

CONTROL NUMÉRICO EN UNA MÁQUINA DE REHABILITACIÓN PARA TOBILLOS

José A. Santana Camilo

Tecnológico Nacional de México/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico
jasantanac@hotmail.com

Andrés Blanco Ortega

Tecnológico Nacional de México/ Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico
andres.blanco@cenidet.edu.mx

Edgar Antúnez Leyva

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
eantunez@tlaloc.imta.mx

Andrea Magadán Salazar

Tecnológico Nacional de México/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico
magadan@cenidet.edu.mx

Fabio A. Gómez Becerra

Tecnológico Nacional de México/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico
claudia@cenidet.edu.mx

Resumen

En el desarrollo de máquinas mecatrónicas para la rehabilitación de tobillo se tiene el reto de proporcionar movimientos suaves de dorsiflexión-plantarflexión, abducción-aducción e inversión-eversión de manera individual en las primeras etapas del proceso de rehabilitación de un paciente que ha sufrido alguna lesión en el tobillo. Conforme, el paciente va recuperándose, se requiere que la máquina proporcione movimientos en sus valores máximos, así como, movimientos complejos que se obtienen al combinar dos movimientos.

En el presente artículo se propone el uso del control numérico en una máquina de rehabilitación de tobillos basado en una mesa XY. El control numérico es utilizado

principalmente en máquinas herramientas para proporcionar movimientos precisos en el maquinado de piezas. En este trabajo se presenta el desarrollo de la máquina de rehabilitación de tobillos, así como el desarrollo para la implementación del control numérico para proporcionar los movimientos suaves y complejos para la rehabilitación.

Palabra(s) Clave: Control numérico, Máquina de rehabilitación de tobillos, Movimiento pasivo continuo.

Abstract

In the development of mechatronic machines for ankle rehabilitation the design challenge is providing smooth movements of dorsiflexion-plantarflexion, abduction-adduction and inversion-eversion individually in the early stages of the rehabilitation process of a patient who has suffered an ankle injury. As the patient recovers, the machine is required to provide movements at their maximum values, as well as, complex movements that are obtained by combining two movements.

In this paper, we propose the use of numerical control in an ankle rehabilitation machine based on an XY table. The numerical control is mainly used in machine tools to provide precise movements in the machining of parts. This paper presents the development of the ankle rehabilitation machine, as well as the development for the implementation of numerical control to provide smooth and complex movements for rehabilitation.

Keywords: *Ankle rehabilitation machine, Numerical control, Continuous passive motion.*

1. Introducción

Los seres humanos estamos sujetos a presentar incidentes traumáticos los cuales ocasionan lesiones en las extremidades inferiores y superiores. Estas lesiones ocasionan que no se puedan realizar actividades de la vida cotidiana. Posteriormente, del tratamiento médico de las lesiones, fracturas, etc., el paciente generalmente permanece en reposo, y, cuando un músculo no se utiliza o se debilita, tiende a acortarse resultando que las articulaciones se vuelvan rígidas y

ocasionando deformidades, lo que provoca un deterioro muy notable sobre músculos y articulaciones, que, sin el estímulo del movimiento o una terapia física, pierden parte de sus aptitudes.

Actualmente, se han propuesto máquinas para rehabilitación de tobillos de movimiento pasivo continuo (MPC) que pueden ser utilizadas desde la etapa inicial del proceso de rehabilitación para recuperar la movilidad y evitar la rigidez. Estas máquinas pueden ser una herramienta para la labor de los fisioterapeutas, de manera que proporcionen movimientos suaves y continuos en base a la etapa y estado de cada paciente en su proceso de rehabilitación.

La mayoría de las máquinas de rehabilitación para tobillos que se han propuesto, presentan una configuración de robot paralelo [1,17, 13, 12]. Un robot paralelo es una estructura mecánica formada por un mecanismo de cadena cerrada, en el que el efector final se une a la base por al menos dos cadenas cinemáticas independientes. Estos robots paralelos se han propuesto desde 1 grado de libertad (gdl) [6, 5] hasta 6 gdl [7], aunque los movimientos son tres rotaciones en el tobillo, por lo que algunos robots paralelos están sobreactuados [2, 7,14]. Las máquinas de rehabilitación, generalmente, no proporcionan movimientos combinados o complejos, como una trayectoria que define una letra del abecedario o alguna figura geométrica, la cual debe de seguir el movimiento del pie mediante el dedo gordo en un plano imaginario.

En la figura 1 se muestran los tres movimientos que pueden realizarse en el tobillo:

- Dorsi/plantarflexión.
- Inversión/eversión.
- Abducción/aducción.

En la tabla 1 se muestran los intervalos máximos para cada movimiento [16,12].

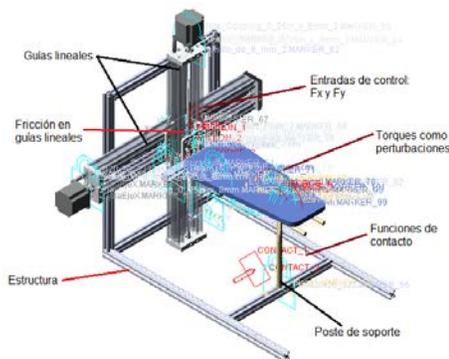
En [8] se propuso un robot rehabilitador de tobillo basado en una configuración paralela, el cual utiliza un sistema de mesa XY, ver figura 2, para proporcionar movimientos de dorsiflexión-plantarflexión y abducción-aducción, ya sea de manera independiente o combinando ambos movimientos.



Figura 1 Movimientos del tobillo con respecto a los tres ejes.

Tabla 1 Intervalos para cada movimiento del tobillo.

Tipo de movimiento	Valores máximos
Dorsiflexión	20.3° a 29.8°
Plantarflexión	37.6° a 45.8°
Inversión	14.5° a 22.0°
Eversión	10.0° a 17.0°
Abducción	15.4° a 25.9°
Aducción	22.0° a 36.0°



Prototipo virtual



Prototipo físico

Figura 2 Rehabilitador de tobillo basado en una mesa XY.

Por otra parte, el control numérico (CN) es el término utilizado para describir las máquinas que son controladas por una serie de instrucciones formadas por números y letras del alfabeto. El Control numérico por computadora (CN o CNC) es un término muy amplio que abarca una variedad de tipos de máquinas, se trata

de usar una computadora como un medio para controlar una máquina que talla objetos útiles de bloques sólidos de material. Por ejemplo, una máquina de CNC podría comenzar con un bloque sólido de aluminio, y luego remover parte del material para dejar una pieza como el manubrio de freno de bicicleta [11].

Hasta la fecha, el control numérico ha sido utilizado en todo tipo de máquinas para manufactura, como los centros de maquinado, tornos, fresas, impresoras 3D, entre otras (ver figura 3). Este tipo de máquinas son productos típicos mecatrónicos. Cuando se desarrollaron las máquinas de CN, el propósito de la máquina CN era maquinar partes con forma compleja de una manera precisa [15].



Figura 3 Torno de CN Dynamach y máquina de grabado CNC.

Basado en el diseño propuesto en [8] de utilizar un sistema de mesa XY en el rehabilitador es posible utilizar el CNC para implementar en el rehabilitador de tobillos movimientos suaves y precisos, a su vez dar una mayor prestación para realizar movimientos complejos que permitan combinar los movimientos de dorsiflexión-plantarflexión y abducción aducción.

El uso de CN presenta ventajas como [6, 7, 10]:

- Automatización de los movimientos de una máquina.
- Automatización flexible: se basa en un programa que se puede cambiar fácilmente.
- Posibilidad de dejar trabajando la máquina desatendida.
- Incrementar la productividad.
- Se reduce la influencia de la “habilidad del operario” en el manejo de la máquina, programar maquinados de curvas complejas.
- Mejora de precisión y velocidad en el movimiento.

Desarrollo de rehabilitador de tobillo con CN

El rehabilitador de tobillos propuesto en [8] se basa en el uso de los movimientos de una mesa XY. Se utilizó perfil modular comercial para la estructura y solo se tienen 6 piezas personalizadas para el ensamble del rehabilitador, todas las demás piezas son componentes estándar. Se utilizaron uniones esféricas para unir la base móvil con la base fija y la mesa XY, en la figura 4 se muestra en perspectiva isométrica y vista frontal el rehabilitador.

En una rehabilitación inicial se requiere que el rehabilitador de tobillo proporcione un movimiento continuo pasivo de los movimientos básicos e independientes de abducción/aducción y dorsiflexión/plantarflexión, los cuales representan los movimientos de una mesa XY en las direcciones de X y Y, respectivamente. En la figura 5, se muestra la máquina de rehabilitación en diferentes posiciones, mostrando los movimientos básicos del pie-tobillo.

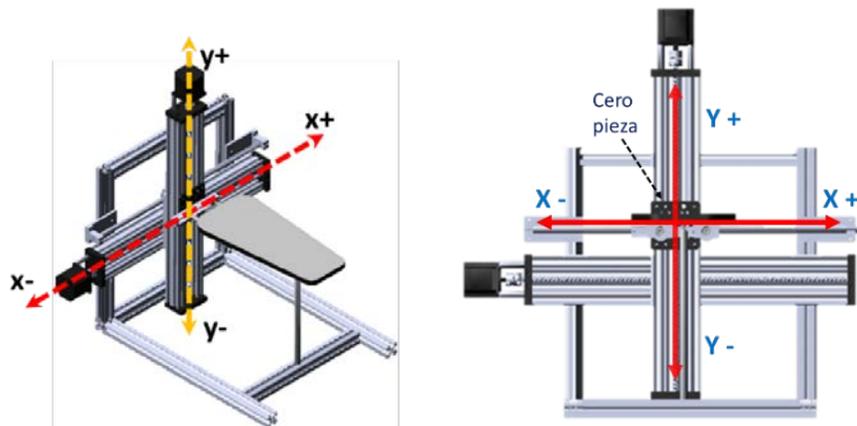


Figura 4 Vista de la mesa XY del rehabilitado: Isométrica y frontal.

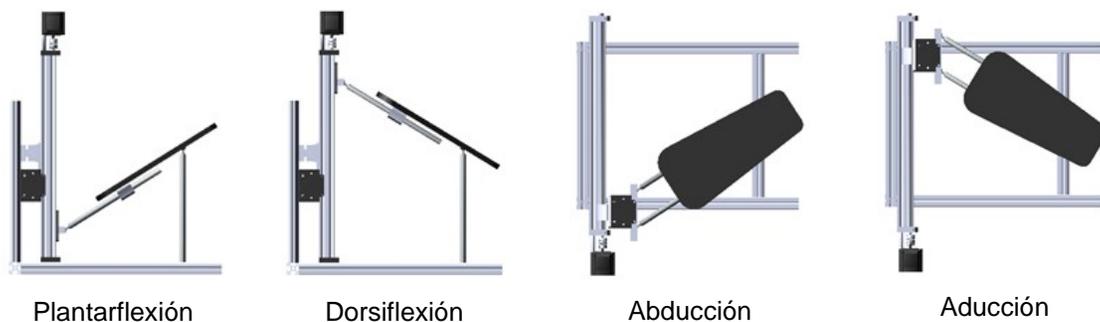


Figura 5 Rehabilitador en diferentes posiciones de los movimientos básicos del pie- tobillo.

En la figura 6, se muestra un diagrama de cuerpo libre del rehabilitador de tobillo considerando perturbaciones constantes, para aproximar la rigidez de la articulación del tobillo. Para el movimiento del eje X, se considera la masa m_1 que corresponde a la suma de la masa de la base móvil y toda la masa del sistema de guía lineal para el eje Y. En el eje Y se considera la masa m_2 en el modelado debido solo a la base móvil. Se considera amortiguamiento viscoso, b , en ambas guías lineales entre el carro y la guía, ver figura 3. Las entradas de control son las fuerzas F_x y F_y las cuales son proporcionadas por un motorreductor de CD al mover la base de la guía lineal. También, se consideran perturbaciones P_1 y P_2 las cuales se consideran constantes y representan la rigidez de la articulación del tobillo [4].

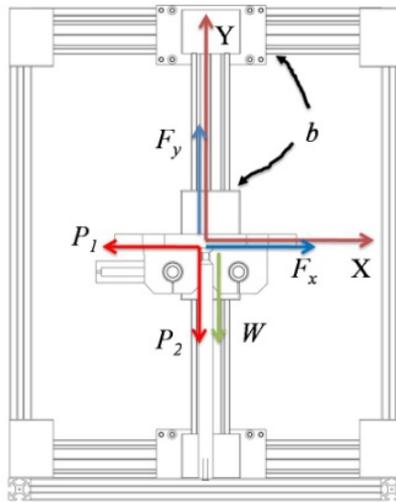


Figura 6 Diagrama de cuerpo libre del rehabilitador basado en una mesa XY.

El modelo matemático que rige la dinámica para el rehabilitador de la mesa XY, puede ser obtenido al aplicar la segunda ley de Newton, el cual está dado por ecuaciones 1 y 2.

$$\ddot{x} + \frac{b}{m_1 + m_2} \dot{x} - \frac{F_x - P_1}{m_1 + m_2} = 0 \quad (1)$$

$$\ddot{y} + \frac{b}{m_2} \dot{y} - \frac{F_y + W - P_2}{m_2} = 0 \quad (2)$$

Se proponen los siguientes controladores GPI robustos para el seguimiento de trayectorias [3], ecuaciones 3 y 4.

$$u_x = \ddot{x}_d - k_5(\hat{x} - \dot{x}_d) - k_4(x - x_d) - k_3 \int_0^t (x - x_d) d\tau - k_2 \int_0^t \int_0^\tau (x - x_d) d\lambda d\tau - k_1 \int_0^t \int_0^\tau \int_0^\lambda (x - x_d) d\lambda d\tau d\sigma - k_0 \int_0^t \int_0^\tau \int_0^\lambda \int_0^\sigma (x - x_d) d\rho d\sigma d\tau d\lambda \quad (3)$$

$$u_y = \ddot{y}_d - k_5(\hat{y} - \dot{y}_d) - k_4(y - y_d) - k_3 \int_0^t (y - y_d) d\tau - k_2 \int_0^t \int_0^\tau (y - y_d) d\lambda d\tau - k_1 \int_0^t \int_0^\tau \int_0^\lambda (y - y_d) d\lambda d\tau d\sigma - k_0 \int_0^t \int_0^\tau \int_0^\lambda \int_0^\sigma (y - y_d) d\rho d\sigma d\tau d\lambda \quad (4)$$

Donde \hat{x} es el valor estimado de \dot{x} y se define en ecuación 5.

$$\begin{aligned} \hat{x} &= \int_0^t u_x d\tau & \hat{y} &= \int_0^t u_y d\tau \\ \dot{x} &= \tilde{x} + \dot{x}_0 & \dot{y} &= \tilde{y} + \dot{y}_0 \end{aligned} \quad (5)$$

Sustituyendo los controladores (ecuaciones 3 y 4), se obtienen ecuaciones 6 y 7.

$$F_x = u_x(m_1 + m_2) + b\tilde{x} \quad (6)$$

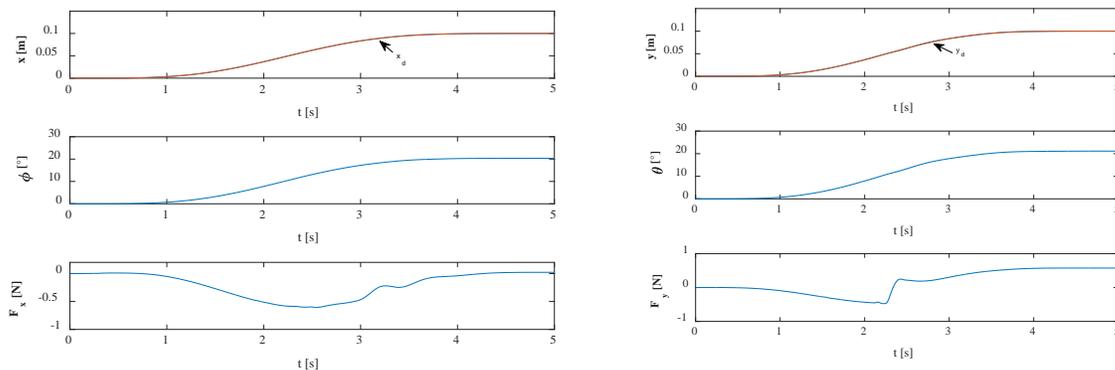
$$F_y = u_y(m_2 u_y) + b\tilde{y} \quad (7)$$

Los parámetros utilizados para las simulaciones del modelo matemático (ecuaciones 1 y 2) del rehabilitador de tobillo con la implementación del control GPI robusto (ecuaciones 6 y 7) se muestran en la tabla 2. Los parámetros k_i son seleccionados de manera que el polinomio característico del sistema en lazo cerrado sea Hurwitz (raíces en el semiplano complejo izquierdo), para garantizar que la dinámica del error sea globalmente asintóticamente estable.

Tabla 2 Parámetros de simulación.

$m_1=2 \text{ kg}$	Masa del eje X
$m_2=1.5 \text{ kg}$	Masa del eje Y
$b= 0.0 \text{ Ns/m}$	Coefficiente de amortiguamiento viscoso
$\mu_s=0.2$	Coefficiente de fricción estático en las guías lineales
$\mu_k=0.14$	Coefficiente de fricción dinámico en las guías lineales

En la figura 7 se muestra la respuesta para el movimiento real y deseado de abducción (movimiento lineal x y angular ϕ) y dorsiflexión (movimiento lineal y y angular θ), utilizando el controlador GPI robusto (ecuaciones 6 y 7). Se observa, cómo se obtiene un movimiento suave de 0° a 20° (0 a 0.1m) donde el error tiende a cero.



a) abducción (eje X).

b) dorsiflexión (eje Y) sin perturbación.

Figura 7 Respuesta para movimiento.

El controlador GPI robusto, así como controladores tipo PD, PID y control de impedancia pueden ser implementados en el rehabilitador basado en una mesa XY utilizando motores de CD para una rehabilitación pasiva (sin esfuerzo del paciente) y resistiva (con fuerza opuesta al paciente) [4]. Sin embargo, para movimientos combinados resultaría ser más complejo su implementación, comparado con el control numérico. A continuación, se mostrará la metodología para implementar el código G en el rehabilitador basado en una mesa XY para ofrecer movimientos suaves y complejos para una rehabilitación pasiva.

En la figura 8 se muestra la plataforma móvil para analizar el movimiento lineal vs angular, para ambos ejes x y y . El avance del sistema eje motor indica que por cada revolución del motor es proporcional a 8 mm en avance lineal (sistema guía lineal Acme OpenBuilds C-Beam 500) con un motor a pasos NEMA 17 (200 pasos por revolución), por lo tanto, la proporción angular es igual en el eje x y y .

Para enviar los comandos de control al motor a pasos mediante el código G, el noruego Simen Svale Skogrud desarrolló para Arduino un chip de Atmel AVR con

un Firmware denominado GRBL, y más tarde Sonny Jeon por medio de este software encontró la forma de controlar los motores.

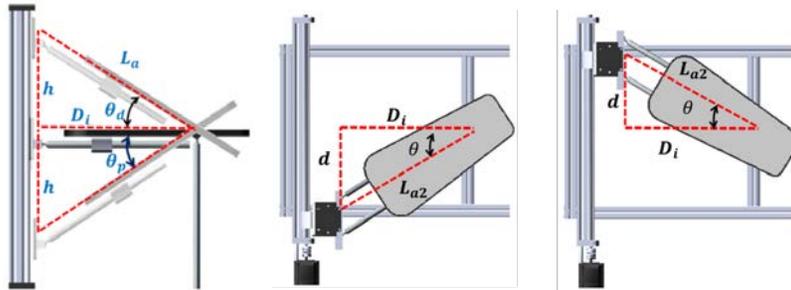


Figura 8 Relación entre los desplazamientos lineales vs angulares.

El Arduino CNC Shield permite la puesta en marcha de proyectos CNC, utilizando el firmware de código abierto para controlar 4 motores a pasos con 4 drivers A4988, con esta extensión y el Arduino se puede construir todo tipo de proyectos de robótica o CNC incluyendo enrutadores CNC, cortadores láser y en nuestro caso aplicarlo en el rehabilitador de tobillo, ver figura 9.

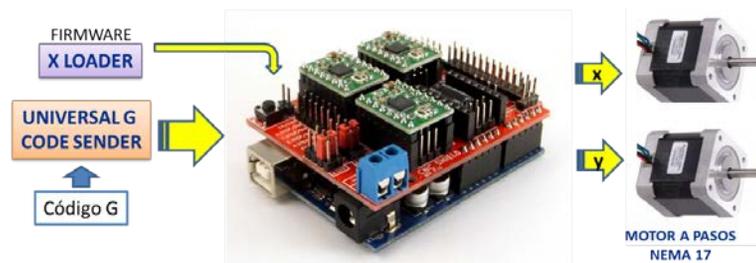


Figura 9 Protocolo de comunicación Arduino CNC Shield Motor a pasos.

La arquitectura del controlador A4988 se muestra en la figura 10, los cuatro bornes de salida: 1A, 1B, 2A y 2B, son para conectar el motor y su nivel de tensión es de acuerdo al voltaje V_{MOT} , el borne RESET habilita las salidas, STEP vincula los pasos para avance y DIR el sentido de giro. En la figura 10 se muestra el diagrama de cableado mínimo para conectar un microcontrolador a un portador de controlador de motor paso a paso A4988 (modo de paso completo).

Universal Gcode Sender es un emisor de programas de código G de plataforma cruzada compatible con GRBL basado en Java, ver figura 11. Este programa se

aplica para ejecutar una máquina CNC controlada por GRBL con comandos de código G y que incluso tiene botones de flecha para mover sus motores paso a paso de forma manual. En esta ventana se configura el cero pieza, que es la referencia a partir del cual se realizarán los movimientos. El cero pieza para la máquina de rehabilitación se define cuando la plataforma está horizontal y centrada, ver figura 4.

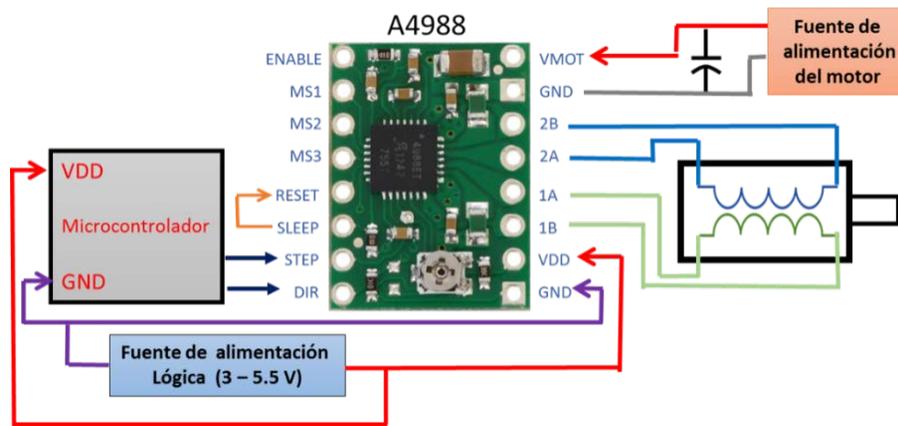


Figura 10 Diagrama de conexión del driver A4988 al motor de pasos.

En la figura 12 se muestra un diagrama de bloques para mostrar la secuencia de operación de la máquina de rehabilitación de tobillo. Se inicia definiendo el tipo de movimientos deseado, sencillo o complejo. El código G del movimiento se puede obtener mediante el uso de Inskape o el usuario lo programa de manera manual. Posteriormente, se carga el programa en el Universal Gcode Sender y se envía al Arduino - CNC Shield y al correr el programa se obtiene el movimiento deseado en el rehabilitador de tobillo.

3. Resultados

Se propone tres etapas de rehabilitación: moderada, intermedia y máxima. Se inicia con los movimientos básicos e individuales de dorsiflexión, plantarflexión, aducción y abducción, en los que se puede modificar el ángulo, velocidad y número de repeticiones.

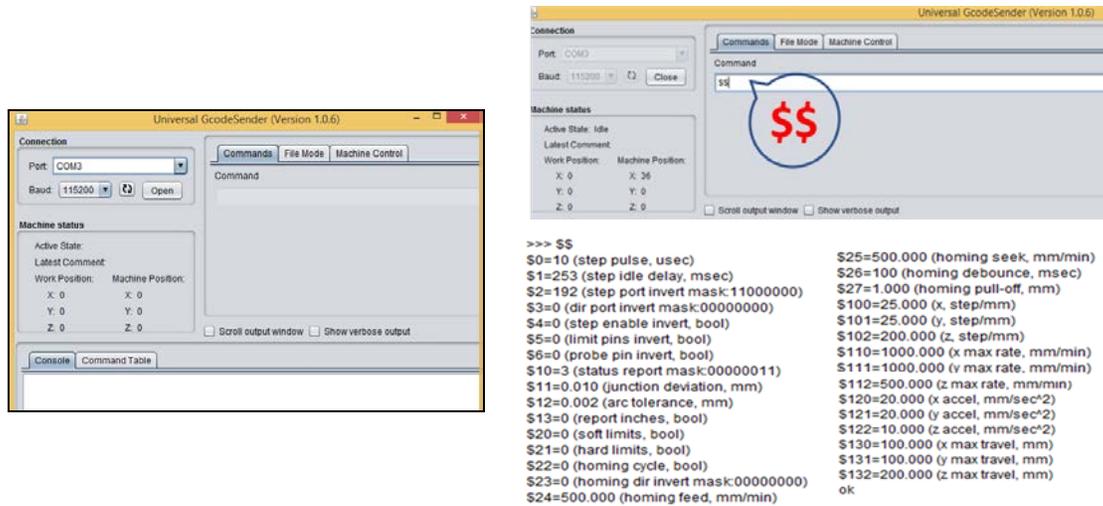


Figura 11 Configuración del Universal Gcode Sender.

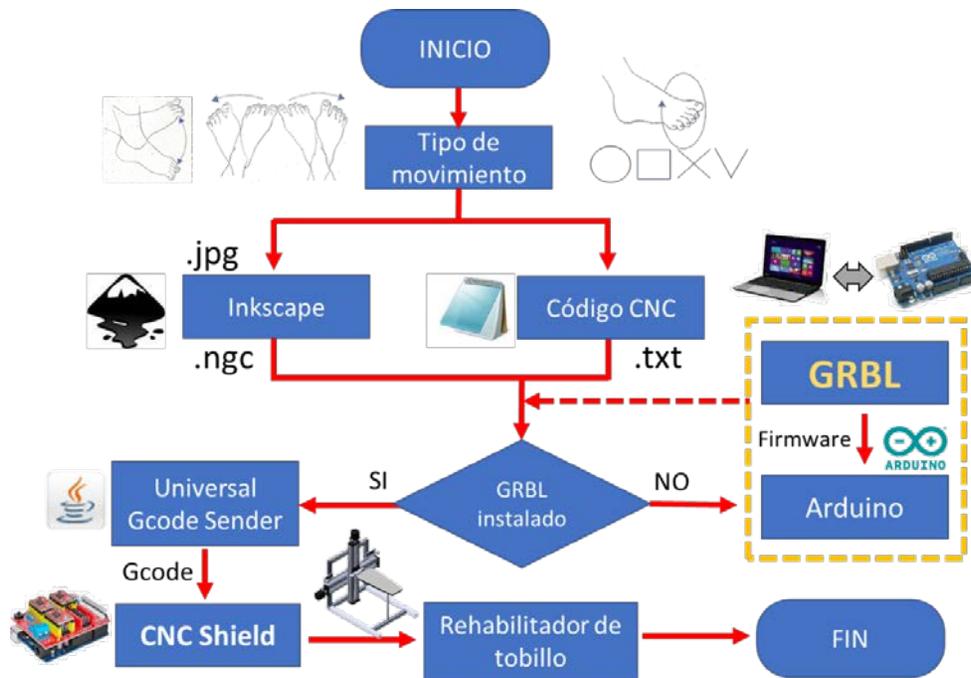


Figura 12 Fases de operación del rehabilitador de tobillo.

En la figura 13 se muestra la relación del desplazamiento en la guía lineal con su valor correspondiente del ángulo de dorsiflexión θ . Posteriormente, en la figura 14 se muestra el código G para un movimiento de dorsiflexión con cuatro repeticiones. Es importante mencionar que la velocidad se puede cambiar desde los comandos del Universal Gcode Sender o con la instrucción G01. Para obtener

un movimiento dorsiflexión o de abducción-aducción solo se modificarían las coordenadas.

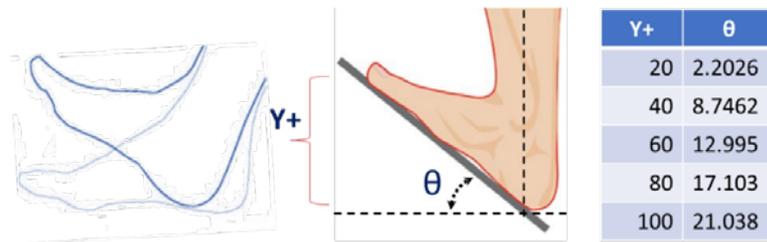


Figura 13 Relación de ángulo vs desplazamiento para el movimiento de dorsiflexión.

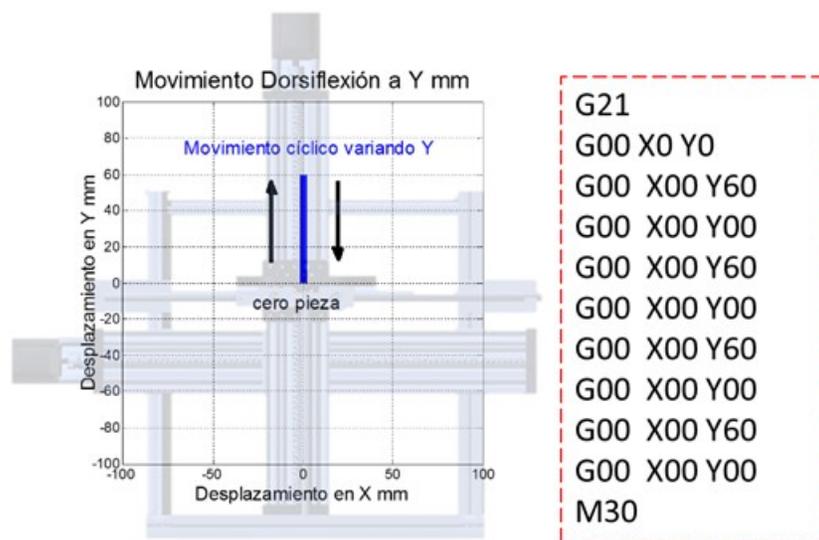


Figura 14 Programa de CN, movimiento de cuatro ciclos dorsiflexión 60 mm de amplitud.

El movimiento circular del pie es muy común en la mayoría de los programas de rehabilitación para recuperar la movilidad en el tobillo. En este caso en el rehabilitador se propone este movimiento que se puede ir aumentando literalmente el radio de esta trayectoria según el avance o tolerancia del paciente con la asistencia oportuna del terapeuta, en la figura 15 se muestra este movimiento y como se aplica en el rehabilitador por cada fase con referencia a un punto de referencia, cero pieza. En la figura 16 se muestra el código G que se envía al rehabilitador mediante el universal Gcode Sender al CNC Shield para obtener este movimiento combinado en la máquina de rehabilitación.

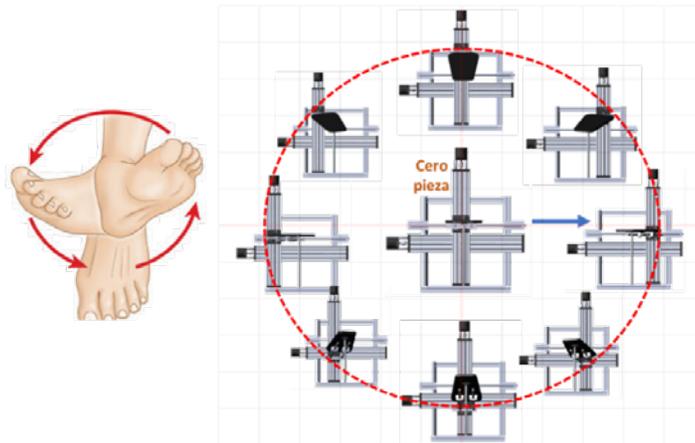


Figura 15 Movimiento complejo en círculo o elipse en el rehabilitador.

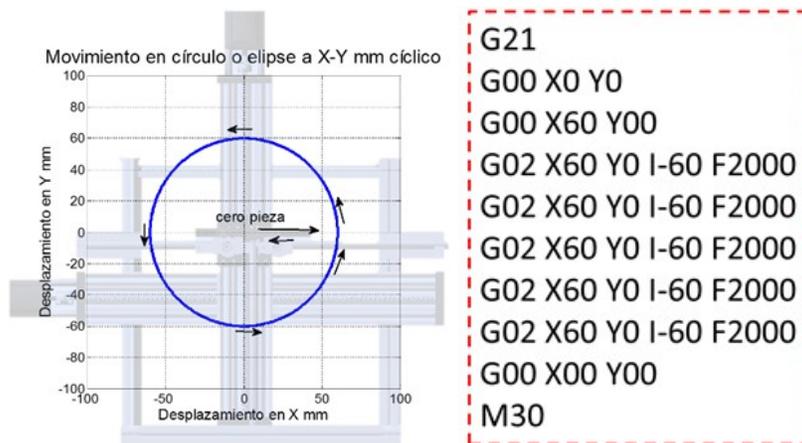


Figura 16 Programa de CN para un movimiento circular con un radio de 50 mm.

En la figura 17 se muestra el desplazamiento que se debe tener en cada base móvil de los ejes x y y, en función del tiempo. Se puede observar en la figura 16, que se utiliza el comando G02 para movimientos circulares, además se agrega la instrucción de velocidad F2000 (mm/min) lo cual permitirá controlar el tiempo del movimiento.

De manera similar en las figuras 18 y 19 se muestra el código G para un movimiento combinado para trazar una V. En este movimiento se combinan los cuatro movimientos: dorsiflexión-plantarflexión y abducción-aducción, ver figura 19.



Figura 17 Trayectoria X y Y de guías lineales respecto al tiempo del movimiento circular.

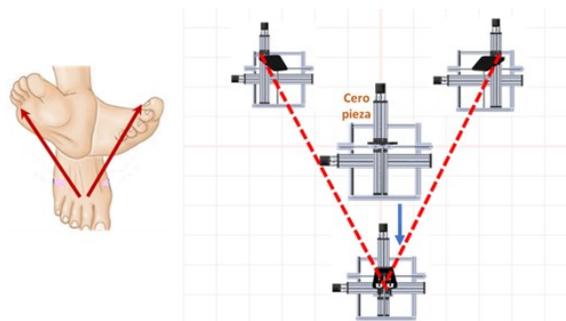


Figura 18. Movimiento letra V en el rehabilitador

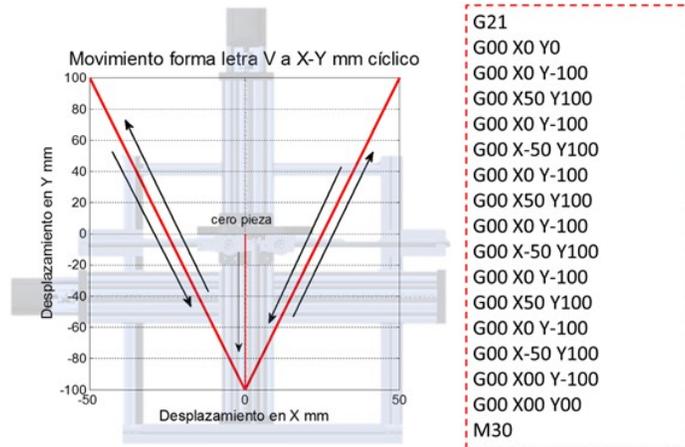
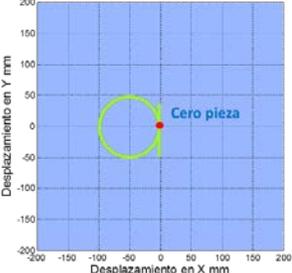


Figura 19 Movimiento V en el rehabilitador con respectivo código G.

Otro ejercicio que se solicita a un paciente para su rehabilitación de tobillo, es que trace con el dedo gordo del pie, en un plano imaginario, las letras del abecedario. Esto también es posible en este rehabilitador gracias al uso del CN. En la tabla 3

se muestran algunos ejemplos con su código G para obtener estos movimientos en la máquina de rehabilitación.

Tabla 3 Trayectoria de letras del alfabeto con su respectivo código G.

Letras	Trayectoria	Código G
		<pre> G21 G00 X00 Y00 Z1 G01 Z-3 G03 X-100 Y00 I-50 G03 X0 Y0 I50 G01 X0 Y40 G01 X0 Y-50 G01 X0 Y0 M30 </pre>
		<pre> G21 G00 X0 Y0 Z1 G01 Z-3 G02 X80 Y0 I40 G02 X0 Y0 I-40 G01 X0 Y80 G01 X0 Y-40 G01 X0 Y0 M30 </pre>
		<pre> G21 G00 X0 Y0 Z1 G01 Z-3 G02 X0 Y50 R-50 G03 X0 Y0 R-50 M30 </pre>

4. Discusión

En el presente artículo se propone el uso del control numérico para proporcionar movimientos suaves y precisos en una máquina mecatrónica para la rehabilitación de tobillos. El rehabilitador basado en el uso de una mesa XY para mover la plataforma móvil, es capaz de proporcionar movimientos complejos al combinar los movimientos de dorsiflexión-plantarflexión con abducción-aducción. La idea es que el paciente realice movimientos complejos como el trazar las letras del abecedario con el dedo gordo en un plano imaginario a la mesa XY.

El uso del CN puede también proporcionar movimientos suaves como las curvas de Bézier que se utilizaron con el control GPI robusto. El uso del CN en la rehabilitación es muy prometedor para que se puedan ofrecer movimientos para que se activen varios músculos al mismo tiempo, evitando la espasticidad y así recuperar el rango de movimiento. En este caso se aplicó a una máquina de rehabilitación de tobillo de 2 grados de libertad, sin embargo, también se puede aplicar a un rehabilitador de cadera de 3 grados de libertad como el propuesto en [9]. Estas máquinas mecatrónicas para la rehabilitación son una herramienta de apoyo para los especialistas en fisioterapia, quienes serán los encargados de poner las rutinas de ejercicios para cada paciente, logrando que la rehabilitación sea personalizada, basándose en los ejercicios recomendados en base a la lesión y estado de los músculos en rehabilitación.

5. Bibliografía y Referencias

- [1] Alcocer, W., Vela, L., Blanco, A., González, J., Oliver, M. Major trends in the development of ankle rehabilitation devices. *Dyna*. 2012. 176, 48-58.
- [2] Ayas, M. and Altas, I. A redundantly actuated ankle rehabilitation robot and its control strategies, 2016 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI), Athens, 2016, pp. 1-7.
- [3] Blanco-Ortega, A., Magadán-Salazar, A., Antúnez-Leyva, A., Santana-Camilo, J. A. Controlador proporcional integral generalizado robusto para un rehabilitador de tobillo de 2gdl. Congreso Internacional en Tecnología, Innovación y Docencia (CITID 2017). México. 2017.
- [4] Blanco, A., Gómez, F., Olivares, V., Abúndez, A., Colín, J. Design and development of a parallel robot based on an XY table for ankle rehabilitation, *Int. J. Automation and Control*, 2015, 9(2), pp.89–106.
- [5] Blanco, A., Azcaray, H., Vela, L., Vázquez, R. Prototipo virtual de un rehabilitador de tobillo, IX Congreso Internacional sobre Innovación y Desarrollo Tecnológico - CIINDET 2011. Cuernavaca, México. Noviembre 23-25, 2011. pp. 1-6.

- [6] Chou-Ching, K., Ju, M., Chen, S., Pan. B. A Specialized Robot for Ankle Rehabilitation and Evaluation. *Journal of Medical and Biological Engineering*. Vol. 28. 2008. pp. 79-86.
- [7] Girone, M. The "Rutgers Ankle" Orthopedic rehabilitation interface. *Proceedings of the ASME Haptics Symposium*. 1999, pp. 305-312.
- [8] Gómez F., Blanco, A., Vela, L. Rehabilitador de tobillo basado en una Mesa XY. X congreso internacional sobre innovación y desarrollo tecnológico (CIINDET-2013). Cuernavaca, Morelos, México. 2013.
- [9] Gómez-Becerra, F., Diseño y control de un robot de 3 GDL para la rehabilitación de extremidades inferiores. Tesis de Doctorado en Ciencias en Ingeniería Electrónica Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico. 2017.
- [10] Graham, Smith. *CNC Machining Technology. Volume I. Design, Development and CIM Strategies*. Springer-Verlag. 1993.
- [11] Hood-Daniel, P., Floyd-Kelly, J. *Build Your Own CNC Machine*. Apress. 2009.
- [12] Khalid YM, Gouwanda D, Parasuraman S. A review on the mechanical design elements of ankle rehabilitation robot. *Journal of Engineering in Medicine*. 2015; 229: (6): pp- 452-463.
- [13] Prashant K. Jamwal, Shahid Hussain, and Sheng Q. Xie Review on design and control aspects of ankle rehabilitation robots. *Journal Disability and Rehabilitation: Assistive Technology*. Volume 10, 2015 - Issue 2. Pp. 93-101.
- [14] Saglia, J. Tsagarakis, N., Dai, J., Caldwell, D. A High Performance 2-dof Over-Actuated Parallel Mechanism for Ankle Rehabilitation. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2009. pp. 2180-2186.
- [15] Suk-hwan, S., Seong-kyoon, K., Dae-hyuk, C., Stroud, I. *Theory and Design of Cnc Systems*. 2008. Springer.

- [16] Tsoi, Y., Xie, S. Design and Control of a Parallel Robot for Ankle Rehabilitation, International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice. 2008. pp. 515-520.
- [17] Sun, T., et al., "Mechanism design and control strategies of an ankle robot for rehabilitation training," 2015 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), Zhuhai, 2015, pp. 132-137.