

Optimización del Mecanismo de Entrada de una Transmisión de Variación Continua Comparando Evolución Diferencial y Forrajeo de Bacterias Modificado

¹Morales-Cruz Cuauhtémoc, ¹Suárez-Santillán Rosaura A. ^{2a}Hernández-Ocaña Betania, ^{2b}Mezura-Montes Efrén, ¹Portilla-Flores Edgar A. y ¹Villarreal-Cervantes Miguel G.

¹ Centro de Innovación y Desarrollo Tecnológico en Cómputo (CIDETEC-IPN)

U. Adolfo López Mateos, México D.F., 07700, México

^{2ab} Laboratorio Nacional de Informática Avanzada (LANIA) A.C.

Rébsamen 80, Centro, Xalapa, Veracruz, 91000, México

cmc.pp@live.com

Resumen

En este artículo se presenta la comparación de dos técnicas heurísticas para la obtención de los parámetros óptimos del mecanismo de entrada de una Transmisión de Variación Continua (TVC). Se formula un problema de diseño óptimo multi-objetivo considerando un modelo cinemático del mecanismo, así como funciones de rendimiento para el sistema y restricciones dimensionales. Se utilizan las metaheurísticas inspiradas en la naturaleza denominadas Evolución Diferencial (ED) y la de Forrajeo de Bacterias Modificada (MOMBFOA).

El conjunto de parámetros estructurales obtenidos por cada heurística son comparados para proponer un mecanismo con desempeño óptimo.

Palabras clave: Transmisión de Variación Continua, Optimización multi-objetivo, metaheurísticas, Evolución Diferencial, Forrajeo de Bacterias.

1. Introducción

En el contexto de ingeniería el proceso de diseño es un conjunto de etapas que se realizan con el fin de generar soluciones a un problema específico, sin embargo dicho proceso busca una solución que satisfice las necesidades establecidas en la primeras etapas, pero no necesariamente produce la mejor[1]. Debido a la naturaleza de los sistemas actuales, no existe una respuesta única que sea correcta para un problema de diseño, por lo que es preciso determinar las soluciones que entre otros aspectos produzcan una mejor relación costo-beneficio.

En forma general el proceso de diseño es recursivo, lo anterior con el fin de detectar fallas o agregar requerimientos que no son fáciles de visualizar inicialmente y así determinar las mejores soluciones posibles. Mientras mayor sea el número de

requerimientos y estos sean tomados en cuenta de forma simultánea, mejor será la solución encontrada.

Una transmisión es un mecanismo diseñado para conducir movimiento y fuerza. Las Transmisiones de Variación Continua (TVC) son mecanismos que permiten cambiar de manera continua la relación de transmisión con el fin de operar en el rango más eficiente del eje de entrada. Existen diferentes configuraciones de TVC's, las cuales se han diseñado considerando que deben tener un reducido número de componentes así como que sus elementos mecánicos deben ser convencionales [2]. Con esto se busca reducir el costo de mantenimiento y reparación. Desde el punto de vista de principios de funcionamiento es basto el trabajo desarrollado acerca de las TVC's, sin embargo el diseño óptimo de este tipo de sistemas representa un reto para los ingenieros de diseño.

Actualmente, existen técnicas que permiten encontrar soluciones buenas en tiempos razonables para problemas de optimización complejos. Y permiten tomar en cuenta todos los requerimientos planteados para esos problemas, cumpliendo así con la sinergia que la Mecatrónica exige. Tal es el caso de los algoritmos inspirados en la naturaleza donde se emula la evolución de las especies o el comportamiento colaborativo de algunos animales como aves, peces o insectos para buscar alimento, refugio o defenderse de ataques.

Las metaheurísticas se dividen en dos grandes grupos [3], los Algoritmos Evolutivos (AE) y de Inteligencia Colectiva (IC). Dentro de los AE más populares encontramos a los Algoritmos Genéticos [4], Estrategias Evolutivas [5], Programación Evolutiva [6], Programación Genética [7] y Evolución Diferencial [8]. Por otra parte, en los IC se

encuentra al algoritmo de cúmulo de partículas [9], Colonia de hormigas [10], y Forrajeo de Bacterias [11], por mencionar algunos. Todos estos algoritmos son propuestos para resolver problemas de optimización, sin embargo algunos presentan un mejor comportamiento en ciertos problemas.

En este trabajo se hace uso de una versión del algoritmo de Evolución Diferencial [12] y del algoritmo del Forrajeo de Bacterias Modificado para problemas Multi-Objetivos [13] con la finalidad de resolver el problema de optimización que se establece para el diseño óptimo de un mecanismo de entrada para una TVC tipo manivela-corredera propuesta en [14]. La aplicación de estas metaheurísticas es debido a que la naturaleza del problema complica el uso de técnicas de optimización clásica. El objetivo es demostrar que las heurísticas antes mencionadas ofrecen resultados competitivos al resolver el problema de optimización multi-objetivo.

El trabajo está estructurado de la siguiente forma: en la sección 2 se hace la descripción del mecanismo original propuesto en [15] y de las modificaciones que se han incorporado para mejorar su desempeño. En la sección 3 se presenta el problema de optimización multi-objetivo propuesto para el mecanismo de entrada de la TVC. En la sección 4 se realiza el análisis de los resultados obtenidos con ambas metodologías aplicadas al problema de la sección anterior. Finalmente, las conclusiones y los trabajos futuros se encuentran en la sección 5.

2. Descripción del Mecanismo

En [15] se presenta un equipo completo de transmisión con cambio de velocidades, el cual es una configuración de una TVC utilizando un mecanismo de manivela-biela-corredera, ver figura N° 1. Este último mecanismo es utilizado para conducir la energía rotacional del balancín en movimiento lineal en la corredera. Posteriormente, con ayuda de un par de trinquetes se rectifica el movimiento bidireccional de la corredera en movimiento rotacional de un solo sentido en el eje de salida.

Sin embargo el dispositivo propuesto en [15] posee algunas desventajas relacionadas no solo con su construcción sino también en su funcionamiento. Una de las desventajas más importante es la de no poder acoplar un motor de movimiento continuo para la aplicación del sistema completo en ambientes automatizados. Por lo que el proponer un mecanismo de entrada que permita dicho movimiento continuo ampliará el campo de aplicaciones del sistema.

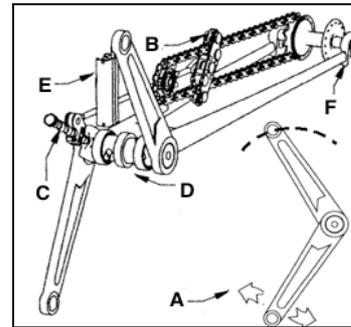


Fig. 1. Sistema unilateral A) movimiento de entrada, B) trinquetes, C) Manivela, D) eje pedalier. E) cambio de velocidades, F) eje de salida.

En [14] se propone y evalúan dos mecanismos de entrada. Estos son: un mecanismo de Cuatro Barras y un mecanismo de Brazo Oscilante, mostrados en la figura N° 2. Se obtiene el modelo cinemático de ambas propuestas con el fin de evaluar justa y detalladamente su comportamiento. Este modelado matemático será retomado en secciones posteriores como un simulador del comportamiento de entrada de la TVC.

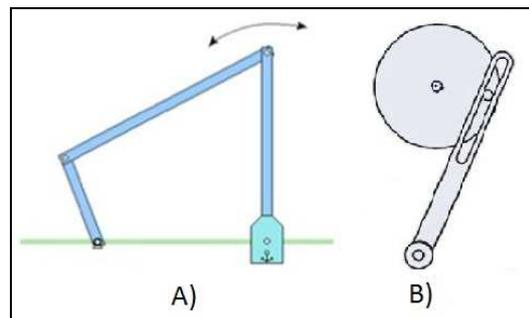


Fig. 2. Mecanismos de entrada A) 4 barras. B) Brazo Oscilante.

Como resultado se obtuvo una posible configuración para la TVC, la cual se muestra en la figura N° 3. En esta distribución se acopla el mecanismo de entrada seleccionado al mecanismo manivela-biela-corredera. Sin embargo, un conjunto de valores óptimos para dicha estructura mecánica no se obtienen.

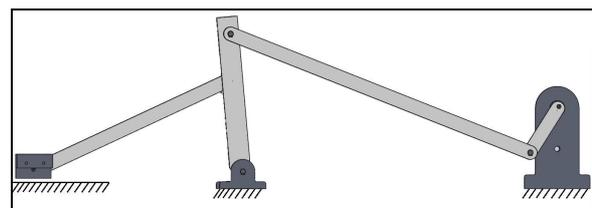


Fig. 3. Configuración de la nueva TVC.

3. Problema de Optimización Multi-Objetivo

Debido a que se desea conservar el principio de funcionamiento de la TVC, el problema de optimización se establece para el mecanismo de entrada del sistema completo, por lo que se proponen y desarrollan funciones de mérito y restricciones del sistema que permitan obtener un conjunto de dimensiones óptimas.

3.1 Funciones de mérito

Para este problema se toman en cuenta dos funciones objetivo. La primera incorpora los parámetros estructurales para obtener una configuración que maximice el desplazamiento angular del balancín. Y de esta manera proporcione un mayor desplazamiento lineal de la corredera del mecanismo acoplado posteriormente. Esta función, Φ_1 , se representa en (1)

$$\Phi_1 = \theta_{4 \max} - \theta_{4 \min} \quad (1)$$

La segunda función de mérito, (2), involucra parámetros de desempeño y representa la desviación del ángulo de transmisión μ (ver figura N° 4), por lo tanto se busca minimizar.

$$\Phi_2 = \left(\mu_{\max} - \frac{\pi}{2} \right)^2 + \left(\mu_{\min} - \frac{\pi}{2} \right)^2 \quad (2)$$

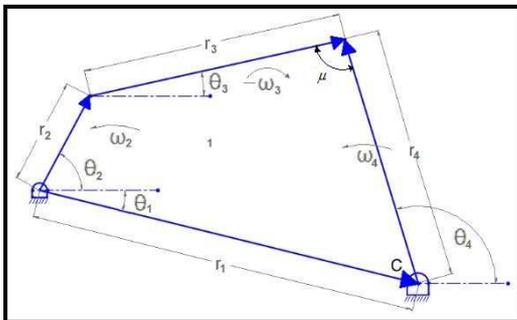


Fig. 4. Configuración del mecanismo de entrada de la TVC.

3.2 Restricciones

El mecanismo de Cuatro Barras es uno de los sistemas mecánicos más estudiados. Como se sabe, el desplazamiento angular que genera la trayectoria del balancín está relacionada con la magnitud de las cuatro barras (r_1 , r_2 , r_3 y r_4), así como del ángulo formado por la posición del eje de entrada y el eje del balancín θ_1 (ver figura N° 4).

Por otro lado la ley de Grashof dice: para un mecanismo planar de cuatro barras, la suma de la longitud de la barra más corta y la más larga no debe ser mayor que la suma de las otras dos barras, si se desea que un elemento pueda girar completamente [1], como sucede en este caso. Para este problema la barra más corta es r_2 , la más larga es r_3 y las dos restantes son r_1 y r_4 , la ley de Grashof en términos de este problema se plantea en (3).

$$r_2 + r_3 \leq r_1 + r_4 \quad (3)$$

Para asegurar que el método utilizado genere configuraciones que cumplan con la ley de Grashof se debe cumplir que:

$$r_1 \leq r_3 \quad (4)$$

$$r_4 \leq r_3 \quad (5)$$

Otra restricción importante es la máxima longitud que los eslabones pueden llegar a medir. Debido al espacio disponible, se propone un máximo de 0.5 m. La longitud mínima está en función de la facilidad de construcción, puesto que mientras más pequeña se una pieza su maquinado es más costoso y complicado, considerando 0.05 m, la longitud mínima.

Sin embargo, para el eslabón r_4 , la longitud mínima aceptada es 0.2 m puesto que esta barra determinará el rango de variación continua que el sistema puede proporcionar y una longitud menor limitaría en gran manera la posibilidad de variar la velocidad de salida. Por lo tanto las restricciones de dimensión son las siguientes:

$$0.05 \leq r_1 \leq 0.5 \quad (6)$$

$$0.05 \leq r_2 \leq 0.5 \quad (7)$$

$$0.05 \leq r_3 \leq 0.5 \quad (8)$$

$$0.2 \leq r_4 \leq 0.5 \quad (9)$$

El ángulo formado entre la horizontal y la barra de referencia (r_1), está limitada a permanecer entre $+45^\circ$ y -45° , por consiguiente:

$$45^\circ \leq \theta_1 \leq -45^\circ \quad (10)$$

Finalmente, el problema de optimización se expresa a continuación:

$$\Phi(x, c\bar{p}^*) = \text{opt}(-\Phi_1, \Phi_2)^T \quad (11)$$

Dónde:

$$\vec{p}^* = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5]^T = [r_1, r_2, r_3, r_4, \theta_1]^T$$

Siendo Φ_1 y Φ_2 las mencionadas en las Eq. (1) y (2) respectivamente y sujeto a las restricciones:

$$g_1 = x_2 + x_3 - (x_1 + x_4) \leq 0 \quad (13)$$

$$g_2 = x_1 - x_3 < 0 \quad (14)$$

$$g_3 = x_4 - x_3 < 0 \quad (15)$$

$$g_{i+3} = x_i - 0.5 \leq 0 \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (16)$$

$$g_{i+7} = x_i - 0.05 \geq 0 \quad i = 1, 2, 3 \quad (17)$$

$$g_{11} = x_4 - 0.2 \geq 0 \quad (18)$$

$$g_{12} = x_5 - \frac{\pi}{4} \leq 0 \quad (19)$$

$$g_{13} = x_5 - \frac{-\pi}{4} \geq 0 \quad (20)$$

$$g_{14} = \frac{\pi}{4} - \mu(x, t) \leq 0 \quad (21)$$

Y:

$$h_1 = \pi - (x_{5_{\min}} + x_{5_{\max}}) = 0 \quad (22)$$

4. Análisis de resultados

Los resultados de ambos algoritmos para el problema de optimización multi-objetivo de la TVC son de 10 ejecuciones independientes con 500,000 evaluaciones de la función objetivo. El valor de los parámetros corresponde al mismo utilizado en el trabajo previo [13] esto con el objetivo de llevar a cabo la comparación del comportamiento de los algoritmos.

En la figura N° 5 se presenta el frente de Pareto [16] de ambos algoritmos (soluciones factibles no dominadas de cada algoritmo). Donde se puede observar que gran parte de las soluciones del ED son dominadas por MOMBFOA. Con el fin de establecer claramente dicha dominancia se utiliza la métrica Two Set Coverage, sobre las soluciones del frente acumulado de la figura N° 5, la métrica compara la cobertura de dos conjuntos de soluciones calculando el número de soluciones producidas por el algoritmo de ED que dominan a las de MOMBFOA y viceversa. Cuando la métrica da como resultado 1 significa que todas las soluciones fueron dominadas por el conjunto de soluciones con el que fue comparado, de lo contrario el valor es 0. En la tabla N° 1 se presenta el resultado de la métrica.

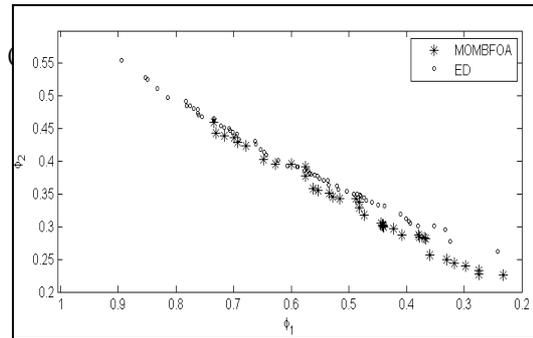


Fig.5. Frente de soluciones de los algoritmos ED y MOMBFOA

Se puede observar en la tabla N° 1 que MOMBFOA es quien domina mayormente las soluciones de ED, mientras que ED tiene un valor cercano a cero, lo cual corresponde a que domina un número muy pequeño de soluciones de MOMBFOA.

Algoritmos	Coverage
MOMBFOA-ED	0.6878
ED-MOMBFOA	0.0156

Tab.1. Resultados de la métrica Two Set Coverage

Desde el punto de vista mecánico las soluciones que favorecen la construcción del mecanismo se encuentran en el espacio de (0.4, 0.8) para la ϕ_1 y (0.3, 0.5) para la ϕ_2 . En este intervalo las soluciones presentan un mayor compromiso con las funciones de mérito, por lo tanto, tales soluciones presentan un mejor desempeño para la generación de movimiento así como para la calidad de funcionamiento de la TVC. En la figura N° 6 se marca con un recuadro de líneas punteadas el intervalo mencionado anteriormente, donde se encuentra que las soluciones de MOMBFOA son de mayor presencia dominando en gran parte a las de ED.

Una solución de cada algoritmo (ver tabla N° 2) es probada en el simulador de movimiento de la TVC, donde la solución pertenece al intervalo de mayor compromiso. Los valores de entrada para el simulador son los contenidos en el vector de variables de decisión x_1, x_2, x_3, x_4 y x_5 .

Algoritmos	X_1/m	X_2/m	X_3/m	X_4/m	X_5/rad
MOMBFOA	0.4499	0.0865	0.4999	0.2208	-0.2053
ED	0.4492	0.0842	0.4527	0.2034	-0.1897

Tab.2. Soluciones dentro del rango que favorece la construcción del TVC

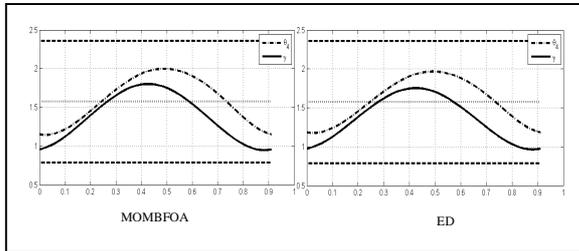


Fig. 6. Grafico resultante del simulador del comportamiento del TVC

Por otro lado, el ángulo θ_4 debe tener un desplazamiento alrededor del eje vertical. Esto es, tomando como referencia un ángulo de 90° , se debe tener una variación positiva y negativa de dicho ángulo, al mismo tiempo el ángulo μ debe oscilar en el eje horizontal alrededor de un valor de 90° para impulsar con mayor fuerza a la barra donde está el ángulo θ_4 y generar un movimiento óptimo. En el caso del ángulo θ_4 , la variación tiene como límites los valores de -45° y 45° , es decir, entre 135° y 45° con respecto al eje horizontal; valores descritos en la sección 3.

Aunque ambos algoritmos presentan soluciones factibles de construir, la solución más competitiva es aquella donde la onda tiene una mayor amplitud pico a pico y no excede los límites establecidos (-45° por debajo del punto de desplazamiento y 45° por encima del punto de desplazamiento).

Como se puede observar en la figura N° 6 la señal de MOMBFOA presenta una mayor amplitud para el caso de θ_4 . El valor mínimo de la señal se encuentra cercano a los 53° y el máximo alrededor de 124° . Con respecto a μ los algoritmos ED y MOMBFOA son similares. Sin embargo por amplitud en el ángulo θ_4 , MOMBFOA es mejor.

5. Conclusiones

En este artículo se realizó la comparación de dos técnicas heurísticas para la resolución de un problema de diseño mecánico establecido mediante un problema de optimización multi-objetivo.

Se comprobó que el desempeño de ambos algoritmos provee soluciones aceptables para el diseño óptimo del TVC de acuerdo a lo esperado por el diseñador y con un costo computacional moderado (500,000 evaluaciones) al producir soluciones

factibles del mecanismo en estudio. Sin embargo, las soluciones del algoritmo MOMBFOA presentan un mejor desempeño tanto para la generación de movimiento como para la calidad de funcionamiento del mecanismo del TVC lo que favorece su construcción.

En trabajo futuro, se construirá el prototipo de la Transmisión de Variación Continua con el fin de corroborar que el mecanismo de entrada seleccionado y los valores obtenidos del problema de optimización multi-objetivo son los adecuados.

6. Agradecimientos

Todos los autores agradecen el apoyo a la Secretaria de Investigación y Posgrado del Instituto Politécnico Nacional a través del proyecto SIP-20111027. El autor 2a agradece el apoyo otorgado por CONACyT para realizar sus estudios de maestría en LANIA. El autor 2b agradece el apoyo otorgado por CONACyT a través del proyecto número 79809.

Referencias

- [1] Robert L. Norton, *Diseño de máquinas*. Prentice-Hall, 1999.
- [2] De Silva C. W., Schultz M., Dolejeis E., *Kinematic Analysis and Design of a Continuously Variable Transmission*. Mech. Mach. Theory, vol. 29, No 1, pp. 149-167, 1994.
- [3] Engelbrecht, A.P., *Computational Intelligence. An Introduction*, 2nd ed., John Wiley & Sons (2007).
- [4] Eiben, A., and Smith, J.E., *Introduction to Evolutionary Computing*, Natural Computing Series, Springer Verlag (2003).
- [5] Schwefel, H.P. (ed.) *Evolution and Optimization Seeking*, New York: Wiley (1995).
- [6] Fogel, L.J., *Intelligence Through Simulated Evolution. Forty years of Evolutionary Programming*, New York: John Wiley & Sons (1999).
- [7] Koza, J.R., Keane, M.A., Streeter, M.J., Mydlowec, W., Yu, J., and Lanza, G., *Genetic Programming IV: Routine Human-Competitive Machine Intelligence*, Hingham, MA, USA: Kluwer Academic Publishers (2003).

- [8] Price, K., Storn, R., and Lampinen, J., *Differential Evolution: A Practical Approach to Global Optimization*, Natural Computing Series, Springer-Verlag (2005).
- [9] Kennedy, J., and Eberhart, R.C., *Swarm Intelligence*, UK: Morgan Kaufmann (2001).
- [10] Dorigo, M., Maniezzo, V., and Coloni, A. (1996), “*The Ant System: Optimization by a Colony of Cooperating Agents*,” IEEE Transactions of Systems, Man and Cybernetics-Part B, 26(1), 29–41.
- [11] Passino, K. (2002), “*Biomimicry of bacterial foraging for distributed optimization and control*,” IEEE Control Systems Magazine, 22(3), 52–67.
- [12] Portilla-Flores, E.A., Mezura-Montes, E., Alvarez Gallegos, J., Coello, C.A.C., Cruz-Villar, C.A., and Villareal-Cervantes, M.G. (2011), “*Parametric Reconfiguration Improvement in Non-Iterative Concurrent Mechatronic Design Using an Evolutionary-Based Approach*,” Engineering Optimization of Artificial Intelligence, 24(5), 757–771.
- [13] Betania Hernández-Ocaña, Efrén Mezura-Montes and Edgar Alfredo Portilla Flores, *Mechatronic Multi-Objective Optimization Using a Modified Bacterial Foraging Optimizer*, in Proceedings of the I Congreso Internacional de Electrónica, Instrumentación y Computación, Minatitlán, Veracruz, June 2011.
- [14] Cuauhtemoc Morales-Cruz, Rosaura A. Suarez-Santillan, Edgar A. Portilla-Flores, Miguel G. villareal-cervantes and Alejandro Escamilla-Navarro, *Selección del mecanismo de Entrada para una Transmisión de Variación Continua tipo Manivela-Corredera*, in Proceedings of the I Congreso Internacional de Ingeniería Electrónica, Instrumentación y Computación, Minatitlán, Veracruz, June 2011.
- [15] Pardo Gómez M. T. and Sanchez Ceballos M., *Equipo completo de transmisión unilateral para pedaleo basculante con sistema de cambio de velocidades*. Solicitud de patente 200401700, Oficina Española de Patentes y Marcas, Abril 1, 2006.
- [16] Deb, K., *Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms*, John Wiley Sons, LTD (2002).