

Energy Evaluation Applied to Serial Manipulator

E. A. G. Barbosa, M. A. G. Palacios, L. A. A. Cortés, J. J. G. Barbosa, C. A. B. Martínez

Abstract—Serial manipulators are highly used in industrial applications, and the need to minimize their energy consumption is apparent. There are investigations that analyze the optimization of energy consumption of these robots based on several factors, and publications that study design parameters to analyze work space and dynamic behavior. The contribution of this paper shows that energy consumption can be improved from a correct selection of torsion angles as design parameters. The dynamic models applied here have been validated experimentally through the monitoring of the variable joints of a 3R prototype adaptive during operation. The results obtained from the dynamic analysis of the serial manipulator show that the energy consumption is improved based on the value of the torsion angles. The above combined with the novel design and the successful construction of the adaptive prototype allows considering the inclusion of this idea at the industrial level

Index Terms—Serial Manipulators, Energy Consumption, Industrial Robots

I. INTRODUCCIÓN

El incremento en la industria de los manipuladores seriales trae como consecuencia la búsqueda de nuevas alternativas de mejora enfocadas en su funcionamiento. De acuerdo a [1], en el 2010 había operando en Estados Unidos de Norteamérica más de 190,000 robots industriales de lo cual se estimaba que consumían 300 kWh por día. Reducir un 1% de energía consumida representaban ahorros económicos considerables. Por tanto, un mínimo ahorro de energía para este tipo de robots tiene un impacto global de gran alcance. En relación a registros publicados por la Federación Internacional de Robótica (IFR), en 2018 operaron aproximadamente 2.4 millones de robots en el mundo. A partir del mismo año, la IFR estima que el porcentaje de crecimiento anual de robots industriales operando oscilará alrededor del 15%; ante esto, se contempla que para el 2021 cerca de 3.8 millones de robots industriales operen en todo el mundo. Por otra parte, de acuerdo a [2], en el año 2014 el mayor consumo de energía en gran parte de los países industrializados se concentraba en la industria manufacturera, en específico en los robots industriales, propiciando con ello un aumento en las tarifas de electricidad y combustible en la última década. Como un esfuerzo para documentar o administrar la energía a nivel mundial, surgen organizaciones como UNIDO, Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial, formalizada a fines del siglo XIX, y la cual en el 2010 generó una herramienta de gran importancia en “política energética” encargada de comparar la eficiencia energética industrial a nivel mundial. En [3] se reporta que aproximadamente un

30% de la energía demandada a nivel mundial proviene de la industria. En países como Alemania existen institutos con departamentos enfocados exclusivamente al análisis de eficiencia en el consumo de energía de robots industriales operando en el sector automotriz, por ejemplo, en el instituto Fraunhofer IPK [4] y su proyecto definido como EnEffCo (Energy Efficiency Controlling with Reference to the Automobile Industry). En el 2011 la Comisión Europea en su plan de eficiencia energética estableció como meta reducir el 20% del consumo de energía en este sector para el 2020 en relación a los consumos registrados durante el 2007. En el 2015, la Unión Europea unió esfuerzos académicos y del ramo industrial para llevar a cabo el proyecto denominado AREUS (Automation and Robotics for European Sustainable manufacturing) que consiste en establecer alternativas para robots industriales basadas en la eficiencia energética y la reducción de costos.

Por lo anterior se justifica el hecho que desde hace años una de las tareas primordiales en la industria consiste en obtener configuraciones de robots industriales que cumplan diversos criterios de optimización para su diseño. Con esta premisa surge la idea de buscar alternativas que permitan optimizar parámetros de funcionamiento tales como: energía requerida para la ejecución de tareas [5], [6], [7], [8], análisis de trayectorias y de tiempo de ejecución [9], [10], [11], espacio de trabajo [12], [13], comportamiento dinámico [14], [15], [16], y de control [11], [17], entre los más importantes. De acuerdo con [18], los criterios de optimización comúnmente utilizados son: a) el tiempo mínimo requerido, limitado por la productividad; b) el mínimo jerk o pulso, que se limita por la calidad del trabajo, la exactitud y el mantenimiento del equipo; c) la energía mínima consumida o esfuerzo mínimo del actuador; y d) el caso combinado, tiempo mínimo y energía mínima. Existen también artículos que se enfocan en evaluar específicamente el consumo de energía en robots industriales durante su funcionamiento [19], [20], [21].

El considerar elementos de menor peso y tamaño en la parte final de las arquitecturas de los robots industriales actualmente se sigue considerando como base para el ahorro de energía durante su funcionamiento. Además, proyectos recientes en los cuales los parámetros de diseño son fundamentales para el ahorro de energía consideran eslabones con resortes en paralelo para aprovechar la restitución de los mismos, estos son empleados en robots móviles y prótesis [22]. En [23] se desarrolla un prototipo 2R con este principio obteniendo ahorros de energía cercanos al 20%. Otras propuestas agregan contrapesos para aprovechar la inercia de los mismos, siendo restringidos a configuraciones y aplicaciones específicas. Por otra parte, se ha comprobado que los parámetros de diseño impactan directamente en su comportamiento, tal es el caso de [24] donde se analiza el robot PUMA 560 enfocado a contabilizar la contribución que ejercen estos parámetros sobre su exactitud y su repetitividad. En [13] y [25], los autores

E. A. G. Barbosa, ITESI-Irapuato, ergonzalez@itesi.edu.mx
 M. A. G. Palacios, Universidad de Guanajuato, DICIS, max@adefid.com
 L. A. A. Cortés, Universidad de Guanajuato, DICIS, aguiler@ugto.mx
 J. J. G. Barbosa, Instituto Politécnico Nacional, jgonzalezba@ipn.mx
 C. A. B. Martínez, ITESI-Irapuato, cabernal@itesi.edu.mx
 Manuscript received Sep 23, 2019; revised August , .

enfocaron específicamente en la variación del parámetro de diseño α . Las configuraciones seleccionadas fueron: el robot PUMA 560 en [25], y el manipulador 3R en [13]. En [25] muestra que los parámetros α determinan el comportamiento dinámico del manipulador; mientras que para [13], estos parámetros son determinantes en la definición del espacio de trabajo que abarca el efector final.

La aportación de este trabajo considera la construcción y el estudio del comportamiento dinámico de un manipulador adaptativo, que pueda adoptar diversas arquitecturas al modificar sus parámetros de diseño α . Para este tipo de manipuladores adaptativos, las arquitecturas que puedan adoptar facilitarán su adaptación a procesos industriales semejantes, logrando mejoras en las líneas de producción y su consumo de energía. En el presente trabajo la sección II describe las bases implementadas para la solución de la cinemática inversa, necesaria para la simulación y el control de los manipuladores seriales. La sección III analiza la dinámica inversa del manipulador. La trayectoria de evaluación durante el funcionamiento del prototipo se define en la sección IV. La sección V detalla los parámetros de diseño del prototipo adaptativo así como sus características y elementos de control y movimiento. El análisis del consumo de energía, analítico y experimental, es descrito en la sección VI. Finalmente, en la sección VII se concluye la importancia del trabajo desarrollado, así como trabajos futuros propuestos.

II. CINEMÁTICA DE MANIPULADOR 3R DE GEOMETRÍA GENERAL

El análisis cinemático del manipulador 3R de geometría general, ver Fig. 1 (a), se basó en la notación *distal* de Denavit-Hartenberg para el modelado de manipuladores seriales [26]. Cada junta tiene un sistema coordenado definido mediante cuatro parámetros de diseño, dos parámetros angulares: α , θ y dos longitudinales: a , b . La Fig. 1 (a) muestra estos cuatro parámetros. La ecuación que se presenta a continuación, describe la relación de los sistemas coordenados $(i-1)$ -ésimo e i -ésimo por medio de la matriz de transformación homogénea ${}^{i-1}A_i$.

$${}^{i-1}A_i = \begin{bmatrix} c_i & -s_i \lambda_i & s_i \mu_i & a_i c_i \\ s_i & c_i \lambda_i & -c_i \mu_i & a_i s_i \\ 0 & \mu_i & \lambda_i & b_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

donde:

- θ_i $(i-1)$ -ésimo ángulo de la junta: $s_i = \sin \theta_i$,
 $c_i = \cos \theta_i$
- α_i i -ésimo ángulo de torsión o eslabón entre los ejes i -ésimo e $(i-1)$ -ésimo: $\lambda_i = \cos \alpha_i$, $\mu_i = \sin \alpha_i$
- a_i Longitud del eslabón i
- b_i Distancia a la junta $i-1$

La Ecuación 1 describe la relación entre eslabones consecutivos, incluyendo el sistema coordenado fijo; la Ecuación 2 describe la relación directa entre la pose del efector final (p_x, p_y, p_z) y la base $(0, 0, 0)$.

$${}^0A_p = \begin{bmatrix} R & \mathbf{p} \\ \mathbf{0} & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

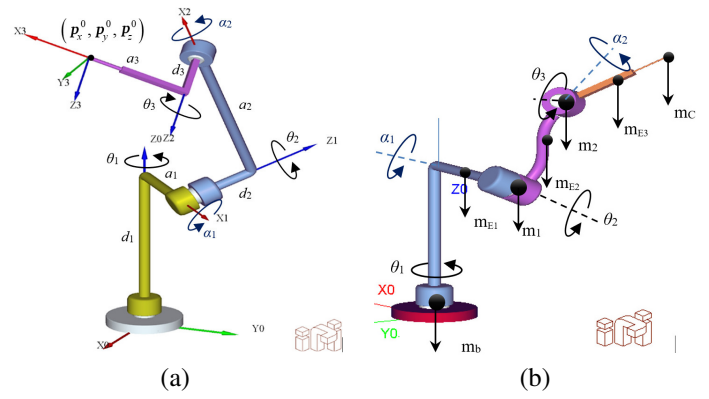


Fig. 1. Cadena cinemática de Manipulador serial 3R de geometría general empleada en: (a) análisis cinemático, y (b) análisis dinámico, imágenes generadas en software ADEFID.

donde:

- 0A_p Pose del efector final respecto al sistema coordenado fijo
- R Matriz de rotación del efector final respecto al sistema coordenado fijo, dimensiones 3×3 ,
- \mathbf{p} Vector posición del efector final, en relación al sistema coordenado fijo, dimensiones 3×1 ,
- $\mathbf{0}$ submatriz 1×3 , $[0 \ 0 \ 0]$, que representa una transformación de perspectiva, la cual es nula al ser una proyección ortogonal.

Con base a las Ecuaciones 1 y 2 se define la cinemática de un manipulador serial, para el presente caso de 3 grados de libertad; en la siguiente ecuación se fusionan ambas.

$$({}^0A_1)({}^1A_2)({}^2A_3) = {}^0A_p \quad (3)$$

La solución propuesta, se basa en las tres expresiones que surgen de igualar el vector de posición, esto es, la cuarta columna del lado izquierdo con la cuarta columna del lado derecho del arreglo matricial de la Ecuación 3. Éstas expresiones obtenidas son la base para la solución de la cinemática inversa del manipulador genérico bajo estudio, la cual de acuerdo a la metodología desarrollada en [26] permite obtener en forma cerrada a través de la solución de un polinomio de cuarto grado, en su tercer variable articular θ_3 . La solución de las variables articulares θ_1 y θ_2 , dependientes del valor obtenido para θ_3 , está basada en el análisis y la solución de ecuaciones cuadráticas.

A. Precauciones en la Solución Cinemática Inversa

Para el análisis descrito en esta sección es necesario un proceso adicional para el recorrido de la trayectoria. El proceso consiste en la selección del valor adecuado para cada variable articular, recordando que la cinemática inversa ofrece múltiples soluciones. El proceso consiste en la selección del valor adecuado para cada variable articular. Para el presente caso solamente se consideran soluciones reales. De acuerdo al manipulador 3R, 2 ó 4 posibles soluciones reales son las opciones a seleccionar. El Algoritmo 1 describe la comparativa entre la solución cinemática inversa a seleccionar y la solución previa. Las variables articulares $[\theta_1, \theta_2, \theta_3]^T$ están definidas

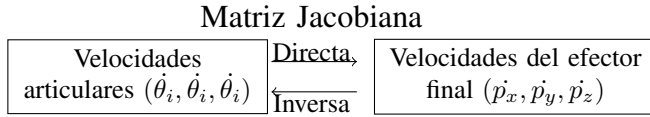


Fig. 2. Relación de velocidades y matriz Jacobiana para manipuladores seriales

por i y j corresponde al número máximo de posibles soluciones (4 en el caso 3R). El valor ϵ depende de la distancia entre punto y punto de la trayectoria. El superíndice PS se refiere a la solución previa. El proceso de selección para una secuencia adecuada de valores, consistió en la aproximación que debe tener la solución actual con la solución previa. Con esto se restringe a cambios mínimos la arquitectura del manipulador para ir de un punto otro a lo largo de la trayectoria indicada y así evitar cambios abruptos que alteren el consumo de energía.

Algorithm 1 Proceso comparativo y selectivo entre la solución cinemática inversa actual y la obtenida previamente (θ^{PS}).

```

1: procedure SOL_NO_LINEAL(  $\theta^{PS}$ ,  $\mathbf{P}$ ,  $\alpha_1, \alpha_2$ )
2:    $j \leftarrow 0$ ;
3:   do  $j \leftarrow j + 1$ 
4:      $\theta^j \leftarrow \text{CINEMATICA\_INVERSA}(\mathbf{P}, \alpha_1, \alpha_2)$ 
5:     if  $|\theta^j - \theta^{PS}| \leq \epsilon$  then  $\theta^{CS} = \theta^j$ 
6:     end if
7:   while  $j \leq 4$ 
8:   Salida:  $[\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3]^T \leftarrow \theta^{CS}$ 
9: end procedure

```

B. Implementación de la Cinemática Inversa: Velocidades y Aceleraciones Angulares

Las ecuaciones descritas en la presente sección se basan en las variables articulares ($\theta_1, \theta_2, \theta_3$), las velocidades articulares ($\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2, \dot{\theta}_3$), y las aceleraciones articulares ($\ddot{\theta}_1, \ddot{\theta}_2, \ddot{\theta}_3$); las cuales describen por completo el problema cinemático para una tarea asignada o para el recorrido de una trayectoria $[p_x, p_y, p_z]^T$ ya definida. Las variables articulares, obtenidas de la solución cinemática inversa, se definen en la Ecuación 4 de forma vectorial:

$$\theta(t) = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3]^T \quad (4)$$

El análisis de velocidad, involucra a la matriz Jacobiana, la cual relaciona las velocidades articulares con las velocidades cartesianas (ver Fig. 2). La matriz Jacobiana se describe en la Ecuación 5 por medio de las derivadas parciales de la posición $[p_x, p_y, p_z]^T$ con respecto a las variables articulares.

$$J_p = \begin{bmatrix} \frac{\partial p_x}{\partial \theta_1} & \frac{\partial p_x}{\partial \theta_2} & \frac{\partial p_x}{\partial \theta_3} \\ \frac{\partial p_y}{\partial \theta_1} & \frac{\partial p_y}{\partial \theta_2} & \frac{\partial p_y}{\partial \theta_3} \\ \frac{\partial p_z}{\partial \theta_1} & \frac{\partial p_z}{\partial \theta_2} & \frac{\partial p_z}{\partial \theta_3} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Para el presente caso de estudio, los términos del vector posición $[p_x, p_y, p_z]^T$, están en función de los parámetros de diseño del manipulador así como de las variables articulares.

La expresión descrita en la Ecuación 6 define las velocidades de las articulaciones del manipulador, en función de las velocidades cartesianas del efector final.

$$[\dot{\theta}_1 \ \dot{\theta}_2 \ \dot{\theta}_3]^T = [J_p^{-1}] [\dot{p}_x \ \dot{p}_y \ \dot{p}_z]^T \quad (6)$$

El comportamiento del vector velocidad cartesiano del efector final se define como el cambio de su posición a lo largo de la trayectoria recorrida en función del tiempo. Para el caso de las aceleraciones articulares, la expresión general es definida en la Ecuación 7.

$$\begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \\ \ddot{\theta}_3 \end{bmatrix} = [J_p^{-1}] \left(\begin{bmatrix} \ddot{p}_x \\ \ddot{p}_y \\ \ddot{p}_z \end{bmatrix} + [\dot{J}_p] \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \end{bmatrix} \right) \quad (7)$$

donde $[\dot{J}_p]$ representa la derivada en función del tiempo t de la matriz Jacobiana, y $[\ddot{p}_x, \ddot{p}_y, \ddot{p}_z]^T$ el comportamiento del vector aceleración cartesiana del efector final a lo largo de la trayectoria recorrida en función de t .

Es importante señalar que, durante el inicio y el final de cualquier trayectoria, la variación de la velocidad cartesiana es más abrupta debido a que se necesita un proceso de aceleración inicial (para comenzar el movimiento), y desaceleración final (para concluir el movimiento). Además, para evitar un cambio brusco en la aceleración, es necesario implementar ecuaciones de desplazamiento cicloidal o polinomial. En la parte media de la trayectoria la velocidad cartesiana del efector final se desea constante, con el objetivo de tener un menor gasto de energía [27]. Mientras que el análisis cinemático es la base para la simulación y el control, el análisis dinámico es el complemento, logrando con ello el estudio completo del comportamiento dinámico durante la ejecución de una tarea del manipulador.

En el Algoritmo 2, $\mathbf{P}^i \leftarrow \{(p_x^i, p_y^i, p_z^i)\}$ es el conjunto de posiciones en el espacio cartesiano que definen la trayectoria del efector final, a un tiempo $T^i \leftarrow \{t^i\}$ de muestreo regular a una velocidad constante. Y $\Gamma \leftarrow \{\gamma^j\}$ corresponde al conjunto de tiempos de muestreo de la tarjeta de adquisición. El número de datos del conjunto \mathbf{P} y T son los mismos (n), mientras que para el conjunto Γ el número de datos es m , y depende del número de muestras adquiridas por la tarjeta de adquisición en la trayectoria definida. $J(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$ corresponde a la matriz jacobiana del manipulador. En el Algoritmo 2, el procedimiento INTERPOLACION nos permite sincronizar los datos teóricos con los datos experimentales. En el primer paso, el tiempo γ^j es usado para encontrar los valores más cercanos de $\{t^k \in T \mid |t^k - \gamma^j| \leq \Delta_t\}$, donde cada tiempo en t^k tiene asociado una posición en $\{(p_x^k, p_y^k, p_z^k) \in \mathbf{P}\}$. El conjunto de tiempos $\{t^k\} \in T$, sus respectivas posiciones $\{p^k\} \in \mathbf{P}$ y el tiempo de adquisición de la tarjeta γ^j es usado para interpolar la posición (p_x^j, p_y^j, p_z^j) .

III. DINÁMICA DEL MANIPULADOR 3R

El análisis dinámico implementado en el manipulador 3R con variación en sus ángulos α_1 y α_2 , se basa en la formulación de Lagrange. Al igual que el análisis cinemático, el análisis dinámico se define desde dos puntos distintos de evaluación, la dinámica inversa y la dinámica directa. La

Algorithm 2 Cálculo de las velocidades y aceleraciones angulares para una trayectoria definida. $\mathbf{P}^i \leftarrow \{(p_x^i, p_y^i, p_z^i)\}$, $T^i \leftarrow \{t^i\}$, $\Gamma \leftarrow \{\gamma^j\}$

```

1: procedure VEL_ACC_AN(  $\mathbf{P}$ ,  $T$ ,  $\Gamma$ ,  $\alpha_1, \alpha_2$ )
2:    $j \leftarrow 0$ ;
3:    $\theta^0 \leftarrow$  Configuración inicial;
4:   do  $j \leftarrow j + 1$ 
5:      $\mathbf{P}^j \leftarrow$  INTERPOLACION(  $\mathbf{P}$ ,  $T$ ,  $\gamma^j$ )
6:     % Algoritmo 1
7:      $\theta^j \leftarrow$  SOL_NO_LINEAL(  $\theta^{j-1}$ ,  $\mathbf{P}^j$ ,  $\alpha_1, \alpha_2$ )
8:     % Evaluación de la Ecuación 5
9:      $J^j \leftarrow J(\theta_1^j, \theta_2^j, \theta_3^j)$ ;
10:     $\dot{\mathbf{P}}^j \leftarrow \frac{\mathbf{P}^j - \mathbf{P}^{j-1}}{\gamma^j - \gamma^{j-1}}$ ; % donde  $\dot{\mathbf{P}}^j = [\dot{p}_x, \dot{p}_y, \dot{p}_z]^T$ 
11:    % Evaluación de la Ecuación 6
12:     $\dot{\theta}^j \leftarrow [J_p^{-1}] \dot{\mathbf{P}}^j$ 
13:    if  $j \geq 2$  then
14:       $\ddot{\mathbf{P}}^j \leftarrow \frac{\dot{\mathbf{P}}^j - \dot{\mathbf{P}}^{j-1}}{\gamma^j - \gamma^{j-1}}$ ; % donde  $\ddot{\mathbf{P}}^j = [\ddot{p}_x, \ddot{p}_y, \ddot{p}_z]^T$ 
15:      % Evaluación de la Ecuación 7
16:       $\ddot{\theta}^j \leftarrow [J_p^{-1}] (\ddot{\mathbf{P}}^j + [\dot{J}_p] \dot{\theta}^j)$ 
17:    end if
18:    while  $j \leq m$ 
19:      Salida:  $\dot{\theta}^j, \ddot{\theta}^j$ 
20: end procedure
21:
22: procedure INTERPOLACION(  $\mathbf{P}$ ,  $T$ ,  $\gamma$ )
23:    $\{(p, t)\} \leftarrow \{p^k \in \mathbf{P}, t^k \in T \mid |t^k - \gamma| \leq \Delta_t\}$ 
24:    $[p_x^j, p_y^j, p_z^j] \leftarrow$  B-SPLINE( $\{(p, t)\}$ ,  $\gamma$ );
25:   Salida:  $[p_x^j, p_y^j, p_z^j]$ 
26: end procedure

```

Matriz Jacobiana

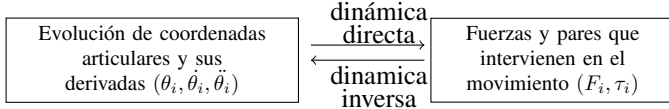


Fig. 3. Relación entre dinámica inversa y dinámica directa

dinámica inversa expresa las fuerzas y pares que intervienen en función de la evolución temporal de las coordenadas articulares y sus derivadas. La directa expresa la evolución temporal de las coordenadas articulares y sus derivadas, en función de las fuerzas o pares que intervienen, ver Fig. 3.

El modelo dinámico es uno de los problemas de mayor complejidad en el análisis de manipuladores robóticos, esto debido a su no linealidad. Sin embargo, de acuerdo a [27] resulta indispensable para: (a) simular el movimiento del robot, (b) diseñar y evaluar la estructura mecánica del robot, (c) seleccionar los actuadores y (d) diseñar y evaluar el control dinámico del robot. Los modelos dinámicos de manipuladores seriales se requieren principalmente para propósitos de simulación y control. El control involucra la dinámica inversa, mientras la simulación requiere de la dinámica directa.

1) *Dinámica Inversa: Formulación de Lagrange*: La formulación de Lagrange para el modelo dinámico de los robots se basa en consideraciones energéticas [28]. Para cada junta el vector de torques generalizados de acuerdo a Lagrange se representa por medio de las expresiones indicadas a continua-

TABLA I
VALORES CINEMÁTICOS PARA EJECUCIÓN DE MOVIMIENTO DE PROTOTIPO

Entrada	Base	Hombro	Codo	Unidades
Posición angular inicial	0	0	0	[rad]
Posición angular final	-1.22	2.36	-2.09	[rad]
Velocidad	0.87	0.87	0.87	[rad/s]
Aceleración	5.24	5.24	5.24	[rad/s ²]
Desaceleración	5.24	5.24	5.24	[rad/s ²]
<i>Jerk</i>	5.24	5.24	5.24	[rad/s ³]

ción,

$$\begin{aligned} \tau_1 &= \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_1} - \frac{\partial L}{\partial \theta_1}; & \tau_2 &= \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_2} - \frac{\partial L}{\partial \theta_2}; \\ \tau_3 &= \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_3} - \frac{\partial L}{\partial \theta_3} \end{aligned} \quad (8)$$

Al no incluir la fricción en la Ecuación 8, se considera un sistema conservativo o ideal, por tanto, el Lagrangiano L se define por:

$$L = \sum K_i - \sum P_i \quad (9)$$

Los términos K_i definido por $(K_b, K_1, K_2, K_3, K_c)$ y P_i por $(P_b, P_1, P_2, P_3, P_c)$ representan las energías cinética y potencial, respectivamente. El subíndice b se refiere a la base, los subíndices 1, 2 y 3, indican los tres eslabones del manipulador; finalmente, c se refiere a la carga manipulada por el efector final, ver Fig. 1 (b). Para el análisis dinámico, se consideró adecuado utilizar masas puntuales en la ubicación del sistema servomotor-reductor de velocidad así como en la parte media de cada uno de los tres eslabones del manipulador bajo análisis, ver Fig.1 (b). Las expresiones desarrolladas no se incluyen en la presente redacción debido a su tamaño. Estas expresiones únicamente se encuentran implícitas dentro del algoritmo que define la construcción de las gráficas del comportamiento de torques desarrollados por cada articulación del manipulador bajo estudio. Se recomienda revisar [29], para análisis y comparación de expresiones similares desarrolladas por completo.

IV. DEFINICIÓN DE TRAYECTORIA

La trayectoria empleada para el presente estudio, analítico y experimental, se definió con base en los valores angulares asignados a cada servomotor del prototipo, ver Tabla I. Las pruebas experimentales se basaron en el espacio de las juntas, esto es, a cada uno de los tres servomotores le fueron asignados los valores inicial y final del ángulo de giro, ver Tabla I. Esto generó la ejecución del prototipo la cual fue monitoreada para el análisis de su consumo de energía. La ejecución realizada por el prototipo se convirtió al espacio Cartesiano por medio de la cinemática directa, lo cual generó la trayectoria que debe recorrer el efector final del manipulador para su estudio analítico.

Por medio del monitoreo de datos del software, se obtuvo la evolución de los valores de cada una de las posiciones angulares registradas en los siguientes rangos $0 \leq \theta_1 \leq -1.22rad$, $0 \leq \theta_2 \leq 2.36rad$ y $0 \leq \theta_3 \leq -2.09rad$. Valores que por medio de la cinemática directa fueron transformados a las coordenadas cartesianas las cuales definieron la trayectoria a emplear. La Fig. 4 (a) y (b) muestra de forma esquemática la trayectoria recorrida por el efector final del prototipo.

V. PARÁMETROS DE DISEÑO DEL PROTOTIPO

Los valores de diseño del prototipo utilizado se describen en la Tabla II. El valor de los ángulos de torsión α no se indican ya que pueden variar de acuerdo a los requerimientos. En la Fig. 4 (c) y (d) se muestra el prototipo adaptativo 3R, incluye: (c) una arquitectura ortogonal, con valores $\alpha_1 = -\pi/2$ rad, $\alpha_2 = \pi$ rad, y (d) una arquitectura arbitraria, con valores $\alpha_1 = -2\pi/3$ rad, $\alpha_2 = -7\pi/6$ rad. En la configuración mostrada, los ángulos de torsión α se delimitan a $-\pi/2 \leq \alpha_1 \leq -\pi$, y $\pi \leq \alpha_2 \leq 3\pi/2$ rad; pero de acuerdo al diseño, se puede cubrir más de un octante. El octante de posibles combinaciones surge de los valores adoptados por α_1 y α_2 . Las juntas son tres del tipo revoluta 3R, y se caracteriza en función de la variación de los parámetros de diseño (ángulos de torsión) α_1 y α_2 . En la Figura 5 se muestra el diseño que permite visualizar cómo es posible ajustar dichos valores. El tipo de manipulación es sin agarre, solo se considera el posicionamiento del efector final. El análisis del espacio de trabajo no fue necesario debido a que del rango de valores angulares asignados a cada uno de los tres servomotores del prototipo se definió la trayectoria a evaluar, tanto experimental como analíticamente.

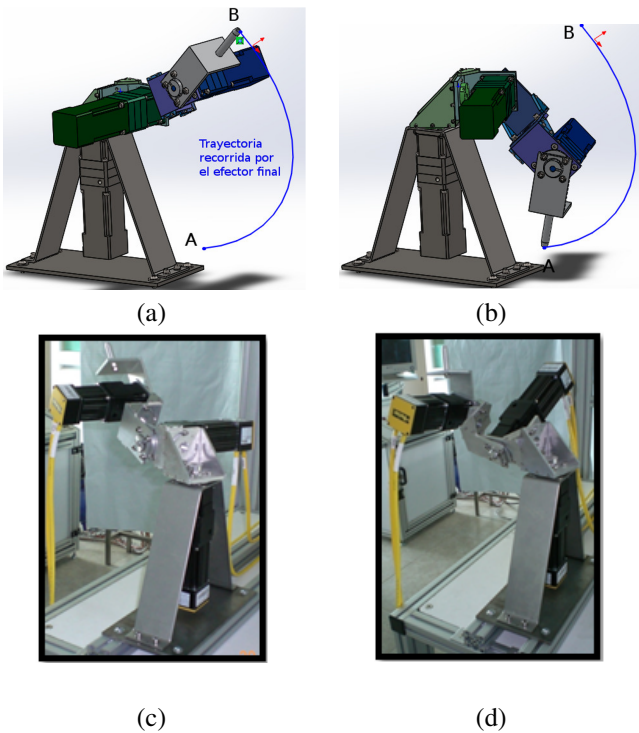


Fig. 4. (a) y (b) Diseño CAD de prototipo 3R de geometría general: los puntos B y A corresponden al punto final e inicial de la trayectoria del robot representada por la curva azul. Arquitecturas de prototipo experimental: (c) ortogonal, y (d) arbitraria.

TABLA II
PARÁMETROS LONGITUDINALES D-H DEL PROTOTIPO

Eslabón	b_i [m]	a_i [m]	α_i [rad]
1	0.297	0.100	-
2	0	0.150	-
3	0	0.150	-

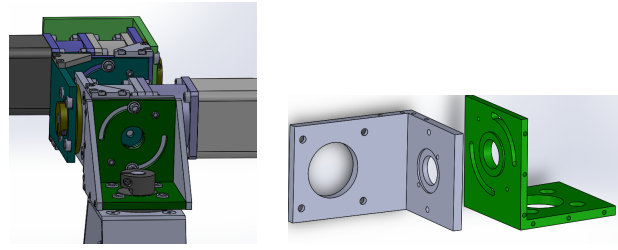


Fig. 5. Diseño de eslabones con ranuras que permiten el ajuste del ángulo de torsión α

A. Sistema de Control del Prototipo

El sistema de control para los servomotores del prototipo está compuesto por un servoamplificador (*drive*), un controlador (*controller*), el equipo de cómputo (PC), y el software de control, [30]. Para el correcto suministro de la demanda de movimiento para cada servomotor se requiere un servoamplificador. El equipo adquirido para el funcionamiento del prototipo es el controlador digital ACR9640/P3/U0/B0 DC, y los tres servo-amplificadores digitales Aries AR-08PE. Los servomotores utilizados son del tipo sin escobillas serie SM de Parker®, de forma específica SM232AE-F10N para la “base” y el “hombro”, y SM231AE-F10N para el “codo”. Los reductores de velocidad tipo planetario son NEMA23, con relaciones de velocidad, 1:25 para la “base”, 1:15 para el “hombro”, y 1:10 para el “codo”. Los servomotores han sido programados para operar a una velocidad angular de 1000 rpm, valor que en sus curvas de comportamiento de torque contra velocidad angular se indica como estable. En relación al ajuste y calibración de los servomotores se realizó automáticamente para cada uno de estos logrando la atenuación adecuada en la señal de salida, así como en su funcionamiento. Para la base, el reductor de velocidad consta de baleros reforzados para soportar la mayor parte del peso del prototipo. El software de control ACR-View® empleado soporta librerías y aplicaciones en lenguajes Visual C++, Visual Basic, Visual C#, Microsoft.NET, LabVIEW® y Delphi. La comunicación del sistema de control ha sido vía Ethernet PowerLink.

VI. ANÁLISIS DE ENERGÍA CONSUMIDA DURANTE RECORRIDO DE TRAYECTORIA

En el presente reporte la forma de evaluar la energía empleada E de manera analítica se define como la suma de la integral del torque desarrollado $\tau(t)$ por cada una de las juntas del manipulador multiplicado por su respectiva velocidad angular $\theta(t)$ durante el tiempo de recorrido, tal como se muestra en la siguiente expresión,

$$E = \int_{t_{INICIO}}^{t_{FIN}} \left[\sum_{i=0}^{i=n_s} (\tau_i(t) \cdot \dot{\theta}_i(t)) \right] dt \quad (10)$$

$$\cong \sum_{j=1}^{j=n_D} \left[\sum_{i=0}^{i=n_s} (\tau_{i,j} \cdot \dot{\theta}_{i,j}) \right] \Delta t$$

donde n_s representa el número de servomotores, n_D el número de datos registrados durante ciclo, Δt representa el tiempo entre registro de datos, $\tau_{i,j}$ es el par del servomotor i

en el dato j , $\dot{\theta}_{i,j}$ es la velocidad angular del servomotor i en el dato j . El término $\tau(t) \cdot \theta(t)$ indica la potencia desarrollada $P(t)$.

A. Gráficas Experimentales

Con los valores de entrada definidos en la Tabla I, la ejecución del movimiento del prototipo se hizo repetitiva para obtener las gráficas y valores de salida definiendo el comportamiento de cada servomotor. Las gráficas y valores de salida $\theta, \dot{\theta}(t), \tau(t)$ se muestran en las Figs. 6 y 7, éstas se obtuvieron de la señal generada por el osciloscopio incluido en el software empleado. Las primeras señales obtenidas experimentalmente muestran la evolución angular de los tres ejes durante el recorrido del efector final del prototipo por la trayectoria establecida, ver Fig. 6. En la Fig. 7 se muestra el comportamiento angular del eje 1 del prototipo experimental durante la ejecución evaluada, la cual muestra: posición angular (curvas trapezoidales), velocidad angular (curvas irregulares alternantes de mayor amplitud) y torque (curvas irregulares alternantes de menor amplitud). La pantalla del osciloscopio usado por el software cubre la repetición de cinco ciclos completos. Para el caso de velocidad angular y torque (curvas no trapezoidales), los datos recabados tienen variaciones pequeñas entre ciclo y ciclo, esto se aprecia en las curvas irregulares mostradas en la Fig. 7. Para la posición angular (forma trapezoidal), estas variaciones no existen, ver Fig. 6.

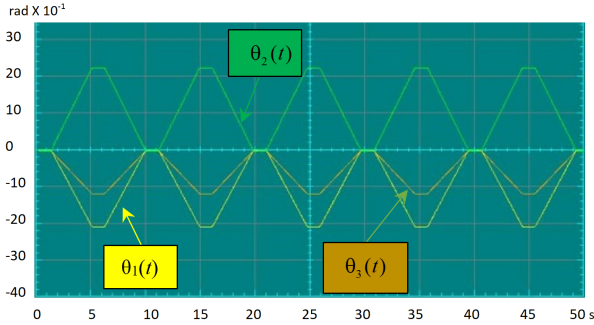


Fig. 6. Comportamiento angular de los tres ejes $\theta_1(t), \theta_2(t), \theta_3(t)$, del prototipo experimental durante el recorrido de la trayectoria establecida.

El tiempo de duración de cada ciclo es de 9 segundos aproximadamente. Los intervalos de tiempo entre registros son variables en un rango de 0.01 a 0.04 segundos, siendo esta una de las razones por la cual difieren las mediciones de ciclo a ciclo. El total de registros durante ciclo fue de alrededor de 300 datos sensados, esto es, un promedio de 33 mediciones por cada segundo. También, es importante señalar que durante el funcionamiento del prototipo sólo se pudo obtener el registro de datos de un eje de forma simultánea, esto debido a que el software solo permite el registro y la salida simultánea de cuatro señales como máximo. Por tanto, no fue posible obtener en un solo ciclo las seis señales necesarias ($\theta_1, \tau_1, \dot{\theta}_2, \tau_2, \theta_3, \tau_3$) para el monitoreo completo del prototipo, lo que generó un desfase adicional entre los datos obtenidos. Siendo esta otra causa de la irregularidad entre curvas de torque y de velocidad angular entre ciclos.

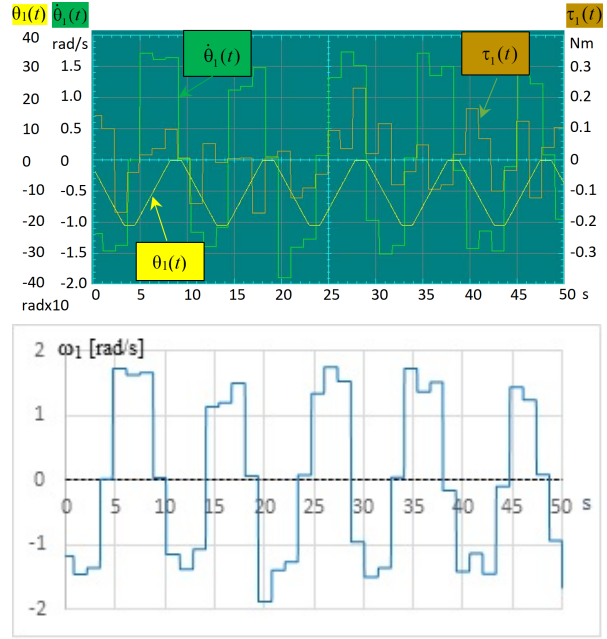


Fig. 7. Comportamiento angular del eje 1 de prototipo en funcionamiento. La gráfica muestra cinco ciclos de la misma trayectoria

La Tabla III indica la potencia y la energía consumidas para cada ciclo.

TABLA III
ENERGÍA Y POTENCIA TOTAL CONSUMIDAS POR CICLO DEL PROTOTIPO DURANTE FUNCIONAMIENTO

Ciclo	Potencia [W]	Energía [J]	Potencia, valor absoluto [W]	Energía, valor absoluto [J]
1	26.388	0.790	90.843	2.663
2	36.715	1.040	85.937	2.474
3	26.533	0.731	102.58	2.999
4	35.056	0.882	89.965	2.640
5	22.608	0.645	97.525	2.751

Los valores de potencia $P(t)$ y energía $E(t)$ consumidas por el prototipo se basan en la Ecuación 10 y se definen en las Ecuaciones 11 (ver Tabla III). El valor absoluto se emplea para la suma total de valores obtenidos durante los registros, para eliminar los valores negativos y considerar el total requerido. La trayectoria utilizada en el experimento se observa en la figura 4, el manipulador va de la posición A a la B y de la posición B a la A . Como se observa en la figura 8 (b) la energía requerida por el manipulador entre la posición A y B es positiva (primer parte de la gráfica) mientras que la energía consumida por el manipulador entre la posición B y A es negativa. Para evitar que se contrarresten las energías en la trayectoria total se considera el valor absoluto de estas, tal como se observa en la figura 8 (d).

$$P(t) = \sum_{j=1}^{j=n_D} \left[\tau_{1,t_j} \dot{\theta}_{1,t_j} + \tau_{2,t_j} \dot{\theta}_{2,t_j} + \tau_{3,t_j} \dot{\theta}_{3,t_j} \right] \quad (11)$$

$$E(t) = \sum_{j=1}^{j=n_D} \left[\tau_{1,t_j} \dot{\theta}_{1,t_j} + \tau_{2,t_j} \dot{\theta}_{2,t_j} + \tau_{3,t_j} \dot{\theta}_{3,t_j} \right] \Delta t$$

donde $\Delta_t = t_j - t_{j-1}$, t es el tiempo de registro para cada dato monitoreado.

Los intervalos de tiempo entre cada registro son variables. La Tabla IV presenta un muestreo del registro de 5 datos, donde se observa que el sensado respecto al tiempo no es uniforme. Con el propósito de sincronizar los datos teóricos con los experimentales, los intervalos de tiempo experimental son usados para generar las posiciones teóricas como se muestra en el Algoritmo 2. Por otro lado, la inconstancia en el tiempo de muestreo entre datos puede ser una de las causas que generen curvas irregulares entre ciclos para el caso de la velocidad angular y el torque, ver Figura 7. En la Figura 7, se puede apreciar la variación entre ciclos para ω_1 . Otra causa que genera las irregularidades es debido al sistema de transmisión por engranes de los reductores de velocidad, donde no se logra una eficiencia del 100%, generando un traslape o *backlash*. Aunado a lo anterior, cabe resaltar que durante el funcionamiento del prototipo sólo se pudo obtener el registro de datos de un eje de forma simultánea, esto debido a que el software solo permite el registro y la salida simultánea de cuatro señales como máximo. Por tanto, no fue posible obtener en un ciclo las seis señales ($\omega_1, \tau_1, \omega_2, \tau_2, \omega_3, \tau_3$) necesarias para el monitoreo completo del prototipo, generando un desfase adicional entre los datos obtenidos al evaluar la energía.

TABLA IV

MUESTREO NO UNIFORME DEL REGISTRO DE DATOS DEL PROTOTIPO.

tiempo [s] t_i	4.660	4.688	4.723	4.768	4.791
ω_1	0.016	0.016	0.016	1.720	1.720
$t_i - t_{i-1}$ [s]	-	0.028	0.035	0.045	0.023

B. Comparativa de Gráficas: Experimentales vs Analíticas

Para validar como afecta la variación de los valores α_1 y α_2 en el consumo de energía para el recorrido de una misma trayectoria, se demuestra en las siguientes gráficas que existe un comportamiento similar y consistente entre los valores analíticos y los experimentales. Las gráficas son generadas en base a los datos de entrada de la Tabla I, y con valores de diseño de la Tabla II. Se consideró $\alpha_1 = -\pi/2$ y $\alpha_2 = \pi$ en ambos casos, comunes en robots industriales. La Fig. 8 (a), (c) muestra el comportamiento de la velocidad angular y el torque del eje 1 del prototipo respectivamente, mientras que la Fig. 8 (b), (d) muestra la energía y la energía absoluta consumidas por el eje 2 durante un ciclo. Las figuras muestran las gráficas analíticas (calculadas) y experimentales (sensadas). Estas últimas se comportan generalmente de manera escalonada debido a la discretización en el monitoreo y registro de datos. Después de mostrar la similitud entre el comportamiento de curvas analíticas y experimentales y así sustentar que los modelos dinámicos implementados son adecuados, lo siguiente es cotejar analíticamente que el consumo de energía es afectado al cambiar los valores de los ángulos α_1 y α_2 .

C. Gráficas Analíticas

En la presente sección se compara analíticamente el comportamiento dinámico de un manipulador 3R para diversos

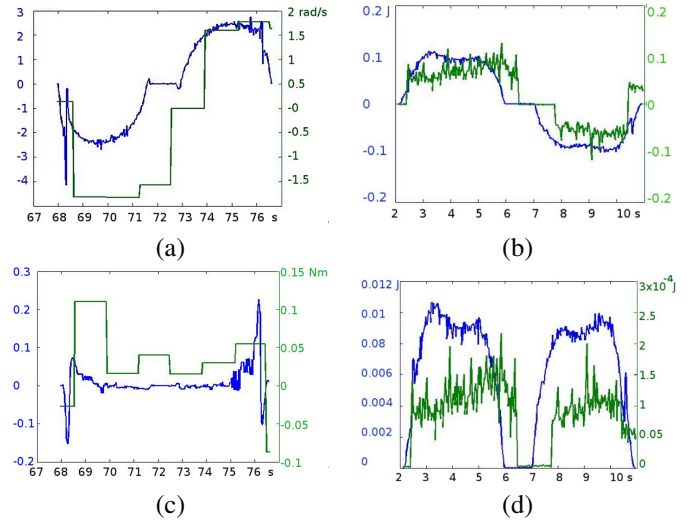


Fig. 8. Comportamiento analítico (color azul) y experimental (color verde). Para eje 1 “base” de: (a) velocidad angular $\theta_1(t)$, y (c) torque $\tau_1(t)$. Para eje 2 “hombro”: (b) energía y (d) energía absoluta consumida. Curvas generadas de valores descritos en la Tabla V.

valores de sus ángulos α en el recorrido de la misma trayectoria, ya definida anteriormente. Los valores empleados para α_1 y α_2 en ambos casos se indican en la Tabla V. Se pretende comprobar que el comportamiento dinámico del manipulador y su consumo de energía son afectados si los valores de α cambian. El rango de valores angulares ingresados para el movimiento del prototipo definen el presente estudio. Los valores angulares discretizados por el software empleado para el prototipo, definen la trayectoria cartesiana que sigue el efector final a partir de la cinemática directa. Por tanto, el control en base al espacio de las juntas o articulaciones define la parte experimental, mientras que la trayectoria definida en el espacio cartesiano define el estudio analítico.

TABLA V

VALORES DE α PARA COMPARATIVA ANALÍTICA DE GASTO ENERGÉTICO

valores α analíticos $_a$	valores α analíticos $_b$
$\alpha_1 = -102^\circ, \alpha_2 = 200^\circ$	$\alpha_1 = 200^\circ, \alpha_2 = -102^\circ$

En las gráficas mostradas en las Fig. 9 y 10 se compara el consumo de energía para el recorrido de la misma trayectoria. Estas curvas, ambas obtenidas analíticamente de los valores descritos en la tabla V. En la Fig. 9 se muestra el valor absoluto del comportamiento de cada eje del manipulador en relación al consumo de energía durante la trayectoria recorrida por el efector final. Finalmente, en la Fig. 10, se ilustra el consumo total de la energía requerida por el manipulador en el recorrido de la misma trayectoria para ambas arquitecturas. De las curvas mostradas en la Fig. 10 se puede llevar a cabo una comparativa directa entre los valores de energía consumida visualizando que bajo las mismas condiciones la cantidad de energía difiere en un 7.5% al momento de emplear diferentes valores para los ángulos α . Valor que puede ser mejorado aplicando un proceso de optimización. En función de las distintas combinaciones posibles de valores de α_1 y α_2 , ya mencionadas en la sección V. En la Figura 11, se muestra una gráfica tridimensional mediante la cual se puede

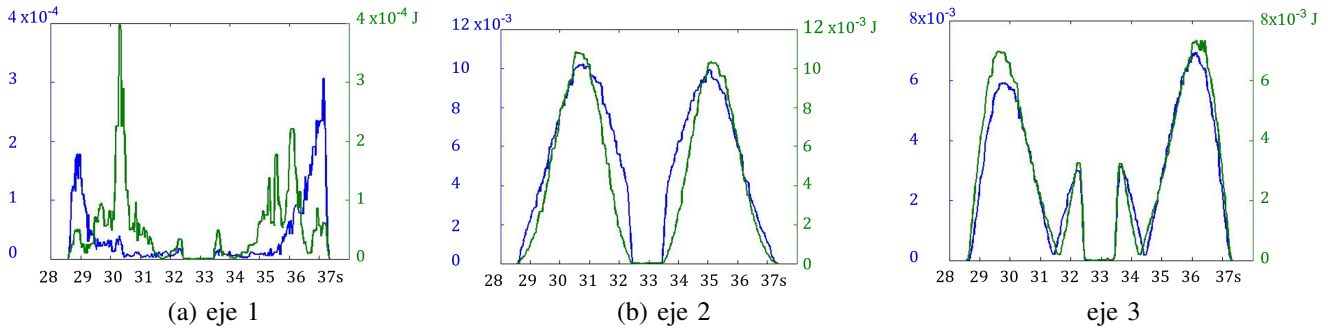


Fig. 9. Comportamiento analítico de la energía absoluta consumida por cada uno de los ejes del manipulador para valores α descritos en la Tabla V.

identificar la combinación óptima de valores α_1 y α_2 que estime del manipulador el mínimo gasto de energía para una misma trayectoria. Esta gráfica ha sido calculada usando el algoritmo 3.

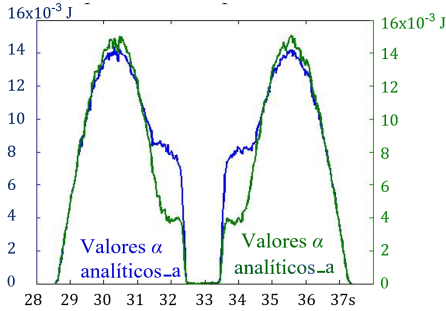


Fig. 10. Valor absoluto de la energía total empleada durante recorrido de efector final del manipulador para valores α descritos en la Tabla V.

Algorithm 3 Cálculo de la energía consumida por el manipulador para una trayectoria definida en función de α_1 y α_2

```

1: procedure EVALUACIÓN_ENERGÍA( )
2:    $\alpha_1 \leftarrow -0.5; \alpha_2 \leftarrow 2; E_t \leftarrow 0$ 
3:    $\{(p_x^k, p_y^k, p_z^k)\} \in \mathbf{P}$  % Trayectoria definida
4:    $\{t^k\} \in T$  % Muestreo de la trayectoria
5:    $\{\gamma^k\} \in \Gamma$  % Muestreo de la tarjeta de adquisición
6:   do  $\alpha_1 \leftarrow \alpha_1 + 0.1$ 
7:     do  $\alpha_2 \leftarrow \alpha_2 + 0.1$ 
8:       % Algoritmo 2
9:        $\theta^j, \dot{\theta}^j \leftarrow \text{VEL\_ACC\_AN}(\mathbf{P}, \mathbf{T}, \Gamma, \alpha_1, \alpha_2)$ 
10:       $(\tau_1, \tau_2, \tau_3) \leftarrow \text{Aplicando la Ecuación 8}$ 
11:       $E \leftarrow \text{Aplicando la Ecuación 10}$ 
12:       $E_t \leftarrow E_t + E$ 
13:     while  $\alpha_1 \leq 4$ 
14:   while  $\alpha_2 \leq -2.5$ 
15:   Salida:  $E_t(\alpha_1, \alpha_2)$ 
16: end procedure

```

Actualmente existen diversos parámetros de análisis y valoración energética para los robots industriales, para el presente proyecto se han seleccionado los parámetros de diseño α como objetivo de estudio. Elección que se sustenta con los resultados obtenidos en el presente artículo donde se ha comprobado el impacto que tienen estos en el consumo de energía para la ejecución de una tarea en específico.

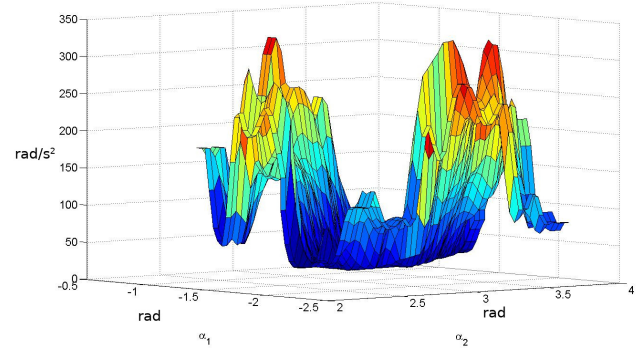


Fig. 11. Estimación del consumo de energía ($\omega_1^2 + \omega_2^2 + \omega_3^2$) del manipulador en función de los ángulos de torsión.

VII. CONCLUSIONES

En el presente artículo se analizó el impacto que tienen los parámetros de diseño α en el consumo de energía de un manipulador 3R para la ejecución de una tarea específica. En la primera parte de los resultados el comportamiento entre gráficas analíticas y experimentales fue semejante, lo que asegura que los modelos dinámicos analíticos empleados son adecuados. Para ambas gráficas los valores fueron $\alpha_1 = -90^\circ$, y $\alpha_2 = 180^\circ$, comunes de los robots industriales.

La discrepancia entre los perfiles experimentales de torque y de velocidad angular entre ciclos fue debido a tres causas principales: a) el desfase entre monitoreo y registro de datos el cual no fue constante, b) el perfil trapezoidal de la posición angular que maneja internamente el software para el control del prototipo, y c) a la limitante de obtener el registro de datos para sólo un eje de forma simultánea; resultando más viable aplicar procesos de interpolación a la primera de estas causas y así mejorar los perfiles obtenidos.

En los resultados analíticos para diferentes valores α , se pudo comprobar que el consumo de energía es distinto para el recorrido de la misma trayectoria. El ahorro fue de aproximadamente un 7.5%, además de que hoy en día una gran cantidad de robots industriales operan continuamente resultando de gran importancia su logro. El considerar un proceso de optimización en la selección de estos valores α , inducirá mejoras en el consumo de energía. El diseño y la construcción del prototipo adaptativo del manipulador serial 3R con variación en sus ángulos de torsión α , y la validación del impacto que tienen estos sobre su consumo de energía,

hace factible considerar la inclusión de lo aquí descrito a nivel industrial.

REFERENCES

- [1] C. Bryan, M. Grenwalt, and A. Stienecker, "Energy consumption reduction in industrial robots," in *Proceedings ASEE North Central Sectional Conference*, 2010.
- [2] A. Mohammeda, B. Schmidt, L. Wang, and L. Gaoc, "Minimizing energy consumption for robot arm movement," *Procedia CIRP*, vol. 25, pp. 400–405, 2014.
- [3] C. Mose and N. Weinert, "Process chain evaluation for an overall optimization of energy efficiency in manufacturing—the welding case," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 34, pp. 44–51, 2015.
- [4] E. Uhlmann, S. Reinkober, and T. Hollerbach, "Energy efficient usage of industrial robots for machining processes," *Procedia CIRP*, vol. 48, pp. 206–211, 2016.
- [5] M. Pellicciari, G. Berselli, F. Leali, and A. Vergnano, "A method for reducing the energy consumption of pick-and-place industrial robots," *Mechatronics*, vol. 23, no. 3, pp. 326–334, 2013.
- [6] Z. Bi and L. Wang, "Optimization of machining processes from the perspective of energy consumption: A case study," *Journal of manufacturing systems*, vol. 31, no. 4, pp. 420–428, 2012.
- [7] I. Raņķis, D. Meike, and A. Senfelds, "Utilization of regeneration energy in industrial robots system," vol. 31, pp. 95–100, 2013.
- [8] P. Papcun and J. Jadlovský, "Optimizing industry robot for maximum speed with high accuracy," vol. 48, pp. 533–542, 2012.
- [9] K. Paes, W. Dewulf, K. Vander Elst, K. Kellens, and P. Slaets, "Energy efficient trajectories for an industrial abb robot," *Procedia Cirp*, vol. 15, pp. 105–110, 2014.
- [10] Y. Machino and I. Mizuuchi, "Analysis of time optimization for a robot arm with series elastic joints," in *International Conference on Control, Automation and Robotics*, 2017, pp. 99–102.
- [11] G. Cheng and J.-g. Hu, "Robust proximate time-optimal servomechanism with speed constraint for rapid motion control," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 30, no. 4, pp. 379–388, 2014.
- [12] M. Ceccarelli and C. Lanni, "A multi-objective optimum design of general 3r manipulators for prescribed workspace limits," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 39, no. 2, pp. 119–132, 2004.
- [13] Y. Tsai and A. Soni, "The effect of link parameter on the working space of general 3r robot arms," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 19, no. 1, pp. 9–16, 1984.
- [14] Paryanto, M. Brossog, J. Kohl, J. Merhof, S. Spreng, and J. Franke, "Energy consumption and dynamic behavior analysis of a six-axis industrial robot in an assembly system," *Procedia CIRP*, vol. 23, pp. 131–136, 2014.
- [15] J. A. Snyman and F. van Tonder, "Optimum design of a three-dimensional serial robot manipulator," *Structural optimization*, vol. 17, no. 2, pp. 172–185, Apr 1999.
- [16] J. Olvander, X. Feng, and B. Holmgren, "Optimal kinematics design of an industrial robot family," in *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, 2008, pp. 777–787.
- [17] M. Gadaleta, M. Pellicciari, , and G. Berselli, "Optimization of the energy consumption of industrial robots for automatic code generation," *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, vol. 57, p. 452–464, 2019.
- [18] F. Rubio, C. Llopis-Albert, F. Valero, and J. L. Suñer, "Industrial robot efficient trajectory generation without collision through the evolution of the optimal trajectory," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 86, pp. 106–112, 2016.
- [19] P. Ystgaard, T. B. Gjerstad, T. K. Lien, and P. A. Nyen, "Mapping energy consumption for industrial robots," in *Leveraging Technology for a Sustainable World*. Springer, 2012, pp. 251–256.
- [20] G. Ingarao, H. Vanhove, K. Kellens, A. Behera, M. Fabrizio, and J. Duffou, "Energy consumption analysis of robot based spif," 01 2013.
- [21] A. Othman, K. Belda, and P. Burget, "Physical modelling of energy consumption of industrial articulated robots," in *International Conference on Control, Automation and Systems*, 2015, pp. 784–789.
- [22] B. Vanderborght, R. Van Ham, D. Lefeber, T. G. Sugar, and K. W. Hollander, "Comparison of mechanical design and energy consumption of adaptable, passive-compliant actuators," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 28, no. 1, pp. 90–103, 2009.
- [23] M. Plooij and M. Wisse, "A novel spring mechanism to reduce energy consumption of robotic arms," in *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2012, pp. 2901–2908.
- [24] P. Shiakolas, K. Conrad, and T. Yih, "On the accuracy, repeatability, and degree of influence of kinematics parameters for industrial robots," *International journal of modelling and simulation*, vol. 22, no. 4, pp. 245–254, 2002.
- [25] M. Y. Ibrahim and C. D. Cook, "Effect of a robot's geometrical parameters on its optimal dynamic performance," in *International Conference on Intelligent Control and Instrumentation*, vol. 2, Feb 1992, pp. 820–825.
- [26] J. Craig, *Robótica*, 3rd ed. México: Pearson Educación, 2006.
- [27] A. Barrientos, L. F. Peñin, C. Balaguer, and R. Aracil, *Fundamentos de Robótica*, 2007.
- [28] B. Siciliano, L. Sciacivico, L. Villani, and G. Oriolo, *Robotics Modelling, Planning and Control*, 1st ed. Springer-Verlag London, 2009.
- [29] S. A. Castillo and R. N. Caberta, "Caracterización de un robot manipulador articulado," *Coordinación de Mecatrónica, Tesis de Maestría, CENIDET, México, Junio del*, 2003.
- [30] *ACR9000 Series hardware installation guide, ACR Motion Controllers-88-022337-01H*, 2010.



Erick-Alejandro González-Barbosa Obtuvo la licenciatura, maestría y doctorado en ingeniería mecánica en la Universidad de Guanajuato en 2004, 2006 y 2009 respectivamente. Profesor Investigador del Instituto Tecnológico Superior de Irapuato-ITESI, México. Sus áreas de interés incluyen: modelado y simulación de sistemas y mecatrónicos, así como cinemática y dinámica de robots industriales.



Maximino-Antonio González-Palacios Ingeniero mecánico y eléctrico por la Universidad Iberoamericana-León. Maestría en ingeniería por la Universidad de Guanajuato y el doctorado en 1992 por la Universidad McGill, Montreal, donde completó un Posdoctorado en 1993. De 1997 a 2000 dirigió el Departamento de Investigación y Desarrollo de Placage Unique, Inc., Québec. Desde el 2000, es director de IPI (Integración de Procesos Industriales).



Luz-Antonio Aguilera-Cortés Obtuvo la licenciatura, maestría y doctorado en ingeniería mecánica en la Universidad de Guanajuato en 1988, 1990 y 1995 respectivamente. Actualmente es profesor titular del Departamento de Ingeniería Mecánica DICIS-UG. Sus áreas de interés incluyen vibraciones mecánicas, mecatrónica, MEMS y diseño mecánico.



José-Joel González-Barbosa Ingeniero Electrónico por la Universidad de Guanajuato, México. Maestría y doctorado en Informática y Telecom. en el INP de Toulouse, Francia en 2000 y 2004 respectivamente. Realizó una estancia de investigación en el LAAS-CNRS, Toulouse Francia (1999-2004) y una estancia sabática en el ISR-Coimbra, Portugal (2018-2019). Profesor del Instituto Politécnico Nacional CICATA-Querétaro.



Carlos-Alberto Bernal-Martínez Licenciatura, maestría y doctorado en ingeniería mecánica en la Universidad de Guanajuato en 2005, 2009 y 2016 respectivamente. Profesor del Instituto Tecnológico Superior de Irapuato-ITESI, México. Su área de estudio es la optimización en aplicaciones de la Ingeniería Mecánica.