



Síntesis guiada de soluciones acumulativas para el diseño conceptual de un fogón eficiente para biomasa

Guided synthesis of accumulative solutions for the conceptual design of an efficient stove working with biomass

Prof. Alexis Álvarez Cabrales^I, Dr.C. Roberto Pérez Rodríguez^{II}, Dr.C. Rolando Esteban Simeón Monet^{II},
Dr.C. Benjamín Gabriel GaskinsEspinosa^I

^IUniversidad de Granma, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ciencias Técnicas, Bayamo, Cuba.

^{II}Universidad de Holguín, Centro Estudio CAD-CAM, Holguín, Cuba.

RESUMEN. El diseño conceptual se encuentra estrechamente relacionado con la estructura funcional de un producto y la búsqueda de los principios de solución para la definición del mismo. En este trabajo se expone un método acumulativo para la trazabilidad de la estructura funcional que implementa la síntesis conceptual guiada de soluciones en el análisis preliminar de esta etapa del proceso de diseño. El método constituye un aporte al modelo clásico de diseño de Pahl y Beitz. En el mismo, se manipula la información funcional del sistema, proporcionándole al diseñador una asistencia para que pueda contemplar las diferentes soluciones que se van obteniendo, dándole la posibilidad de elegir la más conveniente. El análisis de la síntesis guiada de soluciones acumulativas se ejemplifica mediante el diseño conceptual de un fogón eficiente para biomasa.

Palabras clave: síntesis de soluciones, trazabilidad.

ABSTRACT. The conceptual design is closely related to a product functional structure and the search of solution principles for its definition. This work exposes an accumulative method for the traceability of the functional structure that implements the guided conceptual synthesis of solutions in the preliminary analysis of this designing process stage. The method constitutes a contribution to Pahl's and Beitz's classic design model. In it, the functional information system is manipulated, providing the designer with a help so that he can examine the different solutions that are obtained, giving him the possibility of selecting the most convenient one. The guided analysis of the accumulative solutions synthesis is illustrated by means of the conceptual design of an efficient stove working with biomass.

Keywords: conceptual design, synthesis of solutions, traceability.

INTRODUCCIÓN

El diseño conceptual constituye el proceso clave para identificar la estructura funcional de los productos a través de la descomposición de funciones y la búsqueda de los principios de solución, para luego generar los conceptos utilizando la combinación de la matriz morfológica (Pahl *et al.*, 2007; Ölvander *et al.*, 2009). La estructura global de un determinado producto no solo se define con información de tipo geométrica, sino también con información no geométrica, tales como los

principios de solución asociados a las soluciones y su relación con la estructura funcional.

La generación de las variantes de soluciones en el diseño conceptual de un determinado producto se basa en la utilización de dos tipos fundamentales de métodos: los métodos de síntesis de soluciones y los modelos de representación del producto. El desarrollo de estos métodos se dificulta por el hecho de manipular información funcional

del sistema, mucho más abstracta que la información geométrica propia de las fases de diseño básico y de detalle. En este sentido, se considera que los métodos de síntesis de soluciones conceptuales pueden quedar definidos por los factores de: (a) campo de aplicación; (b) extensión del campo de soluciones; (c) grado de intervención requerido por parte del diseñador; y (d) facilidad de interpretación de los resultados (Chakrabarti y Bligh, 1994; Maury y Riba, 2005).

Los tres primeros factores corresponden al proceso de síntesis, mientras que el cuarto depende de los modelos de representación del sistema. La presente investigación toma como referencia el tercero de estos factores, pues los demás están más relacionados con la práctica industrial. Según este criterio, los métodos de síntesis funcional de soluciones se han clasificado en: (a) métodos basados en la síntesis guiada de soluciones (Maury y Riba, 2005; Stanković *et al.*, 2009; Withanage *et al.*, 2010), donde el diseñador toma parte activa del proceso (la asumida en esta investigación); y (b) métodos basados en la síntesis automática de soluciones (Chakrabarti y Bligh, 1994).

La síntesis conceptual guiada de soluciones es la actividad que se desarrolla posterior a la construcción funcional y su objetivo es la generación o formulación de las soluciones de acuerdo a las especificaciones iniciales. Desde la óptica de los modelos prescriptivos de diseño, las soluciones se pueden obtener a partir de la combinación sistemática de los conceptos elementales asociados a las funciones básicas de la estructura funcional. El tipo de conocimiento requerido para la síntesis de soluciones puede definirse de dos tipos: (a) conocimiento formal; y (b) conocimiento heurístico (Maury y Riba, 2005; Ammar-Khodja *et al.*, 2008; Perry y Ammar-Khodja, 2010). Dicha clasificación tiene la posibilidad de ser aplicada en la mayoría de los problemas que aborda este estudio.

MÉTODOS

A continuación se describen los aspectos teóricos esenciales o necesarios para el desarrollo de la síntesis guiada de soluciones acumulativas en el diseño conceptual de productos.

Antecedentes de los métodos de síntesis guiada de soluciones

Estos métodos poseen como característica esencial, que el diseñador es parte activa del proceso de síntesis de soluciones. En tal caso, se proporciona un guiado o asistencia para el que el diseñador pueda visualizar las diferentes soluciones que se van obteniendo y con esto facilitar la elección de la más conveniente. Los métodos desarrollados basados en este enfoque poseen dos tipologías diferenciadas: (a) aquellas donde el diseñador proporciona la iniciativa sobre el avance del proceso de síntesis y el sistema simplemente suministra una ayuda sobre las diferentes soluciones disponibles; y (b) aquellas donde el propio sistema es quien lleva la iniciativa

del avance del proceso de síntesis, al disponer del conocimiento sobre el proceso, quedando el diseñador relegado a la selección de posibles opciones intermedias.

Hundal(1990) así como Hundal y Langholtz, (1992) adoptan la metodología de diseño conceptual de Pahl y Beitz(2007). Por su parte, Huang(1994) propone un método donde la función global del producto se va descomponiendo en funciones más elementales en forma de árbol, a través de un algoritmo pre-establecido, hasta llegar a un nivel donde a cada función se le asigna un elemento físico. Xuet *al.*(2006), desarrollaron un método y una herramienta para el re-diseño de productos basado en la síntesis funcional en el contexto del diseño conceptual. El método utilizado se basa en un modelo de información basado en funciones y utiliza además la optimización multi-objetivo. Kurtoglu y Campbell (2009), proponen una herramienta informática orientada a los diseñadores, para navegar por el espacio de soluciones para crear configuraciones de diseño a partir de especificaciones detalladas de la función de un producto. Chen *et al.* (2012), proponen un modelo conceptual para la síntesis de soluciones de sistemas multi-disciplinarios a partir de la re-utilización y la síntesis de principios de solución conocidos

Método acumulativo para la trazabilidad de la estructura funcional

El método acumulativo para la trazabilidad de la estructura funcional tiene como objetivo la captura, estructuración, estratificación y encapsulación de los requerimientos funcionales en la estructura funcional.

En la Figura 1 se muestra el algoritmo general, el cual parte de la estructuración y estratificación de los requerimientos funcionales (paso 1), a través de la aplicación de métodos para calificar los niveles de cualidades. Esta información se captura a través de vectores y matrices, con el objetivo de facilitar su trazabilidad. A continuación se realiza un proceso iterativo donde para cada modo de operación (paso 2), se comienza un proceso de establecimiento de las estructuras funcionales (paso 3).

Para los niveles de la estructura funcional de cada modo de operación, se determinan las funciones globales y las sub-funciones (paso 4) con las que debe cumplir el producto, así como los flujos asociados. Posteriormente, se obtiene la acumulación o captura en cada estructura funcional (paso 5) de los niveles cualitativos establecidos anteriormente para los requerimientos funcionales. De esta forma se garantiza la transferencia de información al obtenerse la estructura funcional clásica con una nueva información relativa al proceso de estratificación (paso 6). Una vez que se haya efectuado este proceso cíclico para cada modo de operación, el método proporciona un conjunto de estructuras funcionales (paso 7), que contienen de manera implícita los niveles de calidad de los requerimientos funcionales (paso 8).

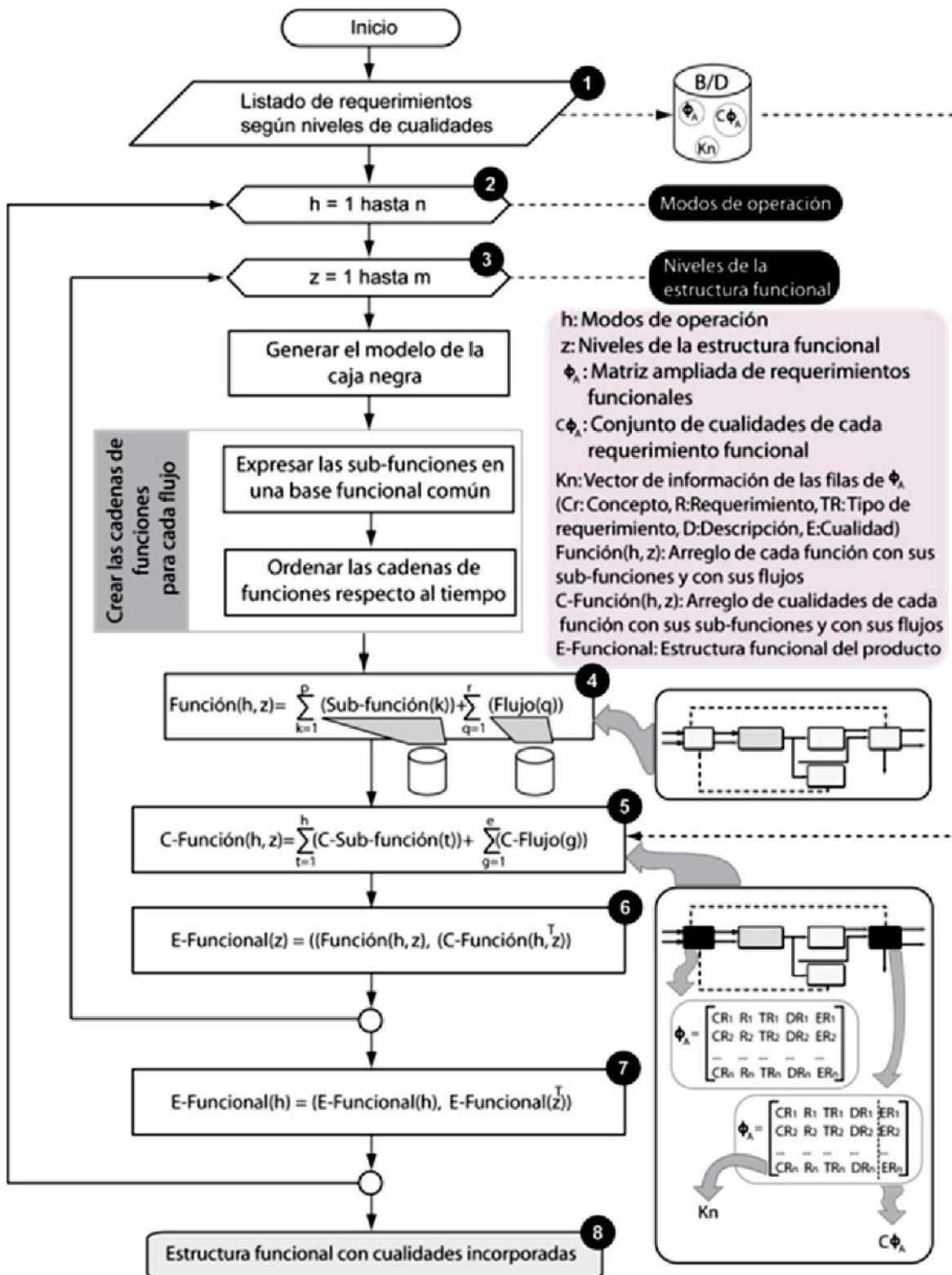


FIGURA 1. Método acumulativo para la trazabilidad de la estructura funcional.

Método para la síntesis guiada de soluciones acumulativas

Una de las limitaciones de los actuales modelos sistemáticos es la forma de dar respuesta al soporte necesario para que el diseñador seleccione los mejores conceptos posibles. La clave para responder a esta limitación está en que en la mayoría de las ocasiones, existen múltiples soluciones posibles para un determinado problema de diseño. Por tanto, si el diseñador dispone de una

asistencia en el proceso de generación y exploración de la gama de alternativas de solución, a través del uso de diversos criterios de evaluación, entonces, se incrementará la posibilidad de obtener mejores conceptos. Para dar respuesta al planteamiento anterior y orientado a garantizar el proceso de trazabilidad de los requerimientos funcionales hasta la evaluación de los conceptos, se desarrolló el método para la síntesis guiada de soluciones acumulativas (Figura 2). El objetivo de este método es conceptualizar la transformación de la información desde el nivel funcional hasta el nivel de soluciones conceptuales.

El método propuesto se basa en la intervención del diseñador en el proceso de toma de decisiones (síntesis guiada). En consecuencia, se proporciona una asistencia para que el diseñador pueda contemplar las diferentes soluciones que se van obteniendo a medida que se avanza y con ello, la posibilidad de elegir la más conveniente. El método (Figura 2) se inicia a partir de la estructura funcional con cualidades incorporadas (paso 1), representadas por un sistema de matrices y vectores. En este paso se establece la síntesis de los principios de soluciones y se obtiene la matriz Mfc.

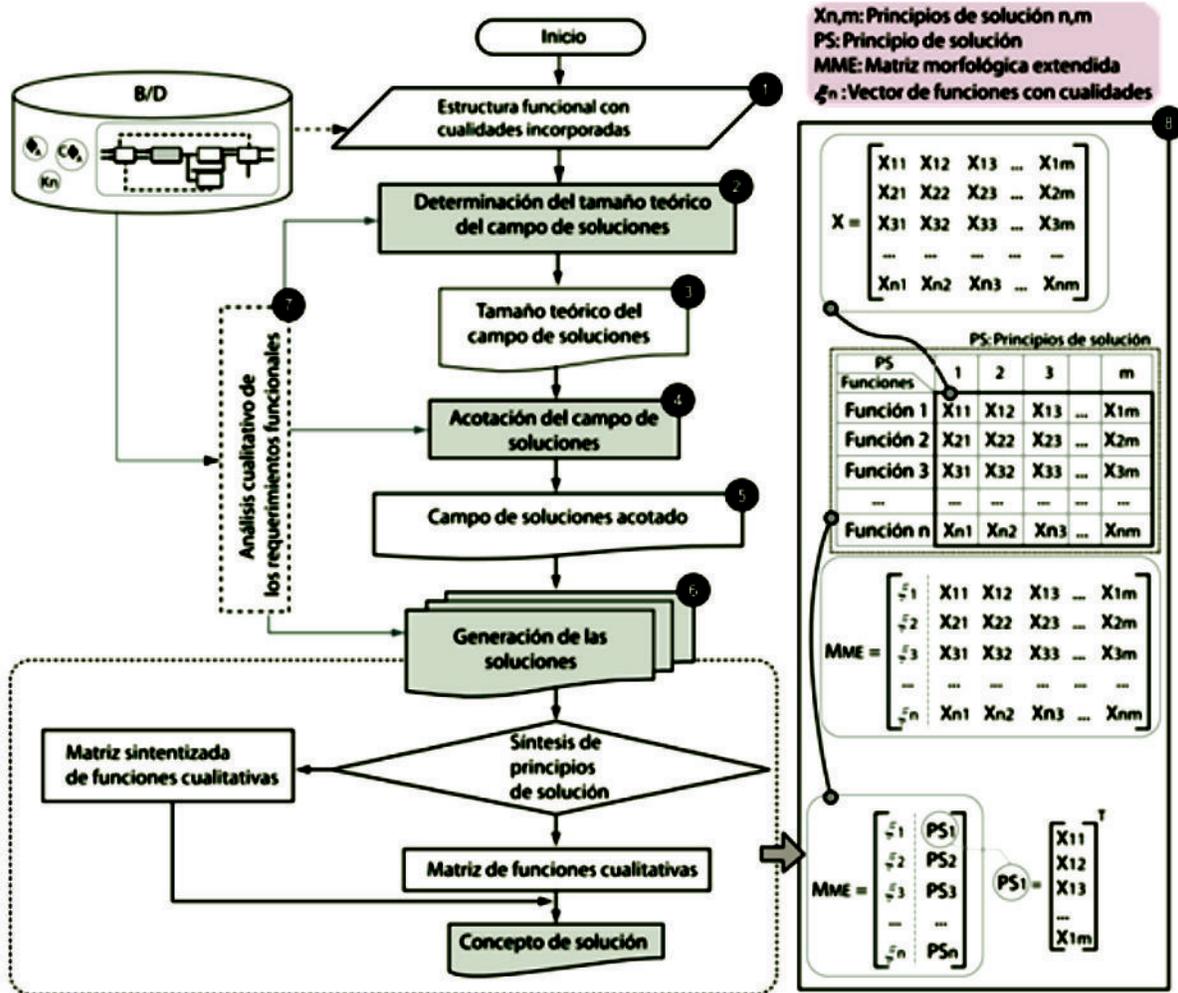


FIGURA 2. Método propuesto para la síntesis conceptual de soluciones.

A continuación, se determina el tamaño teórico del campo de soluciones (paso 2). Mediante este paso se obtiene el tamaño que tendría el campo teórico de soluciones a partir de la combinación sistemática de los conjuntos no acotados de conceptos elementales asociados con cada una de las sub-funciones de la estructura funcional (paso 3).

La acotación del campo de soluciones (paso 4) constituye una alternativa para aquellos sistemas donde existe un campo de soluciones demasiado grande para ser evaluado. Aquí juega un papel importante el conocimiento heurístico, el cual consiste en eliminar aquellos principios de solución inadecuados que

dan respuesta a cada sub-función en la estructura funcional, obteniéndose el campo de soluciones acotado (paso 5). A partir de este campo de principios de solución acotado, se pasa a la combinación sistemática para la obtención de los conceptos del producto (paso 6).

Estructuración de la síntesis de soluciones acumulativa

En el método de síntesis de soluciones propuesto se toma la matriz morfológica como método para generar conceptos

por ser la más adecuada para los objetivos previstos. Considerando la matriz morfológica como una matriz X con n número de funciones y m principios de solución asociados a cada función, la misma puede ser representada según indica el paso 8 de la Figura 2. Sin embargo, esta representación clásica no contiene todos los elementos que permiten su utilización en el proceso de trazabilidad de los requerimientos funcionales con el objetivo de utilizarlos en el proceso de evaluación conceptual.

Con vistas a suplir este aspecto, se propone la representación de una matriz morfológica extendida, que incluye aquellos parámetros esenciales para el proceso de trazabilidad antes analizado. La matriz morfológica extendida (MME) se representa en la Figura 2, donde se aprecia que la misma inserta, en lugar de la denominación tradicional de la función o sub-función, al vector de las funciones con cualidades para la trazabilidad (ξ_n). Por tanto, la MME está compuesta por los vectores (ξ_n)

que representan los diferentes principios de solución de cada función o sub-función.

A la Empresa de Logística Agropecuaria “26 de Julio” Granma (ELA “26 de Julio”) se le solicita la fabricación de un fogón de cocción cuyo combustible sea el desecho del tratamiento sanitario forestal. A continuación se expone una síntesis de las etapas fundamentales del proceso de diseño utilizado siguiendo el orden establecido por el método de síntesis desarrollado.

Fase 1: Requerimientos de usuario

Por medio de encuestas, análisis de expertos y de usuarios potenciales (Tabla 1) se establecen los criterios y necesidades de los usuarios, lo que permite a través de la matriz de requerimientos funcionales (Φ_A), (1) obtener los vectores K_n del fogón eficiente para biomasa.

TABLA 1. Requerimientos funcionales para el diseño de un fogón eficiente para biomasa (Fragmento)

No.	Concepto	Requerimiento	N/D	Descripción	Naturaleza
1	Funciones	Extracción segura de las cenizas una vez al día	Necesidad	Poder extraer de forma segura las cenizas una vez al día	Cuantitativo
2	Geometría	Superficie y volumen del recipiente	Deseo	Diseñar el fogón teniendo en cuenta la superficie y volumen del recipiente	Cuantitativo
3	Geometría	Correlación entre el volumen del hogar, área de la parrilla, distancia al fondo del recipiente	Deseo	Tener en cuenta la correlación entre el volumen del hogar, el área de la parrilla y la distancia al fondo del recipiente	Cuantitativo

El Vector $C\Phi_A$, definido en la expresión (2), contiene el conjunto de cualidades del fogón.



$$C\Phi_A = [A \ I \ A \ I \ A \ A \ A \ I \ U \ U \ U \ A \ A \ A \ A \ A \ U \ U] \tag{2}$$

La matriz ampliada de requerimientos funcionales del fogón eficiente para biomasa (Φ_{An}), se obtiene a partir de los vectores K_n asociados a cada función (3, 4, 5, 6, 7, 8).

- $\Phi_{A1} = [K1 \ K3 \ K4 \ K5 \ K6 \ K13] \tag{3}$
- $\Phi_{A2} = [K1 \ K3 \ K4 \ K5 \ K6 \ K7 \ K8 \ K9 \ K10 \ K11 \ K13 \ K15 \ K16] \tag{4}$
- $\Phi_{A3} = [K1 \ K2 \ K3 \ K7 \ K8 \ K9 \ K10 \ K11 \ K12 \ K13 \ K17] \tag{5}$
- $\Phi_{A4} = [K1 \ K3 \ K5 \ K6] \tag{6}$
- $\Phi_{A5} = [K2 \ K3 \ K4 \ K7 \ K8 \ K9 \ K10 \ K11 \ K12 \ K13 \ K14 \ K15] \tag{7}$
- $\Phi_{A6} = [K14 \ K16 \ K17 \ K18 \ K19] \tag{8}$

Fase 2: Diseño conceptual

Una vez identificados los requerimientos funcionales del producto en la fase 1 y haberla expresado a través de las expresiones (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8), se determina la estructura funcional del producto (etapa no evaluada en este trabajo). La determinación de una estructura funcional sintetizada permite la generación de la matriz morfológica expresada en la Figura 3.

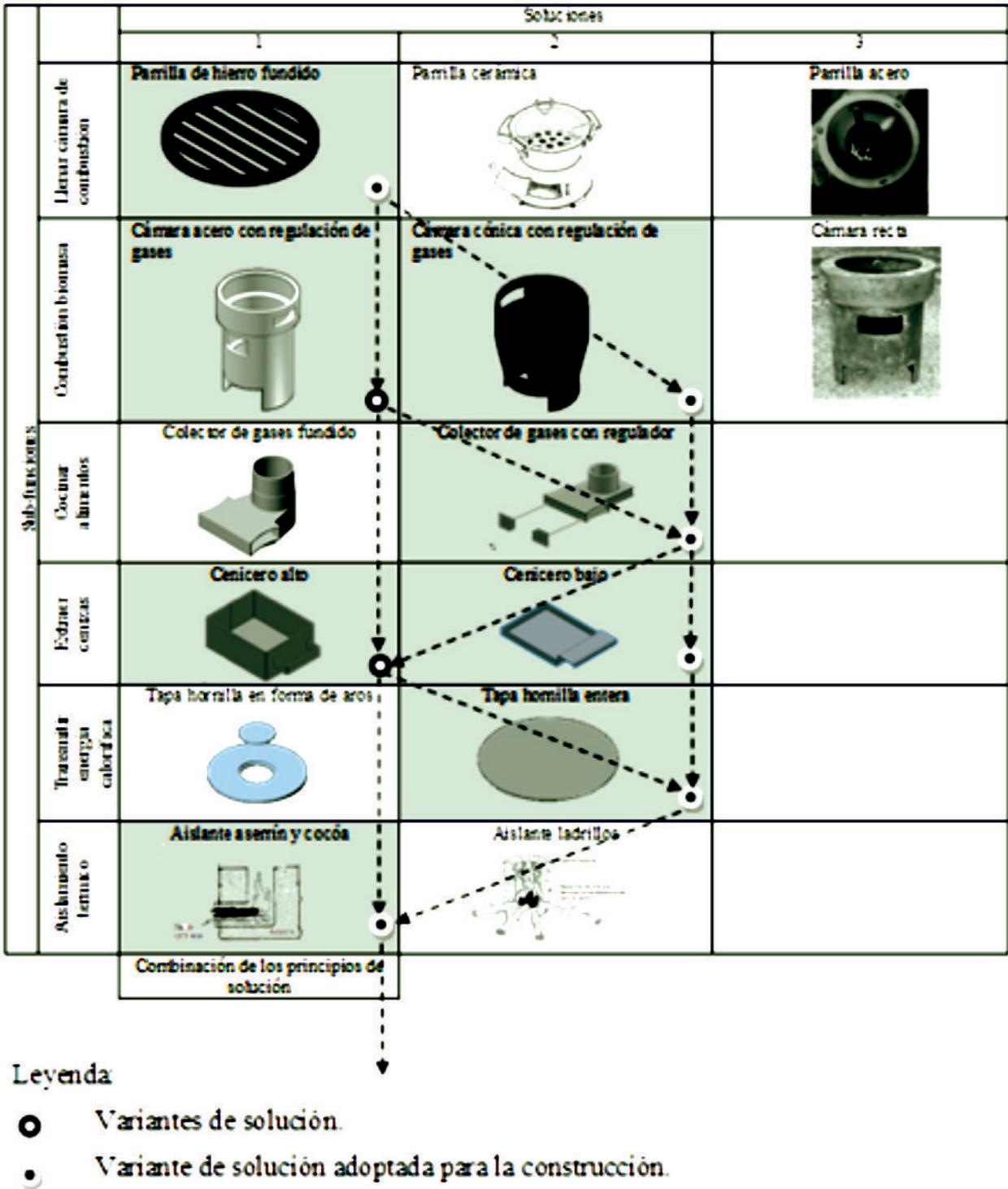


FIGURA 3. Matriz morfológica y soluciones factibles para el fogón eficiente para biomasa.

El análisis de las relaciones entre las funciones y sus soluciones (Figura 3) permitió determinar el tamaño del campo teórico de soluciones (TCS) (9) que se obtiene multiplicando la cantidad de principios de solución de cada sub-función (p) para toda la estructura funcional (q) (Smith *et al.*, 2012).

La expresión (10) muestra de forma resumida la matriz (MME) del fogón eficiente para biomasa.

$$TCS = \prod_{p=1}^q PSp = 3 * 3 * 2 * 2 * 2 * 2 = 144 \text{ soluciones posibles} \tag{9}$$

$$M_{ME} = \begin{bmatrix} \xi_{s1} & \text{“Parrilla de hierro fundido”} & \text{“Parrilla cerámica”} & \text{“Parrilla acero”} \\ \xi_{s2} & \text{“Cámara acero con regulación de gases”} & \text{“Cámara cónica con regulación de gases”} & \text{“Cámara recta”} \\ \xi_{s6} & \text{“Aislante aserrín y cocóa”} & \text{“Aislante ladrillos”} & \end{bmatrix} \quad (10)$$

Los conceptos desarrollados son representados matemáticamente en las matrices de principios de solución (PSn), formuladas en (11), que representan a los diferentes principios de solución definidos para el fogón eficiente para biomasa y que están reflejados en la Figura 3.

PS ₁ =	1	0	0	PS ₂ =	1	0	0	PS ₃ =	1	0	0	PS ₄ =	1	0	0	(11)
	0	1	0		1	0	0		1	0	0		0	1	0	
	0	1	0		0	1	0		0	1	0		0	1	0	
	0	1	0		1	0	0		0	1	0		1	0	0	
	0	1	0		0	1	0		0	1	0		0	1	0	
	1	0	0		1	0	0		1	0	0		1	0	0	

Fase 3: Evaluación conceptual por ponderación a partir de la trazabilidad de los requerimientos funcionales

Las expresiones descritas en (12), contienen los diferentes valores formalizados de los vectores (ξ_n), que han sido calculados en base a los vectores (K_n) contenidos en las matrices (Φ_{An}) y a las cualidades identificadas en el vector ($C\Phi_{An}$), las cuales corresponden a cada uno de los requerimientos funcionales que están asociados a la función del fogón eficiente para biomasa. La Tabla 2 muestra cómo fueron distribuidos, según el criterio del diseñador, los valores de los vectores (ξ_n) entre los diferentes principios de solución aportados para el fogón eficiente para biomasa por la matriz morfológica extendida (MME).

$$\begin{aligned} \Phi_{A1} &= [K_1 K_3 K_4 K_5 K_6 K_{13}]^T \\ C\Phi_{A1} &= [A A I A A A]^T \\ \xi_1 &= 0,20+0,20+0,10+0,20+0,20+0,20 \\ \xi_1 &= 1,10 \end{aligned} \quad (12)$$

TABLA 2. Distribución de los valores de los vectores (ξ_n) y principios de solución seleccionados para la Variante 1 del fogón eficiente para biomasa

Variante 1	1	2	3
$\xi_1=1,10$	0,40	0,50	0,20
$\xi_2=3,00$	0,90	1,50	0,60
$\xi_3=2,60$	0,80	1,80	
$\xi_4=0,80$	0,30	0,50	
$\xi_5=2,70$	1,10	1,60	
$\xi_6=1,40$	0,8	0,60	

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 3 se muestra la correlación existente entre los criterios de evaluación y los valores de los vectores (ξ_n) asociados a los principios de solución seleccionados, los cuales fueron evaluados para cada variante de solución del fogón eficiente para biomasa.

El resultado final indica que entre las variantes evaluadas, la **Variante 1** posee mayor peso de ponderación, lo que permite asegurar que es la que satisface en mayor medida los requerimientos del usuario. Este resultado permite que el diseñador disponga de una referencia para la evaluación conceptual de soluciones, teniendo en cuenta la trazabilidad de las cualidades de los requerimientos funcionales desde su definición hasta esta etapa de evaluación.

TABLA 3. Criterios de evaluación para la comparación de los conceptos

No.	Criterios de evaluación	Peso	Variante 1		Variante 2		Variante 3		Variante 4	
			Mag.	Valor	Mag.	Valor	Mag.	Valor	Mag.	Valor
1	Tamaño de cada pieza del combustible sólido según la superficie de la parrilla.	0,15	0,40	0,06	0,40	0,06	0,40	0,06	0,40	0,06
2	Correlación volumen del hogar, área de la parrilla, distancia al fondo del caldero u olla.	0,20	1,50	0,30	0,90	0,18	0,90	0,18	1,50	0,30
3	Regulación amplia de la velocidad de la combustión.	0,15	1,80	0,27	1,80	0,27	1,80	0,27	1,80	0,27
4	Tiempo de cocción para diferentes alimentos.	0,25	0,50	0,13	0,30	0,08	0,30	0,08	0,30	0,08
5	No aumentar la temperatura interior del recinto.	0,15	1,60	0,24	1,60	0,24	1,60	0,24	1,60	0,24
6	Aislamiento de la cámara de combustión	0,10	0,80	0,08	0,80	0,08	0,80	0,08	0,80	0,08
		1,00				0,91		0,91		1,03

CONCLUSIONES

- Con la aplicación de la metodología sistemática propuesta al caso de estudio (fogón eficiente para biomasa), se denota que la formalización sistemática de la integración de las diferentes sub-etapas que conforman el proceso de diseño conceptual potencia la generación de conceptos de una forma suficientemente estructurada y facilita la toma de decisiones en la evaluación de conceptos.
- La utilización del método acumulativo para la trazabilidad

- de la estructura funcional y del método para la síntesis guiada de soluciones acumulativas, garantizan la captura y transformación evolutiva de la información relativa a los requerimientos funcionales, orientados a la síntesis de soluciones y a la evaluación conceptual de variantes de solución.
- La formulación del conjunto de matrices permite la captura de la información relativa a los requerimientos funcionales y el estudio evolutivo de los mismos desde su definición hasta la evaluación de conceptos, garantizando la viabilidad de la metodología sistemática propuesta.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMMAR-KHODJA, S.; N. PERRY y A. BERNARD: "Processing Knowledge to Support Knowledge-based Engineering Systems Specification", *Concurrent Engineering*, 16(1): 89-101, 2008.
- CHAKRABARTI, A. y T. P. BLIGH: "An Approach to Functional Synthesis of Solutions in Mechanical Conceptual Design. Part I: Introduction and Knowledge Representation", *Research in Engineering Design*, 6: 127-141, 1994.
- CHEN, Y.; Z. L. LIU y Y. B. XIE: "A knowledge-based framework for creative conceptual design of multi-disciplinary systems", *Computer Aided Design*, 44: 146-153, 2012.
- HUANG, C.-P.: "An advisory conceptual design tool for mechanical transmission systems" *Research in Engineering Design*, 6: 142-147, 1994.
- HUNDAL, M.: "A Systematic Method for Developing Function Structures, Solutions and Concept Variants", *Mechanism and Machine Theory*, 25(No. 3): 243-256, 1990.
- HUNDAL, M. y L. D. LANGHOLTZ: Computer-Aided Conceptual Design: an application on X-Window with C, pp. 1-9, Proceeding of ASME Design and Methodology Conference, USA, 1992.
- KURTOGLU, T. y M. I. CAMPBELL: "Automated synthesis of electromechanical design configurations from empirical analysis of function to form mapping", *Journal of Engineering Design*, 20(1): 83-104, 2009.
- MAURY, H. y C. RIBA: "Theoretical Foundations for Knowledge-Based Conceptual Design of Complex Systems", *Lecture Notes in Computer Science*, 3675: 166-185, 2005.
- ÖLVANDER, J.; B. LUNDÉN y H. GAVEK: «A computerized optimization framework for the morphological matrix applied to aircraft conceptual design», *Computer Aided Design*, 41: 187-196, 2009.
- PAHL, G.; W. BEITZ; J. FELDHUSEN y K.-H. GROTE: *Engineering Design. A Systematic Approach*, Ed. Springer-Verlag, third ed, London, UK, 2007.
- PERRY, N. y S. AMMAR-KHODJA: "A knowledge engineering method for new product development", *Journal of Decision Systems*, 19(1): 117-133, 2010.
- SMITH, G.; J. RICHARDSON; J. D. SUMMERS y G. M. G. MOCKO: "Concept Exploration Through Morphological Charts: An Experimental Study", *Journal of Mechanical Design*, 134(5): 051004-051004, 2012.
- STANKOVIĆ, T.; K. SHEA; M. ŠTORGA & D. MARJANOVIĆ: Grammatical evolution of technical processes, Proceedings of the ASME international design engineering technical conferences and computers and information in engineering conference (IDETC/CIE 2009). San Diego, California, USA. 2009.
- WITHANAGE, C.; T. PARK & H.-J. CHOI: "A Concept Evaluation Method for Strategic Product Design with Concurrent Consideration of Future Customer Requirements", *Concurrent Engineering*, 18(4): 275-289, 2010.
- XU, Q. L.; S. K. ONG & A. Y. C. NEE: "Function-based design synthesis approach to design reuse", *Research in Engineering Design*, 17(1): 27-44, 2006.

Recibido: 13 de mayo de 2013.

Aprobado: 20 de marzo de 2014

Alexis Álvarez Cabrales, Profesor Universidad de Granma (UDG), Facultad de Ingeniería, Departamento de Ciencias Técnicas, Carretera Manzanillo, km 17 ½, Peralejo, Bayamo, Cuba. CP 85100, Correo electrónico: aalvarezc@udg.co.cu