

Estrategia para el diseño paramétrico basado en modelos.

S. A. Marrero Osorio, J. Martínez Escanaverino.

Departamento de Mecánica Aplicada. Facultad de Ingeniería Mecánica

Instituto Superior Politécnico *José Antonio Echeverría*.

Calle 114 esq. 127, Marianao 15, Ciudad de la Habana, Cuba

Teléfono: (537) 266 3613 Fax: (537) 260 2267

E – mail: smarrero@mecanica.cujae.edu.cu, escanaverino@mecanica.cujae.edu.cu

(Recibido el 10 de junio de 2008; aceptado el 12 de julio de 2008)

Resumen

El presente artículo expone una manera de diseñar paramétricamente utilizando los programas de computadora (CAD, CAE, PMS) difundidos entre los diseñadores durante los últimos 20 años. La propuesta se basa en modelos matemáticos que consideran el conocimiento sobre la ingeniería del objeto de diseño y lo relacionado con la confección de su modelo virtual tridimensional, planos y otro aspectos; utilizando el Método de los Grafos Dicromáticos para resolver los problemas computacionales que se presentan en el diseño paramétrico. Se analizan los puntos de vista de diferentes autores en relación con el proceso general de diseño y es ubicado dentro del mismo el diseño paramétrico, realizándose una explicación formal que permite arribar a conclusiones interesantes.

Palabras claves: Diseño paramétrico, diseño asistido por computadoras (CAD), ingeniería asistida por computadoras (CAE), software para el modelado paramétrico (PMS), resolución de problemas.

1. Introducción.

Existe hoy día, en el diseño de maquinaria, una importante tendencia [1;2] hacia el empleo de cierto tipo de software que asiste al diseñador en el interés de realizar: modelos virtuales flexibles en 3D, selección de elementos normalizados, verificaciones de ingeniería, planos de ensamblaje ó de taller y determinación de tecnologías y códigos de enlace para la manufactura por control numérico. Por la forma en que funcionan y por el modo en que facilitan la actividad de diseño se suelen denominar *Software para el modelado / diseño paramétrico (SDP)*. Entre ellos, los más conocidos son: Pro/Engineer, Inventor, Mechanical Desktop, NX, Solid Works, CATIA, Solid Edge y otros.

Se denomina diseño paramétrico (DP) a la resolución del problema de asignar la mejor combinación de valores posible a todos los parámetros necesarios para describir el objeto de diseño [3], es decir, dado un problema informal de diseño, plantear y resolver un problema de cómputo que determinará los mejores valores de los parámetros del sistema.

Se utilizan diversos métodos para resolver problemas computacionales. Muchos de ellos se basan en modelos matemáticos que describen la geometría y el

comportamiento del objeto de diseño, exigiéndose por lo general, para resolver los problemas planteados, un elevado conocimiento de las matemáticas y un tedioso trabajo. Esto lleva a que, a veces, los métodos para resolver problemas computacionales no sean correctamente aplicados por el grupo de diseñadores (llamada en lo adelante *el diseñador*) ó a que sencillamente no se utilicen. Existe sin embargo un método que sorprende por su sencillez, su grado de terminación y la certeza de sus resultados: *el Método de los Grafos Dicromáticos* (MGD) [4;5;6]. Se trata de un procedimiento que ha sido utilizado con éxito en la formulación y resolución de problemas de ingeniería en general, que puede ser aplicado específicamente al campo del DP.

En el presente trabajo se expone precisamente una manera de abordar el DP que emplea al MGD en la asignación de valores a las variables involucradas en el modelado, simulaciones, impresión de planos y demás procesos facilitados por los SDP.

2. Sobre el proceso de diseño

No hay una opinión unánime ni exacta sobre lo que ocurre durante la acción de diseñar, ni tampoco existe

un concepto preciso de la palabra diseño, por lo que se investiga con dos orientaciones fundamentales: el diseñador y la computadora. Con el fin de profundizar en ambas direcciones se han esbozado modelos descriptivos (cómo representarlo), prescriptivos (cómo realizarlo), cognitivos (cómo entenderlo) y computacionales (cómo implementarlo en la computadora). Evidentemente no es posible la realización del diseño de modo totalmente automático, luego cualquier modelo hasta el presente solo permite perfeccionar el diseño tomando en cuenta por un lado la interacción entre los sujetos que lo realizan y por otro la de ellos con los objetos de diseño, con los numerosos factores relacionados con ellos y con la computadora como especial herramienta. Existe sin embargo coincidencia en la idea de que en la mente se producen dos géneros de acciones: el análisis y la síntesis; de modo que la asistencia al diseño se ha desarrollado más en la dirección del análisis y menos en la síntesis; no por falta de intención, sino debido a su gran complejidad.

Shigley y Norton [7;8], en sus conocidos libros, exponen en detalle esquemas semejantes del proceso de diseño, con más de diez etapas cada uno. El carácter académico de estos esquemas propicia la explicación pormenorizada y facilita una buena comprensión de los mismos. En otro ámbito Orlov, basado en su amplia experiencia como diseñador de aviones, explica en [9] un grupo de principios del diseño racional en ingeniería mecánica (unificación, normalización, creación de máquinas derivadas y otros), describiendo métodos para reducir el peso y el costo, aumentar la eficiencia, la fiabilidad, la resistencia, la rigidez y para mejorar otros indicadores de calidad de las máquinas. Un modelo descriptivo bastante fragmentado se presenta en [10], donde se enfatizan las pruebas físicas de los productos objeto de diseño, tal y como corresponde al contexto en que dicho libro fue escrito y a sus objetivos.

La tesis doctoral de Chaur [11] analiza organizadamente modelos descriptivos, prescriptivos, cognitivos y computacionales del proceso de diseño. Entre ellos se encuentra el denominado *Total Design*, propuesto por Pugh en 1990, que se presenta con un núcleo lineal que abarca estudio de mercado, diseño conceptual, diseño de detalle, fabricación y venta. Rodeándolo e influyendo sobre dicho núcleo, Pugh ubica claramente las especificaciones de diseño, el vínculo estrecho con múltiples disciplinas (técnicas ó no) y el acercamiento continuo a la solución por medio de la retroalimentación, que conduce a sucesivas etapas de divergencia (generación de conceptos) y convergencia (evaluación sistemática).

Otro de los modelos tratados en [11] es la llamada *teoría general del diseño*, propuesta por Takeda en 1990. La mencionada teoría estudia profundamente el aspecto cognitivo para culminar con la propuesta de un modelo computacional donde un meta-modelo

evoluciona paso a paso a partir de la adición de información y conocimiento hasta que sean cumplidas los requerimientos iniciales. Por ésta última razón es conocido como modelo evolutivo. Al mismo le siguen otros como el *axiomático* de Suh [12] y el *co-evolutivo* de Maher [11], que se sirve de un algoritmo genético y emplea términos como genotipo, fenotipo, cruzamiento, mutación y otros, extraídos de esa importante rama de la ciencia.

Chaur enfatiza sobre todo en la llamada “*parte creativa*” del diseño, que hasta el día de hoy no ha sido del todo explicada, pero que constituye uno de los principales objetivos de las investigaciones sobre el proceso de diseño. En su minucioso estudio no se refiere sin embargo al gigantesco paso que significó la introducción de los SDP para la ingeniería, al salir al mercado Pro/Engineer en 1989 impulsado por la idea de Samuel P. Geisberg [13]. Aunque menciona y contextualiza los SDP no alcanza a comunicar la importancia de la nueva manera de realizar el modelado, que en unos pocos años se impuso y marcó una nueva dirección del desarrollo.

En una propuesta reciente, la Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos [14] expone un esquema de 5 fases: formulación del problema, diseño conceptual, diseño de configuración, DP, y diseño detallado. Aparece aquí explícitamente el DP dentro del modelo descriptivo del proceso de diseño, lo cual refleja su importancia, pero al mismo tiempo queda restringida su aplicación a sólo una etapa del proceso, lo cual no coincide con la opinión de otros autores ni con las aplicaciones cotidianas, donde el DP es realizado tanto en etapas tempranas [15; 16; 17; 18] como tardías [19; 20; 21; 22; 23; 24]. La experiencia demuestra que la tecnología del DP puede ayudar a definir exitosamente tanto los aspectos conceptuales del objeto de diseño como después los detalles del mismo.

3. El diseño paramétrico dentro del proceso general.

Considerando al diseño ingenieril como: la acción de transformar la descripción primaria de un problema en una nueva descripción de cierto conjunto de objetos que, adecuadamente vinculados y puestos en funcionamiento, han de resolver el problema inicial, en el presente trabajo se prefiere una representación sencilla, con dos grandes y abarcadoras etapas: diseño conceptual y diseño detallado [25]. En modo alguno esto contradice los modelos minuciosos de Shigley, Norton, Pugh, Takeda, Maher, Chaur y otros autores; ya que son reconocidas como etapas en casi todos los modelos, con diferencias en la definición de las fronteras. Por otra parte, de ser necesario, cada una de las dos grandes fases podría dividirse y subdividirse para ejecutar, entender y/o automatizar el

procedimiento, con el objetivo de llegar finalmente a lo mismo: nuevos y mejores diseños.

Hay coincidencia también en cuanto al carácter iterativo del proceso de diseño, globalmente y en cada uno de sus pasos; haciéndose obvio que pueden surgir condiciones imprevistas externas o internas que obliguen a saltar hacia adelante o hacia atrás uno o varios de los pasos que hayan sido definidos.

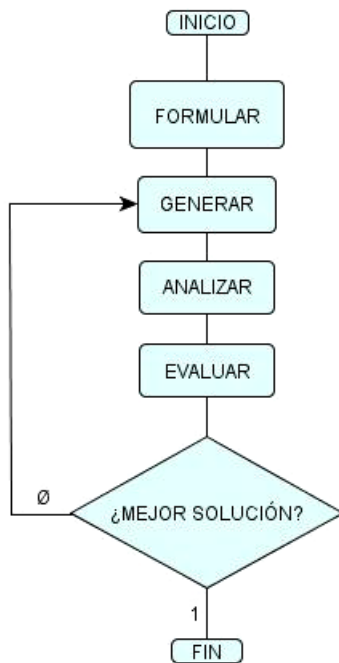


Figura 1 - Diseño paramétrico sistemático.

Al tomar en cuenta que “rediseñar” no es esencialmente diferente a “diseñar”, se puede adoptar la representación de la Fig. 1. La tarea de diseño es presentada al grupo de diseñadores en forma general, imprecisa, informal y muchas veces a través de personas que no son expertas en diseño; luego para *formular* el problema de diseño es necesario estudiar profundamente el objeto de diseño, los problemas que han de resolverse, las metas a alcanzar con el nuevo diseño y en fin, todo lo relacionado con el mismo hasta describirlo con precisión. Posteriormente se procede a *generar* diferentes alternativas de diseño, lo cual, en la práctica de la ingeniería mecánica actual, implica concebir posibles soluciones y componer inclusive modelos geométricos tridimensionales de las mismas. Las alternativas generadas serán *analizadas* de acuerdo con las sofisticadas herramientas de los SDP (además de otras), para ser por último sometidas a los criterios de *evaluación* que permitirán decidir si se trata ó no de la mejor solución.

El diseño conceptual es de carácter estratégico. En él se determinan los parámetros más importantes y

generales. Un ejemplo es la *síntesis de tipo* [8], que consiste en elegir el tipo de mecanismo a utilizar para efectuar una determinada transformación del movimiento mecánico. Otra muestra es la propuesta de Ge y otros [16], que consiste en un método sistemático de generación de alternativas, que ahorra tiempo en el DP (específicamente en la etapa conceptual) de sistemas mecánicos complejos. La clave de la rapidez se atribuye a la búsqueda directa en lugar del clásico método de prueba y error, y a la posibilidad de realizar negociaciones cliente-diseñador en cualquier punto del proceso, en lugar de hacerlo solamente al principio y al final del mismo.

En la etapa conceptual suelen realizarse modelos tridimensionales simplificados y especificaciones transitorias por medio de los software para el diseño paramétrico (SDP). Aquí se simplifican las partes y sub-ensamblajes de la máquina en aras de reducir la cantidad de información a manipular por el diseñador y la computadora. Las variables que se manejan son las fundamentales, incluyendo series de piezas, combinaciones de materiales, sus tratamientos, tipo de mecanismo o de solución constructiva, etc.

En el trabajo referido en [26] se propone el uso del *Método de los Grafos Dicromáticos* (MGD) para la resolución de problemas de cómputo específicamente en el diseño conceptual. Está basado en modelos matemáticos (MM) y aunque no se declara explícitamente es totalmente aplicable en el DP. En trabajos precedentes [5;4] también es obvio que el MGD encaja perfectamente en el modelo mostrado en la Fig.1, solo ó acompañado de otros métodos. Sobre un mismo MM se pueden plantear problemas de análisis (simulación) ó de síntesis (que puede incluir la optimización), tanto en lo conceptual como en lo detallado. Si el MM es de grandes dimensiones el método facilita su descomposición en otros más fáciles de manejar.

En el diseño detallado se asignan valores a los numerosos parámetros restantes que concretan la descripción definitiva y pormenorizada sobre el objeto, necesaria para su posterior realización. Esta fase es de carácter táctico, acaso menos inventiva o heurística y más orientada al cálculo y selección de elementos normalizados, para lo cual los SDP actuales son muy apropiados por contar con herramientas específicas. A diferencia del diseño conceptual, donde es conveniente modelar el objeto de diseño como un todo, en el diseño detallado es posible trabajar paralelamente en varios subsistemas locales, cuyos parámetros fundamentales ya fueron determinados por el diseño conceptual. Los MM en ésta fase se caracterizan por sus grandes dimensiones, por lo que el MGD se puede aplicar con éxito dadas sus herramientas para descomponerlo.

Tan importante es una como otra etapa. Aunque la parte conceptual aparenta serlo más, un diseño de

detalle deficiente invalida por completo una solución. La laboriosidad requerida en la fase detallada hace imprescindible que la preceda un correcto diseño conceptual y que sea ejecutada con eficiencia. Por otro lado, lo que para una máquina determinada es un detalle puede tomar carácter de concepto en un agregado de la misma, por lo que, aún siendo comúnmente aceptada, la terminología no es absoluta. Ésta es una de las ideas en que los autores del presente trabajo se basan para plantear que el DP se realiza en cada una de las dos grandes etapas.

Al diseñar máquinas complejas, los recursos computacionales internos del SDP pueden ser insuficientes para comprender y manipular el volumen de información involucrado, por lo que puede ser necesario trabajar fuera del SDP, utilizando métodos y programas especiales de cómputo ingenieril, cuyos resultados parciales o finales son introducidos posteriormente al SDP para continuar el proceso de diseño.

4. Formalización del diseño paramétrico.

Formalizar matemáticamente el DP es una tarea ineludible para su comprensión y posterior automatización. En general existe coincidencia en considerar que una aplicación de diseño es una búsqueda a través del mapeo en un espacio de múltiples dimensiones de un conjunto de soluciones de diseño $S = \{s_1, \dots, s_s\}$ [3,27].

A juicio de los autores del presente trabajo, el mencionado espacio consta de cuatro dimensiones: $\langle V, D, R, FO \rangle$. Cada una de las acciones del mapeo define una posible solución de diseño PS_k , consistente en la asignación de valores a un conjunto de parámetros $VP = \{vp_1, vp_2, \dots, vp_i\}$ que posteriormente pudieran definir al objeto diseñado.

Se cumple que $VP \subset V$, donde

$V = \{v_1, \dots, v_n\}$ es el conjunto de las variables.

$D = \{D_1, \dots, D_n\}$ es el conjunto de los dominios de las variables.

Para cada variable x_i existe un dominio D_i tal que $x_i \in D_i$, determinándose D_i por un conjunto de propiedades (inecuaciones de una sola variable ó pertenencia a un conjunto finito de valores):

$$\begin{aligned} D_1 &= \{v_{11}, \dots, v_{1m}\} \\ D_2 &= \{v_{21}, \dots, v_{2m}\} \\ D_n &= \{v_{n1}, \dots, v_{nm}\} \\ D &= \{U_{i=1}^n (U_{j=1}^m v_{ij})\} \end{aligned}$$

Por otra parte $R = \{r_1, \dots, r_q\}$ es el conjunto de las relaciones entre variables, mientras que es simbolizada la función objetivo como FO .

El mapeo antes mencionado y la búsqueda entre las posibles soluciones se pueden realizar en muchos problemas de DP utilizando métodos basados en modelos matemáticos. Un *modelo matemático* $M \langle V, D, R \rangle$ está formado por el conjunto V de todas las variables del objeto de diseño, el conjunto D de sus correspondientes dominios y el conjunto R de todas las relaciones entre ellas. Sobre dicho modelo, que recoge el conocimiento sobre la ingeniería del objeto (incluido el modelado virtual tridimensional), se plantean problemas de diseño que, al presentarse por lo general informalmente definidos, el diseñador deberá formular. Visto de forma integral el diseño es un problema de síntesis (optimización), aunque dentro del proceso necesariamente se producen repetidas fases de análisis (simulación). Así que, en general, independientemente del método utilizado para resolverlo, el problema de diseño se formula concretando dicho modelo matemático, las variables de entrada, las de salida y una función objetivo FO ; es decir: $P \langle M, E, X_s, FO \rangle$.

En [27] se considera que en diseño es más frecuente la búsqueda de mínimos, por ello, dado que el costo es una variable “siempre” a minimizar, se le da el nombre de función de costo global a lo que los autores prefieren llamar función objetivo FO .

La función objetivo es un conjunto de variables, relaciones y propiedades $FO \langle VF, RF, PF \rangle$ determinadas por criterios humanos, lo que para la ingeniería implica una importante declaración de principio establecer que la función objetivo no se incluye dentro del modelo matemático [4]. El criterio de selección de la mejor alternativa es una decisión humana, algo totalmente subjetivo, cambiante, que no tiene nada que ver con las leyes naturales, geometría, procesos tecnológicos u otros factores que rigen objetivamente el comportamiento de la máquina; por lo tanto el modelo matemático (sin la función objetivo) constituye una herramienta sólida, firme, esencial, reutilizable en muchos problemas de diseño que se pudieran diferenciar, entre otras cosas, por la propia función objetivo. Para un especialista, la mejor variante puede ser la que más silenciosamente marche y para otro la que menos energía consuma, mientras que para un tercero la elección puede ser la más duradera. Desde el punto de vista puramente matemático la función objetivo sí se puede incluir dentro del modelo, pero dicha inclusión no ayuda si se enfoca desde la óptica ingenieril, dada la flexibilidad exigida en los procedimientos actuales de diseño.

Una posible solución de diseño PS_i existe si a cada parámetro se le ha asignado un valor, sea por decisión o por cálculo; es completa si todas las variables tienen su valor asignado dentro del dominio correspondiente; es válida si además no es violada ninguna relación; y si es completa y válida constituye una solución de diseño S . Finalmente, la solución de diseño óptima es aquella que cumple satisfactoriamente con la función objetivo, mientras que las soluciones racionales son las que se acercan a la óptima. En la Fig. 2 se ilustra la composición del espacio de la actividad de diseño de forma parecida a como hacen Teije, y otros [28].

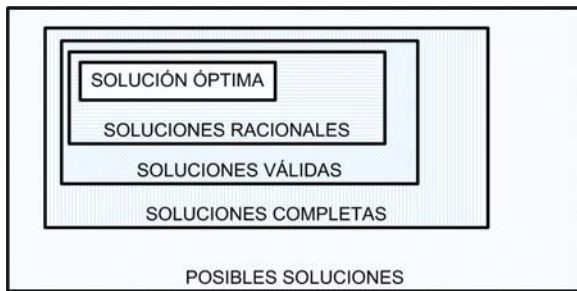


Figura 2 - Espacio de la actividad de diseño.

El conjunto V de variables está compuesto por los conjuntos de parámetros VP y variables de estado VE , o sea $V = VP \cup VE$. Los parámetros v son variables que determinan la configuración del objeto de diseño, es decir, que se comportan como constantes para una posible solución de diseño PS_k ; de modo que un conjunto de varios juegos de valores de parámetros constituye una familia de posibles soluciones de diseño $PS = \{PS_1, PS_2, \dots, PS_p\}$ ó $PS = \{U_{k=1}^p PS_k\}$. Las variables de estado v determinan el estado de una posible solución de diseño para condiciones dadas. Casos particulares de variables de estado son las incluidas en el conjunto de variables de control VC , que siempre son determinadas externamente por accionamientos ó mandos. Es de vital importancia para el diseño identificar las variables de control, variables de estado y parámetros, puesto que, entre otras razones, una posible solución de diseño se define con los parámetros, ya que son constantes, identificables y medibles en las máquinas por parte de los ingenieros. Los valores característicos de las variables de estado son interpretados como parámetros, debido a que para una misma solución de diseño permanecen constantes.

Al mismo tiempo, las variables V (sean parámetros ó variables de estado) pueden ser de entrada E (datos) o incógnitas X . Estas últimas pueden ser variables

intermedias X_I ó de salida X_S por lo que $V = E \cup X_I \cup X_S$.

En la mayoría de los casos, sin hallar al menos una parte de las incógnitas intermedias no es posible obtener todos los parámetros que definen finalmente el objeto de diseño, de ahí su significado. Dependerá del problema de diseño formulado cuáles de los parámetros o variables de estado serán de entrada o de salida y por tanto cuáles incógnitas intermedias.

Así, con respecto a la organización de las variables, se puede resumir que, por una parte (Ver Fig. 3):

$$\begin{aligned} V &= E \cup X \\ E &= VP_E \cup VE_E \\ X &= X_I \cup X_S \\ X_I &= XP_I \cup XE_I \\ X_S &= XP_S \cup XE_S \\ VC &\subset VE_E \end{aligned}$$

Y por otra parte (Ver Fig. 4):

$$\begin{aligned} V &= VP \cup VE \\ VP &= VP_E \cup XP_S \cup XP_I \\ VE &= VE_E \cup XE_I \cup XE_S \end{aligned}$$

Donde:

- VP_E : parámetros de entrada
- XP_I : parámetros intermedios
- XP_S : parámetros de salida
- VE_E : variables de estado de entrada
- XE_I : variables de estado intermedias
- XE_S : variables de estado de salida
- VC : variables de control
- V : variables en general
- E : variables de entrada en general
- X_I : incógnitas intermedias en general
- X_S : incógnitas de salida en general
- X : incógnitas en general

La dimensión R del modelo, que comprende las relaciones entre variables, contiene relaciones de igualdad Ri y relaciones de desigualdad Rd , es decir: $R = Ri \cup Rd$.

Por otra parte, al definir el espacio dominio de las variables D , se está aportando de hecho la información sobre qué valores pueden o no tomar las variables de acuerdo a leyes objetivas. Es en realidad un conjunto de relaciones de una variable con ciertos números, que se expresan en forma de inecuaciones de una sola variable o simplemente como conjuntos de valores discretos, son propiedades.

El proceso de mapeo ocurre del modo mostrado en la Fig. 5. Al modelo matemático original se vinculan los conjuntos de variables, relaciones y dominios que componen la función objetivo. Sobre el modelo se

plantea el problema de DP y se realiza una serie de simulaciones, creándose una familia de posibles soluciones que, al ser iterativamente evaluadas con los criterios de la función objetivo, se va tamizando hasta obtener la mejor solución

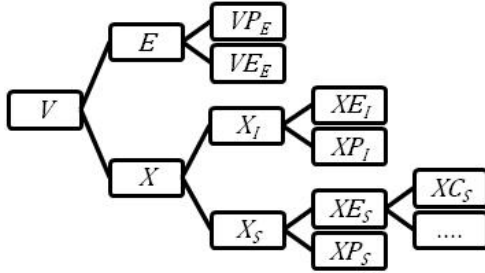


Figura 3 - Clasificación jerárquica de las variables según sean conocidas (datos) ó no.

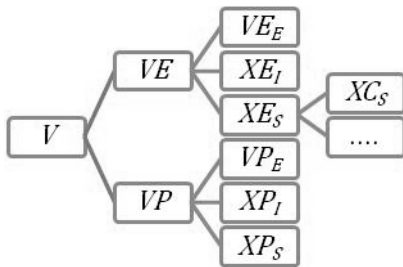


Figura 4 - Clasificación jerárquica de las variables según sean o no parámetros.

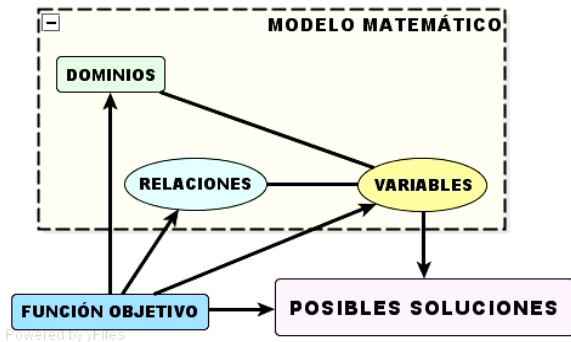


Figura 5 - Mapeo del espacio multidimensional $\langle V, D, R, FO \rangle$ en un conjunto de posibles soluciones.

Para resolver el problema de DP es necesario el auxilio de un método de resolución de problemas. Pudieran usarse métodos basados en: heurísticas (matemáticamente no formales), en tanteo y error, en modelos matemáticos analíticos, en soluciones numéricas, en combinaciones de varias técnicas ó en otros principios diferentes. Es muy importante elegir correctamente y dominar bien el método. Los SDP son

de hecho programados con varios métodos de resolución de problemas que los dotan de la flexibilidad que los caracteriza. Gracias a ello, a medida que se modela un objeto se generan automáticamente los parámetros, que después podrán editarse, siempre que se mantengan dentro de su dominio y no sean violadas las relaciones entre variables (parte de las cuales también es generada internamente). En los trabajos referidos en [29; 30; 15; 28; 31; 32] se exponen y discuten varios de éstos métodos.

Con base en la experiencia adquirida en numerosas aplicaciones, en éste trabajo se adopta el Método de Grafos Dicromáticos (MGD) como vía apropiada para resolver problemas de DP. Según se explica en [5;4;26] el modelo matemático se representa con un grafo dicromático Mg , que capta en sí el conocimiento sobre la estructura del modelo matemático inicial. En él solo pueden admitirse como vértices las variables V y las relaciones de igualdad multivariables Rl ; por lo que, en caso de que el modelo original contemple relaciones de desigualdad Rd , éstas se modifican agregando a cada una de ellas una variable de holgura y convirtiéndola en una ecuación multivariable y una inecuación monovariable; formándose respectivamente los conjuntos Rih y Dh .

$$Rd \rightarrow Rih \cup Dh$$

Las variables de holgura van entonces a unirse al conjunto de las variables, las inecuaciones monovariables al conjunto de los dominios y por supuesto, las ecuaciones multivariables al de las relaciones, de modo que se forman tres nuevos conjuntos: el de las variables que van al grafo Vg , el de sus dominios Dg , y el de las relaciones que van al grafo Rg .

$$Vg = V \cup Vh$$

$$Dg = D \cup Dh$$

$$Rg = R \cup Rih$$

Entonces el grafo del modelo es:

$$Mg < Vg, Rg >$$

Del problema de diseño formulado inicialmente se toman las variables de entrada, ubicando en dicho conjuntos, si fuera preciso, algunas de las nuevas variables de holgura $Vg'_E = E \cup Vh_E$. Así se obtienen, como se manifiesta en [5], el grafo de la situación, al retirar del grafo del modelo todas las variables de entrada y los arcos que las conectan con el resto del modelo:

$$Xg' = Vg \setminus Vg'_E$$

$$Pg' < Xg', Rg' >$$

Del grafo de la situación, al eliminar (por innecesarias) las islas que no contengan variables de salida (si existen), se obtiene el grafo del problema:

$$\begin{aligned} Xg &\subseteq Xg' \\ Rg &\subseteq Rg' \\ Pg &< Xg, Rg > \end{aligned}$$

Sobre éste último grafo, de acuerdo al procedimiento explicado en [4; 5; 6] se realiza un pareo inicial, se determina un resolvente a partir del mismo, luego se obtienen los grados de libertad y las deficiencias (caracterizándose así el problema); posteriormente se dibuja el grafo en forma canónica, se realiza un segundo pareo y por último se halla el resolvente definitivo, el cual contiene la información necesaria y suficiente para dar como resultado una sucesión de pasos

$p_1, p_2, p_3, \dots, p_r$ con un orden estricto, que no forman otra cosa que el algoritmo A que resuelve el problema de diseño planteado:

$$A = (p_1, p_2, p_3, \dots, p_r)$$

No debe olvidarse que el modelo solo responde aceptablemente a la realidad si se cumplen las propiedades que componen el conjunto Dg , por lo que durante la ejecución del algoritmo será necesario constantemente verificar si cada variable obtenida cumple con las propiedades declaradas en Dg , es decir, $x_i \in Dg_i$

Al implementar el algoritmo finalmente obtenido se pueden obtener de modo seguro los valores de todas las incógnitas, con lo cual se da solución al problema de DP que haya sido formulado, sea de análisis o de síntesis.

5. Conclusiones.

El MGD se presta a caracterizar y resolver de modo seguro problemas de cómputo en ambas etapas del proceso general de diseño (conceptual y detallado), al adaptarse bien a las características propias de cada una de ellas.

El MGD se puede utilizar para caracterizar y resolver los problemas computacionales que se plantean en diseño paramétrico, en los procesos de análisis que se realizan al simular y también durante los procesos de síntesis que se realizan al optimizar los parámetros; siempre que se utilicen modelos matemáticos que describan aceptablemente el comportamiento del objeto de diseño de acuerdo a leyes naturales.

Es de suma importancia distinguir los tipos de variables involucradas en el diseño paramétrico, no solo para poder aplicar el MGD, sino también para comprender la esencia del diseño paramétrico.

En los casos en que el modelo matemático sea de grandes dimensiones el MGD constituye una potente herramienta para descomponerlo y manipularlo más fácilmente.

El MGD, al ser empleado en diseños paramétricos capta el conocimiento acumulado, no solo en la funcionalidad del modelo matemático en sí, sino

también en la estructura del modelo matemático que es representada con el grafo Mg , sobre el que podrán resolverse numerosos problemas de diseño paramétrico.

6. Referencias.

1. Monedero, Javier. *Parametric design. A review and some experiences*. [En línea] <http://info.tuwien.ac.at/ecaade/proc/moneder/moneder.htm> (2006).
2. DELCAM. *Parametric Modelling history. MCAD Online*. [En línea]. <http://www.mcadonline.com>. DELCAM, 2005.
3. Wielinga, B.J., Akkermans, J.M. y Schreiber, A.Th. *A Formal Analysis of Parametric Design Problem Solving*. [En línea] <http://hcs.science.uva.nl/usr/Schreiber/papers/WielinWi95a.pdf> (1995).
4. Martínez Escanaverino, José, y otros. *Control, design and error variables in decomposition of design optimization problems*. Montreal, Canadá: Proceedings of DETC'01: ASME 2001 Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, 2002.
5. Martínez Escanaverino, José, y otros. *Rational design automation by dichromatic graphs*. Pittsburgh, Pennsylvania: Proceedings of DETC'01: ASME 2001 Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, 2001.
6. Martínez Escanaverino, José. *Resolución de Problemas de Cómputo*. Material complementario del curso impartido en Facultad de Ingeniería Mecánica del ISPJAE. Ciudad de La Habana: s.n., 2006.
7. Shigley, Joseph E. y Mischke, Charles R. *Standard handbook of machine design* (2da edición). San Francisco: McGraw-Hill, 1996.
8. Norton, Robert L. *Diseño de Máquinas*. México. Prentice Hall, 1999.
9. Orlov, P. *Ingeniería de Diseño* (En español). Tomos I, II y III. Moscú: MIR, 1985.
10. Kochubievskiy, i. D. *Sistemas de carga para la investigación y prueba de máquinas y mecanismos* (en ruso). Moscú: Mashinostroenie, 1985.
11. Chaur Bernal, Jairo. *Diseño conceptual de productos asistido por ordenador : Un estudio analítico sobre aplicaciones y definición de la estructura básica de un nuevo programa*. Tesis doctoral. s.l.: Universidad Politécnica de Cataluña, 2005. B.37093-2005/84-689-3152-7 (2005).
12. Suh, N. *The Principles of Design*. Oxford University Press. [En línea] <http://www.axiomaticdesign.com/technology> (1996).

13. Saitz, Robin. *Diseño Paramétrico, 20 Años de Tecnología de Punta*. PTC. [En línea] <http://www.lankoak.com/Historia.pdf> (2006).
14. ASME. *PPC- Parametric Design*. [En línea] www.professionalpractice.asme.org. 2007.
15. Wang, Nanxin, Wan, Jian y Gomez-levi. *Parametric modeling method and system for conceptual vehicle design*. 20070198230 U. S. Patent, 23 de agosto de 2007.
16. Ge, Ping, C.-Y, Stephen y Bukkapatnam, Satish TS. *A direct synthesis method for early stages parametric design of large- scale mechanical systems*. [ed.] Proceedings of DETC'02. Montreal: Proceedings of DETC'02, 2002. DTM-34006.
17. Aleixos, Nuria, y otros. *Metodología top-down para la modelación CAD avanzada: desarrollo del modelo paramétrico-asociativo de un radiador automovilístico*. [En línea] <http://www3.uji.es/~pcompany/APCCVOI.pdf> (2003).
18. Akin, David L. *Parametric Analysis*. [En línea] http://cpacraft.ssl.uml.edu/old_site/academics/483_F02/01_sys_eng_2002.pdf (2007).
19. Suárez Quirós, Javier, y otros. *Análisis de la eficacia de las herramientas de modelado paramétrico en la resolución de problemas de "layout": un caso práctico en la central térmica de Aboño (Gijón)*. [En línea] <http://www.ingegraf.es/XVIII/PDF/Comunicacion17056.pdf> (2006).
20. Suffo, Miguel, y otros. *Metodología de representación geométrica de hélices de buques para su clasificación topológica*. XIV Congreso Internacional de Ingeniería Gráfica. Santander. (2002).
21. SolidWorks. *Cómo lanzar más rápidamente al mercado productos médicos innovadores*. [En línea] www.solidworks.com (2008).
22. PRO/ENGINEER. *Del diseño a la fabricación en tiempo record*. PRO/ENGINEER. [En línea] www.proengineer.com (2008).
23. Anders, Jürgen M., Haarmeyer, J. y Heukenkamp, H.; *A Parametric Blade Design System (Part I + II)*. [En línea] <http://www.atech.de/pdf/vki.pdf> (2001).
24. Yeoung, KIM, Li-ra, KIM y Cha-soo, JUN. *Parametric design of a part with free-form surfaces*. Journal of Zhe jiang University SCIENCE A. [En línea] <http://www.springerlink.com/index/R1801550TN844561.pdf> (2006).
25. Martínez Escanaverino, José. *Diseño Racional en Ingeniería Mecánica*. Material complementario del curso impartido en Maestría de Ingeniería Mecánica. ISPJAE. Ciudad de La Habana. s.n. (2006).
26. Martinez-Escanaverino, Jose y Martinez-Fonte, Leyden. *A problem solving rationale for conceptual design in engineering*. CAID&CD Conference. Netherlands. (2005).
27. Motta, Enrico y Zdrahal, Zdenek. *Parametric Design Problem Solving*. [En línea] <http://citeseer.ist.psu.edu/137277.html> (1996).
28. Teije, Annette ten, Harmelen, Frank van y Wielinga, Guus Schreiber and Bob. *Construction of problem-solving methods as parametric design*. [En línea] <http://portal.acm.org/citation.cfm?id> (1996).
29. Randall W. Smith, Jason Bright, Thomas Varghese. *Rule based parametric design apparatus and method*. Patent 5548698 United States, 20 de 8 de 1996.
30. Harmelen, Frank van. *Construction of problem-solving methods*. [En línea] <http://ksi.cpsc.ucalgary.ca/KAW/KAW96/tenteije/KAW96.html> (1996).
31. *Methods and systems for generating parametric designs*. Patent 4882692 U.S., 21 de 11 de 1989. <http://www.patentstorm.us/patents/4882692.html>.
32. Brown, David C. *Revision of 1993 Article on Intelligent Computer-Aided-Design*. Encyclopedia of Computer Science and Technology. (1998).

Strategy for model-based parametric design.

Abstract:

The present article exposes a way to design parametrically applying programs (CAD, CAE, PMS) accepted by designers along the last 20 years. The proposal is based on mathematical models that ponder the knowledge on the engineering of the design object and the building of its three-dimensional virtual models, blueprints and another aspects; using the dichromatic graph method to solve computational problems in parametric design. The points of view of different authors are analyzed in connection with the general process of design, locating parametric design inside it, carrying out a formal explanation which arrives to interesting conclusions.

Key words: Parametric design, computer aided design (CAD), computer aided engineering (CAE), parametric modeling software (PMS), problem solving.