

Control *Wavenet* para un sistema HRpI CyberForce: Teoría y Experimentos

Juan Daniel Ramírez Zamora^a, Omar Arturo Domínguez Ramírez^{a,*}, Luis Enrique Ramos Velasco^b

^aÁrea Académica de Computación y Electrónica
Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería

Centro de Investigación en Tecnologías de Información y Sistemas

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Carr. Pachuca - Tulancingo Km. 4.5, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México

^bUniversidad Politécnica Metropolitana de Hidalgo, Boulevard Acceso a Tolcayuca 1009, Ex Hacienda San Javier, 43860 Tolcayuca, Hgo.

Resumen

Los sistemas de interacción física hombre-robot (HRpI), corresponden a plataformas ideadas para la transmisión de conocimiento, a partir del contacto kinestésico entre un humano, y un dispositivo robótico con dinámica inercial y tribológica baja o nula. La dinámica de contacto, para el sistema robótico, representa modificación a las fuerzas inerciales, gravitacionales y tribológicas (fricción y vibraciones mecánicas); lo que constituye incertidumbre en la cooperación dado que el operador humano responde de manera distinta en distintos eventos experimentales. Por lo que las estrategias de control de robot, son notablemente insuficientes con sistemas de estabilización clásica (control PID convencional), o bien controles no lineales robustos que no experimentan cambios en las ganancias de control en función de la dinámica de interacción. En este trabajo de investigación, se propone el diseño e implementación de un control *Wavenet* (Control PID discreto asistido con redes neuronales *wavelet* de segunda generación como esquema de identificación) y evaluado por primera vez en un dispositivo mayordomo de altas prestaciones tecnológicas (*CyberForce*) ideado para el posicionamiento de un exoesqueleto *CyberGrasp* con el operador humano en el lazo, es importante mencionar que la selección del dispositivo háptico se realizó con base al espacio de trabajo, al análisis de manipulabilidad y características de par de los actuadores, ya que permiten desempeñar tareas de guiado háptico en todo el miembro superior.

Palabras Clave: CyberForce, Interfaz háptica, Guiado háptico, Planificación de movimiento, Control PID discreto, Control *Wavenet*, Redes neuronales.

1. Introducción

En la práctica de la ingeniería comúnmente existe la necesidad de llevar un sistema físico hasta un punto determinado con cierto grado de precisión. Un sistema de control es el conjunto de técnicas y herramientas que guían un sistema físico hasta las condiciones deseadas. Dentro de la vida cotidiana son cada vez más los aspectos en que se han visto involucrados los sistemas de control, ya sea en la producción industrial, sistemas de transporte, líneas de ensamble, sistemas de seguridad, etc. En algunos de éstos, la precisión y certidumbre de los procesos realizados es de vital importancia, y en ellas el control juega un papel fundamental. El fundamento del control automático consiste en calcular una acción correctiva, u en función del error,

e que se define como la diferencia entre la salida actual de la planta, y y de la salida deseada, y_{ref} . Esto se conoce como control realimentado y está conformado por tres bloques básicos: un proceso, planta o sistema a controlar, un sensor y un controlador Ogata (1998), como se muestra en la Figura 1.

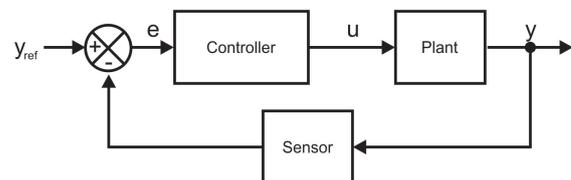


Figura 1: Sistema de control en lazo cerrado.

El presente trabajo propone el desarrollo e implementación de un controlador tipo PID discreto (Aström (1997), Kuo (1995), Ogata (1995)) sintonizado empleando una red *wavenet*. Las redes *wavenet* se han utilizado con anterioridad para aproximación de funciones e identificación de procesos cuyo modelo matemático que describe el comportamiento del proceso es desconocido. En trabajos previos (Cruz-Tolentino et al. (2012),

* Autor en correspondencia.

Correos electrónicos: juandaniel_ramirez@uaeh.edu.mx (Juan Daniel Ramírez Zamora), omar@uaeh.edu.mx (Omar Arturo Domínguez Ramírez), lramosvelasco@hotmail.com (Luis Enrique Ramos Velasco)

URL: www.uaeh.edu.mx (Juan Daniel Ramírez Zamora), www.uaeh.edu.mx (Omar Arturo Domínguez Ramírez)

Díaz-López et al. (2013), Domínguez-Mayorga et al. (2012) y Ramos-Velasco et al. (2013)) se han empleado algoritmos *wavenet* para sintonizar controladores en plantas con modelos no lineales.

El propósito de utilizar un PID *wavenet* es que las ganancias K_p , K_i y K_d del PID se auto-ajusten a posibles cambios de la planta. Un método autosintonizado es una consideración importante de diseño de sistemas para construir controles adaptables de un sistema desconocido que varía lentamente. La idea básica en el control adaptable es estimar los parámetros desconocidos de la planta y correspondientemente ajustar en línea los parámetros del controlador, basados en las señales medidas del sistema, empleando los parámetros estimados en el cálculo de la entrada de control Sastry and Bodson (1989-1994).

2. Dispositivo háptico CyberForce

El sistema mayordomo - exoesqueleto (CyberTeam), es constituido de un mecanismo de eslabones articulados de 6 grados de libertad (CyberForce) que garantiza el posicionamiento y orientación de un exoesqueleto de 5 grados de libertad (CyberGrasp) empleado en tareas de manipulación en ambientes virtuales dinámicos deformables, para ello emplea como retroalimentación con un guante de 22 sensores de fibra de carbono (CyberGlove) para medición de flexión-extensión y aducción-abducción de falanges.



Figura 2: Dispositivo háptico CyberTeam.

3. Desarrollo de un control PID wavenet

El control PID *wavenet* está conformado por tres bloques funcionales principales: el controlador PID, la red neuronal *wavenet* y el algoritmo de sintonización. El controlador es un PID discreto que genera la señal de control que lleva la planta hasta la referencia, y reduce el efecto de perturbaciones en el ciclo de control principal. La red neuronal *wavenet* se encarga de aproximar localmente el comportamiento de la planta desconocida, y genera una señal de estimación de la salida de la planta. El algoritmo de sintonización, a través de un algoritmo de minimización del error, calcula los nuevos valores para las ganancias del controlador y los parámetros de la red neuronal.

3.1. Autosintonización de un PID mediante una red wavenet

Los enfoques de control adaptables tradicionales son limitados en lo que respecta a no poder tratar con sistemas no lineales complejos. Típicamente, estas técnicas suponen que el modelo de control está operando en una región lineal. Los parámetros del modelo de la planta linealizada son calculados recursivamente y usados para actualizar el controlador. En general, el diseño de un controlador basado en el análisis matemático para tales plantas que constan de la no linealidad e incertidumbres, es muy complicado. El problema empeora cuando las funciones que describen la planta son desconocidas y variantes en el tiempo. Tales problemas de control adaptable no lineal variantes en el tiempo no lineales están surgiendo con una frecuencia creciente en la tecnología de hoy. Por esto es importante desarrollar una técnica eficaz en la que la estructura de los modelos desconocidos de la planta ya sea lineales o no lineales pueden ser identificados como un proceso adaptable; y los controladores tienen que ser diseñados para actuar rápidamente, con exactitud y en un modo estable Díaz-López et al. (2013).

3.2. Esquema de identificación wavenet y sintonización del PID

El esquema de identificación *wavenet* y sintonización se muestra en la Figura 3. En él se pueden identificar las tres etapas que manipulan la salida del sistema dinámico MIMO no lineal: identificación, autosintonización y control PID. En la Tabla 1 se muestran las distintas variables que intervienen en cada etapa, las cuales se describen a continuación:

Tabla 1: Variables que intervienen en cada una de las etapas.

$y_{ref}(k)$	Referencia deseada
$e(k)$	Error de seguimiento
$u_c(k)$	Señal de control del PID
$u_h(k)$	Señal de control del usuario
$u(k)$	Señal de control total
$r(k)$	Señal de ruido
$y(k)$	Salida de la planta
$\hat{y}(k)$	Salida estimada
$e(k)$	Error de estimación
$v(k)$	Señal de persistencia

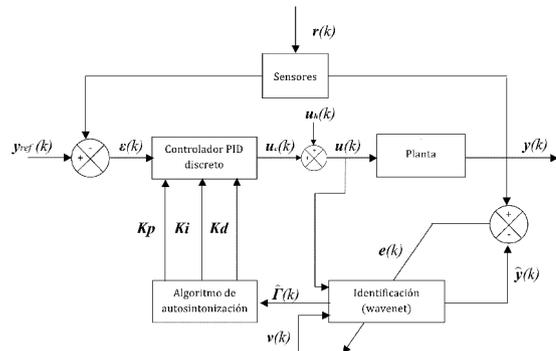


Figura 3: Diagrama a bloques del controlador PID auto-sintonizable.

3.2.1. Identificación del sistema

El proceso de identificación se hace mediante una red neuronal de base radial en la que las funciones de activación $\psi(\tau)$ son funciones *wavelets* hijas $\psi_l(\tau_l)$ del tipo RASP1, la selección de dicha *wavelet* se debe principalmente a la sencillez para ser programada. Además, cuenta en cascada con p filtros IIR (Filtro de respuesta infinita - Sistemas Auto-regresivos) que tienen como función filtrar (podar) las neuronas que tienen poca contribución en el proceso de identificación, permitiendo con esto reducir el número de iteraciones en el proceso de aprendizaje Haykin (2001). Estos dos elementos se pueden ver en las Figuras 4 y 5, respectivamente.

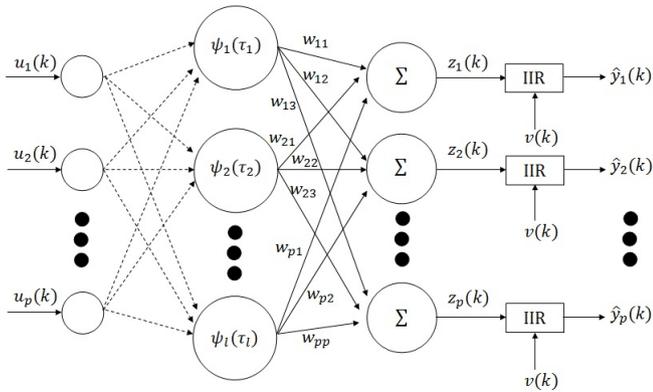


Figura 4: Diagrama de la red neuronal *wavenet*, donde $\tau_l = \frac{\|u(k) - b_l\|}{a_l}$ Daubechies (1992)

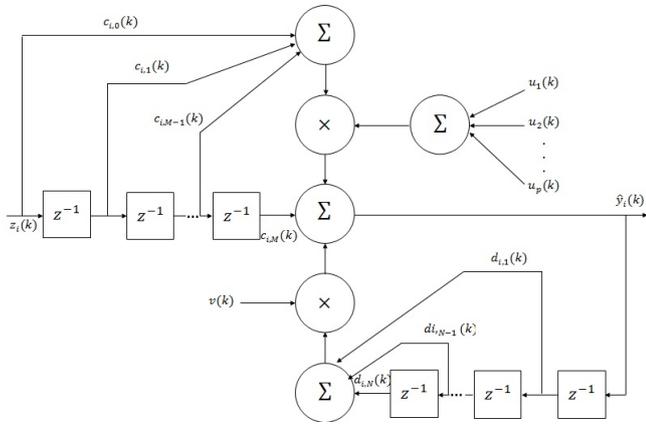


Figura 5: Estructura del filtro IIR. Daubechies (1992)

En el caso de una red neuronal multivariable, se propone:

$$\tau_{l_j} = \left(\sum_{j=1}^p (u_j - b_{l,j})^2 \right)^{1/2} / a_{l_j} \quad (1)$$

donde a_{l_j} es la j -ésima variable de escala, que permite dilataciones y contracciones, $b_{l,j}$ es el (l, j) -ésimo elemento de traslación, que permite desplazamientos en el instante k . La representación matemática de la *wavelet* RASP1 está dada por Daubechies (1992):

$$\frac{\tau}{(\tau^2 + 1)^2} \quad (2)$$

donde su derivada parcial con respecto a b es:

$$\frac{1}{a} \frac{3\tau^2 - 1}{(\tau^2 + 1)^3} \quad (3)$$

La i -ésima señal de aproximación de la *wavenet* con filtro IIR $\hat{y}_i(k)$ puede ser calculada como:

$$\hat{y}_i(k) = \sum_{q=1}^p \sum_{l=0}^M c_{i,l} z_i(k-l) u_p(k) + \sum_{j=1}^N d_{i,j} \hat{y}_i(k-j) v(k) \quad (4)$$

donde

$$z_i(k) = \sum_{l=1}^L w_{i,l} \psi_l(k) \quad (5)$$

L es el número de *wavelets* hijas, $w_{i,l}$ son los pesos de cada neurona en la *wavenet*, $c_{i,i}$ y $d_{i,j}$ son los coeficientes de adelanto y atraso del filtro IIR, respectivamente. M y N representan el número de los coeficientes de adelanto y atraso del mismo filtro, respectivamente. Los parámetros de la *wavenet* son optimizados por medio de un algoritmo de aprendizaje basado en mínimos cuadrados medios (LMS), tras minimizar las funciones de costo de \mathbf{E} , definidas como:

$$\mathbf{E} = [E_1 \quad E_2 \quad \dots \quad E_i \quad \dots \quad E_p]^T \quad (6)$$

para el caso particular de la i -ésima salida se tiene que E_i está dado por:

$$E_i = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^T e_i^2(k) \quad (7)$$

donde el error de estimación $e_i(k)$ se define como la diferencia entre la salida de la *wavenet* con filtro IIR $\hat{y}_i(k)$ y la salida real del sistema $y_i(k)$, es decir:

$$e_i(k) = y_i(k) - \hat{y}_i(k) \quad (8)$$

Para minimizar \mathbf{E} se aplica el método del descenso más pronunciado (steepest decent), para el cual se requiere el cálculo de los gradientes: $\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial \mathbf{A}(k)}$, $\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial \mathbf{B}(k)}$, $\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial \mathbf{W}(k)}$, $\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial \mathbf{C}(k)}$, $\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial \mathbf{D}(k)}$, para actualizar los cambios incrementales de cada parámetro en particular y que para cada coeficiente se define como el negativo de sus gradientes.

3.2.2. Auto-sintonización

Como las ganancias de los controladores $k_{p_\sigma}(k)$, $k_{i_\sigma}(k)$ y $k_{d_\sigma}(k)$ fueron consideradas en la función de costo \mathbf{E} pueden ser actualizadas de la siguiente forma

$$\begin{aligned} k_{p_\sigma}(k) &= k_{p_\sigma}(k-1) + \mu_p e_\sigma(k) \hat{\Gamma}_{i,q}(k) [\varepsilon_\sigma(k) - \varepsilon_\sigma(k-1)] \\ k_{i_\sigma}(k) &= k_{i_\sigma}(k-1) + \mu_i e_\sigma(k) \hat{\Gamma}_{i,q}(k) \varepsilon_\sigma(k) \\ k_{d_\sigma}(k) &= k_{d_\sigma}(k-1) + \mu_d e_\sigma(k) \hat{\Gamma}_{i,q}(k) \\ &\quad [\varepsilon_\sigma(k) - 2\varepsilon_\sigma(k-1) + \varepsilon_\sigma(k-2)] \end{aligned}$$

donde $\hat{\Gamma}_{i,q}(k)$ es el elemento (i, q) de la matriz $\hat{\Gamma}$ de la identificación del sistema. Las constantes μ son las tasas de aprendizaje de las ganancias del controlador PID.

4. Planificación de movimiento

La tarea $T_{DH}(t)$, como consigna de movimiento aplicada al dispositivo háptico, es constituida por tres trayectorias; $T_{DH-1}(t)$ corresponde a la regulación basada en seguimiento operacional, con el propósito de resolver la dinámica inercial debido al estado de reposo y de movimiento, así como establecer un tiempo de convergencia t_{b1} . La trayectoria $T_{DH-2}(t)$, corresponde al lugar geométrico de una circunferencia (Ecuación 9), con un tiempo de duración $T_{C2} = 2\pi/\omega$; con ω como la velocidad angular, r el radio, $[X_c, Y_c, Z_c]$ el centro de la circunferencia y $T_{Cn} = t_{bn} - t_{bn-1}$ es el tiempo de convergencia de la n -ésima trayectoria de $T_{DH}(t)$. $T_{DH-3}(t)$ corresponde a la regulación basada en seguimiento hasta la condición inicial de la tarea.

$$T_{DH}(t) = \begin{cases} T_{DH-1}(t) & ; t_{b0} \leq t \leq t_{b1} \\ T_{DH-2}(t) & ; t_{b1} < t \leq t_{b2} \\ T_{DH-3}(t) & ; t_{b2} < t \leq t_{b3} \end{cases}$$

$$\begin{bmatrix} X_d(t) \\ Y_d(t) \\ Z_d(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_c + r \cos(\omega t) \\ Y_c \\ Z_c + r \sin(\omega t) \end{bmatrix} \quad (9)$$

Las trayectorias $T_{DH-1}(t)$ y $T_{DH-3}(t)$, son definidas por el polinomio de la Ecuación 10, con un tiempo base T_{Cn} ; y corresponde a la trayectoria de seguimiento operacional o articular de acuerdo a la ley de control aplicada, con una conducta suave que limita esfuerzos electromecánicos del mecanismo de eslabones articulados, y garantiza convergencia en tiempo finito. Su derivada $\dot{\xi}_n(t)$ contribuye a que la velocidad en el tiempo de convergencia sea cero, y cuyo valor máximo sea en la mitad de dicho tiempo.

$$\xi_n(t) = 10 \frac{(t - t_{bn-1})^3}{T_{Cn}^3} - 15 \frac{(t - t_{bn-1})^4}{T_{Cn}^4} + 6 \frac{(t - t_{bn-1})^5}{T_{Cn}^5} \quad (10)$$

Dada la planificación de movimiento en el espacio operacional, las trayectorias que involucran a la regulación basada en seguimiento son descritas como:

- $T_{DH-1}(t) : \{(X_c + r)\xi(t), Y_c\xi(t), Z_c\xi(t)\}$ en $t_{b0} \leq t \leq t_{b1}$
- $T_{DH-3}(t) : \{X_0\xi(t), Y_0\xi(t), Z_0\xi(t)\}$ en $t_{b2} < t \leq t_{b3}$

4.1. Resultado experimental en seguimiento pasivo

4.2. Circunferencia

La Tabla 4.2, contiene los parámetros numéricos requeridos para la tarea de seguimiento $T_{DH}(t)$ y las ganancias de control.

Parámetro	Valor
K_θ	[75,75,75]
α_θ	[0.01,0.01,0.01]
K_x	[300,300,300]
α_x	[0.01,0.01,0.01]
t_{b0}	0 s
t_{b1}	8 s
t_{b2}	24 s
t_{b3}	32 s
r	0.1 m
$[X_c, Y_c, Z_c]$	[0,0.508,0.235] m
$[X_0, Y_0, Z_0]$	[0,0.506,0.492] m

La trayectoria generada en la sección 4 se muestra en la Figura 6:

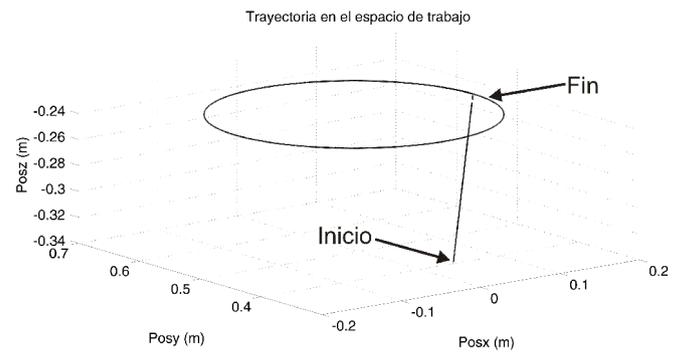


Figura 6: Tarea compuesta en el espacio de trabajo.

Se realizó la comparación del desempeño del control PID *wavenet* con y sin el usuario en el lazo a partir del tiempo de convergencia a la trayectoria deseada, comparación del error de posición, el par de entrada global, medición de la energía total, autosintonización de ganancias k_p, k_d, k_i y la misma posición inicial.

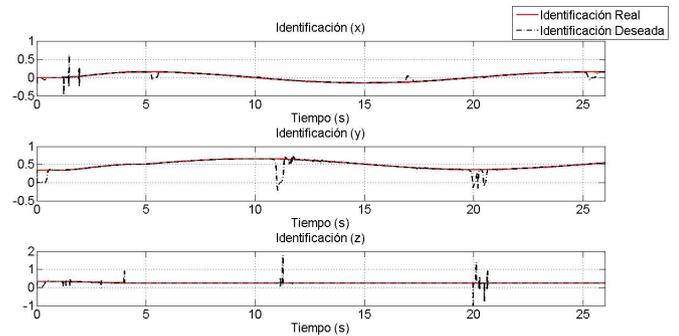


Figura 7: Identificación del sistema sin usuario.

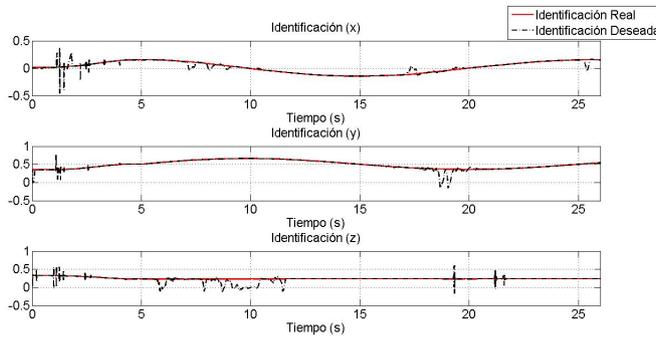


Figura 8: Identificación del sistema con usuario.

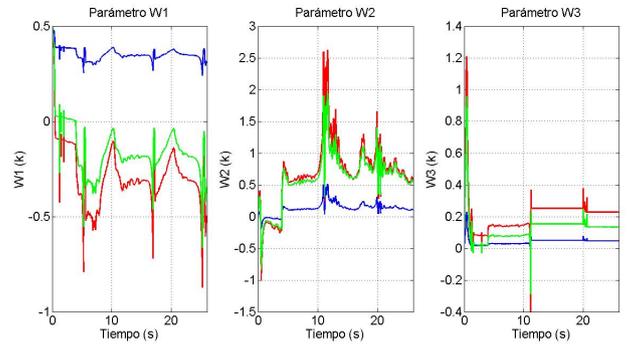


Figura 11: Evolución de los pesos de la red neuronal sin usuario.

Se puede observar que tanto en la gráfica 7 que corresponde a la identificación del sistema sin el usuario en el lazo y la gráfica 8 que corresponde a la identificación del sistema con el usuario en el lazo se obtiene una respuesta favorable en esta etapa.

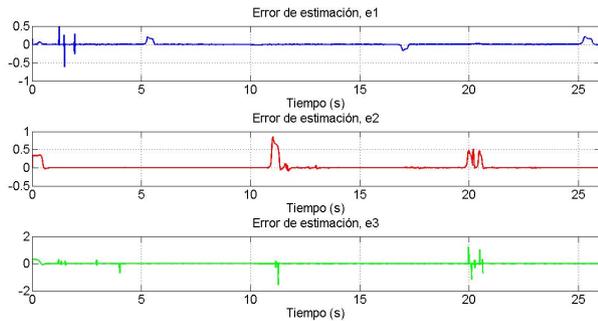


Figura 9: Errores de estimación en la identificación sin usuario.

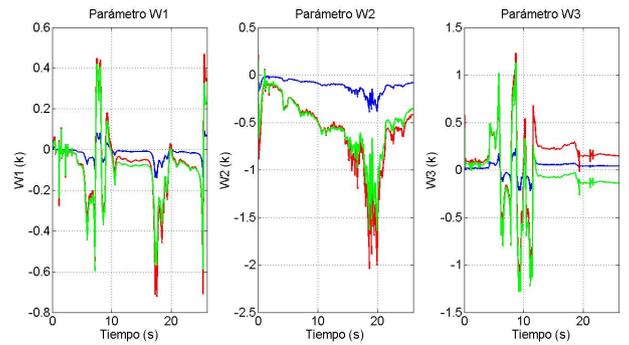


Figura 12: Evolución de los pesos de la red neuronal con usuario.

En las Figuras 11, 12 se presenta el comportamiento evolutivo de los parámetros de la red neuronal, se puede observar que debido a acoplamiento del usuario en el sistema CyberForce los parámetros se adaptan al cambio de la dinámica del dispositivo.

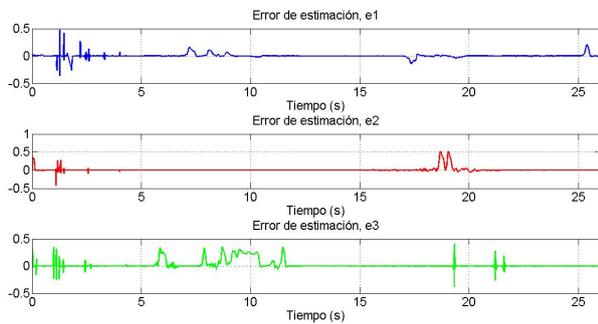


Figura 10: Identificación del sistema con usuario con usuario.

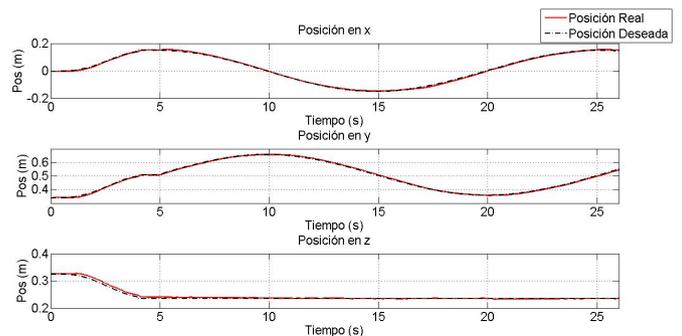


Figura 13: Posición cartesiana sin usuario en el lazo

En la Figura 9 y 10 se aprecian los errores de estimación de cada una de las señales identificadas.

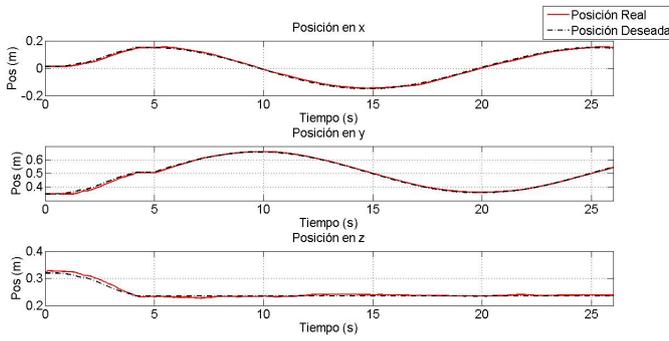


Figura 14: Posición cartesiana con usuario en el lazo

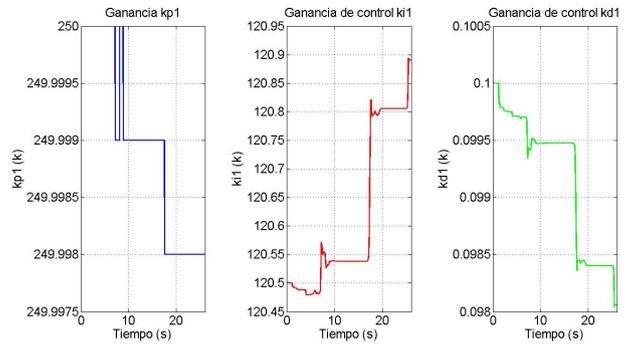


Figura 18: Ganancias del controlador PID para la 1er articulación con usuario en el lazo

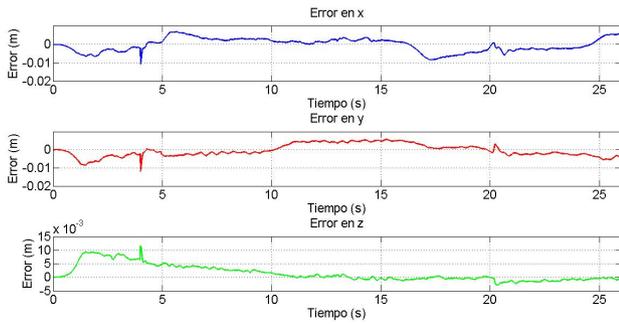


Figura 15: Errores de seguimiento sin usuario en el lazo

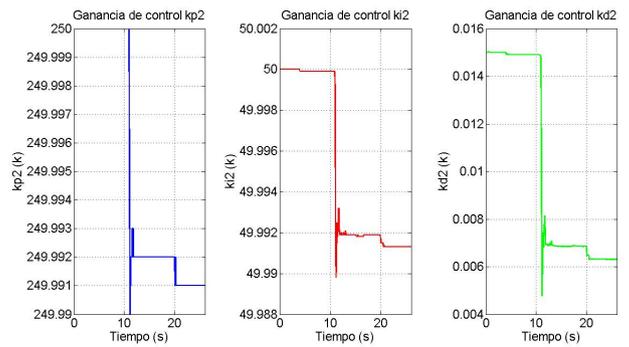


Figura 19: Ganancias del controlador PID para la 2da articulación sin usuario en el lazo

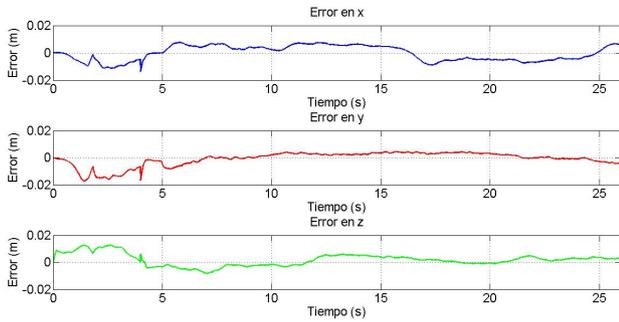


Figura 16: Errores de seguimiento con usuario en el lazo

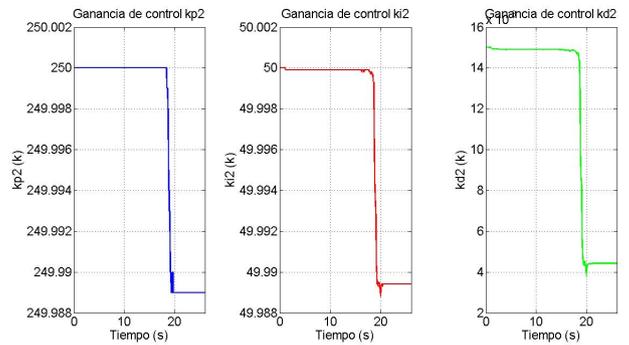


Figura 20: Ganancias del controlador PID para la 2da articulación con usuario en el lazo

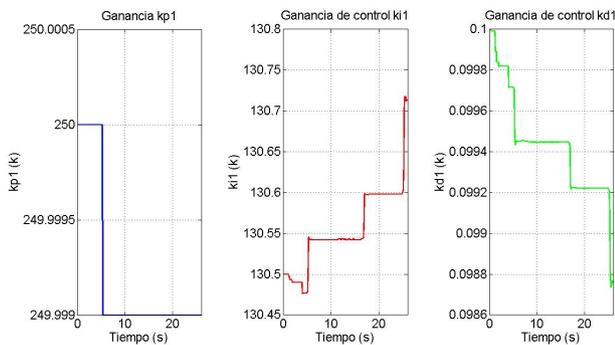


Figura 17: Ganancias del controlador PID para la 1er articulación sin usuario en el lazo

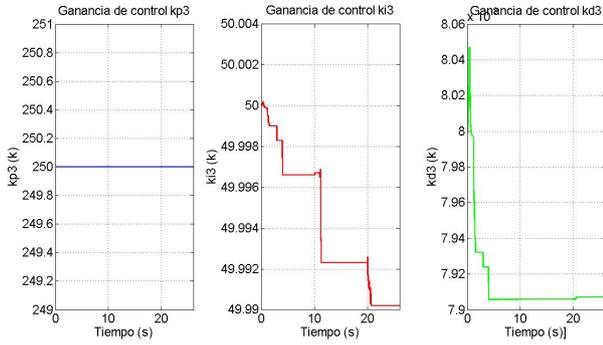


Figura 21: Ganancias del controlador PID para la 3er articulación sin usuario en el lazo

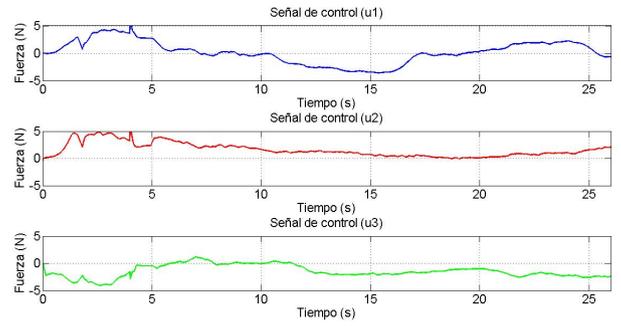


Figura 24: Señales de control con usuario en el lazo

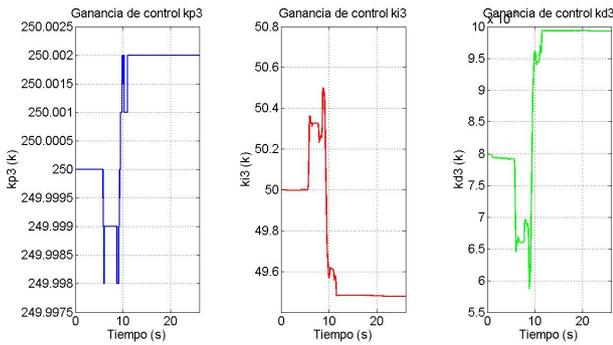


Figura 22: Ganancias del controlador PID para la 3er articulación con usuario en el lazo

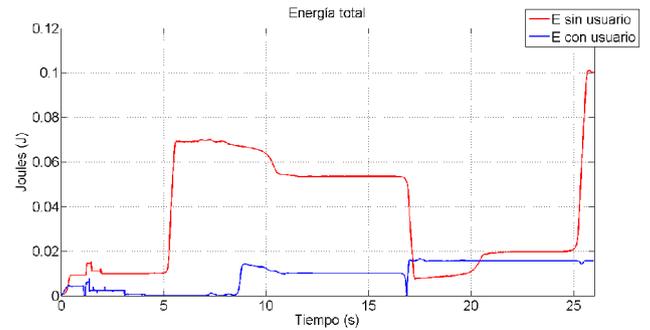


Figura 25: Energía total.

Las Figuras 17, 18, 19, 20, 21 y 22 muestran la evolución de las ganancias de el controlador PID *wavenet*, se puede observar que debido a acoplamiento del usuario en el sistema *CyberForce* las ganancias calculadas en línea se adaptan a las incertidumbres que genera el usuario, llevando de manera favorable el dispositivo a la referencia.

5. Resultados de interfaz hombre-robot

En esta sección se verificaran las condiciones de control y planificación de movimiento con base en la antropometría y espacio de trabajo humano en el lazo de control, y verificar los límites de operación con alta manipulabilidad para garantizar alto desempeño en condiciones de incertidumbre de carga (presencia de operador humano con limitación biomecánica o movimiento involuntario).

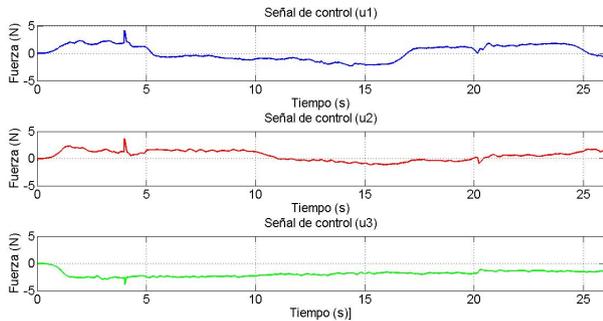


Figura 23: Señales de control sin usuario en el lazo

Se implementará un método para el análisis de la energía, con el propósito de verificar el intercambio de energía y beneficios de entrenamiento y fisioterapia asistida.

$$E = \int_0^t F \dot{x} dt \tag{11}$$

Donde E es la energía de intercambio, $F \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ corresponde al vector de fuerza aplicada en el efector final del dispositivo *CyberForce* y $\dot{x} \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ corresponde al vector de velocidades operacionales.

Para el desarrollo de las pruebas se utiliza la misma trayectoria propuesta en la sección anterior (sección 4)

5.1. Resultados obtenidos con usuarios



Figura 26: Usuario 1.

Nombre:	Carlos Ernesto López Padilla
Edad:	19
Ocupación	Estudiante
Carrera:	Ing. en Informática
Cuatrimestre:	5



Figura 28: Usuario 3.

Nombre:	Jose Luis Acosta García
Edad:	20
Ocupación	Estudiante
Carrera:	Ing. en Informática
Cuatrimestre:	5



Figura 27: Usuario 2.

Nombre:	Gerardo Martínez Terán
Edad:	25
Ocupación	Estudiante
Carrera:	Maestría en Mecatrónica
Cuatrimestre:	5



Figura 29: Usuario 4.

Nombre:	Jose Luis Valdez Verdin
Edad:	19
Ocupación	Estudiante
Carrera:	Ing. en Mecatrónica
Cuatrimestre:	5

5.2. Comparativa de parámetros del esquema de control con usuario y sin usuario en el lazo

En la siguiente sección se muestra una comparación de desempeño en la tarea de guiado háptico con diferentes usuarios en el lazo, tomando en cuenta la actualización de los parámetros de la red neuronal (**A**, **B**, **W**), el filtro IIR (**C**, **D**) y las ganancias (**K_p**, **K_i**, **K_d**) del controlador PID discreto de los diferentes experimentos realizados, se utilizó la misma planificación de movimiento y los mismos valores iniciales en las tareas de guiado

háptico pasivo sin usuario y con diferentes usuarios en el lazo.

El diagrama de la identificación y control propuesto a base de un PID discreto *Wavenet* cumple el cometido dado que para diferentes usuarios en el lazo, la convergencia (Figura 31) no se aprecia afectada ante los cambios de fuerza resultante (Figura 30) y energía utilizada (Figura 32) en el dispositivo para estabilizar al humano, ni ante los diferentes parámetros de la red neuronal y el filtro IIR generados por cada usuario.

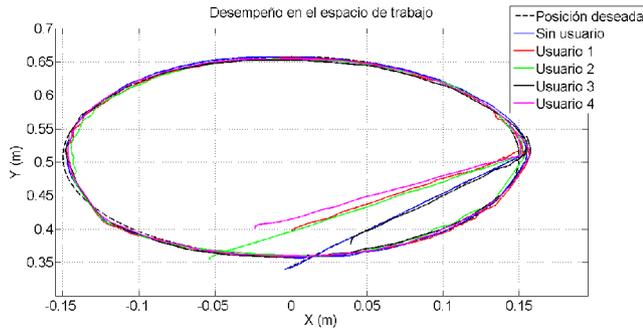


Figura 30: Comparación de trayectorias generadas sin y con usuarios en el lazo.

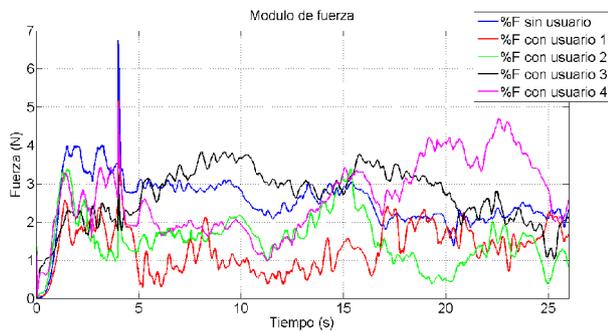


Figura 31: Señal total de fuerza sin y con usuarios en el lazo.

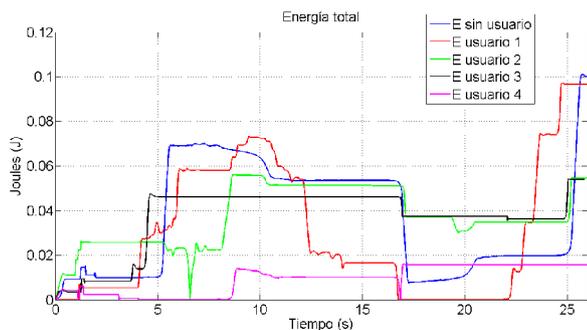


Figura 32: Energía total sin y con usuarios en el lazo.

6. Conclusiones

La descripción con relación a un sistema PID adaptable basado en identificación del modelo a través de redes neurona-

les y teoría *wavenet* presenta una posibilidad para la aplicación en sistemas de HRpI de forma activa, pasiva e interacción virtual en las cuales las contribuciones son: convergencia en movimiento y fuerza aproximadas a sistemas con controles basados en la dinámica, identificación de la planta y adaptabilidad. El uso de controles adaptables indirectos contribuyen a: identificación de la planta en base a la entrada-salida de la misma, adaptabilidad en condiciones de incertidumbre, actualización en tiempo real de las ganancias del controlador y específicamente en controladores PID *wavenet* para actualización de parámetros de la red neuronal, filtro IIR y coeficientes de adelanto y a trazó de la función de activación *wavelet*.

El planteamiento desarrollado en este trabajo de investigación, permite abrir posibilidades de aplicación de distintas estrategias de diagnóstico y rehabilitación de pacientes con discapacidad (movimiento involuntario o espástico) en miembro superior, así como contribuciones en inmersión virtual, y teleoperación de sistemas robóticos con dinámicas conocidas a partir de sistemas de identificación de parámetros, con fines de reconstrucción de dinámica para la HRpI en el dispositivo *CyberForce*.

English Summary

Control Wavenet para un sistema HRpI *CyberForce*: Teoría y Experimentos

Abstract

The human-robot physical interaction systems (HRpI), are experimental platforms designed for the transmission of knowledge based on kinesthetic contact between a human operator and a robotic device with inertial dynamic and joint friction low. The robotic system dynamic (inertial, gravitational and tribology forces) represent uncertainty in the cooperative scheme in the physical interaction and, the human operator responds differently in different experimental events. In a passive haptic guidance scheme, the robot control strategies are remarkably insufficient when the stabilization classical systems are used (conventional PID control). In this research work, the design and implementation of a *wavenet* control (PID control based on wavelet theory and neural networks, with purpose to compute the joint velocity filter and identification scheme) are presented. *Cyberforce* haptic device with the human operator in the loop is used as an experimental platform with high performance.

Keywords:

CyberForce, Haptic Interface, Haptic Guidance, Motion Planning, Discrete PID Control, *Wavenet* Control, Neural Networks.

Referencias

Aström, K., 1997. *Computer-Controlled Systems, Theory and Design*. Prentice-Hall.

- Cruz-Tolentino, J., Jarillo-Silva, A., Ramos-Velasco, L., Domínguez-Ramírez, O., 2012. Wavelet PID and Wavenet PID: Theory and Applications, PID Controller Design Approaches - Theory, Tuning and Application to Frontier Areas, Dr. Marialena Vagia (Ed.), ISBN: 978-953-51-0405-6, InTech.
- Daubechies, I., 1992. Ten Lectures on Wavelets. SIAM.
- Díaz-López, F., Ramos-Velasco, L., Domínguez-Ramírez, O., Parra-Vega, V., 2013. Multiresolution wavenet pid control for global regulation of robots. 9th Asian Control Conference (ASCC 2013) at Istanbul, Turkey.
- Domínguez-Mayorga, C., Espejel-Rivera, M., Ramos-Velasco, L., Ramos-Fernández, J., Escamilla-Hernández, E., 2012. Algoritmos wavenet con aplicaciones en la aproximación de señales: un estudio comparativo. *Revista Iberoamericana Automática e Informática (RIAI)*, ISSN:1697-7912, Vol. 09, <http://dx.doi.org/10.1016/j.riai.2012.09.001>, 347–358.
- Haykin, S., 2001. Kalman Filtering and Neural Networks. Wiley.
- Kuo, B., 1995. Digital Control Systems. Oxford University Press.
- Ogata, K., 1995. Discrete-Time Control Systems. Prentice-Hall.
- Ogata, K., 1998. Ingeniería de Control Moderna. Prentice-Hall, New York.
- Ramos-Velasco, L., Ramos-Fernández, J., Islas-Gómez, O., García-Lamont, J., Espejel-Rivera, M., Márquez-Vera, M., 2013. Identificación y control wavenet de un motor de ca. *Revista Iberoamericana Automática e Informática (RIAI)*, Elsevier, ISSN:1697-7912.
- Sastry, S., Bodson, M., 1989-1994. Adaptive Control: Stability, Convergence, and Robustness. Prentice-Hal.