Congresso de Métodos Numéricos em Engenharia 2015
Lisboa, 29 de Junho a 2 de Julho 2015

DISEÑO PARAMÉTRICO ÓPTIMO DEL MECANISMO DE MARCHA DE UN ROBOT BÍPEDO UTILIZANDO EVOLUCIÓN DIFERENCIAL

Jesús Said Pantoja-García[1], Miguel Gabriel Villarreal-Cervantes[1*] y Juan Carlos González-Robles[1]

1: Departamento de Posgrado, LGAC de Mecatrónica
Instituto Politécnico Nacional
CIDETEC
Av. Juan de Dios Bátiz s/n, 07700, México, D. F., México
e-mail: : {jpantojag, mvillarrealc, jgrobles}@ipn.mx, web: http://www.cidetec.ipn.mx

Palabras clave: Diseño óptimo, Síntesis óptima de mecanismos, Mecanismo de ocho barras, Robot bípedo, Evolución diferencial

Resumen. *En este trabajo se establece el diseño paramétrico de un mecanismo de marcha para un robot bípedo con base en un problema de optimización no lineal con restricciones. El mecanismo cuenta con ocho eslabones y con un grado de libertad. Para llevar a cabo la solución al problema de optimización se hace uso del algoritmo de evolución diferencial con manejo de restricciones. Resultados en simulación muestran el desempeño del diseño obtenido, logrando satisfacer un movimiento similar al de la marcha humana.*

1. INTRODUCCIÓN

La relación en la abstracción del pensamiento humano para convertirlo en una máquina útil para la sociedad ha originado severos cambios a través de la existencia del ser humano, naciendo así diferentes áreas del conocimiento, las cuales evolucionan para crear máquinas más sofisticadas. En la actualidad se pueden considerar a los sistemas mecatrónicos como uno de esos resultados de evolución [1]. Es así como surge el interés en diseñar máquinas capaces de trasladarse de un lugar a otro, a esta acción se le denomina locomoción. La locomoción de los robots ha sido lograda a través de diferentes medios como lo son: la locomoción con patas ó la locomoción con ruedas. La locomoción bípeda ha sido de gran relevancia debido a la intención de imitar el caminar humano por una máquina, sin embargo es un gran desafio el diseñar máquinas que puedan imitar la marcha debido a la alta complejidad de la acción del caminar [2],[3].
El diseño paramétrico [4] resulta de gran importancia para el diseño de bípedos. Éste consiste en que el diseñador cambie los parámetros de las variables de diseño en el modelo paramétrico con el propósito de buscar diferentes alternativas de solución al problema

de diseño. Un modelo paramétrico es la representación matemática que proporciona el comportamiento del sistema a diseñar, éste modelo esta en función de las “variables de diseño”. Utilizar el modelo paramétrico para el diseño de robots bípedos así como plantear un problema de optimización con el propósito de cumplir uno o varios objetivos de diseño y a su vez resolverlo con el uso de alguna técnica de optimización, son una parte medular para mejorar el desempeño del diseño. En [5], se emplea una técnica de optimización llamada: optimización por cúmulo de particulas (PSO por sus siglas en inglés) para encontrar los ángulos de articulación de un robot bípedo con 10 grados de libertad. El resultado del diseño se simuló en un entorno virtual con objetos en 3D. La problemática que se menciona en el artículo son los grados de libertad, debido a que un mecanismo con muchos grados de libertad puede moverse sin problemas, pero esto viene acompañado con la complejidad para controlarlo. El enfoque de diseño de robots bípedos actualmente viene acompañado con el uso de mecanismos que generan una trayectoria y poder utilizarlos para que realicen el movimiento de marcha en el plano sagital del robot. En [6], se realiza la locomoción de un robot para medios acuáticos con el propósito de imitar el comportamiento de un basilisco común por medio de un mecanismo Watt-I, obteniendo resultados en simulación.

Para poder utilizar mecanismos para la marcha es necesario sintetizar mecanismos [7] debido a que se necesita generar una trayectoria en el plano sagital. La síntesis de mecanismos incluye síntesis de función, movimiento y generación de trayectoria, las cuales se han resuelto por métodos analíticos y gráficos. El inconveniente de las técnicas gráficas es el número de puntos de precisión que pueden alcanzar y el problema de los métodos analíticos es que no siempre se puede encontrar una solución, es por eso que se opta por el uso de métodos numéricos los cuales están comúnmente combinadas con técnicas de optimización. Sin embargo, no resulta conveniente utilizar métodos numéricos basados en el gradiente [8] debido a que convergen a soluciones cercanas al punto inicial, i.e., no presenta buen desempeño en problemas altamente no lineal, divergen en problemas discontinuos, entre otros. Por tal motivo se necesitan otro tipo de técnicas para resolver problemas complejos como es el caso de las técnicas meta-heurísticas [9], [10]. En [11], se propusieron algoritmos basados en el gradiente y meta-heurísticos para sintetizar un mecanismo de 4 barras en el problema de generación de trayectorias. Se realizó una comparación entre las dos técnicas concluyendo que los algoritmos meta-heurísticos tienen buen desempeño en problemas no lineales en comparación con los algoritmos basados en el gradiente.

El algoritmo de evolución diferencial (ED), fue propuesto por Kenneth Price y Rainer Storn [12] como una nueva técnica de optimización, utilizada para resolver problemas complejos. En [9] se tiene la problemática de diseño óptimo de una transmisión de variación continúa y un robot paralelo de 5 barras, para la cual se utilizó un algoritmo de ED para resolver el problema de optimización. En [13] se sintetizó un mecanismo de 6 barras para generar trayectorias con tiempo prescrito, a través de un algoritmo de evolución diferencial. En [14] se sintetizó un mecanismo de 4 barras para aproximar el movimiento

rectilíneo utilizando un algoritmo de evolución diferencial para resolver el problema de optimización.
En los anteriores trabajos de investigación se sintetizaron mecanismos para la generación de trayectorias, lo que se propone en el presente trabajo es diseñar un mecanismo para la marcha humana en el plano sagital con base en un problema de optimización, proponiéndolo como un nuevo diseño en la extremidad de un bípedo.
La estructura del artículo es la siguiente: en la sección 2 se describe el mecanismo a utilizar para la locomoción bípeda. El establecimiento formal del problema de optimización se desarrolla en la sección 3. En la sección 4 se menciona el algoritmo de evolución diferencial que resuelve el problema de optimización. Los resultados en simulación se muestran en la sección 5, así como la discusión de los mismos. Finalmente en la sección 6 se dan las conclusiones pertinentes y trabajo futuro.

2. DISEÑO DEL MECANISMO DE MARCHA DEL ROBOT BÍPEDO

El mecanismo de marcha de ocho eslabones mostrado en la Fig. 1, se propone como extremidad del robot bípedo, con el propósito de satisfacer el movimiento de marcha deseado en el plano sagital. El mecanismo de marcha cuenta con un grado de libertad y diez uniones. Los parámetros cinemáticos del mecanismo están dados por las longitudes l_i $\forall i = 1, 2, .., 15$, por los ángulos internos de los dos eslabones con forma triángular $\hat{\theta}_j$, $\forall\ j = 1, 2, ..., 6$ y por el desplazamiento angular θ_i de las longitudes l_i con respecto al sistema de coordenada inercial $X - Y$.
Con el propósito de parametrizar el comportamiento cinemático del mecanismo, se considera que el mecanismo de marcha cuenta con dos mecanismos de cuatro barras y uno de cinco barras en su configuración. Realizando el análisis cinemático en los mecanismos [15], se puede obtener el modelo matemático que describe el comportamiento cinemático del mecanismo de marcha (1)-(2), donde se define para el mecanismo de cuatro barras a l_2 y a l_6 como las longitudes de los eslabones de entrada tipo manivela, l_1 y l_5 a las longitudes de los eslabones fijos, l_3 y l_7 a las longitudes de los eslabones tipo acoplador, l_4 y l_8 a las longitudes de los eslabones tipo balancín, θ_2 es el desplazamiento angular de la manivela y en cuanto al mecanismo de cinco barras se define a l_8 y l_9 a las longitudes de los eslabones de entrada, l_{15} a la longitud del eslabón fijo y a l_{11} y l_{12} a las longitudes de los eslabones del acoplador.

$$\theta_{j+k} = 2atan2\left(\frac{-\hat{B} + (-1)^{k+1}\sqrt{\hat{B}^2 + \hat{A}^2 - \hat{C}^2)}}{\hat{C} - \hat{A}}\right) \ \forall\ j = 0, 4\ \wedge\ k = 3, 4 \tag{1}$$

$$\theta_{o+11} = 2atan2\left(\frac{-\bar{B} + (-1)^{o}\sqrt{\bar{B}^2 + \bar{A}^2 - \bar{C}^2)}}{\bar{C} - \bar{A}}\right) \ \forall\ o = 0, 1 \tag{2}$$

donde:

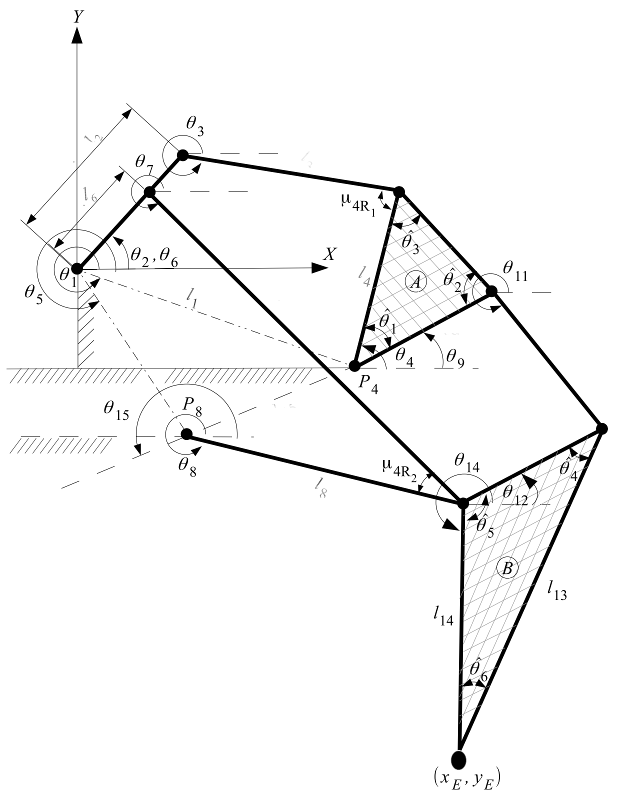


Figura 1: Diagrama esquemático del robot bípedo.

$$\hat{A} = (-1)^k 2l_{j+1}l_{j+k}\cos(\theta_{j+1}) + (-1)^{k+1}2l_{j+2}l_{j+k}\cos(\theta_2)$$
$$\hat{B} = (-1)^k 2l_{j+1}l_{j+k}\sin(\theta_{j+1}) + (-1)^{k+1}2l_{j+2}l_{j+k}\sin(\theta_2)$$
$$\hat{C} = l_{j+1}^2 + l_{j+2}^2 + (-1)^{k+1}l_{j+3}^2 + (-1)^k l_{j+4}^2 - 2l_{j+1}l_{j+2}\cos(\theta_{j+1} - \theta_2)$$
$$\bar{A} = (-1)^{o+1}2l_{o+11}l_{8(1-o)+15o}\cos\theta_{8(1-o)+15o} + (-1)^o 2l_9 l_{o+11}\cos\theta_9 + \\ + (-1)^{o+1}2l_{o+11}l_{8o+15(1-o)}\cos\theta_{8o+15(1-o)}$$
$$\bar{B} = (-1)^{o+1}2l_{o+11}l_{8(1-o)+15o}\sin\theta_{8(1-o)+15o} + (-1)^o 2l_9 l_{o+11}\sin\theta_9 + \\ + (-1)^{o+1}2l_{o+11}l_{8o+15(1-o)}\sin\theta_{8o+15(1-o)}$$
$$\bar{C} = l_8^2 + l_9^2 + l_{o+11}^2 + l_{15}^2 - l_{12-o}^2 + (-1)^{o+1}2l_8 l_{9(1-o)+15o}\cos\left(\theta_8 - \theta_{9(1-o)+15o}\right) + \\ + (-1)^o 2l_8 l_{9o+15(1-o)}\cos\left(\theta_8 - \theta_{9o+15(1-o)}\right) - 2l_9 l_{15}\cos\left(\theta_9 - \theta_{15}\right)$$

2.1. Variables de diseño

Se considera que las variables de diseño en el mecanismo de marcha sean sus parámetros antropométricos dados por las longitudes l_i $\forall$ $i = 1, 2, ..., 15$ y los parámetros cinemáticos dados por los ángulos de los eslabones base θ_1, θ_5 y los $\bar{n}$ desplazamientos angulares de la manivela, i.e., $\theta_2 = \{\theta_2^i \mid i = 1, 2, ..., \bar{n}\}$. Las variables de diseño se agrupan en el vector $p \in R^{17+\bar{n}}$ (3).

$$p = [l_1, l_2, ..., l_{15}, \theta_1, \theta_5, \theta_2^1, \theta_2^2, ..., \theta_2^{\bar{n}}]^T \tag{3}$$

2.2. Función de desempeño

Con el propósito de satisfacer el movimiento en el plano sagital del mecanismo de marcha del robot bípedo, se propone como función de desempeño J (4) a optimizar el cuadrado del error producido entre el punto (x_E, y_E) del mecanismo y el movimiento de marcha deseado ($\bar{x}_E$, $\bar{y}_E$).

$$J = \sum_{i=1}^{\bar{n}} \left(\bar{x}_E^i - x_E^i\right)^2 + \sum_{i=1}^{\bar{n}} \left(\bar{y}_E^i - y_E^i\right)^2 \tag{4}$$

donde:

$$\begin{aligned}
x_E^i &= l_6 \cos\theta_2^i + l_7 \cos\theta_7^i + l_{14} \cos\theta_{14}^i \\
y_E^i &= l_6 \sin\theta_2^i + l_7 \sin\theta_7^i + l_{14} \sin\theta_{14}^i \\
\theta_{14}^i &= 2\pi - (\hat{\theta}_5 - \theta_{12}^i) \\
\hat{\theta}_5 &= \cos^{-1}\left(\frac{l_{12}^2 + l_{14}^2 - l_{13}^2}{2l_{12}l_{14}}\right)
\end{aligned}$$

2.3. Restricciones

2.3.1. Criterio de Grashof

Para realizar un movimiento continuo en el mecanismo de marcha del robot bípedo cuando se considera una velocidad constante en los eslabones de entrada, se requiere garantizar que los mecanismos de cuatro barras presenten una configuración manivela-balancín. El criterio de grashof [16] para mecanismos de cuatro eslabones establece que *si la suma de las longitudes del eslabón mas corto y mas largo es menor o igual a la suma de los dos eslabones restantes, entonces al menos un eslabón puede rotar completamente.* Por tal motivo se incluye el criterio de Grashof como restricciones del diseño para ambos mecanismos de cuatro barras. Esta restricción se muestra en (5)-(6).

$$g_1 : l_2 + l_1 - l_3 - l_4 < 0 \tag{5}$$

$$g_2 : l_6 + l_5 - l_7 - l_8 < 0 \tag{6}$$

Además, para permitir que los mecanismos de cuatro barras presenten configuraciones manivela-balancín en los eslabones (l_2, l_6) y (l_4, l_8), respectivamente, y a su vez garantizar un movimiento continuo en el mecanismo de marcha del robot bípedo, se establecen las restricciones (7)-(10).

$$g_3 : -l_4 - l_1 + l_2 + l_3 < 0 \tag{7}$$
$$g_4 : -l_3 - l_1 + l_2 + l_4 < 0 \tag{8}$$
$$g_5 : -l_8 - l_5 + l_6 + l_7 < 0 \tag{9}$$
$$g_6 : -l_7 - l_5 + l_6 + l_8 < 0 \tag{10}$$

2.3.2. Estructura triángular

El mecanismo de marcha presenta dos eslabones con estructuras triangulares marcadas en la Fig. 1 con las letras **A** y **B**. Con el propósito de preservar dicha estructura en el proceso de optimización, se requiere satisfacer la propiedad geométrica de los ángulos interiores de un triángulo, la cual establece que en el espacio Euclideano la suma de los ángulos interiores de un triángulo es igual a π radianes. Haciendo uso de la ley de cosenos para encontrar los ángulos interiores de la estructura triangular, se incluyen las restricciones (11)-(14) con el propósito de preservar las dos estructuras como triangulares en el mecanismo de marcha.

$$h_1 : \hat{\theta}_1 + \hat{\theta}_2 + \hat{\theta}_3 - \pi = 0 \tag{11}$$
$$h_2 : \hat{\theta}_4 + \hat{\theta}_5 + \hat{\theta}_6 - \pi = 0 \tag{12}$$
$$g_{6+j} : \hat{\theta}_j - \pi < 0 \ \forall \ j = 1, 2, ..., 6 \tag{13}$$
$$g_{12+j} : -\hat{\theta}_j < 0 \ \forall \ j = 1, 2, ..., 6 \tag{14}$$

donde:

$$\hat{\theta}_1 = \cos^{-1}\left(\frac{l_4^2 + l_9^2 - l_{10}^2}{2l_4 l_9}\right), \ \hat{\theta}_2 = \cos^{-1}\left(\frac{l_{10}^2 + l_9^2 - l_4^2}{2l_{10} l_9}\right), \ \hat{\theta}_3 = \cos^{-1}\left(\frac{l_{10}^2 + l_4^2 - l_9^2}{2l_{10} l_4}\right)$$
$$\hat{\theta}_4 = \cos^{-1}\left(\frac{l_{12}^2 + l_{13}^2 - l_{14}^2}{2l_{12} l_{13}}\right), \ \hat{\theta}_5 = \cos^{-1}\left(\frac{l_{12}^2 + l_{14}^2 - l_{13}^2}{2l_{12} l_{14}}\right), \ \hat{\theta}_6 = \cos^{-1}\left(\frac{l_{14}^2 + l_{13}^2 - l_{12}^2}{2l_{14} l_{13}}\right)$$

2.3.3. Calidad de transmisión de movimiento

Una medida que nos indica la efectividad con la cual el movimiento del eslabón de entrada del mecanismo se transmite hacia el eslabón de salida es el ángulo de transmisión [17]. En un mecanismo de cuatro eslabones, el ángulo de transmisión $\mu_\varrho \ \forall \ \varrho \in \{4R_1, 4R_2\}$ es el ángulo formado entre el eslabón acoplador y el eslabón manivela, como se observa en la Fig. 1. Cuando el ángulo de transmisión tiene el valor ideal de $\mu_\varrho = \frac{\pi}{2} rad$, se efectúa la mejor transmisión de fuerza y la exactitud del movimiento del eslabón de salida es menos sensible a errores de manufactura (tolerancia) y a cambios de dimensiones debido a una dilatación/contracción térmica del material. Por lo tanto se recomienda que el ángulo de transmisión se encuentre en el intervalo $[\frac{\pi}{4}, \frac{3\pi}{4}]$ *rad* [17]. Por lo tanto se propone como restricción que el valor del ángulo de transmisión mínima $\mu_{\text{mín}}$ y máxima $\mu_{\text{máx}}$ de los mecanismos de cuatro barras en el mecanismo de marcha se encuentren en el intervalo $[\frac{\pi}{4}, \frac{3\pi}{4}]$ *rad*. Las restriciones relacionadas al ángulo de transmisión se muestran en (15)-(18).

$$g_{19} : \cos^{-1}\left(\frac{l_3^2 + l_4^2 - (l_1 - l_2)^2}{2l_3l_4}\right) \geq \frac{\pi}{4} \tag{15}$$

$$g_{20} : \cos^{-1}\left(\frac{l_7^2 + l_8^2 - (l_5 - l_6)^2}{2l_7l_8}\right) \geq \frac{\pi}{4} \tag{16}$$

$$g_{21} : \cos^{-1}\left(\frac{l_3^2 + l_4^2 - (l_1 + l_2)^2}{2l_3l_4}\right) \leq \frac{3\pi}{4} \tag{17}$$

$$g_{22} : \cos^{-1}\left(\frac{l_7^2 + l_8^2 - (l_5 + l_6)^2}{2l_7l_8}\right) \leq \frac{3\pi}{4} \tag{18}$$

2.3.4. Movimiento de marcha deseado

Con el propósito de que el punto (x_E, y_E) del mecanismo de marcha presente un movimiento preestablecido, se incorpora como restricción de igualdad la trayectoria deseada expresada en (19)-(20). Esta trayectoria tiene una forma semielíptica unida en su eje mayor por una recta de longitud $p_m = 0.08m$ (longitud del paso de la marcha del mecanismo). El eje menor de la trayectoria semielíptica es la altura máxima del paso $h_{pm} = 0.04m$. Se asume que la trayectoria está formada por $\bar{n} = \bar{n}_a + \bar{n}_b = 20$ coordenadas Cartesianas, donde $\bar{n}_a = 13$ y $\bar{n}_b = 7$ son las coordenadas correspondientes a la fase de apoyo y a la fase de balanceo, respectivamente. Se considera en el ciclo de marcha [18] que la fase de apoyo es del 65 % y la fase del balanceo es del 35 % en el movimiento de marcha propuesto.
El punto inicial del movimiento de marcha con respecto al sistema de coordenada inercial $X - Y$ es dado por $(\bar{x}_{ini} = 0.3m, \bar{y}_{ini} = -0.3m)$.

$$h_3 : \bar{x}_{E_i} = \begin{cases} \bar{x}_{ini} + (i-1)p_m/\bar{n}_a & \forall\ i = 1,\ ..., 13 \\ (\bar{x}_{ini} + p_m/2) + p_m/2 \cos\left(-\pi\frac{(13-i)n_b+1}{n_b^2+n_b-2}\right) & \forall\ i = 14,\ ..., 20 \end{cases} \tag{19}$$

$$h_4 : \bar{y}_{E_i} = \begin{cases} \bar{y}_{ini} & \forall\ i = 1,\ ..., 13 \\ \bar{y}_{ini} + h_{pm} \sin\left(-\pi\frac{(13-i)n_b+1}{n_b^2+n_b-2}\right) & \forall\ i = 14,\ ..., 20 \end{cases} \tag{20}$$

	l_1	$\cdots$	l_{15}	θ_1	θ_5	θ_2^1	$\cdots$	$\theta_2^{\bar{n}}$
p_{Max}	0.5	$\cdots$	0.5	2π	2π	2π	$\cdots$	2π

Tabla 1: Cota máxima en las variables de diseño.

2.3.5. Límites en las variables de diseño

Los límites en las variables de diseño se establecen como restricciones de desigualdad dadas en (21), considerando como las cotas mínimas $p_{Min} = \mathbf{0} \in R^{17+\bar{n}}$ y las máximas $p_{Max} \in R^{17+\bar{n}}$ proporcionadas en la Tabla 1.

$$p_{Min} \leq p \leq p_{Max} \tag{21}$$

2.4. Establecimiento del problema de optimización

El problema de optimización para el diseño del mecanismo de marcha del robot bípedo consiste en encontrar los parámetros cinemáticos óptimos del mecanismo p^* (3) de tal manera que se minimize el error J (4) generado entre el punto (x_E, y_E) del mecanismo y un movimiento de marcha preestablecido, sujeto al comportamiento cinemático del mecanismo (1)-(2) representado en forma compacta como $\theta = f(\theta_2^i,\ p)$, al criterio de Grashof (5)-(10), a la estructura triangular de los eslabones **A** y **B**, a la calidad de transmisión de movimiento (15)-(18), al movimiento de marcha deseado (19)-(20) y a cotas en las variables de diseño (21). Formalmente el problema de optimización se puede establecer como (22)-(25).

$$\underset{p^*}{Min}\ J \tag{22}$$

Sujeto a:

$$\theta^i = f(\theta_2^i,\ p)\ \forall i = 1,\ 2,\ ...,\ \bar{n} \tag{23}$$

$$g_j(p) \leq 0\ \forall\ j = 1,\ 2,\ ...,\ 22 \tag{24}$$

$$h_k(p) = 0\ \forall\ k = 1,\ ...,\ 4 \tag{25}$$

3. EVOLUCIÓN DIFERENCIAL

Se realizará una breve descripción del algoritmo de evolución diferencial (ED), para una explicación más detallada ver [19]. El algoritmo de evolución diferencial tiene los siguientes parámetros de control: el tamaño de la población NP, la constante de cruza CR y el factor de escala F. En el estado del arte existen reglas definidas para la selección apropiada de los parámetros de control, sin embargo, la selección adecuada depende las características del problema de optimización a resolver [20]. El algoritmo de evolución diferencial consta de las siguientes etapas:

1. **Iniciar a la población**. Para iniciar a la población de individuos, se deben de establecer los intervalos inferior(L) y superior(U) para cada parámetro de diseño. Para llevar acabo la inicialización del $j-\acute{e}simo$ parámetro del $i-\acute{e}simo$ vector padre $x_{j,i,0}$ en la generación inicial ($g=0$) se debe realizar lo descrito en (26).

$$x_{j,i,0} = rand\,(0,1) \cdot (b_{j,U} - b_{j,L}) \tag{26}$$

   donde: $g = 0, \ldots, g_{max}$, se refiere a las generaciones del algoritmo siendo g_{max} el número máximo de generaciones.

2. **Mutación**. El algoritmo de ED muta y recombina a la población para producir una población de NP vectores mutantes. La ecuación (27), muestra el proceso de mutación, donde $F \in (0,1)$, es un número real positivo que controla la velocidad en la que la población evoluciona. Además $r0, r1\ y\ r2$ son elegidos de una manera pseudoaleatoria de tal forma que se cumpla que $r0 \neq r1 \neq r2 \neq i$.

$$\mathbf{v}_{i,g} = \mathbf{x}_{r0,g} + F \cdot (\mathbf{x}_{r1,g} - \mathbf{x}_{r2,g}) \tag{27}$$

3. **Cruza**. El proceso de cruza consiste en transmitir la información de los parámetros de diseño entre los padres y el vector mutante al vector hijo $\mathbf{u}_{i,g}$. Para el caso particular se utiliza la cruza uniforme la cual se describe en (28), donde $C_r \in [0,1]$ controla la influencia entre los padres y el vector mutante para la generación del vector hijo.

$$u_{j,i,g} = \begin{cases} v_{j,i,g} & if\,(rand_j\,(0,1) \leq C_r \text{ or } j = j_{rand}) \\ x_{j,i,g} & \text{de otra manera.} \end{cases} \tag{28}$$

4. **Selección**. En esta etapa, se compara el desempeño del vector hijo $\mathbf{u}_{i,g}$ con el vector padre $\mathbf{x}_{i,g}$ con el propósito de conocer el individuo que pasará a la siguiente generación. Se utiliza un mecanismo de selección basada en restricciones (MSBR) propuesta en [21] que se establece de la siguiente manera: Una solución i pasa a la siguiente generación sobre una solución j, si cualquiera de las siguientes condiciones se cumplen:

   - Las soluciones i y j son factibles y la solución i domina a la solución j.
   - La solución i es factible y la solución j no lo es.
   - Las soluciones i y j son no factibles, pero la solución i tiene un menor número de restricciones violadas.

El pseudocódigo del algoritmo de evolución diferencial ED/RAND/1/BIN se muestra en el algoritmo (1).

Algoritmo 1 Algoritmo de evolución diferencial

Begin
  $G \leftarrow 0$
  Crear una población aleatoria $\vec{\mathbf{x}}_{i,G}$ $\forall_i = 1, \ldots, NP$
  Evaluar$J\left(\vec{x}_{i,G}\right), g\left(\vec{x}_{i,G}\right), \forall_i = 1, \ldots, NP$
  while G¡=Gmax **do**
    for i←1 to NP **do**
      Seleccionar aleatoriamente $\left\{r_0 \neq r_1 \neq r_2\right\} \in \vec{x}_G$.
      $j_{rand} \leftarrow randint\,(1, D)$
      for j←1 to D **do**
        Proceso de mutación y cruza
      end for
      Evaluar $J\left(\vec{u}_{i,G+1}\right), g\left(\vec{u}_{i,G+1}\right)$
      if $\vec{u}_{i,G+1}$es mejor que $\vec{x}_{i,G}$ **then**
        $\vec{x}_{i,G+1} \leftarrow \vec{u}_{i,G+1}$
      else
        $\vec{x}_{i,G+1} \leftarrow x_{i,G}$
      end if
    end for
    $G \leftarrow G + 1$
  end while
End

4. RESULTADOS

Para realizar el proceso de optimización es necesario establecer los parámetros necesarios de control para el algoritmo ED/RAND/1/BIN, además de la computadora que se utilizó para la simulación. Los cuales se mencionan a continuación: se escoge un número de individuos de la población $NP = 20$, el número máximo de generaciones $Gmax = 10,000,000$, el factor de escala se selecciona aleatoriamente en el intervalo $F \in [0.3, 0.9]$ por cada generación. Se realizó una corrida de diez casos de estudio, considerando diferentes factores de cruza CR de la siguiente manera $CR = \{0, 0.01, 0.05, 0.15, 0.30, 0.45, 0.60, 0.75, 0.9, 1\}$, con el propósito de analizar la influencia de la cruza en el problema en particular. Los resultados de simulación fueron realizados en una computadora de escritorio la cual contiene un procesador Intel core i7 @ 3.50 GHz con 16GB en RAM.

En la Tabla 2 se muestra la función de desempeño del mejor individuo en el algoritmo de ED al variar el factor CR. Se observa que el algoritmo obtiene mejores resultados conforme se decrementa CR. Sin embargo , se necesita que exista un valor $CR \neq 0$, ya que considerando $CR = 0$, como se muestra en el caso 1, los resultados obtenidos no son apropiados. Esto indica que para el problema en particular, el algoritmo de ED se beneficia cuando se presenta poca (mas no nula) posibilidad de escoger un elemento del

vector mutante en el proceso de cruza, i.e., los elementos del vector padre tienen mayor posibilidad de ser seleccionado para crear el vector hijo.
Por otra parte, en la Tabla 2 se incluyen el número de individuos no factibles en la última generación (ver INF). Se puede observar que el número de individuos no factibles (INF) en la última generación es inversamente proporcional al factor CR, i.e., $INF \propto 1/CR$. En consecuencia, para el problema en cuestión, la existencia de individuos no factibles promueve al algoritmo de ED a encontrar mejores solución en el espacio de búsqueda. Sin embargo, un porcentaje alto de individuos no factibles provoca la convergencia prematura del algoritmo a individuos no factibles.

Caso	CR	$J(Best)$	$INF(\%)$
1	0.00	$9.023235e-01$	95
2	0.01	$3.261120e-05$	20
3	0.05	$1.213627e-04$	10
4	0.15	$2.646371e-04$	0
5	0.30	$6.546498e-03$	0
6	0.45	$1.317872e-02$	0
7	0.60	$1.065419e-02$	0
8	0.75	$1.589855e-02$	0
9	0.90	$3.367453e-02$	0
10	1.00	$2.020309e-02$	0

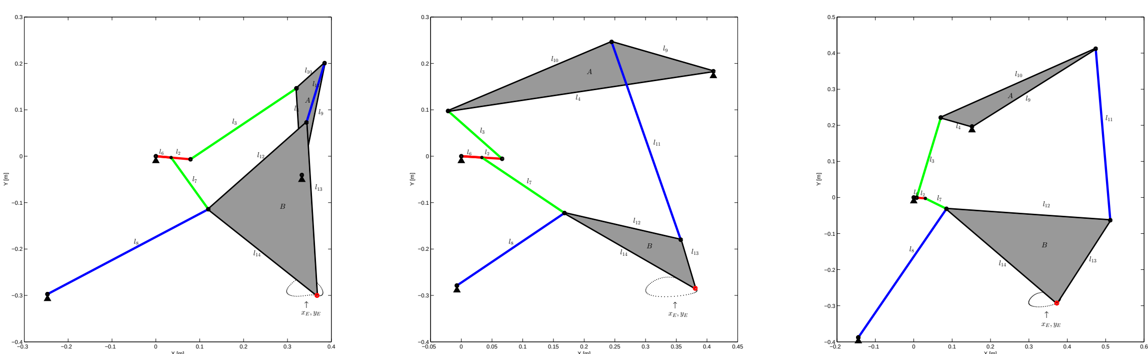
Tabla 2: Desempeño variando CR

En la Tabla 3 se muestran los valores de las variables de diseño que se obtuvieron por medio del algoritmo de evolución diferencial para los cuatro casos mas representativos, y en la Fig. 2 se detalla para tres casos, la representación gráfica de los mismos. Se observa que el caso 4 muestra un resultado que no es viable para la marcha, debido a que uno de sus puntos del eslabón l_8 se encuentra en $(-0.1442[m], -0.3878[m])$ estando por debajo de la trayectoria deseada (x_E, y_E), lo que provocaría que el mecanismo no pueda desplazarse debido a la fricción que existe entre el punto del eslabón l_8 y la superficie de contacto. Este mal comportamiento coincide con el hecho de que el caso 4 tiene el peor funcional con respecto a los casos 2 y 3.

$P^{\star}$

Caso	$l_1[m]$	$l_2[m]$	$l_3[m]$	$l_4[m]$	$l_5[m]$	$l_6[m]$	$l_7[m]$	$l_8[m]$	
1	0.1108	0.0156	0.2953	0.3744	0.4713	0.0455	0.1494	0.4768	
2	0.3352	0.0792	0.2858	0.1873	0.3865	0.03502	0.1399	0.4097	
3	0.4494	0.0667	0.1355	0.4403	0.2788	0.0336	0.1800	0.23474	
4	0.2485	0.0076	0.2307	0.0848	0.4138	0.0304	0.0621	0.4239	
Caso	$l_9[m]$	$l_{10}[m]$	$l_{11}[m]$	$l_{12}[m]$	$l_{13}[m]$	$l_{14}[m]$	$l_{15}[m]$	$\theta_1[rad]$	$\theta_5[rad]$
1	0.4697	0.4497	0.4988	0.2669	0.2918	0.3742	0.350686	1.0163	3.0354
2	0.2468	0.0840	0.1344	0.2916	0.3735	0.3095	0.46498	6.1618	4.0190
3	0.1773	0.3049	0.44100	0.19789	0.10733	0.2677	0.0386	0.4197	4.68692
4	0.3875	0.4462	0.4766	0.4278	0.2685	0.3884	0.1421	0.91334	4.3562

Tabla 3: Valores de las variables de diseño



a) Caso 2: CR=0.01 **b)** Caso 3: CR=0.05 **c)** Caso 4: CR=0.15

Figura 2: Conjunto de mecanismos de marcha sintetizados.

El desempeño en la generación de la trayectoria por el punto (x_E, y_E) para los casos 2 y 3 se muestra en la figura 3, donde se observa que el caso 2 genera la trayectoria deseada de una manera más exacta que el caso 3. Por lo tanto, el caso 2 es la mejor solución encontrada ya que presenta menor funcional (la trayectoria deseada se sigue de mejor manera que en los demás casos) y el mecanismo resultante es viable para producir el movimiento de marcha del robot bípedo.

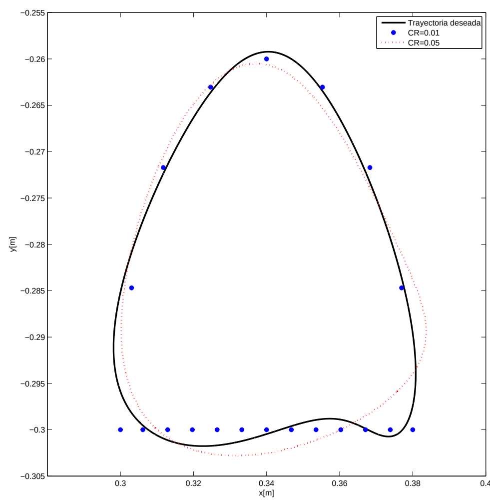


Figura 3: Trayectorias seguidas para el Caso 2 y Caso 3.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta como un problema de optimización el diseño de la extremidad de un robot bípedo con el propósito de reproducir el movimiento de marcha en el plano sagital del robot. La característica principal de la extremidad del robot bípedo es que es un mecanismo con un grado de libertad.
Resultados en simulación de la solución del problema con base en el algoritmo de evolución diferencial muestra lo siguiente: *i*) El problema es altamente no lineal, debido a las múltiples soluciones que se encontraron, *ii*) el proceso de cruza es un factor importante en la generación de mejores individuos y *iii*) el proceso de cruza y mutación de individuos no factibles promueven la diversidad de las soluciones. El mejor diseño resultante reproduce el movimiento de marcha del robot bípedo.

REFERENCIAS

[1] Pawan Mishra, Abhishek Ahuja and Tapas Shivpuri. Mechatronics-concept of past core competence of future, *International Journal of Power Control Signal and Computation (IJPCSC)* , Vol. **2**, pp. 88-93.

[2] Verne T. Inman, Henry J. Ralston and Frank Todd, *Human Walking*, Baltimore: Williams & Wilkins, (1981).

[3] Junjay Tan. Advancing Clinical Gait Through Technology and Policy, *Massachusetts Institute Of Technology*, (2006).

[4] Carlos Roberto Barrios Hernandez. Thinking parametric design: introducing parametric Gaudi, *Design Studies*, Vol. **27**, pp. 309 - 324, (2006).

[5] Nada Kherici and Yamina Mohamed Ben Ali. Using PSO for a walk of a biped robot, *Journal of Computational Science*, Vol. **5**, pp. 743 - 749, (2014).

[6] Sushant Sukumaran and R. Deivanathan. Optimum Linkage for Biped Mechanism, *Procedia Engineering*, Vol. **97**, pp. 1322 - 1331, (2014).

[7] G. Erdman, G.N. Sandor, *Mechanism Design: Analysis and Synthesis*, Prentice-Hall, vol. I (second ed.)., (1991).

[8] M. G. Villarreal-Cervantes, C. A. Cruz-Villar, J. Alvarez-Gallegos, E. A. Portilla-Flores. Kinematic dexterity maximization of an omnidirectional wheeled mobile robot: A comparison of metaheuristic and SQP algorithms, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, Vol. **9**, pp. 1-12, (2012).

[9] E. A. Portilla-Flores, E. Mezura-Montes, J. Alvarez-Gallegos, C. A. Coello-Coello, C. A. Cruz-Villar, M. G. Villarreal-Cervantes. Parametric reconfiguration improvement in non-iterative concurrent mechatronic design using an evolutionary-based approach, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol. **24**, pp. 757-771, (2011).

[10] Daniel de la Cruz-Muciño, Miguel Gabriel Villarreal-Cervantes, Edgar A. Portilla-Flores. Diseño de un manipulador móvil con energía mecánica óptima usando evolución diferencial, *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, pp. 1-12, (2014).

[11] A. Kanarachos and D. Koulocheris and H. Vrazopoulos. Evolutionary algorithms with deterministic mutation operators used for the optimization of the trajectory of a four-bar mechanism, *Mathematics and Computers in Simulation*, Vol. **63**, pp. 483 - 492, (2003).

[12] Rainer Storn and Kenneth Price. Differential Evolution-A simple and efficient adaptive scheme for global optimization over continuous spaces, *Journal of Global Optimization*, Vol. **11**, pp. 341-359, (1997).

[13] P.S. Shiakolas and D. Koladiya and J. Kebrle. On the optimum synthesis of six-bar linkages using differential evolution and the geometric centroid of precision positions technique, *Mechanism and Machine Theory*, Vol. **40**, pp. 319 - 335, (2005).

[14] Radovan R. Bulatović and Stevan R. Đorđević. On the optimum synthesis of a four-bar linkage using differential evolution and method of variable controlled deviations, *Mechanism and Machine Theory*, Vol. **44**, pp. 235 - 246, (2009).

[15] J. J. Uicker, G. R. Pennock, and J. E. Shigley, *Theory of Machines and Mechanisms*, Oxford University Press, vol. I (6a ed.)., (2010).

[16] F. Grashof, *Theoretische Maschinenlehre*, Leipzig: L. Voss , vol. II (6a ed.)., (1875).

[17] Shrinivas S Balli. Transmission angle in mechanisms (Triangle in mech), *Mechanism and Machine Theory*, Vol. **37**, pp. 175-195, (2002).

[18] Alvarez-Alvarez, A. and Trivino, G. and Cordon. Human Gait Modeling Using a Genetic Fuzzy Finite State Machine, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, Vol. **20**, pp. 205-223, (2012).

[19] Kenneth Price,Rainer M. Storn,Jouni A. Lampinen, *Differential Evolution: A Practical Approach to Global Optimization*, Springer, (2005).

[20] Wolpert, D.H. and Macready, W.G. No Free Lunch Theorems for Optimization, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, Vol. **1**, pp. 67-82, (1997).

[21] Kalyanmoy Deb. An efficient constraint handling method for genetic algorithms, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* , Vol. **186**, pp. 311 - 338, (2000).