracias por acompañarme, sufrir conmigo, celebrar conmigo, gracias por las palabras de apoyo, por los retos, por las fiestas y los llantos, gracias por ser parte de este viaje.

Gracias a mis profesores y guías, por sus conocimientos y apoyo durante la realización de este trabajo. Sin sus palabras de apoyo no habría podido terminar este trabajo.

Tamara, gracias por acompañarme en la ultima parte de este viaje, gracias por enseñarme a amar otra vez, por confiar en mi y darme la fuerza para seguir adelante.

Resumen

La economía circular es un concepto que está en desarrollo, que en los últimos años ha visto incrementado el interés de practicantes y académicos por su eficacia al momento de sistematizar el acercamiento al desarrollo sustentable, esto le ha permitido avanzar en la resolución de sus problemas de conceptualización y con ello un avance en la generación de métricas que otorguen la visión del cumplimiento de objetivos circulares. En este trabajo se comienza con una exposición de definiciones de economía circular para poder definir los principios que acogerán la métrica a aplicar sobre las plantas de generación de energía de Enel de forma que sea aplicable a su plataforma MIMA.

La metodología de revisión consistió en una búsqueda de conceptos relacionados a la circularidad en páginas de revistas científicas, de las cuales se encontraron artículos de reseña que sirvieron como base para definir la circularidad y aplicarla a las plantas de generación. Se analizaron los principios en los que se funda, destacando su sistematicidad y el enfoque en el diseño restaurativo y regenerativo. El principio de las 3R's sirve como base para comenzar a establecer la circularidad, lo que permite hacer un enfoque en los flujos de material de los procesos. Además, se presenta una serie de parámetros centrados a objetivos de eco-innovación clasificados en los ciclos técnicos y biológicos junto a una clasificación de los tipos de indicadores de circularidad que existen actualmente.

Se analizó la pertinencia de los análisis de ciclo de vida (ACV) como fuente de información para el indicador concluyendo que si bien tienen un enfoque “de la cuna a la tumba” son la visión más detallada de los flujos de material, enfocado en los análisis del sector de construcción. Estos han tenido avances innovando el mismo análisis de ciclo de vida, integrando nuevos materiales y metodologías que han permitido optimizar los procesos de construcción y disminuir los impactos ambientales de los edificios.

La metodología seleccionada se basa en los análisis de flujo de material y entrega un resultado de 0.39 y 0.4 (de 0 a 1) de circularidad para dos casos de estudios, una planta de generación eólica y una planta solar respectivamente. El modelo está limitado por la información del ACV y solo representa la cantidad de materiales que son tienen comportamiento circular en el sistema sin incluir los impactos de cada uno y para complementar al indicador se presenta un análisis de correlación entre huellas de carbono, hídricas y sus flujos de material. Al respecto se concluye que la circularidad es aplicable cuando se disminuyen estos impactos y se entregó un ejemplo de esta aplicación que disminuye hasta en un 13% la emisión de carbono de la construcción de la planta eólica junto con un esquema que permite de forma general realizar este tipo de análisis.

Finalmente se recomienda seguir investigando sobre la circularidad, pues esta aproximación entrega las brechas de información que tiene como reto la empresa a superar para obtener una circularidad acorde a los objetivos de desarrollo sustentable.

Abstract

The circular economy is a concept that is in development, which in recent years has seen an increase in the interest of practitioners and academics for its effectiveness in systematizing the approach to sustainable development, this has allowed it to advance in the resolution of its problems of conceptualization and with it an advance in the generation of metrics that grant the vision of the fulfillment of circular objectives. This paper begins with an exposition of circular economy definitions in order to define the principles that will receive the metrics to be applied to Enel power generation plants in a way that is applicable to its MIMA platform.

The revision methodology consisted in a search for concepts related to circularity in pages of scientific journals, of which review articles were found that served as a basis to define the circularity and apply it to the generation plants. The principles on which it is based were analyzed, highlighting its systematicity and the focus on restorative and regenerative design. The principle of the 3R's serves as a basis to begin to establish the circularity, which allows us to focus on the material flows of the processes. In addition, a series of parameters focused on eco-innovation objectives classified in the technical and biological cycles are presented together with a classification of the types of circularity indicators that currently exist.

The relevance of life cycle analysis (LCA) as a source of information for the indicator was analyzed, concluding that although they have a "cradle to grave" approach, they are the most detailed view of material flows, focused on the analysis of the construction sector. These have had advances innovating the same analysis of life cycle, integrating new materials and methodologies that have allowed to optimize the construction processes and reduce the environmental impacts of buildings.

The selected methodology is based on the material flow analysis and delivers a result of 0.39 and 0.4 (from 0 to 1) of circularity for two case studies, a wind generation plant and a solar plant respectively. The model is limited by the information of the LCA and only represents the number of materials that are circular in the system without including the impacts of each and to complement the indicator, a correlation analysis is presented between carbon footprints, water and its flows of material. In this regard, it is concluded that the circularity is applicable when these impacts are diminished and an example of this application was delivered, which reduces the emission of carbon from the construction of the wind power plant by 13%, together with a scheme that allows a general this type of analysis.

Finally, it is recommended to continue researching the circularity, because this approach delivers the information gaps that the company has to challenge to overcome in order to obtain a circularity consistent with the objectives of sustainable development.

Glosario

Hora	h
Hora Máquina	HM
Kilogramo	Kg
Kilómetro	Km
Litro	L
Megawatt	MW
Metro	m
Metro cúbico	m ³
Tonelada	ton
Tonelada * Kilómetro	tKm
Persona*Kilómetro	Pkm
Unidad	Ud
Watt	W
Dióxido de carbono equivalente	CO ₂ eq
Tonelada equivalente de petróleo	Ton oil eq
Material particulado 10um equivalente	PM ₁₀ eq
Clorofluorocarbono 11 equivalente	CFC-11 eq
ACV/LCA	Análisis de Ciclo de Vida
EC/CE	Economía Circular

Índice

Resumen	3
Abstract.....	4
Glosario	5
Índice	6
Índice de Tablas	8
Índice de Figuras.....	9
Índice de Gráficos	9
1. Introducción y Objetivos	10
1.1. Introducción	10
1.2. Enel	11
1.2.1. Modelo Integrado de Mediciones Ambientales - MIMA	13
1.3. Objetivos.....	14
1.3.1. Objetivo General:	14
1.3.2. Objetivos Específicos:.....	14
2. Materiales y Método	15
2.1. MIMA e información disponible de Enel.....	15
2.1.1. Datos disponibles.....	19
2.2. Revisión Bibliográfica	22
2.3. Resultados y Selección del Indicador	23
2.4. Otros Cálculos	23
2.5. Análisis de Resultados	24

3.	Resultados.....	25
3.1.	Resultados del Análisis bibliográfico.....	25
3.1.1.	Conceptos Asociados a la Economía Circular	26
3.1.2.	Definiendo la Economía Circular	30
3.1.3.	Los principios de la Economía Circular	35
3.1.4.	Sistematizando la EC.....	37
3.1.5.	Industria de la construcción, análisis de ciclo de vida y su relación con la circularidad.	39
3.2.	Métricas en Circularidad	41
3.2.1.	Tipologías de los indicadores de circularidad.....	42
3.3.	Sumario	50
3.4.	Metodología.....	52
3.5.	Caso de Estudio	55
3.5.1.	Limitaciones del modelo.....	59
3.5.2.	Análisis de impactos ambientales dentro de la circularidad	60
4.	Conclusiones	65
5.	Referencias	67
6.	Anexos.....	69
	Anexo A: Datos que Ingresaron al Modelo y Huellas Ambientales.	69

Índice de Tablas

Tabla 1 Flujos de material -Proceso de Transporte - Fase de construcción Planta Eólica y Solar	19
Tabla 2 Flujos de marerial - Proceso de Recepción de Equipos - Fase de Construcción Planta Eólica y Solar	19
Tabla 3 Fase de Construcción Planta Eólica y Solar - Flujos de material - Proceso de Movimiento de Tierras	20
Tabla 4 Fase de Construcción Planta Eólica y Solar - Flujos de material - Proceso de Cimentación y Fundación	20
Tabla 5 Fase de Construcción Planta Eólica y Solar - Flujos de material - Proceso de Montaje	21
Tabla 6 Fase de Construcción Planta Eólica y Solar - Flujos de material - Proceso de Uso de Instalaciones de Faena.....	21
Tabla 7 Fase de Construcción Planta Eólica y Solar - Flujos de material - Proceso de Mantenimiento de Faena	21
Tabla 8 Fase de Construcción Planta Eólica y Solar - Flujos de material - Proceso de Gestión de Residuos.....	22
Tabla 9 Publicaciones revisadas para la elaboración de la memoria	25
Tabla 10 Principios guía de la EC en una organización	36
Tabla 11 Tipologías de Indicadores de Circularidad.....	43
Tabla 12 Evaluación de algunos indicadores de circularidad. Adaptado desde (Linder, Sarasini, & Van Loon, 2017).....	46
Tabla 13 Peso de generadores de energía.....	55
Tabla 14 Resultados del Indicador, variables en ton/MW y coeficientes sin unidad.....	58
Tabla 15 Análisis de correlaciones de planta solar.....	61
Tabla 16 Análisis de correlaciones de planta eólica.....	62
Tabla 17 Flujos máxicos de las dos plantas	69

Tabla 18 Flujos Másicos y Porcentuales de planta solar	71
Tabla 19 Flujos Másicos y Porcentuales de planta eólica.....	73

Índice de Figuras

Figura 1 Características del grupo Enel.....	11
Figura 2 Características de Enel en Chile.....	12
Figura 3 Límites del Sistema para Planta Eólica.	18
Figura 4 Límites del Sistema para Planta Solar.....	18
Figura 5 Publicaciones revisadas sobre economía circular por año de publicación.	26
Figura 6 Esquema de la economía circular.....	39
Figura 7 Diagrama de flujo del modelo.	54
Figura 8 Mapa de decisiones para aplicación de circularidad en fase de construcción.	64

Índice de Gráficos

Gráfico 1 Distribución de materiales en fase de construcción de planta eólica.	56
Gráfico 2 Distribución de materiales en fase de construcción de planta solar.....	57
Gráfico 3 Comparación de utilización de material por tipo de planta.	57
Gráfico 4 Huella de carbono, hídrica y flujo de material para cada material en la planta solar.	60
Gráfico 5 Huella de carbono, hídrica y flujo de material para cada material en la planta eólica.	61

1. Introducción y Objetivos

1.1. Introducción

La Economía Circular (EC) es un término que se ha masificado en los últimos años, se ha escuchado desde pequeñas innovaciones por particulares, pasando por una oficialización del tema a nivel país con la creación de la oficina de economía circular del ministerio de medio ambiente y también a través de proyectos CORFO (MMA, 2018). A nivel internacional incluso siendo parte importante para completar los objetivos de desarrollo sustentable en Europa y política nacional para productores en China. Incluso a nivel académico, el número de artículos relacionados con la materia no hace más que incrementar con el pasar de los años (Kirchherr, Reike, & Hekkert, 2017). Sin duda es un término de actualidad y si bien aún está en desarrollo, ha dado resultados positivos en el desempeño ambiental y económico de quienes usan el modelo (Ghisellini, Cialani, & Ulgiati, 2014).

Sus principales dificultades teóricas se enfocan en que no existe un consenso generalizado de la definición y principios en los que se funda la EC, para ello variados autores han intentado resolver el problema por medio de revisiones bibliográficas y propuestas consensuadas basadas en la teoría y en las prácticas de algunas organizaciones (Kirchherr, Reike, & Hekkert, 2017). A la vez, al no estar bien definidos los principios se dificulta establecer una métrica que permita medir el nivel de circularidad de alguna actividad, proceso o producto (Howard, Hopkinson, & Miemczyk, 2018).

La importancia de establecer una métrica de circularidad radica en que permite identificar el estado actual y los avances de la transición del modelo lineal al circular.

Este trabajo de título nace por iniciativa de Enel Chile (Enel desde ahora) para establecer un indicador de circularidad en la fase de construcción en sus plantas de generación de energía.

Para cumplir esta solicitud se pretende acoger una de las definiciones de economía circular, conocer sus principios, identificar semejanzas con el desempeño ambiental de la empresa basándose en los análisis de ciclo de vida de las fases de construcción de las plantas, de esta forma aplicar un indicador que se adecúe a este contexto.

Cabe señalar que la información ambiental de las plantas de Enel es gestionada por medio del Modelo Integrado de Mediciones Ambientales (MIMA), por lo que la aplicación del indicador debe ser de acuerdo al formato de esta herramienta.

Por todo lo anterior el trabajo se ha desarrollado principalmente en cuatro partes, la primera “Materiales y Método” describe los procedimientos de la investigación bibliográfica, el análisis

y selección de la metodología de indicador, la aplicación de ésta a un caso de estudio en plantas Enel y el origen de los datos a utilizar. La segunda parte corresponde a la exposición de los resultados según su procedimiento correspondiente, esto es, las definiciones de economía circular más relevantes y la selección de la cual se usará para el desarrollo del indicador, los principios que se acogen con la definición, la relación con el contexto de Enel, además, el estado del arte de los indicadores de circularidad y la selección del indicador a utilizar. Se acompaña esta sección con los resultados del caso práctico de aplicación del indicador. Para la tercera parte se realiza un análisis de los resultados donde se discuten los valores obtenidos, se describen las limitaciones del modelo y se plantean mejoras para el indicador. Finalmente, el trabajo termina con las conclusiones respectivas que resumen los resultados y cumplimiento de los objetivos además de las recomendaciones y oportunidades de mejora del modelo.

1.2. Enel

Enel es una empresa multinacional de energía de origen italiano, que realiza operaciones de generación energética en 35 países de los 5 continentes, con más de 89 GW de capacidad gestionada y con casi 73 millones de consumidores finales en todo el mundo. Posee un parque de generación diversificado entre las que se incluyen centrales hidroeléctricas, termoeléctricas, geotérmicas, eólicas, fotovoltaicas y otras fuentes renovables, de forma que casi la mitad de la energía producida por Enel no provoca emisiones de dióxido de carbono.

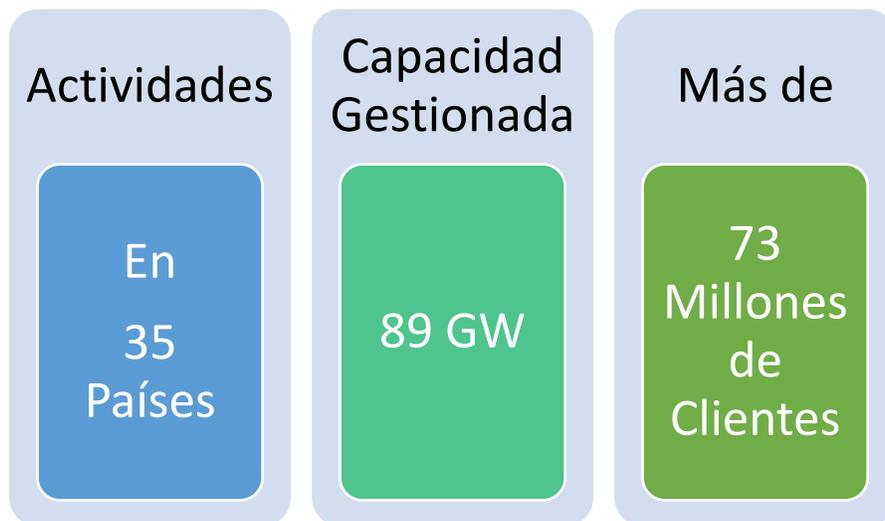


Figura 1 Características del grupo Enel

Fuente: Elaborado desde (Enel, s.f.)

En Chile se estableció desde el 2015 a partir de la reestructuración societaria de la empresa que controlaba los negocios de generación, transmisión y distribución Enersis S.A, que también controlaba en Argentina, Brasil, Colombia y Perú. Este proceso comenzó con la división de Enersis S.A. creando Enersis Chile como agente de control del grupo en Chile y Enersis Américas S.A como el que controla el resto de los países de la región. En Chile también ocurrió la división en las filiales Endesa Chile y Chilectra S.A. De esta forma en 2016 los accionistas deciden cambiar los nombres de Enersis Chile, Endesa Chile y Chilectra por Enel Chile, Enel Generación Chile y Enel Distribución Chile.

Enel Generación Chile posee una capacidad instalada en el país de más de 6.351 MW con 103 unidades generadoras en el Sistema Interconectado Central (SIC) y 8 unidades en el Sistema Interconectado del Norte Grande (SING). En particular Enel Green Power (EGP) filial encargada de las plantas de energía renovable opera 36 plantas con una capacidad instalada combinada de más de 4.730 MW, equivalentes al 45% de la capacidad renovable de Chile, de las cuales 642 MW provienen de energía eólica por medio de 9 parques eólicos, 492 MW de energía solar por 8 plantas fotovoltaicas y 3.548 MW por 18 centrales hidroeléctricas. También posee en conjunto con ENAP la planta geotérmica Cerro Pabellón de 48 MW.

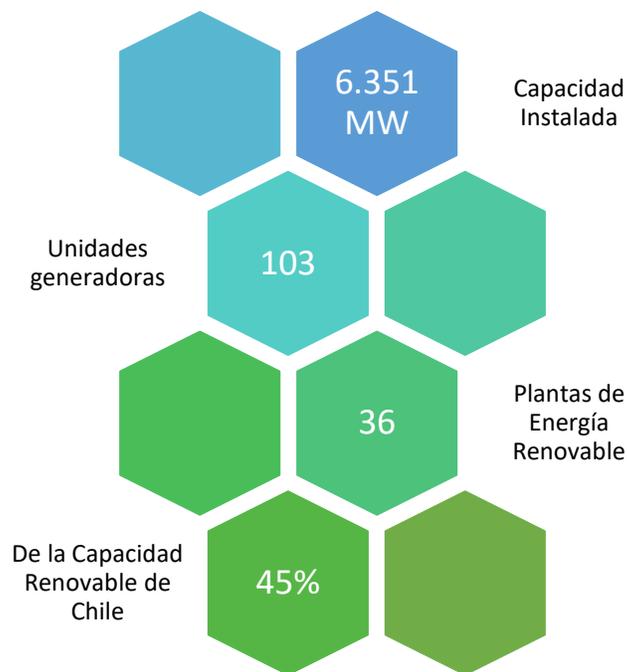


Figura 2 Características de Enel en Chile

Fuente: Elaborado desde (Enel, s.f.)

En la cadena de valor de EGP se distinguen tres fases claramente diferenciadas: *Development & Business* (BD, por sus siglas en inglés); *Engineering & Construction* (E&C) y *Operation & Maintenance* (O&M). Durante la fase de BD se realizan todas las actividades que permitan el desarrollo de un proyecto técnicamente factible y económicamente viable, a fin de ser presentado al Comité de Inversión para poder materializarlo (evaluación de recurso, gestión de permisos, contrato de venta de energía, entre otros). Durante la fase de E&C se realizan las actividades de ajuste de diseño y construcción del proyecto (por un tercero), desde su aprobación en el Comité de Inversión hasta su puesta en servicio. Finalmente, durante la fase de O&M se realizan las actividades necesarias para mantener los niveles de generación de energía de acuerdo a lo previsto, a lo largo de toda la vida útil. En base a la experiencia de EGP, la fase de E&C es la que genera mayores impactos ambientales en comparación a las otras fases.

EGP busca incorporar la sostenibilidad como parte de su modelo de negocio, estableciendo una política de sostenibilidad que abarque todas las fases de su cadena de valor. Es por esto que Enel ha asumido un fuerte compromiso con los objetivos de desarrollo sostenible de la Organización de Naciones Unidas (ONU). Cabe destacar el compromiso específico relativo a la lucha contra el cambio climático, ante lo cual Enel anunció que para el año 2050 será una compañía generadora de energía eléctrica sin emisiones de dióxido de carbono.

1.2.1. Modelo Integrado de Mediciones Ambientales - MIMA

Enel Chile posee un Modelo integrado de Mediciones Ambientales o MIMA, que permite la optimización de la información ambiental de la empresa. El modelo fue creado a partir del desarrollo de los Análisis de Ciclo de Vida (ACV) de las plantas de generación. Al modelo además de la información y registros que posee la empresa se le agregaron información requerida para la realización de ACV y algoritmos de estimación de impactos ambientales. Además, MIMA permite separar los impactos ambientales de un proyecto entre la infraestructura de generación y la infraestructura de transmisión, lo que permite la comparabilidad de los distintos proyectos sin perder información.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General:

- Establecer una metodología que permita la aplicación de indicadores de circularidad en la fase de construcción de plantas de generación de energía basándose en el análisis de ciclo de vida que gestiona el Modelo Integrado de Mediciones Ambientales.

1.3.2. Objetivos Específicos:

- Estudiar el estado del arte de metodologías de evaluación de circularidad para productos y procesos.
- Definir metodología o modificaciones a las ya existentes que permitan aplicación en empresas generadoras de energía, en especial las plantas que pertenecen a Enel Chile.
- Realizar comparación entre las variables de la metodología definida y los KPI que posee Enel.
- Aplicar la metodología a procesos de la empresa y reportar limitaciones de los resultados.

2. Materiales y Método

Para poder asignar un indicador que represente el estado de circularidad de las fases de construcción de plantas de generación de Enel es necesario comprender de que se trata la economía circular, cuáles son los principios que la definen, cuáles son los métodos de medición de la circularidad, dónde se aplican y cuáles son sus limitaciones. Es por eso que se debe realizar una investigación bibliográfica para conocer el estado del arte de la economía circular, poder tomar una definición en cual basarse, conocer los tipos de indicadores de circularidad existentes y discernir adecuadamente un indicador que se adapte a la información que posee Enel, que permita visualizar el estado de la circularidad de las fases de construcción de plantas de generación de energía y que a la vez permita identificar los aspectos mejorables tanto en el manejo de la información que se relaciona con la circularidad como los mismos procesos productivos de la empresa, en este caso el de la construcción de plantas.

Luego, para comprobar la validez del indicador es necesario aplicarlo sobre casos prácticos, para lo cual se cuenta con información de las fases de construcción de dos plantas de generación de energía pertenecientes a Enel. Los resultados de la aplicación del indicador serán analizados objetivamente para identificar las limitaciones y oportunidades de mejora del modelo.

A continuación, se especifican las metodologías y datos de cada uno de los pasos anteriormente descritos.

2.1. MIMA e información disponible de Enel

Enel controla su información ambiental por medio del Modelo Integrado de Mediciones Ambientales (MIMA), plataforma creada para gestionar de forma óptima la información ambiental de Enel en Chile. MIMA cuenta con la capacidad de poder segregar la información dependiendo del proyecto del que se quiera conocer los detalles y presenta la información en 5 módulos:

- Compromisos Ambientales: Realiza un seguimiento del estado de cumplimiento de compromisos del proyecto.
- Permisos Ambientales: Realiza un seguimiento del estado de cumplimiento de permisos del proyecto.
- Impactos Ambientales: Estima los impactos mediante un Análisis de Ciclo de Vida (ACV) del proyecto.

- Reportes: Reporta elementos de interés semanal y mensualmente.
- Registros: Cuenta con los registros ambientales de Enel.

Los ACV que se desarrollan en MIMA siguen las normativas internacionales ISO 14.040 Gestión Ambiental: Análisis de Ciclo de Vida. Principios y marco de referencia, e ISO 14.044 Gestión Ambiental: Análisis de Ciclo de Vida, Requisitos y directrices, ambas en sus últimas versiones de 2006. Esto genera una estandarización de la información entre las plantas de Enel que también es extensible a comparación con otros ACV de plantas de generación que utilicen el sistema ISO de referencia.

Estos ACV están estandarizados para poder comparar los resultados de los impactos entre los distintos proyectos de plantas de generación, esto dado que su unidad funcional se define como 1 MW de potencia instalada. Además, se enfocan en la fase de construcción de las plantas dada la justificación de que la mayor cantidad de impactos de las edificaciones se generar en esta fase. Por esto, para poder definir los flujos de energía y materia dentro de los sistemas de construcción, primero definen los límites del sistema desde el transporte de los insumos y personal hasta los transportes de los residuos de salida de todo el proceso de construcción. Dentro de estos límites se mantiene un esquema estandarizado basado en las actividades de la fase de construcción de las plantas, las cuales son:

- Transporte de Materiales y Residuos:

Actividades asociadas al transporte de materias primas, equipos, insumos, residuos y personal, durante la fase de construcción, cabe mencionar que se considerarán las escalas realizadas.

- Recepción de Equipos de Generación Eléctrica:

Abastecimiento de la central, de equipos y materias primas (aerogeneradores, cimientos, entre otros). Se consideran sólo aquellos elementos que no tienen una gestión ambiental en los procesos posteriores, por lo tanto, recoge las huellas e impactos ambientales de los requerimientos inherentes del proyecto

- Movimiento de Tierras:

Acondicionamiento del terreno para la posterior instalación de infraestructura. Incluye las operaciones de excavación de zanjas y compactación.

- Cimentación y Fundación:

Edificación de los elementos estructurales de las edificaciones, es decir las bases para el montaje, por lo tanto, incluye el encofrado, hormigonado, fraguado y relleno estructural de las excavaciones realizadas en el proceso anterior.

- Montaje de Equipos:

Instalación de la infraestructura. Considera el ensamblaje de los equipos y estructuras sobre sus respectivas fundaciones, la instalación del sistema eléctrico asociado a cada equipo y las pruebas de infraestructura.

- Uso de instalaciones Temporales o de Faena:

Actividades relacionadas con las necesidades del personal. Considera el uso de comedores, oficinas, servicios higiénicos u otras instalaciones habitables y el consumo de agua potable.

- Mantenición de instalaciones temporales o de Faena:

Actividades de mantenimiento de maquinarias y equipos, como revisiones de rutina, lubricación, engrase y ajustes.

- Manejo de residuos generados:

Manejo de los residuos generados durante la construcción. Considera la recepción de los residuos generados por los procesos anteriormente descritos, su segregación, y alternativa de manejo, de acuerdo a si son reutilizados en la faena (previo tratamiento de ser necesario) o destinados a un tercero fuera de la faena, el cual podrá realizar reutilización, reciclaje o disposición de manera permanente en un lugar autorizado

La interacción de estas actividades se muestra en la Figura 3 y en la Figura 4 para una planta de generación eólica y solar respectivamente.

Estos ACV también se caracterizan por evaluar 5 categorías de impacto, correspondientes a:

- Cambio climático en Ton CO₂ eq.
- Agotamiento de Agua en m³.
- Agotamiento de Recursos Fósiles en Ton petróleo eq.¹
- Formación de Material Particulado en Ton PM₁₀ eq.¹

¹ Miden el consumo de combustible en la actividad en Fuel Oil y la cantidad de material particulado que queda en el aire respectivamente.

- Daño a la Capa de Ozono en Ton CFC-11 eq.

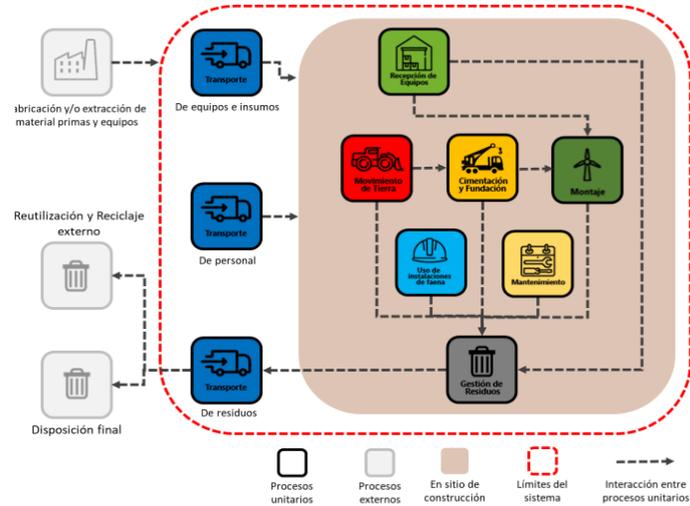


Figura 3 Límites del Sistema para Planta Eólica.

Fuente: (Ulearn, 2018)

La selección de estas categorías como las únicas que serán evaluadas dentro del ACV se justifican basados en que son las únicas que presentan impactos dentro de la fase de construcción de los proyectos dados los materiales a utilizar y los tipos de actividades a realizar. Aun así, para proyectos futuros Enel pretende incluir más tipos de categorías a MIMA y generar análisis de impacto ambiental de forma mucho más completa.

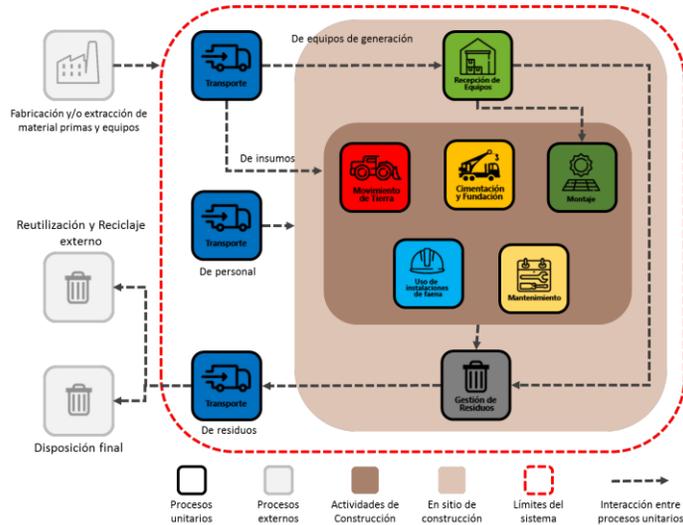


Figura 4 Límites del Sistema para Planta Solar

Fuente: (Ulearn, 2018)

2.1.1. Datos disponibles

A partir de los Análisis de Ciclo de Vida se puede obtener la información de los flujos y el impacto de cada actividad del proceso de construcción de cada tipo de planta. Para el caso de este trabajo se aplicará un indicador de circularidad para dos tipos de planta: una planta de paneles solares y un parque de turbinas eólicas. La información de los flujos por proceso para aquellas plantas se adjunta a continuación:

Tabla 1 Flujos de material -Proceso de Transporte - Fase de construcción Planta Eólica y Solar

Proceso	Flujo	Unidad	Eólica	Solar
 Transporte	Terrestre Materiales y Equipos	tonkm	4501,9	1706586,4
	Terrestre Personal	pkm	19872711,5	1363,5
	Terrestre Residuos	tonkm	3940,5	787,9
	Aéreo Materiales y Equipos	tonkm	163957,1	3289,9
	Aéreo Personal	pkm	185482,3	1007,6
	Marítimo Materiales y Equipos	tonkm	265501854,7	20129122,1

Tabla 2 Flujos de material - Proceso de Recepción de Equipos - Fase de Construcción Planta Eólica y Solar

Proceso	Flujo	Unidad	Eólica	Solar
 Recepción de Equipos	Aerogeneradores - Módulos Fotovoltaicos	und	42,0	3881,5
	Cables	ton	8,1	S/I
	Tubería Plástica	ton	14,5	S/I

Tabla 3 Fase de Construcción Planta Eólica y Solar - Flujos de material - Proceso de Movimiento de Tierras

Proceso	Flujo	Unidad	Eólica	Solar
Movimiento de Tierras 	Agua Industrial	m3	41360,2	25,9
	Áridos	ton	129625,9	202,2
	Combustible utilizado	ton	168,3	0,9
	Emisiones compactación	HM	5471,6	38,7
	Emisiones excavación	HM	9512,4	41,0
	Emisiones generación eléctrica ²	HM	20,6	31,1

Tabla 4 Fase de Construcción Planta Eólica y Solar - Flujos de material - Proceso de Cimentación y Fundación

Proceso	Flujo	Unidad	Eólica	Solar
Cimentación y Fundación 	Acero	ton	2130,3	18,8
	Hormigón	ton	42354,7	0,1
	Combustible	ton	42,7	0,0
	Otros insumos / emisiones fundaciones	ton - HM	0,4	13,1
	Emisiones generación eléctrica ¹	HM	20,6	31,1

² A cada uno de los 4 procesos donde se realizaron actividades de generación eléctrica se le asignó el 25% del total de las emisiones de dicho flujo.

Tabla 5 Fase de Construcción Planta Eólica y Solar - Flujos de material - Proceso de Montaje

Proceso	Flujo	Unidad	Eólica	Solar
Montaje 	Áridos	ton	2839,7	S/l
	Combustible	ton	143,7	0,2
	Otros insumos	ton	1,0	0,0
	Emisiones elevación	HM	9457,2	50,5
	Emisiones generación eléctrica ¹	HM	20,6	31,1

Tabla 6 Fase de Construcción Planta Eólica y Solar - Flujos de material - Proceso de Uso de Instalaciones de Faena

Proceso	Flujo	Unidad	Eólica	Solar
Uso de Instalaciones de Faena 	Agua Potable	m3	283,4	0,0
	Combustible	ton	22,5	0,9
	Emisiones generación eléctrica ¹	HM	20,6	31,1

Tabla 7 Fase de Construcción Planta Eólica y Solar - Flujos de material - Proceso de Mantenimiento de Faena

Proceso	Flujo	Unidad	Eólica	Solar
Mantenimiento de Faena 	Agua industrial	m3	6357,0	97,0
	Aceites	ton	0,2	0,3
	Grasas y otros	ton	0,2	0,0

Tabla 8 Fase de Construcción Planta Eólica y Solar - Flujos de material - Proceso de Gestión de Residuos

Proceso	Flujo	Unidad	Eólica	Solar
Gestión de Residuos 	Residuos Domiciliarios Disposición	ton	25,7	0,0
	Residuos No Peligrosos Disposición	ton	13,1	0,0
	Residuos Peligrosos Disposición	ton	6,9	0,0
	Residuos No Peligrosos Valorizable	ton	65,5	0,8
	Aguas Residuales Disposición	m3	76,7	0,1
	Aguas Residuales Reciclaje	m3	214,6	0,8

2.2. Revisión Bibliográfica

La revisión bibliográfica tiene el fin de poder encontrar una definición de la economía circular, los principios que la rigen, los modelos de indicadores y las prácticas circulares existentes tanto a niveles académicos, gubernamentales y no gubernamentales.

Se comenzó con una búsqueda de publicaciones académicas por medio de la red de Google Scholar, en conjunto con páginas web de las revistas científicas pertenecientes a Elsevier y ResearchGate. En estas se buscaron los términos de *circular economy*, *circular economy metrics*, *circularity indicators* y *circularity metrics*. Como también, se buscaron conceptos relacionados como *life cycle assessment*, *LCA*, *construction*, y *sustainability*. Los resultados de las búsquedas tuvieron que ser filtrados para acceder a documentos que entregaran información relevante para la investigación. Este filtro consistió en primer lugar en descartar aquellos documentos que no poseían conceptos claves de interés que se relacionen a los de las búsquedas en conjunto a un título que incluya alguna relación con los temas de interés. En segundo lugar, se filtraron los artículos a través de su *Abstract* en búsqueda de métodos, resultados y conclusiones que aporten a la investigación y satisfagan la búsqueda de la información que se necesitaba.

Los conceptos y temas que se tuvieron en consideración para filtrar los artículos son los siguientes:

- Definición de Economía Circular. / *Definitions of Circular Economy*
- Principios de la Economía Circular. / *Circular Economy Principles*
- Conceptos que se relacionan con la Economía Circular.
- Métodos e indicadores de Circularidad. / *Metrics, Indicators and Method to measure CE*
- Casos prácticos de economía circular. / *Study cases of CE*
- Relación entre la economía circular y los análisis de ciclo de vida. / *CE and LCA*
- Construcción sustentable y economía circular. / *Construction and CE*

Además de la investigación académica, se buscaron publicaciones de organizaciones reconocidas en materias de Economía Circular, como lo es la Ellen MacArthur Foundation, que cuenta con una amplia biblioteca teórica y de casos prácticos y es reconocida como líder de pensamiento circular.

2.3. Resultados y Selección del Indicador

La revisión bibliográfica culmina con un compendio de los resultados obtenidos, que incluye la definición de EC que se utilizará como base y sus principios. El análisis de las Metodologías de indicadores se realizará considerando los contextos de cada método, los inputs de información necesarios y los límites de cada una. Esto se comparará con el caso Enel y la información disponible, teniendo presente la compatibilidad del indicador con los procesos de construcción de la planta.

La selección de la metodología a aplicar se basará en la definición de economía circular, los principios que acoge el método y que caben dentro del formato de MIMA y la relación de las variables de los datos que se obtienen del ACV con la circularidad.

2.4. Otros Cálculos

En forma de complementar el análisis de resultados, se pretende realizar una serie de cálculos con variables ambientales. Esto se origina desde la búsqueda de un indicador de circularidad original que relacione estas variables con flujos de material en la construcción.

La primera relación que se realizará consiste en un análisis estadístico de las huellas ambientales de los procesos de construcción, obtenidas desde los ACV por medio de un análisis de correlaciones lineales entre Huellas de Carbono – Huellas Hídricas, Huellas de Carbono – Flujo de Material, Huellas Hídricas – Flujo de Material, con la idea de encontrar

relaciones directas entre las huellas que permitan una futura inclusión de estas dentro de los indicadores de circularidad y también darle más profundidad a las relaciones de flujos de material para los procesos de construcción.

Para realizar este análisis se utilizarán las huellas que aparecen como resultados en los ACV de Enel y para calcular se utilizará la herramienta CORREL de Excel for Office 360.

2.5. Análisis de Resultados

Con los resultados obtenidos, incluyendo el método de indicador que se seleccione, se aplicará la metodología sobre el caso de Enel, específicamente sobre la fase de construcción de dos plantas de generación de energía, una eólica y una solar.

Para la aplicación del método se deberán trabajar los datos presentados anteriormente, por lo que se realizarán una serie de conversiones de unidades y equivalencias para trabajar con las medidas que sean requeridas según la metodología seleccionada. Estas conversiones en caso de ser necesarias serán correctamente justificadas y respaldadas para no perder integridad en la información de los flujos.

Una vez aplicada la metodología sobre las plantas se analizarán estos resultados de forma de obtener visión de los beneficios y limitaciones del modelo, las oportunidades de mejora y la relación con otra información ambiental y los análisis complementarios.

3. Resultados

3.1. Resultados del Análisis bibliográfico

El análisis bibliográfico comenzó con la selección de los artículos a revisar, luego de filtrar los artículos de la búsqueda bibliográfica, se conservó un total de 36 artículos publicados entre el 2008 y el 2018, con una gran tasa de publicaciones en los años recién pasados, 2015 con el 19% de los artículos (7), 2017 con el 28% (10) y 2018 con un 19% (7) de ellos.

Tabla 9 Publicaciones revisadas para la elaboración de la memoria

Fuente: Elaboración Propia

Año de Publicación	Número de publicaciones	Porcentaje
2008	2	6%
2009	1	3%
2010	1	3%
2011	0	0%
2012	1	3%
2013	2	6%
2014	3	8%
2015	7	19%
2016	2	6%
2017	10	28%
2018	7	19%
Total	36	100%

De estos artículos 19 corresponden a la discusión de la economía circular, entre la definición y ejecución de sus principios. Destacan las publicaciones que realizaron reseñas (4) del concepto. Para indicadores se encontraron 15 publicaciones de las cuales se repartían entre propuestas de indicadores y su aplicación (10) y reseñas de principios de circularidad, propuesta de indicadores y revisión general de indicadores de circularidad (5). El resto de los artículos corresponde a investigaciones relacionadas al análisis de ciclo de vida y sustentabilidad, a excepción de 1 que incluía referencias a la economía circular.

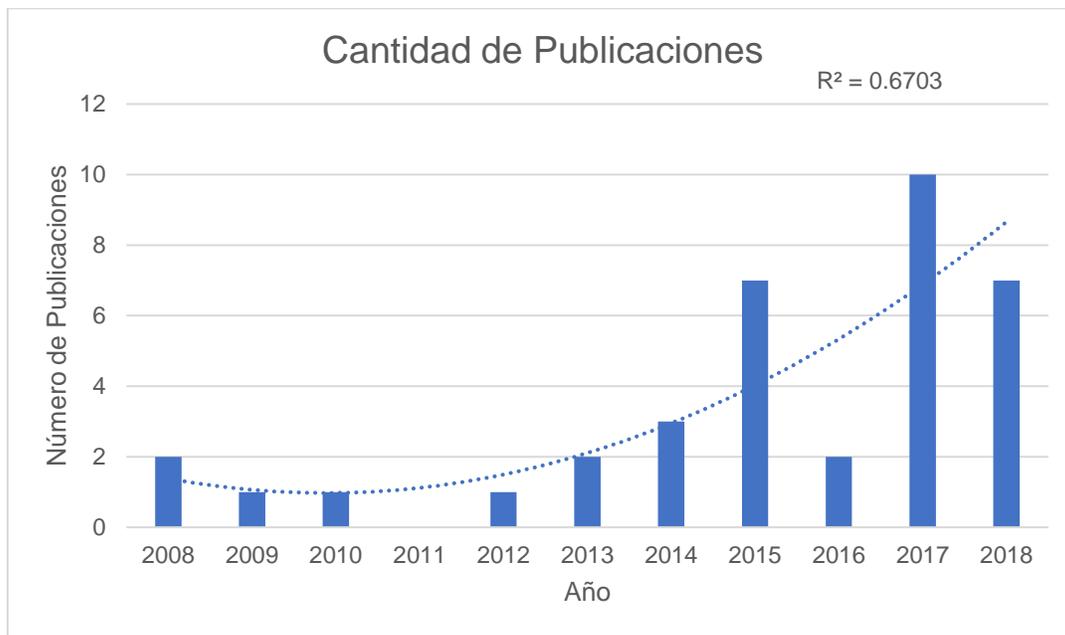


Figura 5 Publicaciones revisadas sobre economía circular por año de publicación.

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 3, resulta interesante, pues muestra la tendencia de los últimos años a indagar en el concepto de economía circular, pues con esta pequeña muestra se logra apreciar la tendencia del mundo académico de proponer y mejorar el concepto por medio de una discusión mucho mas general, que a la larga permita llegar a consensos de los distintos conceptos no solo relacionados a la economía circular, sino que también al desarrollo sustentable.

3.1.1. Conceptos Asociados a la Economía Circular

El origen del término no se puede rastrear a solo un autor o fecha, incluye una serie de términos que provienen las primeras medidas de poner los aspectos ambientales en la palestra económica internacional, desde ahí una serie de términos y conceptos han ido desarrollando ideas para un futuro sostenible, las cuales han inspirado al surgimiento de la economía circular. (Ellen MacArthur Foundation, 2017)

Para simplificar la presentación, CIRAIG, en 2015 realiza un estudio bibliografico sobre la economía circular donde reúne los principales conceptos de sustentabilidad que han guiado al desarrollo sostenible desde el siglo pasado. A continuación se presentan algunos de estos conceptos:

3.1.1.1. *Desarrollo Sustentable:*

Comenzó a propagarse internacionalmente en 1987 luego de la publicación del reporte de Gro Harlem Brundtland para la Comisión Mundial de Medio Ambiente y Desarrollo (WCED de sus siglas en inglés) con el nombre de “Our Future”. Sin embargo, su origen se debe a 2 eventos anteriores: La publicación del Club de Roma “Límites del Crecimiento” y la Declaración y Conferencia de Estocolmo, seguida de la Estrategia de Conservación Mundial en 1980 (CIRAIG, 2015).

Después de Brundtland, los mayores eventos que firmaron el progreso y desarrollo del concepto son la cumbre de Río (1992) que generó su declaración, la Agenda 21, una serie de convenciones internacionales clave en cambio climático y biodiversidad y más tarde en desertificación (CIRAIG, 2015).

La cumbre de Johannesburgo en 2002 trae de vuelta la dimensión social a la discusión, que había sido negada en 1992. En 2003 la Declaración de Marrakech propone 5 objetivos entre los cuales 2 son 1) Desacoplar el crecimiento económico del consumo de recursos y 2) Crear una economía circular (CIRAIG, 2015).

La definición de Brundtland dice: “El desarrollo sustentable requiere que la sociedad satisfaga las necesidades humanas actuales y sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones de satisfacer sus propias necesidades” (WCED, 1987).

3.1.1.2. *Transición Ecológica*

El concepto de Transición, apunta a un modelo social sustentable. Tiene varios nombres dependiendo del enfoque que tome: “transición sustentable”, “transición a una economía *low carbon*”, “Transición socio-ecológica”. El concepto se usa en Europa principalmente tanto como implementación práctica, como discurso y terreno teórico (CIRAIG, 2015).

- Implementación: “Ciudades de transición”, Ecodiseño y también se aplica a políticas públicas como el caso de impuestos ecológicos.
- Discurso: La palabra se usa cada vez más por los miembros de la sociedad y varía dependiendo del enfoque, ya sea técnico o de innovación social.
- Campo teórico: Existen 3 escuelas de pensamiento colaborativas:
 - Gobernanza reflexiva.
 - Perspectiva multinivel.
 - Administración de la transición.

3.1.1.3. *Economía Verde:*

Emerge como prioridad estratégica para gobiernos y organizaciones intergubernamentales, ONU, UE, OCDE, además de ser estudiada en *papers* y planes estratégicos. La definición de la ONU dice que es una economía que resultará en una mejora en el bienestar humano y en equidad social. Mientras que reduce los riesgos ambientales y escases ecológica (CIRAIG, 2015).

De forma resumida se considera como *low carbon*, de recursos eficientes e inclusiva socialmente. Incluye los elementos económicos para solucionar desafíos ambientales, costos ambientales, inversión en tecnologías verdes y energías renovables (CIRAIG, 2015).

La de definición del concepto se adoptó en la conferencia de RIO+20 en 2012, la cual dice:

“Consideramos que la economía verde en el contexto del desarrollo sustentable y erradicación de la pobreza como una de las herramientas más importantes disponibles para alcanzarlas y que puede proveer de opciones para la creación de políticas, pero que no deberían ser un grupo de reglas rígidas. Enfatizamos que debería contribuir a erradicar la pobreza como también al crecimiento económico sustentable, mejorando la inclusión social, el bienestar humano y creando oportunidades de empleos y trabajos decentes para todos, mientras mantiene el funcionamiento saludable de los ecosistemas de la tierra” (Asamblea General ONU, 2012)

3.1.1.4. *Economía Funcional*

También llamada economía de desempeño fue acuñada por Walter Stahel e 1986. El término se relaciona con la coproducción de soluciones integradas para productos y servicios que satisfacen las expectativas de los hogares y la industria entre proveedores y beneficiarios, consolidando nuevos requisitos ambientales y sociales. Supone que la eficiencia y la eficacia deben conciliarse, ya que cambia el papel de los actores en una economía en la que una vida útil y rendimiento prolongados signifiquen hacer lo correcto (eficacia) y hacerlo bien (eficiencia) (CIRAIG, 2015).

Según esto los principales objetivos son:

- Incremento en la creación de riqueza.
- Aumento de empleos.
- Reducción en el consumo de recursos.

3.1.1.5. *Pensamiento en ciclo de Vida*

La principal observación que condujo a la concepción del ciclo de vida es que la búsqueda de optimización ambiental dentro de una organización no garantiza una cadena de valor optimizada. Por lo que tomar una perspectiva holística permitiría mejorar el rendimiento ambiental del producto a lo largo de su ciclo de vida. Este pensamiento incluye tener en consideración desde la extracción de la materia prima, hasta el procesamiento, fabricación, uso, reparación y mantenimiento de materiales, y la eliminación o reciclaje (CIRAIG, 2015).

Una forma conocida de aplicar el pensamiento de ciclo de vida, es a través del análisis de ciclo vida (ACV), que comenzó su concepción en la década de 1970, se normalizaría entre 1990 y 2000 para empezar a ser elaborado desde el 2000 en adelante (CIRAIG, 2015).

Actualmente el pensamiento de ciclo de vida tiene como objetivo reducir los impactos ambientales a lo largo de los ciclos de vida de los productos, gracias a la reducción de recursos y energías y de las emisiones al aire, agua y suelo. En este sentido el ACV se utiliza para evaluar la ecoeficiencia del producto o servicio midiendo cada una de las variables anteriormente nombradas (CIRAIG, 2015).

3.1.1.6. *Pensamiento de la Cuna a la Cuna*

El concepto de la cuna a la cuna (*Cradle to Cradle* o *C2C*), es una filosofía de diseño que fue formalizada por Michael Braungart y William McDonough en su libro "*Cradle to Cradle: Rehaciendo la forma en que hacemos las cosas*" en 2002. Tiene como objetivo crear productos con una huella ambiental positiva, con bases inspiradas en la naturaleza bajo el término de Biomimetismo (*Biomimicry*) y que sean "ecoeficientes", lo que significa que, en lugar de mejorar los productos existentes, la idea es desarrollar productos desde cero rediseñando los flujos de materiales, abordando la toxicidad y eliminando todas las posibles deficiencias de innovación y crecimiento económico (CIRAIG, 2015).

3.1.1.7. *Valor Compartido*

Es un Enfoque de gestión propuesto por Michael E. Porter y Mark R. Kramer en 2011 en el artículo "Creación de Valor Compartido". Este enfoque trata de crear valor tanto comercial como social al identificar y abordar los problemas sociales que el capitalismo tradicional no se ha preocupado de satisfacer. Para ello plantean una estrategia de negocios con mediciones e implementación iterativa que permitan acceder a una mejora continua de los procesos. Esta estrategia consta de 4 pasos: Identificación de problemas sociales, creación de un caso de negocio, seguimiento del progreso, y Medición de resultados y operalización (CIRAIG, 2015).

3.1.1.8. *Ecología Industrial*

El concepto nace en 1989 por propuesta de Robert Frosh y Nicholas Gallopoulos que sugerían la necesidad de “un ecosistema industrial” en el que se optimizan el uso de energías y materiales, se minimizan los desechos y la contaminación bajo un contexto económicamente viable para cada producto de un proceso de fabricación. Por lo tanto, se plantea como la idea de construir industrias que funcionen como ecosistemas naturales donde los desechos, residuos o productos de un proceso se utilizan como aportación a otro proceso. Como aplicación del concepto se tiene a la denominada simbiosis industrial, donde dos o más industrias o compañías se asocian para que los desechos de uno se conviertan en las materias primas del otro (CIRAIG, 2015).

3.1.2. **Definiendo la Economía Circular**

3.1.2.1. *Ellen MacArthur Foundation*

Fundada en 2010 con el propósito de acelerar la transición a la economía circular, se ha instalado como líder de pensamiento, estableciendo la economía circular en la agenda de responsables de empresas, gobiernos y académicos. Posee apoyo de Filántropos: SUN, MAVA, People’s Postcode Lottery y Socios de Conocimiento: ARUP, IDEO, MCKinsey & Company y SYSTEMQ.

Sus áreas de trabajo se centran en 5 áreas que se interrelacionan:

1. Investigación y Análisis: Ofrecen pruebas sólidas sobre ventajas de la transición – Informes Económicos.
2. Empresas y Gobiernos: Impulsan y generan condiciones para que prospere la innovación circular – Socios Globales para desarrollar iniciativas.
3. Educación: Inspirar a alumnos a repensar el futuro a través del marco de la economía circular – Aprendizaje online, contenidos de vanguardia y que respaldan el conocimiento sobre la economía circular.
4. Iniciativas Sistemáticas: Transformar las cadenas de valor de los flujos de material – Ayuda a organizaciones a superar problemas sistemáticos de la transformación de los flujos.

5. Comunicaciones: Involucra a una Audiencia Global en torno a la Economía Circular – Publicaciones: Informes, casos prácticos e investigaciones, además de un sitio especial para noticias y relacionados a economía circular llamado Circulate.

La EMF cuenta con el apoyo de Socios Globales como DANONE, Google, H&M, NIKE, Renault, UNILEVER, SC Jonhson, entre otros.

3.1.2.1.1. Economía Circular según la EMF

Desde la premisa de que el sistema lineal actual de “tomar, producir y desechar” es inviable para un futuro sostenible, se plantea un nuevo sistema económico bajo 3 principios:

- Diseñar los desechos y emisiones
- Mantener Productos y Materiales en uso.
- Regenerar los Sistemas Naturales.

En base a esto define la Economía Circular como: *“Un sistema industrial que es restaurativo y regenerativo por intención y diseño. Reemplaza el concepto de “fin-de vida” con restauración, cambia hacia el uso de energías renovables, elimina el uso de químicos tóxicos que impiden el reúso, y apunta a la eliminación de desechos a través de un diseño superior de materiales, productos, sistemas y dentro de esto, modelos de negocios.”* (Ellen Macarthur Foundation; Granta, 2015)

3.1.2.1.2. “Nuestra misión es acelerar la transición a la economía circular”

La transición no solo pretende reducir los impactos negativos de la “economía lineal”, sino que también un cambio sistemático que crea resiliencia a largo plazo, genera negocios y oportunidades económicas y provee de beneficios sociales y ambientales.

Para facilitar la transición, la fundación ha encontrado 4 bloques de construcción esenciales de la economía circular:

- Diseño de Economía Circular:

Las compañías necesitan competencias esenciales en un diseño circular para facilitar el reúso, el reciclaje y el “cascadaje³”. El diseño de productos y procesos requiere de habilidades, sets de información y métodos de trabajo de alto nivel.

³ No existe una traducción aceptada del término “Cascade” para referirse a los materiales que pierden calidad y se integran a un ciclo de procesos diferente del que provienen dentro de un sistema circular. P.e. los materiales orgánicos se destinan a compostaje.

Para un diseño circular económicamente exitoso debe tenerse en cuenta la selección del material, componentes estandarizados, diseño de último producto (*designed – to – last products*), diseño para un fácil manejo de fin de vida, separación o reúso de productos y materiales y diseño por criterios de construcción que tienen en cuenta posibles casos como productos de los desechos.

- Nuevos modelos de negocios

La transición requiere de modelos de negocios innovadores que replacen los existentes o abarquen las nuevas oportunidades.

Las compañías con un mercado compartido significativo y con actividad en varios pasos verticales de la cadena de valor lineal pueden jugar un rol mayor en la innovación de economía circular y establecer la circularidad como vía de acción principal, que gracias a su éxito puedan inspirar a otros y seguir expandiendo la idea.

- Ciclos Inversos (reverse cycles)

Se necesitan de nuevas habilidades para el “cascadaje” y el retorno final de los materiales al suelo o de vuelta al sistema industrial de procesos. Esto incluye mover las cadenas logísticas, clasificación, almacenaje, manejo de riesgos, generación de energía, biología molecular y química de los polímeros.

En un sistema con recolección y sistemas de tratamiento a costo eficiente, mejor calidad posible, segmentación efectiva y productos con diseño de fin de vida, la necesidad de nuevos materiales para el sistema decaerá, lo que apoya al diseño circular.

- Habilitadores y condiciones sostenibles favorables

Para esparcir el reúso de materiales y una mayor productividad de recursos. Los mecanismos de mercado necesitan jugar un rol distinto, apoyado por políticas, instituciones educacionales y líderes de opinión.

Estos habilitadores incluyen:

- Colaboración
- Iniciativas de repensar.
- Proveer un set de reglas ambientales internacionales viables.
- Liderar por el ejemplo y escalarlo rápido.
- Acceder a financiamiento.

3.1.2.2. *British Standard 8001:2017*

Niero & Schmidt, 2018 realizó un trabajo donde desarrollan una guía de adopción de la circularidad para organizaciones a partir de la guía BS 8001:2017, la cual provee lineamientos para las organizaciones de forma que operen de forma más circular y sustentable.

La BS 8001:2017 es una guía de estándares como la ISO 14040, lo que significa que no es adecuada ni está destinada a propósitos de certificación, pero que está enfocada para servir de soporte a las organizaciones que quieran prácticas más sustentables y circulares en sus negocios (Niero & Schmidt, 2018).

Los objetivos de la guía son:

- Definir que es la Economía Circular y por qué moverse a una operación más circular puede ser beneficioso y relevante para una organización tanto actualmente como en el futuro.
- Explicar cómo implementar los principios de EC en una organización para crear valor a través de la innovación de procesos, productos, servicios o en modelos de negocio.

3.1.2.2.1. *Economía Circular según la BS 8001:2017*

Define la Economía Circular como: *“Una economía que es restaurativa y regenerativa por diseño y que apunta a mantener productos, componentes y materiales a su mayor utilidad y valor en todo momento, diferenciando ciclos técnicos y biológicos.”* (Niero & Schmidt, 2018)

3.1.2.3. *Las 114 definiciones de la Economía Circular*

El trabajo de Kirchherr et al. (2017) presenta una selección de 114 definiciones diferentes de economía circular entre artículos académicos y no académicos. Se trata del primer trabajo académico que realiza una discusión focalizada en las diversas definiciones de la economía circular. Para ello se estudiaron 118 publicaciones relacionadas a la economía circular, con la idea de transparentar el concepto, de estas, 114 presentaban definiciones sobre la EC. Dentro de estas, la más repetida era la definición de la EMF con 11 citas.

En general, los resultados del estudio muestran que al hablar de la economía circular no se toman en cuenta los 3 pilares de desarrollo sustentable, al no considerarse una visión sistemática del modelo y dejando de lado en la mayoría de los casos el pilar social. El 46% de las publicaciones tienen como objetivo de la economía circular a la prosperidad económica, mientras que la equidad social solo en el 19% (Kirchherr et al., 2017).

Dentro de los habilitadores de la economía circular no se empezó a hablar de del modelo de negocios hasta que la EMF lo incluyó dentro de su definición, lo que llevo a que las definiciones

de las publicaciones que incluían este concepto incrementaran del 0% en 2012 al 14% en 2017.

En este trabajo seleccionan los aspectos compartidos entre estos artículos, incluyendo las distintas dimensiones como de la estrategia de las 3R, la visión sistemática y el desarrollo sustentable, con esta información son capaces de entregar la siguiente definición:

“Una economía circular describe un sistema económico que se basa en modelos de negocios que reemplazan el concepto de “fin de vida” en conjunto a reducir, reusar, reciclar y recuperar materiales en los procesos de producción/distribución y consumo, con el fin de alcanzar el desarrollo sustentable tanto en operaciones de nivel micro (productos, compañías, consumidores), meso (parques eco-industriales) y macro (ciudades, regiones, países y más), lo que genera calidad ambiental, prosperidad económica y equidad social, para el beneficio de las generaciones actuales y futuras” (Kirchherr, Reike, & Hekkert, 2017, pág. 224)

3.1.2.4. *El consenso en la Economía circular*

En la búsqueda por un consenso en la definición de economía circular Prieto-Sandoval et al. (2017), realiza una revisión en detalle de las distintas definiciones encontradas en los artículos académicos, los cuales en general describen que la implementación de la economía circular requiere de eco-innovaciones cíclicas y regenerativas que permitan alcanzar el desarrollo sustentable que cumpla las expectativas económicas, ambientales y sociales en el corto y largo plazo. En esta publicación también se presenta una definición cohesiva e inclusiva de la economía circular:

“La economía circular es un sistema económico que representa un cambio en el paradigma en la forma en que la sociedad humana se interrelaciona con la naturaleza y apunta a prever el agotamiento de recursos, cerrar ciclos de materiales y energía, y facilitar el desarrollo sustentable a través de su implementación a nivel micro (empresas y consumidores), meso (agentes económicos integrados en simbiosis) y macro (ciudades, regiones y gobiernos). Alcanzar este modelo circular requiere innovaciones ambientales cíclicas y regenerativas en la forma en que la sociedad legisla, produce y consume.” (Prieto-Sandoval, Jaca, & Ormazabal, 2017, pág. 610)

Las últimas definiciones se pueden establecer como variaciones a la definición de la EMF, pero como se puede notar entre estas últimas existen diferencias que denotan las distintas visiones que se tienen de la economía circular, esto es, Kirchherr et al. (2017) la define como un sistema económico basado en los modelos de negocios, mientras que Prieto-Sandoval et. Al (2017) recurre a solicitar el cambio de paradigma en la relación humano-naturaleza desde una visión económica. Esto también ocurre con la definición de la BS:8001/2017, lo que demuestra el

impacto del trabajo de la Ellen Macarthur Foundation en la promoción de la Economía Circular. Sin embargo, y como critica Kirchherr et al. (2017), cada miembro esta queriendo aportar su propia definición debido a los distintos enfoques individuales de interés, y por eso se pueden encontrar 114 definiciones diferentes, al final esto esta generando una disociación del término y una confusión en los principios. Y si bien las definiciones presentadas aquí son similares en forma y basadas en la definición de la EMF, se presentan en este trabajo al considerarse los mejores ejemplos que sistematizan la economía circular, mejoras en las definiciones y diferentes aproximaciones.

Dado lo anterior para efectos del trabajo se adoptará la definición de Kirchherr pues al ser una definición redactada a partir de los consensos de la economía circular, se centra en la promoción de un modelo de negocios que toma en cuenta los procesos de producción/distribución desde un punto de vista económico y se asocia más el modelo de la empresa y facilita el entendimiento para la transición del modelo lineal al circular.

3.1.3. Los principios de la Economía Circular

El desarrollo de la Economía circular es muy diferente alrededor del mundo. En China por ejemplo sigue un enfoque de política nacional (Top-Down) y dado el sistema político chino tiene un patrón cercano a “comandar y controlar” mas que a uno basado en el mercado como lo es en el caso de las políticas europeas, japonesas o americanas que presentan un tipo más “Bottom-Up”. Es más, la iniciativa circular en Europa comenzó por la actividad de organizaciones ambientales, la sociedad civil, ONG’s entre otros también autores que desde la perspectiva económica han solicitado productos mas verdes y tratan de involucrar a gobiernos y empresas para crear nuevas legislaciones y generar un círculo virtuoso (Ghisellini, Cialani, & Ulgiati, 2014).

Aún con las diferencias geográficas de desarrollo de la economía circular (Prieto-Sandoval et al, 2017) encuentra dos grandes grupos de principios de economía circular, siendo el primero el enfoque 3R y en segundo lugar las denominadas Estrategias de Diseño Sustentable. De hecho, en Kirchherr et al. (2017) se demuestra que la economía circular tiene fundamentos en las 3R’s (Reducir, Reusar y Reciclar) pues es la combinación de elementos claves que más se repite en los artículos de economía circular. Mientras que la EMF (2013) adiciona claves de estrategias de diseño sustentable para implementar la economía circular: análisis de ciclo de vida (ACV o LCA en inglés) de productos, biomimetismo y los principios “de la cuna a la cuna” (Prieto-Sandoval, Jaca, & Ormazabal, 2017).

Si bien no existe una lista exhaustiva de los principios de Economía Circular, existen 6 principios guía para establecer la EC en las organizaciones propuestos por Niero y Schimidt (2018), basándose en los principios de la BS:8001:2007

Tabla 10 Principios guía de la EC en una organización

Adaptado desde (Niero & Schmidt, 2018)

Principio	Descripción	Enfoque
1. System Thinking	Tomar una aproximación holística	Entender como las decisiones individuales y las actividades interactúan con los sistemas a los que pertenecen
2. Innovación	Tomar todo lo que resulte en algo nuevo o de cambio y que genere o distribuya valor	Crear valor al establecer un manejo sustentable de recursos a través del diseño de procesos, productos, servicios y modelos de negocio.
3. Gobernanza	Manejar los impactos directos e indirectos de las actividades de la organización dentro del sistema en el son parte.	Tomar en cuenta los impactos económicos, ambientales y sociales determinados por la organización tanto en su cadena de suministro y su clientela.
4. Colaboración	Colaboración Interna y externa a través de arreglos formales y/o informales.	Crear valor mutuo entre organizaciones.
5. Optimización de valor	Mantener todos los productos, componentes y materiales a su mayor valor y utilidad en todo momento.	Reconsiderar lo que se ve como desecho o pérdidas del sistema e identificar oportunidades para generar nuevos potenciales desde ellos.
6. Transparencia	Estar abierto sobre las decisiones y actividades que afectan la transición a la economía circular y tener la disposición de comunicarlas de forma clara, precisa, oportuna, honesta y de forma completa.	Crear confianza, tanto interna como externamente.

Además de estos principios, la economía circular requiere de innovaciones a niveles legislativos, productivos y de consumo, por medio de mecanismos llamados facilitadores o habilitadores del sistema. Esto permite ir obteniendo una visión sistematizada de la cadena de suministros, generar una correcta interacción entre ofertantes y demandantes, lo cual va acompañado de un modelo de negocios pensado de manera circular para mantener los

materiales a su mayor calidad la mayor cantidad de tiempo posible en el sistema (Howard, Hopkinson, & Miemczyk, 2018).

Estas iniciativas, han llevado a los sectores productivos a implementar modelos de ecodiseño y producción limpia. En especial la producción limpia incluye 3 practicas, prevención de emisiones, reducción del uso de tóxicos y diseño ambiental. Con la idea de integrar los conceptos ambientales al diseño y desarrollo de productos para mejorar su desempeño ambiental a lo largo de su ciclo de vida (Ghisellini, Cialani, & Ulgiati, 2014).

La producción limpia se considera esencial a la transición a la economía circular, ya que introduce al sistema productos limpios, procesos y servicios con bajos flujos de emisiones como también previene el uso de flujos no renovables o dañinos. Se considera como el primer objetivo estratégico de la transición pues se basa en la aplicación continua de una estrategia ambiental preventiva, integrada en procesos, productos y ser visión en orden de incrementar la eficiencia económica y reducir los riesgos para las personas y el medio ambiente (Ghisellini, Cialani, & Ulgiati, 2014).

A niveles de consumidor se ha propagado la conciencia de la responsabilidad del consumidor y la generación de públicos verdes, agentes primordiales para acelerar la transición de las empresas al ser demandadas de productos mas limpios. Desde la vista pública los países han generado leyes de etiquetados de productos de forma de aumentar la confianza de los consumidores y cada vez son más las empresas que se integran a estas iniciativas de tal forma que ya se planifican principios y acuerdos de nivel internacional para regular las políticas de mercado, compras y ventas (Ghisellini, Cialani, & Ulgiati, 2014).

3.1.4. Sistematizando la EC

Una visión práctica para entender la dinámica de la economía circular es del diagrama de mariposa de la EMF (Ellen MacArthur Foundation, 2017), que separa los flujos de materiales de la economía en dos clasificaciones, uno técnico y otro biológico y categoriza los cierres de ciclos del sistema, de forma de mantener los materiales en su mayor estado de calidad el mayor tiempo posible.

3.1.4.1. El Ciclo Técnico

El ciclo técnico incluye los materiales durables, aquellos de los cuales el crecimiento se debe desacoplar para contrarrestar la escases.

Se deben preservar y distribuir el trabajo, energía, material y costo capital que están incluidos en el producto en vez de descartarlo al final de su primer uso.

Para ello, primero se debe buscar la forma de revender el producto o darlo a un nuevo usuario con poco o nada de mantenimiento (reúso en los ciclos internos). Segundo, la remanufactura de componentes puede extender la vida útil de productos (ciclos externos) y por último el reciclaje se encargará de recuperar los materiales de los productos para reintegrarlos al sistema y producir nuevos.

3.1.4.2. El Ciclo Biológico

Los materiales del ciclo biológico son consumidos de forma que se pierde la integridad y calidad original, pero puede caer en cascada a otras actividades y usarse para darle más valor.

- Como ideal el stock de capital natural es regenerado y mantenido.
- La energía del sistema proviene de fuentes renovables, disminuyendo el consumo de combustibles fósiles y la emisión de GEI.

Por lo tanto pertenecerán al ciclo biológico todos los materiales que sean parte de la biosfera y que permitan tener un stock regenerativo.

3.1.4.3. Diagrama de Mariposa.

El diagrama de mariposa incluye la relación entre el ciclo técnico y biológico dentro de un sistema circular. Comienza con la producción de materiales y partes para sustentar la producción de productos que llegan a tiendas y proveedores de servicios. Luego de ser usados los materiales dependiendo de su tipo técnico o biológico seguirán su cadena de revalorización. Para los materiales técnicos priorizando la mayor calidad de los materiales y extensión de vida útil de los productos, para esto se jerarquiza entre mantención, reúso, remanufactura y reciclaje. En cambio para los materiales biológicos, se pueden reinsertar por medio de cascada a la cadena de suministros o bien ser enviados a recuperación por medio de digestión anaerobia o compostaje y volver a producir los mismos materiales. Para aquellos productos que no puedan ser reinsertados se seguiría la tendencia lineal actual, priorizando la recuperación de energía en los materiales compatibles y finalmente enviándolos a disposición final en rellenos sanitarios.

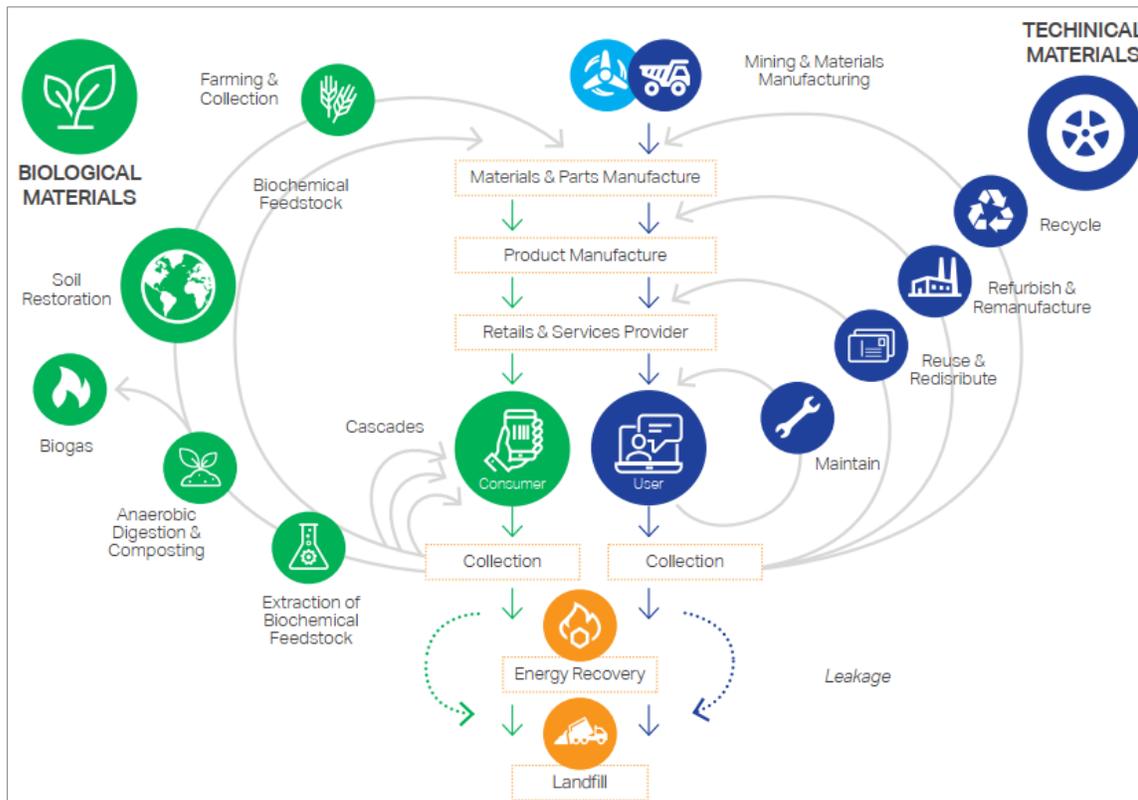


Figura 6 Esquema de la economía circular.

Fuente: (wbcsd, 2017) adaptado de (EMF, 2015)

3.1.5. Industria de la construcción, análisis de ciclo de vida y su relación con la circularidad.

Los ACV se han convertido en una herramienta fundamental para comprender los impactos ambientales de las actividades humanas en general y la tarea se ha facilitado más aún con el desarrollo de softwares que los realizan, como lo son SimaPro, Umberto y Gabi, los cuales se apoyan principalmente de bases de datos como EcolInvent (Negishi et. al, 2018).

Los resultados de los análisis de ciclo de vida para la industria de la construcción han mostrado que las actividades de construcción y trabajos civiles consumen el 60% de los recursos vírgenes que se extraen cada año, lo que conlleva a una producción anual de 1 tonelada de concreto per cápita y un material esencial para la producción de concreto es la producción de cemento, material intenso en emisiones de carbono (Hossain & Thomas, 2018). Además, este sector consume el 16% de las producciones de hierro y acero y a su vez esta última industria es responsable del 6,7% de las emisiones globales de carbono (Dong & Ng, 2015). Sin embargo, el 15% de los materiales totales de construcción son enviados a vertederos

anualmente, debido a pedidos excesivos, pedidos incorrectos o daños recibidos a un almacenamiento deficiente, esto sin incluir los materiales desechados por las desmantelaciones al fin de vida de los edificios. (Hossain & Thomas, 2018).

Debido a la gran cantidad de materiales que se utilizan en este sector de la industria y sus impactos, el reciclaje de estos se vuelve cada vez una opción más viable (Negishi et. al, 2018). Sin embargo, la relación de esta industria con la economía circular a través de los análisis de ciclo de vida está recién comenzando ya que aún se están desarrollando las directrices para la implementación de la economía circular y los indicadores aún son primerizos y no son claros (Hossain & Thomas, 2018). Pero existen acercamientos entre estas variables, se proponen indicadores basados en LCA, análisis de los flujos de materiales y contabilidad de los costos de los flujos materiales. También se propone discutir conceptos como la simbiosis industrial y como en conjunto con la economía circular podrían alcanzar la sostenibilidad mediante la identificación de los principales aspectos de colaboración y los impactos de rendimiento. Sin olvidar las mejoras a los flujos de material por medio de las “ecoinnovaciones”. (Hossain & Thomas, 2018)

Otro concepto que necesita ser actualizado en los ACV es el enfoque de la cuna a la tumba, el cual realiza el análisis de los procesos, servicios y materiales desde la economía lineal, es decir desde la extracción de las materias primas hasta el desecho del producto al fin de su vida útil. Una de las formas que existen dentro de este enfoque de mantener los materiales en el sistema y disminuir la cantidad de desechos es el enfoque de las 3R (Reducir, Reutilizar y Reciclar), el cual se ha ido incluyendo en los ACV, pero que no es suficiente para asociarse a la circularidad. Como respuesta a esta limitante se ha desarrollado el concepto de las 6R (Reducir, Reutilizar, Reciclar, Recuperar, Remanufacturar, Rediseñar) el cual sigue un enfoque de la “Cuna a la Cuna” (C2C, es decir, mantiene los materiales dentro de los ciclos productivos de la economía. Un enfoque C2C dentro de los ACV se alinean mucho mejor con la economía circular, pero para ello se requiere que se integren los costos del ciclo de vida y la implementación de un nuevo modelo de negocios que considere el C2C como soporte de la toma de decisiones.

Si bien se desarrollaran ACV con enfoque circular, la evaluación de los materiales dentro de los ciclos se podría obstaculizar debido a la pérdida en la calidad y/o cantidad de estos al ser usados. Como solución a esta problemática, se plantea desarrollar procesos adicionales al sistema productivo que se basen en esta pérdida de calidad o cantidad de los materiales (“cascadaje”).

Por otro lado, no se debe desprestigiar la tasa de reciclaje de materiales, ya que esta bien puede proporcionar información útil para cuantificar la cantidad de materiales recirculados e indicar el rendimiento de la organización al transicionar a la economía circular.

Los estudios que han tratado la economía circular en las construcciones recomiendan utilizar los LCA en conjunto a análisis del flujo de material (MFA) para implementar la economía circular, seguir investigando la integración de materiales que se consideraban desechos a los flujos de materias primas, como por ejemplo, los casos del uso de cenizas de lodos de depuradoras para producir cemento, ladrillo, cerámica y otros agregados de construcción. Además, para estudiar la circularidad dentro de la organización, se proponen 6 dimensiones a evaluar: los aspectos ambientales, sociales, económicos, tecnológicos, comportamientos y gubernamentales. Es decir, se debe conocer, el estado, cantidad y calidad de los materiales, tener un diseño temprano claro, que ayude a identificar los flujos de materiales en todas las etapas y mejorar el modelo de LCA para que incluya los principios de economía circular por un enfoque C2C.

3.2. Métricas en Circularidad

Al conocer algunos de los aspectos de la circularidad surge la duda de cómo se puede medir la transición al modelo. Hasta la fecha no existe consenso en las definiciones de circularidad, lo que dificulta la estandarización de métricas robustas que permitan comparación entre empresas y en el tiempo. Si bien existen avances a niveles de meso y macro escala, el mayor desafío se centra en el nivel micro (Linder, Sarasini, & Van Loon, 2017). La misma EMF indica que *“no hay una vía reconocida para estimar de forma efectiva como un producto o compañía realiza su transición de un modelo de operaciones lineal a uno circular, ni hay ningún tipo de herramienta apoyando dichas medidas”* (Ellen Macarthur Foundation; Granta, 2015, pág. 4). Por lo que existe esta necesidad real de crear medidas a niveles de producto y empresas que se asocia a la vez con las necesidades de Enel.

A la fecha se ha avanzado en la estandarización de métricas, las más avanzadas son las de mayor escala. En este caso se centran más en medir impactos sociometabólicos de la economía circular y están mucho más desarrollados que los a nivel micro. Existen indicadores que basados en análisis de flujo de material son aplicados en la economía europea y la china (Geng, Sarkis, Ulgiati, & Zhang, 2013).

Esta aproximación desde lo material se presenta como herramienta para medir economías amplias y de forma directa. También se ha aplicado a nivel meso para medir la simbiosis industrial en casos de la industria forestal, placas electrónicas impresas, sistemas de autopistas y agroindustria. Existe también un análisis basado en Emergía que sustituye la aproximación de material y ha sido aplicada a diversos casos de parques industriales en China (Linder, Sarasini, & Van Loon, 2017) (Geng, Sarkis, Ulgiati, & Zhang, 2013).

3.2.1. Tipologías de los indicadores de circularidad

La mayoría de los indicadores que se relacionan a la circularidad se enfocan en la eficiencia de recursos y con una perspectiva de sustentabilidad, centradas en la reducción de impacto ambiental y ahorro de costos, e incluyen reducción de entradas de material, compuestos peligrosos y emisiones, sustitución y recuperación de materiales por reciclaje en varias de las etapas del ciclo de vida del producto. Otros, los menos, incluyen las fuentes sustentables de material, el valor agregado o la recuperación del producto luego del ciclo de vida de este (Howard, Hopkinson, & Miemczyk, 2018).

Lo anterior genera que existan distintos tipos de enfoques de indicadores, algunos más centrados en estas ecoeficiencias individuales y otros centrados en las generalidades de los materiales. Se debe tener en cuenta que no existen muchos casos donde los productos a comparar sean exactamente los mismos, por lo que se desearía tener un indicador que se interprete de la misma manera entre productos similares y productos diferentes, más aún si se está tratando de plantas de generación de energía que poseen una diversidad significativa. (Howard, Hopkinson, & Miemczyk, 2018)

En el trabajo de Elia et al. (2017) se realiza un análisis crítico de los tipos de indicadores de circularidad, entre los cuales se pueden recoger algunas tipologías que se describen en la Tabla 11 clasificados según la cantidad de variables que miden, ya sean únicas o múltiples y según el tipo de variable que miden, si es material, energía, uso de tierra o si está basado en ciclos de vida.

Entre los tipos de indicador se encuentran (Elia, Grazia, & Tornese, 2017):

Basados en flujo de material de variable única

- **Huella Hídrica (WF):**
Entrega información de impacto único de un producto o servicio. Revela tres impactos potenciales relacionados a agua dulce bajo un enfoque de ciclo de vida. Identificando la cantidad de agua consumida o emitida en toda la cadena de suministro considerando el estado de la cuenca donde se extiende. Los estándares son recientes (ISO 14046-2014) y Water Footprint Network Standard (2011)
- **Inputs de Material por unidad de servicio (MIPS):**
Mide impactos relacionados a un solo flujo de material desde C2C.
- **Mochila Ecológica (ER):**
Es la suma de los inputs de material menos la masa de cada producto.

Tabla 11 Tipologías de Indicadores de Circularidad

Fuente: Adaptado desde (Elia, Grazia, & Tornese, 2017)

Parámetros	Indicador Simple	Indicador Múltiple
Flujo de Material	<ul style="list-style-type: none"> - Huella Hídrica (WF) - Inputs de Material por Unidad de Servicio (MIPS) - Mochila Ecológica (ER) 	<ul style="list-style-type: none"> - Análisis de Flujo de Material (MFA) - Análisis de Flujo de Sustancias (SFA)
Flujo de Energía	<ul style="list-style-type: none"> - Demanda Acumulativa de Energía (CED) - Energía Incorporada (EE) - Análisis de Emergía (EmA) - Análisis Exergía (ExA) 	
Uso y Consumo de Suelo	<ul style="list-style-type: none"> - Huella Ecológica (EF) - Indicador de Procesos Sustentables (SPI) - Indicador de Área de Disipación (DAI) 	
Otros basados en Ciclos de Vida	<ul style="list-style-type: none"> - Huella de Carbono (CF) - Daño Potencial al Ecosistema (EDP) 	<ul style="list-style-type: none"> - Análisis de Ciclo de vida (LCA) - Mapa Estratégico de rendimiento ambiental (EPSM) - Indicador de Desempeño Ambiental Sustentable (SEPI)

Basados en flujo de material multivariable

- **Análisis de Flujo de Material (MFA):**
Análisis sistemático de los flujos y stock de material dentro de un sistema definido en espacio y tiempo. Entrega información sobre la cantidad de material, pero no su calidad.
- **Análisis de flujo de Sustancias (SFA):**
Analiza las sustancias que son riesgosas para el medioambiente y la salud definiendo en tiempo y espacio. Requiere más esfuerzo que MFA por los detalles de flujos peligrosos.

Basados en flujos de Energía de variable única

- **Demanda acumulativa de energía (CED):**
Energía total requerida para producir el producto o servicio desde la extracción hasta la disposición final. No existe estandarización, pero se han entregado guías en la Asociación Alemana de Ingenieros en la UDI4600.

- **Energía Incorporada (EE):**
Suma de todos los inputs de energía directa e indirecta necesaria para producir productos o servicios. Mide la energía incorporada al producto. Útil para medir ineficiencia, en general sólo incluye energías no renovables, en energía/masa de producto.
- **Análisis de energía (EMA):**
Estima la cantidad total de energía directa e indirecta requerida para producir un producto o servicio en un solo tipo de energía, usualmente solar (Solar Energy Joules, seJ). Respecto a calidad y cantidad, permite medir eficiencias sólo del uso energético. Es crítico obtener toda la información y factores de transferencia.
- **Análisis de exergía (EXA):**
Indicador único, representa la máxima cantidad de trabajo que puede ser producido por un sistema. Es el flujo de materia o energía con respecto al equilibrio de un entorno de referencia. Respecto a calidad-cantidad, mide ineficiencias en los procesos y fuera de ellos.

Basados en consumo y uso de suelos

- **Huella Ecológica (EF):**
Mide la cantidad total de tierras productivas requeridas incluyendo demanda por cantidad, cultivos, energía, espacio para infraestructura y área necesaria para absorber las emisiones de carbono generadas. Se expresa en unidades de hectáreas globales (gha). Estandarizada por la Global Footprint Network.
- **Índice de Procesos Sustentables (SPI):**
Analiza el área necesaria para dar soporte a las actividades humanas en todo su ciclo de vida. Permite agregar flujos de materia y energía en un período de referencia.
- **Índice del Área de Disipación (DAI):**
Área necesaria para absorber los outputs de procesos específicos.

Indicadores simples y múltiples basados en impactos.

- **Huella de carbono (CF):**
Mide el impacto ambiental de las actividades humanas en el cambio climático expresado como gases de efecto invernadero generadas por el sistema. La contribución se mide como dióxido de carbono equivalente (CO₂eq) considerando su potencial de calentamiento global específico. El protocolo de GHG es de la World Resources Institute y la ISO 14067.

- **Daño potencial ecosistémico (EDP):**
Desarrollada por la *Swiss Federal Institute of Technology* para analizar impactos en ecosistema por el uso y transformación de tierras/suelos. Calcula daño a la diversidad de especies por el producto o servicio.
- **Análisis de Ciclo de Vida (LCA):**
Indicador Múltiple usado en niveles micro, meso y macro. El Protocolo de ISO 14040 es de las más completas, Requiere de mucha información no siempre obtenible lo que aumentaría la incertidumbre.
- **Mapa de Desempeño Ambiental (EPSM):**
Es una representación gráfica que integra 5 huellas (agua, carbono, energía, emisiones y ambiente de trabajo (días perdidos/peso producto) con una dimensión de costos transversal. Se representa en diagrama de araña, los costos se consideran en la pirámide de base del diagrama.
- **Índice de desempeño de ambiente sustentable (SEPI):**
Corresponde al volumen de la pirámide base del EPSM.

Por otro lado, Linder et al. (2017) recoge algunos tipos de indicadores de nivel micro y los clasifica según validez de su construcción, confiabilidad, transparencia, generalidad y principios de agregación. Esta tabla resulta útil para mostrar que no existe una métrica que cumpla en todas las categorías, se presenta en la Tabla 12. Comenta además que tanto el MCI como el MFA son buenos puntos de partida pero que presentan algunos problemas en su operacionalización.

Tabla 12 Evaluación de algunos indicadores de circularidad. Adaptado desde (Linder, Sarasini, & Van Loon, 2017).

Métrica	Validez de Construcción	Confiabilidad	Transparencia	Generalidad	Principio de Agregación
REPRO (e.g., Gehin et al.2008)	Baja	Baja	Media	Media	Baja
	Reuso y reciclaje son excluidos	Dependencia de suposiciones ex ante del potencial de remanufactura	Necesita información detallada sobre partes de productos, interfases y procesos	Aplicable a muchas industrias pero solo ciclos de remanufactura	No entrega principios de agregación a distintos tipos de ciclos para un solo valor.
Parte de Reutilización de Material - De la Cuna a la Cuna (C2C 2014)	Media	Desconocida	Low	Alta	Bajo
	No se integra el ajuste de los ciclos (la recuperación de energía se considera un caso especial)	No fue posible encontrar suficientes detalles para analizar esto.	Necesita datos (lista de materiales de todos los componentes) generalmente confidencial.	Puede ser aplicado a un gran rango de productos	No permite un valor de grano fino que resuma el grado de circularidad (cinco rangos). No hay justificación teórica para pesos para diferentes combinaciones de ciclos y materiales.
		Incluye suposiciones ex ante en cuanto a recirculación	Difícil de verificar por un tercero		
Índice de economía Circular (Di Maio and Rem 2015)	Baja	Alta	Alta	Baja	N/A
	Mide la tasa de reciclaje, excluyendo todos los otros efectos y ciclos de la economía circular	Se requiere de datos detallados de todos los productos y componentes que entran al centro de reciclaje – información que no está disponible comúnmente	Si el índice se basa en estándares (p.e. pasaportes de material)	Solo aplica para recicladores del mismo tipo	

Tabla 11 Evaluación de algunos indicadores de circularidad. Continuación

Métrica	Validez de Construcción	Confiabilidad	Transparencia	Generalidad	Principio de Agregación
Indicador de circularidad de material (EMF & Granta, 2015)	Media	Baja	Baja	Alta	Media
	Mide el uso de material virgen y los desechos resultantes enviados a rellenos o a recuperación energética.	Muchas entradas de datos requeridas pueden ser inciertas o depender de varios factores, como suposiciones ex ante sobre el destino de un producto después del uso y la eficiencia de los procesos de reciclaje.	Los datos requeridos (incluye la lista de materiales de todos los componentes) normalmente se consideran confidenciales.	El indicador se puede aplicar a un rango amplio de productos	La circularidad se representa por un solo valor en un rango entre 0 y 1.
	No se integra el ajuste de ciclos (se menciona como potencial desarrollo futuro)		Difícil de verificar por un tercero		Tiene dificultad para pesar diferentes tipos de ciclos.
					No es aplicable para cada tipo de producto, solo para productos de referencia que representan un grupo de productos similares
Ratio de valor ecoeficiente (Scheepens et al. 2016)	Baja	Baja	Media	Alta	Alta
	Mide el impacto ambiental por euro gastado, no se centra necesariamente en los ciclos de material, pero implícitamente toma en cuenta efectos de la economía circular como compartición, reuso y energías renovables	Requiere muchos datos de entrada para obtener salidas robustas. Los impactos ambientales durante el uso son incluidos. Genera incertezas dependientes de las condiciones de uso	Verificar el costo ecológico de un producto puede ser dificultarse por confidencialidad. El contenido del producto puede ser difícil de seguir en la cadena de suministros aguas arriba	El ratio se puede usar a una gran variedad de productos	Se puede entender fácilmente el valor por producto de uso específico (unidad funcional)

Ecoeficiencias circulares de Howard.

Howard et al. (2018) asocia indicadores a los principios de circularidad de la EMF y esquematiza requisitos para la creación de indicadores más centrados en ecoeficiencias circulares. Propone algunos de estos, los cuales para este trabajo se separaron en los que cabrían dentro del ciclo técnico y los que cabrían dentro del ciclo biológico de la EMF, además de adjuntar los requisitos centrales para poder ser aplicados.

Requisitos centrales que deben ser conocidos para aplicar indicadores de circularidad

- Mantenimiento, regeneración y reconstrucción de las existencias de capital natural y materiales biológicos.
- Uso total de las existencias de materiales técnicos, especialmente recursos y materiales críticos y "en riesgo".
- Cantidad de productos y materiales biológicos y técnicos que son recirculados o que se mueven en las cascadas.
- Calidad de productos y materiales biológicos y técnicos que son recirculados o que se mueven en las cascadas
- Longevidad de los materiales técnicos en circulación.
- Valor de los productos y materiales biológicos y técnicos que son recirculados.
- Porcentaje de uso de energía renovable

Potenciales indicadores de desempeño circular de Howard et al (2018)

Indicadores dentro del ciclo biológico

- Proporción de entradas biológicas y materias primas provenientes de fuentes restaurativas, regenerativas usando sistema internacional como el marco de Millenium Assesment.
- Cantidades totales de materiales biológicos no renovables y /o materiales provenientes de fuentes clasificadas como en riesgo, escasas o vulnerables.
- Proporción y calidad de materiales biológicos totales que regresan a la biosfera
- Valor del material biológico inicial contra las entradas en las cascadas y ciclos subsecuentes
- Energía renovable total como porcentaje del consumo total a través de toda la cadena de suministros

Indicadores dentro del ciclo Técnico

- Cantidad total de flujos de material técnico a través de la cadena de suministros y incluyendo material crítico.
- Ratio de productos y servicios diseñados para circularidad contra todos los tipos de producto y servicios en valores o masa de material.

- Total de productos y materiales técnicos recuperados y reciclados a través de todo el ciclo de vida ya sea en ciclos abiertos o cerrados.
- Calidad y longevidad planificada de los materiales técnicos en el ciclo de vida del producto
- Ventas de productos diseñados circularmente contra todas las ventas de productos y servicios.

3.2.2. Formulas Explícitas de Indicadores

Modelo Basado en Costos (Linder, Sarasini, & Van Loon, 2017)

El trabajo de Linder et al. (2017) incluye una propuesta de indicadores que parte desde la perspectiva económica de la circularidad. Además, indica que “una métrica debería enfocarse en el concepto de circularidad y no otra” además de redefinir la circularidad de un producto como la fracción de este que proviene de un producto usado. En este caso el indicador sería:

$$C = \frac{\text{Costos de partes Recirculadas del producto}}{\text{Costos totales del producto}}$$

Modelo Matemático (García-Barragán, Eyckmans, & Rousseau, 2019)

Es un modelo presentado en el trabajo de García-Barragán et al. (2019) que se basa en el flujo de los materiales y el sistema de valor. Proviene de la maximización del valor social de los materiales usados en la producción de *commodities* que proveen servicios a los consumidores. Se adapta al reciclaje y a otras medidas, como la extensión de vida o nuevos modelos de negocios.

El modelo presenta una ecuación representativa:

$$C^* = M^* - L^*$$

Esta mide las actividades de reciclaje y otras circularidades (M^*) y las actividades lineales (L^*), luego la circularidad neta del sistema (C^*) será la diferencia entre las dos anteriores.

Estas actividades son funciones de las tasas de producción, los costos, externalidades, capitales disponibles, producción y stock de materiales vírgenes, reciclados y re-reciclados.

Si bien aún es un modelo nuevo y mejorable, que necesita de una aplicación sobre un modelo de costos reales con información fidedigna, la utilidad de este modelo es que presenta desde un punto de vista matemático y económico una forma de definir de manera no ambigua el sistema circular con la vista siempre en la utilidad que representa para el sistema.

CirculAbility Model de Enel (Enel , 2018)

Es un modelo de indicador de circularidad desarrollado por le grupo Enel para productos, se basa en los flujos de materia y energía con enfoques circulares. Capaz de incluir los beneficios de extender vida útil de productos y otras actividades circulares de ciclo abierto.

La fórmula es:

$$Ci = Cf + (1 - Cf) \times \frac{Cu - 1}{2 \times Cu}$$

Con Ci como índice de circularidad, Cf flujo circular, Cu Uso circular. Los detalles de este modelo se presentarán en la sección 3.4.

En general los indicadores ayudan a identificar los aspectos de la producción operación y cadena de suministros de la industria y entre diferentes organizaciones. Sin embargo, no tienen sentido si no se realizan las innovaciones necesarias en la organización para transitar a la circularidad. Esto significa adoptar el sistema de diseño de productos con el fin de facilitar la reinserción de los materiales por cualquiera de las 3R's, esto es, hacer diseño modular para facilitar el cambio de partes, diseñar para facilitar el desarmado o re manufactura, poder separar eficazmente materiales renovables de los no renovables y diseñar sin el uso de materiales tóxicos. Generar modelos de negocios que permitan el cierre de los ciclos, ya sean abiertos (con agentes externos a la empresa) o cerrados (en la misma empresa), lo permite ofrecer productos como servicios (el producto siempre es de la empresa lo que permite facilidad para reparación o recuperación de materiales, quitándole una carga al consumidor). Manejo de Redes Inversa, esto es, mantener conexión de información y seguimiento de materiales en toda la red de suministros, eliminar algunos problemas de privacidad o confidencialidad para facilitar la eficacia del sistema. Y por último establecer habilitadores del sistema, como gobiernos u organizaciones que legislen o estandaricen prácticas de economía circular(*Internet of Thing y Blockchain*). (Howard, Hopkinson, & Miemczyk, 2018)

3.3. Sumario

Los resultados de la revisión bibliográfica han mostrado que existe un aumento en las publicaciones de economía circular, también la cantidad de reseñas bibliográficas ha ido aumentando en busca de poder consensuar una definición al respecto. De esto se puede establecer que la economía circular se está instalando como una de las mejores alternativas para sistematizar el desarrollo sustentable por medio de establecer la separación de la escasez de recursos con el crecimiento económico, a través de mantener los materiales dentro del sistema económico a su mayor calidad y en todos los niveles basándose en los principios de las 3R's pero que une de forma sistemática y bajo modelos de negocios a todos los miembros de la cadena de suministros de forma de crear y cerrar los ciclos de materiales. Se considera con diseño regenerativo y restaurativo, refiriéndose a los ciclos biológicos y técnicos

respectivamente con el fin de recuperar stock de materiales y desacoplar el crecimiento económico de la escasez de recursos; funciona bajo energías renovables y para poder ser aplicada necesita de facilitadores del sistema como la aplicación de normativas e innovaciones que permitan la mejor interacción entre los miembros de este. Por lo que para transicionar las empresas y países deben empezar a cerrar los ciclos de flujo de materiales, crear innovación en los modelos de negocios, incentivar desde el ámbito público y privado con productos y servicios que tengan características circulares. Y si bien la circularidad no es la panacea a los problemas ambientales y la respuesta final al desarrollo sostenible, es hasta ahora de las mejores operalizaciones del pensamiento sustentable en la economía.

Al igual que las dificultades en su definición, se han ido publicando distintos análisis y aplicaciones de métricas de circularidad en búsqueda de representar de mejor manera la transición desde el modelo lineal. Esta variedad de publicaciones ha dado con diferentes orientaciones de métricas, primero a nivel de escala, donde los análisis de nivel macro y meso son los más desarrollados enfocándose en circularidades regionales y de parques industriales, esto porque la definición de variables, identificación de flujos y cerrar ciclos es más sencilla, existiendo ejemplos basados en materiales, energía, costos e incluso emergía. En cambio, las métricas de nivel micro pesan con la falta de información de la misma empresa, de la cadena de suministros o la dificultad de cerrar ciclos sumado a la diferencias entre distintos tipos de productos, impidiendo una correcta interpretación de la métrica.

A pesar de lo anterior, los esfuerzos por encontrar una manera de medir la circularidad han generado distintos enfoques para empezar a cumplir sus principios y medirla de forma lo más fidedigna posible. Se presentaron indicadores que varían en tipologías y variables entre únicas y múltiples, que miden materiales o el ciclo de vida de los productos, otros sugiriendo indicadores tipo KPI específicos como medir la cantidad de material de origen regenerativo o en función a costes comparando la cantidad de productos diseñados circularmente con la cantidad total de productos vendidos.

De todos los análisis de indicadores que se indican, y siguiendo las recomendaciones de los estudios, se considera que para implementar la circularidad en primera instancia es mejor partir por un indicador de flujo de material como el que diseña la EMF, ya que puede medir la cantidad de materiales recirculados dentro del sistema utilizando fácilmente inputs de flujos de estudios de análisis de ciclo de vida, a pesar de no poder identificar los impactos de cada uno de los. Por lo tanto, se podría complementar este análisis con el ACV y la información de los impactos.

Con estos antecedentes se propone una metodología para medir la circularidad en la fase de construcción de plantas de energía la siguiente sección.

3.4. Metodología

Se propone utilizar un modelo de circularidad de flujo de material basado en un prototipo de Enel para productos y servicios "CirculAbility". Se selecciona este entre los vistos, porque presenta una fórmula clara que relaciona las 3R's y evalúa entradas y salidas circulares, permite la utilización de los flujos de los ACV de la empresa y a distintos niveles de escala, lo que se puede implementar en MIMA.

A partir del modelo original se presentan los siguientes supuestos para adaptarlo al contexto de una fase de construcción de plantas de generación de energía:

- La planta será considerada como el producto del proceso.
- El límite del análisis es la fase de construcción.
- Serán indicadores centrados en la circularidad del material.
- Los materiales de los cuales no se pueda acceder a su origen, es decir, saber cuál es su porcentaje de masa reciclado, reusado o remanufacturado, serán considerados como material virgen.
- Los materiales enviados a recuperación valórica se considerarán como reciclados, ya que en el modelo no discrimina entre el tipo de recirculación.
- Para conocer la cantidad de combustibles usados en transporte se hizo la conversión a partir de las emisiones equivalentes de CO2 que presentan los estudios de ACV.
- El transporte en TonKm se transforma a combustible por medio de las emisiones de carbono Fuel (Diesel o Jet) eq.
- Los equipos presentados en unidades se transforman a sus pesos según las hojas de proveedores.
- Las energías no renovables se contabilizarán con base a los materiales usados para su producción. En el caso de la maquinaria, en los ACV se contabiliza en el combustible utilizado.
- El indicador se debe trabajar en base a la unidad funcional de los estudios (1 MW).

El indicador se representa como C_i , y es la suma del flujo circular de material con el uso circular de los materiales.

$$C_i = C_f + (1 - C_f) \times \frac{C_u - 1}{2 \times C_u}$$

- C_i : Índice de circularidad
- C_f : Flujo circular
- C_u : Uso circular

Para este caso el uso circular no tiene aplicación por lo que el uso de los materiales corresponde a la fase de operación de la planta.

Queda:

$$Cf = \frac{\left(2 - \left(\frac{V}{Ti} + \frac{W}{To}\right)\right)}{2}$$

Donde se considera el peso de los materiales no sustentables en V/Ti y el peso de los materiales de disposición final W/To , donde:

- *Ti: Input total.*
- *To: Output total.*
- *V: Input total de material virgen no sustentable.*
- *W: Output total enviado a disposición.*

A su vez la entrada total se puede calcular como:

$$Ti = RCni + RUi + RES + V$$

- *RCni: input neto total desde reciclaje.*
- *RUi: input total de reúso.*
- *RES: input total de origen renovable y de reducción de input (eficiencia del proceso).*
- *V: total input de material virgen no renovable.*

$$To = RCno + RUo + O + W$$

- *RCno: output total enviado a reciclaje.*
- *RUo: output total enviado a reúso.*
- *O: output incluido al final del producto.*
- *W: desechos enviados a disposición.*

$$W = WRCi + WRCo + Wo$$

- *WRCi: desechos producidos en la fase de reciclaje antes del input.*
- *WRCo: desechos producidos en la fase de reciclaje después de la salida.*
- *Wo: desechos producidos en el proceso principal del sistema.*

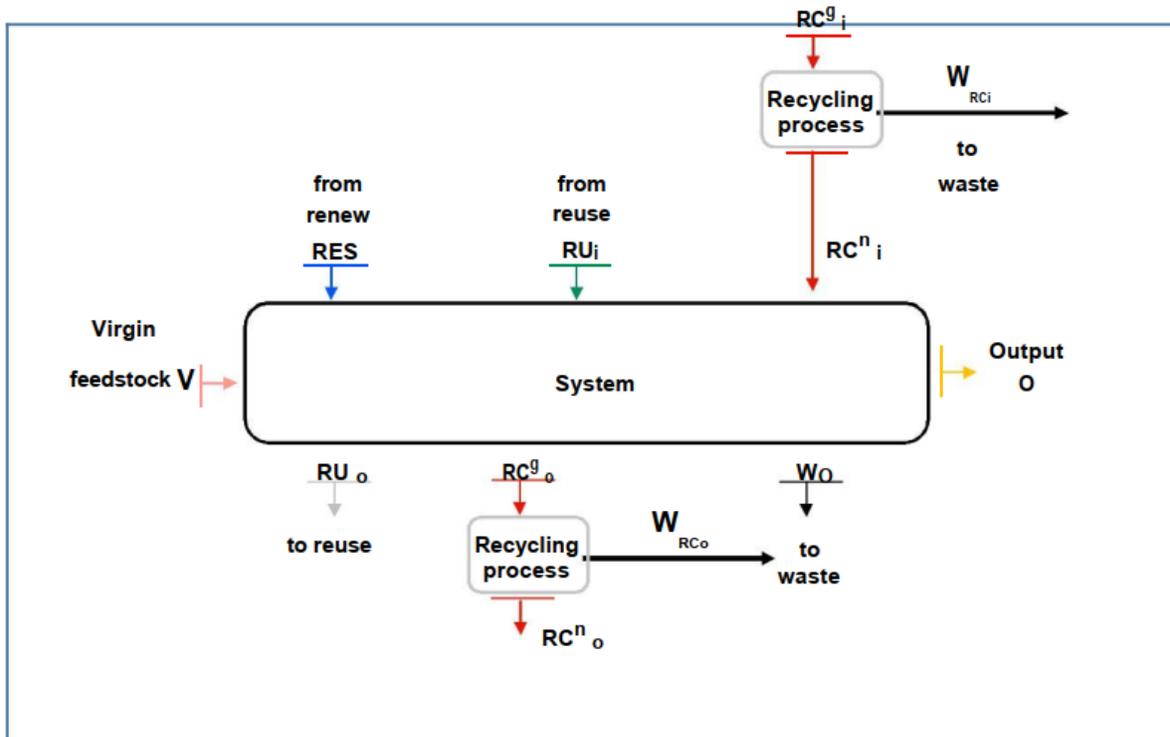


Figura 7 Diagrama de flujo del modelo.

Fuente: (Enel S.p.A, 2018)

Este modelo cuenta con una adopción de los principios de circularidad anteriormente definidos y presenta variables sencillas de identificar a través de los ACV de la empresa, es un modelo del tipo MFA, recomendado para iniciar los estudios de transición. Entre las limitantes se puede destacar que hasta la fecha no es capaz de discriminar en valor de circularidad a los productos que entren por distintos ciclos del sistema (ya sea que sea reciclado (más esfuerzo) o reusado(menos esfuerzo)), tampoco discrimina entre los ciclos biológicos y técnicos. Aún así entrega una buena aproximación a los materiales que son recirculados dentro de cualquier actividad, pudiendo calcularse tanto a nivel de un proceso de construcción específico, para la planta entera, un grupo de plantas o incluso a nivel nacional.

3.5. Caso de Estudio

Se utilizaron los ACV de dos plantas de Enel Green Power para estudiar el comportamiento del indicador. Como indica la metodología se transformaron los flujos a equivalente másico y en primera instancia se realizó un gráfico de torta para identificar los procesos con mayor flujo de materiales que se pueden identificar en cada una de las plantas, ver Gráfico 1 y Gráfico 2. También se comparan los porcentajes de material utilizados en cada una en el Gráfico 3.

En el caso de la planta eólica, el proceso de mayor impacto en materiales es el de movimiento de tierras, este corresponde a la adecuación del terreno para la cimentación y fundación. Y en el caso de la planta solar este se divide en el transporte y el movimiento de tierras. Por medio del Gráfico 3 se puede identificar que los flujos críticos de material para ambos casos son el movimiento de tierras, hormigón y el uso de agua. En el caso de la planta solar destacan los paneles solares.

Para transporte aéreo y marítimo y terrestre se usaron las conversiones de toneladas de Co_2eq a toneladas de combustible Jet A1 para el primero ($3.15 \text{ tCo}_2\text{eq/tJetA1}^4$), y a toneladas de Diesel ($3.15 \text{ tCO}_2\text{eq/tDiesel}^5$) para los otros dos.

Para las unidades de generación (aerogeneradores y paneles) se utilizaron las siguientes conversiones:

Tabla 13 Peso de generadores de energía

Fuente: Elaboración propia

Generador	Peso [ton]
Turbina G90 2.0 MW	94.51 ⁶
Modulo solar JKM315-75 295-315 W	0.025 ⁷

⁴ Verifavia <http://bit.ly/2W3CO5Y>

⁵ Calculadora de Emisiones de CO2 <http://bit.ly/2KT4RDL>

⁶ Fernández (2013). Análisis de Ciclo de Vida de 1kWh generado por un Parque Eólico onshore Gamesa G90 2.0 Mw.

⁷ Data Sheet Módulo JKM315-72 [https://www.jinkosolar.com/ftp/EN-JKM315P-72\(4BB\).pdf](https://www.jinkosolar.com/ftp/EN-JKM315P-72(4BB).pdf)

Las tablas de los datos convertidos que se utilizaron en el modelo y en los análisis se encuentran en el Anexo A.

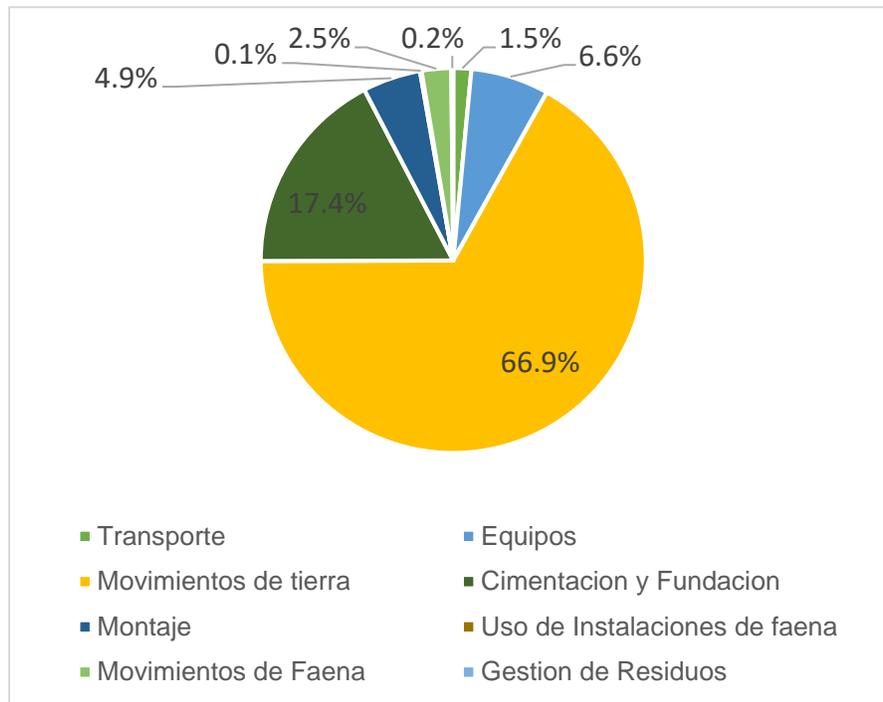


Gráfico 1 Distribución de materiales en fase de construcción de planta eólica.

Fuente: Elaboración Propia desde (Ulearn a, 2018)

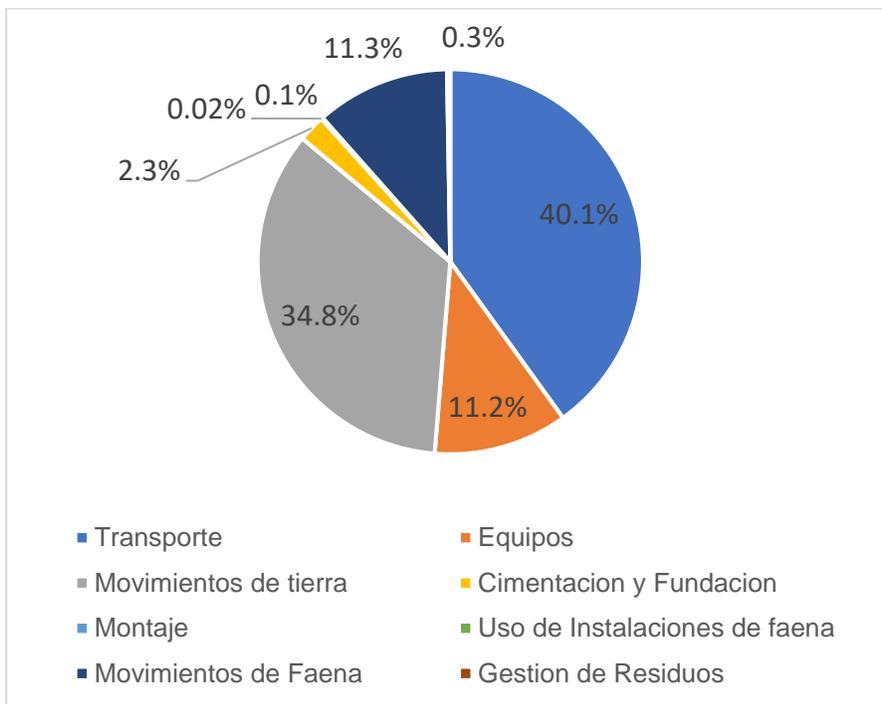


Gráfico 2 Distribución de materiales en fase de construcción de planta solar.

Fuente: Elaboración propia desde (Ulearn b, 2018)

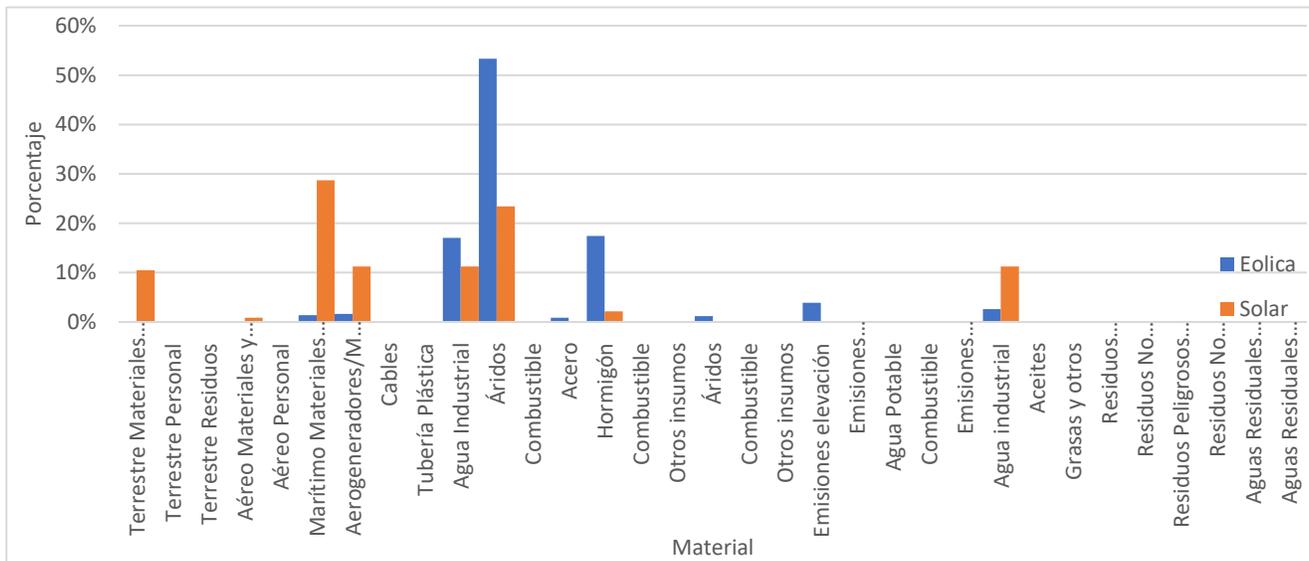


Gráfico 3 Comparación de utilización de material por tipo de planta.

Fuente: Elaboración propia en base a (Ulearn a, b, 2018)

Como se puede identificar, la distribución de materiales muestra que en el caso de la planta eólica la mayoría de los materiales se encuentra en el movimiento de tierras, tratándose de los áridos y el agua industrial principalmente. En el caso de la planta solar el peso se lo llevan los combustibles por el transporte de materiales y los movimientos de tierra en porcentajes similares, seguidos por el peso de las unidades generadoras.

Una vez identificados los flujos críticos de las plantas se aplicó la metodología obteniéndose las variables del indicador. En el ACV se desconoce si existe algún tipo de recirculación de los materiales de entrada, por lo que todas las entradas se consideran como materiales vírgenes en ton/MW. Existen salidas que son enviadas a gestión de residuos, donde existe recirculación de aguas principalmente. Como se puede denotar. La variable “W” también resulta ser pequeño en comparación a la variable “O” esto significa una alta eficiencia en la construcción ya que la mayoría del material permanece en el edificio. Los coeficientes Cfin y Cfout se colocaron para hacer visible la ratio de circularidad en las entradas y salidas según:

$$C_{fin} = 1 - \frac{V}{T_i}$$

$$C_{fout} = 1 - \frac{W}{T_o}$$

Tabla 14 Resultados del Indicador, variables en ton/MW y coeficientes sin unidad.

Fuente: Elaboración Propia en base a (Ulearn a, b, 2018)

Parámetros	Eólica	Solar
Rcin	0.00	0.00
Ruin	0.00	0.00
RES	0.00	0.00
V	1834.47	860.75
Ti	1834.47	860.75
Rcon	2.12	1.51
Ruo	0.00	0.00
O	1470.75	664.50
W	361.60	194.74
To	1834.47	860.75
Cfin	0.00	0.00
Cfout	0.80	0.77
Cf	0.40	0.39

Finalmente se presenta el valor de 0.4 y 0.39 de circularidad de materiales para la planta eólica y solar respectivamente que también pueden representarse como 40% y 39% si se desea. Se explican estos valores por el hecho de gran parte de los materiales de construcción permanecen en la planta (variable O), teniendo diferencias en el flujo de aguas industriales (que se contabilizan en W).

Aún así el número es bajo dado que ninguno de los materiales utilizados tiene algún tipo de origen circular conocido, tampoco se pudieron localizar ciclos dentro de los flujos internos, mas que los envíos a reciclaje que se estipulan en el ACV, cuya cantidad es mínima en comparación al resto. Por lo que el resultado se debe básicamente a que la construcción de las plantas de Enel es eficiente en el uso de los materiales en el sentido que no se generan grandes desechos. El uso y desmantelación de la planta no se incluyen este análisis por lo que la evaluación de la circularidad en esas fases no se puede incluir en esta metodología, aun así, se representa fielmente el uso que tienen los materiales en la fase de construcción (cuyo fin es construir y quedar en la planta).

El modelo, dentro de las variables de ingreso, también muestra la diferencia entre la cantidad de materiales que se necesitan para construir las plantas de generación de energía, que, si bien va a depender del tipo de planta que se vaya a construir, también cuentan las condiciones del terreno, el suelo utilizado (como acondicionamiento del terreno).

Lo anterior presenta una oportunidad de avance a la circularidad de las plantas, partiendo desde un diseño que se centre en mantener los materiales dentro del sistema y exigir a los proveedores el uso de materiales de origen circular, generar las redes para enviar los residuos (desde ahora recursos de salida), cerrar ciclos internos y maximizar la eficacia de los materiales.

3.5.1. Limitaciones del modelo

El modelo representa solo una parte de la circularidad centrada en los flujos de materiales, los supuestos están acotados a la fase de construcción de la planta, pero se presenta como una buena aproximación de esquematización de la circularidad para la empresa y la del proceso de construcción. Permite tomar estas variables presentes en el ACV y darles un análisis de circularidad, desde eso poder definir aspectos en los que se priorice innovar, definir y cerrar ciclos, permitir sistematizar la información circular generando lazos con las empresas contratistas y proveedores para generar la simbiosis que se desea en los sistemas circulares.

El modelo también es mejorable en el sentido de que se pueden agregar pesos a las variables que pasen por los distintos ciclos, ya sea reciclaje, reúso o remanufactura o si bien son materiales de ciclo técnico o biológico.

Y si bien la metodología es del tipo MFA e ignora los impactos generados, se puede complementar con los resultados de ACV, y también con algún otro indicador de ecoeficiencia a medida que vayan revelándose los orígenes de los materiales y se comiencen a cerrar los ciclos de materiales. También debe comenzar a incluirse el valor económico de los materiales para diferenciar su apreciación económica, que, si bien no es perfecta, representa la utilidad en forma numérica.

3.5.2. Análisis de impactos ambientales dentro de la circularidad

Dentro del análisis de circularidad surgió la siguiente duda con respecto a los impactos de un sistema circular, ¿el esfuerzo extra en reciclar materiales hace realmente tener menos impactos ambientales en cada uno de sus procesos?

Para intentar responder la pregunta anterior, se inició un análisis de los impactos ambientales principales de los respectivos ACV, huella de carbono e hídrica, con los flujos de material por medio de un análisis de correlaciones lineales.

En primera instancia se graficó en porcentaje la huella de carbono, hídrica y flujo de material para cada material para la planta solar. Ver Gráfico 4.

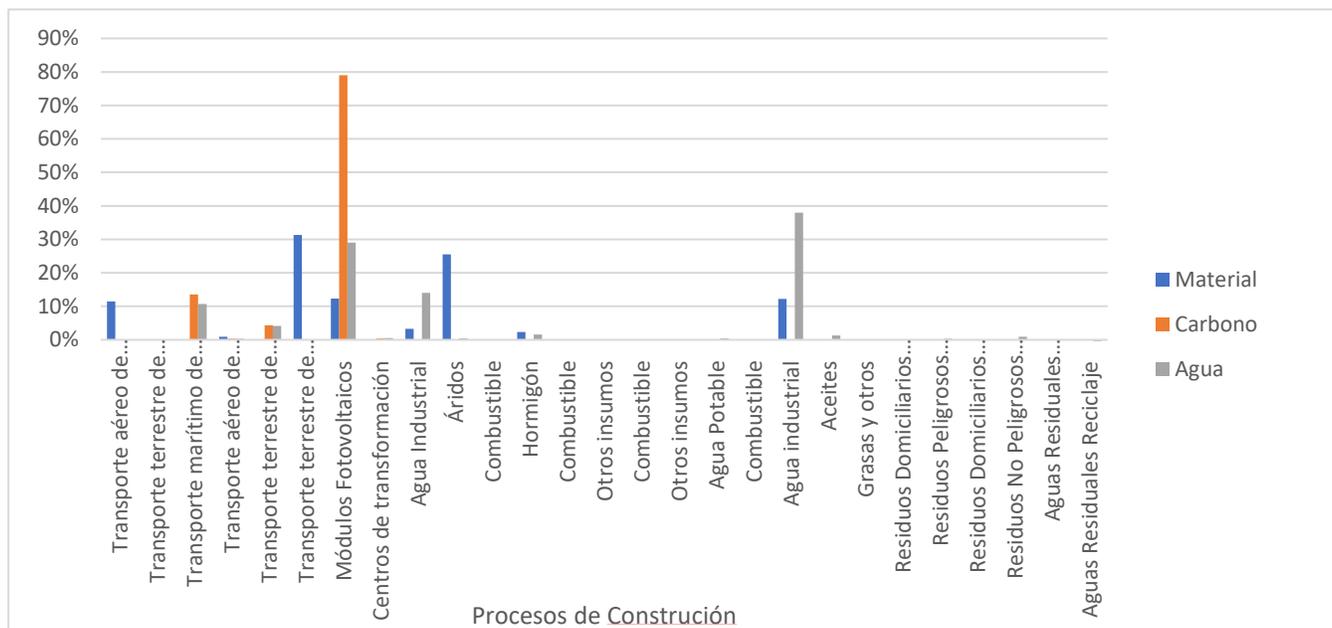


Gráfico 4 Huella de carbono, hídrica y flujo de material para cada material en la planta solar.

Fuente: Elaboración propia en base a (Ulearn b, 2018)

Luego el análisis de correlaciones muestra en verde las mejores correlaciones directas, en amarillo las bajas correlaciones y en rojo las correlaciones indirectas. Además de las correlaciones por proceso, se realizó una correlación entre todas las variables, es decir todos los flujos de materiales versus todas las huellas respectivas. Ver Tabla 15.

Tabla 15 Análisis de correlaciones de planta solar.

Fuente: Elaboración propia en base a (Ulearn b, 2018)

Correlaciones	Carbono-Agua	Material-Carbono	Material-Agua
Transporte	1.00	1.00	1.00
Recepción de equipos	-	-	-
Movimiento de tierras	-0.94	0.68	-0.38
Cimentación y Fundación	1.00	1.00	1.00
Montaje	-	-	-1.00
Uso de instalaciones de Faena	-	-	-1.00
Mantenimiento de Faena	0.77	0.76	1.00
Gestión de Residuos	-0.85	-0.62	0.21
Total	0.56	0.33	0.45

De la misma forma, se realizó el grafico y tabla de correlaciones a la planta eólica obteniéndose la Tabla 16 y el Gráfico 5

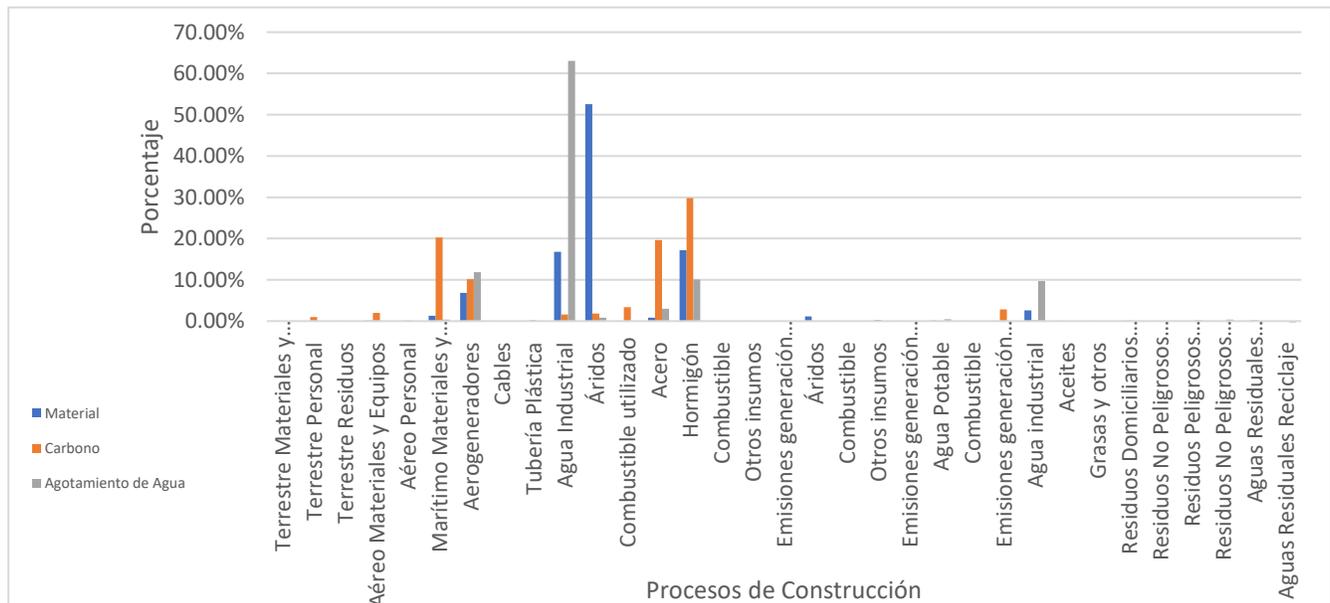


Gráfico 5 Huella de carbono, hídrica y flujo de material para cada material en la planta eólica.

Fuente: Elaboración propia en base a (Ulearn a, 2018)

Tabla 16 Análisis de correlaciones de planta eólica.

Fuente: Elaboración propia en base a (Ulearn a, 2018)

Correlaciones	Carbono-Agua	Material-Carbono	Material-Agua
Transporte	1,00	1,00	1,00
Recepción de equipos	1,00	-0,89	-0,89
Movimiento de tierras	0,35	0,85	-0,20
cimentacion y Fundacion	0,94	0,82	0,98
Montaje	0,91	-0,38	-0,08
Uso de instalaciones de			
Faena	-0,53	-0,52	1,00
Mantenimiento de Faena	1,00	1,00	1,00
Gestión de Residuos	-0,32	-0,06	-0,65
Total	0,13	0,18	0,29

Los datos de mayor impacto en ambas plantas son: El transporte tiene evidentemente una relación directa material-carbono pues el combustible que se utilizó se obtuvo desde las mismas emisiones. En cuanto a las relaciones negativas se explican ya que algunos de los materiales poseen huellas relativas inversamente, esto es, por ejemplo tener huellas de carbono directas con el material e inversas con la huella de agua, y no se debe olvidar que los indicadores representan las correlaciones de todos los materiales que se usen en la actividad. Entonces para el uso de instalaciones en el caso de la planta eólica, se representa que los materiales de mayor cantidad poseen una baja huella de carbono (relación inversa) y que son directas con la huella hídrica. De las correlaciones totales se puede concluir que no existe una forma igualitaria relacionar las huellas con los flujos de materiales para las plantas en general, esto dependerá de la cantidad de material que se utilice y de las huellas que conlleven cada una de las actividades, habiendo casos de mucho material que tenga nula o baja huella ambiental y otros donde si se cumpla esta relación de alto impacto y alta intensidad de uso.

Por otro lado, interesa de manera particular la relación del hormigón con las huellas, en los análisis demuestra una alta relación esto dado por los factores de caracterización que se usaron en los ACV, aun así, el hormigón se eleva como uno de los materiales más intensos ambientalmente para este análisis, por lo que descubrir nuevas formas de disminuir sus impactos será beneficioso para la realización de proyectos.

Se estima que el usar hormigón con vidrio reciclado genera una disminución del 25 % al 40% de la huella de carbono del concreto y el precio de este solo incrementaría un 3% (Ellen

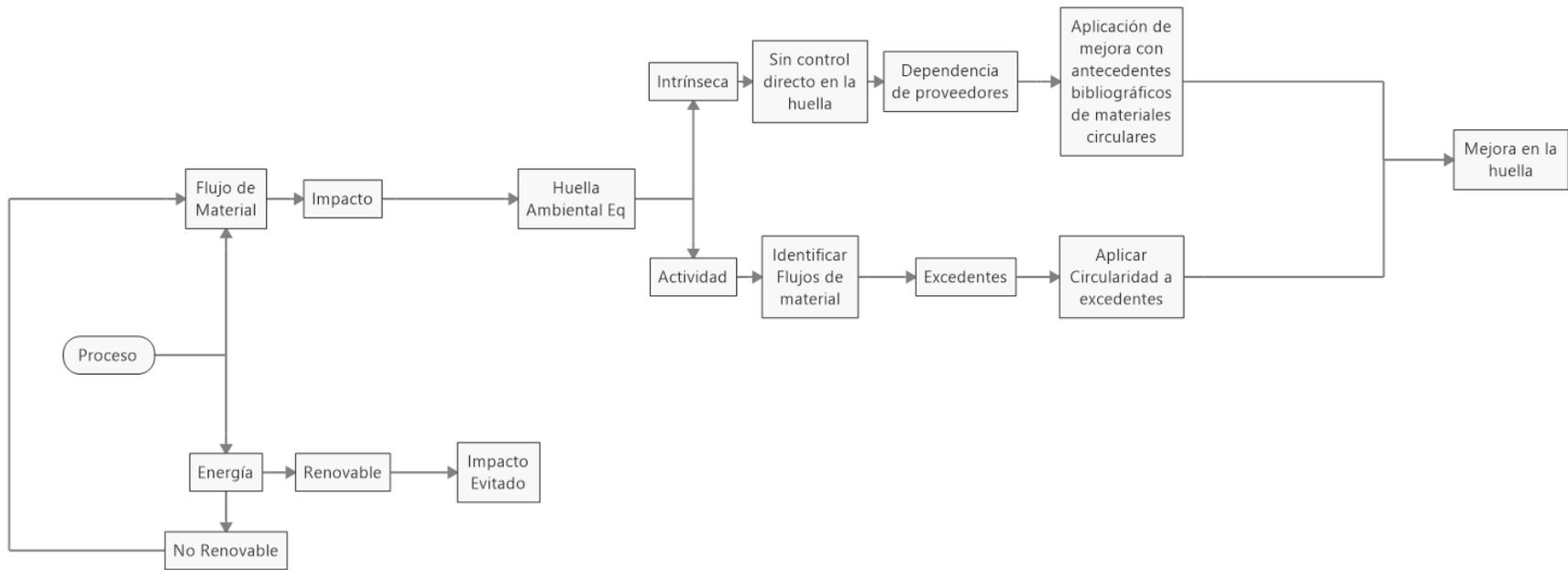
MacArthur Foundation, 2016). Si el hormigón de la planta eólica representa cerca del 29% de las emisiones totales, al utilizar el hormigón reciclado en la construcción se disminuiría entre un 7% y un 13 % las emisiones totales de CO₂ eq para la planta eólica.

Este resultado es significativo ambientalmente si se evalúa la cantidad de hormigón que se utiliza en las dos plantas, por lo que la aplicación de la circularidad convendría desde este punto de vista, aunque faltaría evaluar los costes netos de esta aplicación.

De todas formas, se ha diseñado una tabla de decisiones que permita estimar impactos de aplicaciones de economía circular basados en referencias bibliográficas. El fin es aplicar la economía circular siempre y cuando disminuya los impactos ambientales del proceso cualquiera que sea. Este diagrama se basa en los principios de economía circular acordes a lo que se presentó en la Sección 3.

Figura 8 Mapa de decisiones para aplicación de circularidad en fase de construcción.

Fuente: Elaboración Propia



4. Conclusiones

Se logró realizar una revisión completa sobre el concepto de economía circular, lo que permitió una definición aceptada, en este caso la definición de Kirchher et al. (2018) y sus principios base, utilización de las 3R y pensamiento C2C para cerrar ciclos, utilización de ACV's para análisis de los materiales. De esta forma se puede acoplar este conocimiento al sistema de información que posee Enel, MIMA.

Se comprobó que la economía circular no ha hecho más que aumentar su popularidad tanto empresas como en la academia, lo que ha permitido ir avanzando en el consenso de su definición como también en la forma en la que se mide. Se descubrió una serie de indicadores que se han ido desarrollando, todos con diferentes enfoques, pero ninguno que represente a la circularidad completamente, sin embargo, se tuvo en cuenta que los análisis de flujo de material son una buena aproximación para cualquier organización que desee aplicar un indicador de producto o incluso servicio. En base a esto se utilizó y profundizó en un modelo de MFA que Enel poseía para productos y servicios.

La aplicación de la metodología entregó un valor de 0.4 y 0.39 para las dos plantas que se estudiaron, valor que se debe en primera parte a que se consideraron todos los materiales de entrada a la fase de construcción como vírgenes al no tener información respecto a algún origen circular de estos y en segundo lugar a que la mayoría de estos permanecían en la construcción, teniendo un porcentaje de desechos de menos del 0,15% para cada planta.

En cuanto a las limitaciones del modelo, se establece que se aplica solo para la fase de construcción, donde se puedan obtener los flujos de material, sistemáticamente habilitados desde los ACV de la empresa. Sin embargo, se debe comentar que el nivel de profundidad de estos análisis genera una brecha para profundizar en la creación de ciclos y establecer conexiones de circularidad con los miembros de la red de suministros, al faltar la información de origen de los materiales y salidas de los mismos subprocesos. Esto explicado por el enfoque “de la cuna a la tumba” que poseen la mayoría de los análisis de ciclo de vida.

Dado lo anterior se hace el llamado a las empresas y organizaciones que quieran comenzar con una transición a la circularidad a evaluar sus flujos de material en primera instancia, redefinirlos, crear ciclos cerrados o abiertos que permitan darle la máxima eficacia a los materiales, para luego complementar con otros indicadores de circularidad para ir completando uno a uno los objetivos de la economía circular.

Para complementar la metodología se presentan en la parte sección de resultados bibliográficos un set de parámetros relacionados a los principios de circularidad los cuales permitirían ir avanzando en las innovaciones necesarias para generar un indicador más profundo. Además se acompañan los resultados de la metodología con un análisis de las

huellas ambientales y flujos para definir la relación entre la circularidad y los impactos ambientales. Al respecto se concluye, que los impactos varían dependiendo del tipo de planta, las actividades que se posean y los materiales que se utilicen, no pudiendo generalizar sobre los impactos de la construcción para agregar estos parámetros al indicador, pero si pudiéndose identificar que existen actividades que son más impactantes que otras en distintas categorías. Aún así se debe tener en cuenta que la circularidad solo tendría sentido si los impactos ambientales disminuyen con su aplicación y para esto se da un ejemplo específico de esa visión, al utilizar teóricamente un material de hormigón de origen circular que disminuiría hasta en un 13% las emisiones totales de la planta eólica. Además de esto se acompaña este análisis con un esquema general que ayudaría a realizar este tipo de relaciones al querer comparar materiales de orígenes circulares versus materiales que se usen en el negocio actualmente.

Para finalizar se recomienda seguir investigando en la temática, la economía circular si se está presentando como la mejor forma de operacionalizar el desarrollo sustentable, pero requiere de habilitadores y de innovaciones en todos los niveles y en el caso específico de Enel se recomienda comenzar a establecer una sistematización de la información en cada uno de los procesos de la fase de construcción pensando en el detalle de los flujos de las actividades para la creación de ciclos e innovaciones que permitan la aplicación de los principios de diseño, modelo de negocios, red de conexión y habilitadores del sistema.

5. Referencias

- CIRAIG. (2015). *Circular Economy: A Critical Literature Review of Concepts*.
- Dong, Y. H., & Ng, S. T. (2015). A life cycle assessment model for evaluating the environmental impacts of building construction in Hong Kong. *Building and Environment* 85 (2015).
- Elia, V., Grazia, M., & Tornese, F. (2017). Measuring Circular Economy Strategies Through Index Methods: A Critical Analysis. *Journal of Cleaner Production*, 2741-2751.
- Ellen MacArthur Foundation. (2016). *The circular Economy and the Promise of Glass in Concrete*.
- Ellen MacArthur Foundation. (2017). *Ellen MacArthur Foundation*. Obtenido de Schools Of Thought: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/circular-economy/concept/schools-of-thought>
- Ellen Macarthur Foundation; Granta. (2015). *Circularity Indicators: An Approach to Measuring Circularity*.
- EMF. (2015). *Circularity Indicators: An approach to Measuring Circularity*.
- Enel. (s.f.). *Enel*. Obtenido de Conoce Enel Chile: <https://www.enel.cl/es/conoce-enel/enel-chile.html>
- Enel. (s.f.). *Enel Chile*. Obtenido de Grupo Enel: <https://www.enel.cl/es/conoce-enel/grupo-enel.html>
- Enel S.p.A. (2018). *CircularAbility Model: Methodological Approach*.
- García-Barragán, J., Eyckmans, J., & Rousseau, S. (2019). Defining and Measuring the Circular Economy: A Mathematical Approach. *Ecological Economics* 157 2019, 369-372.
- Geng, Y., Sarkis, J., Ulgiati, S., & Zhang, P. (2013). Measuring China's Circular Economy. *Science*, 1526-1527.
- Ghisellini, P., Cialani, C., & Ulgiati, S. (2014). A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. *Journal of Cleaner Production*.

- Hossain, M. U., & Thomas, S. (2018). Critical consideration of buildings' environmental impact assessment towards adoption of circular economy: An analytical review. *Journal of cleaner Production*, 763-780.
- Howard, M., Hopkinson, P., & Miemczyk, J. (2018). The Regenerative Supply Chain: A Framework for Developing Circular Economy Indicators. *International Journal of Production Research*.
- Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation & Recycling*, 221-232.
- Linder, M., Sarasini, S., & Van Loon, P. (2017). A Metric for Quantifying Product-Level. *Journal of Industrial Ecology*, 545-558.
- MMA. (07 de 12 de 2018). Corfo y Medio Ambiente presentan 25 proyectos de Economía Circular que innovarán en el país. *Noticias MMA*. Recuperado el 08 de 01 de 2019, de <http://portal.mma.gob.cl/corfo-y-medio-ambiente-presentan-25-proyectos-de-economia-circular-que-innovaran-en-el-pais/>
- Negishi, K., Tirura-Barna, L., Schiopu, N., Lebert, A., & Chevalier, J. (2018). An Operational Methodology for Applying Dynamic Life Cycle Assessment to Buildings. *Building and Environment* 144 (2018), 611-621.
- Niero, M., & Schmidt, X. (2018). The Role of Life Cycle Sustainability Assessment in the Implementation of Circular Economy Principles in Organizations. *Procedia CIRP* 69 (2018), (págs. 793-798). Copenhagen, Denmark.
- Prieto-Sandoval, V., Jaca, C., & Ormazabal, M. (2017). Towards a consensus on the circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 605-615.
- Ulearn. (2018). *Análisis de Ciclo de Vida Infraestructura de Generación de Energía de Parque Eólico Wayra*.
- Ulearn. (2018). *Análisis de Ciclo de Vida: Infraestructura de Generación de Energía de Central Solar Rubí - Fase de Construcción*.
- wbcd. (2017). CEO Guide to The Circular Economy.
- WCED. (1987). *Our common Future, Chapter 2: Towards Sustainable Development*.

6. Anexos

Anexo A: Datos que Ingresaron al Modelo y Huellas Ambientales.

Tabla 17 Flujos máxicos de las dos plantas

Proceso	Flujo	Eólica	Solar	Unidad	Flujo máxico por MW [ton]	
		Flujo por MW	Flujo por MW		Eólica	Solar
Transporte	Terrestre Materiales y Equipos	0,001	28,48	toe	0,00	90,29
	Terrestre Personal	0,46	0,00	toe	1,46	0,01
	Terrestre Residuos	0,00	0,02	toe	0,00	0,05
	Aéreo Materiales y Equipos	0,87	2,31	toe	2,74	7,26
	Aéreo Personal	0,08	0,055	toe	0,24	0,17
	Marítimo Materiales y Equipos	7,80	78,21	toe	24,72	247,92
Recepción de equipos	Aerogeneradores/Módulos PV	0,32	3881,52	und	30,00	97,04
	Cables	0,06	0,00	ton	0,06	0,00
	Tubería Plástica	0,11	0,00	ton	0,11	0,00
Movimiento de Tierras	Agua Industrial	312,62	97,0	m3	312,62	96,96
	Áridos	979,79	202,2	ton	979,79	202,20
	Combustible	1,27	0,9	ton	1,27	0,85
Cimentación y Fundación	Acero	16,10	0,00	ton	16,10	0,00
	Hormigón	320,14	18,8	ton	320,14	18,75
	Combustible	0,48	0,85	ton	0,48	0,85
	Otros insumos	0,00	0,00	ton	0,00	0,00
Montaje	Áridos	21,46		ton	21,46	0,00
	Combustible	1,09	0,16	ton	1,09	0,16

	Otros insumos	0,01	0,04	ton	0,01	0,04
	Emisiones generación eléctrica	0,16		ton (diésel)	0,16	0,00
Uso de Instalaciones de Faena	Agua Potable	2,14	0,9	m3	2,14	0,90
	Combustible	0,17	0,01	ton	0,17	0,01
	Emisiones generación eléctrica	0,16		ton (diésel)	0,16	0,00
Mantenimiento de Faena	Agua industrial	48,05	96,96	m3	48,05	96,96
	Aceites	0,00	0,32	ton	0,00	0,32
	Grasas y otros	0,00	0,01	ton	0,00	0,01
Gestión de Residuos	Residuos Domiciliarios Disposición	0,19	0,04	ton	0,19	0,04
	Residuos No Peligrosos Disposición	0,10	0,75	ton	0,10	0,75
	Residuos Peligrosos Disposición	0,05	0,03	ton	0,05	0,03
	Residuos No Peligrosos Valorizable	0,50	0,75	ton	0,50	0,75
	Aguas Residuales Disposición	0,58	0,00	m3	0,58	0,00
	Aguas Residuales Reciclaje	1,62	0,76	m3	1,62	0,76

Tabla 18 Flujos Másicos y Porcentuales de planta solar

Proceso	Flujo	Total flujo	flujo unitario	Unidad	Masa [ton]	Masa [%]	Carbono [%]	Carbono [ton]	AA [%]	AA [ton]
Transporte	Transporte aéreo de personal	1.007,6	5,6	Pkm/MW	0,17	0%	0,0%	0,16	0,01%	0,0185
Transporte	Transporte terrestre de personal	1.363,5	7,6	Pkm/MW	0,0	0%	0,0%	0,00	0,00%	0
Transporte	Transporte marítimo de materiales	20.129.122,1	111828,5	Tkm/MW	247,9	31%	13,6%	222,71	10,66%	19,721
Transporte	Transporte aéreo de materiales	3.289,9	18,3	Tkm/MW	7,3	1%	0,4%	5,74	0,35%	0,6475
Transporte	Transporte terrestre de materiales	1.706.586,4	9481,0	Tkm/MW	90,3	11%	4,4%	71,83	4,12%	7,622
Transporte	Transporte terrestre de residuos	787,9	4,4	Tkm/MW	0,0	0%	0,0%	0	0,00%	0
Recepción de equipos	Módulos Fotovoltaicos	3.881,5	21,6	Ud/MW	97,0	12%	79,0%	1295,60	29%	53,65
Movimiento de Tierras	Agua Industrial	25,9	0,1	m3/MW	25,9	3%	0,0%	0,00	14,03%	25,9555
Movimiento de Tierras	Áridos	202,2	1,1	m3/MW	202,2	26%	0,0%	0,49	0,46%	0,851
Movimiento de Tierras	Combustible	0,9	0,0	Ton/MW	0,9	0%	0,0%	0,33	0,15%	0,2775
Cimentación y Fundación	Hormigón	18,8	0,1	Ton/MW	18,8	2%	0,1%	1,97	1,62%	2,997
Cimentación y Fundación	Combustible	0,1	0,0	Ton/MW	0,1	0%	0,0%	0,00	0,02%	0,037
Cimentación y Fundación	Otros insumos	0,0	0,0	Ton/MW	0,0	0%	0,0%	0,00	0,02%	0,037
Montaje	Combustible	0,2	0,0	Ton/MW	0,2	0%	0,0%	0,00	0,04%	0,074
Montaje	Otros insumos	0,0	0,0	Ton/MW	0,0	0%	0,0%	0,00	0,16%	0,296
Uso de Instalaciones de Faena	Agua Potable	0,0	0,0	m3/MW	0,0	0%	0,0%	0,00	0,47%	0,8695

Uso de Instalaciones de Faena	Combustible	0,9	0,0	Ton/MW	0,9	0%	0,0%	0,00	0,00%	0
Mantenimiento de Faena	Agua industrial	97,0	0,5	m3/MW	97,0	12%	0,0%	0,49	37,99%	70,2815
Mantenimiento de Faena	Aceites	0,3	0,0	Ton/MW	0,3	0%	0,0%	0,33	1,28%	2,368
Mantenimiento de Faena	Grasas y otros	0,0	0,0	Ton/MW	0,0	0%	0,0%	0,00	0,02%	0,037
Gestión de Residuos	Residuos Domiciliarios Disposición	0,0	0,0	Ton/MW	0,0	0%	0,0%	0,00	0,00%	0
Gestión de Residuos	Residuos Peligrosos Disposición	0,0	0,0	Ton/MW	0,0	0%	0,0%	0,00	0,36%	0,666
Gestión de Residuos	Residuos Domiciliarios Reutilización	0,0	0,0	Ton/MW	0,0	0%	0,0%	0,00	0,00%	0
Gestión de Residuos	Residuos No Peligrosos Reutilización	0,8	0,0	Ton/MW	0,8	0%	0,0%	-0,16	0,93%	1,7205
Gestión de Residuos	Aguas Residuales Reutilización	0,1	0,0	Ton/MW	0,1	0%	0,0%	0,00	0,00%	0
Gestión de Residuos	Aguas Residuales Reciclaje	0,8	0,0	Ton/MW	0,8	0%	0,0%	0,00	-0,37%	-0,6845
			121370,3		790,6			1599,49		187,442

Tabla 19 Flujos Másicos y Porcentuales de planta eólica.

Proceso	Flujo	Total flujo	Flujo Unitario	Ud	masa [ton]	Masa [%]	Carbono [%]	Carbono [ton]	Agotamiento de Agua [%]	AA [ton]
Transporte	Terrestre Materiales y Equipos	4.502	34,0	ton m	0,00	0,00%	0,00%	0,00	0,00%	0,0
Transporte	Terrestre Personal	19.872.711	150209,5	pkm	1,46	0,00%	1,03%	1,34	0,02%	0,1
Transporte	Terrestre Residuos	3.941	29,8	ton m	0,00	0,00%	0,00%	0,00	0,00%	0,0
Transporte	Aéreo Materiales y Equipos	163.957	1239,3	ton m	2,74	0,00%	1,99%	2,59	0,05%	0,2
Transporte	Aéreo Personal	185.482	1402,0	pkm	0,24	0,00%	0,18%	0,23	0,00%	0,0
Transporte	Marítimo Materiales y Equipos	265.501.855	2006816,7	ton m	24,716 49	0,01%	20,25%	26,32	0,39%	2,0
Recepción de equipos	Aerogeneradores	42	0,3	und	0,13	0,00%	10,17%	13,22	11,89%	59,9
Recepción de equipos	Cables	8	0,1	ton	8	0,00%	0,04%	0,05	-0,08%	-0,4
Recepción de equipos	Tubería Plástica	15	0,1	ton	15	0,01%	0,24%	0,31	0,07%	0,4
Movimiento de Tierras	Agua Industrial	41.360	312,6	m3	41.360	18,31 %	1,57%	2,04	63,04%	317,7
Movimiento de Tierras	Áridos	129.626	979,8	ton	129.62 6	57,40 %	1,85%	2,41	0,81%	4,1
Movimiento de Tierras	Combustible utilizado	168	1,3	ton	168	0,07%	3,35%	0,49	0,08%	0,4
Cimentación y Fundación	Acero	2.130	16,1	ton	2.130	0,94%	19,62%	25,51	3,03%	15,3
Cimentación y Fundación	Hormigón	42.355	320,1	ton	42.355	18,75 %	29,85%	38,81	10,11%	51,0
Cimentación y Fundación	Combustible	43	0,3	ton	43	0,02%	0,10%	0,13	0,02%	0,1
Cimentación y Fundación	Otros insumos	0	0,0	ton	0	0,00%	0,00%	0,00	0,00%	0,0
Cimentación y Fundación	Emisiones generación eléctrica	21	0,2	ton (diés el)	21	0,01%	0,00%	0,00	0,00%	0,0

Montaje	Áridos	2.840	21,5	ton	2.840	1,26%	0,04%	0,05	0,02%	0,1
Montaje	Combustible	144	1,1	ton	144	0,06%	0,01%	0,00	0,00%	0,0
Montaje	Otros insumos	1	0,0	ton	1	0,00%	0,32%	0,42	0,07%	0,4
Montaje	Emisiones generación eléctrica	21	0,2	ton (diés el)	21	0,01%	0,10%	0,13	0,00%	0,0
Uso de Instalaciones de Faena	Agua Potable	283	2,1	m3	283	0,13%	0,00%	0,00	0,43%	2,2
Uso de Instalaciones de Faena	Combustible	22	0,2	ton	22	0,01%	0,05%	0,07	0,01%	0,1
Uso de Instalaciones de Faena	Emisiones generación eléctrica	21	0,2	ton (diés el)	21	0,01%	2,87%	3,73	0,00%	0,0
Mantenimiento de Faena	Agua industrial	6.357	48,0	m3	6.357	2,81%	0,240%	0,31	9,69%	48,8
Mantenimiento de Faena	Aceites	0	0,0	ton	0	0,00%	0,00%	0,00	0,00%	0,0
Mantenimiento de Faena	Grasas y otros	0	0,0	ton	0	0,00%	0,000%	0,00	0,00%	0,0
Gestión de Residuos	Residuos Domiciliarios Disposición	26	0,2	ton	26	0,01%	0,14%	0,18	0,00%	0,0
Gestión de Residuos	Residuos No Peligrosos Disposición	13	0,1	ton	13	0,01%	0,00%	0,00	0,00%	0,0
Gestión de Residuos	Residuos Peligrosos Disposición	7	0,1	ton	7	0,00%	0,08%	0,10	0,24%	1,2
Gestión de Residuos	Residuos No Peligrosos Valorizable	66	0,5	ton	66	0,03%	-0,08%	-0,10	0,37%	1,9
Gestión de Residuos	Aguas Residuales Disposición	77	0,6	m3	77	0,03%	0,23%	0,30	0,03%	0,2
Gestión de Residuos	Aguas Residuales Reciclaje	215	1,6	m3	215	0,10%	0,04%	0,05	-0,29%	-1,5