

DISEÑO MECÁNICO DE UN ACCIONAMIENTO PARA UN ROBOT MANIPULADOR

Francisco M. Vergara

Dpto. de Mecánica. Facultad de Ingeniería – UNLP. 48 y 116 (1900) La Plata - Argentina
fvergara@ing.unlp.edu.ar

RESUMEN

REN-1 es un robot manipulador electro-neumático. Fue desarrollado mediante un convenio de colaboración entre la Facultad de ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata y una empresa de la zona, dedicada a los servicios de automatización y control, con fines didácticos y comerciales. Una primera versión del equipo ya se presentó junto con un software supervisor que permite supervisar una célula de manufactura o ensamble simple de la que forma parte el robot. En este prototipo, se utilizó para el primer eje (eléctrico) un motor disponible de baja potencia, y un sistema de mando simple y económico pero poco robusto. Este subsistema tenía bajas prestaciones, y el objetivo de este trabajo fue mejorar el mismo. El artículo se centra en el diseño del mecanismo, en el que se utilizaron métodos y herramientas de diseño de última generación, como el modelado sólido (CAD) y la simulación cinemática y dinámica. Se abordan brevemente las características del subsistema de control y potencia. El mando ya ha sido construido y probado y sus prestaciones resultaron acordes a las especificaciones.

Palabras Claves: *Robot manipulador, sistemas de transmisión, diseño 3D, simulación.*

1. INTRODUCCIÓN

El equipo (figuras 1 y 2) tiene configuración cilíndrica (RTT) y tres grados de libertad: el primero, rotación alrededor de la base, accionado por motor paso-a-paso y reductor mecánico; el segundo, desplazamiento vertical, neumático y el tercero, desplazamiento horizontal neumático. En el extremo se puede montar un actuador final intercambiable (neumático en la foto). Posee sensores de movimiento y presencia electrónicos. El control del equipo se realiza con un autómatas programable (PLC) comercial. El control de movimientos es secuencial, y sobre los distintos ejes se programaron algoritmos de control por tren de pulsos, on-off y PWM. Este manipulador se describe en detalle en [1,2].

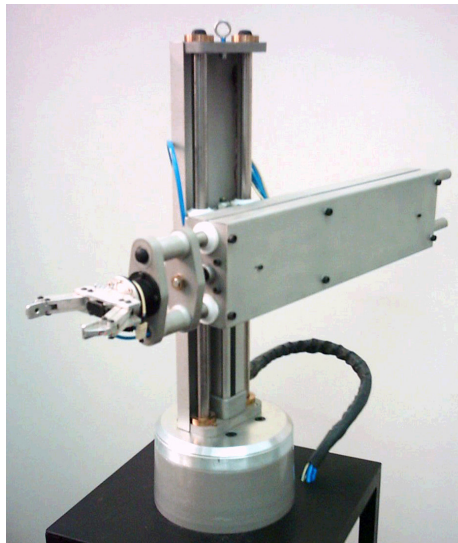


Figura 1: Vista del equipo

En la cadena cinemática adoptada las juntas de los ejes 1 y 2 son colineales y la del eje 3 es excéntrica (60 mm, ver figura 2), lo que produce momentos de inercia y cargas desbalanceados, que deben absorberse en los cojinetes. El eje 1 resulta el más solicitado y requiere mayor atención en el diseño del conjunto.

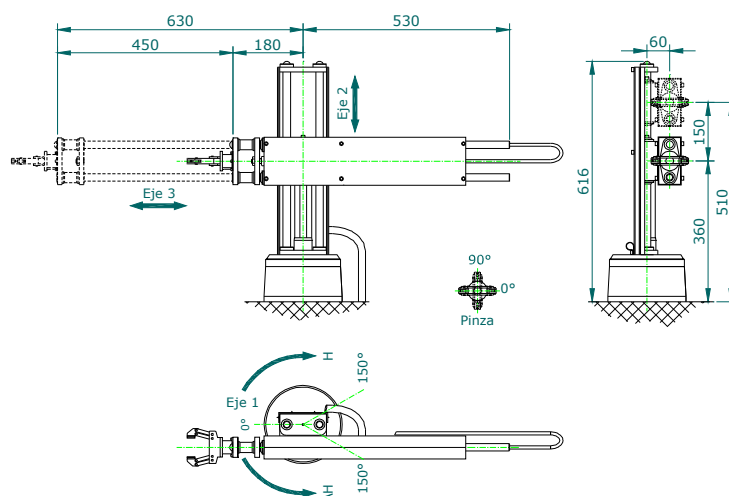


Figura 2: Movimientos y dimensiones principales del manipulador

La primera versión del subsistema eje 1 fue diseñada en base a componentes disponibles y tenía bajas prestaciones (presentaba juego y poca potencia), y el objetivo de este trabajo fue mejorar el mismo. El artículo se centra en el diseño del mecanismo, y menciona brevemente las características del subsistema de potencia; este subsistema se trata en detalle en [3].

Las restricciones al diseño eran que el subsistema fuera compacto, liviano, no presentara juego apreciable y su exactitud de posicionamiento fuera compatible con la resolución del motor paso a paso. Para lograr todas estas características, se utilizó una herramienta moderna de diseño mecánico en tres dimensiones, con capacidad de animación cinemática [4]. La construcción de modelos complejos en Solidworks exige el establecimiento de las relaciones cinemáticas entre todas las partes; si estas relaciones están bien definidas, los conjuntos tienen solo los grados de libertad previstos (no permite modelos hiperestáticos), y se puede proceder a la animación cinemática, lo que se hizo para analizar el mecanismo.

La integración de este tipo de herramientas de software con otros utilitarios [5] puede constituir un sistema CAD/CAE/CAM para robots [6]; aunque en este caso no se llegó ese nivel de integración, se usaron varias de estas facilidades.

El desarrollo del trabajo se presenta en 2. En 2.1 se tratan las características del motor; en 2.2 el mando y control; en 2.3 y 2.4 los aspectos mecánicos del eje 1 y en 2.5 el modelo dinámico y resultados de la simulación. En 3 se presentan las conclusiones.

2. DISEÑO DEL SISTEMA

2.1 Características generales del motor

Los mandos directos son una buena alternativa a los sistemas tradicionales con cadena cinemática [7]. Se utilizan motores de torque y reemplazan con ventajas a los motorreductores; son más compactos que éstos, y proveen un posicionamiento preciso a bajas velocidades [8]. Pero los motores resultan más caros, y debido a su elevada corriente, los mandos también. Debido a estas características, aquí se decidió utilizar un mando clásico con motor y reductor.

El motor que se utilizó en el período de pruebas del equipo era de poca potencia; su principal limitación era su bajo torque, y lograba mover el equipo gracias a una gran reducción. El equipo es relativamente pequeño; fue diseñado para ser montado en una mesa de trabajo, y manipula piezas livianas (hasta 800 gr.). La estructura móvil es en su mayor parte de aluminio; los movimientos lineales se apoyan en cojinetes de deslizamiento de teflón, y sus guías son tubos de acero inoxidable. Estas características determinan una baja inercia del conjunto móvil, y redundan en limitados requerimientos del motor de la base.

El nuevo motor se seleccionó en base a los siguientes parámetros:

Velocidad angular deseada en el eje de salida:

$$\omega_{sal} = 150 \text{ }^\circ/\text{seg máxima}$$

Luego, la velocidad del motor debe ser:

$$\omega = \omega_{sal} \times N = 150 \times 4,9 = 735 \text{ }^\circ/\text{seg} = 122,5 \text{ RPM}$$

Donde N es la relación total de transmisión del reductor. Ver ecuación (1), en 2.4.

Esta velocidad es baja para un motor eléctrico y no le impone ninguna característica especial.

Torque deseado en el eje de salida:

Para la aceleración máxima deseada del eje, se estiman 29 N de fuerza en el extremo del actuador final, a extensión máxima del brazo. Esta fuerza, aunque pequeña, es suficiente para mover piezas. Para el actuador en uso, la extensión máxima es de 0,7 mts. Se adoptó un coeficiente de seguridad de 1,1. En estas condiciones, el torque necesario en el eje de salida es:

$$T_s = 29 \text{ N} \times 70 \text{ cm} \times 1,1 = 2233 \text{ N.cm}$$

El torque requerido en el motor es:

$$T = T_s/N = 2233 \text{ N.cm}/4,9 = 455,7 \text{ N.cm}$$

La potencia máxima que debe entregar:

$$P = T \times \omega = 4,56 \text{ N.m} \times 735 \times 2\pi/360 \text{ rad/seg} \approx 60 \text{ Watts}$$

En correspondencia con estos requerimientos, el motor elegido es bifásico, de imán permanente, con un torque bipolar crítico (pull-out) del orden de 460 N.cm, a 6 amperes.

2.2 Control del movimiento

Actualmente, cualquier mando comercial para motores de pasos tiene cierto grado de inteligencia, y puede implementar estrategias de control más o menos complejas para el perfil de velocidades del motor. En este desarrollo, en lugar de delegar en el mando del motor la administración del perfil, éste se implementa totalmente en el controlador (PLC) del robot; de esta forma, es fácil modificar las características del movimiento, ya que todas residen en el mismo controlador. El control se realiza en lazo abierto, y el perfil de velocidad solicitado al motor tiene una forma trapecial típica con tres partes: Aceleración, Régimen y Deceleración. Este tipo de perfil permite lograr arranques y frenados suaves, que evitan posibles daños al mecanismo. Las ecuaciones de estos perfiles son clásicas [9].

Las características del movimiento se pueden ajustar por software, modificando el bloque de datos del PLC desde el programa supervisor.

2.3 Subsistema de soporte

El eje 1 debe permitir un solo grado de libertad al conjunto (giro alrededor del eje vertical), por lo que debe restringir cinco grados, con apoyos isostáticos en dos ejes y un grado de libertad de rotación en el tercero. Esto puede lograrse con dos cojinetes radiales y uno axial, o con un cojinete mixto, que fue la solución adoptada aquí. En general, los cojinetes de deslizamiento dan un funcionamiento más suave que los de bolas, pero los cónicos (mixtos) tienden a engranarse, por lo cual se eligió un cojinete de bolas. Cuánto mayor es el diámetro del cojinete, más sencillo es restringir el juego y menor la carga específica que debe soportar, y se decidió darle

el mayor diámetro posible, compatible con las dimensiones de la base. El rodamiento se diseñó y construyó especialmente para el equipo, y está totalmente integrado al mismo (figura 3).

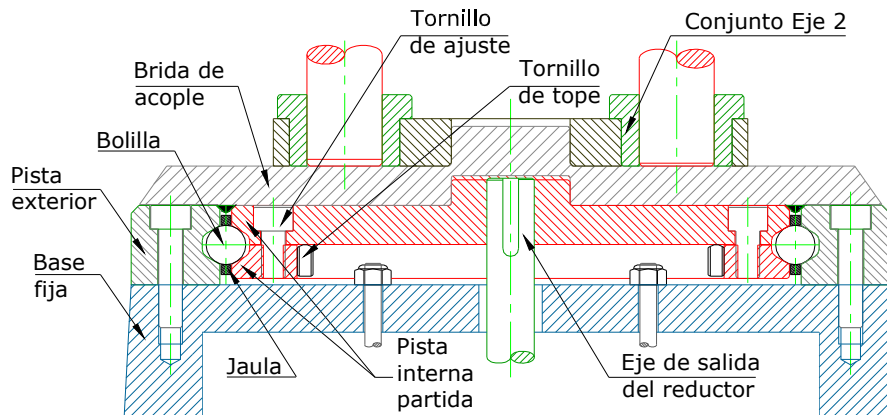


Figura 3: Detalle de la base y rodamiento del eje 1

La pista exterior es solidaria a la base fija del robot, mientras que la interior es a la vez soporte de toda la estructura móvil. Para eliminar el juego, la pista interior se halla partida por un plano horizontal. Seis tornillos de ajuste y tres de tope permiten un ajuste muy fino del juego. Las bolillas se encuentran separadas por una jaula de teflón. Las pistas son de acero al carbono, rectificadas, sin temprar, y con un perfil sencillo, que otorga un aceptable contacto angular. La protección contra el ensuciamiento se logra con una luz muy limitada (0,2 mm) entre la brida de acople y la pista exterior. El rodamiento resultante no tiene juego perceptible en ningún sentido, muy poca fricción y un diámetro muy cercano al de la base; comparado con los rodamientos comerciales de dimensiones similares, es mucho más compacto, liviano y barato, y su capacidad de carga mucho menor, pero suficiente para el servicio previsto.

2.4 Transmisión

El reductor diseñado es paralelo a poleas y correas sincrónicas (figura 4). Frente a otros mecanismos, los mandos por correas dentadas tienen la ventaja de ser sumamente silenciosos, muy compactos y requerir muy poco mantenimiento. En general, se les atribuye problemas de rigidez, pero si se seleccionan adecuadamente los componentes, y con un tensado adecuado de las correas, el problema se acota considerablemente. En este modelo, además, se minimizó la distancia entre ejes y con ella la longitud de las correas, y su estiramiento total.

El reductor diseñado tiene dos etapas de ruedas paralelas, con igual relación de transmisión por etapa (N_e). Definiendo $N_e > 1$ para reducción de velocidad [10], con un par de poleas de 14 (conductora) y 31 dientes (conducida), se obtuvo:

$$N_e = 31/14 = 2,2143$$

Con dos etapas, la relación de transmisión total resulta:

$$N = 2,2143^2 = 4,9 \tag{1}$$

La potencia a transmitir determinó el ancho de las correas, y éste el de las poleas.

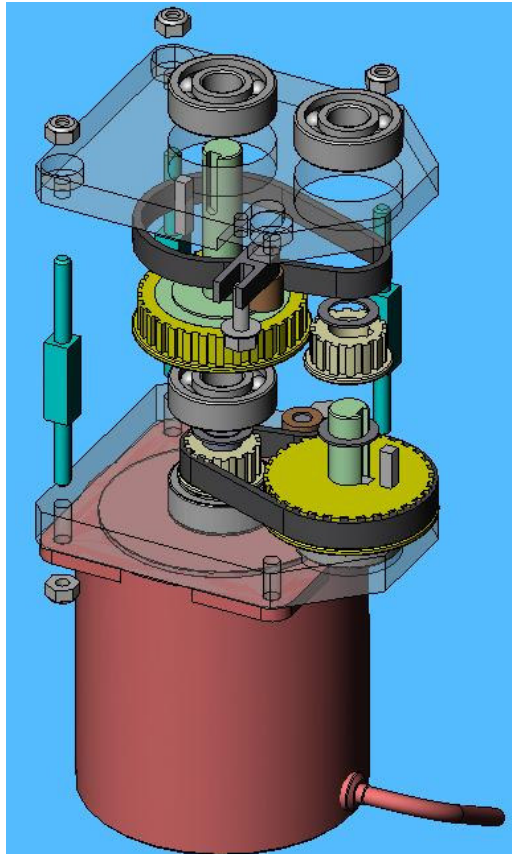


Figura 4: Vista explosionada del reductor

La capacidad de animación cinemática del software permitió verificar el funcionamiento del reductor. Debido a que tiene poco espacio libre, también se realizó el análisis de interferencias, que determinó la necesidad de modificar la posición de uno de los tensores.

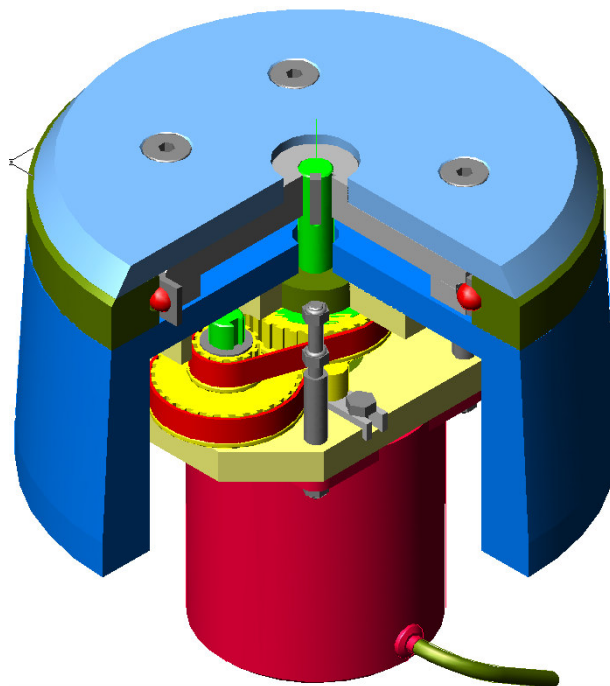


Figura 5: Base montada con reductor

Para hacerlo más compacto, el reductor está integrado con el motor y su eje de entrada es el eje de salida del motor, constituyendo un conjunto moto-reductor. El conjunto se aloja dentro de la base de aluminio, ocupando la mayor parte de la misma (figura 5).

2.5 Modelo dinámico y simulación

El modelo completo del sistema debe incluir tanto la parte móvil de la estructura como el motor y su mando. El modelo del motor y mando se tratan ampliamente en [3]; aquí se analizará el subsistema mecánico.

Las ecuaciones dinámicas del sistema se obtienen realizando un balance de cantidad de movimiento sobre toda la masa móvil. Las ecuaciones de estado quedan:

$$\begin{aligned}d\omega/dt &= (T - f \cdot \omega - T_R)/J_z \\d\Theta/dt &= \omega\end{aligned}\tag{2}$$

Donde:

- ω : Velocidad angular del motor
- Θ : Angulo barrido por el eje
- f : Coeficiente total de fricción del motor y carga.
- T_R : Torque resistente de la carga
- J_z : Momento de inercia total de la masa móvil

El torque del motor es función de las corrientes en las fases del mismo [3], y puede expresarse en función éstas como:

$$T = K_T (i_b \cos p\Theta - i_a \sin p\Theta)\tag{3}$$

Donde:

- K_T : Constante del torque motor
- i_a, i_b : Corrientes de fase del motor
- p : Número de pasos por vuelta del motor

La ecuación (3) vincula el modelo del subsistema mecánico con el eléctrico del motor.

El modelo constituido por las ecuaciones (2) se simuló utilizando el Toolbox Simulink de Matlab. Para esto, se debieron cuantificar los parámetros.

En la aplicación más común (transporte) el robot no está acoplado a ninguna carga ($T_R = 0$); el motor solo debe vencer la inercia de la masa móvil, y la fricción.

La masa móvil incluye la mayor parte del robot, la pieza transportada, el tren de engranajes del reductor y el rotor del motor. Los robots son sistemas de geometría variable, por lo tanto su momento de inercia también lo es. En este modelo, el momento es mínimo cuándo el eje 3 está retraído, y máximo cuándo está extendido (figura 1). Aquí se consideró el caso más desfavorable, con el eje extendido. Debido a la dificultad para determinar analíticamente el momento de inercia de la masa móvil, se estimó un valor para la simulación y luego se ajustó contrastando los resultados con los experimentales.

Para la fricción se utilizó un modelo lineal dependiente de la velocidad; esto es aceptable a las bajas velocidades que se mueve el equipo. La fricción del rodamiento principal y los cojinetes del motor se consideran despreciables; la mayor resistencia se produce en el tren de transmisión, entre las correas, poleas y tensores.

El sistema de control del motor mantiene las corrientes prácticamente constantes durante cada paso y la conmutación necesaria para el giro produce un valor medio del torque bastante uniforme. Se utilizó la aproximación de suponer el torque constante y algo menor al máximo, pues se quería conocer la disponibilidad de torque para vencer resistencias que pudieran oponerse al movimiento.

El diagrama de bloques del modelo resultante se presenta en la figura 6 (diagrama de Simulink)

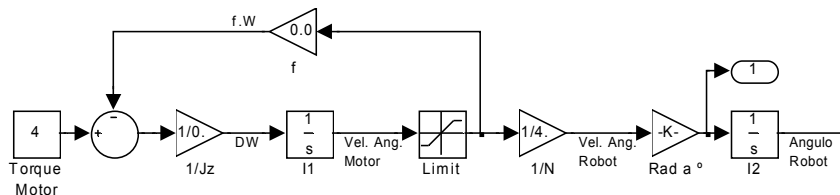


Figura 6: Diagrama de bloques del modelo

La figura 7 presenta la respuesta del sistema, cuándo se solicita una velocidad de régimen de 60°/seg, partiendo del reposo. En este modelo, con torque de entrada constante y sin carga resistente, la respuesta teórica de la velocidad sería una curva exponencial de primer orden con un valor máximo muy superior al deseado, pues la velocidad aumentaría hasta que todo el torque motor se consumiera en las fricciones. El mando limita esta velocidad quedando disponible buena parte del torque motor para vencer resistencias. La pendiente de la curva permite estimar la aceleración máxima que puede alcanzar el equipo, y limitar las aceleraciones en el perfil de velocidades solicitado al motor (ver 2.2).

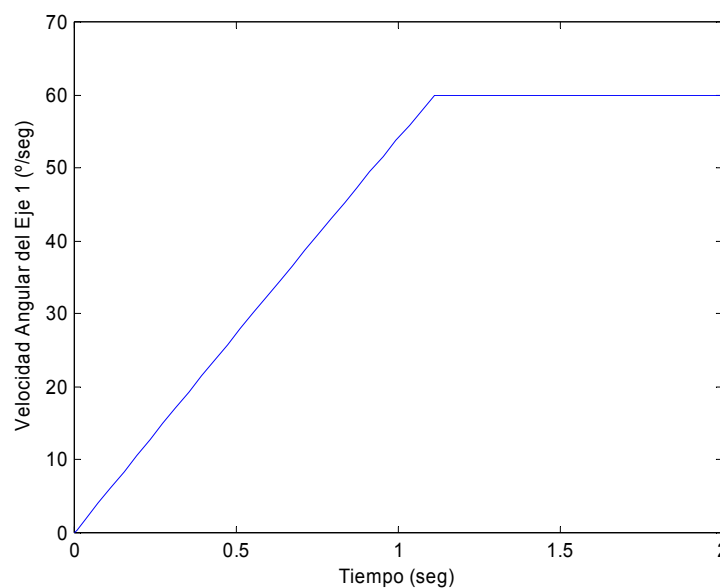


Figura 7: Respuesta del equipo durante el arranque

3. CONCLUSIONES

El sistema de mando presentado es sencillo y económico, pero cumple las especificaciones establecidas. Utilizando herramientas modernas para el diseño mecánico, se logra un conjunto compacto y robusto. Por medio de la simulación dinámica se analizaron los límites de operación para las condiciones de diseño establecidas, resultando aceptables. Los resultados experimentales fueron satisfactorios, y permiten proyectar otras aplicaciones con una tecnología similar.

4. REFERENCIAS

- [1] F. M. Vergara, *Actas de la XI Reunión en Procesamiento de la Información y Control (RPIC 2005), Robot Electro-Neumático para manipulación de pequeñas piezas*, Trabajo ROB-00, Río cuarto, 2005.
- [2] E. G. Gulino, F. M. Vergara, *Actas de la XI Reunión en Procesamiento de la Información y Control (RPIC 2005), Programa supervisor para un manipulador electro-neumático*, Trabajo ROB-01, Río Cuarto, 2005.
- [3] F. M. Vergara, J. R. Vignoni, Presentado para el *XXI Congreso Argentino de Control Automático, Diseño del control y mando para un eje robótico*, Buenos Aires, sept. 2008.
- [4] Solidworks, www.solidworks.com, 2007
- [5] B. Sivaraman, T. Burks, J. Schueller, Using Modern Robot Synthesis and Analysis Tools for the Design of Agricultural Manipulators, *Agricultural Engineering International: the CIGRE journal*, **VIII**, 2, 2006.
- [6] H. S. Lee, S. L. Chang, Development of a CAD/CAE/CAM system for a robot manipulator, *Journal of Materials Processing Technology*, 140, 100–104, 2003.
- [7] P. J. Turner, P. Nigrowsky, G. Vines, A new approach for the design of robot joint transmission, *Mechatronics*, **11**, 8, pp. 1053-1062, 2001.
- [8] Siemens, En el camino hacia la máquina óptima, *Advance Latinoamericana*, 2, pp. 16-17, 2007.
- [9] K. Takashi, *Stepping Motors and Their Microprocessor Controls*, Oxford, 1986.
- [10] J. J. Craig, *Robótica. Tercera Edición*, Pearson Educación de México, S.A de C.V. Naucalpán de Juárez, 2006.