

Sobre la solución de problemas computacionales en ingeniería mediante grafos dicromáticos. Selección de software de apoyo

Sergio A. Marrero-Osorio

Recibido el 23 de noviembre de 2010; aceptado el 6 de mayo de 2011

Resumen

El autor realiza una concisa revisión sobre la aplicación de grafos en la resolución de problemas de cómputo en ingeniería, enfatizando en un método propuesto por Martínez Escanaverino que utiliza grafos dicromáticos y ha sido usado en el ámbito científico técnico de Cuba. Analiza, basado en seis ejemplos, el escaso empleo que se ha dado hasta el momento al software disponible para trazar y editar los sucesivos grafos durante el proceso de resolución; estudiando y evaluando un grupo de 18 editores de grafos por sus aptitudes para aplicar el mencionado método. Finalmente se recomienda uno de ellos para su uso futuro y se confirma la conveniencia de su empleo a través de una comparación.

Palabras claves: análisis estructural, resolución de problemas, algoritmos, modelo matemático, grafos dicromáticos, editores de grafos.

About solving computational problems by dichromatic graphs in engineering. Selection of supporting software

Abstract

Author makes a concise review about employment of graphs in solving engineering computational problems, emphasizing in one method proposed by *Martinez Escanaverino* which uses dichromatic graphs and has been applied in Cuban technical sciences. Analyzes, based in six examples, lack in use (until this moment) of software for graph drawing and edition through problem solving process, studying and evaluating 18 available graph editors and suggesting one of them for future applications of mentioned method. Finally, making a comparison, are confirmed advantages of its usage.

Key words: structural analysis, problem solving, algorithms, mathematical models, dichromatic graphs, graph editors.

Introducción

La búsqueda y desarrollo de métodos para analizar estructuralmente los **modelos matemáticos** (MM) y obtener algoritmos de **resolución de problemas de cómputo** (RPC) en ingeniería; es, sin dudas, una corriente actual. Algunos de dichos métodos utilizan grafos, siendo aplicados principalmente en dos direcciones: la generación automática de algoritmos; y la asistencia en cuanto a la visualización e interacción con la estructura de los MM, para formular adecuadamente los problemas de ingeniería y resolverlos mediante la obtención *no automática* de algoritmos.

Los métodos utilizados en la segunda dirección confrontan un obstáculo para su empleo sistemático en medianos y grandes MM. Este gravita en lo laborioso de representar y manipular los sucesivos grafos que conducen al algoritmo, lo que inclusive ocurre cuando se utilizan herramientas informáticas comunes. La problemática anterior condujo al autor a enfrentar el presente trabajo, planteándose como objetivos: estudiar la representación de MM mediante grafos enfocada a la RPC en ingeniería; y recomendar un editor de grafos (**EG**) para la aplicación específica de un Método de Grafos Dicromáticos (**MGD**) propuesto por Martínez Escanaverino [1, 2, 3, 4, 5].

Representación de modelos matemáticos mediante grafos enfocada a la RPC en ingeniería. Ejemplos

La teoría de grafos, inicialmente elaborada para solucionar *problemas combinatorios*, ha sido posteriormente usada en problemas computacionales. Pionero en este aspecto es *Enn Tyugu*, formado en la escuela de la antigua Unión Soviética y uno de los líderes científicos actuales del Instituto Cibernético de Tallinn (<http://www.cs.ioc.ee/~tyugu>). Por haber propuesto y fundamentado teóricamente en 1970 el empleo de grafos de dos colores para representar la estructura de los MM, *Tyugu* fue especialmente tomado en cuenta en las referencias [1, 2, 3, 4, 5], de las que se comenta más adelante. Martínez también se refiere a Serrano, un puertorriqueño que en 1989 defendió un doctorado en el Instituto Tecnológico de Massachusetts y cuya tesis [6] se destaca por su enfoque ingenieril. En ella utiliza primero grafos bipartitos y luego hipergrafos en función del diseño conceptual en ingeniería mecánica, incluyendo un algoritmo declarativo y ejemplos de problemas relativamente simples sobre vigas, soldaduras, reductores de velocidad, mecanismos de palancas y otros componentes de máquinas.

En la *Concise Encyclopedia of Modelling & Simulation* [7], edición de 1992, *Richetin* realiza una reseña teórica sobre el análisis estructural de MM mediante grafos dicromáticos, la cual da idea aproximada del estado en que se encontraba el tema en occidente. En este caso no se examina la asimetría de ciertas relaciones, la posible incompatibilidad de los problemas primariamente planteados y otros aspectos frecuentes en la realidad científico-técnica.

La tesis de maestría de *Jianjun Oung* [8] es un ejemplo práctico más reciente, donde se implementa el software *FRONTIER* que cuenta con medios para visualizar grafos elaborados internamente por el programa, los cuales reflejan la estructura del objeto modelado y del MM.

Gran relevancia en el tema tiene el proyecto *Modelica* (<http://www.modelica.org>) [9], que constituye un lenguaje de alto nivel creado para modelar y simular sistemas físicos en general, idea de *Mattsson, S.E.* y *Elmqvist, H.* [10] impulsada por investigadores como *Fritzon* [11, 9], *Bonus* [12, 13], *Aronsson*. A partir de las partes del sistema y de las conexiones entre ellas *Modelica* puede generar grafos dicromáticos que muestran los MM de forma esquemática, facilitando la obtención de algoritmos de simulación de sistemas físicos, tanto de carácter continuo como discreto. Encuentra incluso aplicaciones al diseño y desarrollo de productos como la que se detalla en [14], y emula con análogos como *EcosimPro/EL*, *Simulink* y *DinaFlexPro*; manifestando más actual y completamente la tendencia a visualizar MM y algoritmos utilizando grafos.

Con relación al diagnóstico automático de sistemas (estáticos o dinámicos) existen también ejemplos; como la tesis de maestría de *Rattfält* [15], dirigida por *Frisk* y *Krysaner*, en la que se comparan dos métodos que se valen del análisis estructural de MM para la detección y aislamiento de fallas en sistemas dinámicos; y también la aplicación de *Bonus* y otros autores [16] a la industria aeronáutica. Ambos utilizan exitosamente matrices y grafos dicromáticos para programar los algoritmos.

Quizás el ejemplo más difundido de la propensión a representar simbólicamente los MM es la herramienta de rastreo de *precedentes* y *sucesores* de *Microsoft Office Excel*, que ofrece una especie de grafo del resolvente (no dicromático) obtenido a partir de un algoritmo programado con antelación por el usuario. La mayor utilidad en este caso está en que se pueden localizar ciclos (referencias circulares), rectificar errores y comprender el problema computacional, pero no en su formulación ni en la obtención directa del algoritmo. En el caso de

Excel la visualización comprensible del grafo se ve limitada por la posición que el usuario asigna a las casillas programadas con fórmulas.

El MGD desarrollado por Martínez Escanaverino se incluye en la actual corriente, fundamentalmente en lo que respecta a la interacción del ingeniero (no necesariamente informático) con el problema computacional. A diferencia de otros (que en alguno de sus pasos emigran a representaciones distintas) este método aprovecha las particularidades teóricas de los grafos dicromáticos durante todo el proceso de RPC; que es rigurosamente ordenado para pasar por la caracterización del problema, por su correcta formulación y culminar con la obtención del algoritmo. Un grupo de sucesivas transformaciones permiten descartar (por innecesarias) algunas partes de los grafos que podrían ser complejas, lo que contribuye a simplificar los algoritmos y sus procesos de obtención. Lo anterior se refiere específicamente al paso de o que se denomina **situación al problema** y del denominado **resolvente** al algoritmo.

El MGD ayuda a resolver problemas de simulación (tanto directa como variacional) y de optimización (incluso con criterios múltiples); que pueden estar asociados a grandes MM (lineales o no) y contener relaciones asimétricas, algoritmos multicíclicos y muchos grados de libertad. Funciona tanto al utilizar vías numéricas como algebraicas, y suministra herramientas para solucionar algunos problemas declarados en primera instancia como incompatibles. Ha sido divulgado en eventos [3, 5, 4, 2], publicaciones [1] y cursos sobre RPC, simulación, optimización y diseño racional en ingeniería mecánica, lo que ha permitido a otros conocerlo y aplicarlo (<http://www.cujae.edu.cu/facultades/mecanica/postgrado/maestria/asig>). No se ha visto acompañado, sin embargo, de ningún proyecto de envergadura (como *Modelica*, por ejemplo), lo cual ha limitado su desarrollo.

Algunas aplicaciones del MGD en investigaciones

Entre las aplicaciones publicadas del MGD están las de Rivero [17] y Ortíz [18], en cuyos casos se desarrollan algoritmos más o menos sencillos para resolver respectivamente problemas de transmisiones por tornillo sinfín y de resortes helicoidales.

Morejón [19] en su investigación doctoral se vale del MGD para obtener algoritmos más complejos partiendo de un MM de 190 vértices que es dividido en cuatro sub-modelos interconectados; planteando y cumpliendo el objetivo de conceptualizar un hidromotor de alto par. En su tesis Llamos [20] maneja MM bastante mayores (de 444 vértices en total), que separa en seis sub-modelos primero de acuerdo al sentido común y al tema tratado, y posteriormente (para su resolución) de acuerdo a la estructura representada en los grafos. Obtiene eficientes algoritmos y llega, entre otras, a una importante confirmación, que se refiere a la reutilización del MM en múltiples problemas con diferentes funciones objetivo a su vez. Tanto Llamos como Morejón hacen un correcto uso del MGD, pero les faltan herramientas para procesar MM más complejos en función del diseño, que consideren otras partes de las respectivas máquinas, así como aspectos económicos, medioambientales, etc.

Rivero en su tesis doctoral [21] también divide el MM (de 122 vértices) en cuatro sub-modelos de acuerdo a los temas y a la tradición. Alemán [22], sin embargo, recurre al MGD para representar un MM de grandes dimensiones y para obtener varios algoritmos. En este último caso, a pesar de ser el mayor de los MM aquí comparados, los grafos visualizados no son complejos, debido al estricto orden impuesto por las matrices en el **Método de los Elementos de Contorno** y a una compacta notación que simplifica los grafos. Descompone el MM en un grupo de 15 sub-modelos.

Abordando el diseño de engranajes cónicos González Rey [23] usa el MGD en la representación estructural de un MM, pero no en la obtención del algoritmo; mientras que en [24] se apoya en dicho método para determinar algoritmos.

Un importante aporte de los trabajos y tesis antes mencionados [19, 20, 21, 22, 23, 24, 18, 17] es haber probado en nuevas aplicaciones la validez del MGD, que sirvió para la RPC y para formalizar el uso de MM durante el diseño y otras acciones de ingeniería. En la generalidad de los citados casos es evidente que no se utilizaron medios automáticos para el trazado y manipulación de los grafos. Esto no sólo dificulta hacerlo a mano ó con instrumentos informáticos rudimentarios, sino que restringe las posibilidades de aplicación del método, obligando a limitar la complejidad de los MM y a descomponerlos intuitivamente.

La práctica y el estudio de los citados trabajos confirman que, ordenar el MM según la intuición o de acuerdo a temas o especialidades (y no conforme a su estructura), puede ser conveniente desde el punto de vista de su construcción, pero en general no lo es cuando el enfoque está en la RPC. La forma óptima de fraccionar el modelo podría ser, por ejemplo, obtenida a partir de la correcta agrupación del grafo por cadenas, árboles o racimos (además de las islas que son más evidentes); y esto sólo puede ser sistematizado si se utiliza el software adecuado.

Software para trazado y edición de grafos en genera

El desarrollo alcanzado por la teoría de grafos y su gran utilidad han ido conduciendo a la producción de software para el trazado y edición de grafos (EG). Exploraciones realizadas al respecto (para dar respuesta a la necesidad antes declarada) muestran que numerosos trabajos son expuestos año tras año en eventos como *Graph Drawing* y en publicaciones como *Journal of Graph Algorithms and Applications*; encaminados específicamente a representar grafos en las formas más adecuadas.

El proyecto *GRAFOS*, de la Universidad Politécnica de Valencia, dirigido por Rodríguez Villalobos [25, 26] ofrece una aplicación (sobre *Dotnet Framework*) para crear, importar y realizar análisis de grafos representables en diferentes formas (circular, orgánica, aleatoria, jerárquica, etc.). Dicho EG resuelve un importante número de problemas clásicos de optimización de rutas, flujos, árboles y otros; destacándose por su carácter educativo y por su utilidad práctica en grafos de escala pequeña.

Similar al anterior es *uDraw (Graph)*, de la Universidad de Bremen, caracterizado por ser rápido en la entrada de datos y en el ordenamiento al tener predeterminados muchos aspectos del trazado, lo que le hace, sin embargo, perder flexibilidad frente a otros programas. *Himeli*, de la Universidad de Helsinki, está designado para manipular y editar grafos complejos, de gran tamaño, difíciles de representar y en los cuales no se distinguen regularidades. Es un software libre cuya versión 3 funciona muy bien, y que, como suele suceder, comenzó como proyecto estudiantil que mejoró posteriormente su personalidad.

Con menor grado de acabado y capacidad que éste último están *Giden*, *GRIN 40*, *Algraf* y otros. En Cuba también se realizan esfuerzos en esta dirección, ejemplo de lo cual es la tesis doctoral de Rosete [27] donde se expone una investigación aplicable en la elaboración eficiente de software, pero que por el momento no responde a las características del MGD, ni a las dimensiones ni complejidad de los MM a manejar.

Especial interés despierta un software libre llamado *yEd*, programado en *JAVA*, que cuenta con algoritmos realmente espectaculares para trazado, ordenamiento y edición de diagramas y grafos de gran tamaño y complejidad. Asociada a *yEd* se edifica una biblioteca llamada *yFiles* con numerosas posibilidades de aplicación que hacen de *yEd* una herramienta flexible. Todo esto, junto a sus algoritmos de agrupación (parte de ellos automáticos a partir de cadenas, árboles, racimos, islas y otros criterios) y a sus posibilidades de intercambio, viabiliza su empleo en la aplicación del MGD.

Otro sofisticado programa para trazar y editar diagramas UML (grafos en definitiva) es *Visual Paradigm*, competidor del conocido *Microsoft Visio* y perfectamente capaz de apoyar al MGD en MM bastante grandes. También lo son *Edraw*, *GTE*, *GDTToolkit*, *Graphviz*, *CAIDA* y *GUESS*. En los casos de *Found in Space* y *Nodes3D* la representación en pantalla de grandes grafos (que casi nunca son planos) es espacial. Prácticamente todo el software analizado exporta imágenes de los grafos, siendo hasta cierto punto compatibles mediante lenguajes de intercambio como: *gml (Graph Modeling Lenguaje)*, *xgml (xml based Graph Modeling Lenguaje)*, *tgf (Trivial Graph Format)*, *ged (geneological data)* y otros.

Selección de editores de grafos para la aplicación del MGD

Se han realizado ya comparaciones entre EG, pero el punto de interés ha estado en aspectos como la elaboración de diagramas (<http://www.umsl.edu/~s1028363/DiagrammingMethods.html>). Queda entonces por saber cuál de ellos es recomendable específicamente en cuanto a la asistencia sistemática al uso del MGD.

El MGD se puede resumir en el proceso representado en el diagrama de la Figura 1. Todo parte de un grafo de dos colores que representa el MM, el cual se va transformando sucesivamente y aportando la información necesaria para descomponer, caracterizar y resolver el problema planteado. Para obtener el algoritmo de resolución de un problema compatible y determinado es preciso realizar al menos seis transformaciones del grafo inicial; y a su vez debe ser posible observar, manipular y realizar varias acciones de edición en cada grafo. La cantidad y complejidad de las transformaciones se incrementa notablemente en problemas con múltiples grados de libertad o con incompatibilidades eliminables mediante la adición de variables de error. Todo este trabajo, aunque necesario, puede convertirse en algo realmente arduo cuando el modelo es de medianas o grandes dimensiones y su algoritmo multicíclico; y por la frecuencia con que se presenta este último caso se reafirma que es vital el uso metódico de un EG con determinadas aptitudes.

Desde el punto de vista del usuario, un EG que va a ser destinado a la aplicación del MGD se puede evaluar por sus prestaciones en cuanto a: eficiencia en el ordenamiento con diferentes formas (orgánica, jerárquica, circular, etc.); capacidad para manipular grafos de gran complejidad; facilidad de localización de cualquier elemento; trazabilidad de caminos; posibilidad de identificar ciclos e islas; facilidad para la agrupación manual y automática de vértices y aristas (por cadenas, racimos, componentes, árboles, etc.); capacidad de edición

que maneja, a las posibilidades de agrupación y a la libertad de edición; aparte de la conveniencia de su carácter de software libre.

Tabla 1. Puntuación ponderada (en base a 5) de algunos editores de grafos según su eficiencia al resolver problemas de cómputo mediante el Método de los Grafos Dicromáticos

| Software | Indicadores evaluativos | | | | | | | | | | | | | Puntuación ponderada | |
|---|-----------------------------|---------|--------------|----------------|--------------------|-------------------|------------|--------------|---------|-----------------------|--------------|----------|----------|----------------------|---------------|
| | Ordenamiento | Rapidez | Localización | Trazar caminos | Identificar ciclos | Identificar islas | Agrupación | Programación | Edición | Complejidad del grafo | Pareo máximo | Análisis | Vínculos | | Visualización |
| | coeficientes de ponderación | | | | | | | | | | | | | | |
| | 0,0847 | 0,0339 | 0,0847 | 0,0847 | 0,0847 | 0,0847 | 0,0678 | 0,0339 | 0,0847 | 0,0847 | 0,0847 | 0,0339 | 0,0847 | | 0,0678 |
| Puntuación en base a 5 por cada indicador | | | | | | | | | | | | | | | |
| uGraph | 4 | 4 | 5 | 5 | 2 | 5 | 2 | 3 | 5 | 3 | 2 | 3 | 3 | 4 | 3,63 |
| Grafos | 4 | 3 | 3 | 4 | 2 | 5 | 2 | 2 | 4 | 3 | 2 | 5 | 5 | 4 | 3,46 |
| Grin 40 | 2 | 3 | 2 | 3 | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 5 | 3 | 3 | 2,54 |
| GIDEN | 2 | 3 | 2 | 3 | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 5 | 3 | 3 | 2,54 |
| Graph Magic | 3 | 4 | 5 | 3 | 2 | 2 | 2 | 3 | 2 | 3 | 2 | 5 | 3 | 3 | 2,86 |
| Algraf | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 2 | 3 | 2 | 3 | 5 | 5 | 4 | 3 | 3,08 |
| yEd | 5 | 5 | 5 | 5 | 3 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 2 | 4 | 5 | 5 | 4,54 |
| GTE | 4 | 4 | 5 | 3 | 3 | 4 | 5 | 3 | 4 | 4 | 2 | 4 | 3 | 4 | 3,69 |
| CmapTools | 3 | 3 | 5 | 4 | 2 | 2 | 3 | 3 | 4 | 4 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3,17 |
| Graphviz | 4 | 4 | 4 | 3 | 2 | 3 | 4 | 5 | 4 | 5 | 2 | 4 | 2 | 3 | 3,37 |
| Visual Paradigm | 5 | 5 | 5 | 5 | 3 | 5 | 4 | 5 | 4 | 4 | 2 | 4 | 5 | 5 | 4,31 |
| Edraw Max | 3 | 4 | 4 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 5 | 2 | 2 | 3 | 5 | 4 | 3,10 |
| Microsoft Visio | 3 | 4 | 2 | 2 | 2 | 4 | 3 | 3 | 5 | 2 | 2 | 2 | 5 | 4 | 3,07 |

Los programas analizados no son los únicos disponibles, pero sí constituyen una buena representación de herramientas útiles en la asistencia al MGD cuando se aplica a problemas de ingeniería, incluyendo la formación de nuevos ingenieros y especialistas.

En su tesis doctoral el autor usa el editor *yEd* para el trazado y manipulación de los grandes grafos obtenidos al realizar sistemáticamente el diseño paramétrico basado en modelos matemáticos, en este caso orgánicamente vinculado al MGD [28, 29, 30]. De la Figura 2 a la Figura 4 se refleja una comparación respecto a las características de los grafos manipulados en varios de los trabajos citados [19, 20, 22, 23, 24, 18, 30, 21]. A modo de indicador de complejidad, en la Figura 2 y la Figura 3, aparecen los números de vértices de los respectivos grafos de los MM y de los algoritmos; destacándose en este sentido los trabajos [20] y [30], aunque realmente el modelo (no el grafo) más grande y complejo es el de Alemán [22]. Por otro lado (Figura 4), los problemas de optimización más complicados son los de Morejón [19], Llamas [20] y el autor [30], subrayándose este último por sus 14 grados de libertad y cuatro criterios diferentes. Nótese como la ingeniería de la más sencilla máquina de un sistema [28, 30] pudo ser representada y manipulada con un

grafo único de 292 vértices; a diferencia de [19, 20, 22, 21], donde se descomponen los MM en cantidades mayores de submodelos Figura 5.

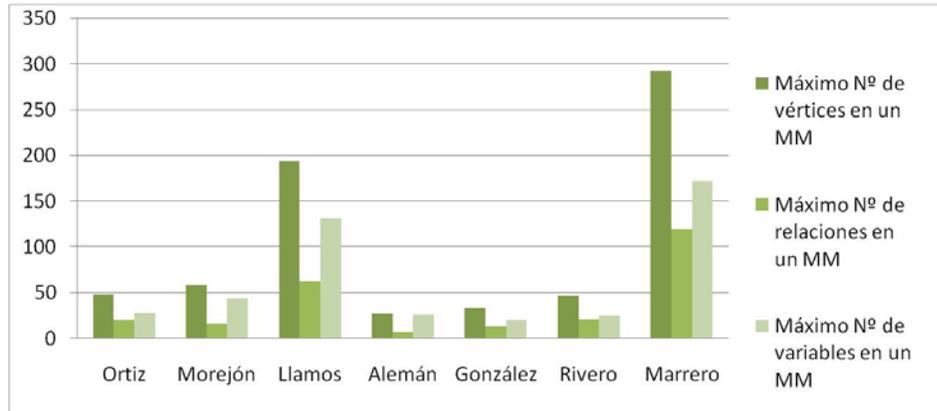


Figura 2. Números de vértices de los grafos manipulados en los MM de algunas aplicaciones del MGD

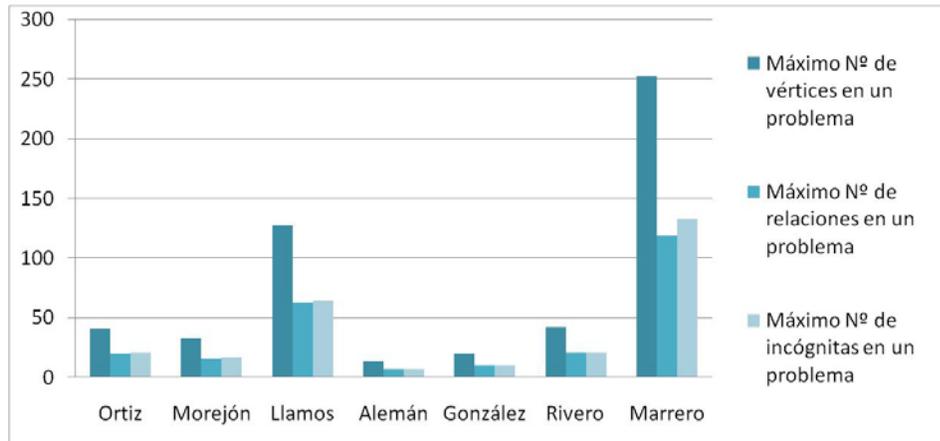


Figura 3. Números de vértices de los grafos manipulados en los algoritmos de algunas aplicaciones del MGD

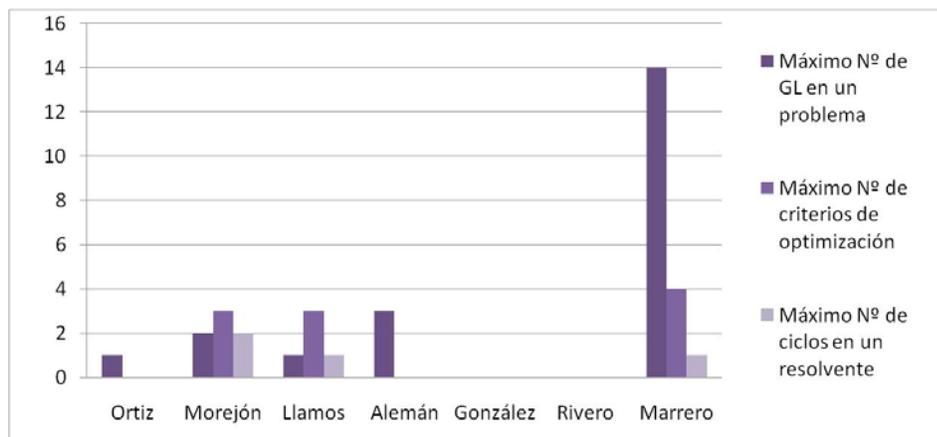


Figura 4. Otros indicadores de complejidad de los grafos manipulados en los algoritmos de algunas aplicaciones del MGD

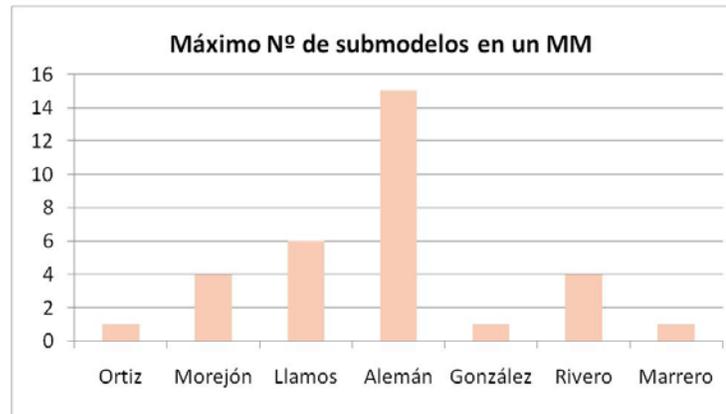


Figura 5. Números de submodelos en que fueron divididos para su tratamiento los MM de algunas aplicaciones del MGD]

Conclusiones y recomendaciones

1. A partir del estudio teórico del MGD, de su aplicación sistemática, y del análisis de un grupo de aplicaciones del mismo, se elaboró diagrama (mostrado en la Figura 1) que sirve de guía para el uso de esta herramienta por parte de científicos e ingenieros.
2. En la inmensa mayoría de las aplicaciones publicadas del MGD se detectan limitaciones en su alcance, dadas fundamentalmente por el escaso manejo de software para el trazado y la edición de los sucesivos grafos durante el proceso de RPC.
3. En la actualidad se encuentra disponible una gama de *editores de grafos* capaces de ampliar considerablemente la utilidad y las posibilidades de aplicación del MGD, principalmente al trabajar con grandes MM. Con base en el estudio, análisis y evaluación de un grupo importante de ellos, se recomienda utilizar *yEd* como software de apoyo al MGD.
4. De todo lo planteado se desprende la necesidad de trabajar en los procedimientos de uso del EG y en la automatización futura del proceso de RPC de una manera interactiva, de modo que quienes aplican el MGD participen conscientemente y se concentren en el proceso de obtención de algoritmos, sin desviar su atención hacia las dificultades con el trazado, la visualización y la manipulación de los grafos

Referencias.

1. Martínez Escanaverino, J., García Toll, A. y Ortiz Cárdenas, T. Algorítmica del diseño mecánico. *Revista de Ingeniería Mecánica. 10 años de publicaciones científicas*, [Libro electrónico en CD-ROM]. La Habana: Editorial Cujae, Disponible en: <http://www.cujae.edu.cu/facultades/mecanica/postgrado/maestria/revista/cdrevista.zip>. ISBN 978-959-261-305-8.
2. Martínez Escanaverino, J. "Dichromatic Graphs: A Tool for the Algorithmic Education of Mechanical Engineers". En: *ASME Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering*. Baltimore, Maryland, USA, September 10-13, 2000. Paper DETC2000/CIE-14594, ISBN 0-7918-3506-5.
3. Martínez Escanaverino, J., Llamos Soriz, J., García Toll, A. et al. "Rational design automation by dichromatic graphs". En: *Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering, DETC'01. 2001*, Pittsburgh, Pennsylvania: ASME. 2001. Paper DETC2001/DAC-21050, ISBN 0-7918-3506-5.
4. Martínez Escanaverino, J., Llamos Soriz, J., García Toll, A. et al. "Control, design and error variables in decomposition of design optimization problems". En: *ASME Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering, DETC 2002*. Montreal, Quebec, Canada: ASME. September 29-October 2, 2002. Paper DETC2002/ DAC- 34085, ISBN 0-7918-3603-7.
5. Martínez Escanaverino, J. y Martínez Fonte, L. "A problem solving rationale for conceptual design in engineering". En: *CAID & CD Conference*. Netherlands, 2005.

6. Serrano, D. "Constraint Management in Conceptual Design". Director: Gossard David, C. PhD thesis. Massachusetts Institute of Technology. Massachusetts, USA. 1989.
Disponibile en: <http://hdl.handle.net/1721.1/14689>
7. Richetin, M. *Structural Analysis: Graph Representation*. Manchester: Pergamon Press plc, 1992. p. 462-467. Université de Clermont II, Aubière, France. ISBN 0-08-036201-X.
8. Oung, J. "Design and Implementation of an Object-oriented Geométric Constrain Solver". Director: Meera, Sitharam. Master's thesis. Universidad de Florida. USA. 2001.
9. Elmqvist, H., Mattsson, S. E. y Otter M. "Modelica-A language for physical system modeling, visualization and interaction". En: *IEEE Symposium on Computer-Aided Control System Design*. Hawaii, USA. 1999, p. 630-639. Disponible en: <http://www.laas.fr/cacsd/cacsd99/technicalprogram.pdf> . ISBN 0-7803-5500-8.
10. Mattsson, S. E. y Elmqvist, H. "Modelica-An international effort to design the next generation modeling language". En: *7th IFAC Symposium on Computer Aided Control Systems Design, CACSD'97*. Gent, Belgium. 1997, ISBN 1090-9389.
11. Fritzon, P. y Engelson, V. "Modelica-A Unified Object-Oriented Language for System Modelling and Simulation". En: *12th European Conference on Object-Oriented Programming*. Springel, 1998. p. 67-90. ISBN 3-540-64737-6.
12. Bunus, P. y Fritzon, P. "Automated Static Analysis of Equation-Based Components". *Simulation, Simulation Councils Inc.*, July-August 2004, vol. 80, p. 7-8,
Disponibile en:
<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.125.2342&rep=rep1&type=pdf> .
ISSN: 1741-3133.
13. Bunus, P. "A Simulation and Decision Framework for Selection of Numerical Solvers in Scientific Computing". En: *Simulation Symposium. 39th Annual Huntsville*, 2006. Alabama: IEEE. Disponible en: <http://portal.acm.org/citation.cfm?id=1216681> . ISSN 1080-241X.
14. Pop, A. "Integrated Model-Driven Development Environments for Equation-Based Object-Oriented Languages". Thesis No. 1183. Linköping University, 2008. ISBN 0345-7524.
15. Ratfält, L. "A comparative study of two structural methods for fault isolability analysis". Supervisor: Frisk, E., Krysander, M. Master's thesis. Linköping University, ISRN: LITH-ISY-EX-3462-2004.
16. Bunus, P., Isaksson, O. y Frey, B. "Model-Based Diagnostics Techniques For Avionics Applications with RODON". En: *2nd Workshop on Aviation System Technology*, 2009, Hamburg, Germany.
Disponibile en:
<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.159.3003&rep=rep1&type=pdf> ISBN 978-3-8322-8071-0.
17. Rivero LLerena, G. "Descifrado geométrico de transmisiones de engranaje por tornillo sinfín cilíndrico". *Revista de Ingeniería Mecánica. 10 años de publicaciones científicas*, [Libro electrónico en CD-ROM] La Habana: Editorial Cujae, 2010 [Consultado el: diciembre de 2010]
Disponibile en: <http://www.cujae.edu.cu/facultades/mecanica/postgrado/maestria/revista/cdrevista.zip> . ISBN 978-959-261-305-8
18. Ortiz Cárdenas, T. y García Toll, A. "El enfoque algorítmico en el diseño de muelles helicoidales a través de los grafos dicromáticos". *Revista de Ingeniería Mecánica. 10 años de publicaciones científicas*, [Libro electrónico en CD-ROM] La Habana: Editorial Cujae, 2010. [Consultado el: diciembre de 2010]
Disponibile en: <http://www.cujae.edu.cu/facultades/mecanica/postgrado/maestria/revista/cdrevista.zip> . ISBN 978-959-261-305-8
19. Morejón Vizcaino, G. "Primera etapa del proceso de desarrollo de un hidromotor de alto par: conceptualización y prototipo analítico". Tutor: Arzola Ruíz, J. Tesis Doctoral, Departamento de Mecánica Aplicada, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría. La Habana, 2004.
Disponibile en: <http://biblioteca.cujae.edu.cu/Tesis/Doctorado%5CTesis53.pdf>
20. Llamas Soriz, J. A. "Diseño óptimo de cajas reductoras". Tutor: Martínez Escanaverino, J. Tesis Doctoral. Departamento de Mecánica Aplicada, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría. La Habana, 2000. Disponible en: <http://biblioteca.cujae.edu.cu/Tesis/Doctorado%5CTesis8.pdf>.

21. Rivero LLerena, G. "Determinación del factor de contacto entre flancos del engranaje por tornillo sinfín con perfil derivado de cono". Tutor: Martínez Delgado, L. Tesis Doctoral. Departamento de Mecánica Aplicada, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría. La Habana, 2002. Disponible en: <http://biblioteca.cujae.edu.cu/Tesis/Doctorado%5CTesis32.pdf> .
22. Alemán Romero, I. L. "Modelo Matemático y Algoritmos para la Aplicación 3D del Método de los Elementos de Contorno". Tutor: Otero Pereiro, L. Tesis Doctoral. Departamento de Matemática, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría. La Habana. 2003. Disponible en: <http://biblioteca.cujae.edu.cu/Tesis/Doctorado%5CTesis49.pdf> .
23. González Rey, G. "Establecimiento del cálculo del diámetro de cresta exterior de un engranaje cónico con técnicas de grafos". *Ingeniería Mecánica*, 2007. vol. 10, nº. 3, p. 33-39. Disponible en: http://www.cujae.edu.cu/ediciones/Revistas/Mecanica/Vol-10/3-2007/06-2007_03_33_39.pdf. ISSN 1815-5944.
24. González Rey, G., García Martín, R. J. y Frechilla Fernández, P. "Modelo matemático y procedimiento para la generación gráfica de los contornos de dientes de engranajes cilíndricos". *Ingeniería Mecánica*, 2006. vol. 9. nº. 1. Disponible en: http://www.cujae.edu.cu/ediciones/Revistas/Mecanica/Vol-9/1-2006/04_35-46_Modelo_matemát_y_procedGonzalo12.pdf ISSN 1815-5944.
25. Rodríguez Villalobos, A. "Grafos: herramienta informática para el aprendizaje y resolución de problemas reales de teoría de grafos". En: *X Congreso de Ingeniería de Organización*. 2006. ISBN 84-9705-544-7.
26. Rodríguez Villalobos, A. *Grafos-Software para la construcción, edición y análisis de grafos*. Madrid: Bubok Publishing, 2010. ISBN 84-9981-116-1.
27. Rosete Suárez, A. "Una solución flexible y eficiente para el trazado de grafos basada en el escalador de colinas estocástico". Tutores: Ochoa Rodríguez, A., Sebag, M. y Hernández Guerra, A. Tesis de Doctorado. Facultad de Ingeniería Industrial, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría. La Habana, 2000. Disponible en: <http://biblioteca.cujae.edu.cu/Tesis/Doctorado%5CTesis70.pdf> .
28. Marrero Osorio, S. A. "Diseño Paramétrico Basado en Modelos Matemáticos. Caso de Estudio: máquinas para la construcción sostenible de viviendas". Tutor: Martínez Escanaverino, J. Tesis de Doctorado. Departamento de Mecánica Aplicada, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría. La Habana, 2009. Disponible en: <http://biblioteca.cujae.edu.cu/Tesis/Doctorado/Tesis185.pdf> .
29. Marrero Osorio, S. A. y Martínez Escanaverino, J. "Estrategia para el diseño paramétrico basado en modelos". *Ingeniería Mecánica*, 2008. vol. 11, nº. 3, p. 39-46. Disponible en: http://www.cujae.edu.cu/ediciones/Revistas/Mecanica/Vol-11/3-2008/07_2008_03_39_46.pdf. ISSN 1815-5944.
30. Marrero Osorio, S. A. y Martínez Escanaverino, J. "Diseño paramétrico de pinzas de fricción". *Ingeniería Mecánica*, 2009. vol. 12, nº. 1, p. 37-48., Disponible en: http://www.cujae.edu.cu/ediciones/Revistas/Mecanica/Vol-12/1-09/05_2009_01_37_45.pdf . ISSN 1815-5944.

Sergio A. Marrero-Osorio

Departamento de Mecánica Aplicada.

Facultad de Ingeniería Mecánica. Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría". Cujae

Calle 114, # 11901, e/ Ciclovía y Rotonda. Marianao. La Habana. CP 19390. Cuba.

E-mail: smarrero@mecanica.cujae.edu.cu