

LAS ONTOLOGÍAS Y EL MARCO FBS

Cebrián, D.^(p); Vidal, R.

Abstract

In the past years there have been great advances in the development of ontologies applied to the field of engineering design, essentially in functional and structural models.

A great diversity of methodologies for the analysis of the design process in relation to the FBS (Function - Behaviour - Structure) framework have been modelled, thereby attaining a profound knowledge of the subject. Hence, it is possible to carry this knowledge to the industrial domain through the use of ontologies.

In the article, an in-depth analysis of the existing methodologies based on the FBS framework is carried out. Later, the focus is shifted onto the ontologies that were based upon the aforementioned framework. From this review, a discussion of the ontologies is made, pointing out their main virtues.

The aim is to insist upon the benefits of ontologies and to encourage their wider industrial application.

Keywords: ontology, conceptual design, FBS

Resumen

En los últimos años, se han producido grandes avances en el desarrollo de ontologías aplicadas al campo de la ingeniería de diseño, esencialmente en modelos funcionales y estructurales.

Se han modelado una gran diversidad de metodologías para el análisis del proceso de diseño en relación al marco FBS (Función – Comportamiento - Estructura), logrando un conocimiento profundo sobre la materia. Con ello, es posible trasladar dicho conocimiento a través de las ontologías al ámbito industrial.

En el desarrollo del artículo se realiza un análisis en profundidad de las metodologías existentes basadas en el marco FBS. Posteriormente, se centra en las ontologías que se han basado en el citado marco. A partir de esta revisión, se establece una discusión indicando las principales virtudes.

El objetivo es incidir en los beneficios de las ontologías para que este trabajo pueda servir como un primer paso para conseguir una mayor aplicación industrial.

Palabras clave: ontología, diseño conceptual, FBS

1. Introducción

El objetivo final de la ingeniería de diseño es la creación de un objeto, producto, sistema o proceso que alcance unos requerimientos funcionales para satisfacer las necesidades del consumidor de un modo económico, ecológico y con unas posibilidades de fabricación factibles. El desarrollo de tecnologías basadas en la inteligencia artificial y CAE (Computer Aided Engineering – Ingeniería Asistida por Ordenador) ha facilitado el acceso de información relacionada con la estructura y la forma de objetos, aunque el “know-how” del

diseño usado en la fase de diseño conceptual permanece oculto debido a su naturaleza subjetiva y su noción implícita [1].

El desarrollo de sistemas basados en KBE (Knowledge Based Engineering - Ingeniería Basada en el Conocimiento) ayuda a mejorar este aspecto [2, 3]. No obstante, el uso de estas tecnologías tiene limitaciones al imposibilitar una reutilización y compartición del conocimiento, la falta de un conocimiento común a partir del cual se pueda crear una base de conocimiento y el limitado éxito de metodologías para la extracción de éste [4, 5]. En el campo de la ingeniería del diseño, cada vez se está prestando una mayor atención en el desarrollo de ontologías como una posible solución de las deficiencias mencionadas anteriormente [6, 7].

Una ontología se puede describir como una especificación explícita de una conceptualización compartida, la cual se puede basar en una taxonomía o en axiomas [8]. Las ontologías se pueden basar en una sola taxonomía o en varias siendo conceptos y relaciones que se organizan jerárquicamente y cuyos conceptos pueden ser ordenados como clases e instancias [9, 10].

La estructura de una ontología debe estar basada en una taxonomía que tenga en cuenta el modelado de un sistema basado en ciertas descripciones funcionales [11]. De este modo, se han modelado una gran diversidad de metodologías para el análisis del proceso de diseño basadas en el marco FBS [12-15].

Al respecto de esto último, Suh [16] describe el diseño como un zigzag entre requerimientos funcionales y parámetros de diseño y Veyrat et al. [17] cuestionan si el diseño es realmente un mapeado directo entre funciones y estructura. Como intento para resolver esta cuestión, Cebrián-Tarrasón [18] combina el concepto del OntoRFB (Ontologically clean Reconciled Functional Basis – Base funcional reconciliada ontológicamente limpia) de Garbacz [11] basado en DOLCE (Descriptive Ontology for Linguistic and Cognitive Engineering – Ontología descriptiva para la ingeniería cognitiva y lingüística) [19] y el modelo B-FES (Behaviour-driven Function-Environment-Structure – Comportamiento dirigido por función-ambiente-estructura) [20, 21] creando una nueva ontología que hace un especial énfasis en la importancia del *behaviour* como enlace en el esquema FBS.

El propósito de este trabajo es demostrar cuáles son los motivos que permitirían una mayor aplicación en el ámbito industrial de las ontologías existentes en el campo de la ingeniería de diseño. Para ello se realiza un análisis actualizado de las metodologías existentes actualmente en el campo de la ingeniería del diseño referidas al marco FBS. A continuación se indica cómo se han acoplado dichas metodologías al ámbito de las ontologías. A partir del citado análisis, se realiza una discusión sobre las mejoras posibles en la materia.

Se debe indicar que se va a utilizar terminología en inglés para mantener la concordancia con el trabajo previo en el que se basa esta investigación, ya que hay determinados conceptos que al traducirse a la lengua castellana, podrían quedar descontextualizadas.

2. Marco FBS

Aunque los términos *function*, *behaviour* y *structure* ya habían sido utilizados anteriormente, no es hasta 1990 cuando se clarifican y se usan para definir un marco donde modelar y representar la funcionalidad de un sistema [12, 22]. En el marco FBS, *function* representa las funciones que el sistema lleva a cabo, *structure* representa los elementos físicos de la solución y *behaviour* actúa como la relación entre *function* y *structure*. En la síntesis de diseño, el *behaviour* se deriva de una funcionalidad intencionada con el fin de obtener una solución de ello. Cuando se define una solución, su *behaviour* se deduce de dicha solución para evaluar si ésta alcanza la funcionalidad pretendida. Entonces, el *behaviour* se relaciona con el estado físico del diseño, el cual puede ser estático o variable con el tiempo.

El marco FBS puede usarse también como una metodología para el análisis del proceso de diseño, a través de la representación de la evolución del estado del diseño desde el análisis de los protocolos de diseño [23]. A partir de una detallada revisión del estado del arte, en la Tabla 1 se conforma un listado actualizado de las investigaciones realizadas sobre la materia [24, 25].

Abreviatura	Fuente	Descripción
A-Design	Campbell et al. [26]	Agent-Based Approach to Conceptual Design in a Dynamic Environment
Axiomatic Design	Suh [16]	Axiomatic theory of design
FBRL	Sasajima et al. [27]	Function and behaviour representation language
FBS	Umeda et al. [12]	Theory of objects described in terms of function, behaviour and structure
FBS	Gero et al. [22]	Theory of objects described in terms of function, behaviour and structure
FEBS	Deng et al. [28]	Function-Environment-Behaviour-Structure modelling
FPPT	Klein Meyer et al. [29]	Function, Physical Principle and Technology
FR	Chandrasekaran et al. [30-32]	Formal theory of objects and object functionalities
Reconciled Functional Basis	Hirtz et al. [13]	Taxonomy of flows and functions
HSA	Zhang et al. [33]	Heuristic State-Space Approach
NIST Design Repository	Szykman et al. [34]	Formal model of objects from object-oriented perspective
FB	Pahl and Beitz [35]	General theory of design activity
PFM	Roy et al. [36]	General theory of objects
Theory of Technical Systems	Hubka and Eder [37]	General non-formal theory of objects

Tabla 1. Investigaciones relacionadas con el marco FBS.

A grandes rasgos se podrían distinguir dos enfoques en el esquema FBS [31]. En el primero, se relacionan las *functions* con los *behaviours* de un elemento, y entonces se relacionan los citados *behaviours* con las descripciones físico-estructurales de los elementos. Fue desarrollado por Gero [22], quien propuso un modelo de diseño *Function-Behaviour-Structure* (*Función - Comportamiento - Estructura*), y por Umeda et al. [12], que propusieron un modelo de diseño *Function-Behaviour-State* (*Función - Comportamiento - Estado*).

Este primer enfoque considera el *behaviour* como un concepto clave al sugerir una ordenación ontológica clara: los objetos tienen su propia estructura física. Esta estructura, en interacción con un entorno físico, suscita los *behaviours* de los objetos, y entonces, dichos *behaviours* determinan de alguna manera las *functions* de los objetos [14].

Diversas investigaciones se han desarrollado con respecto a este enfoque. Mizoguchi et al. [4] utiliza el modelo FBRL (Function and Behaviour Representation Language – Lenguaje de representación de función y comportamiento) basado en el trabajo de Sasajima et al. [27] y expresa el *behaviour* como una conceptualización del cambio de los valores en el espacio sobre el tiempo. Además, consideran que una *function* es una interpretación teleológica del *behaviour* bajo un objetivo dado.

Klein Meyer et al. [29] proponen la teoría FPPT (Function, Physical Principle and Technology – Función, principio físico y tecnología) la cual establece, con respecto al análisis funcional y la selección de tecnología, que los conceptos de modelado se basan en el enfoque FBS con el objetivo de permitir el análisis del *behaviour* en el inicio del proceso de diseño, cuando aún no hay una geometría disponible.

Las posibilidades de búsqueda, exploración, combinación y selección de sistemas basados en la representación FBS se han incrementado también debido al modelo B-FES propuesto por Tor et al. [21, 38, 39]. Este modelo es una extensión y un refinamiento del marco de modelado FEBS (Function Environment-Behaviour-Structure) de Deng et al. [28].

En el segundo enfoque, se modelan las *functions* de los objetos en términos de entradas y salidas, y entonces se relacionan directamente estas *functions* a las descripciones físico-estructurales de los objetos [34]. También se conoce como *Functional Modelling* (Modelado Funcional) ya que considera el *behaviour* como una representación matemática de los estados de un mecanismo [13, 34, 40].

El modelado funcional se crea con el objetivo de reducir la ambigüedad existente en el nivel de modelado de un objeto. Para ello, realiza una discriminación entre el significado de *function* y *flow* (flujo). Los *flows* se divide en tres tipos esencialmente: material, energía y señal. La definición parte del trabajo previo del Análisis del Valor y posteriormente de Pahl and Beitz [40] al inspirar la clasificación de las *functions* en clases. Así, el conjunto de *functions* y *flows* recibe el nombre de *functional basis* (base funcional). Posteriormente se perfeccionó recibiendo el nombre de *Reconciled Functional Basis* (RFB) [13, 34].

A partir de esta revisión, a priori se observa la gran cantidad de trabajos desarrollados en el ámbito de la ingeniería del diseño aplicados entorno al marco FBS. Igualmente, se percibe la diversificación del enfoque entre las diversas investigaciones al respecto.

3. Ontologías en ingeniería del diseño

En esta sección se discuten brevemente aquellas ontologías que se encuentran en el dominio de la ingeniería de diseño. Generalmente, las ontologías se pueden categorizar a través del tema de la conceptualización [10], entre otras:

- **Metaontologías:** Describen conceptos muy generales (p.e. sustancia, tangible, intangible) y proveen de nociones generales sobre las cuales se enlazan todos los términos básicos en las ontologías existentes. El objetivo es disponer de un gran número de ontologías disponibles sobre una metaontología.
- **Ontologías de dominio:** Son reutilizables en un dominio específico dado (ingeniería, fabricación, diseño, etc). Estas ontologías proveen vocabularios sobre conceptos bajo un dominio y sus relaciones, donde determinadas actividades se reproducen bajo el citado dominio, mientras se rigen por teorías y principios elementales.
- **Ontologías de tarea:** Describen el vocabulario relacionado con una tarea específica o actividad (p.e. diagnóstico, planificación). Proveen un vocabulario sistemático de los términos utilizados para resolver problemas asociados con tareas que pueden o no pertenecer al mismo dominio.

- **Ontologías de aplicaciones** o dependientes de las aplicaciones: Contienen todas las definiciones necesarias para modelar el conocimiento requerido para una aplicación particular. Las ontologías de aplicaciones a menudo extienden y especializan el vocabulario de las ontologías de dominio y de tarea para unas aplicaciones dadas.

Hay muchos lenguajes para expresar el conocimiento ontológico, cada uno con unas capacidades de representación de conocimiento y mecanismos de razonamiento. Como lenguaje más utilizado se puede considerar OWL (Web Ontology Language – Lenguaje ontológico de la web). Sin embargo, la capacidad de representación de restricciones en OWL no es adecuada para la implementación de relaciones en el campo del diseño [41]. Con tal fin se utiliza SWRL (Semantic Web Reasoning Language – Lenguaje de razonamiento de la web semántica), lenguaje basado en una combinación de sublenguajes de OWL con los provenientes de un lenguaje de reglas RML (Rule Markup Language). La herramienta más utilizada actualmente para su desarrollo es Protégé [42], un entorno para el desarrollo de ontologías, basado en Java y de código libre, creado por la Stanford University.

En el campo de la ingeniería de diseño, los tipos de ontologías más predominantes son las ontologías de tarea y ontologías de dominio [18]. La Tabla 2 contiene una revisión del estado del arte en el ámbito de la ingeniería de diseño relacionado con el campo de las ontologías, basado parcialmente en el trabajo de Kitamura [1], donde se realiza una descripción de las ontologías más destacadas, indicando el tipo de ontología y el lenguaje utilizado.

Abreviatura	Origen	Descripción	Tipo de ontología	Lenguaje de la ontología
SOFAST®	Kitamura et al. [1, 43-45]	<i>Non-formal ontology of objects in the FBRL language</i>	Ontología de dominio	Hozo
DOLCE	Masolo et al. [19]	<i>Descriptive Ontology for Linguistic and Cognitive Engineering</i>	Meta-ontología	OWL
AsD	Kim et al. [41]	<i>Assembly Design Ontology</i>	Ontología de tarea	OWL/SWRL
OntoRFB	Garbacz [11]	<i>Taxonomy of artefact functions</i>	Ontología de dominio	OWL
EDIT	Ahmed et al. [46]	<i>Engineering Design Integrated Taxonomy</i>	Ontología de dominio	OWL
DO	Storga et al. [47]	<i>Design Ontology</i>	Ontología de dominio	OWL
Gellish English	Van Rennsen et al. [48]	<i>A taxonomy of functions on Gellish English</i>	Ontología de tarea	OWL
DiDeas II	Liu et Bason [49]	<i>Distributed Design Assistant</i>	Ontología de dominio	OWL
FB Ontology	Bryant Arnold et al. [50]	<i>A Function-Based Component Ontology For Systems Design</i>	Ontología de dominio	OWL

Tabla 2. Ontologías en el dominio de la ingeniería del diseño

Una de las principales ontologías de la Web Semántica, DOLCE, provee un marco de referencia común para ontologías con el objetivo de facilitar el intercambio de información entre ellos. Así, DOLCE se dirige hacia la captura de categorías ontológicas subrayando el lenguaje natural y el sentido común humano [19].

Gero, quien impulsó uno de los primeros estudios sobre el marco FBS, establece las bases para el modelado computacional de procesos como apoyo al proceso de diseño basado en el marco FBS [51, 52]. Así desarrolló el término “*FBS Ontology*” para referirse a su modelo.

EDIT (Engineering Design Integrated Taxonomy – Taxonomía integrada de la ingeniería del diseño) [46] se constituye a partir de un conjunto de taxonomías integradas y las relaciones entre ellas. Dicha taxonomías se rellenan con instancias, y las relaciones se capturan entre los múltiples conceptos creados. Así, EDIT se establece con el propósito de indexar, buscar y recuperar el conocimiento del diseño [46].

La DO (Design Ontology – Ontología de diseño) está relacionada con el trabajo anterior [6]. Storga et al. [47] crearon la DO como una potencial descripción formal del conocimiento ingenieril compartido en el dominio de diseño. A partir de ambos trabajos, Ahmed and Storga [6] han creado una comparación entre ambos, donde la DO es descrita como una ontología concebida para describir el diseño como un producto. En contraposición, la EDIT establecía el diseño como una actividad, incorporando el proceso tanto como el producto.

Por último, se indican varios trabajos de especial relevancia. El primero está basado en un estudio exhaustivo de las diferentes teorías de diseño, donde Garbacz [11] expone OntoRFB, una taxonomía de funciones de artefactos, basada en DOLCE y en RFB y analizada desde una perspectiva de la lógica filosófica. Por otra parte, la ontología AsD [41] que es la única que hace uso tanto del lenguaje OWL como del SWRL, para el área de fabricación. Finalmente, aplicada al apartado industrial, la ontología desarrollada por Kitamura et al. [45] logra desarrollar una ontología de dominio y aplicarla a un ejemplo práctico por medio del programa informático SOFAST®.

4. Discusión

A través de la discusión de las ontologías se puede observar una serie de mejoras en los trabajos desarrollados, y los motivos para lograr una mayor aplicación de éstas al ámbito industrial.

En el marco FBS, la primera mejora posible se debe a la existencia de dos corrientes completamente diferenciadas en su primera definición. Esta situación que ha permitido el avance en las investigaciones realizadas en este ámbito, posibilita un gran margen de progreso. Concretamente, el concepto de *behaviour* podría estudiarse en mayor profundidad en el enfoque del modelado funcional para lograr unos nexos eficientes entre aquellas estructuras cuyo *behaviour* es necesario para relacionarlas con el apartado de *function* [53]. Este progreso permitiría un esquema conceptual estable al potenciar la conexión en la definición de los apartados de *function*, *behaviour* y *structure* [14, 31, 53].

Como soluciones ya existentes al respecto, dado el gran interés que se está desarrollando en este campo, diversos autores provenientes de la rama de la filosofía están planteando esquemas formales con el objetivo de proponer vías de solución. Dichos trabajos proporcionan un nuevo punto de vista al basar sus estudios en formalismos lógicos [11, 14, 24, 48, 53].

La posibilidad de mejora se acrecienta aún más en el caso de plantear una ontología en base al esquema FBS. Tal como se ha indicado, la definición de una ontología involucra que todo el conocimiento seleccionado ha de ser conciso y explícito, lo que implica una formalización precisa. Dicha formalización constituye una tarea donde hay un gran trabajo

por delante. Su consecución permitiría la optimización del proceso de diseño industrial, al lograr que todo el conocimiento del producto estuviera disponible. Este hecho supondría una considerable reducción en tiempo y costes.

En el campo de la ingeniería del diseño, se han producido grandes avances teóricos en este ámbito. Así, la mayoría de las ontologías de diseño que se han revisado han sido diseñadas para facilitar el intercambio de conocimiento a través de definiciones bien planteadas. Cabe ahora expandir ese desarrollo a un mayor número de aplicaciones industriales. De esa forma, se mostraría la ya demostrada capacidad de una ontología para indexar el conocimiento del diseño [46, 53]. Un ejemplo de ello es el trabajo de Kitamura [45], que logró aplicar su complejo modelo en una cadena de producción de una empresa japonesa con gran éxito.

Un elemento que ha permitido el avance de las ontologías aplicadas a la ingeniería de diseño, es la progresiva adopción de la definición de ontología considerada actualmente en el ámbito informático [6, 11, 47-49, 53]. Se ha de considerar que hace pocos años Gero acuñaba el término “*FBS Ontology*” para referirse a su modelo [54], sin desarrollar una taxonomía en base a éste.

En el apartado de la representación de ontologías existe una unificación de criterios ya que la mayoría de ontologías desarrolladas en este campo (Tabla 2) hacen uso del lenguaje OWL. Este lenguaje permite el uso de la lógica para posibilitar la inferencia de nuevo conocimiento por medio de una búsqueda basada en el razonamiento [55]. Así, la ontología AsD [41] profundiza en su aplicación, concretamente en el área de fabricación, además de enlazar los resultados de la ontología con una aplicación CAD.

En conclusión, se puede percibir el campo de las ontologías en el ámbito de la ingeniería de diseño con unas grandes posibilidades de progreso y capacidad de aplicación en el ámbito industrial a corto plazo. El incremento de aplicaciones basadas en ontologías fundamentadas en el marco FBS, ejemplos prácticos a nivel industrial [53], una mayor homogeneidad o la profundización de las capacidades de una ontología son aspectos que permitirían estos logros [18].

5. Conclusión

Se ha presentado este trabajo con el objetivo de mostrar los medios para incentivar la aplicación industrial de las ontologías desarrolladas en el campo de la ingeniería del diseño. Este estudio analiza los diversos esquemas existentes entorno al marco FBS, así como las ontologías basadas en el citado marco.

El estudio del marco FBS, muestra el gran avance logrado en las investigaciones realizadas en este ámbito, aunque es posible una mejora en la conexión en la definición de los apartados de *function*, *behaviour* y *structure*. En el campo de las metodologías de la ingeniería del diseño, se observa la gran ventaja proveniente de la aplicación de las ontologías: la inferencia de nuevo conocimiento.

Otro hecho destacable en el análisis realizado es la gran posibilidad de expansión del campo de las ontologías en el ámbito de la ingeniería del diseño, aguardando un gran auge en su aplicación a nivel industrial de esta tecnología en un futuro próximo.

Los resultados obtenidos de este estudio establecen las bases para la construcción de una ontología que pueda aunar las ventajas de las investigaciones comentadas con anterioridad. Con este objetivo, se está desarrollando la ontología OntoFaBeS [18], para su aplicación a nivel industrial.

En futuras investigaciones se pretende desarrollar OntoFaBeS para hacia otros ámbitos complementarios dentro del campo de la ingeniería del diseño como pueden ser aspectos ambientales [56], criterios de evaluación [57] o técnicas creativas [58].

Referencias

- [1] Kitamura Y. and Mizoguchi R., "Ontology-Based Systematization of Functional Knowledge", *Journal of Engineering Design*, Vol.15 (4), 2004, pp.327-351
- [2] Cebrián-Tarrasón D., Muñoz C., Chulvi V. and Vidal R., "Nuevo Enfoque En El Diseño Inteligente De Implantes Craneales Personalizados a Través De Kbe", *XI Congreso Internacional de Ingenieria de Proyectos (AEIPRO)*, LUGO, 2007, pp.668-677.
- [3] Chulvi V., Sancho A., Cebrian D., Gimenez R., Muñoz C. and Vidal R., "Knowledge-Based Engineering in Cranioplasty Implant Design", *16th International Conference on Engineering Design*, Paris, France, 2007.
- [4] Mizoguchi R., "Tutorial on Ontological Engineering - Part 1: Introduction to Ontological Engineering", OhmSha&Springer, ed., *New Generation Computing*, 4 2003, pp. 365-384.
- [5] Baxter D., Gao J., Case K., Harding J., Young B., Cochrane S. and Dani S., "An Engineering Design Knowledge Reuse Methodology Using Process Modelling", *Research in engineering design*, Vol.18 2007, pp.37-48.
- [6] Ahmed S. and Storga M., *Engineering Design Ontologies - Contrasting an Empirical and a Theoretical Approach*, International Conference on Engineering Design, ICED'07, Cite des Sciences et de l'Industrie, Paris, France, 2007.
- [7] Ahmed S. and Wallace K., "Reusing Design Knowledge", *14th CIRP Desing Seminar*, Cairo, 2004.
- [8] Gruber T.R., *Toward Principles for the Design of Ontologies Used for Knowledge Sharing*, Knowledge Systems Laboratory, Stanford University., Padova, Italy, 1993.
- [9] Cottam H., Milton N. and Shadbolt N., "The Use of Ontologies in a Decision Support System for Business Process Re-Engineering", *Proceedings of IT & KNOWS Conference of the 15th IFIP World Computer Congress*, OCG, Vienna, AUTRICHE, Vienna, Budapest,, 1998, pp. 76-89.
- [10] Gómez-Pérez A., Fernández-López M. and Corcho O., "Theoretical Foundations of Ontologies - Chapter 1", Springer, ed., *Ontological Engineering with Examples from the Areas of Knowledge Management, E-Commerce and the Semantic Web*, London, 2004, 1-44.
- [11] Garbacz P., "Towards a Standard Taxonomy of Artifact Functions", *Applied Ontology*, Vol.1 (3), 2006, pp.221-236.
- [12] Umeda Y., Takeda H., Tomiyama T. and Yoshikawa H., "Function, Behaviour, and Structure", Gero J., ed., *Applications of Artificial Intelligence in Engineering V*, 1 Springer, Berlin, 1990, pp. 177-194.
- [13] Hirtz J., Stone R., Mcadams D., Szykman S. and Wood K., "A Functional Basis for Engineering Design: Reconciling and Evolving Previous Efforts", *Research in Engineering Design*, Vol.13 2002, pp. 65-82
- [14] Borgo S., Carrara M., Vermaas P.E. and Garbacz P., "Behaviour of a Technical Artifact: An Ontological Perspective in Engineering", *Frontiers in Artificial Intelligence and Applications*, Vol.150 (Formal Ontology in Information Systems), 2006, pp. 214–225.

- [15] Umeda Y., Kondoh S., Shimodura Y. and Tomiyama T., "Development of Design Methodology for Upgradable Products Based on Function-Behavior-State Modeling", *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing (AIEDAM)*, Vol.19 2005, pp.161-182.
- [16] Suh N.P., "*The Principles of Design*", Oxford University Press, New York, 1990.
- [17] Veyrat N., Blanco E. and Trompette P., "When Shape Does Not Induce Function: Why Designers Must Not Lose the Big Picture", *16th International Conference on Engineering Design*, Paris, France, 2007.
- [18] Cebrian-Tarrason D., Lopez-Montero J.A. and Vidal R., Ontofabes: Ontology Design Based in FBS Framework, CIRP Design Conference 2008, University of Twente, 2008.
- [19] Masolo C., Borgo S., Gangemi A., Guarino N. and Oltramari A., Wonderweb Deliverable D18, Dissertation/Thesis, Laboratory For Applied Ontology - ISTC-CNR, 2003.
- [20] Zhang W.Y., Tor S.B. and Britton G.A., "Funcdesigner a Functional Design Software System", *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol.22 2003, pp.295-305.
- [21] Zhang W.Y., Tor S.B. and Britton G.A., "A Graph and Matrix Representation Scheme for Functional Design of Mechanical Products", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol.25 (3-4), 2005, pp.221-232.
- [22] Gero J.S., "Design Prototypes: A Knowledge Representation Schema for Design", *AI magazine*, Vol.11 (4), 1990, pp.26 - 36.
- [23] Takeda H., Towards Multi-Aspect Design Support Systems, Technical Report NAIST-IS-TR94006, Nara Institute of Science and Technology, Nara, Japan, February 1994., 1994.
- [24] Garbacz P., "Subsumption and Relative Identity", *Axiomathes*, Vol.14 (4), 2004, pp.341-360.
- [25] Camelo D., Modelado Y Desarrollo De Un Modelo Computacional De Síntesis Interactivo Y Multirrelacional Para Guiar La Actividad De Diseño En La Fase Conceptual, Dpto. de Ingeniería Mecánica y Construcción, Universitat Jaume I, Castellón, Spain, 2007.
- [26] Campbell M., Cagan J. and Kotovsky K., "The a-Design Approach to Managing Automated Design Synthesis", *Research in Engineering Design*, Vol.14 2003, pp.12 - 24.
- [27] Sasajima M., Kitamura Y., Ikeda M. and Mizoguchi R., "Fbri: A Function and Behavior Representation Language", *Proceedings of IJCAI*, 1995, pp.1830-1836.
- [28] Deng Y.M., "A Computerized Design Environment for Functional Modeling of Mechanical Products", *fifth ACM symposium on Solid modeling and applications*, ACM Press, Ann Arbor, Michigan, 1999, pp.1-12.
- [29] Klein Meyer J.S., Cabannes G., Lafon P., Troussier N., Roucoules L. and Gidel T., "Product Modeling for Design Alternatives Selection Using Optimization and Robustness Analysis." *16th International Conference on Engineering Design*, Paris, France, 2007.
- [30] Chandrasekaran B., "Design Problem Solving:A Task Analysis", *AI Magazine*, Vol.11 1990, pp. 59-70.
- [31] Chandrasekaran B., "Representing Function: Relating Functional Representation and Functional Modeling Research Streams", *AIEDAM Artificial Intellig. for Engineering Design*, Vol.19 (2), 2005, pp.65-74.
- [32] Chandrasekaran B., Goel A. and Iwasaki Y., Functional Representation as Design Rationale, 1993.

- [33] Zhang W.Y., Tor S.B. and Britton G.A., "A Heuristic State-Space Approach to the Functional Design of Mechanical Systems", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol.19 (4), 2002, pp.235-244.
- [34] Szykman S., Racz J. and Sriram R., "The Representation of Function in Computer-Based Design", *Desing Engineering Technical Conferences*, ASME, Las Vegas, Nevada, 1999.
- [35] Pahl G. and Beitz W., "*Engineering Design*", Design Council, 1984.
- [36] Roy U. and Bharadwaj B., "Design with Part Behaviors: Behavior Model, Representation and Applications", *Computer-Aided Design*, Vol.34 (9), 2002, pp.613-636.
- [37] Hubka V. and Eder W.E., "*Theory of Technical Systems*", Springer-Verlag, Berlin, 1988.
- [38] Tor S.B., Britton G.A., Zhang W.Y. and Deng Y.M., "Guiding Functional Design of Mechanical Products through Rule-Based Causal Behavioural Reasoning", *International Journal of Production Research*, Vol.40 (3), 2002, pp.667-682.
- [39] Tor S.B., "Design Automation of Two-Stage Collapsible Core Using Design Prototype", *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, Vol.13 (1), 2000, pp.31-39.
- [40] Pahl G. and Beitz W., *Systematic Approach to the Design of Technical Systems and Products*, VDI Society for Product Development, Design and Marketing, Berlin, 1986.
- [41] Kim K.-Y., Manley D.G. and Yang H., "Ontology-Based Assembly Design and Information Sharing for Collaborative Product Development", *Computer-Aided Design*, Vol.38 (12), 2006, pp.1233-1250.
- [42] Protégé3.4, Stanford University <http://protégé.stanford.edu>, 2008.
- [43] Kitamura Y., Sano T., Namba K. and Mizoguchi R., "A Functional Concept Ontology and Its Application to Automatic Identification of Functional Structures", *Advanced Engineering Informatics*, Vol.16 (2), 2002, pp.145-163.
- [44] Kitamura Y. and Mizoguchi R., "Ontology-Based Description of Functional Design Knowledge and Its Use in a Functional Way Server", *Expert Systems with Applications*, Vol.24 (2), 2003, pp.153-166.
- [45] Kitamura Y., Washio N., Koji Y., Sasajima M., Takafuji S. and Mizoguchi R., "An Ontology-Based Annotation Framework for Representing the Functionality of Engineering Devices", *ASME 2006 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference*, Pennsylvania, USA, 2006.
- [46] Ahmed S., "A Methodology for Creating Ontologies for Engineering Design." *Journal of computing and information science in engineering.*, Vol.7 (2), 2006, pp.132-140.
- [47] Storga M., Andreasen M.M. and Marjanovic D., "Towards a Formal Design Model Based on a Genetic Design Model System." *Proceedings of the 15th International Conference on Engineering Design ICED 05*, Melbourne, Australia, 2005.
- [48] Van Rennsen A., Vermaas P.E. and Zwart S.D., "A Taxonomy of Functions in Gellish English." *Proceedings of the 16th International Conference on Engineering Design ICED '07*, Paris, France, 2007.
- [49] Liu Y. and Bason A.H., "An Ontology Based Approach to a Flexible Aid for Mechanical Conceptual Design." *Proceedings of the 16th International Conference on Engineering Design ICED 07*, Paris, France, 2007.
- [50] Bryant-Arnold C.R., Stone R.B., Greer J.L., Mcadams D.A., Kurtoglu T. and Campbell M.I., "A Function-Based Component Ontology for Systems Design", *16th International Conference on Engineering Design*, Paris, France, 2007.

- [51] Gero J.S. and Kannengiesser U., "The Situated Function-Behaviour-Structure-Framework", *Artificial Intelligence in Design'02*, 2002, pp.89-104.
- [52] Gero J.S. and Kannengiesser U., "Modelling Expertise of Temporary Design Teams", *Journal of Design Research*, Vol.4 (3), 2004.
- [53] Vermaas P.E. and Dorst K., "On the Conceptual Framework of John Gero's Fbs-Model and the Prescriptive Aims of Design Methodology", *Design Studies*, Vol.28 (2), 2007, pp.133-157.
- [54] Gero J.S. and Kannengiesser U., "The Situated Function-Behaviour-Structure Framework", *Design Studies*, Vol.25 (4), 2004, pp.373-391.
- [55] Antoniou G., Bikakis A., Dimareisis N., Genetzakis M., Georgalis G., Governatori G., Karouzaki E., Kazepis N., Kosmadakis D., Kritsotakis M., Lilis G., Papadogiannakis A., Padiaditis P., Terzakis C., Theodosaki R. and Zeginis D., "Proof Explanation for a Nonmonotonic Semantic Web Rules Language", *Data & Knowledge Engineering*, Vol.64 2008, pp.662-687.
- [56] Garraín D., Vidal R., Martinez P., Franco V. and Cebrian D., "Lca of Biodegradable Multilayer Film from Biopolymers", *3rd International Conference on Life Cycle Management*, Zurich, 2007.
- [57] Justel D., Vidal R., Arriaga E., Franco V. and Val-Jauregi E., "Evaluation Method for Selecting Innovate Product Concepts with Greater Potential Marketing Success", *16th International Conference on Engineering Design* Paris, France, 2007.
- [58] Chulvi V. and Vidal R., "Vinculación De Triz Con El Diseño Funcional", *XI Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos (AEIPRO)*, Lugo, 2007, pp.613-621.

Agradecimientos

Los autores muestran su gratitud al Ministerio de Educación y Ciencia por su financiamiento bajo el proyecto con referencia DPI2006-15570-C02-00 dentro del plan nacional de I+D+i (2004 – 2007) y a los fondos FEDER de la Unión Europea. Del mismo modo, los autores muestran su agradecimiento al apoyo del resto de personal del Grupo de Ingeniería del Diseño (GID) de la Universitat Jaume I de Castellón.

Correspondencia (Para más información contacte con):

David Cebrián Tarrasón.
GID – Grupo de Ingeniería del Diseño.
Departamento de Ingeniería Mecánica y Construcción, Universitat Jaume I.
Av. Sos Baynat, s/n. E-12071 Castellón.
Tel. +34964729252 Fax +34964728106
e-mail: dcebrian@uji.es
URL: <http://www.gid.uji.es>

Rosario Vidal Nadal.
GID – Grupo de Ingeniería del Diseño.
Departamento de Ingeniería Mecánica y Construcción, Universitat Jaume I.