

SÍNTESIS DE GENERACIÓN DE TRAYECTORIA Y DE MOVIMIENTO PARA MÚLTIPLES POSICIONES EN MECANISMOS, UTILIZANDO ALGORITMOS GENÉTICOS

RESUMEN

En este trabajo se presenta un procedimiento para realizar la síntesis de un mecanismo que cumpla con las condiciones definidas (generación de trayectoria o de guiado de un cuerpo) para múltiples puntos de precisión. Para la generación de guiado de un cuerpo se extiende la aplicación tradicional, mecanismo de cuatro eslabones (4B), a mecanismos de seis eslabones. La metodología empleada para la obtención del mecanismo utiliza los procedimientos propios de los algoritmos genéticos.

PALABRAS CLAVES: Síntesis de mecanismos, algoritmos genéticos.

ABSTRACT

A method of synthesis for multiple point for path generation and body guide is presented in this paper. Procedures for body guidance synthesis of Four Bar (4B) Mechanisms are extended to six bar (6B) mechanisms. Genetic algorithms are applied into synthesis of mechanisms.

KEYWORDS: *Synthesis of mechanisms, Genetic Algorithm.*

1. INTRODUCCIÓN

Existen procedimientos gráficos y analíticos clásicos en la síntesis de mecanismos para tres o cuatro puntos de precisión [11]. Para los métodos gráficos, Hrones y Nelson [12] crearon un atlas para las curvas del acoplador de los mecanismos de cuatro barras con más de 10000 curvas. Nuevos métodos gráficos y analíticos han sido formulados en trabajos como Zhixing [5]. Estudios recientes han empleado métodos de optimización para la síntesis para múltiples puntos de precisión introduciendo técnicas modernas como la optimización no lineal (Vallejo[1], Luck [2], Watanake [3] y Krishnamurty [4] entre otros), algoritmos genéticos (Cabrera [6]), redes neuronales (Vasiliiu [15]), métodos de Monte Carlo (Kanas [17]) entre otras. Requerimientos de velocidades son resueltos por autores como Chang [16].

La mayor parte de estos trabajos están relacionados con la generación de trayectoria para mecanismo de cuatro eslabones. En el presente trabajo se propone un algoritmo que es válido tanto para resolver problemas de síntesis de trayectoria como de movimiento. Adicionalmente se realizó un estudio para otra configuración diferente a la de los mecanismos de cuatro eslabones. La clasificación del mecanismo basado en grupos de Assur, ayuda a una rápida obtención de las ecuaciones del mecanismo [8].

En este trabajo se describen brevemente los fundamentos de los algoritmos genéticos, se plantean las ecuaciones que permiten evaluar las funciones objetivo a minimizar, se presenta la aplicación particular de los algoritmos genéticos en los problemas planteados con la descripción

HÉCTOR FABIO QUINTERO R

Ingeniero Mecánico, M. Sc.
Profesor Asistente
Universidad Tecnológica de Pereira
Doctorando UPC
hquinte@utp.edu.co

GABRIEL CALLE TRUJILLO

Ingeniero Mecánico, Ph.D.
Profesor Asociado,
Facultad de Ingeniería Mecánica
Universidad Tecnológica de Pereira
gcalle@utp.edu.co

ALEXANDER DÍAZ ARIAS

Ingeniero Mecánico, Esp.
Profesor Asistente
Facultad de Ingeniería Mecánica
Universidad Tecnológica de Pereira
alexdiaza@utp.edu.co

de las operaciones realizadas en este trabajo y finalmente se resuelven algunos ejemplos.

2. BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS ALGORITMOS GENÉTICOS

Los algoritmos genéticos son procedimientos de búsqueda basados sobre los mecanismos de selección natural y los procesos característicos de la genética natural. Estos combinan la supervivencia del gen del individuo más fuerte entre las estructuras de cadenas con un intercambio estructurado de información todavía aleatoria para crear un algoritmo de búsqueda. En cada generación, se crea un nuevo conjunto de individuos (cadenas o criaturas artificiales) usando los genes de los individuos de la anterior generación. Las operaciones básicas del procedimiento de algoritmo genético que obtienen buenos resultados están compuestas de tres operaciones básicas [10]:

1. Reproducción
2. Cruzamiento
3. Mutación

La reproducción es un proceso en el cual un individuo es copiado de acuerdo al valor de la función objetivo, de tal forma que los individuos de mejor comportamiento o funcionamiento tienen mayor probabilidad de pertenecer a la siguiente generación. Después de la reproducción, se aplica la operación de cruzamiento. El cruzamiento ocurre cuando algunos genes de un individuo de la nueva población son intercambiados con el gen de otro,

generalmente con el individuo más fuerte. El intercambio es aleatorio y el porcentaje de los genes intercambiados puede ser un proceso aleatorio o fijo. En la figura 1, se da una ilustración de la operación de cruzamiento entre dos individuos de cinco genes. Para este caso, a manera de ejemplo, se intercambiaron el segundo y cuarto gen del primer individuo por los genes del individuo de mejor comportamiento, de acuerdo a la valoración de la función objetivo.

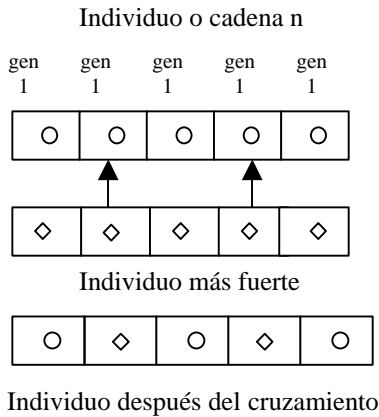


Figura 1. Operación de cruzamiento.

Después del cruzamiento se realiza la operación de la mutación. La mutación es la variación del valor de los genes de forma aleatoria. Generalmente se define una operación entre [-valor valor] para cada gen con una distribución normal y de media igual a cero.

La operación de mutación sobre cada gen es dada por:

$$V_{j,k,nuevo} = V_{j,k,viejo} + (random - 0.5) \cdot Valor_K$$

Donde:

$V_{j,k,nuevo}$ es el valor del gen k del individuo j después de la mutación

$V_{j,k,viejo}$ es el valor del gen k del individuo j antes de la mutación

$random$ es un número aleatorio entre 0 y 1 con media cero de acuerdo a una distribución normal

$Valor_K$ es el valor de variación para el gen k , 0,5% del valor del rango definido.

3. ECUACIONES DE ENLACE DEL MECANISMO

A continuación se describen las ecuaciones que permiten evaluar la función objetivo, definida como la suma de las distancias entre los puntos de precisión y los puntos generados por el mecanismo obtenido.

3.1 Mecanismo 4B.

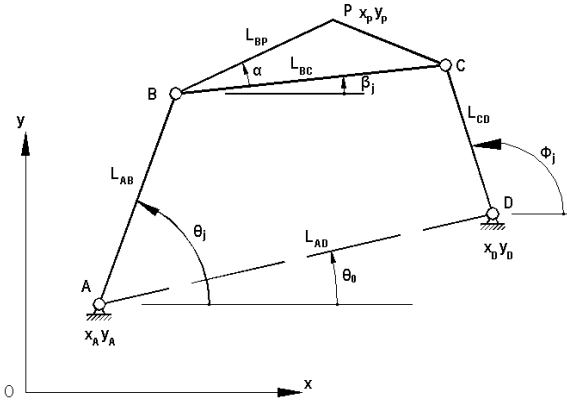


Figura 2. Mecanismo de cuatro eslabones.

Para la clasificación del mecanismo en grupos de Assur se elige un eslabón motor; para el análisis se considera como eslabón motor el eslabón L_{AB} , el cual es un grupo de primera clase. El mecanismo es obtenido al adicionarle, al grupo de primera clase, un grupo de Assur de segunda clase tipo I, grupo integrado por los eslabones L_{BC} y L_{CD} y contiene tres pares de V clase, B , C y D . De acuerdo a la clasificación de Assur es un mecanismo de un grado de libertad de segunda clase tipo I. En la figura 3, se presenta la división del mecanismo en los grupos que lo integran.

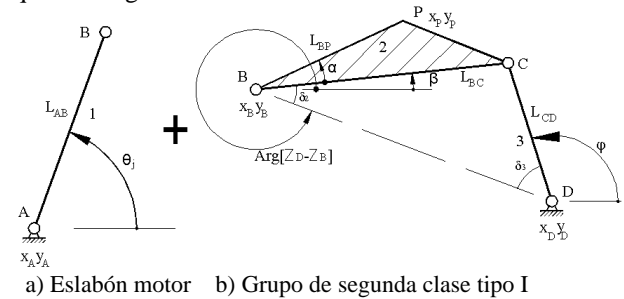


Figura 3. División del mecanismo 4B en grupos de Assur.

La clasificación de un mecanismo en grupos de Assur, descompone el mecanismo en los grupos que conforman el mecanismo. La metodología de análisis consiste en determinar, en el mismo orden de formación del mecanismo, las variables cinemáticas de interés [9]:

Del eslabón motor se encuentra la coordenada del par B:

$$x_B = x_A + L_{AB} \cos \theta_j \tag{1}$$

$$y_B = y_A + L_{AB} \sen \theta_j \tag{2}$$

Del grupo de segunda clase tipo I, se obtienen las posiciones angulares de los eslabones 1, ángulo β , y 2, ángulo ϕ . En la figura 3, se traza la línea auxiliar entre los pares B y D que ayuda a determinar las posiciones angulares de los eslabones. De la figura 3, se puede establecer:

$$\beta = \arg(Z_D - Z_B) + \delta_2 \tag{3}$$

$$\phi = \arg(Z_D - Z_B) + \pi - \delta_3 \tag{4}$$

Donde \mathbf{Z}_B y \mathbf{Z}_D representan al vector posición de los pivotes B y D en el sistema de coordenadas \mathbf{Oxy} de la Fig. 5 y arg es la función que determina el argumento de un vector en el sistema coordenado \mathbf{Oxy} . Los ángulos auxiliares δ_2 y δ_3 , se determinan mediante la aplicación de la ley del coseno al triángulo B, C, D de la figura 6:

$$\delta_2 = \arccos \left[\frac{L_{bc}^2 + L_{bd}^2 - L_{cd}^2}{2L_{bc}L_{bd}} \right] \quad (5)$$

$$\delta_3 = \arccos \left[\frac{L_{cd}^2 + L_{bd}^2 - L_{bc}^2}{2L_{cd}L_{bd}} \right] \quad (6)$$

Una segunda solución de las posiciones angulares, para iguales dimensiones de los eslabones e iguales posiciones de los pares B y D , existe si mecanismo se ensambla tal que la línea BD sea una línea reflejo. La solución es:

$$V_{j,knuevo} = V_{j,kviejo} + (\text{random}) \cdot \text{Val}_k \quad (7)$$

$$y_B = y_A + L_{AB} \text{sen } \theta_j \quad (8)$$

El ángulo ϕ_K puede ser resuelto de manera similar.

Una vez resuelto el grupo se puede determinar la coordenada de cualquier punto que pertenezca al eslabón L_{BC} . Las ecuaciones de las coordenadas del punto P se determinan mediante:

$$x_P = x_B + L_{BP} \cos(\alpha + \beta_j) \quad (8)$$

$$y_P = y_B + L_{BP} \text{sen}(\alpha + \beta_j) \quad (9)$$

Para la generación de movimiento se requieren dos puntos del acoplador, por lo tanto se tendría dos ecuaciones similares a las anteriores para el otro punto.

3.2. Mecanismo con dos grupos de Assur: (segunda clase Tipo I, Segunda clase Tipo II)

Se propone ahora, realizar una generación de guiado de un cuerpo con un mecanismo de un grado de libertad integrado por un grupo de estructural de primera clase y dos grupos de estructurales de segunda clase (Tipo I y Tipo II), de acuerdo a la clasificación de Assur [8].

En la figura 4, se presenta el mecanismo a estudiar y las dimensiones utilizadas para el proceso de optimización.

Para la clasificación en grupos de Assur, se considera el eslabón L_{AB} como eslabón motor, formando así el grupo de primera clase. El primer grupo que se obtiene del mecanismo es el grupo formado por el eslabón L_{BC} y el deslizador C , el cual es un mecanismo de segunda clase Tipo II.

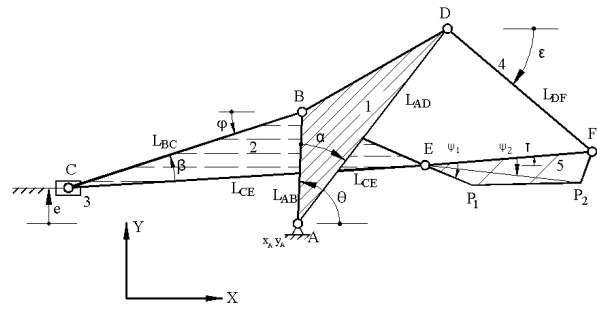


Figura 4. Variables para la síntesis del mecanismo.

El mecanismo completo se obtiene mediante la adición al mecanismo obtenido previamente, el grupo de segunda clase Tipo I formado por los eslabones L_{DF} y L_{EF} . En la figura 5, se presenta el mecanismo en sus grupos que lo conforman.

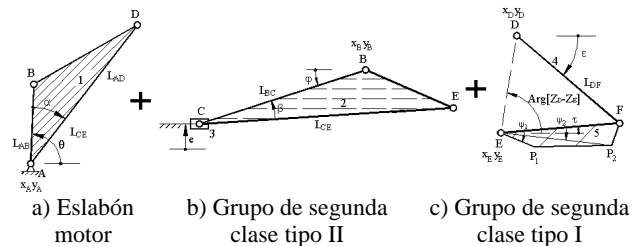


Figura 5. División del mecanismo en sus grupos de Assur.

Las ecuaciones del mecanismo son:

Eslabón Motor. Del eslabón motor se encuentra la coordenada del par B

$$x_B = x_A + L_{AB} \cos q_k \quad (10)$$

$$y_B = y_A + L_{AB} \text{sen} q_k \quad (11)$$

Del grupo de segunda clase tipo II, se obtienen la posición angular del eslabón L_{BC} y la posición horizontal del deslizador [9]:

$$x_C = x_B - L_{BC} \cos f_k = s \quad (12)$$

$$y_C = y_B - L_{BC} \text{sen} f_k = e + y_A \quad (13)$$

De la ecuación (14) se obtiene la coordenada f_K .

$$\delta_K = \arcsen \left[\frac{y_B - e - y_A}{L_{BC}} \right] \quad (14)$$

Resuelto el grupo BC , se determinan las coordenadas de los puntos D y E .

$$x_D = x_A + L_{AD} \cos (q_k - a) \quad (15)$$

$$y_D = y_A + L_{AD} \text{sen} (q_k - a) \quad (16)$$

$$x_E = x_C + L_{CE} \cos (f_k - b) \quad (17)$$

$$y_E = y_C + L_{CE} \text{sen} (f_k - b) \quad (18)$$

El grupo DFE se resuelve de manera similar al grupo BCD del mecanismo de cuatro eslabones. La solución

para el ángulo t_k es similar a la obtenida al ángulo β del mecanismo de cuatro eslabones

Una vez resuelto el grupo se puede determinar la coordenada de cualquier punto que pertenezca al eslabón L_{EF} , de manera similar a la determinación de la coordenada del punto P del caso anterior.

4. OPERACIONES REALIZADAS

En el caso de la síntesis de trayectoria se crea una función objetivo definida como:

$$f_j = \sum_{k=1}^n \text{abs} [XP_{G,k} - XP_{M,k}] + V_1 \cdot \text{BandG} + V_2 \cdot \text{Band}\phi \quad (19)$$

Donde f_j es el valor de la función para el individuo j , abs es la distancia entre los puntos XP_G y XP_M siendo la posición para el punto k de la trayectoria deseada y del mecanismo respectivamente.

V_1 es un valor de peso que determina si el mecanismo pueda dar un giro completo, esta condición se cumple si [11]:

$$l + s < p + q$$

Donde l es la longitud más largo, s es la longitud del eslabón más corto y p, q las longitudes de los otros dos eslabones. Adicionalmente el eslabón mas corto debe ser la manivela. Si se cumple estas condiciones BandG toma el valor de 0. En el caso que el mecanismo no cumpla la condición de Grashof y el eslabón L_{AB} no sea el eslabón mas corto, BandG toma el valor de 1.

V_2 comprueba que el mecanismo realice un ciclo en un solo sentido cuando pasa por cada uno de los puntos deseado, para ello se toma la primera posición angular y como referencia. Los demás ángulos deben cumplir:

$$f_1 < f_2 < \dots < f_N$$

ó

$$f_1 > f_2 > \dots > f_N$$

Si se cumple esta condición Bandf toma el valor de cero, de lo contrario toma el valor de 1. Los individuos se organizan de acuerdo al menor valor de la función f , siendo el objetivo del procedimiento minimizar esta función. Para la implementación del algoritmo genético para este caso, se definió una población con cinco individuos. Cada individuo contiene la siguiente información:

$$X = [f, L_{AB}, L_{BC}, L_{CD}, L_{AD}, L_{BP}, \mathbf{q}_0, \mathbf{a}, x_A, y_A, \{\phi_k\}]$$

El valor de f para cada individuo, es obtenido de acuerdo a la ecuación 19. El vector de posiciones angulares $\{\mathbf{f}_k\}$, $\{k = 1, 2, \dots, n\}$ se implementó como un conjunto de genes de los individuos, ya que demandaba demasiado tiempo de procesamiento la determinación de la posición angular del eslabón L_{AB} en la cual la trayectoria estaba en el punto

más cercano al punto $X_{P,k}$. Todas las dimensiones están basadas en la figura 2.

Para cada uno de los genes, o variables, se definió un rango sobre el cual eran validos sus valores. El rango de valores para cada uno de los problemas dependía de las dimensiones manejadas. Esta condición adicional se implementó para evitar configuraciones poco favorables constructivamente o el manejo de valores negativos.

Para la generación de movimiento, para el caso del mecanismo de cuatro eslabones, se definieron dos puntos del elemento que se pretender guiar, siendo necesario incrementar dos genes la información de cada individuo.

$$X = [f, L_{AB}, L_{BC}, L_{CD}, L_{AD}, L_{BP}, L_{BP2}, \mathbf{q}_0, \mathbf{a}, \mathbf{a}_2, x_A, y_A, \{\mathbf{f}_k\}]$$

La función para este caso se definió como:

$$f_j = \sum_{k=1}^n \left(\begin{array}{l} \text{abs}[XP_{1G,k} - XP_{1M,k}] \\ \text{abs}[XP_{2G,k} - XP_{2M,k}] \end{array} \right) + V_1 \cdot \text{BandG} + V_2 \cdot \text{Band}\phi \quad (20)$$

Siendo XP_1 y XP_2 los dos puntos del elemento que se desean orientar. Los subíndices G y M se refieren al punto deseado y al punto obtenido por el mecanismo. El subíndice j se refiere al valor de la función objetivo sobre el individuo j y el subíndice k se refiere al k -ésimo punto de precisión definido.

La población elegida tiene cinco individuos, el proceso de elección de la primera población es un proceso aleatorio y el valor de cada variable depende del rango definido previamente. En cada iteración se evalúan todos los individuos y se organizan de acuerdo al menor valor. En la siguiente generación se reproduce en tres ocasiones el individuo de mejor comportamiento, reemplazando al cuarto y quinto individuo de la anterior generación. Estos dos últimos individuos sufren variación del 50% de los genes dimensionales, los cuales son elegidos aleatoriamente. El nuevo valor del gen modificado es elegido aleatoriamente sobre el valor del rango. El segundo y tercer individuo pasan a integrar la siguiente generación.

Se procede a realizar el proceso de cruzamiento del primer individuo con los otros cuatro. Se decidió por realizar la operación de cruzamiento sobre el 40% de los genes, los genes cruzados son elegidos mediante una operación aleatoria normalizada.

gen_{kj} se refiere al valor del gen k del individuo j ; si el número aleatorio es mayor que 0,6 se realiza la conmutación con el valor del gen k del individuo 1. Si no se cumple la condición anterior el gen k del individuo j conserva el valor que tenía en la generación anterior.

Para el segundo mecanismo planteado, se consideró un problema de generación de movimiento. Los genes definidos para cada individuo se presentan a continuación:

$$X = \{f, L_{AB}, L_{BC}, e, L_{AD}, L_{CE}, L_{DF}, L_{EF}, L_{BP1}, L_{BP2}, \mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{t}_1, \mathbf{t}_2, x_A, y_A, \{\mathbf{f}_K\}\}$$

El proceso de mutación se decidió ignorar sobre el primer individuo, de tal forma que no sufre cambios para la siguiente generación.

4. RESULTADOS

5.1. síntesis de posición realizada a un mecanismo de cuatro eslabones

Se pretende obtener, mediante la síntesis de trayectoria, un mecanismo de cuatro eslabones que pase por los puntos presentados en la tabla 1.

	Coord		Coord		Coord
1	(2,264, -0,236)	6	(0,669, 0,434)	11	(0,776, -0,447)
2	(2,016, -0,134)	7	(0,448, 0,384)	12	(1,18, -0,576)
3	(1,634, 0,039)	8	(0,319, 0,235)	13	(1,611, -0,587)
4	(1,269, 0,236)	9	(0,323, -0,013)	14	(1,985, -0,497)
5	(0,956, 0,377)	10	(0,482, -0,237)	15	(2,243, -0,354)

Tabla No 1. Coordenadas para la síntesis de trayectoria.

Para la implementación del algoritmo, se definieron los siguientes rangos:

$$L_{AB} = \{0,3;2\}; L_{BC} = \{0,6;4\}; L_{CD} = \{0,6;4\}; L_{AD} = \{0,6; 4\}; L_{BP} = \{0,5; 2,5\}; \mathbf{q}_0 = \{-40, 40\} \text{grad}; \mathbf{a} = \{5, 120\} \text{grad}; x_A = \{-1;5\}; y_A = \{-1;5\};$$

La solución obtenida fue:

$$L_{ab} = 1,0076; L_{bc} = 2,93; L_{cd} = 2,164; L_{ad} = 3,43; L_{bp} = 1,743; \text{tetha}0 = 16,48 \text{ grad}, \text{alfa} = 0,154 \text{ grad}; x_A = -0,4; y_A = 0,48$$

En la figura 6 se presenta la trayectoria generada por el mecanismo y los puntos requeridos.

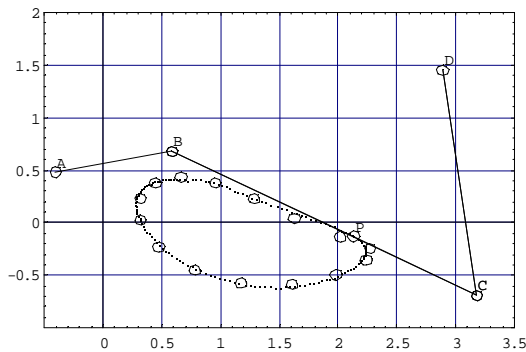


Figura 6. Mecanismo para la generación de trayectoria.

5.2. Síntesis de generación de movimiento para un mecanismo de cuatro eslabones.

En la síntesis de generación de movimiento se requieren las coordenadas de las posiciones de dos puntos del cuerpo a guiar, o las coordenadas de las posiciones de un punto y la posición angular del cuerpo. Se prefirió atenerse al primer enfoque para tener una función que

determine la distancia entre los puntos especificados. Los valores de las coordenadas de estos puntos se presentan en la tabla 2.

Tabla 2. Coordenadas para los puntos de precisión.

Punto	XP_1	XP_2
1	(1,768, 2,331 I)	(1,9592, 2,44973)
2	(1,947, 2,627 I)	(2,168, 2,675)
3	(1,595, 2,795 I)	(1,821, 2,804)
4	(1,019, 2,724 I)	(1,244, 2,720)
5	(0,479, 2,428 I)	(0,705, 2,437)
6	(0,126, 2,052 I)	(0,346, 2,104)
7	(-0,001, 1,720)	(0,195, 1,833)
8	(0,103, 1,514)	(0,356, 1,680)
9	(0,442, 1,549)	(0,558, 1,742)
10	(1,055, 1,905)	(1,186, 2,088)

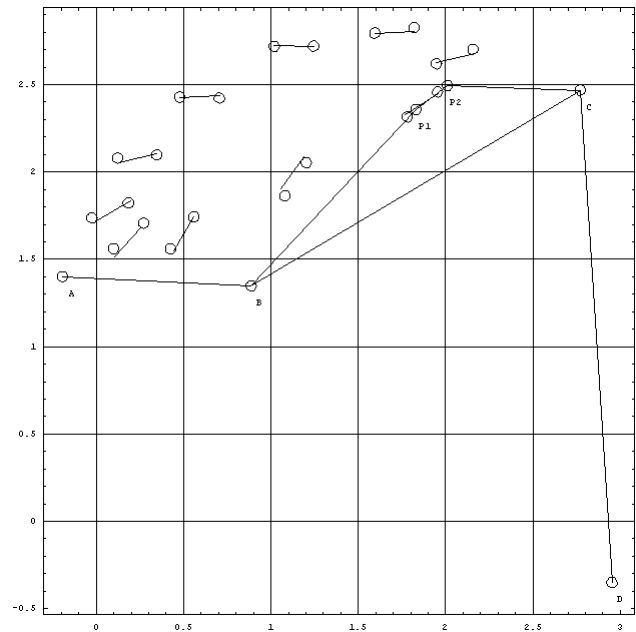


Figura 7. Solución para la síntesis de movimiento.

El mecanismo obtenido tiene las siguientes dimensiones:

$$L_{AB} = 1,08012; L_{BC} = 2,19273; L_{CD} = 2,82421; L_{AD} = 3,59853; \mathbf{q}_0 = -29,1125 \text{ grad}; L_{BP1} = 1,38287; \mathbf{a}_1 = 16,1868 \text{ grad}; L_{BP2} = 1,60547; \mathbf{a}_2 = 14,8432 \text{ grad};$$

En la figura 7 se presenta el mecanismo, las posiciones deseadas (representadas por una línea) y las posiciones generadas por el mecanismo (representadas por dos círculos).

5.3. Síntesis para el mecanismo con dos grupos de Assur.

En la tabla 3, se presentan las coordenadas de los puntos de las posiciones especificadas de un cuerpo. Se pretende obtener la solución con un mecanismo presentado en la figura 4.

Tabla No 3.

Punto	XP_1	XP_2
1	(18,559, -1,519)	(19,114, -8,931)
2	(20,083, 1,814)	(25,147, -3,627)
3	(17,84, 6,926)	(25,272, 6,823)
4	(16,843, 7,509)	(24,216, 8,456)
5	(15,732, 7,88)	(22,909, 9,811)
6	(14,837, 8,016)	(21,793, 10,636)
7	(13,903, 8,03)	(20,581, 11,295)
8	(11,952, 7,7)	(17,936, 12,109)
9	(9,953, 6,919)	(15,111, 12,272)
10	(7,979, 5,73)	(12,237, 11,824)

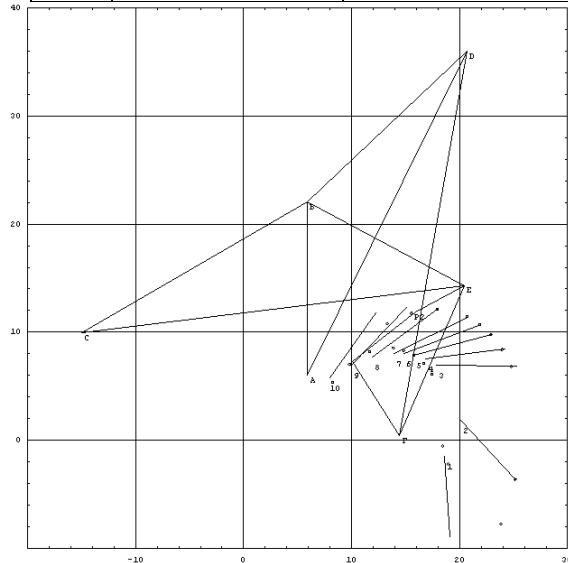


Figura 8. Solución para la síntesis de movimiento.

En la figura 8, se presenta la solución del mecanismo. Las líneas representan las posiciones deseadas, los pequeños discos sólidos representan las posiciones que genera el mecanismo. La complejidad del ejercicio propuesto pudo ser resuelta implementado un rango de diseño para cada una de las variables definidas. Esto se realizó por tener soluciones que por razones constructivas se descartaban. Los rangos de valores definidos, para la solución particular, se presentan a continuación:

$L_{AB} = \{6, 20\}$; $L_{BC} = \{11, 40\}$; $e = \{-1, 4\}$; $L_{AD} = \{11, 40\}$; $L_{CE} = \{11, 50\}$; $L_{EF} = \{6, 25\}$; $L_{DF} = \{6, 25\}$; $L_{EP1} = \{5, 15\}$; $L_{EP2} = \{5, 20\}$; $\mathbf{a} = \{5, 40\}$ grad; $\mathbf{b} = \{5, 40\}$ grad; $\mathbf{d} = \{5, 40\}$ grad; $\mathbf{e} = \{5, 40\}$ grad;

Las dimensiones del mecanismo encontrado son:

$L_{AB} = 6,00124$; $L_{BC} = 11,0038$; $e = 3,77112$; $L_{AD} = 26,0766$; $L_{AD} = 6,00124$; $L_{CE} = 15,1043$; $L_{EF} = 19,1114$; $L_{DF} = 23,8683$; $L_{EP1} = 12,6427$; $L_{EP2} = 19,9971$; $\mathbf{a} = 27,4595$ grad; $\mathbf{b} = 19,4358$ grad; $\mathbf{d} = 36,4621$ grad; $\mathbf{e} = 37,4912$; $X_A = 5,79989$; $Y_A = 5,93885$;

6. CONCLUSIONES.

En el este trabajo se comprobó la extensión de la optimización por algoritmos genéticos en la síntesis de mecanismos, introduciendo la aplicación a mecanismos diferentes a los 4B y a la síntesis de movimiento.

Es fundamental un análisis previo del problema para limitar el rango de valores para cada uno de las variables, esto permite evitar encontrar una solución constructivamente no válida y evitar la pérdida de procesamiento correspondiente.

Es posible aplicar estos procedimientos para problemas similares en que condiciones adicionales sean incluidas, tales como la temporización o los ángulos de transmisión.

7. BIBLIOGRAFÍA.

- [1] VALLEJO, JAVIER, et al. Nonlinear Optimization of Planar Linkages for Kinematic Synthesis. *Mech. Mach Theory* Vol 30 No 4, pp 501-518. 1995
- [4] KRISHNAMURTY, S; TURCIC, D. A. Optimal Synthesis of Mechanisms Using Nonlinear Goal Programming Techniques. *Mech. Mach Theory* Vol 27 No 5, pp 599-612. 1992
- [5] ZHIXING, W, et al. Study on Rigid-Based Guidance Synthesis of Planar Linkage. *Mech. Mach Theory* Vol 37 No 7, pp 673-684. 2002.
- [6] CABRERA, J. A, et al. Optimal Synthesis of Mechanisms with Genetic Algorithms. *Mech. Mach Theory* Vol 37 No 10, pp 1165-1177. 2002.
- [7] ERDMAN; SANDOR. *Diseño de mecanismos: Análisis y síntesis*. Mc Graw Hill.
- [8] CALLE, G; QUINTERO, H. F.; ROMERO, C. A. Mejoramiento estructural de mecanismos. *Revista Scientia et Technica* Vol 9 año 1999, pp 141 - 149.
- [9] DIAZ, A; CALLE, G; QUINTERO, H. F. Análisis cinemático de mecanismos planos a partir del análisis estructural según Assur. V Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica, pp 1231 - 1240. Mérida, Venezuela: 2001
- [10] GOLDBERG, D. E. *Genetic Algorithms: in Search, Optimization, and Learning*. Addison Wesley Publishing Company. USA: 1989.
- [11] HARTENBERG, R. S; DENAVIT, J. *Kinematics Synthesis of Linkages*. Mc Graw Hill. USA: 1964.
- [12] HRONES, J. ; NELSON, G. *Analysis of the Four Bar Linkage*. Mit Press and Wiley. New York: 1951.
- [13] LIO, M. D; COSSALTER, V; LOT, R. On the Use of Natural Coordinates in Optimal Synthesis of Mechanisms. *Mech. Mach Theory* Vol 35 No10, pp 1367-1389. 2000.
- [14] YAO, J; ANGELES, J. Computation of All Dyads in the Approximate Synthesis of Planar Linkages for Rigid Body Guidances. *Mech. Mach Theory* Vol 35 No 8, pp 1065-1078. 2000.
- [15] VASILIU, A; YANNOU, B. Dimensional Synthesis of Planar Mechanisms Using Neural Network: Application to path generator Linkages. *Mech. Mach Theory* Vol 36 No 2, pp299-310. 2001.
- [16] CHANG, C F. Synthesis of Adjustable Four Bar Mechanisms Generating Circular Arcs with Specified Tangential Velocities. *Mech. Mach Theory* Vol 36 No 3, pp 387-395. 2001.
- [17] KALNAS, R. S; KOTA; S. Incorporating Uncertainty into Mechanism Synthesis. *Mech. Mach Theory* Vol 36 No 3, pp 843 - 851. 2001.