

## Control virtual de un exoesqueleto robótico

ISLAS-ALEJANDRE, Arturo †, ACOSTA-SÁNCHEZ, José Antonio, NERI-GÓMEZ, Manuel y MENDOZA-BELLOC, Armando

CA. Sistemas de Ingeniería y Mantenimiento, Universidad Tecnológica del Valle de Toluca cp. 52044 Lerma, Edo. México

Recibido Julio 13, 2017; Aceptado Septiembre 15, 2017

### Resumen

Esta investigación desarrolla un programa de control virtual inalámbrico por Bluetooth a un exoesqueleto. El principal objetivo es enviar señales analógicas y digitales de forma inalámbrica a cada articulación del sistema de forma secuencial o independiente. Este estudio no sólo pretende ser aplicado al área médica de la rehabilitación física, también se espera se aplique en diferentes áreas industriales donde se emplea la supervisión en tiempo real y de forma virtual. Se presenta en un control de un sistema de instrumentación virtual LabVIEW realizando una comunicación con la plataforma de diseño, dentro de panel frontal al utilizar bloques especialmente prediseñados para el control de servomotores, a través de un envío de datos de comunicación con tecnologías como Arduino y el módulo HC-05 por Bluetooth. El diseño de control es aplicado a un primer prototipo de un exoesqueleto de rehabilitación física para personas con discapacidad en las funciones motoras de los dedos de la mano. Se proyecta en un futuro mejorar este prototipo y realizar una comunicación entre Solidworks y LabVIEW.

**Microcontralador ( $\mu$ c), Interfaz Virtual (VI), Protocolo de comunicación Arduino LabVIEW (LIFA), modulador de ancho de pulsos (PWM), especificación industrial para Redes Inalámbricas de Área Personal (Bluetooth)**

### Abstract

This research develops a virtual Bluetooth wireless control program to an exoskeleton. The main objective is to send analog and digital signals wirelessly to each articulation of the system in a sequential or independent way. This study is not only intended to be applied to the physical rehabilitation medical area, but is also expected to be applied in different industrial areas where supervision is used in real time and virtual. It is presented in a control of a virtual instrumentation system LabVIEW realizing a communication with the platform of design, in front panel when using blocks especially predesigned for the control of servomotors, through a sending of data of communication with technologies like Arduino and The HC-05 via Bluetooth. The control design is applied to a first prototype of a physical rehabilitation exoskeleton for the disabled in the motor functions of the fingers. It is planned in the future to improve this prototype and establish a communication between SolidWorks and LabVIEW.

**Microcontroller ( $\mu$ c), Virtual Interface (VI), Arduino communication protocol LabVIEW (LIFA), Pulse width modulator (PWM), Industry Specification for Personal Area Wireless Networks (Bluetooth)**

**Citación:** ISLAS-ALEJANDRE, Arturo, ACOSTA-SÁNCHEZ, José Antonio, NERI-GÓMEZ, Manuel y MENDOZA-BELLOC, Armando. Control virtual de un exoesqueleto robótico. Revista del Desarrollo Tecnológico 2017, 1-3: 26-35

\* Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: arturo.islas@utvtol.edu.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

## Introducción

Una de las primeras formas de programar un sistema de control fue a través del uso de un  $\mu\text{c}$ , como Intel 8048 el cual tiene arquitectura que en la actualidad es obsoleto. Después aparecieron los  $\mu\text{c}$  PIC con mayor simplicidad de diseño, aunque tiene pocas instrucciones, 33 instrucciones el 16C5X mientras que el Intel 8048 tiene más de 90.

La evolución de estos sistemas es muy rápida y hoy en día hay sistemas como tarjetas de adquisición de datos de National Instruments, Raspberry, Arduino que es una plataforma de desarrollo basada en un  $\mu\text{c}$  de la línea Atmel. Circuitos integrados que ofrecen un hardware embebido junto con varios periféricos. Como timers, osciladores internos, PWM, conversores analógico/digital.

En la actualidad existen sistemas que presentan un monitoreo de forma virtual que emplea diferentes tipos de control como Scada, Wincc, Vijeo Designer, PLC's especializados en el área de control y monitoreo de señales. Pero requieren de un conocimiento especializado para su utilización.

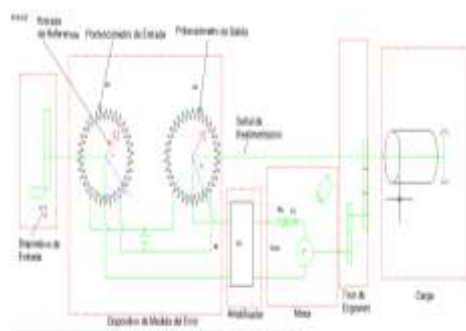
El objetivo es desarrollar un control con base en la instrumentación virtual con elementos económicos de bajo costo y fácil adquisición. Con la finalidad de enviar señales analógicas y digitales de forma inalámbrica a cada articulación de un exoesqueleto. Este estudio pretende beneficiar el área de rehabilitación física como principal aplicación, pero en un futuro se realizaran pruebas a diferentes procesos industriales donde se emplea la supervisión en tiempo real y virtual.

## Justificación

Los sistemas de control que se emplean en la actualidad, tienen como objetivo aplicar tecnologías en robótica para la rehabilitación en el área física. Este estudio pretende dar a conocer otros sistemas de control a personas que se dedican a desarrollar este tipo de mecanismos, que ayudan a personas con discapacidades diferentes, afectados en sus actividades normales por alguna alteración de sus funciones intelectuales o físicas.

El control realizado está basado en una interfaz virtual, diseñada en LabVIEW. Que emplea aplicaciones especialmente pre-diseñadas para interactuar con el  $\mu\text{c}$  Arduino.

## Modelado matemático de un servomotor



**Figura 1** Diagrama esquemático de un servomotor

Fuente: *Katsuhiko Ogata*

### Función de transferencia

$$Ft = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{b_0s^m + b_1s^{m-1} + \dots + b_{m-1}s + b_m}{a_0s^n + a_1s^{n-1} + \dots + a_{n-1}s + a_n} \quad (1)$$

Un sistema tiene varios componentes, por lo que, se representa a través de un diagrama de bloques que se divide en 2 tipos de sistemas. El primero es un sistema de lazo abierto y el segundo es un sistema de lazo cerrado, los cuales contienen información sobre el sistema dinámico.

Función de transferencia en lazo cerrado

$$Ft = \frac{G(s)}{1+G(s)H(s)} \quad (2)$$

Para un flujo constante el voltaje del inducido  $e_b$  es directamente proporcional a la velocidad angular

$$e_b = K_3 \frac{d\theta}{dt} \quad (3)$$

La velocidad de un servomotor de corriente continua controlado por inducido  $e_a$ , la ecuación diferencial para el inducido es

$$L_a = \frac{di_a}{dt} + R_a i_a + e_b = e_a \quad (4)$$

O bien

$$L_a = \frac{di_a}{dt} + R_a i_a + K_3 \frac{d\theta}{dt} = K_1 e_v \quad (5)$$

La ecuación para el equilibrio del par es

$$J_0 = \frac{d^2\theta}{dt^2} + b_0 \frac{d\theta}{dt} = T = K_2 i_a \quad (6)$$

Donde  $J_0$  es la inercia de la combinación del motor, carga y tren de engranaje referido al eje del motor y  $b_0$  el coeficiente de fricción viscosa de la combinación del motor, carga y tren de engranaje y referido al eje del motor.

Eliminando  $i_a$  de las ecuaciones 5 y 6 se tiene

$$\frac{\theta(s)}{E_v(s)} = \frac{K_1 K_2}{s(L_a s + R_a)(J_0 s + b_0) + K_2 K_3 s} \quad (7)$$

El tren de engranaje es tal que el eje de salida gira  $n$  veces en cada revolución del motor.

$$C(s) = n\theta(s) \quad (8)$$

La relación entre  $E_v(s)$ ,  $R(s)$  y  $C(s)$  es

$$E_v(s) = K_0[R(s) - C(s)] = K_0 E(s) \quad (9)$$

A partir de la ecuación 7, 8 y 9 la función de transferencia en este sistema

$$Ft = \frac{C(s)}{\theta(s)} \frac{\theta(s)}{E_v(s)} \frac{E_v(s)}{E(s)} = \frac{K_0 K_1 K_2 n}{s[(L_a s + R_a)(J_0 s + b_0) + K_2 K_3]} \quad (10)$$

Cuando  $L_a$  es pequeño, se puede despreciar y la Ft es

$$Ft = \frac{K_0 K_1 K_2 n / R_a}{J_0 s^2 + (b_0 + \frac{K_2 K_3}{R_a})s} \quad (11)$$

Donde

$$K_m = \frac{K}{B}, T_m = \frac{J}{B} = \frac{R_a J_0}{R_a b_0 + K_2 K_3} \quad (12)$$

$J = J_0/n^2 =$  Momento de inercia referido a la salida del eje.

$$B = [b_0 + (K_2 K_3 / R_a)]/n^2$$

Coficiente de fricción viscosa referido a la salida del eje.

$$K = K_0 K_1 K_2 / n R_a$$

La Ft dada por la ecuación 11 se simplifica

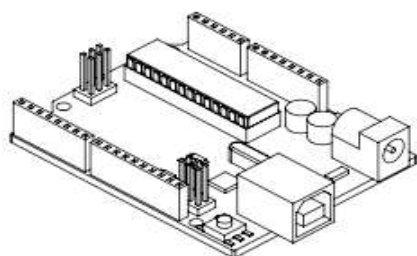
$$Ft = \frac{K}{J s^2 + B_s} \quad (13)$$

O bien

$$Ft = \frac{K_m}{s(T_m s + 1)} \tag{14}$$

**Arduino**

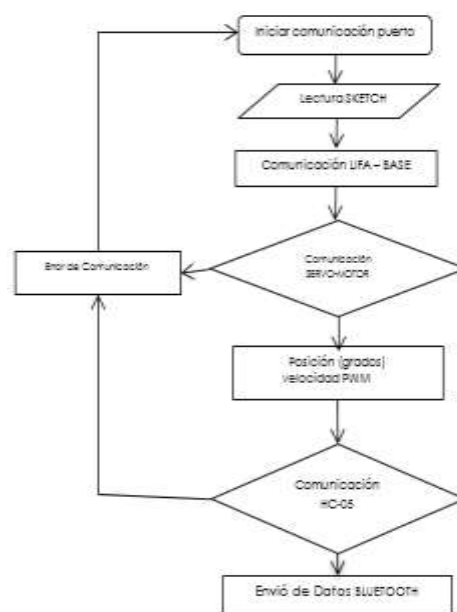
Es una plataforma de prototipos, electrónica de código abierto (open-source) basada en hardware y software flexibles y fáciles de usar. Está pensado para diseñadores o entornos interactivos. Funciona mediante la recepción de entradas desde una variedad de sensores, motores a pasos, actuadores, motores de cd.



**Figura 2** Microcontrolador Arduino

Fuente: *Arduino*

Para garantizar la correcta configuración de LabVIEW con Arduino se escribe un Sketch, nombre que reciben los programas hechos en Arduino. El cual tiene la finalidad de transmitir un mensaje o dato a través del puerto serie.



**Figura 3** Diagrama de flujo Arduino

Fuente: *Universidad Tecnológica del Valle de Toluca*

**Velocidad de Comunicación**

Como primer punto es importante verificar la compatibilidad entre la comunicación y la velocidad de procesamiento de datos entre los sistemas de programación de cada elemento, se realizan pruebas con diferentes versiones del  $\mu$ c Arduino y su compatibilidad de comunicación con el software labVIEW 2012. Se determina que Arduino 1.0.5-r2 es la versión mas adecuada para emplearse debido a que no presenta errores en la transferencia de datos y enlace, ya que en la actualidad hay mas de 20 diferentes placas oficiales del  $\mu$ c. esto conlleva a tener más de 30 versiones diferentes de su software.

El firmware LIFA en el Arduino procesa los paquetes, y asegura que los datos no se han dañado durante la transmisión. Una vez leídos, comprueba el byte de comando y ejecuta las instrucciones con los bytes de datos proporcionados.

La velocidad de transmisión se establece de manera normal en 115200 bps pero se realizaron pruebas con velocidades de 230400, 460800, 921600 bps. Se observa que en ocasiones el diseño envía un mensaje de error de comunicación en el tiempo de respuesta por lo que la mejor opción, es la velocidad máxima recomendada por el fabricante. Se tiene en cuenta que los resultados obtenidos dependen también del procesamiento de los datos de la PC y sus características técnicas de diseño y fabricación.

### Procesamiento de datos

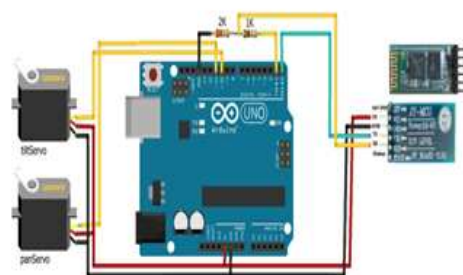
La medida de un fenómeno físico, comienza con un sensor. También llamado un transductor, éste convierte un fenómeno físico en una señal eléctrica que se puede medir. Para este sistema se emplean sensores de posición y desplazamiento como potenciómetros y codificadores angulares integrados en el servo motor.



**Figura 4** Procesamiento de una señal

Fuente: Universidad Tecnológica del Valle de Toluca

La adquisición de los señales de medición se realizan con un transductor por medio del servo motor al  $\mu$ c Arduino, envía estos datos por Bluetooth al módulo HC-05, la velocidad de comunicación del módulo es de 19200 bps.



**Figura 5** Envío de datos

Fuente: Universidad Tecnológica del Valle de Toluca

La PC utilizada en los resultados obtenidos cuenta con un procesador Intel Core i7-7560 (4MB Caché, hasta 3.80 GHz) segunda generación, USB 3.1 (10 Gbps), Tarjeta inalámbrica Killer 1535 Wi-Fi, Bluetooth 4.1, esto proporciona una solución potente, flexible y rentable.

### Accesibilidad

LabVIEW brinda la flexibilidad de un potente lenguaje de programación sin la complejidad de los entornos de desarrollo tradicionales.

- Fácil de Aprender y Usar
- Funcionalidad Completa
- Capacidades de E/S Integradas

En la actualidad las universidades y centros educativos. Cuentan con el equipamiento y la tecnología que permite a investigadores, docentes y alumnos realizar este tipo de estudios.

La existencia de tiendas especializadas, de manera establecida o por internet hace más fácil la adquisición de material y equipo a un costo relativamente accesible para estudiantes e investigadores.

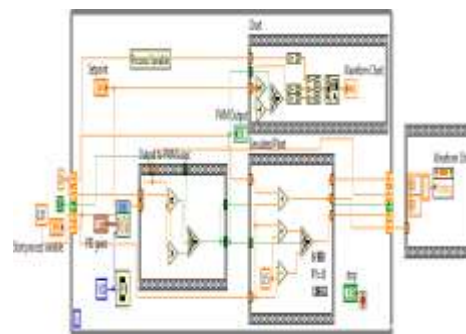
LabVIEW presenta la capacidad de interactuar con otros programas y aplicaciones como:

- Multisim
- Matlab/Simulink
- AutoCAD
- Solidworks
- PLC's
- Adquisición y tratamiento de imágenes
- Tiempo real
- Control de movimiento
- Adquisición de datos

### Metodología

Se realizan tres pruebas a un motor eléctrico de 3 a 6 Vcd, un motorreductor 25D 75:1 de 6 Vcd, y un servomotor SG90 de 6 Vcd.

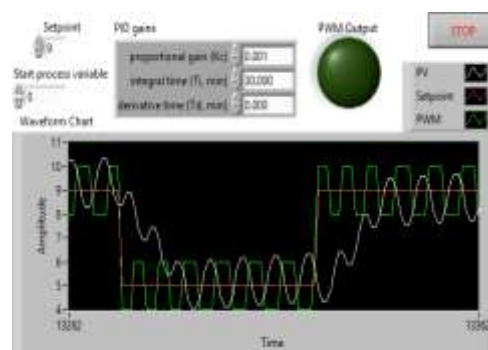
La primera prueba consiste en la aplicación de un control PID y PWM diseñado en LabVIEW para observar su tiempo de respuesta, precisión, posición y Manejo del software. En un motor eléctrico de 3 a 6 Vcd aplicado a una tarjeta de adquisición de datos de National Instruments.



**Figura 6** Control PID y PWM en LabVIEW

Fuente: *Software LabVIEW National Instruments*

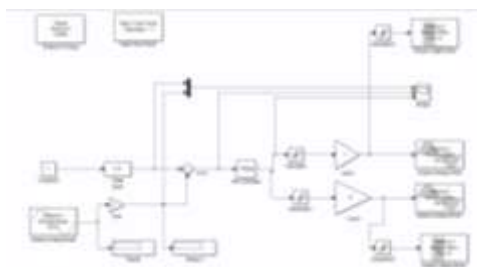
En el gráfico #1 el PID sigue y corrige el error de posición con respecto a la referencia y el PWM controla la velocidad del motor.



**Gráfico 1** Panel frontal en LabVIEW

Fuente: *Software LabVIEW National Instruments*

Para el motorreductor 25D 75:1 se realiza un control PID a través de la plataforma de Matlab, que interactúa con un  $\mu$ c Arduino a través de sus salidas PWM para el control de la velocidad.



**Figura 7** Control PID y PWM en Matlab

Fuente: *Software Matlab/Simulink*

El gráfica #2 muestra el funcionamiento del controlador PID en el cual se tienen dos señales, que siguen a la señal de referencia representada por la línea horizontal mostrada en la gráfica superior.

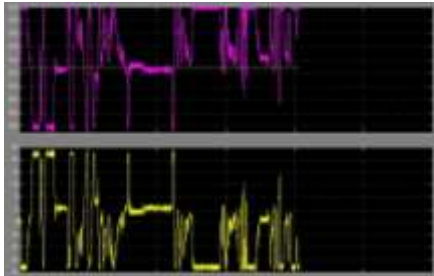


Gráfico 2 Respuesta del control PID en Matlab

Fuente: Software Matlab/Simulink

Para el servomotor SG90 de 6 Vcd se diseñó un control a través de bloques prediseñados especialmente para interactuar con el  $\mu$ c Arduino, con esto la programación se simplifica de manera significativa como se muestra en la figura # 8, 9 y 10.

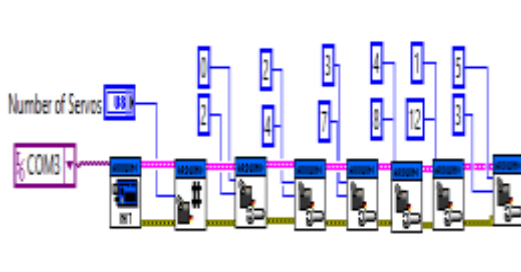


Figura 8 Programación del puerto de comunicación de los servomotores

Fuente: Software LabVIEW National Instruments

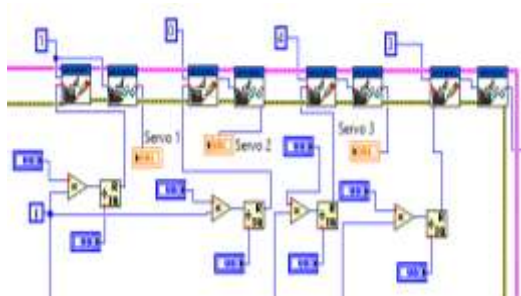


Figura 9 Programación del ángulo de control para servomotores

Fuente: Software LabVIEW National Instruments

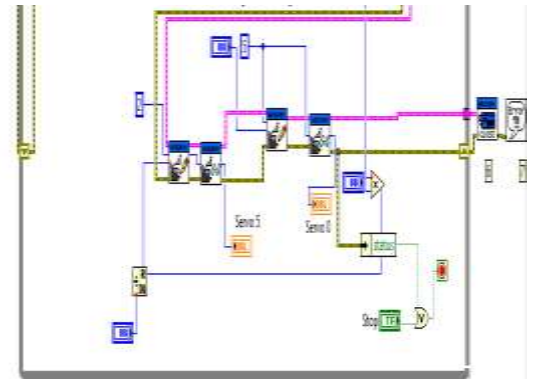


Figura 10 conexión código de error para servomotores

Fuente: Software LabVIEW National Instruments

La interfaz de comunicación LIFA de Arduino con un módulo HC-05 permite a los desarrolladores establecer comunicación con los puertos Visa de LabVIEW, a través del puerto de comunicación Bluetooth de la computadora.

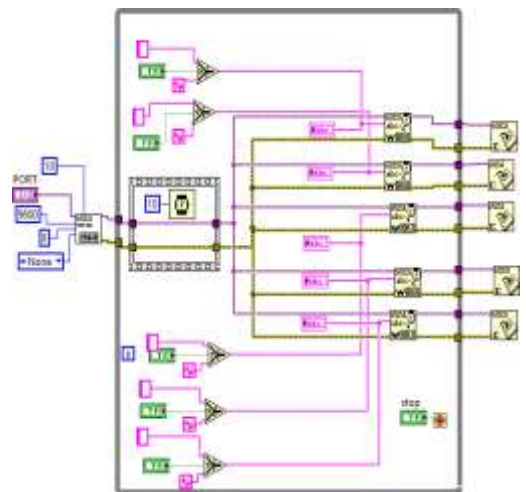
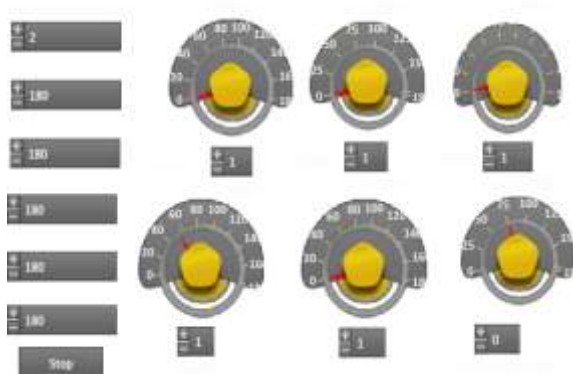


Figura 11 Sistema de comunicación visa

Fuente: Software LabVIEW National Instruments

Como resultado del programa anterior se obtiene un panel frontal, desarrollado con aplicaciones como el módulo de supervisión y control para el desarrollo de un panel de control más interactivo, facilita su uso para personas con poco conocimiento en control.



**Figura 12** Panel frontal de control LabVIEW

Fuente: *Software LabVIEW National Instruments*

## Resultados

Como se puede observar en la siguiente tabla en los dos primeros resultados se diseñó un control moderno basado en un controlador PID con el objetivo de realizar una comparación entre este tipo de control y un control virtual con bloques prediseñados se obtiene lo siguiente.

Motor de CC de 3 a 6 Vcd	
<b>μC Tarjeta de adquisición de datos</b>	<b>Resultados</b>
Tiempo de respuesta	Buena
Velocidad	Excelente
Precisión	Regular
Costo	Alto
Programación y diseño del control	Avanzado
Interfaz Virtual de control	Excelente
Motorreductor 25D 75:1	
<b>μC Arduino</b>	<b>Resultados</b>
Tiempo de respuesta	Excelente
Velocidad	Excelente
Precisión	Buena
Costo	Excelente
Programación y diseño del control	Avanzado
Interfaz Virtual de control	Mala
Servomotor SG90	
<b>μC Arduino</b>	<b>Resultados</b>
Tiempo de respuesta	Excelente
Velocidad	Excelente
Precisión	Excelente
Costo	Excelente
Programación y diseño del control	Intermedio
Interfaz Virtual de control	Excelente

**Tabla 1** Resultados de las pruebas realizadas

Fuente: *Universidad Tecnológica del Valle de Toluca*

## Conclusiones

Se diseñó un control que realiza un movimiento secuencial e independiente de cada articulación de los dedos de la mano a través de una interfaz virtual en LabVIEW, por medio de bloques prediseñados especialmente para interactuar con servomotores, el μC Arduino y el módulo Bluetooth HC-05 a través de la computadora. Aplicado a un primer prototipo construido especialmente para estas pruebas, figura #13.





**Figura 13** Prototipo exoesqueleto

Fuente: *Universidad Tecnológica del Valle de Toluca*

Este tipo de investigación ofrece una base de estudio, tanto a estudiantes, docentes e investigadores interesados en aprender y mejorar el control o diseño. Se tiene como finalidad el área médica y de rehabilitación, sin descartar implementaciones en el sector industrial.

Si bien se realizan pruebas con otros tipos de control, la finalidad de este estudio es la implementación de un control de interfaz virtual a través de una comunicación inalámbrica del software y el  $\mu$ c. Se plantea en un futuro se realizar el análisis de la respuesta del sistema, su estabilidad, y emplear el modelo matemático con herramientas como Matlab/Simulink aplicados a diferentes diseños de exoesqueletos en Solidwork con estudio de elemento finito.

### Agradecimiento

Los autores agradecen a la Universidad Tecnológica del Valle de Toluca y al Cuerpo Académico de Sistemas de Ingeniería y Mantenimiento.

### Referencias

Katsuhiko Ogata Ingeniería del control moderna 5 edición, Ed. Pearson Cap.2, 8

Dorf, R.C.y Bishop, R.H. (2005). Sistemas de Control Moderno 10 ma. Edición, Ed. Pearson Educación.

Gonnet, S. and Chiotti, O., Modeling of the Supervising

Control System of a Multipurpose Batch Plant. Computers & Chemical Engineering, Vol. 21, pp. S691-S696, 1997.

Castillo, I. and Roberts, C.A. Real time control scheduling for multipurpose batch plants. Computers and

Industrial Engineering, 41, pp. 211 – 225, 2001

Chou, W., Wang, T. y Xiao, J. (2004). Haptic interaction with virtual environment using an arm type exoskeleton device, 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1992-1997.

Gupta, A. y O'Malley, M. K. (2006). Design of a haptic arm exoskeleton for training and rehabilitation, IEEE/ASME Transactions Mechatronics. 11, 280–289.

Gutiérrez, R., Vanegas, F. Avilés, O. y Niño, P. (2005). Prototipo Exoesqueletico para Rehabilitación de Miembro Superior, CE-NIDET, 2-6.

Hogan, N. Krebs, H.I. Charnnarong, J. Srikrishna, P. Sharon, A. (1992). MIT MANUS: A Workstation for Manual Training I, IEEE International Workshop on Robot and Human Communication, 161-165.

Hibbler, R. C. (2006). Mecánica de Materiales. México. Prentice Hall, 877-879.

Mihelj M. Nef. y Riener R. (2007). ARMin II–7 DoF rehabilitation robot: mechanics and kinematics. 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation. 4120-4125.

Li Y. Heong A. K. y Chong G. C. Y. (2006). PID Control System Analysis and Design. Problems, remedies and future directions. IEEE Control Systems Magazine. Febrero. Vol. 26 No. 1, pp. 32-41, 120.

LabVIEW entorno gráfico de programación 2 edición Ed. Marcombo, José Rafael Lajara Vizcaíno

Manual LabVIEW Core I y Core II National Instruments

LabVIEW entorno de programación versión 8.2, José Rafael Lajara Vizcaíno

Antúnez F, M. E., & Balcázar, A. (2000). Diagnóstico sobre Discapacidad en México. Recuperado el 2014

Durán, A.C.M., Miranda, R.A. (2012). Comunicación inalámbrica basada en tecnología Bluetooth para la automatización de procesos industriales, Revista el Hombre y la Máquina, 39, 26-32 Aunque se presenta un caso de estudio, es necesario el incrementar el número de personas, con la finalidad de validar los resultados obtenidos, además de buscar otra forma de medir con mayor precisión las masas de las extremidades y sus elementos.