

Aplicación de MATLAB® al diseño de mecanismos

A. de Juan, R. Sancibrián, S. Rodríguez, P. García

Dpto. de Ingeniería Estructural y Mecánica
sancibr@unican.es

A. Sedano

Dpto. de Mecatrónica e Ingeniería de Precisión, Tekniker

Resumen

En este artículo se presenta la aplicación informática DISMEC desarrollada en el entorno MATLAB® para el diseño cinemático de mecanismos. Esta aplicación es un complemento docente en la asignatura de Cinemática y Dinámica de Máquinas impartida en el plan de estudios de Ingeniero Industrial. El alumno puede seleccionar un mecanismo de la librería predefinida y definir la geometría y los parámetros de entrada del mismo. Después puede realizar tanto el análisis cinemático como la síntesis de generación de trayectorias de un punto del mismo. Los resultados se muestran de una forma gráfica y mediante animaciones se consigue simular el movimiento real que tendría el mecanismo.

Se pretenden conseguir de esta manera dos objetivos fundamentales: (i) que los alumnos que se inician en el estudio de la Cinemática de Mecanismos cuenten con una herramienta sencilla de utilizar para realizar sus primeras simulaciones numéricas y (ii) transmitir al alumnado de grado de forma eficiente y cercana el conocimiento generado por las investigaciones en síntesis cinemática del Grupo de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Cantabria.

INTRODUCCIÓN

Dentro del diseño mecánico, el análisis y la síntesis cinemática de mecanismos constituye una parte fundamental de las tareas del ingeniero industrial. Por esta razón siempre se ha dedicado a estas materias una parte importante en los planes de estudio de nuestras carreras dentro de la Teoría de Máquinas y Mecanismos (TMM). Los métodos para resolver estos problemas se agrupan desde el punto de vista clásico en tres grandes bloques: gráficos, analíticos y numéricos. Los dos primeros hoy en día están en desuso en la práctica debido, entre otras razones, a la falta de generalidad para aplicarlos a cualquier mecanismo aunque se siguen enseñando en nuestras universidades, ya que desde el punto de vista pedagógico siguen siendo útiles para la comprensión de los problemas.

Las técnicas numéricas de análisis cinemático (y dinámico) de mecanismos han evolucionado notablemente durante los últimos años y se han incorporado en aplicaciones informáticas comerciales. Algunos ejemplos entre un número elevado de estas herramientas son MSC.ADAMS [1], Working Model [2], LMS Virtual Lab Motion [3]. Estas herramientas permiten al diseñador abordar el estudio cinemático y dinámico de cualquier mecanismo, ya sea de cadena plana o espacial. Son herramientas muy potentes que permiten al diseñador abordar problemas de una gran complejidad.

Por otro lado las técnicas de síntesis cinemática no han experimentado esta evolución, o al menos no lo han experimentado en la misma medida. Esto se demuestra por las pocas aplicaciones informáticas comerciales que pueden encontrarse con un módulo potente de síntesis cinemática. Ejemplo de estas aplicaciones son: WATT [4], LINCAGES [5], SAM [6], SYNTHETICA [7]. Estas herramientas resuelven problemas muy concretos y limitados de síntesis cinemática. Generalmente tratan el problema de síntesis de generación de trayectorias y guiado de sólido rígido. Otra limitación importante es que los mecanismos que pueden abordar no son generales, es decir tienen una librería de mecanismos planos (p. ej. biela-manivela, cuadrilátero articulado, cadenas cinemáticas de Watt y Stephenson, etc.).

En muchas de las asignaturas de los planes de estudio de Ingeniero Industrial impartidas en España o en universidades extranjeras los métodos numéricos de análisis cinemático y dinámico han ocupado el espacio que se merecen a la vez que estas técnicas han ido evolucionando. Sin embargo, los métodos numéricos de síntesis cinemática no se han implantado en la misma medida, siendo habitual en los programas de las asignaturas encontrar los temas de síntesis cinemática dedicados casi exclusivamente a los métodos gráficos y analíticos. Estos métodos analíticos, aunque importantes, tienen muchas limitaciones en el diseño práctico de mecanismos, y estas limitaciones son fácilmente evitables por los métodos numéricos.

Actualmente, los métodos numéricos aplicados a la síntesis dimensional se basan en métodos de optimización (síntesis óptima). En la actualidad estos métodos se dividen en dos grandes campos: métodos de optimización local y métodos de optimización global [8]. Los métodos de optimización local exploran el campo de trabajo de las variables de diseño en una zona próxima a un punto de partida. Por tanto el mínimo encontrado suele ser el mínimo más cercano a dicho punto. Los métodos de optimización global exploran ampliamente el campo de trabajo de las variables de diseño tratando de encontrar el mínimo global. Realmente no existe ninguna forma de garantizar que un mínimo es un mínimo global por lo que estrictamente muchos autores cuestionan el termino global para referirse a estos métodos. Dentro de los métodos locales las técnicas más empleadas en síntesis óptima de mecanismos son los métodos que soportan restricciones como el método del Gradiente Reducido Generalizado (GRG) [9] o los métodos de Programación Cuadrática Secuencial (SQP) [10]. En la optimización global se utiliza actualmente los métodos de Algoritmos Genéticos (GA) [11] o la técnica denominada *Simulated Annealing* (SA) [12].

En este artículo se presenta una aplicación informática denominada DISMEC (DISEño de MECanismos). Esta aplicación informática ha sido desarrollada por los autores en el entorno MATLAB[®]. De esta manera, se pretende que los estudiantes de 2º curso de Ingeniero Industrial del plan de estudios antiguo, y los alumnos de 3º curso de los nuevos planes de estudio dentro de EEES cuenten con una herramienta de fácil manejo, que les permita resolver problemas de análisis y síntesis dimensional cinemática en su primer contacto con el estudio de la Teoría de Máquinas y Mecanismos.

La principal motivación que ha llevado a los autores a desarrollar la aplicación es conseguir relacionar de una forma sencilla las explicaciones teóricas presentadas en clase con la aplicación práctica en el manejo de la aplicación informática. Para ello se ha desarrollado esta herramienta para que su manejo sea sencillo e intuitivo. Desde el punto de vista docente permite que el alumno que acaba de aprender los conceptos teóricos en clase, se centre principalmente en la resolución del problema de análisis y síntesis. De esta forma no es necesario que el alumno tenga que aprender a manejar un programa comercial. Debe quedar claro que no se trata de evitar el uso de las herramientas comerciales a nivel docente, pero en ciertos aspectos como es la síntesis el proceso de aprendizaje se consigue de una forma más directa con una herramienta desarrollada con tal objetivo.

El desarrollo de software propio para la simulación de sistemas multicuerpo es una práctica relativamente habitual en otras universidades tanto españolas como del resto del mundo. Por ejemplo en la Universidad de Málaga, el Área de Ingeniería Mecánica ha desarrollado el programa de simulación de mecanismos WinMecC [13], que realiza el análisis cinemático y dinámico de mecanismos planos con cualquier número de eslabones. En la Université Catholique de Louvain, en Bélgica, el CEREM [14] ha desarrollado el software de modelado y análisis de sistemas multicuerpo Robotran [15]. En las Universidades Carlos III y de Castilla La Mancha, se han desarrollado diversas aplicaciones, más próximas al estilo de DISMEC, para el cálculo de prestaciones de un automóvil [16], para el análisis de sistemas dinámicos [17] y para el análisis de sistemas vibratorios y diseño de levas [18] respectivamente.

Los objetivos fundamentales que se persiguen con el desarrollo de esta herramienta es que el alumno adquiera durante su aprendizaje las competencias siguientes:

- Comprender el proceso de diseño de mecanismos y la importancia del análisis y la síntesis así como su interrelación.
- Identificación de los problemas en el diseño de mecanismos y su resolución.
- Comprender la relación entre los métodos teóricos y las aplicaciones prácticas.

La herramienta DISMEC ha sido desarrollada por alumnos de la titulación de Ingeniero Industrial en sus Trabajos Fin de Carrera. En estos trabajos los alumnos han relacionado diferentes materias de estudio dentro de la carrera como son: Cinemática y Dinámica de Máquinas, Métodos Numéricos y manejo de herramientas informáticas. Por tanto los estudiantes no sólo son usuarios de la herramienta sino que tienen la posibilidad de participar activamente en su diseño.

DESCRIPCIÓN DE LA HERRAMIENTA

En la Figura 1 representa un diagrama de flujo del proceso de diseño cinemático de un mecanismo de una máquina. Como se observa en dicha figura el proceso comienza con la definición de las especificaciones de diseño, a continuación se realiza una síntesis estructural donde se definen los pares y elementos que forman el mecanismo. Una vez definidos los elementos y pares cinemáticos se realiza la síntesis dimensional para obtener las dimensiones geométricas de todos los elementos. Finalmente se realiza el análisis cinemático para comprobar que se cumplen con todas las especificaciones de diseño. Es precisamente en estos dos últimos puntos donde se centra la aplicación informática DISMEC.

La aplicación DISMEC esta formada por dos módulos fundamentales: módulo de análisis y módulo de síntesis. La aplicación está diseñada para que todas las opciones estén disponibles en una única ventana. En esta ventana existirán paneles ocultos inicialmente y que se irán descubriendo a medida que el alumno realice la introducción de datos o avance en los análisis.

Dentro del módulo de análisis la aplicación DISMEC resuelve el problema de posición inicial, posiciones sucesivas, velocidades y aceleraciones. El procedimiento de análisis se basa en el planteamiento de las ecuaciones de restricción. Para ello se define el vector de coordenadas generalizadas \mathbf{q} . Para el análisis de posición inicial y posiciones sucesivas se resuelve el sistema de ecuaciones de restricción planteadas como:

$$\mathbf{C} = \mathbf{0} \quad (1)$$

El análisis de velocidad se obtiene de la resolución de la ecuación:

$$\dot{\mathbf{q}} = -\mathbf{C}_q^{-1}\mathbf{C}_t \quad (2)$$

donde la matriz \mathbf{C}_q representa la derivada de las ecuaciones de restricción respecto de las coordenadas generalizada y la matriz \mathbf{C}_t representa la derivada de las mismas ecuaciones respecto del tiempo. Del mismo modo el análisis de aceleraciones emplea la expresión:

$$\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{C}_q^{-1}\mathbf{Q}_d \quad (3)$$

donde,

$$\mathbf{Q}_d = -(\mathbf{C}_q\dot{\mathbf{q}})_q - 2\mathbf{C}_{qt}\dot{\mathbf{q}} - \mathbf{C}_{tt} \quad (4)$$

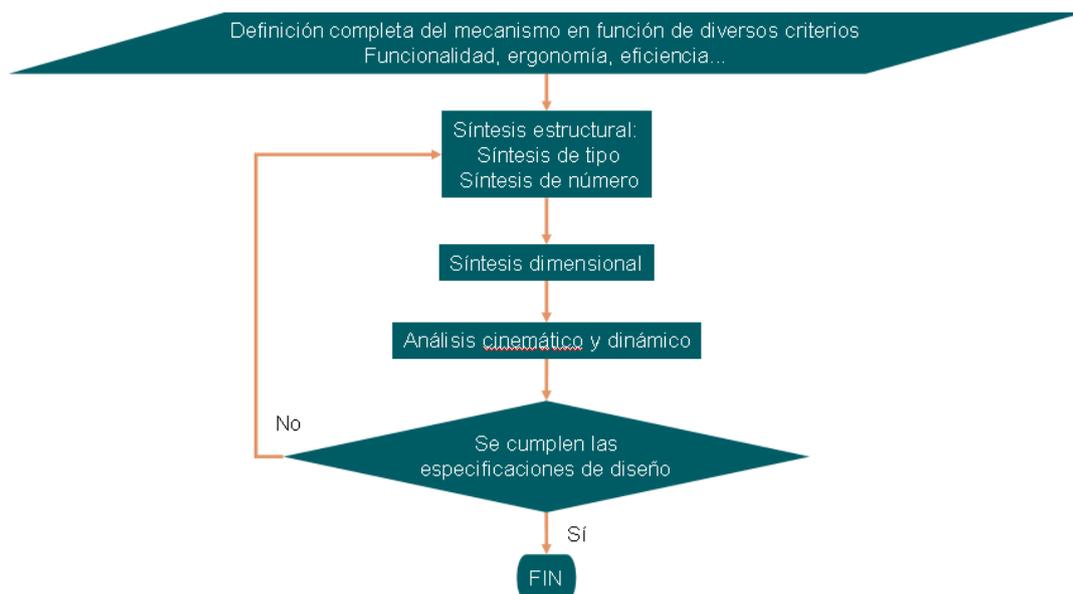


Fig. 1. Diagrama de flujo del proceso de diseño cinemático de un mecanismo

El módulo de síntesis se basa en optimización local y utiliza la técnica de optimización GRG. El algoritmo de optimización local ha sido desarrollado por los autores que cuenta con varias publicaciones dentro de este campo

[19-21]. De esta manera, también se pretende acercar los resultados de la investigación llevada a cabo dentro del grupo a los alumnos de una forma sencilla.

Como se trata de un método de optimización local es necesario definir un mecanismo inicial que debe ser propuesto por el usuario. A partir del mecanismo inicial se evoluciona hacia la convergencia mediante la siguiente expresión recursiva:

$$\mathbf{z}_{i+1} = \mathbf{z}_i + \alpha_i \Delta \mathbf{z}_i \quad (5)$$

donde i representa la i -ésima iteración, \mathbf{z} representa el vector de variables de diseño y α es el tamaño del paso. El incremento de las variables de diseño viene dado por la siguiente expresión:

$$\Delta \mathbf{z} = -[\mathbf{J}^T \mathbf{J}]^{-1} \mathbf{J} \boldsymbol{\varepsilon}_0 \quad (6)$$

donde \mathbf{J} es la matriz jacobiano obtenido de las ecuaciones de restricción y $\boldsymbol{\varepsilon}_0$ es el error de síntesis.

Una vez el usuario entra en la aplicación DISMEC, en primer lugar se muestra únicamente los paneles “Tipo de mecanismo” y “Opciones Principales” (ver Figura 2), en donde se puede escoger las diferentes cadenas cinemáticas que definen el mecanismo. Estas son las siguientes: Cuadrilátero articulado, Stephenson I, Stephenson II, Stephenson III y Watt I. También la aplicación permite cargar algún mecanismo previamente simulado.

Una vez realizada la selección del mecanismo se libera el panel “Definición del mecanismo” tal y como se muestra en la Figura 2, en donde se muestra una figura genérica del mismo. Esta figura define las variables de diseño y las coordenadas generalizadas empleadas por la aplicación. La definición del mecanismo se hace a través de sus coordenadas cartesianas. Se pueden introducir las coordenadas tanto numérica como gráficamente. Existe la posibilidad de cambiar la escala de los ejes para ajustar la ventana a distintos tamaños

A continuación se activa el panel de opciones “cinemática” como se muestra en la Figura 2, en donde se define el movimiento del elemento de entrada mediante el número de posiciones a calcular, el ángulo barrido a partir de la posición inicial y la velocidad angular del mismo. Se puede elegir entre realizar el análisis de velocidades o de aceleraciones.

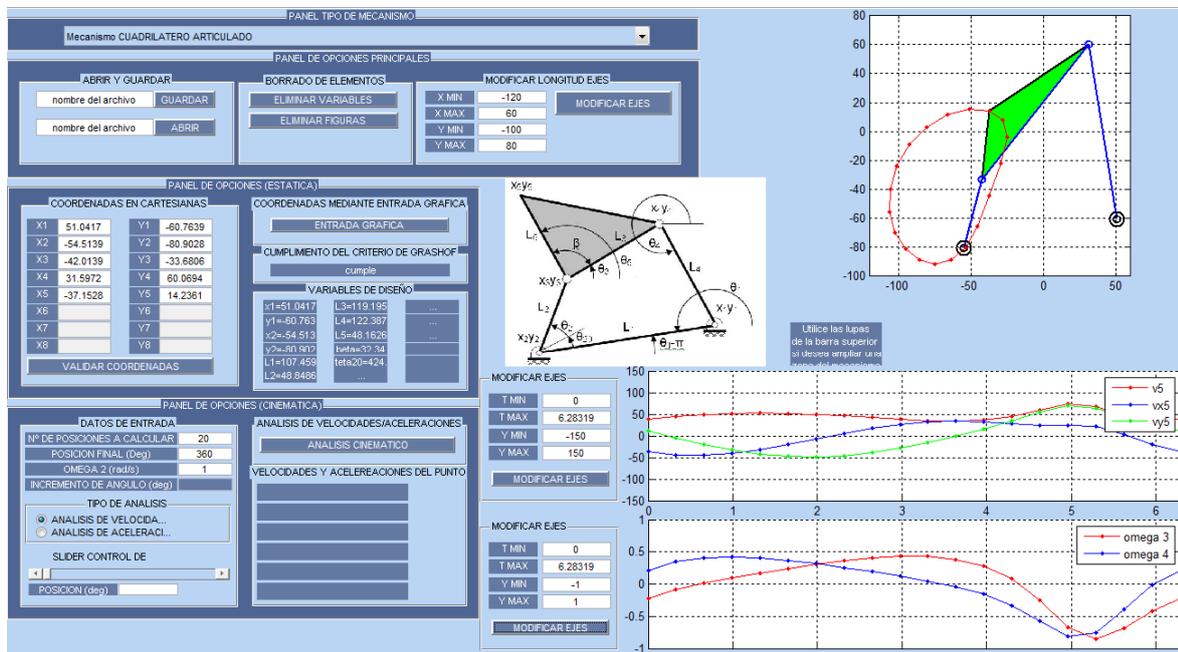


Fig. 2. Módulo de análisis de la aplicación informática DISMEC

Cuando se activa el botón “Análisis cinemático”, comienza la simulación y puede observarse el movimiento del mecanismo y la trayectoria descrita por el punto analizado. En el cuadrante inferior izquierdo de la Figura 2 aparecen las gráficas de velocidad o aceleración de un punto de estudio del mecanismo (módulo y componentes

horizontal y vertical) y las velocidades angulares de los elementos móviles, salvo el de entrada, todo ello en función del tiempo. Al finalizar la simulación es posible volver a alguna posición específica gracias a la barra de desplazamiento del panel de opciones “cinemática”, situado en la parte inferior izquierda de la pantalla (Figura 2), o bien introducir la posición angular de la barra de entrada manualmente.

En la Figura 3 se muestra el módulo de síntesis de la aplicación. Este módulo se activa pulsando el botón “Síntesis”, situado en la parte inferior izquierda de la pantalla (Figura 3). En esta versión de la aplicación únicamente está disponible la síntesis de generación de trayectorias, pero se espera ampliar a síntesis de generación de funciones y guiado de sólido rígido en futuras versiones.

Al activar el módulo de síntesis el primer paso requerido es introducir la trayectoria deseada. Esta trayectoria se puede definir mediante la introducción numérica de las coordenadas de los puntos de precisión o mediante introducción gráfica. La introducción gráfica puede ser mediante la definición de los puntos de precisión o utilizando la opción *spline*. La trayectoria puede guardarse en el disco duro y recuperarse posteriormente para su utilización en otros problemas.

Una vez definida la trayectoria el proceso de optimización se inicia pulsando la opción “Síntesis para la trayectoria”. En cuanto al tamaño del paso la aplicación informática permite su definición del mismo por el usuario. A medida que avanza el proceso de síntesis, se van mostrando gráfica y numéricamente en tiempo real el valor de las variables de diseño que definen los elementos del mecanismo en la iteración actual. El proceso de síntesis se detiene cuando se alcanza un mínimo local según un criterio de parada establecido por los autores.

El módulo de síntesis cinemática es la parte más innovadora de la aplicación informática, ya que como se ha mencionado anteriormente muy pocas aplicaciones lo incluyen actualmente. Otra ventaja adicional es que la aplicación permite salvar los resultados de las distintas simulaciones para que los alumnos puedan comparar posteriormente los resultados obtenidos bajo distintas condiciones o diferentes mecanismos iniciales, y de esta manera elaborar un resumen o memoria de sus trabajos de forma fácil.

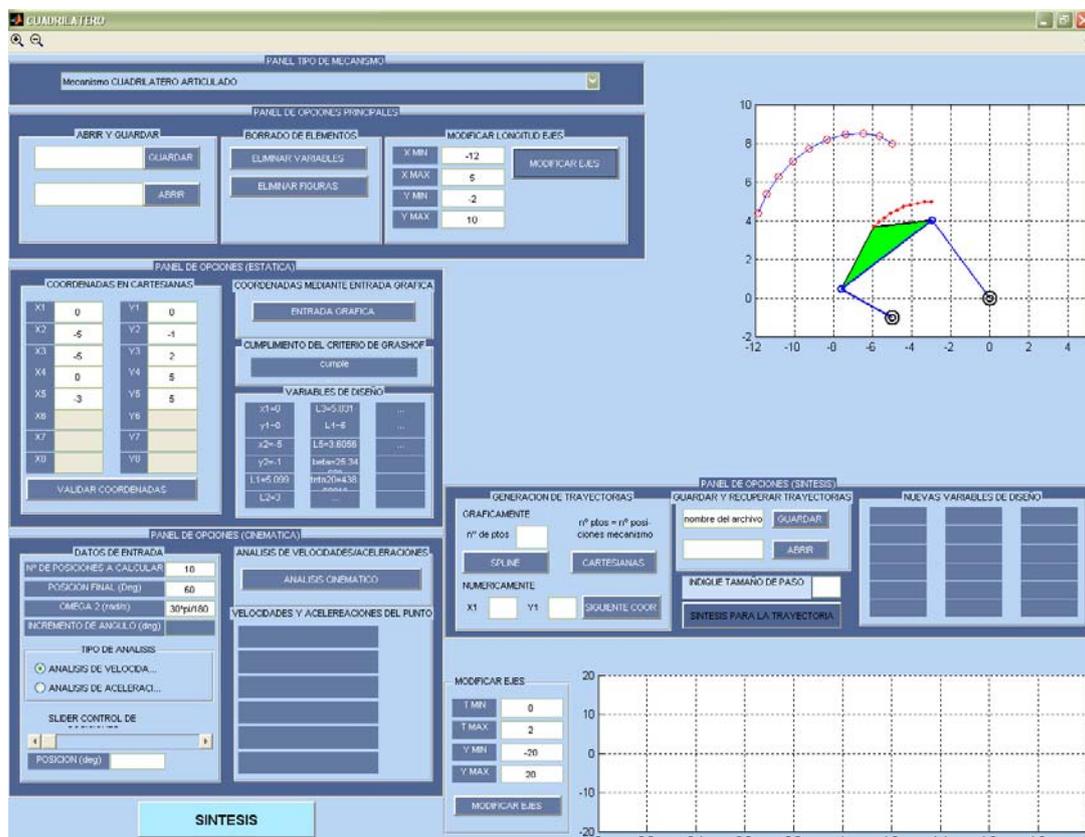


Fig. 3. Módulo de síntesis de la aplicación informática DISMEC

EJEMPLOS

En este apartado se muestra un ejemplo de aplicación de la herramienta DISMEC. A partir de este ejemplo se desarrolla una práctica de laboratorio computacional de la asignatura. El mecanismo planteado es un Stephenson I, tal y como se muestra en la Fig. (4). Se ha definido mediante coordenadas naturales introducidas directamente. Los valores de estas coordenadas se exponen en la Tabla (1).

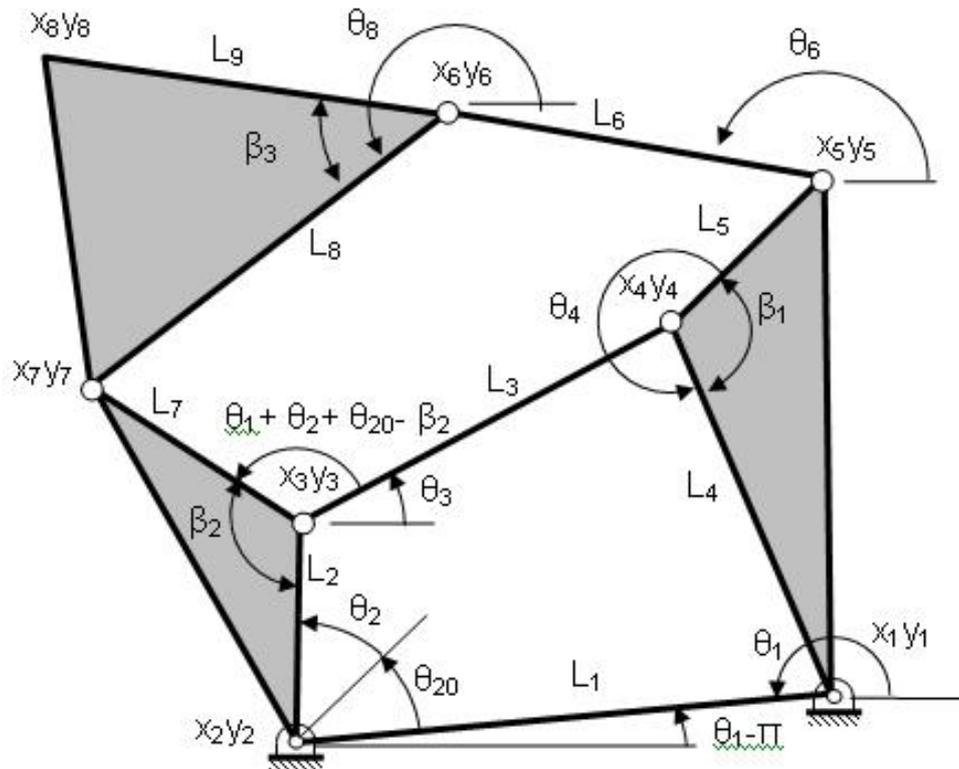


Fig. 4. Definición del mecanismo Stephenson I.

Una vez definido el mecanismo, se procede a realizar un análisis cinemático del mismo. En esta parte, los alumnos deben definir el movimiento del elemento de entrada, así como el ángulo de giro y el número de posiciones que se desea estudiar. De esta manera, se realizarán los análisis de velocidades y aceleraciones, obteniendo para cada una de las posiciones definidas los valores de velocidades y aceleraciones angulares de todos los elementos del mecanismo, así como las velocidades y aceleraciones del punto 8 de la Fig. (4).

Tabla 1. Coordenadas naturales del mecanismo Stephenson I.

	x	y
Punto 1	80	-70
Punto 2	-50	-80
Punto 3	-50	-50
Punto 4	50	-20
Punto 5	80	40
Punto 6	1	60
Punto 7	-80	-40
Punto 8	-70	40

Después de realizar el análisis, se procede a realizar la síntesis de generación de trayectorias. El punto trazador es el 8 de la Fig. (4). Se da al alumno una curva objetivo que deberán cargar en su programa, y se pide realizar la síntesis óptima para encontrar las dimensiones del mecanismo que mejor se adapte a la curva deseada. Deberán realizar al menos dos simulaciones variando distintos parámetros, como el mecanismo inicial o el tamaño de paso del algoritmo de optimización. La Tabla (2) muestra las dimensiones y orientaciones iniciales y óptimas del ejemplo que aquí se presenta.

Tabla 2. Valores iniciales y óptimos de las variables de diseño del mecanismo Stephenson I.

	Inicial	Óptimo
x_1	80	80.27
y_1	-70	-70
L_1	130.4	131.13
L_2	30	32.28
L_3	104.4	103.5
L_4	58.3	56.86
L_5	67.1	67.6
L_6	81.5	81.4
L_7	31.6	32.11
L_8	128.7	128.54
L_9	73.8	73.97
θ_1	184.4°	-152.81°
θ_{20}	85.6°	481.8°
β_1	122.5°	81.5°
β_2	108.4°	164.75°
β_3	35.3°	140.9°

En la Fig. (5)-a se representa el mecanismo inicial, así como la trayectoria inicial en rojo y la trayectoria deseada en azul. En la la Fig. (5)-b se representa el mecanismo óptimo generado, la trayectoria deseada en azul y la trayectoria generada por el mecanismo óptimo en verde.

Como se puede observar, los resultados obtenidos después del proceso de síntesis son satisfactorios.

CONCLUSIONES Y FUTURAS MEJORAS

En este trabajo ha descrito la aplicación DISMEC para uso docente sobre análisis y síntesis cinemática de mecanismos planos desmodrómicos, que ha sido íntegramente desarrollada en el entorno MATLAB®.

Se ha cumplido el objetivo principal de DISMEC, ya que con el uso de discha herramienta, los alumnos pueden abordar problemas de análisis y síntesis cinemática de una forma sencilla e integrada y sin tener que aprender a manejar los programas de sistemas multicuerpo comerciales.

Solamente unos pocos de los numerosos programas comerciales para el análisis de sistemas multicuerpo que existen, abordan problemas de síntesis cinemática. El método de síntesis óptima que DISMEC utiliza ha sido desarrollado por el Área de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Cantabria, lo cual proporciona una herramienta de transmisión del conocimiento generado en las tareas de investigación a los alumnos de ingeniería.

Dados los excelentes resultados docentes, se espera añadir más mecanismos a la librería de DISMEC, así como poder resolver problemas de síntesis de generación de funciones y de guiado de sólido rígido. Además, se espera también incorporar mejoras al método de optimización, que se han estado desarrollando últimamente.

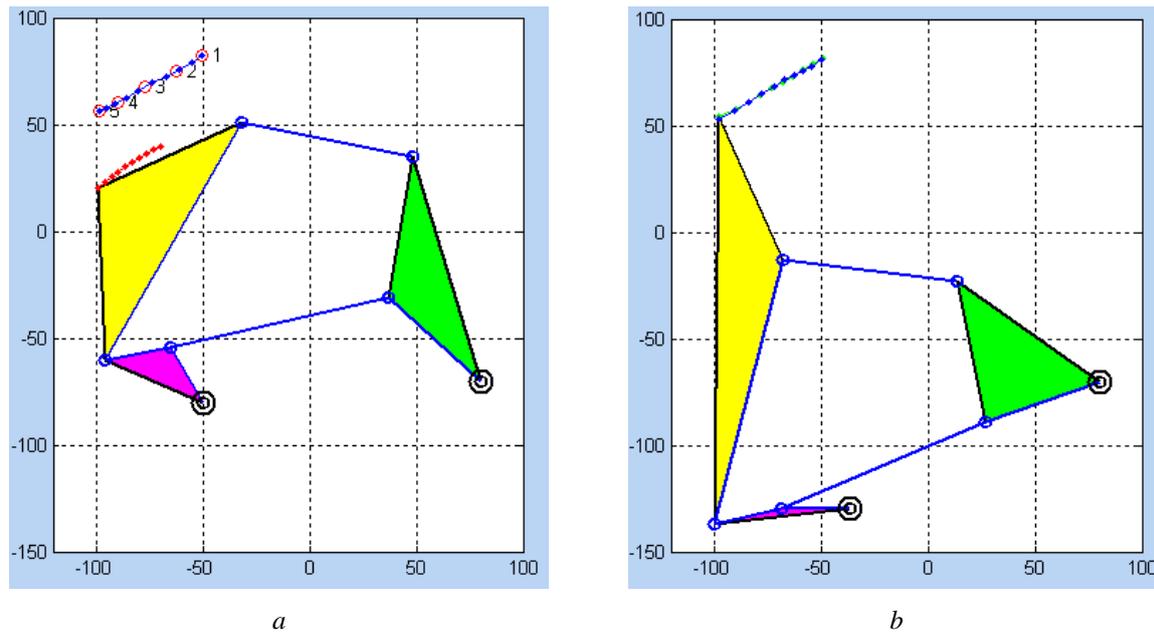


Fig. 5. Síntesis de generación de trayectorias del mecanismo Stephenson I.

REFERENCIAS

- [1] <http://www.mscsoftware.com/Products/CAE-Tools/Adams.aspx>
- [2] <http://www.design-simulation.com/WM2D/index.php>
- [3] <http://www.lmsintl.com/simulation/virtuallab/motion>
- [4] <http://www.heron-technologies.com/watt/>
- [5] <http://www.me.umn.edu/labs/lincages/>
- [6] http://www.artas.nl/Xsam_us.htm
- [7] <http://www.umbc.edu/engineering/me/vrml/research/software/synthetical/>
- [8] A. Smali, N. Diab, *Optimum synthesis of hybrid-task mechanisms using ant-gradient search method*, Mechanism and Machine Theory, 42(1) (2007) 115-130.
- [9] J. Mariappan and S. Krishnamurty, *A Generalized Exact Gradient Method for Mechanism Synthesis*, Mechanism and Machine Theory 31 (4) (1996) 413-421.
- [10] R.J. Minnaar, D.A. Tortorelli, J.A. Snyman, *On nonassembly in the optimal dimensional synthesis of planar mechanisms*, Structural and Multidisciplinary Optimization 21 (2001) 345-354.
- [11] J.A. Cabrera, A. Simon, M. Prado, *Optimal synthesis of mechanisms with genetic algorithms*, Mechanism and Machine Theory, 37 (2002) 1165-1177
- [12] H-J. Su and J.M. McCarthy, *Synthesis of bistable compliant four-bar mechanisms using polynomial homotopy*, Journal of Mechanical Design 129 (2007) 1094-1098.
- [13] <http://immf.uma.es/departamento/winmecc/>
- [14] <http://comete.meca.ucl.ac.be/cerem/fr/index.php/Accueil>
- [15] <http://www.prm.ucl.ac.be/robotran/index.html>
- [16] J. A. Calvo, M. J. López, J. L. San Román, D. García-Pozuelo, *Aplicación de Simulink al cálculo de las prestaciones de un vehículo automóvil (PRESCAR)*, Anales de Ingeniería Mecánica Gijón, (2008).
- [17] J. A. Calvo, M. J. López, J. L. San Román, E. Olmeda, *Aplicación de Simulink al método de Bond Graph (BONDSYM)*, Anales de Ingeniería Mecánica Gijón, (2008).
- [18] F. Mata, J. García, F. Álvarez, *Desarrollo de herramientas informáticas de carácter didáctico en el ámbito de los PFC*, Anales de Ingeniería Mecánica, Gijón, (2008).
- [19] R. Sancibrian, P. Garcia, F. Viadero, A. Fernandez, A. De-Juan, *Kinematic design of double-wishbone suspension systems using a multiobjective optimisation approach*, Vehicle System Dynamics 48 (7) (2010) 793-813.
- [20] R. Sancibrian, P. Garcia, F. Viadero, A. Fernandez, *A general procedure based on exact gradient determination in dimensional synthesis of planar mechanisms*, Mech. Mach. Theory, 41 (2) (2006) 212.
- [21] R. Sancibrian, F. Viadero, P. Garcia, A. Fernandez, *Gradient-based optimization of path synthesis problems in planar mechanisms*, Mech. Mach. Theory, 39 (8) (2004) 839.