

## **Diseño, construcción y evaluación de un sistema mecatrónico para implementar movimientos articulados en prototipo de rodilla**

José Olvera, Domingo Miranda, Hernando Chagolla, Agustín Barrera y Carlos Suárez

J. Olvera, D. Miranda, H. Chagolla, A. Barrera y C. Suárez  
Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada. UNAM. Boulevard Juriquilla No. 3001, Col. Juriquilla. C. P. 76230. Querétaro, Qro.  
Instituto Tecnológico de Querétaro, Av Tecnológico s/n esq. Mariano Escobedo, Querétaro, Qro., México, C.P. 76000  
mrodriguez@utsoe.edu.mx

M. Ramos., V. Aguilera., (eds.) .Ciencias de la Ingeniería y Tecnología, Handbook -©ECORFAN- Valle de Santiago, Guanajuato, 2014.

## Abstract

In this work, the design of a control system capable of controlling five DC motors, with gear reduction and incremental encoder, through a GUI (graphical user interface) is presented. It was realized on Lab View software, with the objective to controlling the freedom degrees that give movement to a mechatronic knee prototype, in real time. The module is based on a microcontroller PIC18F microchip series, which allows communication USB Full-speed, achieving data transfer speeds up to 12 Mbps, enough speed for this application. It controls both the speed and rotation of the geared motors.

The system works with a human-machine interface for testing the angular position which you want to reach. In a next stage the mechatronic model must be fully automated and able to simulate all the movements of a human knee, performing coordinated movements of each degree of freedom which will be coupled to the mechanical structure of the articulated model.

## Introducción

En la rodilla existen cartílagos de gran importancia llamados meniscos. El menisco tiene varias funciones, la más importante de las cuales es la transmisión de la fuerza desde el fémur a la tibia. Mientras que la pierna y la rodilla sufren lesiones con frecuencia, a menudo desembocan en lesiones de menisco.

Las lesiones inestables de menisco a menudo producen síntomas que impiden que la rodilla desarrolle toda su gama de movimientos de manera fluida. La eliminación del menisco hace que el cartílago articular del fémur y a tibia soporte una carga excesiva; en consecuencia, es un factor que acelera el desarrollo de la artritis. Dependiendo del tamaño y la ubicación del desgarramiento del menisco, el tratamiento puede variar desde una terapia no operatoria hasta una meniscectomía artroscópica parcial o reparación del menisco. Para el futuro se prevén modalidades como la inyección de sustancias que estimulen la curación del menisco o el trasplante de menisco (William,2005)

En el Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada de la UNAM, Campus Juriquilla, se desarrollan biomateriales poliméricos capaces de sustituir y regenerar los meniscos. Este biomaterial tiene que ser sometido a pruebas de fuerza y resistencia; es por eso que se desarrolla un prototipo mecatrónico de rodilla para hacer pruebas biomecánicas del menisco artificial, aclarando que no es una prótesis, sino un sistema de pruebas para el biomaterial, el cual se basa en una estructura mecánica que se encarga de realizar toda la cinemática de una rodilla.

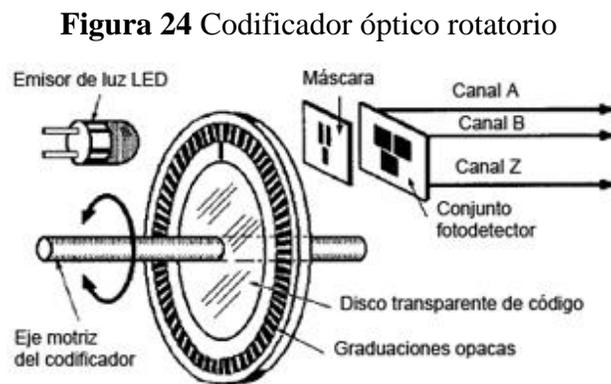
En particular, en este artículo, se ocupará del control de los motores, encargados de los movimientos del mencionado prototipo. Estos motores serán controlados por algoritmos de control como el de Ziegler-Nichols aplicados desde el software de LabVIEW utilizando el PIC18F4550 a manera de tarjeta de adquisición de datos.

La tarjeta de adquisición de datos tiene como finalidad, proporcionar una comunicación rápida y fiable entre la computadora y los motores que controlan los grados de libertad del prototipo mecatrónico de rodilla.

## 24 Metodología

Los elementos principales para el desarrollo de este proyecto son los moto-reductores con “encoder”, la etapa de potencia y el microcontrolador. Adicionalmente se utiliza una interfaz gráfica desarrollada en LabVIEW para realizar las pruebas de movimiento del eje del motor.

Para identificar la posición del eje del motor, el método más común es a través de un sensor de posición directamente en el eje del actuador. El dispositivo de retroalimentación de posición más popular por ser de un costo accesible y proporcionar una información apropiada, es el codificador óptico rotatorio como se muestra en la Fig24 junto con sus partes básicas.



Este tipo de codificador irá acoplado al eje del motor, donde al girar proporciona una señal de pulsos desfasados  $90^\circ$  por los canales A y B, con los cuales se puede conocer el sentido de giro y mediante un conteo realizado desde el microcontrolador se puede ubicar la posición del ángulo de giro del motor.

Por otra parte, se tiene un mecanismo reductor a base de engranes en el motor, como se muestra en la 24.1. Esto proporciona dos ventajas, la reducción de velocidad del eje conducido, que permitirá controlar la posición de manera más precisa; y un incremento de torque en el mismo; característica necesaria, ya que se requiere un torque relativamente alto para realizar los movimientos reales de una rodilla, donde por ejemplo, en un joven con un peso de 70 kg; para una flexión a  $5^\circ$  se requiere una fuerza de 60 kg, y para  $90^\circ$  se requiere una fuerza de 130kg. (Sanchis, 2003).

Esto se menciona como referencia ya que la mayor parte del esfuerzo lo realizan los músculos como los cuádriceps. Por lo tanto en esta fase del prototipo, se pretende realizar y controlar los movimientos de una rodilla, posteriormente estos movimientos serán realizados con las cargas más próximas a lo real.

**Figura 24.1** Motor que muestra su reducción de engranes



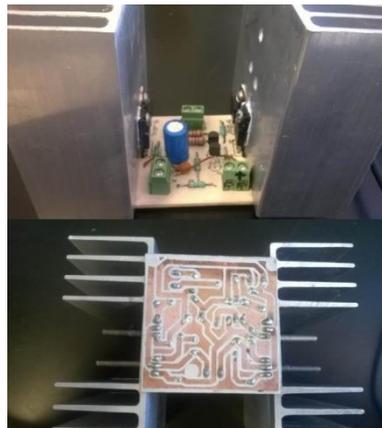
Inicialmente las pruebas se realizan con motores que ya tienen una reducción de engranes y un "encoder" acoplado al eje, donde el motor utilizado es el de la 24.2, esto nos facilita el uso y montaje de los mismos en el sistema mecánico.

**Figura 24.2** Moto-reductor con "encoder" utilizado en el proyecto



Para poder controlar el sentido de giro de los motorreductores, se configuró un puente H basado en transistor MOSFET para cada motor, el cual se encarga de la etapa de potencia, dado que llegan a consumir hasta 5 A. Con el uso de esta configuración, se tiene un alto nivel de eficiencia. Si se alimenta el puente H con 12V, estará llegando aproximadamente el mismo voltaje al moto-reductor. El puente H realizado es el que se muestra en la Fig. 24.3, donde se puede apreciar la vista superior e inferior del circuito.

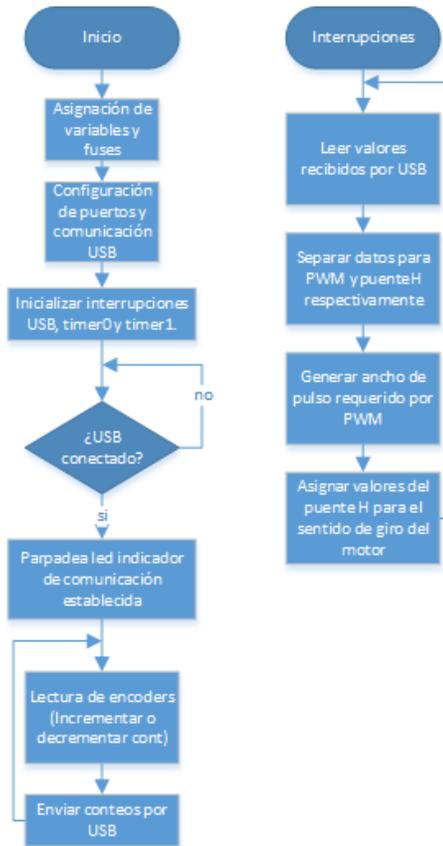
**Figura 24.3** Vista superior e inferior del circuito del puente H con MOSFET



Pasando a la parte de comunicación con la PC, se optó por trabajar con microcontroladores de MICROCHIP, debido a su amplia variedad en dispositivos, lo que permite la localización rápida de un dispositivo que satisfaga las necesidades del proyecto en cuanto a sus características y número de terminales de entrada y salida como de comunicación. El chip seleccionado fue el PIC18F4550 de 40 pines, ya que se requería manejar comunicación USB, controlar 5 puentes H, leer 5 "encoder" y generar 5 señales PWM; lo que resulta en un total de 10 entradas y 15 salidas digitales.

El microcontrolador se programó con el software "PIC C Compiler", siguiendo una estructura como muestra el diagrama de flujo general de la Fig. 5.

**Figura 24.4** Diagrama de flujo general que muestra los procesos principales del programa desarrollado

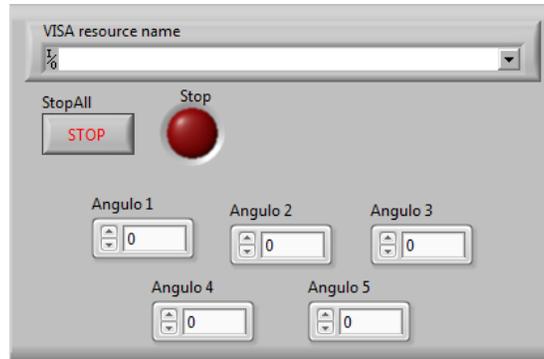


En el diagrama de la Fig. 24.4, por un lado se tiene la lectura de los "encoders" en el microcontrolador y el envío de los datos por USB, mientras que por interrupciones, se encarga de la escritura del microcontrolador de los valores adecuados que se establecerán para las salidas hacia los puentes H, controlando velocidad y sentido de giro de los motores.

Por último se presenta la interfaz gráfica en LabVIEW, en la Fig. 6, en la que se puede seleccionar el dispositivo de comunicación USB (VISA Resource name). Se utilizan controles numéricos con los cuales se puede establecer la posición de giro a la que se quiere llegar en cada motor.

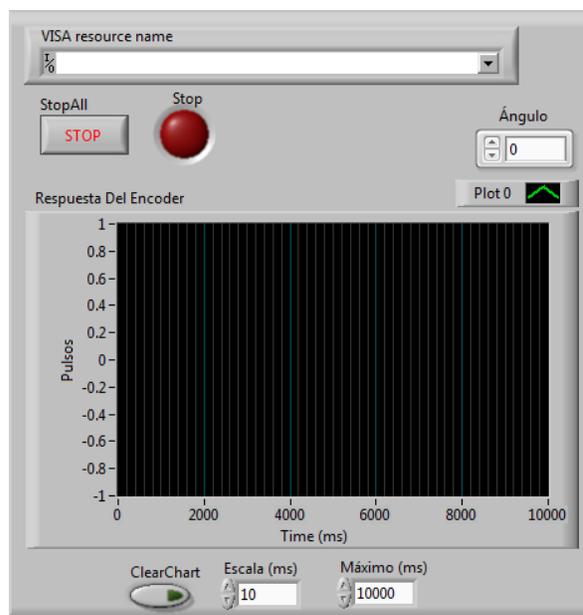
La interfaz cuenta con un controlador PID, el cual posee una función de auto sintonía, que permite aproximar las ganancias del controlador para obtener los parámetros de control adecuados para el sistema.

**Figura 24.5** Interfaz gráfica en LabVIEW para el control de posición de 5 motores



Para la parte de pruebas del movimiento angular de los motores, se diseñó una interfaz diferente, mostrada en la Fig. 7, en la que se puede obtener la curva de respuesta del motor, con la finalidad de obtener datos representativos, como el tiempo de asentamiento, el tiempo de levantamiento y el error producido.

**Figura 24.6** Interfaz gráfica desarrollada para pruebas de posicionamiento del motor



## 24.1 Resultados y discusión

### Resultados

Después de haber sintonizado el controlador, se realizaron pruebas del motor sin carga en el eje y después se sometió a una carga de 4 kg, medida con un dinamómetro, como se muestra en la Fig. Esta carga se levanta a manera de grúa, enrollando el cordón del que colgaba, proporcionalmente al ángulo de giro establecido.

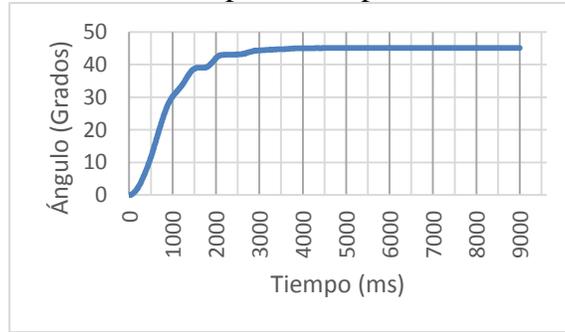
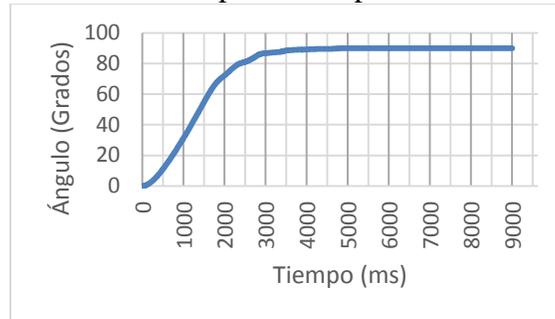
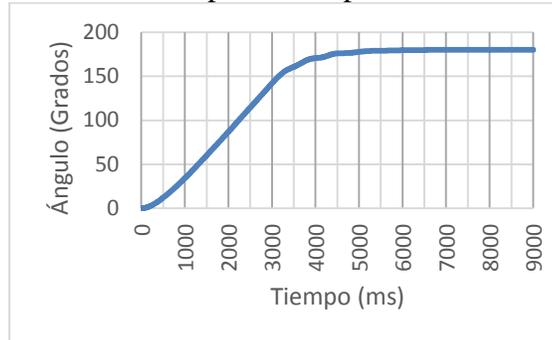
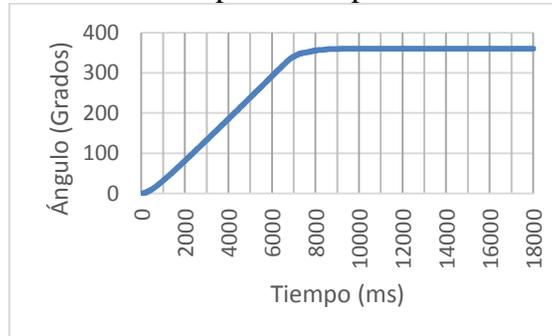
**Figura 24.7** Carga colocada en el eje, colgando de un dinamómetro para su medición



1) Pruebas sin carga: Para estas pruebas se establecieron ángulos significativos; 45, 90, 180 y 360°; realizando pruebas repetitivas del posicionamiento angular, tabulando y graficando los valores se obtuvo una curva típica para cada ángulo, **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** a Fig, junto con una tabla de resultados, Tabla 24 , que muestra el tiempo de asentamiento ( $t_s$ ), de levantamiento ( $t_d$ ) y de retardo ( $t_r$ ) y el error en estado estable ( $E_{ss}$ ) del sistema.

**Tabla 24** Valores significativos de las pruebas sin carga obtenidos de la curva típica correspondiente a cada ángulo

Ángulo	$t_d$ (ms)	$t_r$ (ms)	$t_s$ (ms)	$E_{ss}$ (grados)	Sobrepaso (grados)
45°	750	1620	3770	0.10284	0.13712
90°	1290	2050	4820	0.03428	0
180°	2050	2920	7080	0.0171	0
360°	3900	5520	9180	0.015545 4	0.49881818

**Figura 24.7** Curva típica de respuesta a 45° sin carga**Figura 24.8** Curva típica de respuesta a 90° sin carga**Figura 24.9** Curva típica de respuesta a 180° sin carga**Figura 24.10** Curva típica de respuesta a 360° sin carga

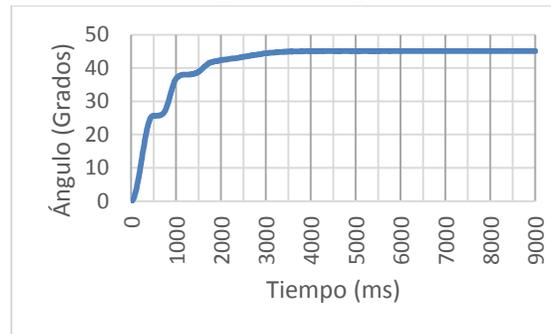
2) Pruebas con carga: en estas pruebas se efectuaron las mismas pruebas repetitivas con los ángulos significativos obteniendo los resultados de la Tabla 24.1 24.1.

**Tabla 24.1** Valores significativos de las pruebas con carga obtenidos de la curva típica correspondiente a cada ángulo

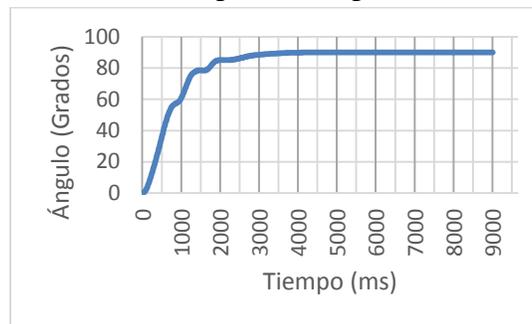
Ángulo	$t_d$ (ms)	$t_r$ (ms)	$t_s$ (ms)	$E_{ss}$ (grados)	Sobrepaso (grados)
45°	360	1520	3670	0.06856	0.0857
90°	600	1550	4300	0.03428	0
180°	990	1760	6440	0.1026	0
360°	1770	2780	8100	0.0342	0

Los resultados de la Tabla 24.1 4.1 se pueden observar en las gráficas de la Fig a la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

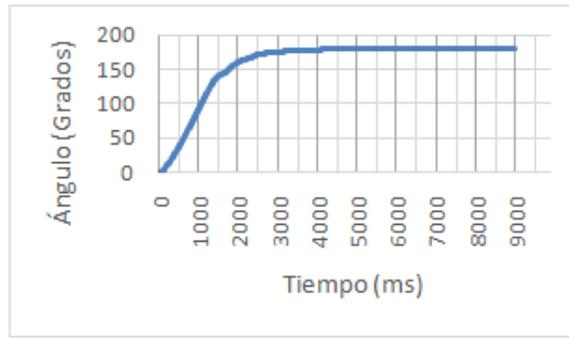
**Figura 24.11** Curva típica de respuesta a 45° con carga



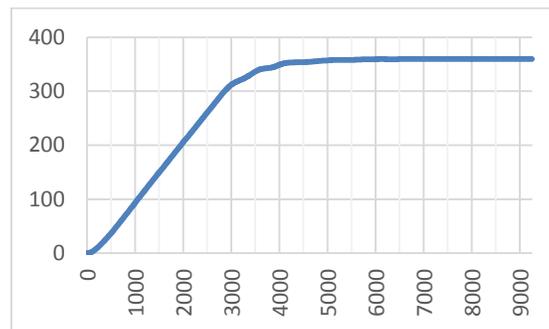
**Figura 24.12** Curva típica de respuesta a 90° con carga



**Figura 24.13** Curva típica de respuesta a 180° con carga



**Figura 24.14** Curva típica de respuesta a 360° con carga



## Discusión

El realizar pruebas repetitivas del posicionamiento angular, tanto sin carga y con carga, permite ver con cierto grado de certeza, de qué manera responderá el motor al dirigirse a cierta posición.

Conocer los tiempos en los que responderá el motor con carga y sin ella, muestra cómo responde el controlador ante ciertas perturbaciones, ya que como se puede ver los tiempos de levantamiento y de respuesta son totalmente diferentes. Ya que el controlador proporciona a la salida una respuesta diferente, la cual se incrementa de acuerdo al esfuerzo que esté realizando el motor. Como podemos ver, si comparamos las curvas de respuesta de los ángulos sin carga con respecto de los ángulos con carga; en la respuesta con carga tenemos momentos en los que la pendiente, en el tiempo de levantamiento, tiene un ángulo, y por pequeños instantes tiene otro ángulo. Esto indica que en determinada posición el motor puede estar realizando un mayor esfuerzo en ese punto y que la señal de control enviada no fue suficiente y que ésta se tiene que incrementar.

Por otro lado podemos ver que en el sistema sin carga se tiene un sobrepaso mucho mayor que en el sistema con carga, esto se debe a que la carga ejercida en el motor, funciona como amortiguamiento en el sistema, es decir; el peso de la carga impide que el motor, por su misma inercia u otros factores, gire más grados que el punto establecido.

## 24.2 Conclusiones

El utilizar algoritmos para el control de velocidad y posición en los motores, es un tema que ha adquirido gran importancia a partir de la automatización de los procesos industriales.

El realizar un control con auto sintonía, desde un software como LabVIEW, es de gran utilidad; ya que permite tener una idea general de la respuesta de un sistema que aún se encuentra en etapa de pruebas, ya que posteriormente, al estar montados los motores en la estructura mecánica del prototipo de rodilla, el sistema responderá diferente ante las fuerzas ejercidas en conjunto con la estructura. Debido a esto, es probable que se requiera realizar una sintonía diferente en el controlador, caracterizando de nuevo la respuesta proporcionada por el sistema.

Este tipo de aplicaciones han dado grandes avances en otros campos, como lo es la robótica. En este caso se implementará el control de motores en un sistema biomecatrónico de rodilla, para la prueba de meniscos sintéticos, donde a partir de los resultados obtenidos en las pruebas de posicionamiento, se puede considerar factible el control utilizando este tipo de motores, para la realización de la cinemática de la rodilla.

### 24.3 Agradecimientos

Los autores agradecen al Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Querétaro (CONCYTEQ) por el financiamiento y apoyos otorgados a este proyecto.

### 24.4 Referencias

D. T. K. S. R. C. William E. Garret, «Menisco,» de Medicina del Fútbol, Bandalona, Paidotribo, 2005, p. 373.

V. Sanchis, Dolor anterior de rodilla e inestabilidad rotuliana en el paciente joven, D.F.: Médica Panamericana, 2003, p. 40.

J. J. Craig, Robótica, Tercera ed., México: Prentice Hall, 2006, p. 252.

B. C. Kuo, Sistemas de Control Automático, Séptima ed., Naucalpan de Juárez: Prentice Hall, 1996.

«Ciudad Universitaria,» Marzo 2014. [En línea]. Available:  
[http://www.dgcs.unam.mx/boletin/bdboletin/2014\\_125.html](http://www.dgcs.unam.mx/boletin/bdboletin/2014_125.html).

B. Miller, «USB Facts of Life,» 2008. [En línea]. Available:  
[http://www.tracesystemsinc.com/USB\\_Tutorials\\_web/USB/A1\\_Overview/Books/A3\\_USB\\_Facts\\_of\\_Life/slide04.htm](http://www.tracesystemsinc.com/USB_Tutorials_web/USB/A1_Overview/Books/A3_USB_Facts_of_Life/slide04.htm).

L. McCann, E. Ingham, Z. Jin y J. Fisher, «Influence of the meniscus on friction and degradation of cartilage in the natural knee joint,» de Osteoarthritis and Cartilage, 2009, pp. 17,995-1000.