

Modelado y Control de una Mano Mecánica

Patrick Grosch¹ Raúl Suárez¹

¹ Instituto de Organización y Control de Sistemas Industriales (IOC)
Universidad Politécnica de Cataluña (UPC)

Av. Diagonal 647, planta 11, 08028 Barcelona, España patrick.grosch@upc.es - raul.suarez@upc.es

Resumen - En este artículo se presenta el trabajo realizado en relación con el desarrollo de un modelo dinámico y el control de las articulaciones de la mano mecánica MA-I, diseñada y construida en IOC-UPC. En el trabajo del modelado se incluye la identificación de los parámetros que ajustan el modelo al comportamiento real de la mano y el diseño de un sistema de control para que cumpla con unas determinadas prestaciones. La finalidad es la obtención de una herramienta mecánica que sirva como plataforma de pruebas experimentales de diferentes algoritmos y estrategias de aprehensión y manipulación de objetos.

I. INTRODUCCIÓN

Los elementos terminales de robots especialmente diseñados para aplicaciones particulares han alcanzado un alto grado de desarrollo y sofisticación y están ampliamente difundidos en el mundo de la robótica. No obstante, su flexibilidad operativa es todavía limitada, lo que motiva el desarrollo de herramientas más versátiles. En este sentido, la mano humana es el más claro ejemplo de herramienta con alta flexibilidad operativa que además de capacidad de aprehensión tiene gran capacidad de manipulación de objetos de diferentes formas y tamaños. Es lógico, por tanto, que se plantee el desarrollo de dispositivos mecánicos que imiten su comportamiento. Esto ha abierto un campo de investigación muy amplio dentro de la robótica, que se puede subdividir en dos áreas principales, una centrada en el desarrollo de estrategias y algoritmos para determinar la forma de llevar a cabo la prensión de un objeto dado, y la otra se ocupa del desarrollo y construcción de manipuladores o herramientas diestras con sus respectivos sensores y controles. En el IOC se ha desarrollado una mano mecánica, denominada MA-I, y en este artículo se describe el trabajo realizado en relación con el desarrollo de un modelo dinámico y el control de sus articulaciones.

Tras esta breve introducción, en la sección II se hace una descripción de la mano mecánica MA-I tanto en lo referente a su parte de hardware como e software. En la tercera sección se describe el modelado de las

articulaciones. En la cuarta sección se describen los métodos que se utilizaron para la determinación de los valores de los parámetros del modelo. La quinta sección describe las pruebas realizadas para la verificación del modelo y los resultados obtenidos. Con el modelo propuesto y el valor de los parámetros se realizaron pruebas tendientes a determinar las capacidades del sistema, con el fin de poder establecer las exigencias máximas que se le podrían pedir al mismo. Los resultados se consignan en la sexta sección. En esta sección también se describe el diseño de las consignas, dado un ángulo de partida y uno de llegada para cada una de las 16 articulaciones, que asegure que todas las articulaciones lleguen en el mismo periodo de muestreo al valor final. En la sección VII se presenta la primera versión de un controlador para cada articulación independiente, incluyendo el proceso de diseño y sus resultados. En la octava sección se mencionan algunos trabajos aún en proceso. En la novena y última sección se resumen algunas conclusiones del trabajo.

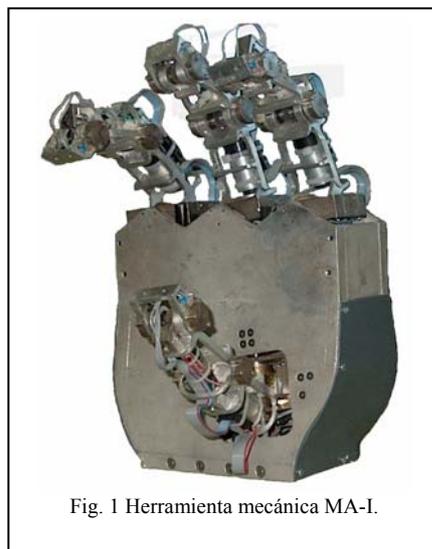


Fig. 1 Herramienta mecánica MA-I.

II. MA-I

En esta sección se describen los aspectos básicos de la mano mecánica MA-I que se muestra en la figura 1, información más detallada puede encontrarse en [1]. Los dos apartados siguientes hacen referencia al hardware y software, respectivamente.

Hardware del sistema MA-I

El hardware del sistema básico cuenta con la mano propiamente dicha, el controlador, las tarjetas de entrada/salida, la etapa de potencia y el robot manipulador. El controlador es un ordenador con procesador pentium III a 700 MHz y cuatro ranuras del bus PCI para las tarjetas I/O. Como sistema operativo utiliza QNX, un sistema operativo de tiempo real. Las interrupciones por hardware del ordenador se tienen habilitadas, se utilizan para sincronizar el control. Sobre el bus PCI se tienen cuatro tarjetas PMDI 4MIO-Lite. Cada una de las tarjetas permite leer la posición de 4 motores, a partir de los pulsos del encoder acoplado al eje, y entregan un voltaje ($\pm 10V$), como señal de control para mover los cuatro motores. El voltaje de control es la entrada a la fuente de potencia que transforma la señal de voltaje de las tarjetas en una señal de corriente equivalente. Esto tiene por finalidad facilitar el control de fuerza aunque aumenta la dificultad para controlar la posición. Por último se tiene la mano propiamente dicha (figuras 1 y 2). Su relación de dimensiones está inspirada en las proporciones de una mano humana y sus medidas son aproximadamente el doble de las de la mano de un adulto. Consta de una base que semeja la palma de la mano humana que tiene tres finalidades principales: servir de pieza de ensamble entre la mano y el robot manipulador, soportar los dedos, incluyendo algunos motores, y por último concentrar, en cuatro conectores, las señales de control y potencia desde y hacia la etapa de potencia, respectivamente. Sobre la palma están colocados los cuatro dedos, tres dedos (índice, medio y anular) alineados sobre la parte superior de la palma y el cuarto (pulgár), opuesto a los tres primeros, saliendo del plano de la palma. Cada dedo cuenta con 4 grados de libertad. Las articulaciones semejan las de un dedo humano. Dos articulaciones de un grado de libertad, la distal y la media, y una articulación con dos grados de libertad, la proximal (figura 3). Todas las articulaciones se mueven independientemente utilizando motores DC con reducciones mecánicas. Las articulaciones distal y media están movidas por motores alojados sobre las falanges media y proximal. Los motores que controlan la articulación proximal están alojados en la palma. Esta es una característica destacable de la mano MA-I, puesto que permite que toda la mano sea mecánicamente auto-contenida, propiedad que facilita su montaje y desmontaje sobre el brazo robot. Otra característica que destaca en la mano es la configuración de la articulación proximal, la de dos grados de libertad. La disposición y diseño del mecanismo de engranajes permite que los ejes de los dos grados de libertad sean coplanares y perpendiculares entre sí.

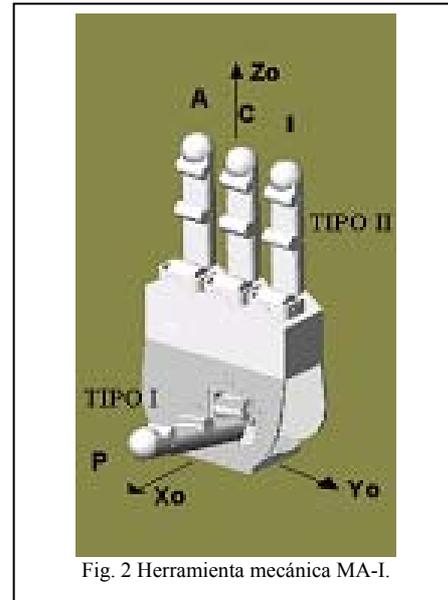


Fig. 2 Herramienta mecánica MA-I.

Software del sistema MA-I

El sistema completo no trabaja sobre un único sistema operativo, aunque la parte de control de la mano corre bajo QNX-RTOS (sistema operativo de tiempo real) exclusivamente. El robot, sobre el cual está instalada la mano, tiene su propio sistema de programación (V+) y el guante de realidad virtual, una de las opciones de interfase con el usuario, trabaja bajo Windows XP.

QNX-RTOS es un sistema operativo de tiempo real que permite asegurar y cumplir con las especificaciones temporales del controlador. El sistema de control se debe ejecutar con prioridad máxima sobre las demás tareas en cada periodo de muestreo y sin interrupción, condición necesaria que obliga al uso de RTOS. El software diseñado que controla la mano está dividido en tres módulos con una memoria compartida entre los dos primeros.

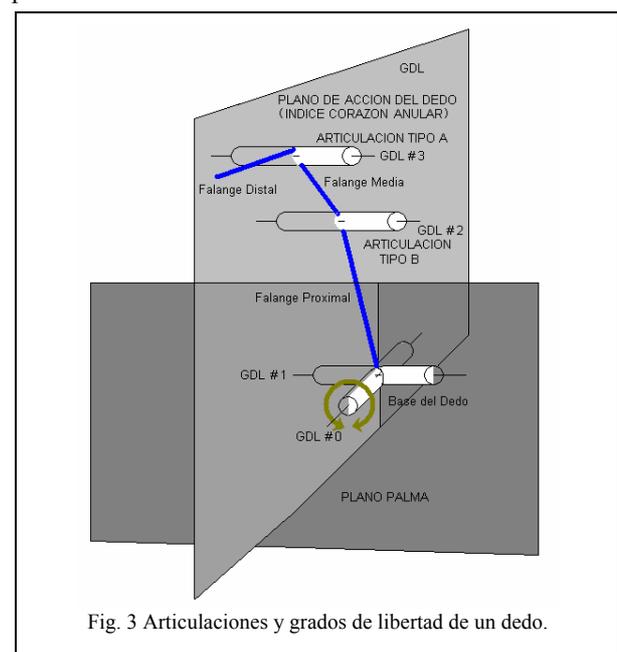


Fig. 3 Articulaciones y grados de libertad de un dedo.

El primer módulo es el sistema básico de interfase con el usuario, mediante el cual se introduce por teclado la información que especifica las posiciones destino de las articulaciones de la mano. Esta información puede introducirse de dos formas, la primera es indicando la ubicación espacial de los puntos de contacto deseados de los cuatro dedos sobre el objeto más la ubicación de la muñeca. La segunda es indicando directamente los valores en que se debe posicionar cada grado de libertad del manipulador. En el primer caso, a partir de la información suministrada, se utiliza la cinemática inversa de la mano para calcular los valores de las 16 articulaciones. Los valores de los 16 ángulos se escriben en la memoria compartida y se usa un sistema de semáforos para asegurar la integridad de los datos.

El segundo módulo de software lee los datos de la memoria compartida y a partir de ellos calcula qué articulación tardará más en realizar el movimiento desde la posición actual hasta la posición final deseada, dada una velocidad de cruce y una aceleración máxima. Conocida la articulación mas lenta se genera una lista de consignas para cada articulación que asegura que todas las articulaciones llegan al mismo tiempo a su posición final. La lista se descarga en la entrada del controlador periodo a periodo. El tercer módulo del software es el controlador. Está diseñado de forma que puedan utilizarse diferentes estrategias de control, sólo es necesario introducir el código que hace el cálculo de la salida para cada motor dada la estrategia deseada de control. Actualmente se tiene implementado un control PD individual para cada articulación. En la sección VII se hace una descripción detallada del controlador, su cálculo y su ajuste.

III. MODELADO

Se ha planteado un modelo dinámico de las articulaciones de la mano. El modelo dinámico es necesario para el conocimiento de las características del sistema y para el desarrollo y prueba del controlador. El sistema se dividió en dos bloques con fin de facilitar el desarrollo del modelo. El primer bloque incluye la etapa de potencia y el segundo bloque la parte eléctrica y mecánica de la articulación. La etapa de potencia, como se comentó anteriormente, es un amplificador de potencia y convertor voltaje-corriente. La salida del ordenador es un valor entre ± 10 voltios. Esta señal indica la cantidad de corriente que debe fluir a través del

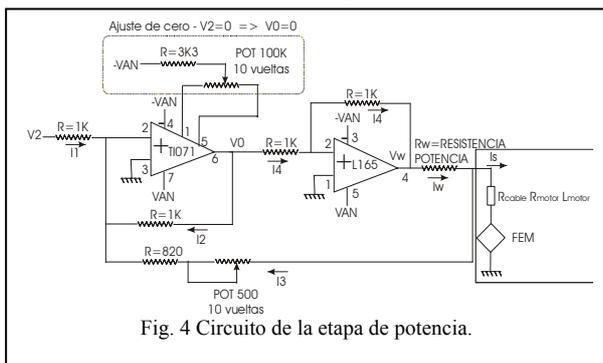


Fig. 4 Circuito de la etapa de potencia.

motor. El hardware de la etapa de potencia traduce la señal de voltaje a corriente. El sistema está diseñado para imponer unos límites máximos de voltaje en los terminales del motor, con el fin de que los motores nunca puedan ser alimentados con corrientes superiores a las establecidas por el fabricante. Esto se logra con la saturación de los amplificadores operacionales responsables de entregar la corriente equivalente, asegurándose que nunca se supera los límites. El circuito, además de proteger los motores, asegura el flujo de una corriente equivalente a la señal de voltaje de entrada aunque el motor cambie de velocidad, ya que el motor DC genera un voltaje contra-electromotriz proporcional a la velocidad, obligando a la etapa de potencia a subir el voltaje para mantener la corriente cuando el motor aumenta de velocidad, o viceversa.

El circuito de la etapa de potencia se muestra en la figura 4, y en la figura 5 se muestra el diagrama de bloques que relaciona las variables de entrada y salida, identificando los puntos de saturación de variables. El circuito dispone de unos potenciómetros para ajustar tanto las ganancias como el nivel cero, asegurando así un desempeño óptimo.

El segundo bloque del modelo se refiere a la articulación, incluye el motor, la reducción mecánica y la estructura móvil o falange. Para el caso ideal, el modelo podría reducirse a un ecuación de segundo grado, teniendo como entrada el voltaje que suministra la etapa de potencia y como salida la posición de la articulación [2]. Este es un buen modelo cuando se trabaja con altas velocidades o el sistema tiene fricción seca (dinámica y estática) despreciable y cuando no existen huelgos entre los engranajes de la reducción; pero estas condiciones no se cumplen en el caso de la articulación de la mano mecánica: se trabaja con velocidades muy bajas, y las fricciones y huelgos debido a las reducciones mecánicas no son despreciables. Por ello se debe plantear un modelo mas complejo. Se parte del modelo ideal del motor y se agregan las condiciones correspondientes. El modelo ideal de partida es el mostrado en la figura 6.

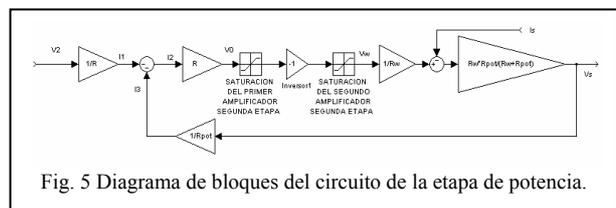


Fig. 5 Diagrama de bloques del circuito de la etapa de potencia.

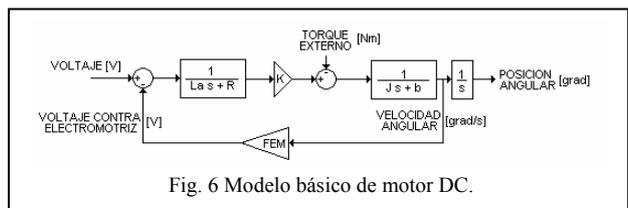


Fig. 6 Modelo básico de motor DC.

A partir del modelo ideal se agrega la fricción. Para incluir la fricción en el modelo se deben tener en cuenta los distintos efectos de fricción. Para el caso tratado se determinó que es indispensable incluir la fricción seca

dinámica y estática además del efecto Stiction [3]. La fricción viscosa ya está incluida en el modelo básico del motor DC mostrado en la figura 6, donde el parámetro b representa la pérdida de energía en función de la velocidad. En la literatura se encuentran varios modelos de fricción que introducen variables de estado, y asumen diferentes condiciones de contacto entre las superficies, pero estos exceden las necesidades del caso que nos ocupa. Así se definió y desarrolló un modelo que incluye los efectos de fricción observados (figura 7). Además de que incluyera, de manera aproximada, los efectos de fricción observados, para efectos de la simulación, se obligó a que el modelo fuera diferenciable en todo el rango. La ecuación 1 describe de forma genérica la fricción observada. El modelo diferenciable en todo el rango obtenido está representado por la ecuación 2, y su representación gráfica se muestra en la figura 8.

$$F_{friccion} = \begin{cases} -F_{Coulomb} & \dots \dots \dots |F_{aplicada}| < F_{Coulomb} \wedge v = 0 \\ -\text{sign}(F_{aplicada}) \times F_{Coulomb} & \dots \dots \dots |F_{aplicada}| \geq F_{Coulomb} \wedge v = 0 \\ -\text{sign}(v) \times F_{Coulomb} & \dots \dots \dots v \neq 0 \end{cases}$$

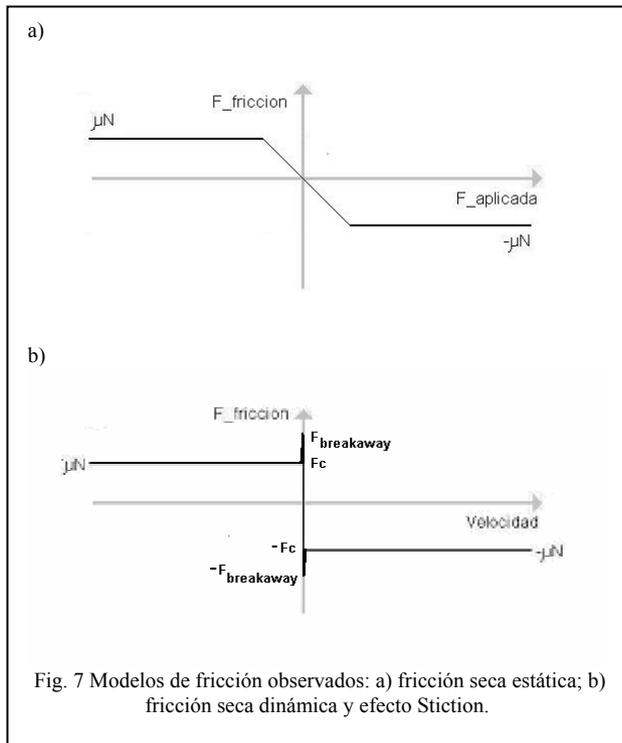
Ecuación 1.

$$F_{friccion} = -\tanh(v \times 1000) \times F_{Coulomb} - (1 - (\tanh(v \times 1000))^2) \times \dots$$

$$(F_{breakaway} \times (\tanh((F_{aplicada} - F_{breakaway}) \times 1000) + \tanh((F_{aplicada} + F_{breakaway}) \times 1000)) / 2 + \dots$$

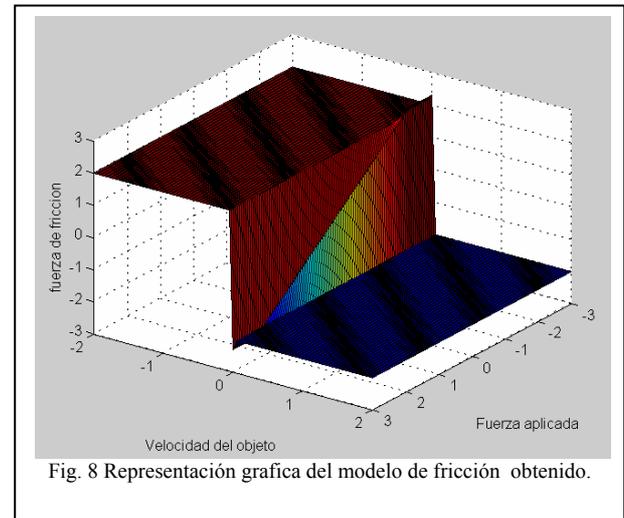
$$\dots - F_{aplicada} \times (\tanh((F_{aplicada} - F_{breakaway}) \times 1000) + \tanh(-(F_{aplicada} + F_{breakaway}) \times 1000)) / 2)$$

Ecuación 2.

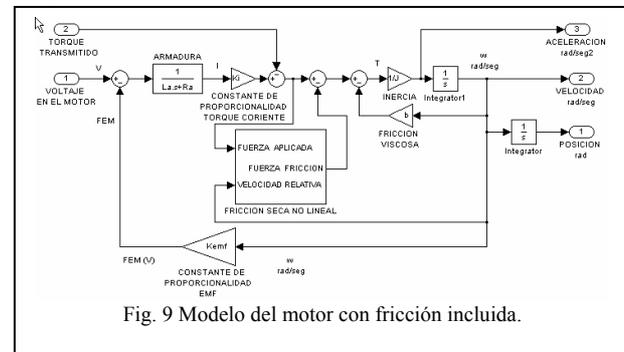


Dado el modelo de fricción, el modelo de la articulación sería la adición del modelo de fricción al modelo básico del motor DC. El bloque de fricción tiene como entradas el par resultante sobre el eje del motor y la velocidad del eje del motor. El par resultante es la suma de los pares externos y el par producido por la corriente que circula en el motor. La salida es el par de

fricción que se le debe restar al par resultante sobre el eje. La diferencia es el par neto sobre el eje del motor disponible para acelerar al eje y lo que esté unido al mismo. La figura 9 muestra el diagrama de bloques del modelo del motor con la adición de la fricción.



Para completar el modelo se deben incluir los huelgos mecánicos de la reducción y la reducción misma. La reducción introduce un factor que disminuye la velocidad y aumenta el par. Los huelgos necesitan más detalle, y si bien se podrían reducir esto implica mayores costos de fabricación. Cuando el motor está realizando el movimiento el efecto del huelgo puede ser despreciable, pero en el posicionamiento final el efecto es muy importante, por lo tanto el controlador debe manejar las dos condiciones, y por ello se debe incluir en el modelo. Para modelar el efecto del huelgo, se puede pensar en este como en un conmutador, que opera en función de la posición relativa entre el eje del motor y el eje de salida del reductor al que está acoplada la falange. Si la diferencia de posiciones es menor que el rango equivalente al huelgo, entonces el eje del motor se comporta como independiente de la falange, sin cargas externas, y la falange se comporta como una masa girando sometida a sus fricciones. En caso contrario, el eje del motor se comporta como acoplado a la falange, o cargas externas.



Esta aproximación no es suficiente, pues se crearían unas colisiones de magnitud infinita, en la transición de una situación a la otra. Si en un instante entre los dientes de los engranajes hay fuerza cero y un instante después hay un valor, significa que en ese intervalo infinitesimal

de tiempo tuvo que haber una aceleración infinita, situación imposible. Por lo tanto se debe incluir en el modelo un elemento que refleje colisiones elásticas amortiguadas, que físicamente serían las deformaciones elásticas de los dientes de los engranajes cuando entran en contacto. En la literatura se utiliza un sistema resorte-amortiguador para simular colisiones. Pero observando detenidamente los resultados, se aprecia que al utilizar esta alternativa en el caso tratado de un engranaje, cuando se está desacoplando, en el modelo se ejercerá fuerzas de tensión sobre el diente, situación que no sucede en la realidad puesto que sólo se pueden realizar fuerzas de compresión entre dientes. Por lo tanto, para modelar la situación descrita se desarrolló el siguiente modelo. Las condiciones que debe cumplir el modelo son: 1) Si la diferencia entre las posiciones de engranajes es menor que el rango del huelgo entonces la fuerza entre los dientes del engranaje es cero; 2) Si la diferencia entre las posiciones de los engranajes es mayor que el rango y su derivada es positiva la fuerza entre los dientes del engranaje es mucho mayor que cero y es función de la diferencia; 3) Si la diferencia entre las posiciones de los engranajes es mayor que el rango y su derivada es negativa la fuerza entre los dientes del engranaje es cercana a cero⁺ y es función de la diferencia. Con estas tres condiciones se construyó el modelo del huelgo que pretende reflejar las fuerzas entre los dientes de los engranajes en la transición de una situación a otra, y no modelar exactamente las deformaciones de los dientes. En la figura 10 se ilustra el diagrama de bloques del modelo completo incluyendo el huelgo. El bloque de la falange que aparece en la figura 10 es equivalente al del motor quitando la parte eléctrica, es decir, incluye sólo la parte mecánica teniendo como entrada la fuerza aplicada al eje de salida del reductor.

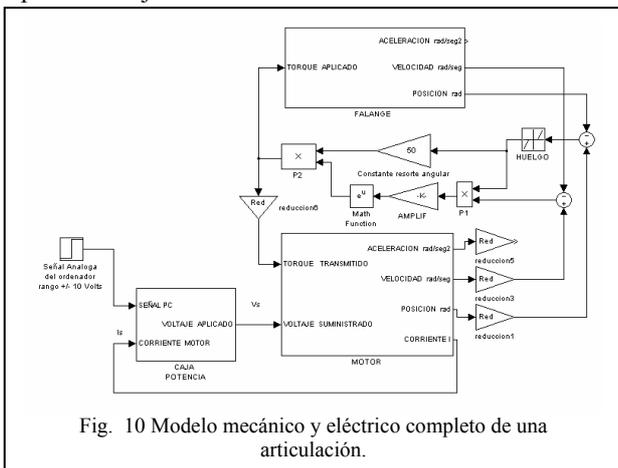


Fig. 10 Modelo mecánico y eléctrico completo de una articulación.

IV. IDENTIFICACIÓN DE PARÁMETROS

En esta sección se describe el proceso, con sus respectivos experimentos, seguido para determinar los valores de los parámetros del modelo descrito en la Sección III. Los valores de muchos parámetros se obtuvieron directamente de los manuales correspondientes, por ejemplo los de las características eléctricas y mecánicas de los motores. Otros parámetros

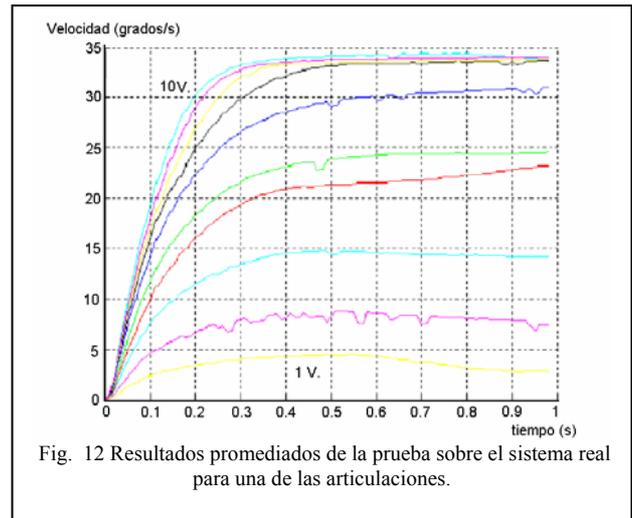
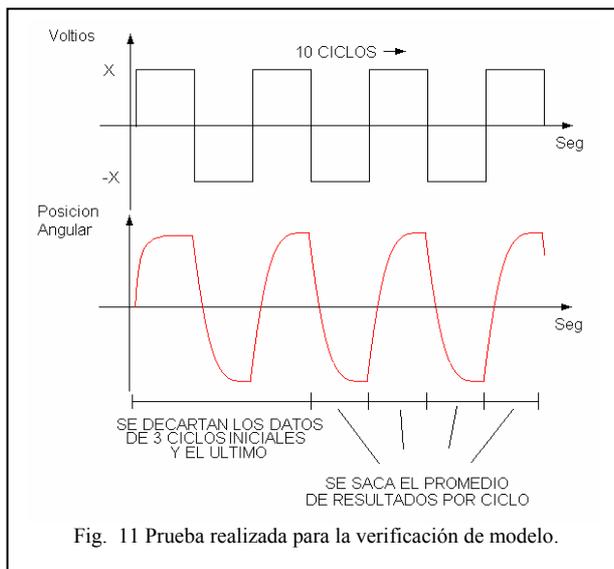
se calcularon a partir de medidas, por ejemplo las inercias las falanges. En el caso particular de las estructuras de las falanges, al estar diseñadas en un sistema CAD, el valor teórico se calculó haciendo uso del mismo software. Para el bloque de la etapa de potencia se deben determinar las saturaciones de los amplificadores, los valores de resistencia y verificar que proteja al motor, no entregando corrientes superiores a las indicadas por el fabricante del mismo. La verificación y determinación de los valores de saturación se realizó colocando cargas resistivas equivalente al motor bloqueado. Midiendo la corriente cuando se le indicaba a través del ordenador el máximo valor de salida (10 voltios) se confirmó la protección de los motores. El valor de la carga resistiva utilizada en la prueba era equivalente a la suma de la resistencia del cable (8 metros) y la resistencia del bobinado del motor. Para obtener los valores de las resistencias se utilizaron los valores dados por el fabricante. En el caso de los potenciómetros de ajuste, los valores de la resistencia se determinaron midiendo la caída de voltaje en el potenciómetro y calculando la corriente a partir de la caída de voltaje en una resistencia conocida que estuviese en serie. Para el bloque del motor no se tenían los valores de la constante de proporcionalidad de la fricción viscosa ni las constantes de fuerza *breakaway* y fuerza de Coulomb [3]. Para determinar los valores mencionados se realizaron las siguientes pruebas: 1) Se subió gradualmente el valor de voltaje sobre el motor hasta que comenzara a moverse. El valor promedio de varias pruebas se utilizó para calcular la fuerza de *breakaway*. 2) A partir del voltaje encontrado en la prueba 1 se disminuyó el valor del voltaje hasta que el motor se detuviera. Igual que en la prueba 1, con el valor promedio de varias pruebas se calculó la fuerza de Coulomb. Para confirmar el valor se aplicó la corriente teórica calculada para que se produjera una fuerza equivalente a la de Coulomb. Con esta corriente el motor no debería acelerarse. El par producido era equivalente a la fuerza de fricción; 3) Para calcular la fricción viscosa se partió de la prueba dos. Con el motor en estado estacionario se aumentó un poco la corriente, el motor se aceleró hasta una velocidad tal que el par producido por la corriente suministrada fuese equivalente al par producido por la fuerza de Coulomb más la fuerza de fricción viscosa. Con la diferencia de velocidad y la diferencia de par aplicado se calculó la constante de proporcionalidad de la fuerza fricción viscosa. La relación de la reducción está dada directamente por el número de dientes de los engranajes de la articulación. Para la determinación del huelgo se bloqueó la articulación y se aplicó tensión en un sentido y en otro, determinado la variación de ángulo de la articulación registrada por el encoder. Los valores de los parámetros utilizados en el modelo del huelgo se determinaron experimentalmente en el ordenador, sólo se procuraba que la transición fuera suave, que no produjera rebotes u oscilaciones de alta frecuencia y cuidando de que la deformación no superara valores lógicos, por ejemplo medio grado; teniendo en cuenta que un engranaje tiene

30 dientes, un diente equivale a doce grados, por lo que medio grado de deformación no supera el 5% de un diente. Por último se tiene el bloque de la falange. De este bloque quedan por determinar los parámetros de fricción. El procedimiento utilizado fue idéntico al del bloque del motor. Se calcularon las fricciones en conjunto y posteriormente se restaron las del motor. Así quedan determinados todos los parámetros del modelo.

V. VERIFICACIÓN DEL MODELO

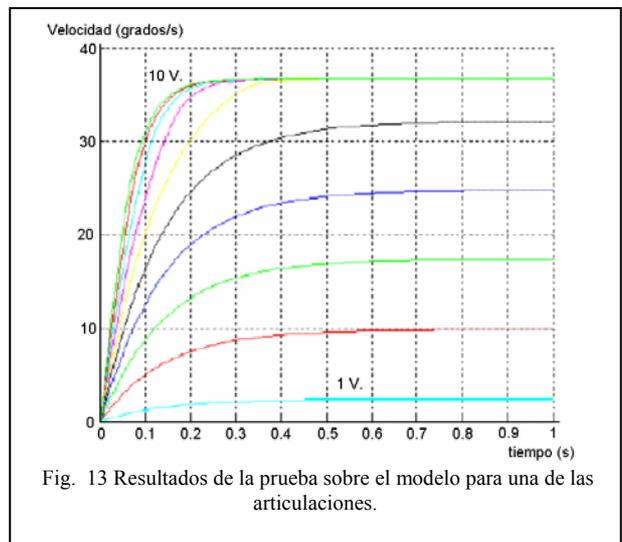
Con los parámetros determinados del modelo se procedió a verificar y ajustar el modelo con el comportamiento del sistema real. Para la verificación del modelo se realizó la aplicación alternada de valores de voltaje opuestos durante diez ciclos. El periodo de cada ciclo se reducía en función del voltaje aplicado, de lo contrario la articulación llegaría a final de su recorrido y se estrellaría, o en el caso de voltajes bajos la velocidad no llegaría al estado estacionario. Las pruebas se realizaron tanto sobre el modelo como sobre el sistema real, registrándose la posición angular del sistema. La señal utilizada como entrada y la salida se ilustran en la figura 11.

Para cada prueba se descartaron los resultados de los tres primeros y del último de los cambios de voltaje. Con la información recolectada de los datos de los 16 cambios de voltajes restantes, se sacó un promedio del comportamiento de la posición de la articulación al pasar de estado estable en un voltaje X a estado estable en un voltaje -X. Los resultados de 10 pruebas con voltajes distintos entre 1 y 10 voltios para una articulación se muestran en la figura 12. En la gráfica se ven algunas oscilaciones del valor final, esto es por que la fricción no es constante sobre todos los dientes de los engranajes. Una prueba equivalente se simuló utilizando el modelo. Tras el ajuste de algunos de los valores de los parámetros del modelo se obtuvieron los resultados mostrados en la figura 13. Puede verse la similitud de los resultados de la prueba sobre el sistema real y los resultados de la simulación sobre el modelo ajustado.



VI. RANGO DE TRABAJO DEL SISTEMA

Se determina el rango de trabajo para delimitar el rango de consignas validas del sistema, por ejemplo no se puede exigir como consigna al motor que suba a una velocidad de 50 grados/seg sabiendo que con los 10 voltios, voltaje máximo de salida, llega a 35 grados/seg como máximo. Para encontrar el rango de trabajo del sistema se utilizaron los mismos resultados promediados de posición de las pruebas sobre el sistema real realizadas para la validación y ajuste del modelo. Con los datos se calcularon las velocidades y aceleraciones para los distintos valores de voltaje utilizados en las pruebas. Cabe destacar que para encontrar valores razonables de velocidad y aceleración fue necesario pasar los datos por filtros pasa bajos. Con los datos filtrados se realizaron gráficas de velocidad vs. aceleración, las cuales indican exactamente el rango de trabajo del sistema si se barren todos los valores de voltaje de alimentación. La figura 14 muestra los resultados. Las curvas de la gráfica encierran el conjunto de duplas de estado velocidad-aceleración que el sistema puede alcanzar. Por lo tanto las curvas de consigna que se quiera que siga el sistema deben estar inscritas dentro



de la área de duplas de estado velocidad-aceleración.

En la gráfica 14 se observa que el sistema funciona de manera desequilibrada, en un sentido le cuesta más trabajo girar que en el otro, por lo tanto para tener un margen de error, debido a las variaciones del sistema, se plantea que las curvas de consigna estén dentro del área de trabajo simétrica ilustrada en la misma figura 14. La figura 15 ilustra la diferencia existente entre girar en un sentido o en otro (resultados del experimento para 10 voltios), claramente se ve que la posición de la articulación deriva y no establece la oscilación en torno a una posición fija.

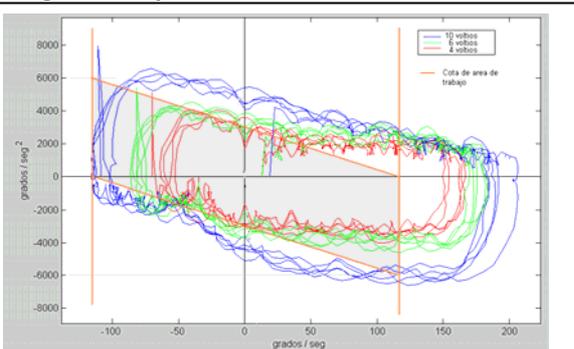


Fig. 14 Duplas de estado velocidad – aceleración, para 10, 6 y 4 voltios & Área definida de trabajo.

VII. CONTROL

El control del sistema actualmente está limitado al control independiente de posición de cada articulación. La coordinación de las articulaciones, para que describan el movimiento que se quiere, se realiza con la actualización de la consigna de cada articulación periodo a periodo, dada una lista. Los valores de las consignas en la lista se calculan a partir del plan de movimiento, definiendo dónde debe estar cada articulación en cada periodo de muestreo.

Actualmente se tiene implementado un controlador PD digital. El controlador se calculó a partir de la linealización del modelo de la planta descrita en sección V, obteniendo una función de transferencia lineal. Después de la linealización se discretizó la función de transferencia obteniendo una función de transferencia en el espacio Z. Con esta función de transferencia se

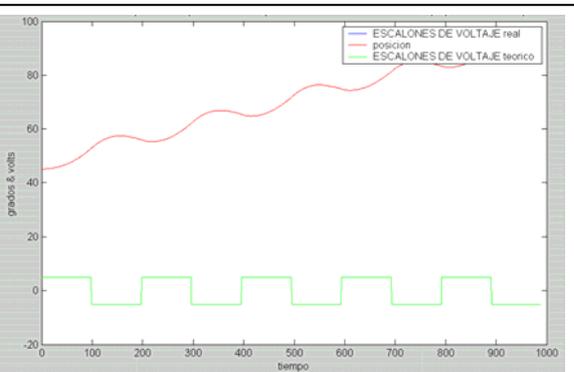


Fig. 15 Ejemplo del efecto de deriva de la posición, caso para 10 voltios.

calculó el controlador digital por el método de asignación de polos. Al implementar el controlador, sobre el sistema real, con los valores calculados se obtuvo una respuesta estable pero no satisfactoria. El sistema presentaba un sobre-pico, y esto equivale a que el dedo sobrepasaría la posición deseada para luego regresar a ella, situación poco deseable para el caso de querer manipular un objeto. Por lo tanto, a partir de los valores calculados se realizaron ajustes experimentales de los parámetros del controlador. En la figura 16 se aprecia un ejemplo del resultado del controlador implementado en una de las articulaciones posterior al ajuste de parámetros.

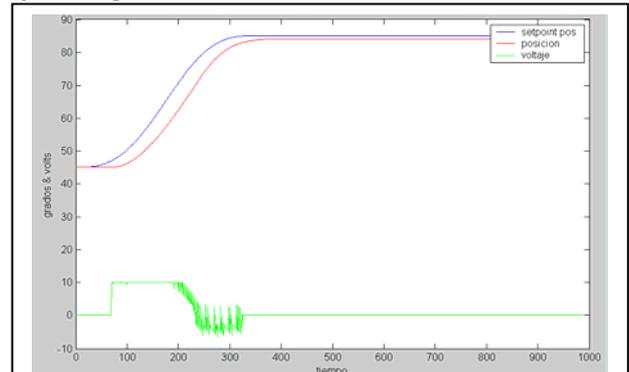


Fig. 16 Consigna y salida real de posición para una de las articulaciones

VIII. TRABAJOS ADICIONALES

Además del trabajo presentado en las secciones anteriores, ha sido necesario el desarrollo de software y hardware adicionales para el funcionamiento del sistema. A continuación se mencionan tres de los trabajos más relevantes.

Estimación de la posición y orientación de la muñeca (base de la herramienta), dada la posición y orientación de los 4 extremos de los dedos. El algoritmo encuentra la posición y orientación de la muñeca con la condición de que las articulaciones estén lo más cerca del punto medio de su recorrido, y que los dedos estén sobre los cuatro puntos indicados como datos de entrada. Con la información de la muñeca se comienza la búsqueda, con un algoritmo desarrollado en el IOC, de la posición exacta de las articulaciones de la mano y del brazo robot. Actualmente se están desarrollando algoritmos que resuelven directamente la cinemática inversa de todo el conjunto.

Otro de los trabajos en curso es el desarrollo e implementación de yemas de dedos con sensores de fuerza, sistema necesario para trabajar y desarrollar algoritmos de control con realimentación de fuerza.

También se trabaja en software de control en tiempo real y planificación de movimientos coordinados de los 16 DOF y software de interfase usuario-maquina que permite definir trayectorias punto a punto, dando la posición final de la yema de los cuatro dedos o definiendo la posición de las 16 articulaciones.

IX. CONCLUSIONES

En el artículo se presentó el trabajo realizado en relación con el desarrollo de un modelo dinámico y el control de las articulaciones de la mano mecánica MA-I. En el trabajo del modelado se incluyó la identificación de los parámetros que ajustan el modelo al comportamiento real de la mano y el diseño de un sistema de control para que cumpla con unas determinadas prestaciones.

El sistema está en operación y funciona satisfactoriamente. Los trabajos actuales en torno al proyecto están relacionados con el desarrollo de algoritmos de control de fuerza y sistemas de interfase que permitan el uso del sistema de manera más fácil e intuitiva agregando, por ejemplo, el uso de un guante

sensorizado como interfase para guiar la mano mecánica.

REFERENCIAS

- [1] R. Suárez y P. Grosch (2003) "Mano mecánica MA-I" *XXIV Jornadas de Automática, CEA-IFAC*, (ISBN 84-931846-7-5)
- [2] Katsuhiko Ogata "Modern Control Engineering" *Prentice Hall, Englewood Cliff* (1978) (ISBN 0-13-589128-0)
- [3] B. Armstrong, P. Dupont y C. Canudas "A survey of Models, Analysis Tools and Compensation Methods for the Control of Machines with Friction" *Automatica, Vol 30 No 7 pp 1083-1138* (1994), (ISBN 0005-1098/94)