

Reference holonic architecture for sustainable manufacturing enterprises distributed

María Jesús Ávila-Gutiérrez ^a, Francisco Aguayo-González ^a, Mariano Marcos-Bárcena ^b,
Juan Ramón Lama-Ruiz ^a & María Estela Peralta-Álvarez ^a

^a Escuela Politécnica Superior, Universidad de Sevilla, España. mavila@us.es, faguayo@us.es, jrlama@us.es, mperalta@us.es

^b Escuela Superior de Ingenieros, Universidad de Cádiz, España. mariano.marcos@uca.es

Received: September 17th, 2015. Received in revised form: July 11th, 2016. Accepted: November 25th, 2016.

Abstract

The introduction of new operational requirements to manufacturing enterprises determines an emergent complexity in their life cycle, due to different aspects such as geographic distribution, volatility and uncertainty of business, incorporating TIC and intelligent technology, adoption of "edge technologies" to scales macro, meso and micro and incorporation of sustainability requirements. In the present work, it has established a paradigmatic framework to conceive Enterprises under an Integrated Architecture, as provided by its complexity from the variety required for sustainability (S) integrating business objectives (Economic S.), natural environment (Ecological S.) and individuals, social groups and cultural environment (Social S.). For this, the Holonic paradigm is proposed as a framework for bio-psycho-social inspiration that enables the design of Holonic Enterprises and entities distributed in the range required by the environment.

Keywords: Projects complexity; Required variety; Sustainable enterprise architecture; Enterprise models; Enterprise life cycle, Holonic paradigm.

Arquitectura holónica de referencia para empresas de fabricación sostenibles distribuidas

Resumen

La introducción de nuevos requerimientos operacionales a las empresas de fabricación determina una complejidad emergente en su ciclo de vida debida a distintos aspectos tales como: su distribución geográfica, volatilidad e incertidumbre de los negocios, incorporación de TIC y tecnología inteligente, adopción de "tecnologías de borde" a escalas macro, meso y micro e incorporación de requerimientos de sostenibilidad. En el presente trabajo, se ha establecido un marco paradigmático que permita concebir Empresas bajo una Arquitectura Integrada, que contemple su complejidad desde la variedad requerida para la sostenibilidad (S), integrando los objetivos del negocio (S. Económica), el medioambiente natural (S. Ecológica) y las personas, grupos sociales y el medio cultural (S. Social). Para ello, se plantea el paradigma Holónico como un marco de inspiración bio-psycho-social que posibilita la concepción de empresas como entidades Holónicas distribuidas de la variedad requerida por el entorno.

Palabras clave: Complejidad de proyectos; Variedad requerida; Arquitectura empresarial sostenible; Modelos empresariales; Ciclo de vida empresarial; Paradigma holónico.

1. Introducción

Las empresas están permanente sometidas a cambios y su tendencia es incrementar su entropía, haciéndolas evolucionar en su ciclo de vida hacia el desorden, comprometiendo su adaptación evolutiva al entorno. Ello determina el interés de disponer de Arquitecturas de Referencia que permitan crear

empresas reales, virtuales o extendidas que limiten la tendencia natural de los procesos entrópicos y les permitan operar eficientemente bajo criterios de sostenibilidad. Independientemente del desorden inherente a las empresas en su ciclo de vida (CV), muestran patrones de conducta predecibles que hay que entender para poder realizar predicciones y modificaciones en su CV. A pesar de la complejidad que

How to cite: Ávila-Gutiérrez, M. J., Aguayo-González, F., Marcos-Bárcena, M., Lama-Ruiz, J. R. & Peralta-Álvarez, M. E. Reference Holonic Architecture for Sustainable Manufacturing Enterprises Distributed DYNA 84 (200) 159-168, 2017.

presentan y su aparente desorden, las empresas presentan una cierta coherencia entre las partes que la forman y están sujetas a comportamientos emergentes de actuación según su arquitectura, que permiten entender las diferentes conductas relevantes que las definen. Comprendiendo estos principios que determinan dicho comportamiento podremos establecer una estrategia de modelado y predicción de conducta, de tal forma que resulte lógico entender lo que ocurre, por qué ocurre y cómo debemos actuar para intervenir correctamente en la conducta de la empresa. Estas tareas se verán facilitadas de forma exitosa si se dispone de Arquitecturas de Referencia empresarial que permitan su implantación de la forma más ágil posible.

La problemática actual para la concepción de Arquitecturas de Referencia integradas gira en torno a tres conceptos importantes: complejidad empresarial [1], variedad requerida [2] y sostenibilidad empresarial [3]. En los siguientes apartados se hace una aproximación de cada una de estas perspectivas, para su proyección en la concepción de Arquitectura de Referencia Holónica para empresas de fabricación sostenible.

1.1. Complejidad empresarial

La definición de complejidad está relacionada con la diversidad de elementos que componen una situación, su interrelación y las características de elementos e interacción [4]. Es decir, un todo que se compone de partes que interactúan y que estas, al mismo tiempo, se encuentran en contacto con su entorno. Bajo la consideración de otros autores, la complejidad no tiene una única definición. Según Warfield [5], la complejidad depende del punto de vista del observador, ya que algo puede ser complejo para un observador y no serlo para otro grupo de observadores. Para Hall [6] la complejidad se define como el grado de conocimiento requerido para producir el resultado de un sistema. Los aspectos de la complejidad son distintos según el ámbito de análisis de la empresa, por ejemplo en el ámbito de investigación de sistemas de fabricación [7] ha recibido gran atención su complejidad estática y dinámica.

A nivel empresarial se tiene como objetivo disponer de una arquitectura empresarial que sea evolutivamente estable en su entorno, consiguiendo la máxima eficiencia con la mínima complejidad o la complejidad requerida bajo criterios de integración sostenible de los elementos y flujos que la integran.

1.2. Complejidad desde la variedad requerida

Las empresas operan en un entorno de dimensiones caóticas al que han de adaptarse (tecnológico, de mercado, socioeconómico, legal, etc.); ello determina que para poder operar de forma exitosa en su ciclo de vida, deben dotarse de la variedad requerida (límite de complejidad) y de los mecanismos necesarios para su gestión, de forma que puedan adaptarse a los nuevos requerimientos del entorno, modulando su variedad en sintonía con las demandas del entorno.

La variedad requerida y su gestión para obtener sistemas en equilibrio interno y externo en relación con el entorno, fue introducida por Ashby [2], que propone la ley de la variedad y los mecanismos para su gestión. Ashby dice que "solo la variedad puede absorber variedad". Dicho de otra forma, en un sistema regulador-regulado, es preciso que la parte reguladora tenga al

menos la misma variedad que la regulada, para que el sistema pueda alcanzar la estabilidad. De esta ley se deriva la complejidad que debe tener una arquitectura empresarial para adaptarse exitosamente al entorno en que opera. Entre los mecanismos de gestión de la variedad [2] se encuentran los amplificadores y filtros de variedad que posteriormente fueron contemplados en el diseño de organizaciones viables por Beer [8] planteando que la variedad puede ser disminuida a través de atenuadores, limitando la complejidad; y el incremento de variedad puede ser atendida en una forma más eficiente a través de amplificadores de variedad, incrementando la complejidad. Una arquitectura empresarial debe disponer de recursos y energía para administrar la variedad que demanda el entorno interno y externo. La empresa puede hacer uso de **atenuadores** de la variedad generada desde el medio ambiente para disminuir su efecto, o usar **amplificadores** para maximizar el desempeño de sus recursos. No es suficiente contar con recursos para atender la variedad, sino que los recursos deben contar con la capacidad suficiente para atender los diferentes estados y procesos que presente la variedad.

Lo expuesto en los párrafos precedentes determina el interés de disponer de Arquitecturas de Referencia Integradas concebidas con la variedad requerida y los mecanismos de su gestión para adaptarse al medio ambiente en que opera la empresa.

1.1. Sostenibilidad empresarial

Cualquier acción que realicen las organizaciones empresariales para mejorar, debe considerar los requisitos que impone el entorno a su organización. El objetivo que tienen las Arquitecturas de Referencia Integradas es la integración interna (como un todo) y externa (como parte del entorno). Ello determina que sean concebidas desde un marco de colaboración que permita innovar y optimizar las operaciones de la cadena del valor desde la perspectiva de la sostenibilidad de forma integrada, dando lugar a una cadena del valor sostenible. En la Fig. 1, se observan los distintos eslabones de la cadena del valor que han de estar integrados desde la perspectiva de la sostenibilidad tanto ascendentemente (aguas arriba) como descendentemente (aguas abajo). Para cada uno de los eslabones y dada la complejidad de los productos y de la tecnología que se da en las empresas, se requiere una integración de la sostenibilidad en los niveles micro (nanoingeniería), meso (microingeniería) y macro (ingeniería) [9]. Por otra parte, todos estos niveles de un eslabón y ámbitos de la cadena del valor deben quedar integrados desde la perspectiva de los sistemas de gestión de calidad, seguridad y medioambiente,

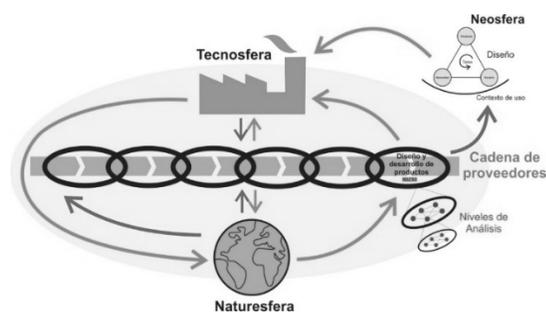


Figura 1. Cadena de valor sostenible.
Fuente: elaboración propia

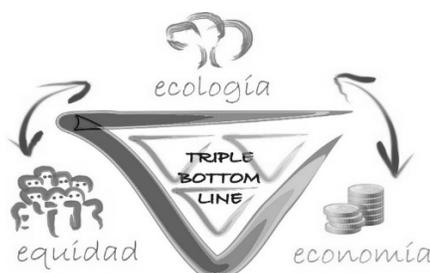


Figura 2. Modelo de Sostenibilidad bajo la triple E
Fuente: elaboración propia

que podrían ser introducidos en un sistema de gestión de valor sostenible, formado por empresas sostenibles, mitigando la fractura metabólica [10,11].

De las distintas formas de conceptualizar y representar la sostenibilidad, la que ha adquirido el mayor nivel de consenso y operatividad es la triple E (triple bottom line) [12], habiendo sido adoptada por el Intelligent Manufacturing System (IMS) como marco para el desarrollo de gran parte de proyectos de su programa de sostenibilidad IMS2020 [13]. Ello determina que constituya un instrumento para su inclusión en la propuesta que formulamos en el presente trabajo, de forma que posibilite la innovación de operaciones, fabricación y empresa sostenible. La perspectiva precedente de sostenibilidad de la empresa y de los sistemas de fabricación en su concepción, comporta una evaluación multidimensional de sus resultados, tomando como base no solo la vertiente económica sino contemplando la evaluación del rendimiento de la misma a través de la “triple bottom line”, o triple cuenta de resultados como se conoce en español, integrando personas (people), planeta (planet) y beneficios (profit). Ver Fig. 2.

Tal como se desprende de los párrafos anteriores, manejar la complejidad empresarial y hacerle frente atendiendo a los aspectos cambiantes del entorno resulta complejo. Ello ha determinado un ámbito de investigación referido a las Arquitecturas de Referencia para la integración de empresas [14] desde el que se han propuesto distintas metodologías, paradigmas y modelos.

La pregunta que motiva el presente trabajo la podemos formular en los siguientes términos: ¿Existe algún modelo empresarial o Arquitectura de Referencia que permita concebir y gestionar aspectos empresariales tales como su complejidad, la variedad disponible y requerida derivada de la gestión de esa complejidad, así como la flexibilidad de las empresas para adaptarse a los entornos cambiantes con criterios de sostenibilidad? Para identificar las respuestas que ha tenido esta pregunta, desde el estado del arte vamos a ver en qué situación se encuentran las aportaciones que la comunidad científica ha llevado a cabo en el ámbito de las arquitecturas de empresa, sus herramientas de modelado y métodos empleados desde distintos puntos de vista como pueden ser: estándares, arquitecturas y marcos empresariales así como metodologías empleadas. Posteriormente y en base a las limitaciones de sostenibilidad de las arquitecturas formuladas hasta el momento por la comunidad científica, se propone una Arquitectura de Referencia para la integración de empresas sostenibles bajo el paradigma holónico.

2. El ámbito de investigación de la arquitectura de integración de empresas

La investigación en “Arquitecturas de Referencia Integradas”

(ARI) tiene una gran tradición en el ámbito de la Ingeniería de Organización [15]. En los momentos actuales las investigaciones tienen que contemplar la empresa virtual, para referenciar una red de empresas independientes, en ocasiones competidoras, que forman una alianza temporal con la finalidad de producir un producto o servicio que les permita aprovechar una oportunidad de mercado y lograr un mayor éxito en sus objetivos. Otro ámbito de proyección de las ARI es el de la empresa extendida, como el conjunto de empresas que establecen una relación duradera y estable a lo largo de la cadena de valor que las une [16]. En el ámbito de las ARI se han propuesto una serie de conceptos con una especial significación que pasamos a exponer para una mejor comprensión del presente trabajo y de las propuestas y aportaciones efectuadas.

2.1. Empresa

De acuerdo con la ISO 15704 [17], una empresa es una o más organizaciones que comparten una misión definida, metas y objetivos para ofrecer un producto o un servicio. Esta amplia definición abarcaría también a la empresa extendida (EE) (integración de proveedores y clientes a largo plazo) y empresa virtual (EV) (más orientada a la interoperabilidad de las redes empresariales dinámicas). La empresa virtual (EV) tiene una naturaleza dinámica y menos estable que la empresa extendida. La idea es unir las capacidades y competencias que vienen de diferentes empresas para formar una entidad de negocio viable que satisfaga la necesidad del mercado de forma oportuna.

La empresa extendida (EE) son las organizaciones que además de gestionar su propia cadena de valor, tienen en cuenta el resto de elementos que intervienen en la cadena del valor global, desde el cliente hasta el proveedor, sin olvidarnos de los empleados; esto se logra a través de la incorporación de nuevas tecnologías, la innovación y la implementación de estrategias empresariales que facilitan la comunicación.

2.2. Arquitectura empresarial

De acuerdo con la ISO 15704 [17], una arquitectura es una descripción de la estructura básica y la conectividad de partes de un sistema (ya sea físico o un objeto conceptual o entidad). En términos generales, una arquitectura empresarial (AE) debe estar organizada de manera que apoye el razonamiento sobre la estructura, las propiedades y el comportamiento del sistema. Define los componentes que conforman el sistema global y proporciona un modelo a partir del cual el sistema puede ser desarrollado. La arquitectura permitiría gestionar la complejidad y los riesgos debidos a diversos factores tales como la tecnología, el tamaño, la interfaz, el contexto y las partes interesadas (stakeholders). Se puede decir que las AE focalizan las características o rasgos significativos de un sistema mientras que los modelos empresariales describen y especifican en detalle el sistema.

2.3. Integración empresarial

La integración empresarial es el proceso de garantizar la interacción entre las entidades empresariales necesarias para alcanzar los objetivos del dominio del negocio [18].

La integración empresarial se puede abordar de varias maneras y en varios niveles [19], por ejemplo: (i) integración física (interconexión de dispositivos, máquinas de control numérico a

través de redes informáticas), (ii) la integración de aplicaciones (integración de aplicaciones software y sistemas de bases de datos) y (iii) la integración de negocios (coordinación de las funciones que gestionan, controlan y siguen los procesos de negocio), integración de los flujos (materiales, energía, información, fluidos, etc.), integración de departamentos o sistemas de gestión (seguridad y salud, calidad, medio ambiente, etc.).

Algunos otros enfoques consideran también la integración a través del modelado de la empresa mediante el uso de un marco de modelado consistente [20] y la integración como un enfoque metodológico para lograr coherencia en la toma de decisiones de la empresa [21]. En cuanto a las arquitecturas de integración más conocidas podemos encontrar: CIMOSA (Open System Architecture), GIM (GRAI Integrated Methodology) y PERA (arquitectura desarrollada por Purdue University) que serán desarrolladas en apartados posteriores.

2.4. Interoperabilidad empresarial

El concepto de interoperabilidad empresarial adquiere una gran importancia en el contexto de la empresa virtual (EV) y extendida (EE) como forma de operar con recursos y medios desde una perspectiva deslocalizada.

En [22] se han revisado algunas definiciones sobre interoperabilidad. Hablando en términos generales, se puede decir que la interoperabilidad es la capacidad que tienen los sistemas informáticos de entenderse unos a otros y usar sus funciones de forma recíproca. El concepto inter-operar implica que un sistema realiza una operación de otro sistema de forma deslocalizada. Desde el punto de vista de la tecnología informática [23], es la facultad que poseen dos sistemas informáticos heterogéneos de funcionar de forma conjunta para acceder a sus recursos de manera recíproca. En el contexto de las redes empresariales [24] la interoperabilidad se refiere a la capacidad propia de las interacciones para intercambiar información y servicios entre los distintos sistemas de la empresa. La interoperabilidad es significativa si las interacciones tienen lugar en al menos tres niveles diferentes: datos, servicios y procesos, con una semántica definida en un contexto de negocios.

3. Modelado empresarial

El objetivo del modelado empresarial se define como el arte de externalizar el conocimiento de diseño empresarial, que añade valor a la empresa o necesita ser compartido, es decir, representando la empresa en términos de su organización y sus operaciones (procesos, comportamiento, actividades, información, objetos y flujos de materiales, recursos y unidades de organización, e infraestructuras de sistemas y arquitecturas). En distintos Proyectos Europeos, UEML [25], IDEAS [26], ATHENA [27] e INTEROP [28], se han realizado, con diferentes propósitos, estados del arte sobre modelado empresarial los cuales recogen extensos ejemplos y documentación sobre este dominio de conocimiento.

En el estado del arte que formulamos en el presente trabajo, se recogen solo aquellos métodos y técnicas en relación a ARI, Arquitecturas de Empresas y Modelado Empresarial que se consideran más relevantes desde el punto de vista de la representación del conocimiento empresarial [29]. Se ha dividido el estado del arte de las ARI en tres

categorías como son: los estándares, las arquitecturas empresariales y las metodologías.

3.1. Estándares

Existen muchos métodos y técnicas de modelado empresarial que han venido siendo establecidos durante los años 90, lo cual ha dado lugar a que existan un gran número de iniciativas y grupos de estandarización en este ámbito a nivel mundial. Estos estándares proponen que el modelado empresarial debe al menos cumplir los siguientes requisitos:

- Contemplar tres tipos fundamentales de flujo dentro y entre las empresas: materiales, información y decisión o control.
- Representar cuatro vistas de modelado: funcional, de información, de recursos y organizativa.
- Permitir tres niveles de modelado: definición de requisitos, especificaciones de diseño y descripción de la implementación.

A pesar de la necesidad de los estándares para una mejor integración e interoperabilidad de las empresas y del gran esfuerzo empleado en su desarrollo, estos tienen muy poca o nula implantación en la industria. Sin embargo, es necesario tenerlos en cuenta porque sientan las bases de lo que debe ser el modelado empresarial desde diferentes puntos de vista y recogen la mayor parte del conocimiento sobre modelado empresarial desarrollado en los últimos veinte años. Ver Tabla 1.

3.2. Arquitectura Empresarial (AE)

Los modelos de arquitecturas empresariales se utilizan como instrumentos que permiten a las empresas afrontar los retos asociados con la complejidad que le presenta el entorno operativo de una organización [30].

Desde distintos grupos de desarrollo e investigación internacional se han propuesto varias arquitecturas revisadas y analizadas en diversos estudios mostrados en la Tab. 2. Entre ellas algunas de las más conocidas son CIMOSA, arquitectura desarrollada en el programa ESPRIT de la Unión

Tabla 1. Estándares relacionados con el modelado empresarial.

Estándar	Descripción
EN ISO 19439:2006	Enterprise integration. Framework for enterprise modeling. (Anterior: ISO 19439:2004)
ISO 14258:1998	Concepts and rules for enterprise models
ISO 15704:2000	Industrial automation systems. Requirements for enterprise reference architectures and methodologies.
ISO/IEC 15288:2008	System and software engineering. System life cycle processes.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2. Arquitecturas empresariales (AE).

CIMOSA	CIM Open System Architecture	[31-33]
GRAI	Graphs with Results and Actions Inter-related	[34]
PERA	Purdue Enterprise Reference Architecture	[35]
ARIS	ARchitecture of integrated Information Systems	[15]
MISSION-IEM	IEM_Integrated Enterprise Modelling	[36, 37]
AKM	Active Knowledge Modeling	[38]
ArchiMate	ArchiMate	[39]

Fuente: Elaboración propia

Europea, por el consorcio AMICE; GRAI, arquitectura derivada del trabajo llevado a cabo en varios proyectos subvencionados por el programa ESPRIT de la Unión Europea como IMPACS, por el GRAI/LAP de la Université Bordeaux 1 (Francia); y PERA, arquitectura desarrollada por la Purdue University (EEUU). Estas arquitecturas proporcionan entornos completos de modelado en los cuales es posible llevar a cabo todos los modelos necesarios para el análisis, diseño e implementación de una empresa mediante las metodologías, los lenguajes y las herramientas de soporte que proporcionan conjuntamente. Ver Tabla 2.

El gran número de Arquitecturas de Referencia existentes dificulta el proceso de selección de una determinada para la realización de una tarea específica de modelado, puesto que la mayor parte de ellas están orientadas al concepto de ciclo de vida, pero sin embargo no cubren distintas partes del mismo y además el conjunto de constructores y nomenclatura que utilizan para representar los modelos es diferente. En el contexto del presente artículo es obligado remarcar la ausencia de trabajos que contemplen Arquitecturas de Referencia para empresas sostenibles.

3.3. Marcos generales de modelado empresarial

Los marcos generales de trabajo [40] para el modelado empresarial proponen un enfoque general para desarrollar modelos empresariales pero no disponen de todos los elementos que les harían ser considerados una Arquitectura de Referencia empresarial. En general, podemos identificar como uno de los marcos más interesantes el de Zachman [41], ya que su sencillez, completitud y la posibilidad de mapearlo sobre otros enfoques lo hacen especialmente atractivo. El resto de marcos son el resultado de iniciativas de diversos departamentos de EEUU (DoDAF, TOGAF, TEAF, etc.) como repuestas a necesidades muy concretas que no aportan nada nuevo a los enfoques ya comentados.

3.4. Metodologías

En [42] una metodología de ingeniería empresarial describe el proceso de la ingeniería e integración empresarial. Una metodología de ingeniería empresarial debe ser expresada en forma de un modelo de proceso o procedimiento estructurado con instrucciones detalladas para cada actividad de integración y de ingeniería empresarial. Según Anaya [25] existe modelado empresarial específico. La mayoría de ellos son guías metodológicas aplicables al proceso de modelado independientemente de cualquier lenguaje, entre los que cabe considerar IDEF. Los métodos IDEF [43,44] son utilizados para crear representaciones gráficas de varios sistemas, analizar el modelo, crear el modelo de una versión deseada del sistema y ayudar en la transición desde uno a otro. Dependiendo del método IDEF utilizado, existen diferentes sintaxis para representar los modelos. Además, existen herramientas software que proponen o prescriben una metodología específica para ser usada [26].

Tras realizar el análisis anterior sobre aspectos tales como marcos y arquitecturas de modelado, técnicas de modelado, así como las metodologías, nos planteamos una nueva pregunta: ¿cuál es el marco más adecuado para la concepción empresarial con una Arquitectura Integrada Sostenible? Para responder a esta pregunta debemos adoptar un marco que integre distintos aspectos que son considerados de interés y que de forma parcial se encuentran en las distintas propuestas tales como:

- Completitud del análisis y síntesis contemplando: vistas, niveles, flujos y etapas del ciclo de vida en el análisis.
- Integración de la sostenibilidad distribuida y multinivel para mitigar la fractura metabólica bajo mínima complejidad empresarial.
- Considerar el carácter bifronte como todo y parte, producto y procesos de las empresas.
- Carácter fractal y ubicuo, minimización de la complejidad de la Arquitectura Empresarial.
- Requerimientos de cooperación y colaboración entre sus entidades y con el exterior para la adaptación dinámica y evolutivamente estable al entorno cambiante y caótico.
- Autonomía y autoasertividad de las unidades que la integran, para configurar entornos, innovadores, armónicos y estables.
- Autorregulación para la variedad requerida de la empresa y las entidades que la forman, formando un todo con el medio natural sin solución de continuidad.
- Capacidad de manejar la complejidad con la variedad requerida.

De los análisis de las AR y los marcos de trabajo identificados en el estado del arte, no se han encontrado trabajos que aporten soluciones a los requisitos expuestos en los párrafos precedentes y que consideramos esenciales para el modelado empresarial bajo los nuevos conceptos de EV y EE sostenibles. Lo anteriormente expuesto permite concluir que ninguno de ellos contempla aspectos tales como: el concepto de sostenibilidad en ninguna de sus vistas, las técnicas de gestión de la variedad bajo mínima complejidad, la consideración de dualidad como todo y parte, así como el ciclo de vida de manera completa; por ello, en el presente trabajo planteamos el enfoque holónico para establecer una Arquitectura Empresarial de Referencia que soporte los requerimientos de sostenibilidad social, económica y ambiental.

4. Modelo formal para la caracterización de una Arquitectura Empresarial Holónica

Los estudios holónicos constituyen un avance en la intención de contar con visiones de mayor alcance, holísticas e integradoras que expliquen e integren la realidad humana con la realidad organizacional y de esta con el medio ambiente en un paradigma más acorde y sostenible con los tiempos que vivimos. Este marco permite estructurar las organizaciones en diferentes niveles y al mismo tiempo hace que interactúen entre ellas y con el entorno con la variedad requerida y sin solución de continuidad [7], evitando la fractura metabólica [10]. Además permite soportar diferentes herramientas y metodologías complementarias como pueden ser amplificadores y filtros desde la teoría de la variedad de Ashby como mecanismo para abordar la complejidad o diversas estrategias sostenibles bajo criterios fractales, que mitiguen la fractura metabólica configurando ecosistemas socio-naturales sin solución de continuidad.

4.1. Origen y desarrollo del paradigma holónico

El término “holón” fue acuñado por el escritor y filósofo Arthur Koestler para referirse a una unidad organizacional básica en sistemas físicos, psicológicos, biológicos y sociales tras un análisis sincrónico y diacrónico de la arquitectura de la complejidad en entidades bio-psico-sociales y culturales [45-47]. La palabra holón

es una combinación de la palabra griega *holos*, que significa *el todo* y el sufijo *on*, que significa *partícula o parte*. Un holón es una parte identificable de uno o más sistemas y es, a la vez, un sistema formado por partes subordinadas que lo integra como un todo.

El concepto de holón ha sido ampliamente utilizado como recurso de modelado en sistemas inteligentes de fabricación [48] y particularmente, en sistemas de fabricación multi-agentes inteligentes [49]. En el contexto industrial, la palabra “holónica” se refiere a las relaciones y propiedades que se dan entre los holones que forman un sistema, la forma en que se manifiestan reciben el nombre de holonomía. Dos de estas propiedades son la autonomía y la cooperación. Cada holón es autónomo en sus decisiones y coopera con otros para alcanzar los objetivos de la totalidad de la cual forma parte. En el contexto empresarial y, particularmente, en pequeñas y medianas empresas (PYME), la noción de holón ha facilitado la creación de un tipo de estructura organizacional flexible y dinámica, a la cual McHugh [50] denomina “organización virtual”. Una organización virtual holónica es una red empresarial cuyos nodos están formados por empresas (holones) relacionadas en torno a uno o más objetivos comunes.

Desde el paradigma holónico es posible conceptualizar la ecoesfera como las distintas entidades que constituyen el medio natural –naturaleza-, el medio artificial –tecnosfera y noosfera-, como un conjunto de elementos u holones, y de sus interacciones que constituyen su holarquía. El desarrollo original de Koestler ha tenido recientes contribuciones a partir de los trabajos de Wilbers [51] y Aguayo [7].

4.2. Principios holónicos

En el marco paradigmático holónico las entidades se articulan para formar estructuras holónicas basándose en unos principios fundamentales [7] que pasamos a enunciar:

- Principio 1.- La realidad se configura mediante holarquías. Las holarquías son estructuras que se refieren a cualquier organización físico-químico, bio-psico-social y cultural con determinado grado de coherencia, estabilidad dinámica y armonía; presenta un ordenamiento, en el cual, de forma general, se aplican ciertos principios o leyes a todos los niveles de su organización holárquica y las entidades que los constituyen reciben la denominación de holones. Una holarquía es una estructura multinivel abierta autorregulada entre procesos y productos que representa propiedades emergentes en cada uno de sus niveles como: culturales, sociales, cognitivas, biológicas, químicas, etc. La holarquía quedaría formalizada por una tripla constituida por holones como todo o entidad básica dual (HOLÓN/T), relaciones entre holones como parte (RELACIONES_HOLÓN/P) y las reglas y estrategias de comportamiento de los mismos que constituyen el canon y la estrategia de toda la holarquía (Est_C).

$$\langle \text{HOLARQUÍA} \rangle ::= \langle \langle \text{HOLÓN/T} \rangle \langle \text{RELACIONES_HOLÓN/P} \rangle \langle \text{Est_C} \rangle \rangle$$

- Principio 2.- Los holones son entidades bifrontes (dos caras). Cada elemento de la red está constituido por una entidad denominada holón que es todo y parte, que posee una serie de propiedades que le confieren su holonomía, que se expresa mediante polimorfismo a través de su inclusión en la holarquía de nivel superior.

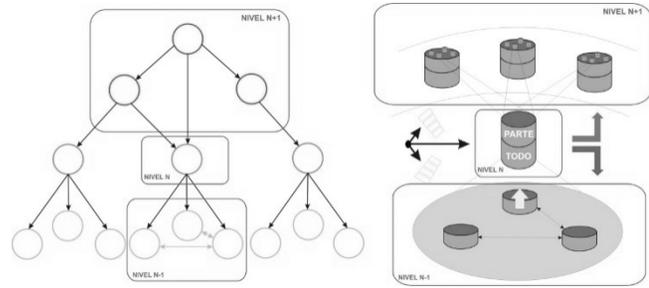


Figura 3. Carácter fractal de la holarquía y modelo para su análisis. Fuente: elaboración propia

- Principio 3.- Toda matriz holárquica es fractal. El holón y sus relaciones con otros holones constituyen la matriz holárquica a la que pertenece. La entidad básica es la representada por el holón en el nivel n, la holarquía de nivel n+1 y la de nivel n-1, como queda representado en la Fig. 3. La holarquía tiene un carácter fractal como producto y como procesos, la misma está integrada por las entidades (producto) y las estrategias y procedimientos (procesos) para encapsular la complejidad entre dominios de propiedades emergentes multinivel, junto con las relaciones de colaboración entre holones de nivel n y holarquía de nivel n+1, determinadas por distintos flujos

4.2. Propiedades del holón

Todo holón queda caracterizado mediante un conjunto de propiedades [7] que pasamos a exponer:

- Un holón es *TODO/PARTE*: un holón puede ser parte de otro holón o integrar distintos holones u holarquías en interacción armónica, constituyendo dominios de colaboración (n+1) o de cooperación (n-1).
 $\langle \text{HOLÓN} \rangle ::= \langle \langle \text{HOLÓN/T} \rangle \langle \text{HOLÓN/P} \rangle \rangle$
 - ♦ *El HOLÓN /T*. Puede ser modelado como una *quíntupla* integrada por los siguientes elementos:
 $\langle \text{HOLÓN/T} \rangle ::= \langle \langle \text{Identificador} \rangle \langle \text{Entradas} \rangle \langle \text{Salidas} \rangle \langle \text{Conjunto de estados internos} \rangle \langle \text{Función de evolución} \rangle \langle \text{Función operacional} \rangle \langle \langle \text{Dominios de Cooperación} \rangle_{n-1} \rangle$
 - ♦ *El HOLÓN/P*. Se refiere a la especificación del holón desde la perspectiva de la parte que se integra en distintos holones/holarquías. Este se puede modelar como una tripla:
 $\langle \text{HOLÓN/P} \rangle ::= \langle \langle \text{Holón/P} \rangle \langle \langle \text{Dominio_colaboración} \rangle_{n+1} \rangle \langle \text{Roles} \rangle \rangle$
- Un holón es una entidad *AUTÓNOMA*: posee capacidad de crear y controlar la ejecución de sus propios planes o estrategias de forma autorregulada como la variedad de la que está dotada. Un holón es autónomo si y solo si su comportamiento (ϕ_i) depende de su estado y de sus percepciones, es decir:

$$\phi_i = s_i \times p_i \rightarrow s_i \times a_i$$

s_i : estados posibles del holón h_i

p_i : percepciones o entradas del holón h_i

a_i : acciones de que está dotado el holón h_i

- Un holón es una entidad *COLABORATIVA*: se integra en una o más holarquías de nivel superior denominadas

dominios de colaboración, formando las holarquías de nivel $n+1$, es una propiedad del holón en cuanto a su expresión como parte (Fig. 3).

$\Pi(\text{Holón}/P, p_i) \rightarrow D.\text{colaboración}_i$

Π : es una función de percepción/entradas que determina las percepciones/entradas del holón.

Colaboración <Conjunto Holón/T de nivel $n+1$ >

<D. colaboración_i>::=<<ID><R.D. colaboración>

<Rol>>

♦ **ID**: identidad y metas del holón de nivel $n+1$ perteneciente al dominio de colaboración que integra el holón como parte de nivel n .

♦ **R.D.colaboración**: recursos requeridos por el dominio de colaboración como por ejemplo, comunicación, coordinación, control, operación,...

♦ **Rol**: son los "papeles" asignados al holón en el dominio de colaboración y que desempeña como todo el holón i de nivel $n+1$. Es la especificación de requerimientos funcionales (RF_i); dominios y ámbitos de responsabilidad del rol (Dr_i), realizaciones asociadas al rol, conjunto de actividades y operaciones que lo integran (R_i) y competencias asociadas al rol y sus clases de conocimientos asociados (C_i).

<Rol>::=<< RF_i >< Dr_i >< R_i >< C_i >>

Desde el punto de vista del dominio de colaboración, el número de dominios desplegados en el nivel $n+1$ (ej. D. colaboración 1, D. colaboración 2,...) proporciona un grado de variedad que podrá ser amplificado o atenuado según el control que se desee realizar sobre el mismo.

Un holón es una entidad **COOPERATIVA**: integra otros holones y procesos en el que un conjunto de entidades realizan conjuntamente planes aceptables para desarrollar una función. De la cooperación se derivan propiedades emergentes. Es una propiedad del holón en cuanto a todo. Dicha propiedad debe sintetizar procesos y productos de variedad requerida a mínima complejidad estática y dinámica.

$\Pi(\text{Holón}/T, p_i) \rightarrow D.\text{cooperación}_i$

Cooperación <Conjunto Holón/P de nivel $n-1$ >

<D.cooperación_i>::=<<ID><R.D.cooperación>

<Rol>>

♦ **ID**: identidad y metas del holón de nivel $n-1$ perteneciente al dominio de cooperación que integra el holón como todo de nivel n .

♦ **R.D.cooperación**: recursos requeridos por el dominio de cooperación como por ejemplo, comunicación, coordinación, control, operación,...

♦ **Rol**: son los "papeles" asignados al holón en el dominio de cooperación y que desempeña como parte el holón i de nivel $n-1$. Es la especificación de funciones o procesos (Fi); dominios y ámbitos de responsabilidad del rol (Dr_i), realizaciones asociadas al rol, conjunto de actividades y operaciones que lo integran (R_i) y competencias asociadas al rol y sus clases de conocimientos asociados (C_i).

♦ <Rol>::=<< Fi >< Dr_i >< R_i >< C_i >>

Desde el punto de vista del Dominio de Cooperación, cada una de las vistas desplegadas en dicho nivel ($n-1$) da lugar a un grado de variedad que deberá ser tratado según la vista en la que nos encontremos. (ej. Vista informacional, de actividades, flujo de materiales,...)

d) Un holón es **AUTOASERTIVO**: está dotado de capacidad de imponer ante otros holones formas de interacción, planes, estrategias, ideas, criterios o pensamientos para desarrollar unos planes. Cuando la actuación, percepción y estado no están acoplados a otros holones: $\phi_i = s_i \times p_i \rightarrow s_i \times a_i$ la actuación solo depende de su estado s_i y de su

percepción p_i . De este modo, a partir de su percepción, el holón determina su nuevo estado $s_i = \phi_i(s_i \times p_i)_1$ y su próxima acción $a_i = \phi_i(s_i \times p_i)_2$ de forma desacoplada a los otros holones. Los modos de cooperación generan las distintas clases de funciones dando lugar al balanceo de cooperación y asertividad requerida según la clase de tarea.

e) El holón se **AUTORREGULA**: está dotado de capacidad de cambiar su modo de cooperar para desarrollar una función confiriéndole resiliencia a la variedad requerida. Puede ser interna o externa del holón.

4.3. El ciclo de vida del holón

El ciclo de vida del holón se estructura en tres dimensiones recogidas en la Fig. 4, que son: las etapas del ciclo de vida, las vistas de la complejidad y los grados de especificidad del mismo como entidad particular, parcial o general según el grado de concreción o especialización del mismo.

La variedad en el ciclo de vida se encontrará determinada por el número de etapas, grado de generalidad y por el número de vistas. En el ciclo de vida (CV), el tiempo se introduce como una sucesión de acontecimientos regulares, así, a cada intervalo de tiempo, el holón h_i recibe de su entorno $p \in \Sigma$ y de su propio estado $s_i \in S_i$, su percepción local $p_i = \Pi(p)_i$. A partir de esta percepción, el holón determina su nuevo estado $s_{i+1} = \phi_i(s_i \times p_i)_1$ y su próxima acción $a_{i+1} = \phi_i(s_i \times p_i)_2$, una sucesión de intervalos que constituye el ciclo de vida del holón.

4.4. La autorregulación del holón

El holón como entidad autónoma en interacción armónica con el entorno dispone de una consigna de variedad requerida y de unos mecanismos de autorregulación, en base a la realimentación proveniente de los dominios de colaboración de las holarquías $n+1$ y de los dominios de cooperación pertenecientes a las holarquías $n-1$. A partir de las mismas el holón establece unas estrategias de autoajuste sobre el dominio de cooperación mediante estrategias de control hacia abajo (top-down) y sobre el dominio de colaboración basadas en estrategias de control hacia arriba (bottom-up).

En la consigna para la autorregulación del holón (Fig. 5), para el caso de un holón sostenible, encontramos indicadores de sostenibilidad bajo la triple E, de manera que todo el flujo de requerimientos funcionales o funciones que la atraviesen contemplarán la tripla de sostenibilidad formada por indicadores de economía, ecología y equidad, es decir, los tres conceptos en torno a los cuales gira la Sostenibilidad orientada a la consecución del equilibrio metabólico con la ecosfera o la mitigación de la fractura metabólica.

4.5. Resiliencia holónica

Desde la Ley de Ashby, "Solo la variedad puede absorber variedad", se corresponde con un sistema regulador-regulado, en el que es preciso que la parte reguladora tenga al menos la misma variedad que la regulada, para que el sistema pueda alcanzar la estabilidad, bajo distintas contingencias internas y externas. De ello deriva que la consigna de variedad requerida

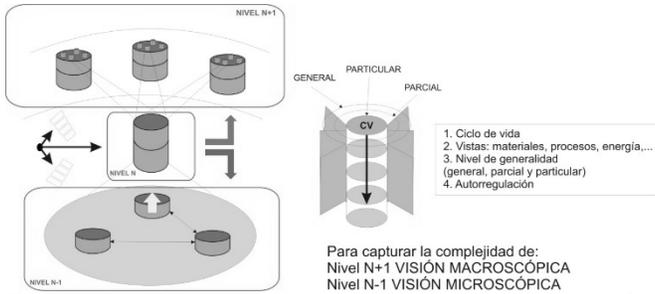


Figura 4. Dimensiones de la variedad holónica en el nivel n como interfaz de los niveles n y n+1 o n-1.
Fuente: elaboración propia

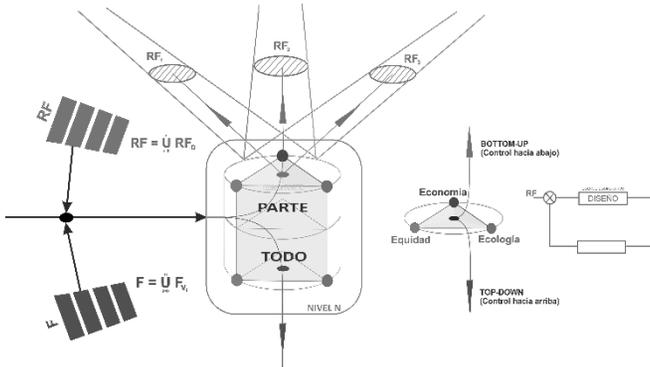


Figura 5. El holón como entidad regulada por los dominios de colaboración y como regulador de los dominios de las holarquías de los dominios de cooperación.
Fuente: elaboración propia.

del holón es variable en función del efecto de aprendizaje, entrenamiento o experiencias que ha tenido el holón o requerimientos nuevos de sostenibilidad.

4.6. Caso de estudio

Una organización holónica empresarial es un conjunto de empresas que actúan de forma integrada para acometer una oportunidad de negocio que solicita un cliente. Cada empresa participante, denominada holón, es responsable de la ejecución de uno o más procesos de la cadena de valor requerida por la organización.

<ARH>::<<Holón empresa>/<Holarquía empresa>><Entorno>>

La complejidad empresarial radica tanto en la diversidad de proyectos, como en la realización de actividades que pueden ser paralelas a los proyectos sin olvidar la propia complejidad del proyecto en sí. Para establecer una holarquía empresarial tenemos que tener en cuenta los agentes intervinientes y las relaciones existentes entre ellos.

Si planteamos el objetivo de la realización de un proyecto empresarial de fabricación, podemos distinguir entre otras, dos tipos de empresas: la empresa ingeniería y la empresa promotora (Fig.6). Para ello necesitamos conocer la relación entre el proyecto y la organización en la que se va a desarrollar el mismo. En esta relación encontramos los procesos asociados a la empresa, distinguiendo entre procesos básicos o esenciales de la empresa, estratégicos, de soporte o de medición. Cada proceso a su vez queda representado a nivel de organización por las distintas áreas departamentales como pueden ser: diseño, fabricación, compras,

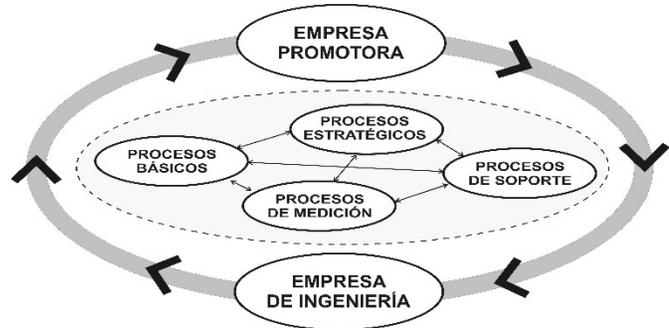


Figura 6. Holarquía de entidades para Arquitectura de Referencia Holónica.
Fuente: elaboración propia

finanzas, marketing, dirección y control o servicios generales. Las áreas funcionales a su vez están desglosadas en actividades desarrolladas con la tecnología y los recursos necesarios y finalmente la conjunción o integración de todo desde el punto de vista informacional.

El modelo propuesto está compuesto de distintas vistas holárquicas que a su vez están formadas por holones u otras organizaciones holónicas de menor tamaño. Cada holón es una unidad organizacional autónoma que ejecuta aquellos procesos para los cuales es más competente. Tienen la capacidad de crear, ejecutar sus propios planes y definir estrategias y actividades para realizar los procesos que le corresponden. Los holones cooperan entre sí a fin de que se ejecuten todos los procesos que son necesarios para producir los productos y/o prestar los servicios que le han sido encomendados. A efectos de modelado, una organización empresarial holónica debe estar caracterizada en los aspectos expuestos en los párrafos precedentes en las siguientes dimensiones y niveles:

- i. **Holarquía de nivel n+1:** define el DOMINIO COLABORATIVO y los requerimientos holónicos.
- ii. **Holarquía de nivel n-1:** define el DOMINIO COOPERATIVO y la competencia o capacidades holónicas.
- iii. **Holón de nivel n:** actúa como interfaz de adaptación de la variedad holónica entre los niveles n-1 y n+1. Se define el ciclo de vida (vistas, fases, generalidad) y los mecanismos de autorregulación. En este nivel el holón se dota de mecanismos de AUTORREGULACION: validación, verificación y estrategias de control hacia arriba y hacia abajo. En este nivel se establece la consigna de indicadores de sostenibilidad bajo la 3E.

Una vez expuestos los fundamentos del paradigma holónico pasamos a concretar o instanciar el concepto de holarquía y holón como marco paradigmático para el modelado de organizaciones con la variedad requerida, proponiendo una Arquitectura genérica (Fig. 7).

5. Conclusiones

A pesar de que las organizaciones empresariales se esfuerzan por hacer las cosas correctas y por aplicar las más modernas herramientas de gestión y control, la realidad sigue superando al diseño y la planificación y los resultados no son satisfactorios. Alrededor de las empresas, existe una problemática derivada de la complejidad empresarial; el manejo de esa complejidad con la variedad requerida como elemento de regulación y la

- [31] Ortiz A., Lario F. and Ros, L., Enterprise integration–business processes integrated management: A proposal for a methodology to develop enterprise integration programs. *Computers in Industry*, 40(2-3), pp. 155-171, 1999
- [32] ESPRIT Consortium AMICE. CIMOSA: Open System Architecture for CIM. Springer-Verlag, 1991.
- [33] Ortiz, A., Vrcilt - Virtual reality CIMOSA learning and training tutorial, 2005.
- [34] Doumeingts, G., Dossou, P.E., Despoix, T., Roque, M., Vallespir, B. and Domenger J.P., GRAI Metamodeling v 2.5. Technical report, UEML (IST-2001- 34229) WP3, 2002.
- [35] Williams, T., The Purdue enterprise reference architecture. In Elsevier, editor, Proc. of the Workshop on Design of Information Infrastructure Systems for Manufacturing, 1993.
- [36] IEM. Business process oriented knowledge management. In: K. Mertins, Heisig, P. and Vorbeck, J., eds., Knowledge Management. Concepts and Best Practices. Springer-Verlag, 2003.
- [37] Spur, G., Mertins, K. and Jochem, R., Integrated enterprise modelling. beuth Verlag GmbH, 1996.
- [38] Lillehagen, F., Dehli, E., Fjeld, L., Krogstie, J. and Jorgensen, H., Utilizing active knowledge models in an infrastructure for virtual enterprises. In PROVE, pp. 353-360, 2002.
- [39] Lankhorst, M., Enterprise architecture at work. Springer-Verlag, 2005.
- [40] Shah, H. and Kourdi, M.E., Frameworks for enterprise architecture. *It Professional*, 9(5), pp. 36-41, 2007.
- [41] Zachman, J., A framework for information systems architecture. *IBM Systems Journal*, 38(2-3), pp.454-70, 1999.
- [42] IFIP-IFAC. Generalised enterprise reference architecture and methodology (GERAM). Technical Report Version 1.6.3, 1999.
- [43] IDEF. Integrated DEFINition methods, [online]. 2014. Available in: <http://www.idef.com/>
- [44] Noran, O. UML vs. IDEF: An ontology-oriented comparative study in view of business modelling. In ICEIS (3), pp. 674-682, 2004.
- [45] Koestler, A., The ACT of creation. The Danube Edition, London, 1976.
- [46] Koestler, A. The ghost in the machine. The Danube Edition, London, 1981.
- [47] Koestler, A., Jano. Ed. Debate, Madrid, 1981.
- [48] Bongaerts, L., integration of scheduling and control in holonic manufacturing systems. PhD Thesis, Department Werktuigkunde Afdeling Productietechnieken. Katholieke Universiteit Leuven, Belguin, 1998.
- [49] Ulieru, M., Stefanoiu, D. and Norrie, D., Holonic self-organization of multi-agent systems by fuzzy modeling with application to intelligent manufacturing. In: Systems, Man and cybernetics, 2000 IEEE International Conference (3), pp. 1661-1666, 2000.
- [50] McHugh, P., Merli, G. and Wheeler, W.A., Beyond business process reengineering: Towards the holonic enterprise, John Wiley, New York, N.Y., 1995.
- [51] Wilber, K., Una teoría de todo: Una visión integral de la ciencia, la política, la empresa y la espiritualidad. Editorial Kairós, 2001.
- [52] Aguayo, F., Diseño y fabricación de productos en sistemas holónicos: Aplicación al desarrollo de un módulo holónico de diseño, Tesis Doctoral, Departamento de Ingeniería Mecánica y Diseño Industrial, Universidad de Cádiz, España, 2003.

M.J. Ávila-Gutiérrez, is BSc. Eng. in Industrial Design and MSc. Design and development of products and industrial installations and PhD. student (in doctoral program of materials, manufacturing and environmental engineering). She worked for consulting companies within the aeronautical and agroindustrial sectors. Actually, she works as professor at University of Seville (Department of design engineering, engineering Project area). Field of knowledge: Holonic manufacturing systems, ecological modeling, natural and industrial systems with emphasis on environmental management and sustainability.
ORCID: 0000-0002-2801-1153

F. Aguayo-González, is BSc. Industrial Eng, Engineer and PhD. Industrial Engineering, BSc. Psychology, Computer Science Engineering, MSc. Quality, Environment, Security and Health. He is professor at University of Seville (Department of Design Engineering, Field of Knowledge: Engineering Project). He worked as project manager of engineering project of installations and products.
ORCID: 0000-0002-8381-5947

J.R. Lama-Ruiz, BSc. Engineer, MSc. Electronic Eng and PhD. Student (in doctoral program of manufacturing engineering). He worked as project

manager in different companies in industrial automation, distributed and intelligent system to fleet management. He is professor at University of Seville (Department of design engineering, Field of Knowledge: Engineering Project), at Higher Polytechnic School and Quality assistant manager.

ORCID: 0000-0003-1382-5274

M. Marcos-Bárcena, BSc. Physical and PhD. Physics. Head of Manufacturing & Materials Engineering and Technologies. He is professor at University of Cádiz in the Department of Mechanic Engineering and Industrial Design. He worked in different projects in aeronautical sector.
ORCID: 0000-0002-4805-832X

M.E. Peralta-Álvarez, BSc. Eng Industrial Design, MSc. Environmental Engineering, and PhD. Student (in doctoral program of materials, manufacturing and environmental engineering). She works as professor at University of Seville (Department of design engineering, Field of Knowledge: engineering Project), and her aim topics of research are design and sustainable manufacture.
ORCID: 0000-0003-0252-9349



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Ingeniería Administrativa e
Ingeniería Industrial
Oferta de Posgrados

Especialización en Gestión Empresarial
Especialización en Ingeniería Financiera
Maestría en Ingeniería Administrativa
Maestría en Ingeniería Industrial
Doctorado en Ingeniería - Industria y Organizaciones

Mayor información:

E-mail: acia_med@unal.edu.co
Teléfono: (57-4) 425 52 02