

Optimización de la Energía Consumida por las Extremidades de un Robot Caminante

Calderón López Hugo Enrique ^{a,*}, Bedolla Hernández Jorge ^b, Szwedowicz Wasik Dariusz ^a

^a Departamento de Ingeniería Mecánica, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Interior Internado Palmira s/n, 62490, Morelos, México.

^b Departamento de Metal Mecánica, Instituto Tecnológico de Apizaco, Av. Instituto Tecnológico s/n, 90300, Tlaxcala, México.

Resumen

Se presenta un método de optimización multi-objetivo, aplicado al funcionamiento de las cadenas cinemáticas abiertas, analizando el caso del movimiento de una extremidad de un robot caminante electro-hidráulico. Para demostrar la efectividad del método propuesto, se aplica en dos casos de estudio. El primer caso muestra el movimiento de la extremidad sin obstáculos en su espacio de trabajo, y en el segundo se incluye la evasión de un obstáculo. Se usan como criterios de optimización, la minimización del desplazamiento angular de los eslabones con mayor consumo de energía y la minimización del valor absoluto máximo de la aceleración angular de los eslabones. En ambos casos se determinó una trayectoria que disminuye el consumo de energía en más de un 25 % respecto de otros métodos planteados en la literatura, a la vez que se mejora el comportamiento dinámico del sistema evitando variaciones en la velocidad y la aceleración durante la fase de transferencia, además de aumentar la precisión y exactitud de la posición del pie. *Copyright* © 2015 CEA. Publicado por Elsevier España, S.L.U. Todos los derechos reservados.

Palabras Clave: Planificación y seguimiento de trayectorias, robots móviles y vehículos autónomos inteligentes, cinemática de robots, dinámica de robots, control de fuerzas.

1. Introducción

Los robots móviles han tenido un gran auge en los últimos años incrementando su desarrollo e implementación. Uno de sus principales problemas es la energía disponible en sus baterías que limita su tiempo de operación. Investigadores en todo el mundo se han dado la tarea de desarrollar diferentes metodologías que permitan incrementar el rendimiento de los robots a la vez que les proporcione independencia en su movimiento.

En (Silva y Machado, 2011) presentaron una revisión bibliográfica de las diferentes metodologías implementadas en la optimización de robots caminantes, encontrando que existen diferentes aspectos a considerar al optimizar estos sistemas como la eficiencia energética, la estabilidad, la velocidad de desplazamiento, el confort, la movilidad y el impacto ambiental. En esa se determinó que mejorar la eficiencia energética es el principal objetivo y que existen dos metodologías para este fin. La primera se implementa en la etapa de diseño utilizando como criterios de optimización a la geometría y material de los elementos estructurales y al sistema de transmisión de potencia. La segunda se implementa en la etapa de operación teniendo a la energía como el principal criterio de optimización.

Existen dos formas de aumentar el rendimiento de un robot caminante en su etapa de operación, la primera es mediante la locomoción libre y la segunda es mediante el desplazamiento libre de las extremidades.

Se estudia el caso particular del movimiento libre de una extremidad de un robot caminante, considerando que la configuración de la extremidad apoyada en el piso requiere otro tipo de análisis, en el que se modele al sistema como una cadena cinemática cerrada.

En este trabajo se propone un método para calcular una trayectoria a seguir por la extremidad de un robot caminante, capaz de minimizar el consumo de energía, a la vez que se disminuyen el número e intensidad de los tirones causados por las variaciones de velocidad y aceleración angular presentes durante la fase de transferencia. En el planteamiento presentado la extremidad del robot se considera como una cadena cinemática abierta, y se prueban condiciones de trabajo con y sin obstáculo.

Se emplea el método de los algoritmos genéticos, y se usa como criterios de optimización la minimización del desplazamiento angular de los eslabones con mayor consumo de energía y la minimización del valor absoluto máximo de la aceleración angular de los eslabones.

1.1. Locomoción Libre

La locomoción libre es cuando se le permite al robot mover sus extremidades de manera independiente sin tener una secuencia. En (Vargas, 1999) se implementó este concepto al

* Autor en correspondencia.

Correos electrónicos: hec1555@hotmail.com (Hugo E. Calderón),
1jbedolla@itapizaco.edu.mx (Jorge Bedolla),
d.sz@cenidet.edu.mx (Dariusz Szwedowicz)

movimiento de un robot hexápodo para que se desplazara a través de terrenos irregulares. Algunas mejoras a ese trabajo fueron propuestas por (Gorriostieta y Varga, 2004 y 2008) presentando un algoritmo que permite a un robot hexápodo, realizar su desplazamiento de manera autónoma, efectuando movimientos no preestablecidos, ni periódicos y utilizando como trayectoria de las extremidades una parábola. En ese trabajo se consideraron la estabilidad del cuerpo al caminar y el consumo de energía,

En el trabajo de (Gew y Hyeon, 2009) se propone la implementación de trayectorias elípticas para optimizar el desplazamiento de un robot caminante cuadrúpedo, disminuyendo el consumo de energía y garantizando la estabilidad del robot al caminar.

Por su parte, (García et al., 2012) ponen énfasis en evaluar el rendimiento del movimiento de la extremidad de un robot hexápodo, implementando un algoritmo para generar trayectorias eficientes, utilizando un perfil parabólico como base de las trayectorias. Por otro lado, (Zapata, 2013) desarrolló un algoritmo capaz de generar una secuencia de movimientos eficientes, lo cual permite el desplazamiento de un robot caminante hexápodo de manera libre a través de superficies irregulares y poco estables, teniendo como base para la trayectoria una parábola.

Se puede observar en estos trabajos que se omite la importancia de la fase de transferencia de las extremidades. En los cuales se implementan trayectorias basadas en perfiles predefinidos como elipses y parábolas, los cuales implican un mayor consumo de energía. Incluir el cálculo de la fase de transferencia de las extremidades permitiría optimizar el consumo de energía, y en consecuencia aumentar el tiempo de operación, con lo que se proporciona una mayor autonomía al robot caminante en su desplazamiento.

1.2. Desplazamiento Libre de las Extremidades

En (Gonzalez et al., 2009) desarrollaron una metodología que minimiza la energía consumida por un robot caminante hexápodo al desplazarse por terrenos irregulares, utilizando como función objetivo a la suma de la energía mecánica consumida por cada articulación y las pérdidas de energía que se generan. Sin embargo, en su trabajo se presentan solamente resultados sobre el movimiento del cuerpo, dejando de lado el movimiento de las extremidades cuando actúan como cadenas cinemáticas abiertas, lo cual ocurre cuando éstas no tienen contacto con el suelo durante la fase de transferencia.

A continuación se presentan algunos de los trabajos más relevantes encontrados en la literatura sobre la optimización de la energía en cadenas cinemáticas abiertas, los cuales optimizan el consumo de energía durante la fase de transferencia.

Un ejemplo de esto, es el algoritmo genético desarrollado por (Tian y Collins, 2004) el cual genera trayectorias que evaden obstáculos, disminuyen el tiempo de operación y minimizan el consumo de energía, utilizando como función objetivo minimizar el desplazamiento angular total del sistema,

Por su parte, (Solteiro et al., 2007), utilizó diversas variables como son el desplazamiento y la velocidad angular, la distancia y la velocidad del efector final, además de la potencia total del sistema como criterios de optimización, para calcular una trayectoria que minimizara el consumo de energía y que permitiera al manipulador desplazarse por el espacio de trabajo sin colisionar. Otra variable utilizada para optimizar el consumo de energía es la potencia, implementada por (Pérez et al., 2010) para generar trayectorias con un bajo consumo de energía. El

trabajo presentado por (Rodrigues et al., 2010) logró incrementar el rendimiento del sistema al maximizar la precisión del manipulador y disminuir el consumo de energía, utilizando como criterios de optimización la matriz Jacobiana y la potencia total del sistema. Un gran avance en este tema fue el trabajo presentado por (Saravanan et al., 2010) el cual permite generar trayectorias capaces de evitar obstáculos fijos y móviles, además minimiza el tiempo de operación, el consumo de energía y los tirones en las articulaciones, implementando como criterios de optimización el tiempo, el promedio del torque, el promedio de la aceleración, el promedio del jerk y la matriz Jacobiana. Autores como (Ayten et al., 2010; Gregory, 2012) también han utilizado el promedio del torque como función objetivo para minimizar el consumo de energía, obteniendo buenos resultados.

La distancia del efector final es otra variable que ha sido utilizada para minimizar el tiempo de operación y el consumo de energía en trayectorias punto a punto, como lo muestra el trabajo de (Shankar y Kaur, 2011).

Algunos de los criterios utilizados en la literatura son opuestos como es el caso del desplazamiento angular y la distancia recorrida (Calderón et al., 2012), por lo que sus resultados dependen de los pesos asignados a esos criterios, y dado que la mayoría de los autores no menciona estos pesos o cómo pueden ser determinados, no es posible establecer una comparación directa entre los mismos.

En este estudio se propone un nuevo método multi-objetivo capaz de generar una trayectoria a seguir por la extremidad de un robot caminante que minimice el consumo de energía, a la vez que disminuye el número e intensidad de los tirones causados por las variaciones de velocidad y aceleración angular que pudieran ocurrir durante su funcionamiento. Se usa como criterios de optimización el desplazamiento angular de los eslabones con mayor consumo de energía, y el valor absoluto máximo de la aceleración angular de los eslabones. Además se propone una alternativa simplificada para determinar el valor de los pesos asignados a cada criterio.

2. Planteamiento del Problema

Los robots caminantes están limitados por la energía disponible en sus baterías. Esto aunado a su programación, la cual está diseñada para realizar movimientos predefinidos que permitan a la extremidad evadir obstáculos con una altura determinada, hacen que el robot presente un mayor movimiento del mínimo requerido para desplazarse, generando un mayor consumo de energía como se puede apreciar en los resultados del primer caso de estudio, donde la trayectoria parabólica tiene un desplazamiento total 4 veces mayor y consume hasta 260 veces más energía que las otras dos trayectorias.

Existen en la bibliografía metodologías basadas en la energía que permiten generar trayectorias que optimizan el consumo de ésta, como las de (Pérez et al., 2010; Rodrigues et al., 2010; Gonzalez et al., 2011). Sin embargo, las trayectorias generadas utilizando a la energía como criterio de optimización presentan un comportamiento errático, que puede llegar a dañar al sistema por el incremento del número e intensidad de los tirones, causado por las variaciones de velocidad que se llegan a presentar durante la fase de transferencia en las trayectorias calculadas.

En este trabajo se propone un método que determine la mejor trayectoria, con la que disminuya el consumo de energía y se mejore el comportamiento dinámico del sistema, evitando

variaciones de velocidad y aceleración durante la fase de transferencia de la extremidad del robot caminante

3. Método de Optimización

Como método de optimización se implementa un algoritmo genético, el cual es adaptativo basado en el proceso genético de los organismos vivos, utilizado para la resolución de problemas de búsqueda y optimización. Este método genera n número de soluciones e imita el proceso de selección natural por m número de generaciones, seleccionando las mejores soluciones de cada generación, con base en una función objetivo y mediante un operador de cruce desarrolla una nueva generación de resultados. La evolución de estos valores hacia un óptimo depende de la codificación del sistema.

Una de las principales ventajas de este método, es que puede trabajar con problemas en los cuales no se cuente con una ecuación para derivar, o su solución sea muy compleja, como es el caso del cálculo de trayectorias donde existen una infinidad de posibilidades y muchas de ellas no pueden ser descritas mediante una ecuación.

El esquema de funcionamiento del algoritmo genético propuesto se muestra en la figura 1, y es el siguiente: se genera de manera aleatoria una población inicial de posibles soluciones con una codificación diferente a la binaria; se determina su dinámica inversa mediante la formulación de Newton – Euler (Calderón *et al.*, 2012); se evalúa cada uno de los posibles resultados con base en una función objetivo; se seleccionan algunos individuos de la población como progenitores buscando aleatoriedad en el proceso con la finalidad de tener un mayor espacio de búsqueda y no enfocarse en óptimos locales; se aplican operadores de cruce y mutación a estos progenitores para desarrollar una nueva generación de soluciones; y se itera hasta cumplir con un criterio, el cual por lo general es un número determinado de generaciones.

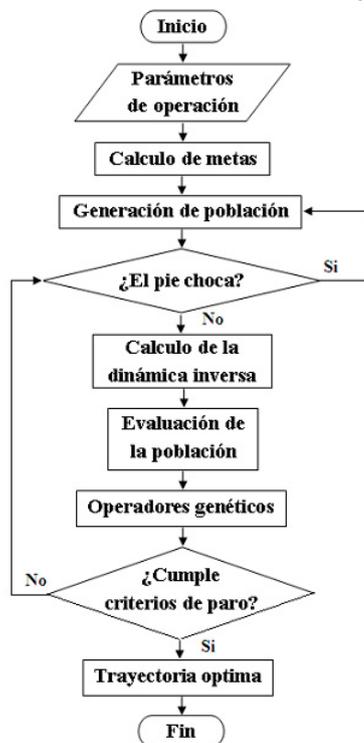


Figura 1: Diagrama de bloques del algoritmo genético.

Con la finalidad de aumentar la precisión y exactitud de la posición del pie, aspectos que generalmente no consideran los trabajos presentados en la literatura, se implementa una codificación diferente a la binaria basada en números enteros, con la resolución de control como múltiplo de los valores calculados, lo que permitirá que los valores generados por el algoritmo genético puedan ser siempre alcanzados por el sistema.

Los algoritmos genéticos cuentan con una serie de operadores básicos para darle aleatoriedad al proceso de cálculo, estos operadores son la selección, el cruce y la mutación de individuos. Para este trabajo se implementará como operador de selección al método de la ruleta (Melanie, 1996), permitiendo que los individuos con las mejores características tengan una mayor posibilidad de ser elegidos. Se utiliza el cruce basado en un punto, dividiendo el valor del cromosoma en dos porcentajes al azar los cuales serán sumados con los porcentajes del otro individuo para generar dos nuevos individuos. El operador de mutación en lugar de sustituir un cromosoma de la cadena genética como se hace cuando se trabaja con una codificación binaria, generará un nuevo valor del genotipo para los individuos mutados.

3.1. Criterios de Evaluación

En el presente trabajo se utilizan como criterios de optimización el desplazamiento angular de los eslabones con mayor consumo de energía, y el valor máximo de la aceleración angular de los eslabones. Lo anterior con base en un análisis previo (Calderón *et al.*, 2012), en el cual se analizaron todas las variables que intervienen en el funcionamiento de las cadenas cinemáticas abiertas, como son: el peso y geometría de los eslabones, la fricción, la influencia de los actuadores y del sistema de transmisión, el desplazamiento angular, la velocidad angular, la aceleración angular, el jerk, la distancia recorrida por el pie, su velocidad y aceleración, el tiempo de operación, el torque necesario para mover los eslabones, y la potencia requerida por el sistema durante la fase de transferencia. Concluyendo que el desplazamiento angular y la aceleración angular son las principales variables que permiten identificar a las trayectorias con el mejor funcionamiento, aquellas que consumen menos energía y que además presentan el mejor comportamiento dinámico del sistema, eliminando variaciones de velocidad, aceleración y jerk. Además, determinadas variables como el peso y geometría de los eslabones, los actuadores y el sistema de transmisión, solo pueden ser consideradas como criterios de optimización en la fase de diseño del robot, ya que cualquier modificación de éstas representa un rediseño del sistema, lo cual no es el propósito de esta investigación.

La función objetivo está basada en la unión de dos técnicas de optimización multi-objetivo: el método de la suma ponderada y el método de programación de metas. Implementando estos dos métodos, se logró manejar valores adimensionales en la función objetivo y obtener un mejor control de los pesos. La función objetivo (F_o) se presenta en (1).

$$F_o = w_1 f_d + w_2 f_a \quad (1)$$

Donde, w_1 y w_2 son los pesos asignados a los criterios de optimización basado en los intereses del usuario, f_d es el criterio de optimización basado en el desplazamiento angular de los eslabones, y f_a es el criterio de optimización basado en la aceleración angular de los eslabones.

El criterio de optimización f_d basado en el desplazamiento angular de los eslabones, permite disminuir el consumo de energía del sistema, se presenta en (2).

$$f_d = \sum_{i=1}^3 w_{d,i} \left| \frac{\theta_{i,\min}}{\theta_{i,T}} \right| \quad (2)$$

Donde, i es el eslabón que se está analizando, $w_{d,i}$ es el peso asignado al desplazamiento angular de la articulación i , $\theta_{i,\min}$ es el desplazamiento angular mínimo de la articulación i , y $\theta_{i,T}$ es el desplazamiento angular total de la articulación i .

El desplazamiento angular mínimo de la articulación i ($\theta_{i,\min}$), se determina con base en las posiciones inicial y final de cada articulación, se presenta en (3).

$$\theta_{i,\min} = \left| \theta_{i,f} - \theta_{i,o} \right| \quad (3)$$

Donde, $\theta_{i,o}$ es el valor de la posición angular inicial de la articulación i , y $\theta_{i,f}$ es el valor de la posición angular final de la articulación i .

El desplazamiento angular total de la articulación i ($\theta_{i,T}$), se determina con base en las posiciones angulares que tiene que adoptar cada articulación durante su fase de transferencia por la trayectoria calculada, se presenta en (4).

$$\theta_{i,T} = \sum_{j=1}^n \left| \theta_{i,j} - \theta_{i,j-1} \right| \quad (4)$$

Donde, n es el número de divisiones consideradas para caracterizar la trayectoria, $\theta_{i,j}$ es el valor de la posición angular de la articulación i en la división n , y $\theta_{i,j-1}$ es el valor de la posición angular de la articulación i en la división anterior.

El criterio de optimización f_a basado en la aceleración angular, permite disminuir el consumo de energía y optimizar el comportamiento dinámico del sistema, se presenta en (5).

$$f_a = \sum_{i=1}^3 w_{a,i} \left| \frac{AcC_{i,\max}}{Ac_{i,\max}} \right| \quad (5)$$

Donde, $w_{a,i}$ es el peso asignado a la aceleración angular máxima de la articulación i , $Ac_{i,\max}$ es el valor absoluto máximo de aceleración angular de la articulación i resultante de la trayectoria generada, y $AcC_{i,\max}$ es el valor absoluto máximo de aceleración angular de la articulación i resultante de una trayectoria coordinada entre las posiciones inicial y final.

3.2. Consideraciones para el Cálculo de los Pesos

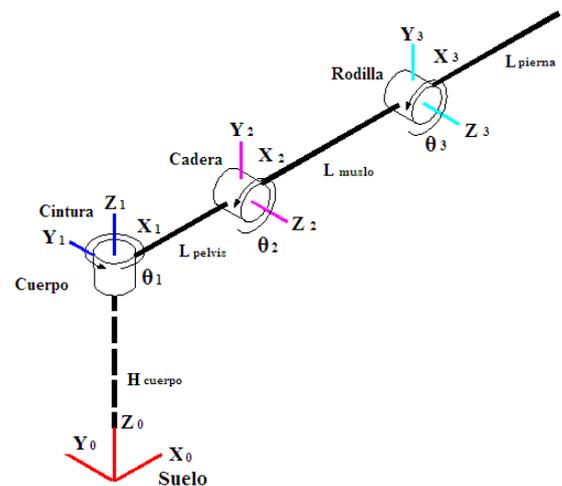
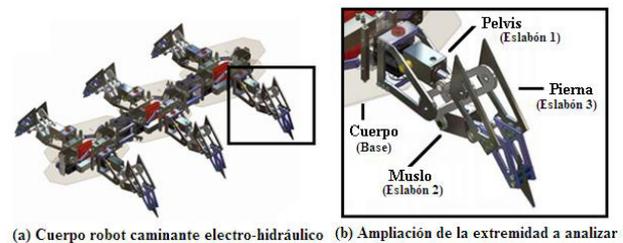
Considerando que una de las dos técnicas multi-objetivo implementadas es la programación de metas, el valor máximo obtenido por los criterios f_a y f_d es la unidad. La implementación del método de la suma ponderada permite al usuario libertad para proporcionar diferentes valores a los pesos w_1 y w_2 con base en sus objetivos y experiencia. Para el cálculo de los pesos $w_{a,i}$ y $w_{d,i}$ se considera el torque necesario para mover cada eslabón, asignándole un mayor peso a los eslabones que necesiten más torque en su fase de transferencia. Estos valores se pueden considerar de dos formas, la primera es asignar el valor del peso basándose en la diferencia del torque necesario para mover los

eslabones, y la segunda es utilizar el valor promedio de dicha diferencia. Existen dos maneras de determinar este rango de torques. La primera es con base en las condiciones de operación críticas del sistema, utilizando los valores máximos y mínimos del torque necesario para mover un eslabón, los cuales suelen producirse cuando el eslabón se encuentra completamente extendido en posición horizontal y contraído en posición vertical. La segunda es utilizar los valores del torque en las coordenadas iniciales y finales de la fase de transferencia.

Para los casos de estudio en este trabajo, se buscó que la calificación máxima de una trayectoria sea 10, con lo que se facilita el manejo de las evaluaciones, y como el objetivo es generar una trayectoria que optimice tanto el consumo de energía como el comportamiento dinámico del sistema, el valor de los pesos para los criterios tienen que ser iguales; es decir, $w_1 = w_2 = 5$. Considerando que el valor de los criterios f_a y f_d tiene que ser la unidad, y ya que el eslabón 2 llega a requerir el doble del torque máximo requerido por los otros dos eslabones como se puede observar en las tablas 2 y 4 de los casos de estudio, los valores de los pesos $w_{a,i}$ y $w_{d,i}$ quedaran establecidos de la siguiente manera, $w_{a,1} = w_{d,1} = w_{a,3} = w_{d,3} = 0.25$ y $w_{a,2} = w_{d,2} = 0.5$.

4. Robot Hexápodo Electro-Hidráulico

Para realizar el análisis en los casos de estudio, se utilizaron características físicas y geométricas de las extremidades del robot caminante electro-hidráulico diseñado por (Calderón, 2008), el cual se muestra en la figura 2, y la tabla 1 muestra los parámetros estructurales y geométricos del robot, el cual mediante actuadores lineales genera el desplazamiento angular requerido por las articulaciones del robot para el movimiento de sus extremidades durante la fase de transferencia.



(c) Diagrama de bloques cinemático de la parte a analizar

Figura 2: Robot caminante electro-hidráulico.

Tabla 1: Parámetros estructurales del robot caminante electro-hidráulico

Cuerpo (Base)				
Altura: 0.05 m	Longitud: 0.15 m	Masa: 1.54 kg		
Centro de masa (m)				
X:	-0.075	Y:	0	
Z:	0.025			
Tensor de inercia (kg m ²)				
XX:	0.01259	XY:	-0.000002	
YX:	-0.000002	YY:	0.002615	
ZX:	-0.000007	ZY:	0	
XZ:	-0.000007		ZZ:	0.01316
YZ:	0			
Pelvis (Eslabón 1)				
Longitud: 0.065 m	Masa: 0.175 kg			
Centro de masa (m)				
X:	0.0305	Y:	0	
Z:	0.015			
Tensor de inercia (kg m ²)				
XX:	0.000186	XY:	0	
YX:	0	YY:	0.0001	
ZX:	0	ZY:	-0.000031	
XZ:	0		ZZ:	0.000173
YZ:	-0.000031			
Muslo (Eslabón 2)				
Longitud: 0.075 m	Masa: 0.13 kg			
Centro de masa (m)				
X:	0.0242	Y:	-0.0036	
Z:	0			
Tensor de inercia (kg m ²)				
XX:	0.000037	XY:	-0.000006	
YX:	-0.000006	YY:	0.000085	
ZX:	0	ZY:	0	
XZ:	0		ZZ:	0.000084
YZ:	0			
Pierna (Eslabón 3)				
Longitud: 0.15 m	Masa: 0.11 kg			
Centro de masa (m)				
X:	0.0995	Y:	0.005	
Z:	0			
Tensor de inercia (kg m ²)				
XX:	0.000053	XY:	-0.000039	
YX:	-0.000039	YY:	0.000199	
ZX:	0	ZY:	0	
XZ:	0		ZZ:	0.000182
YZ:	0			

5. Simulación y Resultados

A continuación se presentan simulaciones y resultados de dos casos de estudio representativos del sistema, los cuales muestran la efectividad de la metodología propuesta. En esta sección se presenta el comportamiento dinámico del sistema durante la trayectoria predeterminada para el desplazamiento de la extremidad del robot caminante electro-hidráulico utilizado como caso de estudio. Además se presenta su comportamiento dinámico durante diferentes trayectorias, para comparar la efectividad del método propuesto. Para caracterizar la trayectoria se consideraron 10 puntos intermedios en todos los ejercicios presentados, un tiempo de 3 s para la fase de transferencia y una resolución de control de 0.00174 rad para todas las articulaciones. Se consideró una población de 100 individuos, con un máximo de 100 generaciones y un factor de mutación del 3 %, como operadores del algoritmo genético. Ya que esos valores son los más recurrentes dentro de la bibliografía, y en función de eso estar en posibilidad de realizar una comparación de los resultados obtenidos.

5.1. Desplazamiento por Superficies Lisas

Este caso muestra la trayectoria, el comportamiento dinámico del sistema y el consumo de energía de una de las extremidades analizadas, al trasladarse a lo largo de una superficie lisa. Se consideran tres diferentes trayectorias, la primera trayectoria

corresponde a un movimiento parabólico que se desplaza una longitud de 0.156 m con una altura máxima de 0.065 m, la cual es propuesta por (Calderón, 2008), como trayectoria predeterminada para la fase de transferencia normal de las extremidades. La segunda trayectoria minimiza el desplazamiento angular total del sistema y se determinó utilizando los criterios de optimización propuestos por (Tian y Collins, 2004). La tercera trayectoria se obtuvo utilizando los criterios propuestos en este trabajo.

En este caso en particular tanto la trayectoria generada utilizando los criterios de (Tian y Collins, 2004), como la trayectoria generada utilizando los criterios propuestos en este trabajo, minimizan el desplazamiento angular total del sistema con una diferencia en el eslabón a mover.

La figura 3 presenta las diferentes trayectorias que sigue la extremidad del robot caminante en su fase de transferencia del punto inicial al final.

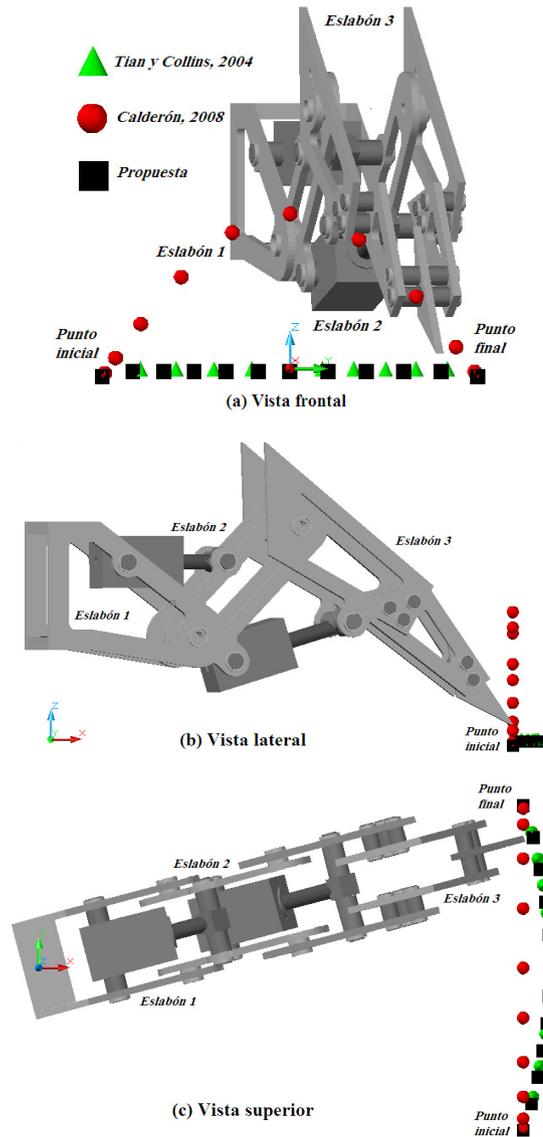


Figura 3: Movimiento de la extremidad de un robot caminante a lo largo de una superficie lisa.

En la tabla 2 se muestran los valores de las variables dinámicas, obtenidos durante la fase de transferencia de la extremidad del robot caminante a lo largo de las trayectorias

analizadas. Dentro de estos se encuentran: el desplazamiento angular de cada articulación (θ), la velocidad angular máxima (ω_{\max}), la aceleración angular máxima (α_{\max}), la desaceleración angular máxima (α_{\min}), el Jerk, el torque máximo (τ_{\max}), la integral del cuadrado del torque (T_{cuad}), la energía consumida por las articulaciones (E), el desplazamiento angular total de las articulaciones (θ_T) y la distancia recorrida por el punto final de la extremidad (D_{PFE}). La energía consumida por el sistema se obtiene mediante la suma de la integral de la potencia respecto del tiempo, consumida por cada eslabón. La potencia en sistemas donde se tiene un movimiento de rotación, como es el caso de las articulaciones del robot, se calcula mediante el producto del torque por la velocidad angular del eslabón (Gonzalez *et al.*, 2009).

Tabla 2: Cuadro de valores del comportamiento dinámico de la extremidad

Variable	Trayectoria Calderón, 2008		
	Eslabón 1	Eslabón 2	Eslabón 3
θ (rad)	0.6458	1.2007	0.5655
ω_{\max} (rad/s)	0.217	0.486	0.1932
α_{\max} (rad/s ²)	0.0551	0.4497	0.1489
α_{\min} (rad/s ²)	0.0844	0.3331	0.1518
Jerk (rad/s ³)	0.385	4.1815	1.6623
τ_{\max} (N-m)	0.0003	0.1763	0.1024
T_{cuad} ((N ² -m ²)s)	0.0000018	1.1796	0.3863
E (J)	0.00004	0.0627	0.0152

Variable	Trayectoria Tian y Collins, 2004		
	Eslabón 1	Eslabón 2	Eslabón 3
θ (rad)	0.6458	0.00348	0
ω_{\max} (rad/s)	0.2094	0.006	0
α_{\max} (rad/s ²)	0.0988	0.033	0
α_{\min} (rad/s ²)	0.1191	0.033	0
Jerk (rad/s ³)	0.3715	1.2906	0
τ_{\max} (N-m)	0.0005	0.1765	0.0862
T_{cuad} ((N ² -m ²)s)	0.000007	1.399	0.3336
E (J)	0.0001	0.0004	0

Variable	Trayectoria Propuesta		
	Eslabón 1	Eslabón 2	Eslabón 3
θ (rad)	0.6458	0	0.00348
ω_{\max} (rad/s)	0.2094	0	0.006
α_{\max} (rad/s ²)	0.0988	0	0.033
α_{\min} (rad/s ²)	0.1191	0	0.033
Jerk (rad/s ³)	0.3715	0	1.2906
τ_{\max} (N-m)	0.0006	0.1765	0.0862
T_{cuad} ((N ² -m ²)s)	0.000007	1.4006	0.3336
E (J)	0.0001	0	0.0002

En la tabla 3 se muestran los valores de las variables utilizadas como criterios de optimización en la literatura, obtenidos durante la fase de transferencia de la extremidad del robot caminante.

Tabla 3: Valores críticos del comportamiento dinámico de la extremidad

Variable	Trayectorias		
	Calderón, 2008	Tian y Collins, 2004	Propuesta
θ_T (rad)	2.412	0.6493	0.6493
T_{cuad} ((N ² -m ²)s)	1.5654	1.7325	1.7341
D_{PFE} (m)	0.2045	0.1532	0.1532
E (J)	0.078	0.0005	0.0003

5.2. Desplazamiento con Obstáculos en el Espacio de Trabajo

En este caso es necesario que la extremidad del robot caminante evite un obstáculo que cuenta con las siguientes dimensiones: longitud = 60 mm, ancho = 40 mm y altura = 26 mm, el cual está posicionado a la mitad de la fase de transferencia entre los puntos inicial y final. Se proponen cuatro diferentes trayectorias comparativas, la primera trayectoria minimiza la distancia recorrida por la punta de la extremidad y se determinó utilizando los criterios de optimización propuestos por (Shankar y Kaur, 2011). La segunda trayectoria se determinó utilizando diferentes criterios como la disminución del desplazamiento angular total del sistema, la disminución de la distancia del efector final, la disminución de la velocidad del efector final y de la velocidad angular, y la disminución del consumo de energía, criterios propuestos por (Solteiro *et al.*, 2007). La tercera trayectoria minimiza el consumo de energía y se determinó implementando como criterio de optimización a la potencia, criterio propuesto por (Pérez *et al.*, 2010). La cuarta trayectoria se obtuvo utilizando los criterios propuestos en este trabajo.

La figura 4 presenta las diferentes trayectorias que sigue la extremidad del robot caminante en su fase de transferencia del punto inicial al final.

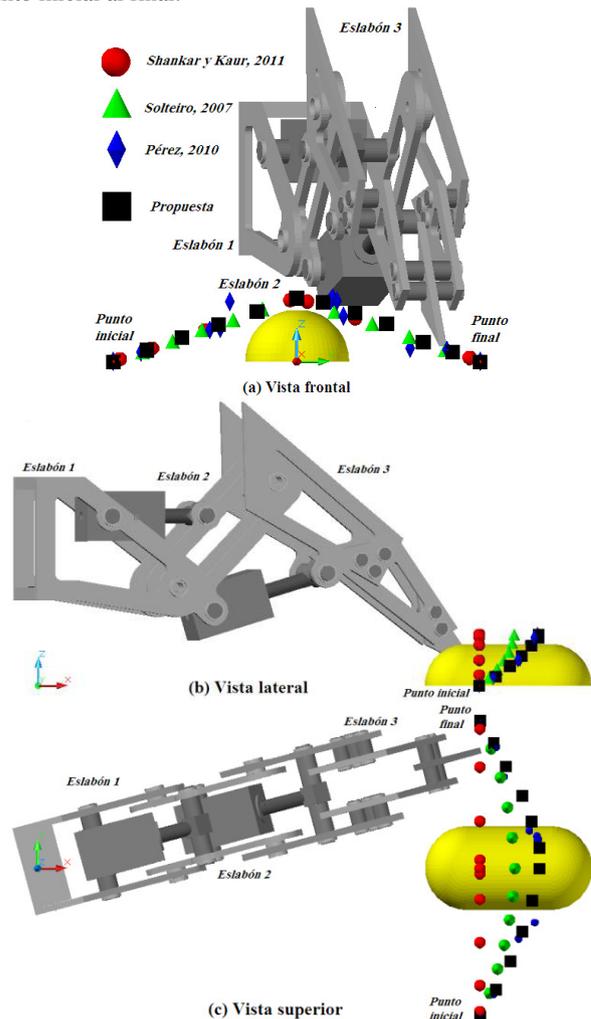


Figura 4: Movimiento de la extremidad de un robot caminante al evadir un obstáculo situado en el espacio de trabajo.

En la tabla 4 se muestran los valores de las variables dinámicas, obtenidos durante la fase de transferencia de la extremidad del robot caminante a lo largo de las trayectorias analizadas.

Tabla 4: Cuadro de valores del comportamiento dinámico de la extremidad

Variable	Trayectoria Shankar y Kaur, 2011		
	Eslabón 1	Eslabón 2	Eslabón 3
θ (rad)	0.6458	0.6946	0.5376
ω_{\max} (rad/s)	0.2029	0.236	0.216
α_{\max} (rad/s ²)	0.1092	0.1604	0.1535
α_{\min} (rad/s ²)	0.1368	0.2508	0.2345
Jerk (rad/s ³)	0.36	1.9879	1.7977
τ_{\max} (N-m)	0.0005	0.1763	0.0909
T_{cuad} ((N ² -m ²)/s)	0.000006	1.2095	0.3475
E (J)	0.0001	0.0347	0.0148
Variable	Trayectoria Solteiro, 2007		
	Eslabón 1	Eslabón 2	Eslabón 3
θ (rad)	0.6458	0.2967	0
ω_{\max} (rad/s)	0.2094	0.102	0
α_{\max} (rad/s ²)	0.0988	0.1206	0
α_{\min} (rad/s ²)	0.1191	0.1206	0
Jerk (rad/s ³)	0.3715	0.8776	0
τ_{\max} (N-m)	0.0006	0.1763	0.0948
T_{cuad} ((N ² -m ²)/s)	0.000007	1.3875	0.3688
E (J)	0.0001	0.0202	0
Variable	Trayectoria Pérez, 2010		
	Eslabón 1	Eslabón 2	Eslabón 3
θ (rad)	0.6458	0	0.4224
ω_{\max} (rad/s)	0.2367	0	0.1536
α_{\max} (rad/s ²)	0.1194	0	0.1825
α_{\min} (rad/s ²)	0.1479	0	0.1298
Jerk (rad/s ³)	0.4208	0	1.3215
τ_{\max} (N-m)	0.0007	0.1883	0.098
T_{cuad} ((N ² -m ²)/s)	0.00001	1.5116	0.3892
E (J)	0.00013	0	0.0128
Variable	Trayectoria Propuesta		
	Eslabón 1	Eslabón 2	Eslabón 3
θ (rad)	0.6458	0	0.4224
ω_{\max} (rad/s)	0.2094	0	0.144
α_{\max} (rad/s ²)	0.0988	0	0.1703
α_{\min} (rad/s ²)	0.1191	0	0.1727
Jerk (rad/s ³)	0.3715	0	1.239
τ_{\max} (N-m)	0.0006	0.1883	0.098
T_{cuad} ((N ² -m ²)/s)	0.000008	1.5	0.3832
E (J)	0.0001	0	0.0151

En la tabla 5 se muestran los valores de las variables utilizadas como criterios de optimización en la literatura, obtenidos durante la fase de transferencia de la extremidad del robot caminante.

Tabla 5: Valores críticos del comportamiento dinámico de la extremidad

Variable	Trayectorias			
	Shankar y Kaur, 2011	Solteiro, 2007	Pérez, 2010	Propuesta
θ_T (rad)	1.878	0.9425	1.0681	1.0681
T_{cuad} ((N ² -m ²)/s)	1.557	1.7563	1.9008	1.8832
D_{PFE} (m)	0.1594	0.164	0.1825	0.1714
E (J)	0.0496	0.0203	0.0129	0.0152

6. Análisis de Resultados

Las tablas 2 y 3 presentan los resultados obtenidos para las trayectorias implementadas en el primer caso, mientras que las tablas 4 y 5 presentan los resultados obtenidos en el segundo caso de estudio. En las tablas 2 y 4 se puede observar que los valores del torque máximo permanecen casi constantes para todos los casos.

Mientras que en las tablas 3 y 5 se puede observar que el valor de la integral del cuadrado del torque utilizado como criterio de optimización por autores como (Saravanan *et al.*, 2010; Ayten *et al.*, 2010; Gregory, 2012), es menor en aquellas trayectorias que consumen más energía, por lo que se considera que este criterio no puede ser utilizado para optimizar el consumo de energía.

En la tabla 2, relacionada con el primer caso se observa que puede existir más de una trayectoria que minimice el desplazamiento angular total del sistema; mientras que en la tabla 4, relacionada con el segundo caso, se observa que existe una trayectoria que tiene un menor consumo de energía que aquella que implementa este criterio. Por lo que éste criterio propuesto por (Tian y Collins, 2004), aunque permite disminuir el consumo de energía, no determina sus valores óptimos.

En la tabla 3 se puede apreciar que la trayectoria generada utilizando los criterios propuestos en este trabajo disminuyó el consumo de energía en un 99.5 % respecto de la trayectoria propuesta por (Calderón, 2008), y en un 40 % respecto de la trayectoria generada implementando los criterios de (Tian y Collins, 2004).

En el segundo caso al igual que en el primero, la trayectoria generada implementando los criterios propuestos en este trabajo, disminuyó en un 70 % el consumo de energía respecto de la trayectoria que minimiza la distancia del efector final, criterio propuesto por (Shankar y Kaur, 2011), y en un 25 % respecto de la trayectoria generada implementando diferentes criterios como la disminución del desplazamiento angular total del sistema, la disminución de la distancia del efector final, la disminución de la velocidad del efector final y de la velocidad angular, y la disminución del consumo de energía, criterios propuestos por (Solteiro *et al.*, 2007). La trayectoria generada utilizando el criterio de optimización de (Pérez *et al.*, 2010), logró disminuir en un 15 % la energía consumida respecto de la trayectoria propuesta. Sin embargo, esta presenta un comportamiento errático como se puede observar en la figura 4, lo cual provoca la inestabilidad de la extremidad y que tiene influencia en el robot al caminar. Este comportamiento aumenta los tirones en el sistema como se puede observar en las figuras 24, 26, 36 y 38 del apéndice B, donde se pueden apreciar variaciones repentinas en los valores de la velocidad angular, la aceleración angular y el jerk.

Por otra parte como se observa en las tablas 2, 3, 4 y 5, la optimización de energía se logra al minimizar el desplazamiento angular de las articulaciones que consumen más energía, ya que el incremento en el movimiento de estas articulaciones genera un mayor consumo de energía del sistema.

La trayectoria propuesta, además de disminuir el consumo de energía respecto de la mayoría de las trayectorias, mejoró el comportamiento dinámico del sistema, como se puede observar en las figuras 24, 26, 36 y 38 del apéndice B. Donde se aprecia un comportamiento suave, así como, una disminución en los valores de la velocidad angular, la aceleración angular, y el jerk generando una disminución en los tirones que pudieran dañar al sistema.

7. Conclusiones

Se demostró que el desplazamiento y la aceleración angular permiten generar trayectorias que minimizan el consumo de energía hasta en un 25 % respecto de trayectorias generadas utilizando varios criterios como los de (Solteiro *et al.*, 2007), que implementa como criterios el desplazamiento angular, la distancia, la velocidad y la energía. Además de disminuir el número e intensidad de los tirones causados por las variaciones de velocidad y aceleración angular, respecto de las otras trayectorias como se puede observar en las gráficas del apéndice B.

Se determinó que el minimizar el movimiento de aquellas articulaciones que generan un mayor consumo de energía permite optimizar el consumo y no solo disminuirlo, como se presentó en el segundo caso, donde se logró disminuir el consumo de energía en un 25 % respecto a criterios como minimizar el desplazamiento angular total del sistema propuesto por (Tian y Collins, 2004), e incluido por (Solteiro *et al.*, 2007) en sus criterios.

Se comprobó que el criterio de disminuir el desplazamiento angular de las articulaciones genera mejores resultados al disminuir el consumo de energía en un 70 % respecto de criterios como minimizar la distancia del efector total, propuesto por (Shankar y Kaur, 2011), e incluido por (Solteiro *et al.*, 2007) en sus criterios, o entre 58 - 99 % respecto de criterios como el de disminuir el torque promedio, implementado por (Saravanan *et al.*, 2010; Ayten *et al.*, 2010; Gregory, 2012).

Se determinó que el criterio basado en la energía, propuesto por (Pérez *et al.*, 2010) aunque calcula trayectorias que optimizan el consumo de energía, éstas presentan un comportamiento errático como puede apreciarse en la figura 4, generando la inestabilidad del robot al caminar lo cual podría provocar su caída al desplazarse por terrenos irregulares. Además de incrementar el número e intensidad de los tirones presentes en el sistema durante la fase de transferencia, como puede apreciarse en las gráficas del apéndice B.

Por último, se mostró la efectividad de los criterios propuestos, así como de su formulación, para determinar trayectorias que disminuyan el consumo de energía y optimicen el comportamiento dinámico. Esto en función de los casos presentados, donde se logró disminuir estos valores en relación con los diferentes criterios empleados en la literatura.

English Summary

Optimizing the Energy Consumed by the Extremities of a Walking Robot

Abstract

It presents a method of multi-objective optimization, applied to energy consumption of open kinematic chains, analyzing the case of the movement of an extremity of a walking electro-hydraulic robot. To demonstrate the effectiveness of the proposed method, it is applied in two cases of displacement. The first case shows the movement of the extremity without obstacles in its workspace and the second includes the evasion of an obstacle. The minimization of angular displacement of the links with higher energy consumption and the minimization of the maximum absolute value of the angular acceleration of the links are used as

optimization criteria. In both cases a trajectory that reduces energy consumption by more than 25% over the other methods proposed in the literature, at the same time the dynamic behavior of the system by avoiding variations in the speed and the acceleration is improved during the phase of transference, besides increasing the precision and accuracy of the foot position.

Keywords:

Planning and trajectory tracking, mobile robots and intelligent autonomous vehicles, kinematics of robots, dynamics of robots, control of forces.

Agradecimientos

Agradezco por su ayuda económica al Concejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), así como al personal del Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET) por el apoyo brindado para la realización de este trabajo.

Referencias

- Ayten, K., Sahinkaya, M., Iravani, P., 2011, Optimum Trajectory Planning for Redundant and Hyper Redundant Manipulators Through Inverse Dynamics, International Desing Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference.
- Calderón, H., 2008, Diseño de un Robot Caminante Electro-hidráulico, Tesis de Maestría, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Michoacán, México.
- Calderón, H., Szwedowicz, D., Bedolla, J., 2012, Principales Variables del Comportamiento Dinámico en Cadenas Cinemáticas Abiertas, XVIII Congreso Internacional Anual de la SOMIM, pp. 409 – 417.
- García, M. Gorrostieta, E., Vargas, J., Ramos, J., Sotomayor, A., Moya, J., 2012, Kinematic Analysis for Trajectory Generation in One Leg of a Hexapod Robot, The 2012 Iberoamerican Conference on Electronics Engineering and Computer Science, pp. 342 – 350.
- Gew, K., Hyeon, J., 2009, Trajectory Optimization with GA and Control for Quadraped Robots, Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 23, pp. 114 – 123.
- Gonzalez de Santos, P., García, E., Ponticelli, R., Armada, M., 2009, Minimizing Energy Consumption in Hexapod Robots, Advanced Robotics, Vol. 23, pp. 681-704.
- Gorrostieta, E., Vargas, J., 2004, Free Locomotion for Six Legged Robot, WSEAS Transactions on Computers, Vol. 3, No. 4, pp. 795 – 800.
- Gorrostieta, E., Vargas, J., 2008, Algoritmo Difuso de Locomoción Libre para un Robot Caminante de Seis Patas, Computación y Sistemas, Vol. 11, No. 3, pp. 260 – 287.
- Gregory, J., Olivares, A., Staffetti, E., 2012, Energy-optimal Trajectory Planning for Robot Manipulators with Holonomic Constraints, Elsevier Systems & Control Letter, pp. 279 – 291.
- Melanie, M., 1996, An Introduction to Genetic Algorithms, MIT Press.
- Pérez, W., Barrera, E., Juárez, I., Ramos, A., 2010, Mechanical Energy Optimization in Trajectory Planning for Six DOF Robot Manipulators Base don Eighth-Degree Polynomial Functions and a Genetic Algorithm, 7th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control, pp. 446 – 451.
- Rodrigues, R., Steffen, V., Pereira, S., 2010, Optimal Task Placement of a Serial Robot Manipulator for Manipulability and Mechanical Power Optimization, Intelligent Information Management, Vol. 2, pp. 512 – 525.
- Saravanan, R., Ramabalan, S., Balamurugan, C., Subash, A., 2010, Evolutionary Trajectory Planning for an Industrial Robot, International Journal of Automation and Computing, Vol. 7, No. 2, pp. 190 – 198.
- Sengupta, A., Chakraborti, T., Konar, A., Nagar, A., 2011, Energy Efficient Trajectory Planning by a Robot Arm Usising Invasive Weed Optimization

Technique, Third World Congress on Nature and Biologically Inspired Computing, pp. 311 – 316.

Shankar, G., Kaur, A., 2011, Optimization of Energy in Robotic Arm Using Genetic Algorithm, International Journal of Computer Science and Technology, pp. 315 – 317.

Silva, M., Machado, J.A., 2011, A literature review on the optimization of legged robots, Journal of Vibration and Control.

Solteiro, E., Tenreiro, J., Moura, P., 2007, Manipulator Trajectory Planning Using a MOEA, Applied Soft Computing, Vol. 7, pp. 659 – 667.

Tian, L., Collins, C., 2004, An effective Robot Trajectory Planning Method Using a Genetic Algorithm, Elsevier Mechatronics, Vol. 14, pp. 455 – 470.

Vargas, J., 1999, Free Locomotion Gaits for a Four Legged Machine, International Congress on Industrial Automation and Material Science Mexico-Hungary, Querétaro, México.

Zapata, F., 2013, Análisis del Funcionamiento de las Extremidades en un Robot Hexapodo, Tesis de Licenciatura, Universidad de San Buenaventura, Colombia.

Apéndice A. Gráficas del Comportamiento Dinámico del Sistema en el Primer Caso de Estudio.

En este apartado de muestran las graficas de variables como el desplazamiento, la velocidad y la aceleración angular, así como del jerk, el torque y la potencia. Que caracterizan el comportamiento dinámico del sistema.

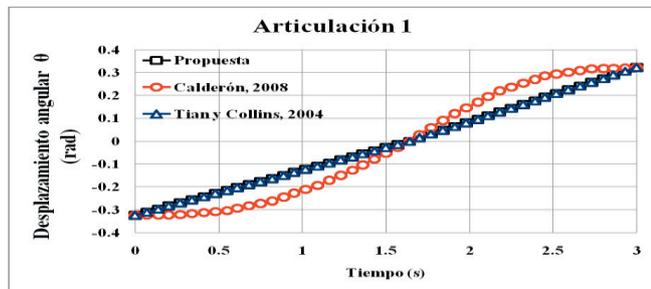


Figura 5: Desplazamiento angular de la articulación 1 de las diferentes trayectorias analizadas en el primer caso.

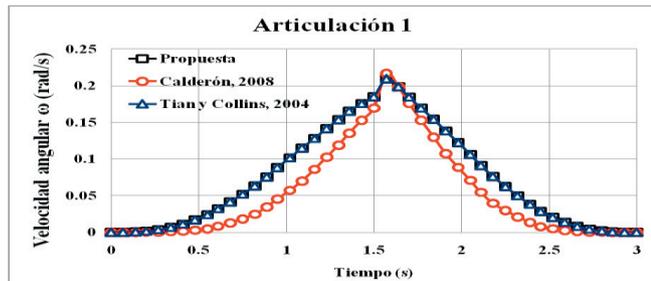


Figura 6: Velocidad angular de la articulación 1 de las diferentes trayectorias analizadas en el primer caso.

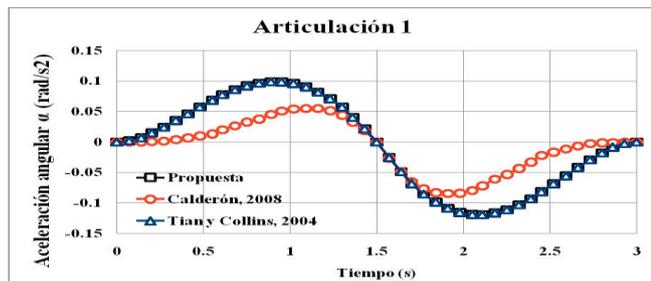


Figura 7: Aceleración angular de la articulación 1 de las diferentes trayectorias analizadas en el primer caso.

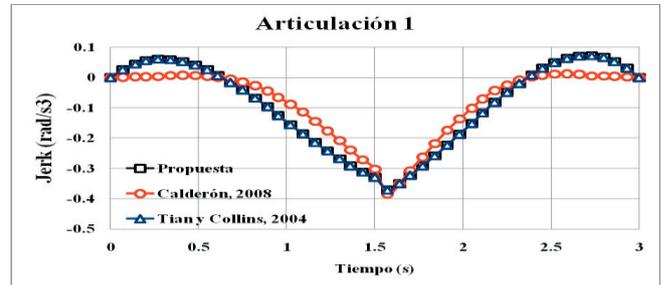


Figura 8: Jerk de la articulación 1 de las diferentes trayectorias analizadas en el primer caso.

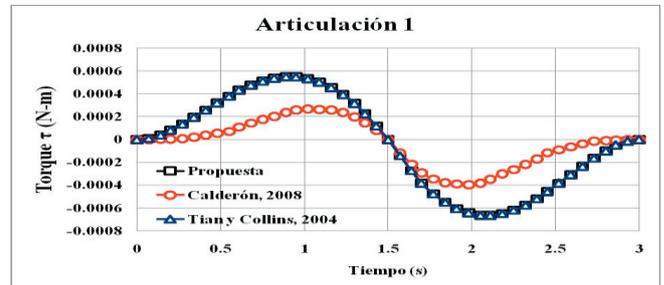


Figura 9: Torque de la articulación 1 de las diferentes trayectorias analizadas en el primer caso.

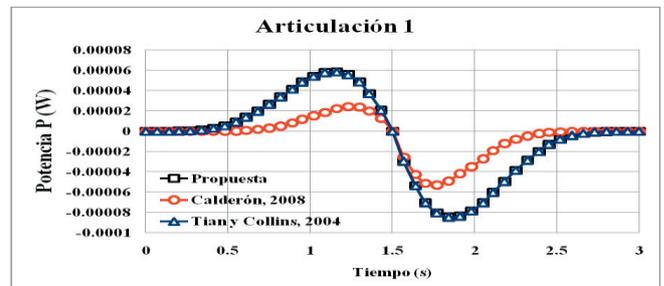


Figura 10: Potencia de la articulación 1 de las diferentes trayectorias analizadas en el primer caso.

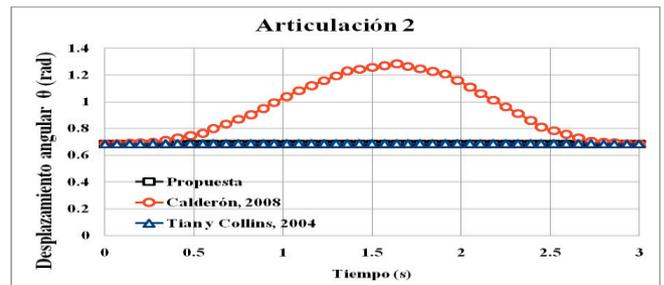


Figura 11: Desplazamiento angular de la articulación 2 de las diferentes trayectorias analizadas en el primer caso.

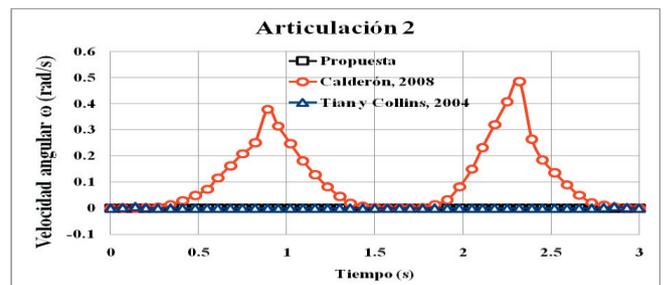


Figura 12: Velocidad angular de la articulación 2 de las diferentes trayectorias analizadas en el primer caso.

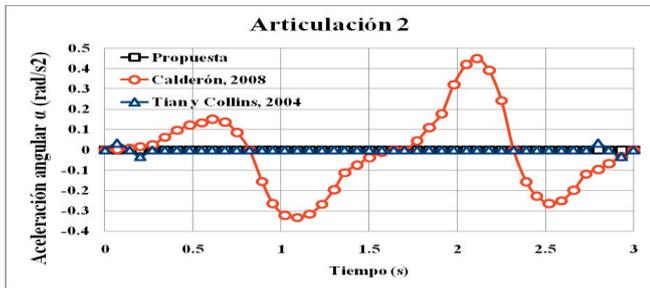


Figura 13: Aceleración angular de la articulación 2 de las diferentes trayectorias analizadas en el primer caso.

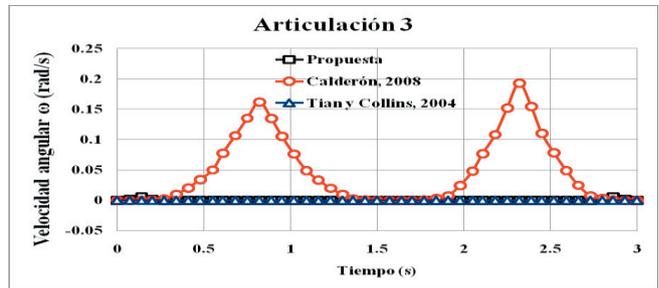


Figura 18: Velocidad angular de la articulación 3 de las diferentes trayectorias analizadas en el primer caso.

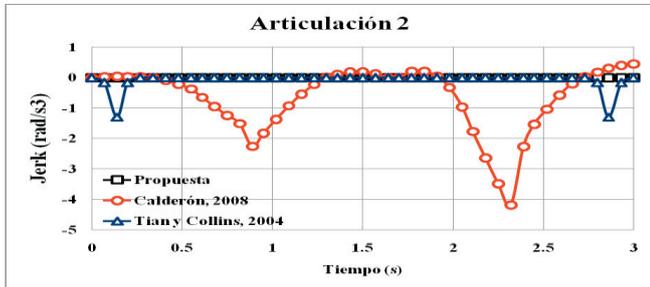


Figura 14: Jerk de la articulación 2 de las diferentes trayectorias analizadas en el primer caso.

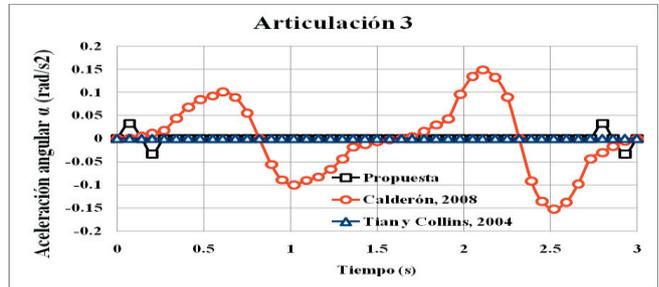


Figura 19: Aceleración angular de la articulación 3 de las diferentes trayectorias analizadas en el primer caso.

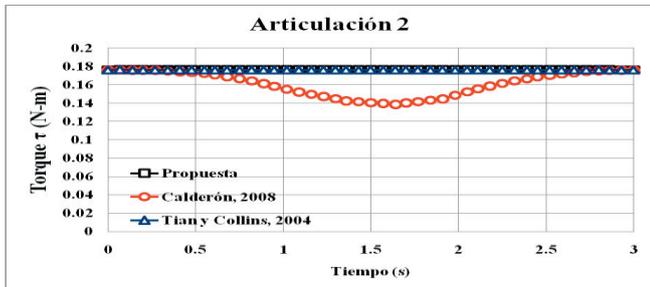


Figura 15: Torque de la articulación 2 de las diferentes trayectorias analizadas en el primer caso.

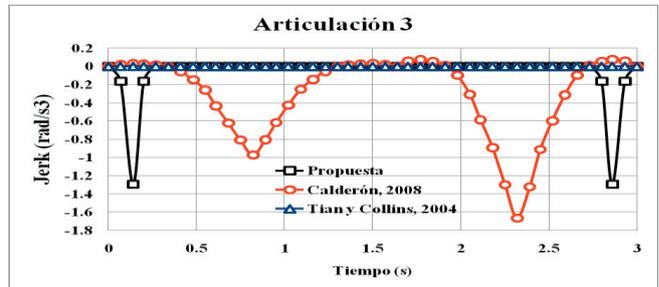


Figura 20: Jerk de la articulación 3 de las diferentes trayectorias analizadas en el primer caso.

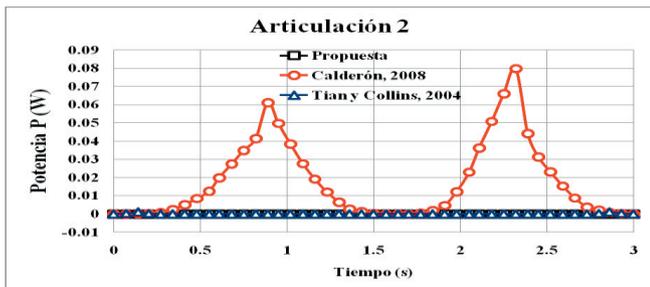


Figura 16: Potencia de la articulación 2 de las diferentes trayectorias analizadas en el primer caso.

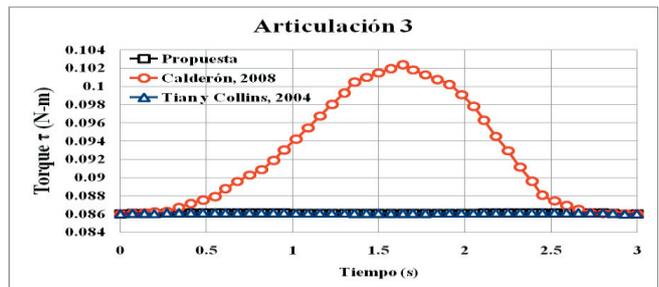


Figura 21: Torque de la articulación 3 de las diferentes trayectorias analizadas en el primer caso.

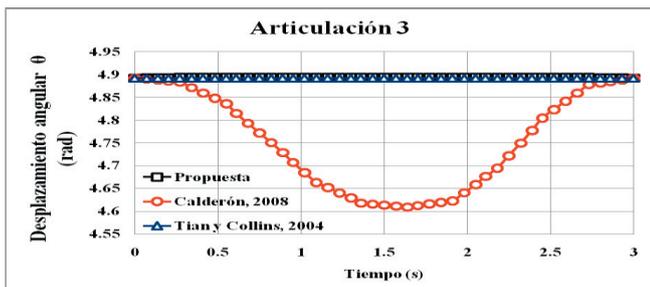


Figura 17: Desplazamiento angular de la articulación 3 de las diferentes trayectorias analizadas en el primer caso.

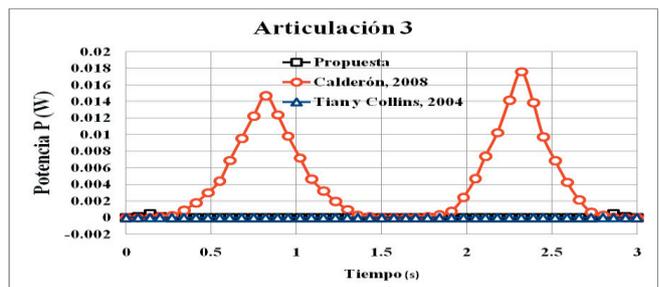


Figura 22: Potencia de la articulación 3 de las diferentes trayectorias analizadas en el primer caso.

Apéndice B. Gráficas del Comportamiento Dinámico del Sistema en el Segundo Caso de Estudio.

En este apartado de muestran las graficas de variables como el desplazamiento, la velocidad y la aceleración angular, así como del jerk, el torque y la potencia. Variables que caracterizan el comportamiento dinámico del sistema durante los diferentes movimientos analizados en el segundo caso de estudio.

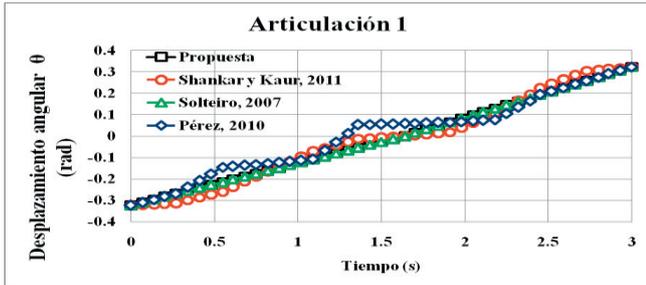


Figura 23: Desplazamiento angular de la articulación 1 de las diferentes trayectorias analizadas en el segundo caso.

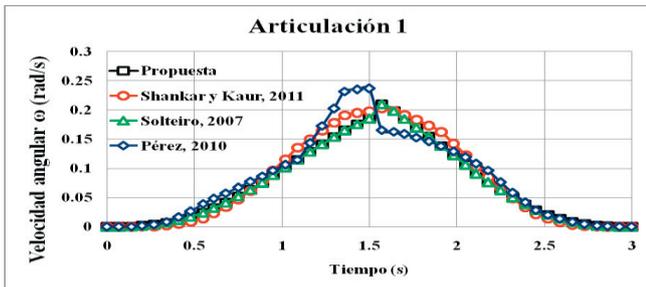


Figura 24: Velocidad angular de la articulación 1 de las diferentes trayectorias analizadas en el segundo caso.

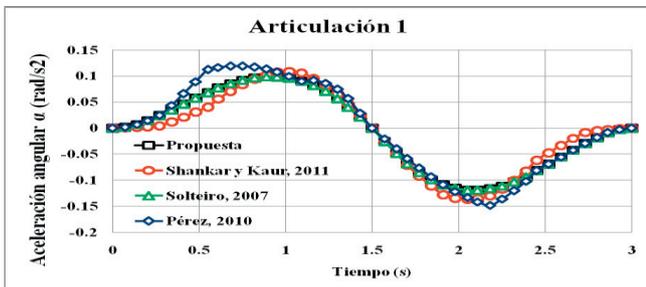


Figura 25: Aceleración angular de la articulación 1 de las diferentes trayectorias analizadas en el segundo caso.

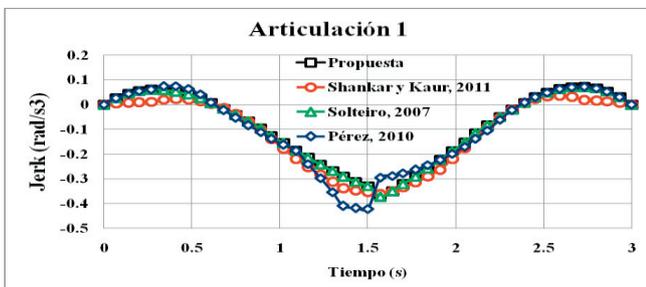


Figura 26: Jerk de la articulación 1 de las diferentes trayectorias analizadas en el segundo caso.

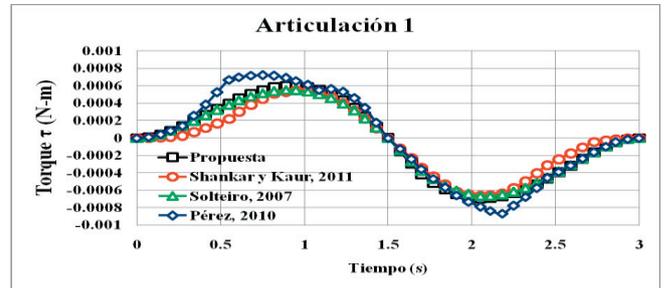


Figura 27: Torque de la articulación 1 de las diferentes trayectorias analizadas en el segundo caso.

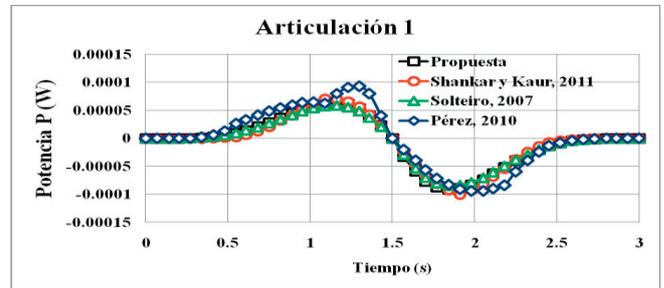


Figura 28: Potencia de la articulación 1 de las diferentes trayectorias analizadas en el segundo caso.

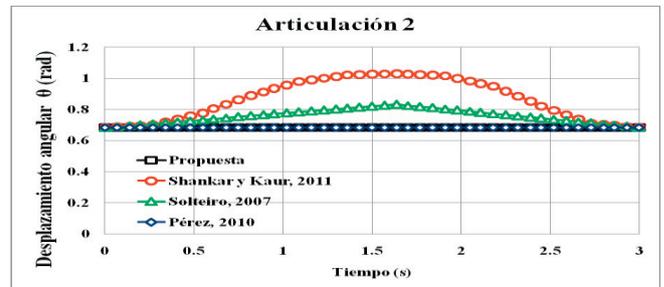


Figura 29: Desplazamiento angular de la articulación 2 de las diferentes trayectorias analizadas en el segundo caso.

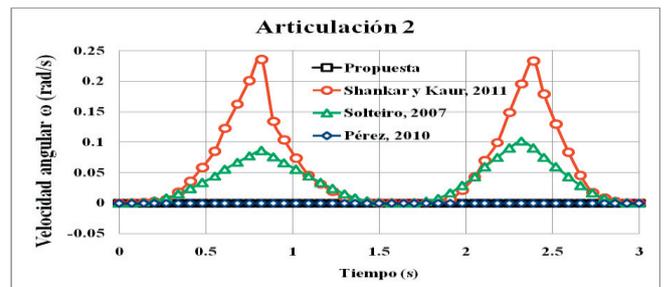


Figura 30: Velocidad angular de la articulación 2 de las diferentes trayectorias analizadas en el segundo caso.

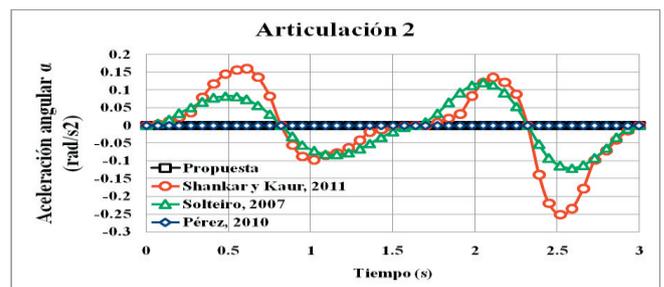


Figura 31: Aceleración angular de la articulación 2 de las diferentes trayectorias analizadas en el segundo caso.

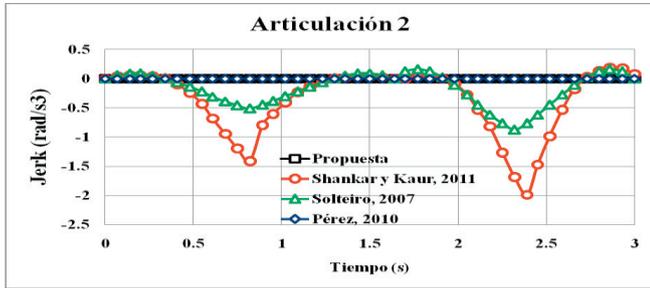


Figura 32: Jerk de la articulación 2 de las diferentes trayectorias analizadas en el segundo caso.

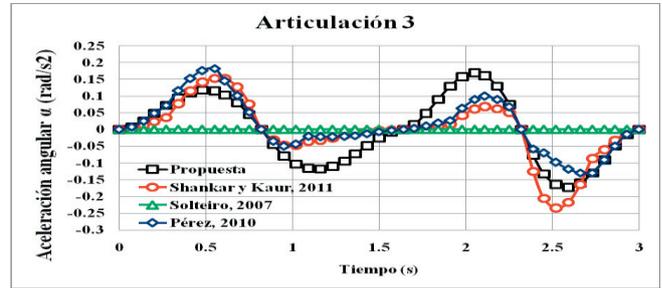


Figura 37: Aceleración angular de la articulación 3 de las diferentes trayectorias analizadas en el segundo caso.

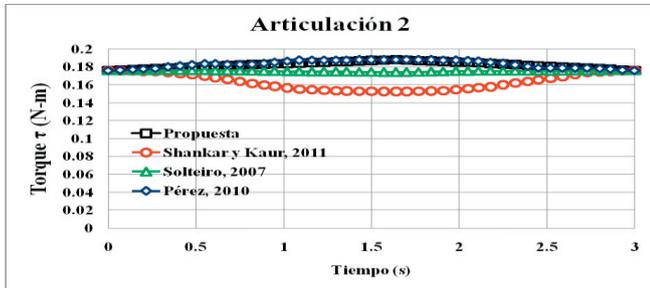


Figura 33: Torque de la articulación 2 de las diferentes trayectorias analizadas en el segundo caso.

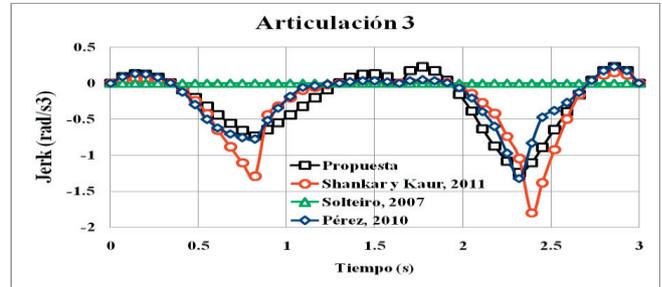


Figura 38: Jerk de la articulación 3 de las diferentes trayectorias analizadas en el segundo caso.

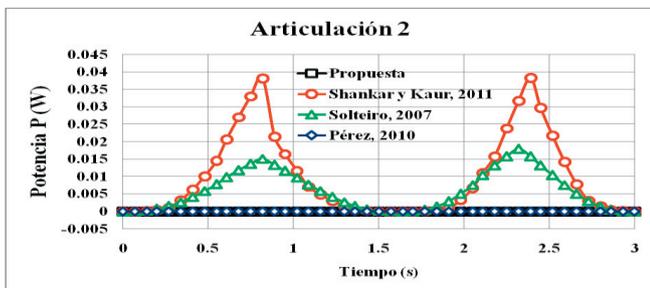


Figura 34: Potencia de la articulación 2 de las diferentes trayectorias analizadas en el segundo caso.

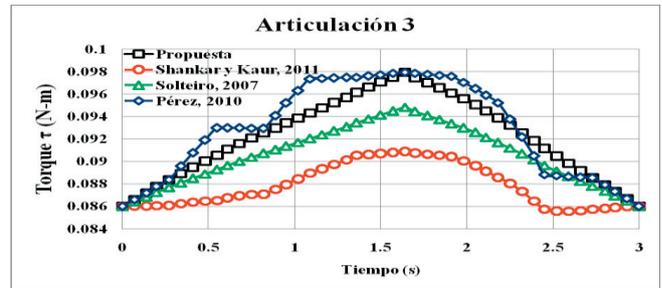


Figura 39: Torque de la articulación 3 de las diferentes trayectorias analizadas en el segundo caso.

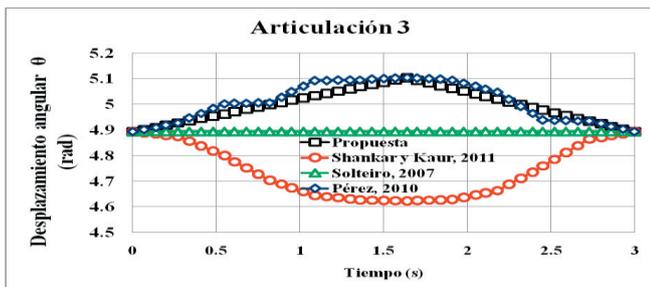


Figura 35: Desplazamiento angular de la articulación 3 de las diferentes trayectorias analizadas en el segundo caso.

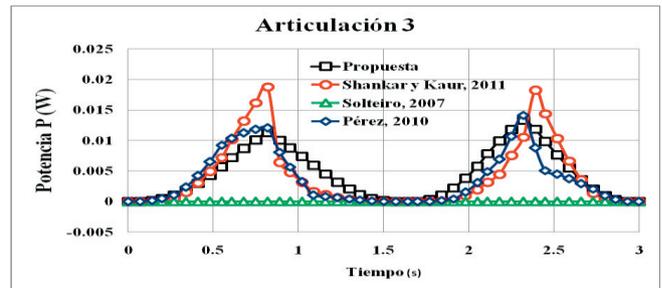


Figura 40: Potencia de la articulación 3 de las diferentes trayectorias analizadas en el segundo caso.

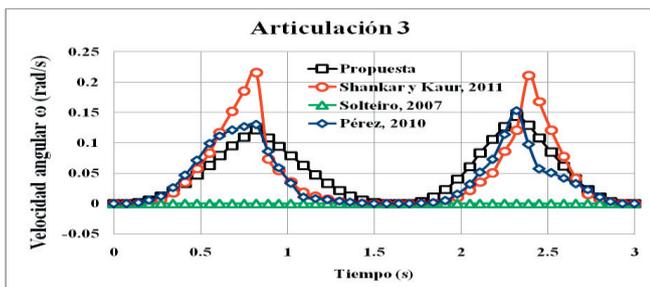


Figura 36: Velocidad angular de la articulación 3 de las diferentes trayectorias analizadas en el segundo caso.