

01-057

M3C: CIRCULAR METABOLISM MODELING FRAMEWORK IN ENGINEERING PROJECTS

Martín Gómez, Alejandro Manuel ⁽¹⁾; Ávila Gutiérrez, María Jesús ⁽¹⁾; Aguayo González, Francisco ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Universidad de Sevilla

Engineering projects need to be conceived in a sustainable way, so as to ensure ecocompatibility between technical metabolism associated with the project and natural metabolism that exists in the ecosystems, that is, the environment in which the project is developed. This paper presents a general framework for modeling engineering project entities for environments built with metabolism for circular economy. The framework is based on the holonic paradigm, which has traditionally been used to optimize manufacturing, control and planning systems, aimed at providing high efficiency from an economic perspective, and not considering the other two perspectives of sustainability (social and environmental). The proposed holonic modeling framework has a fractal configuration, bioinspired, that parameterizes its elements under the situation and context of application, multilevel and multiscale, to form ecosystems in which technosphere is integrated into natursphere. Likewise, the framework proposes the holonic as an organizational enabler that manages the emerging complexity of current engineering projects, and that integrates and takes advantage of the opportunities offered by digital and technological enablers, from Industry 4.0, to integrate the different views of the industrial metabolism.

Keywords: project modeling; holonic system; industrial metabolism; circular economy

M3C: MARCO DE MODELADO DE METABOLISMO CIRCULAR EN PROYECTOS DE INGENIERÍA

Los proyectos de ingeniería requieren ser concebidos de forma sostenible, de modo que garanticen la ecocompatibilidad entre el metabolismo técnico asociado al proyecto y el metabolismo natural existente en los ecosistemas, esto es, el entorno en que se desarrolla el proyecto. En este trabajo se presenta un marco general para el modelado de entidades de proyectos de ingeniería para entornos construidos con metabolismo para la economía circular. El marco se basa en el paradigma holónico, que tradicionalmente se ha empleado en optimizar los sistemas de fabricación, control y planificación, direccionándose a proporcionar una alta eficiencia desde la perspectiva económica, y no siendo consideradas las otras dos perspectivas de la sostenibilidad (social y ambiental). El marco de modelado holónico propuesto posee una configuración fractal, bioinspirada, que parametriza sus elementos bajo la situación y contexto de aplicación, multinivel y multiescala, para formar ecosistemas en los que la tecnosfera se integre en la natursfera. Así mismo, el marco propone la holónica como habilitador organizacional que gestione la complejidad emergente de los actuales proyectos de ingeniería, y que integre y aproveche las ventajas que ofrecen los habilitadores digitales y tecnológicos, provenientes de la Industria 4.0, para integrar las distintas vistas del metabolismo industrial.

Palabras clave: modelado de proyectos; sistemas holónicos; metabolismo industrial; economía circular

Correspondencia: María Jesús Ávila Gutierrez mavila@us.es



©2020 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. Introducción

La cadena de valor es identificada como origen de la fractura metabólica y al mismo tiempo sirve como medio para mitigarla y revertirla. En este contexto, el valor es concebido y modelado para permitir su agregación a través de toda la cadena, no solo en el vector económico tradicional, sino también en los vectores ambientales y sociales, es decir, desde los tres pilares de la sostenibilidad. Por tanto, la cadena de valor circular, en base a sus características inherentes y al nivel de agregación que presenta, es apta como objeto de implementación del metabolismo industrial circular.

La implementación de los proyectos de ingeniería en el ámbito empresarial bajo el paradigma de la economía circular a menudo requiere la incorporación de nuevos modelos de negocios (Heyes et al., 2018). Los ciclos cerrados de materiales suelen afectar a múltiples aspectos de los modelos de negocio actuales, siendo necesario realizar cambios notables entre los que se identifican los diferentes productos o servicios, diferentes relaciones con clientes, distintos procesos de producción y diferentes modelos de ingresos. A veces incluyendo otros tipos de valores más allá del beneficio financiero, como el valor ambiental y social. La gestión de estos cambios requiere que las empresas de ingeniería participen en un proceso de innovación del modelo de negocio, desde la perspectiva circular (Potting et al., 2017). Los Modelos de Negocio Circular (MNC) permiten la retención de un activo en su valor más alto a lo largo del tiempo, apoyando la mejora del capital natural (Urbinati, Chiaroni, & Chiesa, 2017).

Debido a la existencia de diversas estrategias para la economía circular (Kalmykova, Sadagopan, & Rosado, 2018), los MNC requieren un marco que posibilite la integración de estrategias top-down (modelos de negocio) y bottom-up (diseño de producto/servicio). Este marco debe orientar sobre cómo una empresa de ingeniería puede identificar, evaluar e implementar oportunidades de economía circular alineando estratégicamente la innovación del modelo comercial con los requisitos de diseño del producto desde la fase proyectual (Mendoza et al., 2017).

La complejidad de los entornos de fabricación, de los entornos socioeconómicos y naturales, que se encuentran en continua evolución, debe ser gestionada por un facilitador que tenga la capacidad de adaptarse al entorno e implementar evolutivamente los mecanismos necesarios que permitan la integración de la organización. La holónica se presenta como facilitador organizacional adecuado por la variedad requerida desde la complejidad de los ecosistemas de fabricación del mercado y ecosistemas naturales (Ávila-Gutiérrez et al., 2020; Martín-Gómez, Aguayo-González, & Luque, 2019).

Los facilitadores digitales como Big data, Internet de las Cosas, computación ubicua, cloud computing, sensores inteligentes, conectividad, M2M (Machine to Machine), etc. y los modelos organizacionales de sistemas productivos bajo orientación fractal, holónica y biónica, permiten diseñar ecosistemas en la tecnosfera. Ello requiere plantear un marco para llevar a cabo la ingeniería y reingeniería de cadenas de valor sostenibles bajo la triple bottom line (TBL) con indicadores claves en las tres dimensiones de sostenibilidad (Popovic et al., 2018), formulado a partir de la economía circular, y con objeto de establecer un metabolismo integrado resiliente. Este metabolismo resiliente requiere disponer de la capacidad de coevolución y adaptación al entorno externo y la integración con el entorno interno.

Derivado de la existencia de diversas arquitecturas para la Industria 4.0 (Li et al., 2018), se hace adecuada la inclusión de facilitadores organizacionales (de inspiración biónica) que integren a los facilitadores digitales y tecnológicos. El facilitador organizacional propuesto es

el paradigma holónico y los facilitadores digitales, de campo y en la nube, son aquellos contemplados en la Industria 4.0.

2. Objetivos

Definición de un marco de modelado de entidades de proyectos de ingeniería con metabolismo circular basado en el paradigma holónico, multinivel y multiescala para negocios, su cadena de valor, productos y sistemas de fabricación ecocompatibles, integrables en el contexto (territorio).

3. Metodología

El paradigma holónico, como facilitador organizacional, es empleado para definir un marco de modelado holónico multinivel y multiescala sostenible bajo el paradigma de la economía circular, incorporando a los facilitadores digitales provenientes de la Industria 4.0. El marco de modelado propuesto es multinivel ya que incorpora los distintos niveles de análisis presentes en la economía circular, desde el nivel de región o estado, hasta el nivel de máquina, sensor o actuador, pasando por las ciudades, parques eco-industriales (PEI), plantas de fabricación, líneas de fabricación, etc. Asimismo, este marco es multiescala debido a que es escalable al incorporar un mayor o menor número de entidades dispersas en el territorio. El resultado obtenido es una estructura multinivel y multiescala que se adapta a las características del entorno, haciendo uso de estrategias y herramientas específicas de cada nivel.

En la caracterización de estructuras jerárquicas de sistemas complejos, las relaciones se establecen en: (1) los niveles de granularidad de la organización estructural, tales como el nivel micro (productos, procesos, empresas), el nivel meso (PEI) y el nivel macro (cadena de valor), donde aparecen relaciones emergentes entre los diferentes niveles; y (2) escalas geográficas, que distinguen entre ciudad, región, nación y más allá, y de países industrializados a economías emergentes (Kirchherr, Reike, & Hekkert, 2017; Liu, Heiner, & Gilbert, 2017; Pulido Barrera, Rosales Carreón, & de Boer, 2018).

El marco de modelado holónico propuesto se justifica en atención a sus siguientes propiedades:

1. Ser todo y parte, en interacción dinámica en el entorno interno y externo, que posibilita su adaptación al medio externo y la integración del medio interno evolutivamente estable.
2. Ser proceso y producto, en base a los procesos externos e internos que determinan distintos estados, confiriéndole carácter dinámico y coevolutivo).
3. Auto-organización, para gestionar la variedad requerida bajo principios de vida evolutivamente estables.
4. Ser una estructura simpleja, generando a partir de estructuras simples autosimilares (con estructura fractal), la variedad requerida (complejidad) En consecuencia, con los actuales sistemas de fabricación de oferta personalizada, con mínima complejidad de fabricación.
5. Auto-optimización, desde los principios de selección natural en consonancia con la filosofía Lean de los actuales sistemas de fabricación.
6. Orientación al objetivo (dinámico), para garantizar la supervivencia desde los principios de vida.

7. Autonomía, un holón tiene la capacidad de crear y controlar la ejecución de sus propias estrategias de forma autorregulada.
8. Autorregulación, un holón está dotado de la capacidad de cambiar su forma de cooperar para desarrollar una función, ganando así resiliencia. El holón evoluciona con el medio ambiente a través de los parámetros establecidos en la TBL.
9. Colaboración, un holón puede integrarse en una o más holarquías de nivel superior, denominadas dominios de colaboración, formando así holarquías de nivel $N + 1$; esta es una propiedad del holón en términos de su expresión como parte, por ejemplo, la mejora a través de la cadena de valor basada en sinergias verticales y horizontales. Esto permite que el holón se adapte al entorno.
10. Cooperación, un holón puede integrar otros holones y procesos en los que un grupo de entidades conjuntamente hacen planes aceptables para desarrollar una función, por ejemplo, la mejora de los indicadores de rendimiento clave, desde el enfoque TBL, a nivel de fábrica.

El marco holónico propuesto para soportar el proceso de modelado está formado por una arquitectura holónica en la que se distinguen:

1. Los holones objetos de modelado. Las entidades que se hace necesario modelar en un proyecto de fabricación industrial para entornos construidos con metabolismo industrial desde la economía circular, que como se expone en la Figura 1, son:
 - Holón Metodología (Entidad 1).
 - Holón Empresa de Ingeniería (Entidad 2).
 - Holón Planta Industrial (Entidad 3).
 - Holón Negocio Circular (Entidad 4).
 - Holón Producto (Entidad 5).
 - Holón Proceso (Entidad 6).
 - Holón Facility (Entidad 7).
 - Holón Parque Industrial (Entidad 8).
 - Holón Cadena de Valor Circular (Entidad 9).

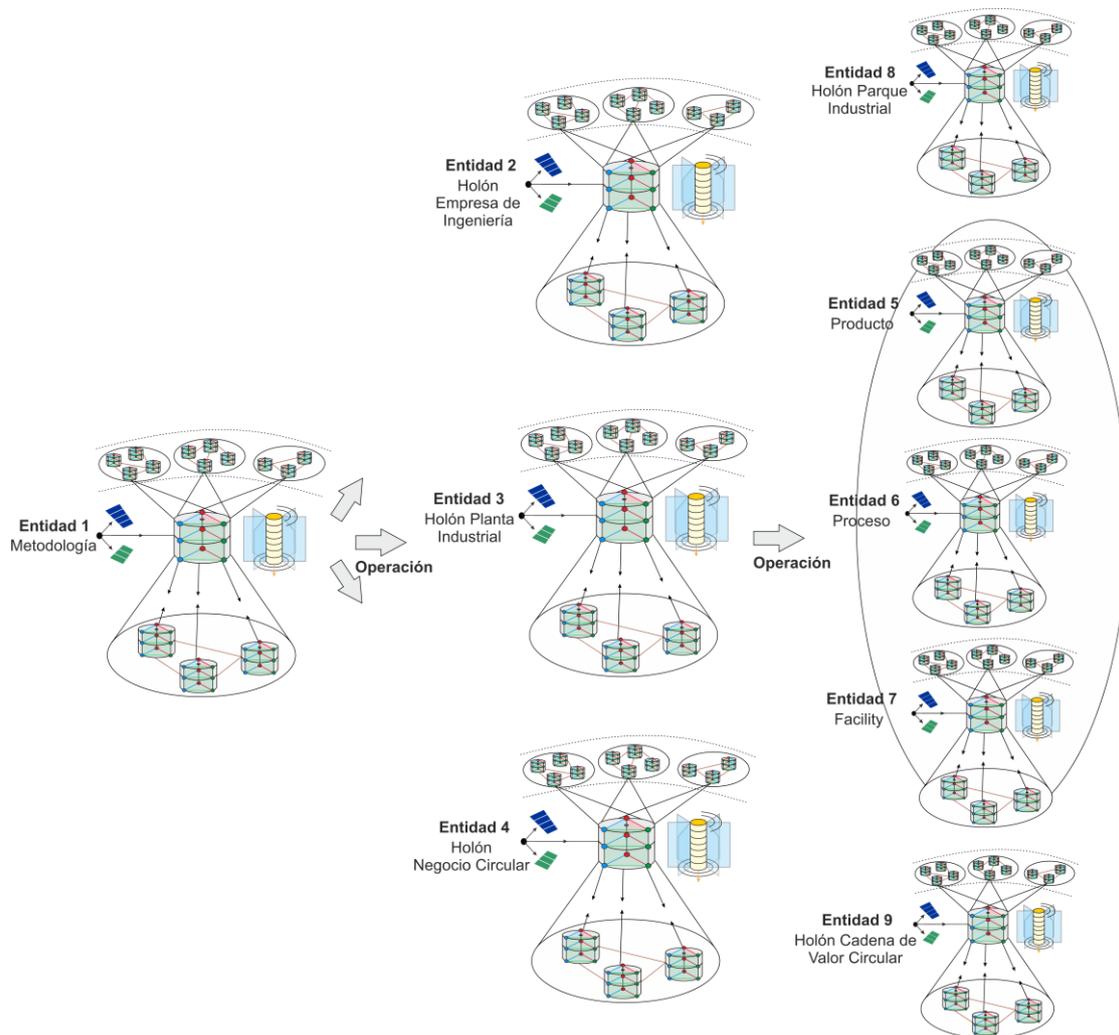
En función del proyecto en cuestión, puede requerirse modelar todas las entidades o sólo algunas de ellas. La Entidad 2 es mejorada en base a la experiencia adquirida en el desarrollo de proyectos de ingeniería.

2. Las vistas de la entidad objeto de modelado. Se refiere a las vistas de la complejidad de las diferentes fases del ciclo de vida de las entidades. Las vistas existentes son:
 - Vista de Recursos.
 - Vista Informativa.
 - Vista de los Procesos de negocio y operaciones.
 - Vista Organizacional.
 - Vista de Flujo de materiales, sustancias y energía.
 - Vista Metabólica.
3. Modelo del ciclo de vida. El ciclo de vida está constituido por un conjunto de etapas, entre las que cabe señalar: identificación, conceptualización, requerimientos, diseño

preliminar, diseño de detalle, abastecimiento de materiales, fabricación, distribución, venta, consumo, retirada, eliminación, reciclaje, demolición y eliminación. Un aspecto que adquiere especial importancia es la gestión de la configuración de las entidades del ciclo de vida del proyecto, para lo que se hacen necesarios los entornos de diseño y desarrollo PLM y BIM.

4. Los niveles de análisis. Estos se estructuran en general, parcial y particular constituyendo el nivel de análisis de lo más nuclear a lo más molecular de las entidades que pueden integrar el desarrollo de un programa empresarial.

Figura 1: Entidades del Marco de Modelado de Metabolismo Circular (M3C) en proyectos de ingeniería para entornos construidos con metabolismo para la economía circular



Cada una de las entidades holónicas soporta en su ciclo de vida una caja de herramientas con estrategias de economía circular fractalizable, clasificada en las diferentes fases del ciclo de vida, que le permite alcanzar los objetivos para la economía circular. Entre las estrategias de economía circular hay una que es transversal y atraviesa todas las etapas del ciclo de vida que es la fabricación Lean que, orientada a la sostenibilidad, tiene por objetivo la optimización del holón en el uso de recursos materiales, hídricos y energéticos.

Para llevar a cabo cada una de las estrategias incorporadas al conocimiento del holón, es necesario disponer de herramientas que permitan desempeñar la estrategia en cuestión

para cada proceso concreto del ciclo de vida, con los criterios que caracteriza el metabolismo industrial para la economía circular. Todas estas técnicas, métodos y estrategias del paradigma de la economía circular incorporadas como conocimiento al ciclo de vida del holón, y apalancadas con los facilitadores tecnológicos y digitales, vertebran el metabolismo holónico circular. A continuación, se exponen las características de los distintos holones que constituyen la holarquía propuesta.

3.1 Entidad Holón Metodología

El proyecto de ingeniería de producto o de la planta e instalaciones, que surge del negocio circular y se desarrolla en la empresa de ingeniería, pertenece a la vez al negocio circular y a la empresa de ingeniería, formando parte de su cartera de proyectos de productos e instalaciones industriales. Un componente fundamental del holón empresa de ingeniería es el holón metodología. Este holón, caracterizado en la Tabla 1, interviene de forma fractalizada en los distintos niveles (creación de empresa, proyectos del parque industrial, planta industrial y producto), dando soporte para el diseño de procesos, estrategia y su gestión, así como la integración con los sistemas tecnológicos y de información.

Tabla 1. Descripción del holón metodología

Componentes	Salidas	Técnicas	Objetivos
- Entorno diseño y desarrollo BIM	- Modelo 3D infraestructuras	- BIM	- Facilitar el modelado de infraestructuras, edificios y productos desde los principios de la economía circular
- Entorno diseño y desarrollo PLM	- Modelo 3D edificio industrial	- PLM	- Visualizar las soluciones de diseño
- Plan de acción	- Modelo de mantenimiento	- Planes estratégicos	- Elevar la seguridad durante las fases de fabricación o construcción y uso o explotación
- Procedimientos	- Modelo del producto	- Análisis DAFO	- Facilitar Análisis de ciclo de vida (ACV)
		- Otros	- Permitir la gestión y transferencia de datos del proyecto

3.2 Entidad Holón Empresa de Ingeniería

La empresa de ingeniería se basa en modelos de arquitecturas empresariales utilizados como instrumentos que permiten a las empresas afrontar los retos asociados con la complejidad que supone el entorno operativo de una organización. El modelado de la empresa de ingeniería desde GERAM (IFIP-IFAC, 1999), que es una metodología de ingeniería empresarial para describir el proceso de la ingeniería e integración empresarial bajo el enfoque de ontología del conocimiento, parte del diseño de diferentes entidades con distintos grados de detalle, siguiendo estrategias top-down y bottom-up, para los distintos grados de concreción y refinamiento (Aguayo González et al., 2007).

Tabla 2. Descripción del holón empresa de ingeniería

Componentes	Salidas	Técnicas	Objetivos
- Cartera de proyectos	- Estrategia competitiva	- Análisis de nuevos productos	- Mejora continua en base a la cadena de

- Organización de empresa	- Estrategia de cadena de valor	- Análisis de productos innovadores	valor sostenible
- Planta industrial	- Estrategia de producto/ servicio/ proceso	- Benchmarking	- Innovación e infraestructura
- Tecnología	- Indicadores de rendimiento	- Análisis DAFO	- Mejora de condiciones laborales
- Estrategia		- Análisis de fuerzas de Porter	- Producción y consumo responsables
- Metodología		- Análisis de personalización	

El negocio circular tiene su origen en la empresa de ingeniería, en la cual se desarrolla a través de, una metodología, entornos de diseño y desarrollo BIM y PLM, el proyecto de planta industrial, el proyecto de parque industrial y los procesos asociados, y es soportado por la propia organización de la empresa. La Tabla 2 describe la holarquía de la entidad holón de empresa de ingeniería.

3.3 Entidad Holón Planta Industrial

El holón de planta industrial gestiona los procesos internos de la planta industrial y las relaciones con el resto de holones de planta industrial. La holarquía interna tiene un carácter fractal como producto, proceso y facility. Está integrado por las entidades producto, las estrategias y procedimientos para encapsular la complejidad de procesos, y la maquinaria, equipos, instalaciones e infraestructuras (facility). Estas tres entidades componen cada eslabón de la cadena de valor circular. La ontología del conocimiento explícito y tácito del holón de planta industrial es mostrada en la Tabla 3.

Tabla 3. Descripción del holón planta industrial

Componentes	Salidas	Técnicas	Objetivos
- Producto	- Fabricación sostenible	- Análisis de flujo de materiales y sustancias (AFM/AFS)	- Propiciar el cierre de ciclos en la planta
- Proceso	- Fabricación verde	- ACV	- Maximizar los tres valores de la cadena de valor de la empresa
- Facility	- Fabricación de cero residuos	- Entrada de material por unidad de servicio	- Desarrollar estrategias de fabricación flexible, colaborativa, etc.
	- Fabricación en lazo cerrado	- Circularidad del agua (huella hídrica)	- Aportar indicadores agregados de los puesto de trabajo que engloba
	- Fabricación limpia	- Análisis de energía embebida	
		- Análisis de exergía	

3.4 Entidad Holón Negocio Circular

Este holón, como entidad abstracta, es el que recoge los principios y objetivos de la economía circular y los principios naturales en los que se basa, tal y como se muestra en la Tabla 4, relativa a la descripción del holón. El resto de holones en las sucesivas holarquías mantienen estos principios consignados en este holón, fractalizándose aguas abajo.

Tabla 4. Descripción del holón negocio circular

Componentes	Principios de la economía circular	Principios naturales	Objetivos
<ul style="list-style-type: none"> - Sector agrícola - Sector industrial - Sector de la construcción - Ciudad 	<ul style="list-style-type: none"> - Preservar y mejorar el capital natural controlando las existencias finitas y equilibrando los flujos de recursos renovables - Optimizar los rendimientos de los recursos haciendo circular los productos - Fomentar la efectividad del sistema revelando y diseñando para minimizar las externalidades negativas 	<ul style="list-style-type: none"> - Diseñar sin residuos - Desarrollar la resiliencia a través de la diversidad - Usar recursos y energías renovables - Pensar en sistemas - Pensar en cascadas 	<ul style="list-style-type: none"> - Orientarse en el desarrollo territorial sostenible en el tiempo bajo condiciones de diversidad y principios de cohesión territorial - Marco económico regenerativo y restaurador - Desacoplar el crecimiento económico y la degradación ambiental - Preservar el valor económico, social y ambiental - Contribuir a la resiliencia del sistema - Establecimiento de relaciones colaborativas con otros holones de negocio circular

La holarquía propuesta es portadora y soporta la ingeniería del conocimiento del metabolismo industrial circular, estructurado en conocimiento explícito e implícito. Este segundo coevoluciona bajo principios holónicos y de la economía circular como paradigma de la sostenibilidad bajo la TBL.

3.5 Entidad Holón Producto

El holón producto alberga el conocimiento del producto y de su proceso de fabricación para asegurar la correcta fabricación del mismo en base a los principios de la economía circular. El holón producto contiene información coherente y actualizada sobre el ciclo de vida del producto, requisitos del usuario, diseño, planes de proceso, lista de materiales, procedimientos de aseguramiento de calidad, etc. y como tal, contiene el modelo del tipo de producto. El holón producto actúa como un servidor de información para los otros holones en la holarquía. Este holón comprende funcionalidades que tradicionalmente están cubiertas por el diseño del producto, la planificación del proceso y la garantía de calidad. Así mismo, asume los objetivos de evaluación y monitorización del producto en su ciclo de vida en las tres dimensiones de la sostenibilidad, la disminución de la entropía en base a los componentes y procesos incorporados en su ciclo de vida, y la orientación al cierre de ciclo como producto o de sus componentes, entre otros. Este holón contiene información, sobre el tipo de nutrientes (técnicos o biológicos) que le son incorporados, útil en el establecimiento de rutas metabólicas.

Tabla 5. Descripción del holón producto

Componentes	Salidas	Técnicas	Objetivos
<ul style="list-style-type: none"> - Subsistemas - Interface - Comunicación 	<ul style="list-style-type: none"> - Información de diseño - Especificaciones del producto 	<ul style="list-style-type: none"> - AFM/AFS - Clasificación de materiales técnicos y 	<ul style="list-style-type: none"> - Evaluación y monitorización del comportamiento en su ciclo de vida bajo la

- Recursos materiales y energéticos	- Propiedades de los recursos	biológicos	TBL, a través de indicadores de producto
- Estructura	- Eco-propiedades de los recursos	- Entrada de material por unidad de servicio	- Disminuir la entropía del sistema
	- Plan de fabricación	- Circularidad del agua (huella hídrica)	- Orientarse al cierre de ciclos como producto o de sus componentes
	- Arquitectura del producto		
	- Otras		

La Tabla 5 representa algunos de los aspectos de la ontología del conocimiento del holón producto, tanto explícito como tácito en su dominio interno, para la resolución de problemas y estrategias.

3.6 Entidad Holón Proceso

El holón proceso alberga el conocimiento del proceso productivo para asegurar la correcta fabricación del producto en base a los principios de la economía circular. Contiene información y métodos sobre cómo producir ciertos productos usando recursos concretos. El holón proceso monitoriza, evalúa y cede información, a otros holones de la holarquía, relativa a los indicadores en la dimensión ambiental (ciclicidad, eficiencia y toxicidad que supone el proceso productivo), social y económica. Esta información permite al resto de holones de la holarquía la toma de decisiones en base a sus objetivos bajo los principios de la economía circular.

Tabla 6. Descripción del holón proceso

Componentes	Salidas	Técnicas	Objetivos
- Métodos de fabricación	- Especificaciones del proceso	- AFM/AFS	- Evaluación y monitorización del comportamiento del proceso bajo la TBL, a través de indicadores de proceso productivo
- Gestión	- KPI asociados al proceso	- Diagramas de procesos	- Diseño de procesos de fabricación bajo criterios de sostenibilidad
- Coordinación		- Planificación	

La Tabla 6 representa algunos de los elementos de la ontología del conocimiento de las dimensiones del dominio interno, resolución de problemas y estrategias del holón.

3.7 Entidad Holón Facility

El holón facility, como holón ciber-físico, contiene una parte física, un elemento de producción del sistema de fabricación, y una parte de procesamiento de información que controla el facility. Ofrece capacidad de producción y funcionalidad para los holones de la holarquía. Contiene los métodos para asignar los recursos de producción y los conocimientos y procedimientos para organizar, usar y controlar estos recursos de producción e impulsar la producción.

Tabla 7. Descripción del holón facility

Componentes	Salidas	Técnicas	Objetivos
-------------	---------	----------	-----------

- Infraestructura	- Modelo del edificio industrial	- BIM	- Evaluación y monitorización del rendimiento de los recursos bajo la TBL, a través de KPI de recursos
- Instalaciones	- Modelo de las instalaciones	- Planificación de recursos	- Optimización de la asignación de recursos bajo la TBL
- Máquinas		- Nivelación de recursos	- Establecimiento de sinergias colaborativas
- Recursos humanos		- SLP (systematic layout planning)	

Un holón facility es una abstracción de los medios de producción, como una fábrica, un taller, máquinas, hornos, transportadores, tuberías, AGV, componentes, herramientas, almacenamiento de material, personal, energía, superficie, etc. La Tabla 7 muestra algunos de los aspectos de la ontología del conocimiento explícito y tácito del holón facility.

3.8 Entidad Holón Parque Industrial

El negocio circular, en lo que respecta a la planta industrial o complejo industrial, debe ser instanciado en el territorio, bajo criterios de diversidad y principios de cohesión y desarrollo orgánico. Para ello, es necesario que exista una entidad de negocio que gestione de forma circular el uso del suelo y las infraestructuras comunes que pueden abastecer los distintos negocios circulares establecidos en un área geográfica concreta. Este holón puede también denominarse, en función de su corporización en un territorio concreto, holón parque industrial.

Este aspecto es importante no sólo para la gestión circular del uso del suelo en las áreas de extracción (Muradian, Walter, & Martinez-Alier, 2012), sino a lo largo de las diferentes configuraciones que se adoptan en las distintas etapas de la cadena de valor, a partir de posibles ejes territoriales colaborativos sostenibles (ETCS). En este sentido, adquiere especial importancia el uso del suelo en las áreas industriales, que actualmente se configuran como parques industriales. Este holón gestiona las instanciaciones de las plantas industriales de los negocios circulares que pretenden desarrollar su actividad en un territorio específico.

Tabla 8. Descripción del holón negocio de ofertas de suelo e infraestructuras circular

Componentes	Salidas	Técnicas	Objetivos
- Estrategia	- Asignación de espacios de uso	- Método del centro de gravedad	- Facilitar cierre de ciclos locales
- Organización	- Indicadores	- Método de carga-distancia	- Maximizar los tres valores de la cadena de valor
- Tecnología	- Aumento del suelo industrial	- Método del análisis del punto de equilibrio	- Desarrollar ETCS virtuales para las distintas plantas que acoge, integrando a los ejes territoriales colaborativos sostenibles configurados en la planificación prospectiva del territorio
- Cadena de Valor	- Tamaño anual de territorio empleado en la producción de bienes y servicios	- Método de transporte	- Aportar indicadores desde los ejes territoriales sinérgicos colaborativos y la economía circular para la gestión de los negocios y plantas circulares que aloja

La ontología del conocimiento explícito y tácito en algunos de sus aspectos declarativos correspondientes al holón de ofertas de suelo e infraestructura circular se muestra en la Tabla 8. Aquí se incluye la descripción principal de este holón, cuyos objetivos fundamentales son: facilitar el cierre de ciclos de materiales, sustancia y energía de productos y procesos, y maximizar los tres componentes de valor de la cadena de valor agregada que forma la agrupación de negocios circulares, todo ello a través de la decisión de localización de la planta industrial mediante herramientas de optimización bajo la perspectiva del metabolismo industrial.

3.9 Entidad Holón Cadena de Valor Circular

La siguiente holarquía es la correspondiente a la cadena de valor circular, principalmente orientada a los sectores industriales, donde se recogen las principales plantas de fabricación y servicios que conforman la cadena de valor del sector, desde la perspectiva de la economía circular. Tal y como muestra la Tabla 9, esta holarquía tiene como objetivo la integración de los eslabones de la cadena de valor en el dominio de cooperación, para coevolucionar con los cambios del entorno, adaptarse al dominio de colaboración del entorno y promover la coevolución de la cadena de valor mediante la integración vertical y horizontal (transversal).

Tabla 9. Descripción del holón cadena de valor circular

Componentes	Salidas	Técnicas	Objetivos
- Planta Extracción	- Indicadores de rendimiento clave	- AFM/AFS - ACV	- Integración vertical. Formación de ETCS
- Planta Productos Semielaborados	- Relaciones sinérgicas - Residuos ecocompatibles	- Indicador de longevidad - Cadena trófica - Simbiosis industrial	verticales para el agrupamiento de entradas/salidas en el sistema de valor y cadena de suministro desde los principios de la economía circular e incardinados en los ejes territoriales colaborativos sostenibles
- Planta Fabricación Componentes		- Redes ecológicas - Diagrama de Sankey	- Integración horizontal. Formación de ETCS
- Planta Fabricación Productos		- Análisis de energía embebida	horizontales con otras empresas del sector u otros sectores
- Planta Logística Inversa		- Análisis de emergencia - Análisis de exergía - Análisis de huella ecológica	incardinados en los principios de la economía circular y la consecución de ejes territoriales colaborativos
- Servicio Mantenimiento		- Análisis de huella ecológica - Dinámica ecológica - Análisis Input-Output - Análisis de exergía social - Red de análisis económico - Red de análisis social - Análisis de interesados	- Favorecer la diversidad y cohesión territorial

Desde el paradigma holónico, es posible conceptualizar las diferentes entidades que constituyen el entorno natural (naturaleza) y el entorno artificial (tecnosfera), como un conjunto de entidades u holones, y de las interacciones que constituyen su holarquía desde una perspectiva bioinspirada. Liwarska-Bizukojc (2009) propone un modelo de ecosistema industrial que imita al ecosistema natural desde el punto de vista de las cadenas tróficas. Este modelo proporciona la estructura del ecosistema, clasificando las empresas como productores, consumidores y descomponedores, flujos de masa y energía y tipos de interacciones. De forma análoga, la cadena de valor puede considerarse como una red trófica, en la que las entidades tienen relaciones inter e intra-específicas, donde cada holón tiene su propio metabolismo y un metabolismo asociado en la red (ecosistema).

4. Conclusiones

Conforme a los objetivos de desarrollo sostenible, se han identificado las necesidades de la creación de valor en las tres dimensiones de la sostenibilidad (ambiental, social y económica), a través del establecimiento de un nuevo modelo de negocio orientado desde la economía circular para el metabolismo industrial. Estos negocios, encuentran su enmarcación en el territorio por medio de los sistemas de valor y de la cadena de valor circular directa e inversa. Los negocios circulares, organizados en los distintos sectores productivos en empresas de ingeniería, parques industriales, plantas industriales de fabricación, infraestructuras, etc, requieren de arquitecturas de digitalización como las provenientes de la Industria 4.0, que soporten la complejidad de estos sistemas y sean capaces de sensorizar y tomar decisiones en tiempo real. Todo lo anterior, determina y justifica la propuesta realizada de un Marco de Modelado de Metabolismo Circular (M3C), a través de sus aportaciones, tales como: (1) integración del metabolismo industrial contemplando vistas, niveles, flujos y las fases del ciclo de vida; (2) integración de las tres dimensiones de la sostenibilidad, multinivel y multiescala, para mitigar y revertir la fractura metabólica desde principios bioinspirados; (3) establecimiento de una metodología de selección y agregación de indicadores bajo criterios ambientales, mediante la integración de flujos energéticos, hídricos y de materiales, criterios económicos y sociales y (4) establecimiento de las relaciones en los diferentes dominios como precursoras del sistema de información asociado al modelo, mediante las posibilidades del gemelo digital.

5. Referencias

- Ávila-Gutiérrez, M. J., Martín-Gómez, A., Aguayo-González, F., & Lama-Ruiz, J. R. (2020). Eco-Holonic 4.0 Circular Business Model to Conceptualize Sustainable Value Chain towards Digital Transition. *Sustainability*, 12(5), 1889. <https://doi.org/10.3390/su12051889>
- Heyes, G., Sharmina, M., Mendoza, J. M. F., Gallego-Schmid, A., & Azapagic, A. (2018). Developing and implementing circular economy business models in service-oriented technology companies. *Journal of Cleaner Production*, 177, 621–632. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.168>
- Kalmykova, Y., Sadagopan, M., & Rosado, L. (2018). Circular economy - From review of theories and practices to development of implementation tools. *Resources, Conservation and Recycling*, 135(August), 190–201. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.10.034>
- Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, 127, 221–232. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>
- Li, Q., Tang, Q., Chan, I., Wei, H., Pu, Y., Jiang, H., ... Zhou, J. (2018). Smart manufacturing standardization: Architectures, reference models and standards framework. *Computers*

- in Industry*, 101, 91–106. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2018.06.005>
- Liu, F., Heiner, M., & Gilbert, D. (2017). Coloured Petri nets for multilevel, multiscale and multidimensional modelling of biological systems. *Briefings in Bioinformatics*, (December), 1–10. <https://doi.org/10.1093/bib/bbx150>
- Liawska-Bizukojc, E. (2009). The conceptual model of an eco-industrial park based upon ecological relationships. *Journal of Cleaner Production*, 17(8), 732–741. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2008.11.004>
- Martín-Gómez, A., Aguayo-González, F., & Luque, A. (2019). A holonic framework for managing the sustainable supply chain in emerging economies with smart connected metabolism. *Resources, Conservation and Recycling*, 141, 219–232. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.10.035>
- Mendoza, J. M. F., Sharmina, M., Gallego-Schmid, A., Heyes, G., & Azapagic, A. (2017). Integrating Backcasting and Eco-Design for the Circular Economy: The BECE Framework. *Journal of Industrial Ecology*, 21(3), 526–544. <https://doi.org/10.1111/jiec.12590>
- Muradian, R., Walter, M., & Martinez-Alier, J. (2012). Hegemonic transitions and global shifts in social metabolism: Implications for resource-rich countries. Introduction to the special section. *Global Environmental Change*, 22(3), 559–567. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2012.03.004>
- Popovic, T., Barbosa-Póvoa, A., Kraslawski, A., & Carvalho, A. (2018). Quantitative indicators for social sustainability assessment of supply chains. *Journal of Cleaner Production*, 180, 748–768. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.142>
- Potting, J., Hekkert, M., Worrell, E., & Hanemaaijer, A. (2017). Circular Economy: Measuring innovation in the product chain. Retrieved from <https://www.pbl.nl/en/publications/circular-economy-measuring-innovation-in-product-chains>
- Pulido Barrera, P., Rosales Carreón, J., & de Boer, H. J. (2018). A multi-level framework for metabolism in urban energy systems from an ecological perspective. *Resources, Conservation and Recycling*, 132, 230–238. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.05.005>
- Urbinati, A., Chiaroni, D., & Chiesa, V. (2017). Towards a new taxonomy of circular economy business models. *Journal of Cleaner Production*, 168, 487–498. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.047>

**Comunicación alineada con los
Objetivos de Desarrollo Sostenible**

