



# IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO  
DOCENTE  
DEL ÁREA  
MECÁNICA  
DE LAS  
INGENIERÍAS

FoDAMI

## MODELACIÓN LINEAL Y NO LINEAL DE UNA VÁLVULA NEUMÁTICA PARA SU APLICACIÓN EN BIOMECATRÓNICA

Silvia E. Rodrigo<sup>1\*</sup>, Claudia N. Lescano<sup>1,2</sup>, Carina V. Herrera<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Gabinete de Tecnología Médica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de San Juan San Juan, Argentina. Av. San Martín 1109 (oeste), CP 5400, Capital, San Juan, Argentina correo-e: srodrigo@gateme.unsj.edu.ar.

<sup>2</sup> CONICET: Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas

### RESUMEN

Este trabajo describe la dinámica de una válvula reguladora de presión proporcional (VRPP), con vistas a su aplicación para el control de un músculo artificial neumático (PAM), que será utilizado como elemento activo de una órtesis robótica para rehabilitación de la marcha humana.

Con el fin de identificar tal dinámica en base a modelos lineales y no lineales, se registraron experimentalmente datos de entrada y salida de la válvula analizada. Luego de calibrar los instrumentos de medición y acondicionar las señales obtenidas, se logró como primera aproximación un modelo lineal de tercer orden sin retardo, que relaciona la presión de salida de la VRPP con su tensión de referencia. En la segunda etapa se empleó un modelo no lineal serie-paralelo basado en redes neuronales (RN), con una topología de red de tres capas (entrada, oculta y salida) de 6, 10 y 1 neuronas, respectivamente. Asimismo, se validaron ambos modelos para señales de entrada de 0.4-1.5 Hz mientras el puerto de salida de la VRPP permaneció cerrado.

Comparando las respuestas temporales de ambos modelos con las salidas reales del sistema bajo distintas condiciones, se observó que en todos los casos, el modelo no lineal arrojó menores valores del error cuadrático medio ( $2.9557 \times 10^{-10}$  versus 0.1718 para modelo lineal). Esto evidencia que el modelo no lineal proporciona una mejor aproximación del comportamiento de la válvula frente a las no linealidades de su operación, vinculadas no sólo con la compresibilidad del aire y las fuerzas de fricción, sino también con la variación de flujo másico causada por caídas de presión en el circuito neumático.

Como conclusión, puede decirse que el desempeño de las RN muestra su capacidad para identificar el modelo y controlar no sólo a la VRPP analizada, sino también otros dispositivos neumáticos utilizados en aplicaciones biomecátricas.

**Palabras Claves:** *comportamiento dinámico de sistemas neumáticos, identificación, robótica de asistencia.*



# IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO  
DOCENTE  
DEL ÁREA  
MECÁNICA  
DE LAS  
INGENIERÍAS

FoDAMI

## 1. INTRODUCCIÓN

La Biomecatrónica es un campo interdisciplinario relacionado con la interacción de sistemas robóticos con el sistema neuro-músculo-esquelético del cuerpo humano, con el fin de incrementar su capacidad funcional o proveer asistencia para efectuar actividades de la vida diaria a individuos con desórdenes neuromotores [1]. Un ejemplo de tales sistemas son los exoesqueletos para rehabilitación de la marcha, también llamados órtesis activas o robóticas, que interactúan con el operador humano transfiriéndoles potencia mecánica mediante actuadores articulares, de tal forma de optimizar su desempeño funcional para la práctica de la ambulación [2-3].

Entre los distintos tipos de actuadores articulares empleados para esta clase de sistemas robóticos [1, 4-5], el músculo neumático artificial (en inglés, pneumatic artificial muscle, PAM) emerge como uno de los mejores, basado en sus propiedades semejantes a las del músculo esquelético humano, tales como su alta relación potencia – peso y su complianza variable, que posibilita una óptima adaptación e interacción con el operador humano [6-7]. Sin embargo, su comportamiento dinámico no lineal dificulta el control de aire presurizado a través del PAM, representando un desafío la identificación e implementación del sistema, previo a su uso como elemento activo en dispositivos robóticos de asistencia.

Específicamente en nuestra aplicación se utilizará un PAM como elemento de actuación en una órtesis activa de tobillo-pie (AAFO) para rehabilitación de marcha y por lo tanto, el control de su presión a través de una válvula neumática es primordial para regular la fuerza ejercida por este exoesqueleto con el fin de compensar la debilidad de músculos flexores plantares del tobillo, normalmente observada en pacientes con lesión medular incompleta a nivel lumbosacro (LMEi) [3].

Otro aspecto de esta aplicación del PAM es su viabilidad para operar a las frecuencias típicamente observadas durante la marcha de sujetos normales (mínimo entre 0.25 y 0.4, máximo 1.5 Hz) y de pacientes con lesión medular (0.125 a 1.25 Hz) [8]. Algunos investigadores informan un ancho de banda de 0-5 Hz para este tipo de válvulas de presión proporcional [9], aunque el rango frecuencial específico para la VRPP aquí analizada no ha sido reportado por el fabricante.

Además, se conoce que el músculo esquelético biológico opera con mayor eficiencia, responde más rápidamente y tiene un control más preciso que el de un PAM, lo cual implica la necesidad de encontrar no sólo modelos precisos que diferencien el comportamiento estático y dinámico del PAM [10] del correspondiente a la válvula de presión, sino también de definir estrategias de control precisas basadas en el uso de válvulas de presión que intenten emular la regulación ejercida por el sistema nervioso central durante la locomoción humana.



# IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO  
DOCENTE  
DEL ÁREA  
MECÁNICA  
DE LAS  
INGENIERÍAS

FoDAMI

En este sentido, una revisión de la literatura muestra que las válvulas reguladores de presión proporcional (VRPP, cuya presión de salida es controlada mediante una señal eléctrica de entrada), constituye una adecuada interfaz de control basada en la alta resolución de su puerto de salida y menor nivel de ruido que la válvula PWM, mostrando así su capacidad de regular en forma precisa la fuerza ejercida por el PAM [11]. Para la identificación del comportamiento dinámico de la VRPP en las condiciones de operación aquí previstas, es posible utilizar métodos paramétricos [12] y no paramétricos [13], que permiten obtener modelos lineales y no lineales a partir de datos experimentales de entrada y salida, sin necesidad de considerar su diseño mecatrónico.

Teniendo en cuenta estos antecedentes, el objetivo de este trabajo fue identificar, modelar y validar el comportamiento dinámico de una VRPP comercial no caracterizada hasta ahora, tal como es el caso del tipo VPPM 6L-L-1- G18-0L10H-V1 de Festo®. Para lograr este objetivo se aplicó la metodología seguidamente descrita. En primer lugar, se presenta el sistema experimental implementado para identificar el comportamiento de la VRPP y calibrar los instrumentos de medición. Luego se detallan los pasos seguidos para obtener los modelos dinámicos lineal y no lineal de la VRPP analizada bajo distintas condiciones de operación. Posteriormente se muestran los resultados obtenidos y la validación correspondiente para cada caso, mostrando finalmente las conclusiones del trabajo, referidas a las ventajas y desventajas de uso de ambos tipos de modelos.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 Banco de prueba experimental

Con el fin de identificar el comportamiento de la VRPP evaluada, se efectuaron diferentes ensayos experimentales a partir de un banco de prueba (Figura 1), compuesto por: la VRPP; celdas de presión para medir sus presiones de entrada y salida; tanque para carga y descarga de flujo de aire; circuito neumático; fuente de tensión de cc para tensión de referencia y de alimentación de 24 V y 12 V de la VRPP y de las celdas de presión, respectivamente; circuito de acondicionamiento de señal y placa de adquisición de datos, descriptos detalladamente a continuación.

- Válvula reguladora de presión proporcional (1): se empleó una válvula de control direccional de 3/2 vías modelo VPPM 6L-L-1-G18-0L10H-V1 Festo®, que provee ajuste infinito de la presión y por lo tanto de la fuerza o flujo, a través de un voltaje de referencia entre 0 y 10 Vcc y según tres modos de control de operación: rápido, universal y preciso. Para la operación de la VRPP se utilizó el modo universal, comúnmente empleado para distintas aplicaciones. Dos tipos de señales de referencia  $V_{ref}$  (2) fueron provistas a la VRPP a fin de mapear su espacio de trabajo: señal escalón de tensión continua entre 0 y 5 V y señal periódica de 0.4-1.5 Hz en el rango de 0-5V con un ciclo

de trabajo del 50%. El rango frecuencial se eligió considerando las frecuencias de marcha típicamente observadas en sujetos normales y en pacientes LMEi [8].

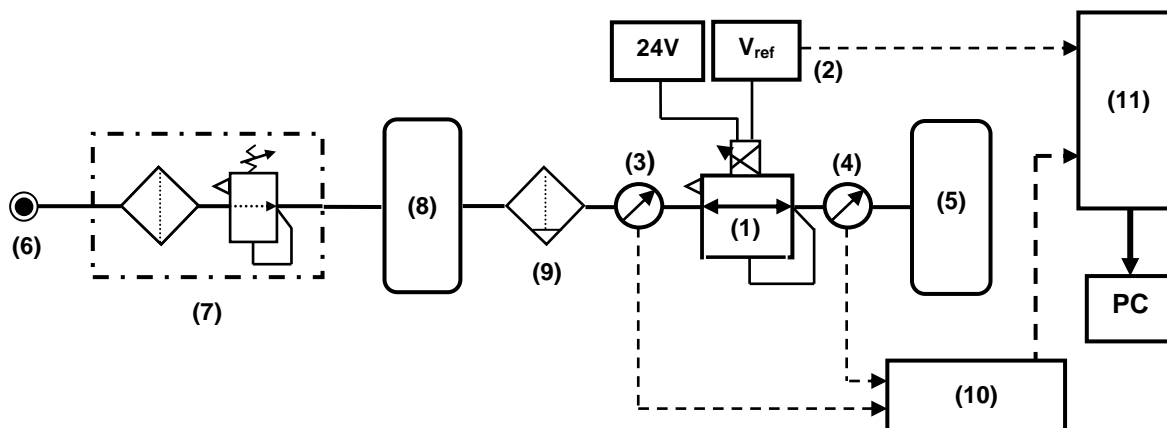


Figura 1. Configuración del banco de prueba experimental implementado para la VRPP.

- Transductores de presión de entrada (3) y salida (4): se utilizó el modelo MBS 1700 Danfoss<sup>®</sup>, para medir y verificar si la presión de alimentación de la VRPP corresponde a la presión de suministro del compresor. Por su parte, el modelo AKS 330 Danfoss<sup>®</sup> permitió medir la presión suministrada por la VRPP a un tanque (5) corriente abajo, de volumen constante de 0.04 m<sup>3</sup>.
- Circuito neumático: un compresor de 30 Kg/cm<sup>2</sup> de capacidad (6) provee aire a presión regulada por la unidad filtro-regulador (7), que luego es acumulado en un tanque (8) para estabilizar y suministrar a la VRPP una presión corriente arriba constante. La presión de trabajo máxima fue de 6 bar, según las condiciones de operación del PAM en términos de la fuerza requerida para la aplicación pretendida [10]. Luego del tanque acumulador, el aire fluye a través de un filtro de trampa de agua (9) y de la VRPP, que regula la presión de salida mediante su  $V_{ref}$ .
- Placa de acondicionamiento de señal (10): registró las señales de las celdas de presión convirtiendo la señal de corriente (4 to 20mA) en una tensión sobre una resistencia de 500  $\Omega$ .
- Placa de adquisición de datos (11): fue utilizado el modelo NI USB-6009 de National Instrument<sup>®</sup>, en base a su frecuencia de muestreo, transmisión de datos a la PC vía puerto USB y su adaptabilidad a varios lenguajes de programación. Mediante sus entradas analógicas y a partir de un instrumento virtual desarrollado en Labview<sup>®</sup>, se adquirieron las señales provenientes de las celdas de presión y del voltaje de referencia de la VRPP, así como de los instrumentos de medida, transmitiéndolas luego a la PC para procesamiento y visualización de resultados.



## 2.2 Calibración de los instrumentos de medida

A fin de efectuar la calibración estática de la VRPP analizada se aplicó una presión de suministro  $P_s$  constante de 6 bar y valores constantes de tensión de referencia (rango 0-5 Vcc), mientras se mantenía su puerto de salida cerrado. Las curvas de calibración se obtuvieron luego aplicando como señal de referencia, diferentes valores de tensión en pasos de 1 V y midiendo la presión de salida con un módulo de presión modelo Serie 700 P27 Fluke®, rango 0-20 bar, asociado a un calibrador de procesos multifunción modelo Fluke® 725. La Figura 2 muestra la curva estática de la VRPP en términos de presión relativa de salida versus tensión de referencia de entrada.

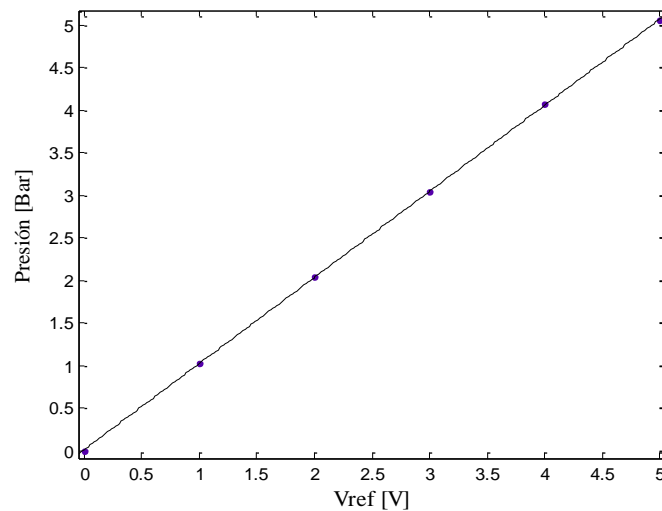


Figura 2. Curva de calibración de la VRPP para  $P_s = 6$  bar.

Asimismo, la calibración del transductor de presión corriente arriba se basó en diferentes  $P_s$ , rango 0-6 bar y el registro de su voltaje de salida sobre un resistor de 500  $\Omega$ . Similar procedimiento se aplicó para calibrar la celda de presión corriente abajo, fijando la  $P_s$  en 6 bar y variando la  $V_{ref}$  en pasos de 1 V con el puerto de salida de la VRPP conectado a un tanque. En todos los casos se obtuvo un ajuste lineal con un coeficiente de regresión mayor del 97%.

## 2.3 Modelo lineal de la válvula neumática

A fin de obtener un modelo que reproduzca adecuadamente el comportamiento dinámico de la válvula analizada, se efectuó el registro de datos de entrada y de salida de la VRPP a partir del banco de prueba experimental mostrado en la Figura 1. Previo a su análisis en el dominio temporal, los datos fueron suavizados utilizando una serie de filtros, tales como los de Sawitsky-Golay, de media móvil y pasabajos de Butherworth [12].



# IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO  
DOCENTE  
DEL ÁREA  
MECÁNICA  
DE LAS  
INGENIERÍAS

FoDAMI

Como una primera aproximación se eligió un modelo paramétrico lineal de lazo abierto (LA), que vincula la presión de salida de la VRPP con su tensión de referencia, correspondiente a una señal cuadrada de 1.5 Hz, rango 2-5 Vcc, y para una presión de suministro de 6 bar con el puerto de salida cerrado. Luego de una serie de pruebas con modelos subamortiguados de 2° y 3° orden y sin retardo, se obtuvo el mejor ajuste para un modelo de 3° orden, cuyos parámetros se estimaron a través de la herramienta System Identification de Matlab® [12]. Además, la señal fue subdividida para obtener adecuados porcentajes para identificación (60%) y validación (40%) del modelo.

Además, el desempeño del modelo logrado fue evaluado y validado aplicando señales de entrada en el rango frecuencial de 0.4 a 1.5 Hz. Para esto y con el fin de comparar las señales real y simulada, se implementó un diagrama de bloques en el entorno Simulink de Matlab®. Finalmente, la función de transferencia de LA adoptada viene dada por:

$$G(s) = \frac{1.0049}{1.2 \times 10^{-4} s^3 + 1.69 \times 10^{-3} s^2 + 7.465 \times 10^{-2} s + 1} \quad (1)$$

caracterizada por un par de polos complejos conjugados y un polo real ubicados en el semiplano izquierdo, lo cual indica que el sistema tiene un comportamiento estable.

## 2.4 Modelo no lineal de la válvula neumática

En términos generales, el procedimiento de identificación del comportamiento de un sistema dinámico mediante una RN consiste en ajustar los parámetros de la red en base al error entre las salidas del modelo y de la planta. Asumiendo que el sistema físico presenta una estructura matemática expresada como una función  $f(y, u)$  de los valores actual y pasado de las entradas  $u$  y las salidas  $y$ , y que además es estable en el sentido que tanto las entradas como las salidas están acotadas, su descripción puede efectuarse por una ecuación en diferencias del tipo [13-14]:

$$y(k) = f[y(k), y(k-1), y(k-2), \dots, y(k-n), u(k), u(k-1), \dots, u(k-m)] \quad n \geq m \quad (2)$$

donde  $k$ : variable tiempo discreto;  $m$  y  $n$ : número de retardos de entrada y salida, respectivamente.

Para esta clase de sistemas existen dos esquemas tradicionales de identificación, denominados Modelo Paralelo y Serie-Paralelo (Figura 3). En particular, la estructura de identificación del modelo serie paralelo o modelo NNARX (Nonlinear Auto-Regressive with exogenous input models), es tal que la salida de la planta  $\hat{y}_p$  es realimentada al modelo de identificación, de acuerdo a un esquema conocido como retropropagación estática (en inglés, static back propagation) [13-14], de la forma:

$$\hat{y}_p(k+1) = \hat{f}[y(k), \dots, y(k-n+1), u(k), \dots, u(k-m+1)] \quad (3)$$



que respecto del modelo paralelo (en donde la realimentación viene dada por la salida estimada), tiene la ventaja de ajustar más fácilmente los parámetros con menor esfuerzo computacional.

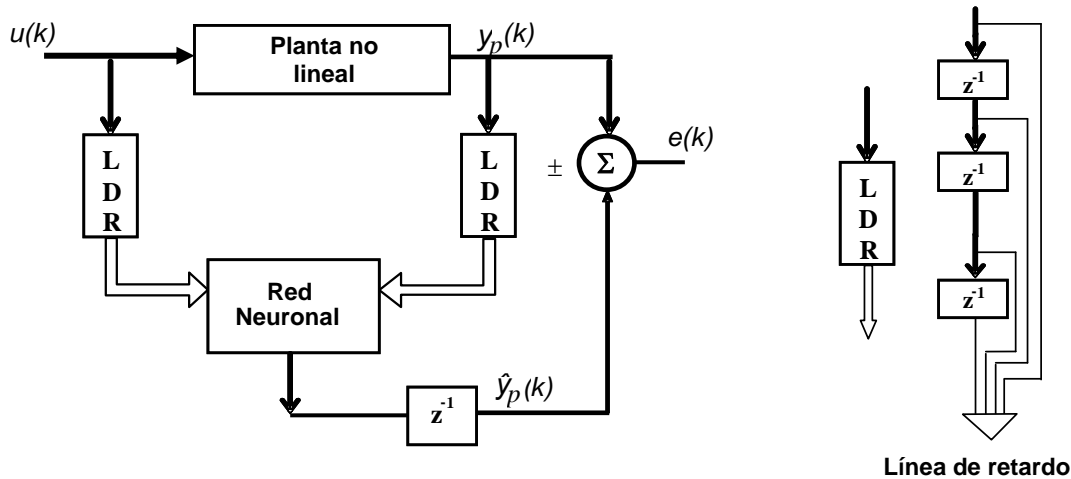


Figura 3. Modelo Serie Paralelo de RN utilizado para identificación del sistema analizado.

Para el modelado se eligió esta RN con una configuración de 3 capas completamente conectadas, de 6, 5 y 1 neuronas, respectivamente. Además, las funciones de activación para la entrada y las capas ocultas fueron del tipo tangente hiperbólica, y lineal para la capa de salida, eligiendo como algoritmo de entrenamiento el método de Levenberg-Marquardt. Asimismo, el vector de datos de la señal de entrada evaluada en el rango de 0.4–1.5 Hz y con distintas condiciones de operación de la VRPP (puerto de salida cerrado y conectado al tanque corriente abajo), fue dividido para lograr adecuados porcentajes para entrenamiento (70%), validación (15%) y prueba (15%).

Con el fin de modelar la dinámica no lineal de LA de la VRPP analizada, se efectuaron distintas pruebas variando el número de neuronas de las capas ocultas y retardos aplicados a las señales de entrada y salida de la planta, calculando también el error de identificación. Finalmente, se implementó un diagrama en bloques en Simulink® para comparar las salidas real y simulada.

### 3. RESULTADOS

En la Figura 4 se visualizan los resultados de la comparación entre datos experimentales reales y simulados con el puerto de salida cerrado y una señal cuadrada de entrada con valores de pico de 2-5 V y frecuencia  $f = 1.5$  Hz. El mejor ajuste fue de 88.65%, con un error cuadrático medio (ECM) de 0.1718. También, diferentes valores de pico fueron evaluados en la misma condición para  $V_{ref} = 2-4$  V y  $f = 1$  Hz (ECM 0.2135), así como  $V_{ref} = 0-3$  V y  $f = 0.7$  Hz (ECM 0.4241), respectivamente.



# IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO  
DOCENTE  
DEL AREA  
MECANICA  
DE LAS  
INGENIERIAS

FoDAMI

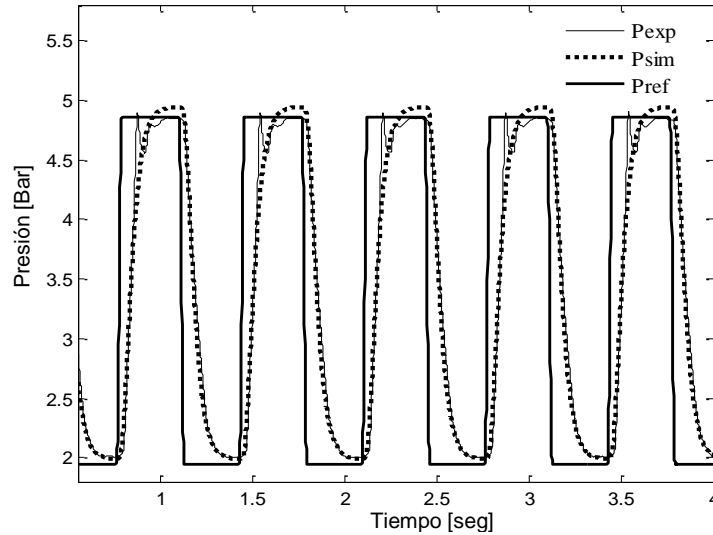


Figura 4. Datos experimentales y simulados con modelo lineal para  $V_{ref} = 2-5$  V y  $f = 1.5$  Hz, VRPP en vacío.

Resultados equivalentes (no mostrados aquí por cuestiones de espacio) se lograron con el puerto de salida conectado al tanque corriente abajo y para una señal cuadrada con  $V_{ref} = 2-5$  V y  $f = 1.5$  Hz, y  $V_{ref} = 0-4$  V y  $f = 0.4$  Hz, con ECM de 0.26 y 0.4051, respectivamente. Frecuencias mayores a 1.5 Hz producen distorsión en la presión de salida y por lo tanto, se consideró que el ancho de banda de la VRPP analizada es de 0–1.5 Hz. Además, la Figura 5 muestra los resultados de la validación del modelo lineal de LA para una entrada escalón de 0-5 bar y el tanque corriente abajo.

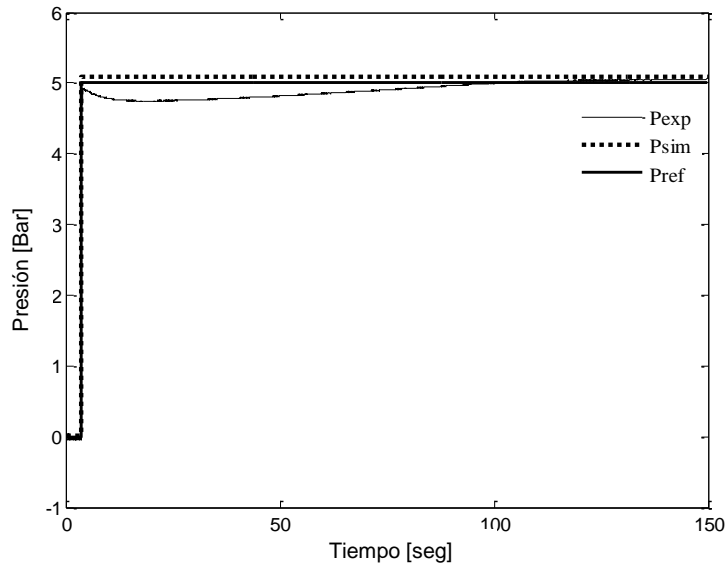


Figura 5. Validación del modelo lineal de la VRPP, obtenido comparando las salidas real y simulada.

Por su parte, los resultados de la comparación entre datos experimentales y simulados con la RN para la VRPP con puerto de salida cerrado y una señal cuadrada de  $V_{ref} = 2-5$  V y frecuencia  $f =$



# IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO  
DOCENTE  
DEL AREA  
MECANICA  
DE LAS  
INGENIERIAS

FoDAMI

1.5 Hz, así como de su correspondiente error de identificación se exhiben en las Figuras 6 y 7, respectivamente. Al igual que en el caso del modelo lineal, también se efectuaron pruebas equivalentes para el modelo de RN con el tanque conectado corriente abajo de la VRPP para  $V_{ref} = 2-5$  V y  $f = 1.5$  Hz, y  $V_{ref} = 0-4$  V y  $f = 0.4$  Hz, con un ECM de 0.0034 y 0.0605, respectivamente.

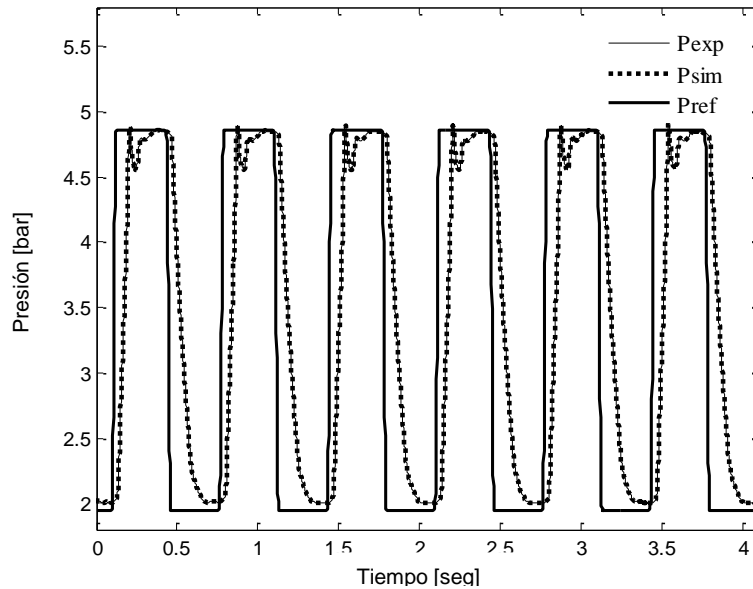


Figura 6. Datos experimentales y simulados con modelo de RN para  $V_{ref} = 2-5$  V y  $f = 1.5$  Hz, VRPP en vacío.

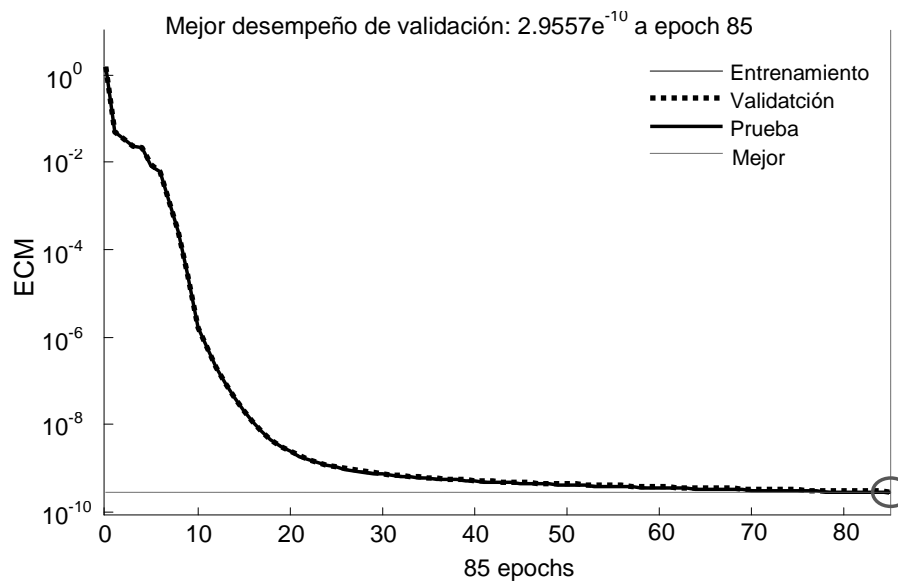


Figura 7. Desempeño del modelo no lineal de la VRPP según el ECM entre la salida actual y la del modelo.



# IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO  
DOCENTE  
DEL AREA  
MECANICA  
DE LAS  
INGENIERIAS

FoDAMI

Finalmente, la Figura 8 muestra la validación del modelo de RN de LA, para  $V_{ref} = 0-5$  bar.

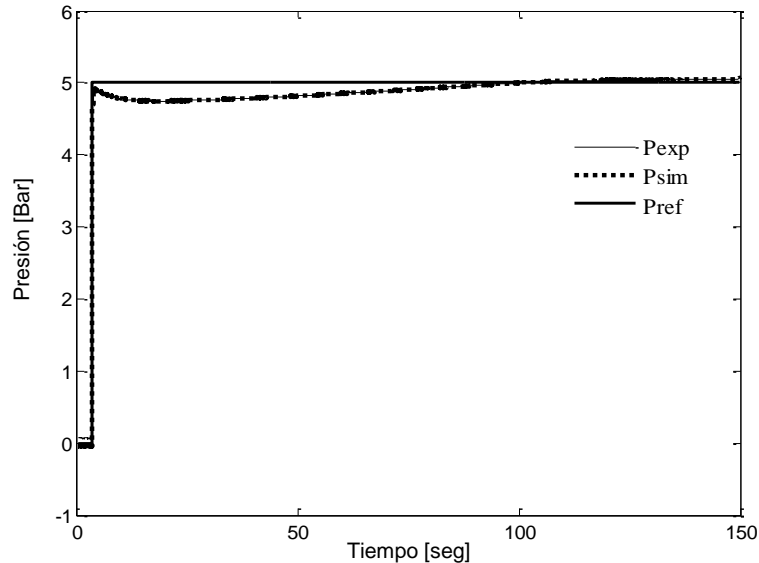


Figura 8. Validación del modelo no lineal de la VRPP, obtenido comparando las salidas real y simulada.

## 4. CONCLUSIONES

Entre las ventajas del uso del modelo lineal de lazo abierto utilizado para caracterizar la dinámica de la VRPP analizada, figura la obtención de una función de transferencia que luego puede utilizarse para el control de PAM a través de la VRPP [12]. En contraste, el modelo no lineal de lazo abierto logrado aplicando la técnica de RN proporciona una mejor descripción de la dinámica del sistema, si bien al costo de no disponer de una estructura definida del modelo [13-14]. Otra ventaja importante de esta última técnica es la capacidad para resolver las alinealidades típicamente observadas en sistemas neumáticos (tales como la compresibilidad del aire, fuerzas de fricción y pérdidas de carga producidas en el circuito neumático), corroborada por los valores de ECM obtenidos en cada caso ( $0.1718$  para modelo lineal versus  $2.9557 \times 10^{-10}$  para no lineal).

En trabajos futuros se prevé analizar el comportamiento dinámico de la válvula no sólo en el dominio frecuencial, sino también en configuración de lazo cerrado y bajo el efecto de flujos variables, tales como los desarrollados durante el funcionamiento del PAM. Como conclusión de este trabajo puede decirse entonces, que el modelo no lineal de la VRPP analizada proporcionó una mejor estimación de su comportamiento dinámico, siendo ésta una característica importante para regular con precisión la fuerza que ha de ejercer el PAM como elemento activo de una AAFO para rehabilitación de la marcha, con el fin de compensar la debilidad de músculos flexores plantares del tobillo, típicamente observada en pacientes LMEi [8].



# IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO  
DOCENTE  
DEL AREA  
MECANICA  
DE LAS  
INGENIERIAS

FoDAMI

**AGRADECIMIENTO:** Los autores quieren agradecer a la Universidad Nacional de San Juan (UNSJ) y al Gobierno de la Provincia de San Juan por el financiamiento de este proyecto, y al personal del Instituto de Materiales y Suelos de la UNSJ por su asistencia técnica.

## 5. REFERENCIAS

- [1] A. Dollar, Herr H. Lower extremity exoskeletons and active orthoses: challenges and state-of-the-art, *IEEE T Robotic Autom*, **24**,144-158, 2008.
- [2] G. Colombo, Wirz M., Dietz V. Driven gait orthosis for improvement of locomotor training in paraplegic patients, *Spinal Cord*, **39**, 252-5, 2001.
- [3] M. Wirz et al. Effectiveness of automated locomotor training in patients with chronic incomplete spinal cord injury: a multicenter trial, *Arch Phys Med Rehabil*, **86(4)**,672-680, 2005.
- [4] P. Beyl et al. Proc. IEEE 10th Int. Conf. on Rehabilitation Robotics, Mechanical design of an active knee orthosis for gait rehabilitation, IWT-Vlaanderen, Brussels, 13-15 July, 2007.
- [5] H. Naito et al. An ankle-foot orthosis with a variable-resistance ankle joint using a magnetorheological-fluid rotary damper. *J Biomed Eng*, **4**,182-91, 2009.
- [6] D. Ferris, Sawicki G., Domingo A. Powered lower limb orthoses for gait rehabilitation. *Spinal Cord Inj Rehabil*, **11(2)**, 34-49, 2005.
- [7] D. Ferris, Gordon K., Sawicki G., Peethambaran A. An improved powered ankle foot orthosis using proportional myoelectric control. *Gait & Posture*, **23**, 425-8, 2006.
- [8] J. Perry. *Gait Analysis: Normal and Pathological Function*, Slack Inc., USA, 1992.
- [9] M. Sorli, Figliolini G., Pastorelli S. Dynamic model and experimental investigation of a pneumatic proportional pressure valve, *IEEE/ASME IEEE/ASME} Trans. Mechatron.*, **9(1)**, 78-86, 2004.
- [10] C. Lescano, Herrera C., Mirabal Z., Rodrigo R., Rodrigo S. Characterization of a pneumatic artificial muscle for its application in an active ankle-foot orthosis. *JOP*, **477**- 012040, 1-10, 2013.
- [11] P. Beater. *Pneumatic Drives. System Design, Modelling and Control*. Springer, Germany, 2007.
- [12] L. Ljung. *System Identification. Theory for the User*, Prentice Hall PTR, U.S.A., 1999.
- [13] K. Narendra, Parthasarathy K. Identification and control of dynamical systems using neural networks. *IEEE Trans. Neural Networks*, **1(1)**, 4-27, 1990.
- [14] F. Carneiro F., Gomes de Almeida F. A neural network based nonlinear model of a servopneumatic system, *J DYN SYST-T ASME*, **134**, 1-8, 2012.