



CARACTERIZACIÓN DE LA DINÁMICA DE UNA VÁLVULA NEUMÁTICA PARA SU APLICACIÓN EN BIOMECASTRÓNICA

S. E. Rodrigo¹, C. N. Lescano^{1,2}, C. V. Herrera¹, C. A. Riveros¹

¹Gabinete de Tecnología Médica, Facultad de Ingeniería, Universidad

Nacional de San Juan, Av. San Martín 1109 Oeste, San Juan.

²CONICET: Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas.

Relación de la Bioingeniería con la Ingeniería Mecánica

➤ **Docencia:**

- “Biomecánica”
- “Ingeniería de Rehabilitación”

➤ **Investigación:**

- **Análisis de la Marcha Humana**
- **Dispositivos Robóticos para Rehabilitación de Marcha**

Exoesqueleto: mecanismo estructural externo que interactúa en paralelo con el operador humano, transfiriéndole potencia mecánica a través de actuadores articulares.



- *Lokomat*® actúa sobre las articulaciones de cadera y rodilla.
- En pacientes con lesiones medulares incompletas de bajo nivel, el déficit motor proviene de la debilidad de los flexores plantares del tobillo (F= 3-4 Peso Corporal).
- *Lokomat*® actúa en base a patrones de marcha normal, sin tener en cuenta la condición neuropatológica del paciente considerado.

Caracterización de la dinámica de una válvula neumática para su aplicación en biomecánica

Compresor

Libera el aire, de acuerdo a las órdenes que recibe desde la computadora, que se inyecta a los músculos neumáticos para regular la marcha del paciente.

El dispositivo

Se trata de un sistema mecánico que ayuda al movimiento del tobillo y compensa las deficiencias motoras que afectan a esta articulación, en pacientes con lesiones en la parte inferior de la médula espinal.

Músculo neumático

Es un actuador de tracción que imita la musculatura humana. Ejerce la fuerza para producir el despegue del pie.



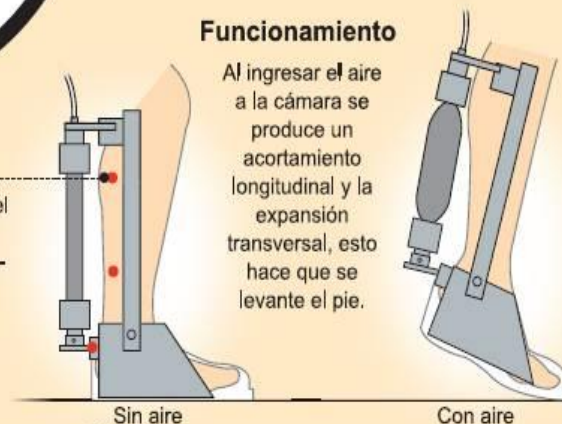
Materiales:
Se prevé la utilización de duraluminio o titanio

Características

Este músculo neumático tiene 40 mm. de diámetro y está compuesto por un tubo flexible contráctil, con sus empalmes, formado por una capa interior de goma estanca y resistente a la presión y de una capa exterior de fibras altamente resistentes.

Funcionamiento

Al ingresar el aire a la cámara se produce un acortamiento longitudinal y la expansión transversal, esto hace que se levante el pie.



Sensores

Se colocan en el pie y en el músculo neumático para establecer ciertos parámetros (presión plantar, fuerza) de cada paciente.

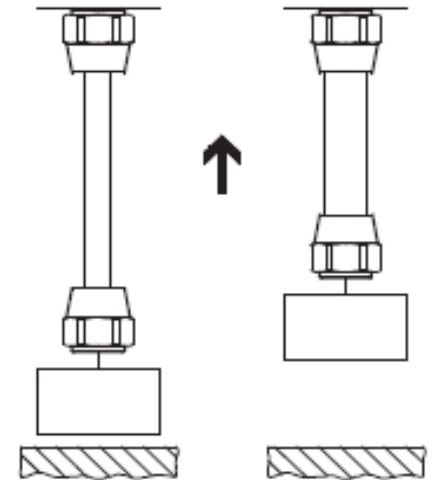
Válvula

Recibe la señal desde la PC para dosificar el aire, desde el compresor hacia los músculos neumáticos,

Software

Los parámetros obtenidos son procesados por un software específico y se establece un patrón de trabajo que controla el sistema. Coordina el momento en que se inicia el trabajo (marcha) de acuerdo a cada caso en particular.

- La tendencia actual es utilizar actuadores alternativos a los motores eléctricos, que aproximen el comportamiento mecánico real de las articulaciones anatómicas.
- Los músculos artificiales neumáticos muestran importantes ventajas respecto de otro tipo de actuadores:
 - imita el comportamiento del músculo biológico
 - exhibe una alta relación potencia / peso.



- Su dinámica no lineal dificulta el control de aire presurizado.

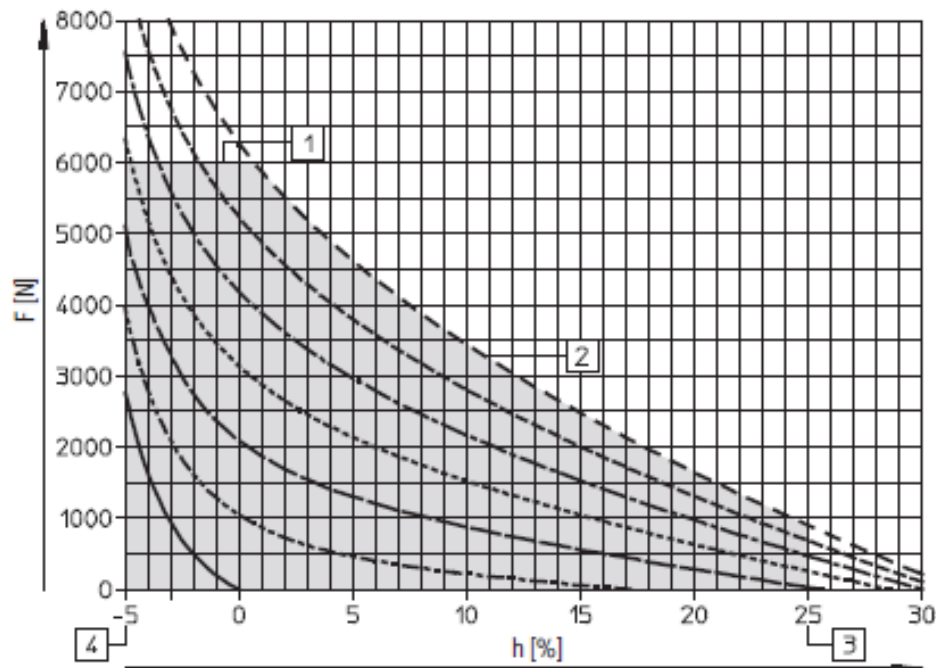
Músculo neumático DMSP con extremos prensados

Hoja de datos

FESTO

Margen de funcionamiento DMSP-40-400N-...

Ejemplos de configuración → 32



- 0 bar
- - - 1 bar
- - - 2 bar
- · - · 3 bar
- · - · 4 bar
- · - · 5 bar
- · - · 6 bar

- 1 Fuerza teórica mínima con presión de funcionamiento máxima
- 2 Presión máx. de funcionamiento
- 3 Deformación máx.
- 4 Estiramiento inicial máx.
- Margen de trabajo admisible

Las válvulas reguladora de presión proporcional constituyen una adecuada interfaz de control del exoesqueleto basado en:

- alta resolución de su puerto de salida (control de fuerza/posición del músculo),
- respuesta frecuencial adecuada para un exoesqueletos de rehabilitación de marcha (sujetos normales: 0.25-1.5 Hz; pacientes con lesión medular: 0.125-1.25 Hz),
- menor nivel de ruido que válvulas on-off.

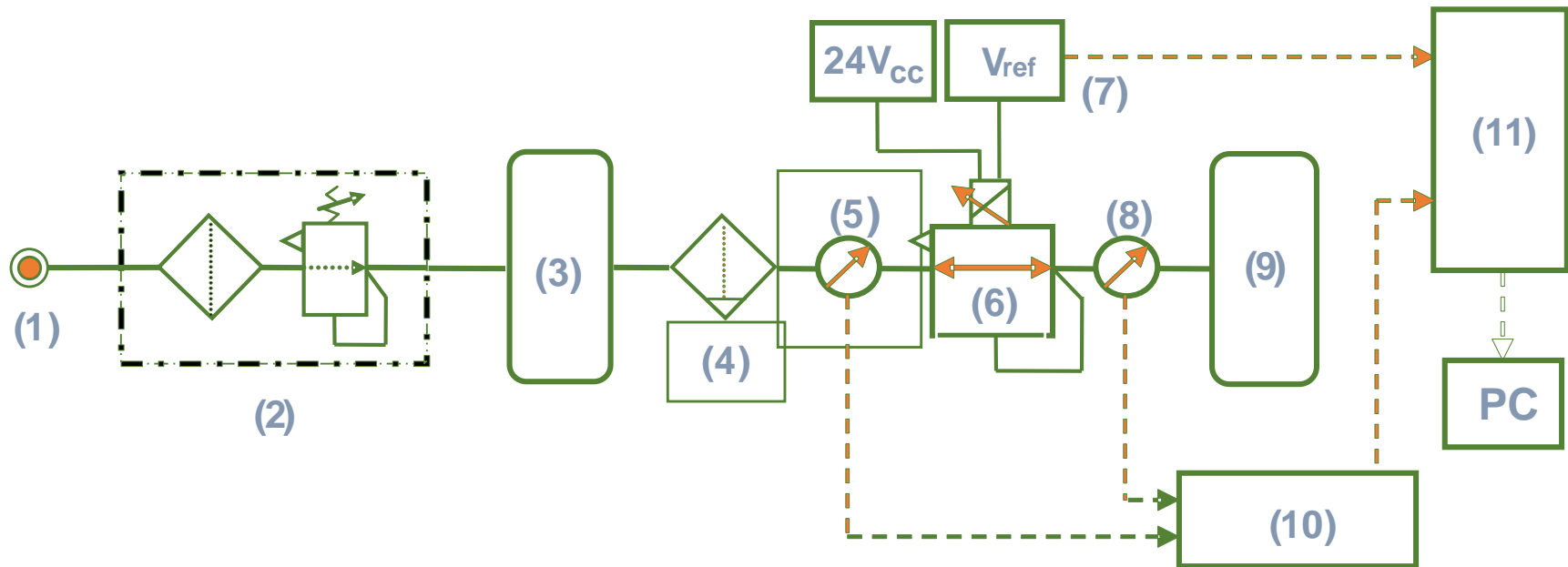
Objetivo:

Describir la dinámica de una válvula neumática de presión proporcional en base a un modelo lineal, con vistas a su aplicación para el control de un músculo neumático en una órtesis robótica para rehabilitación de marcha en pacientes con lesión medular incompleta de bajo nivel.

Objetivo:

Describir la dinámica de una válvula neumática de presión proporcional en base a un modelo lineal, con vistas a su aplicación para el control de un músculo neumático en una órtesis robótica para rehabilitación de marcha en pacientes con lesión medular incompleta de bajo nivel.

Sistema Experimental



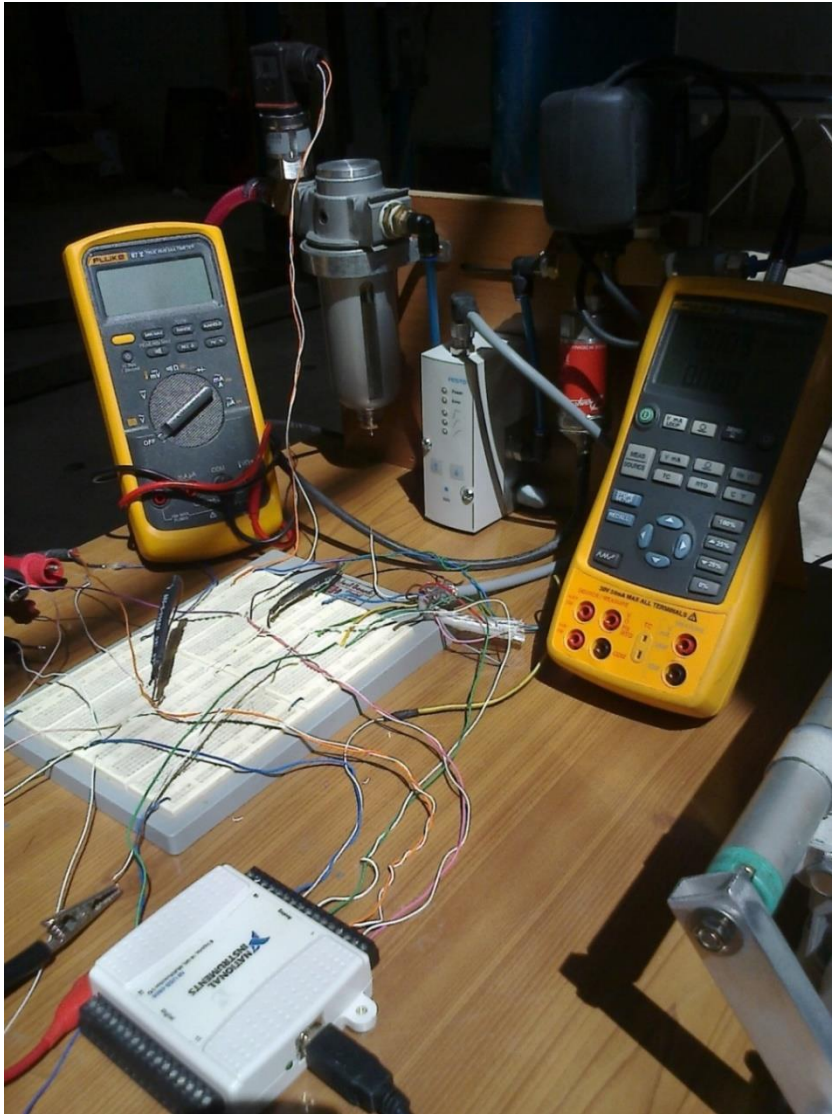


- Compresor de 30 Kg/cm² de capacidad
- Filtro-regulador

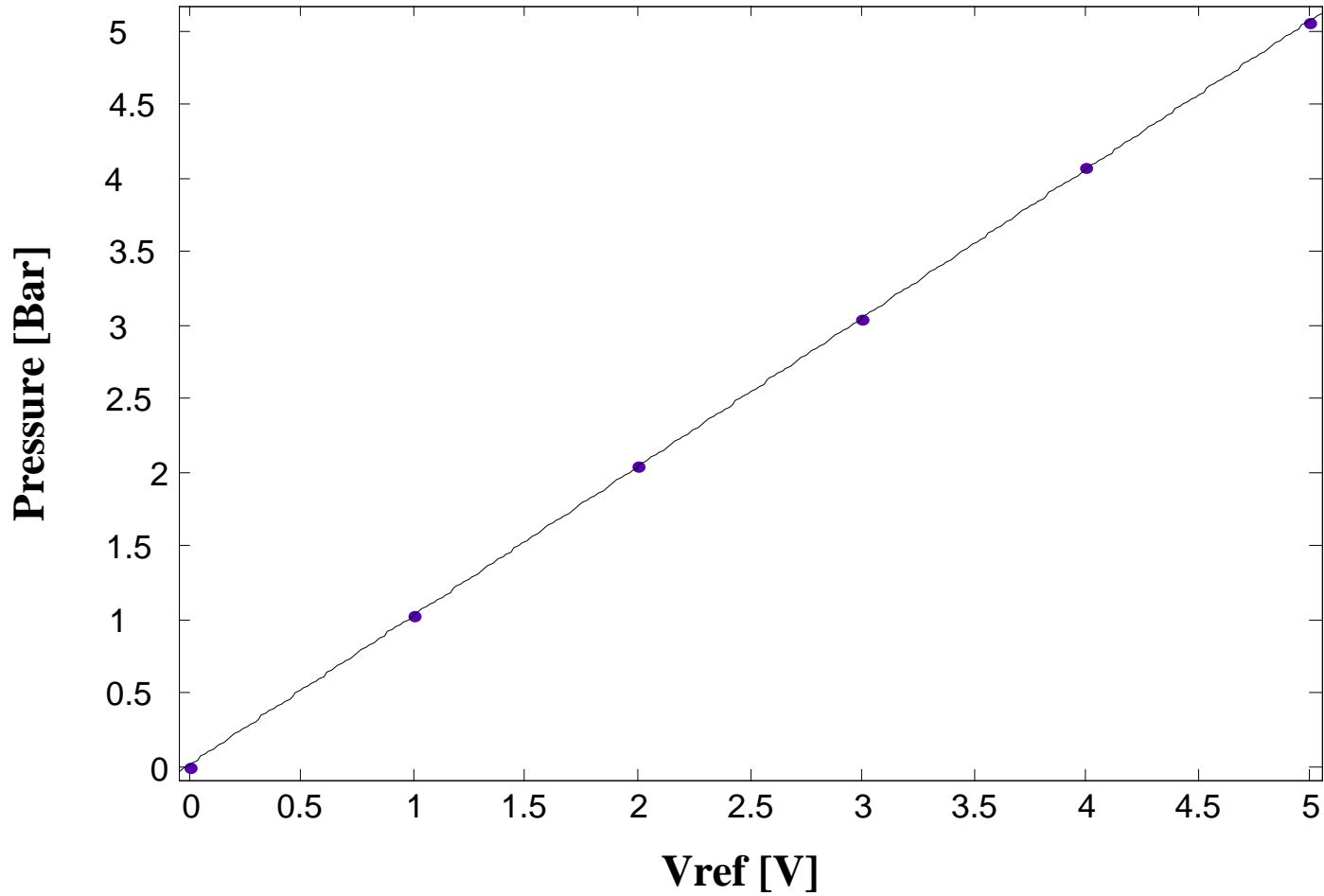
Caracterización de la dinámica de una válvula neumática para su aplicación en biomecatrónica



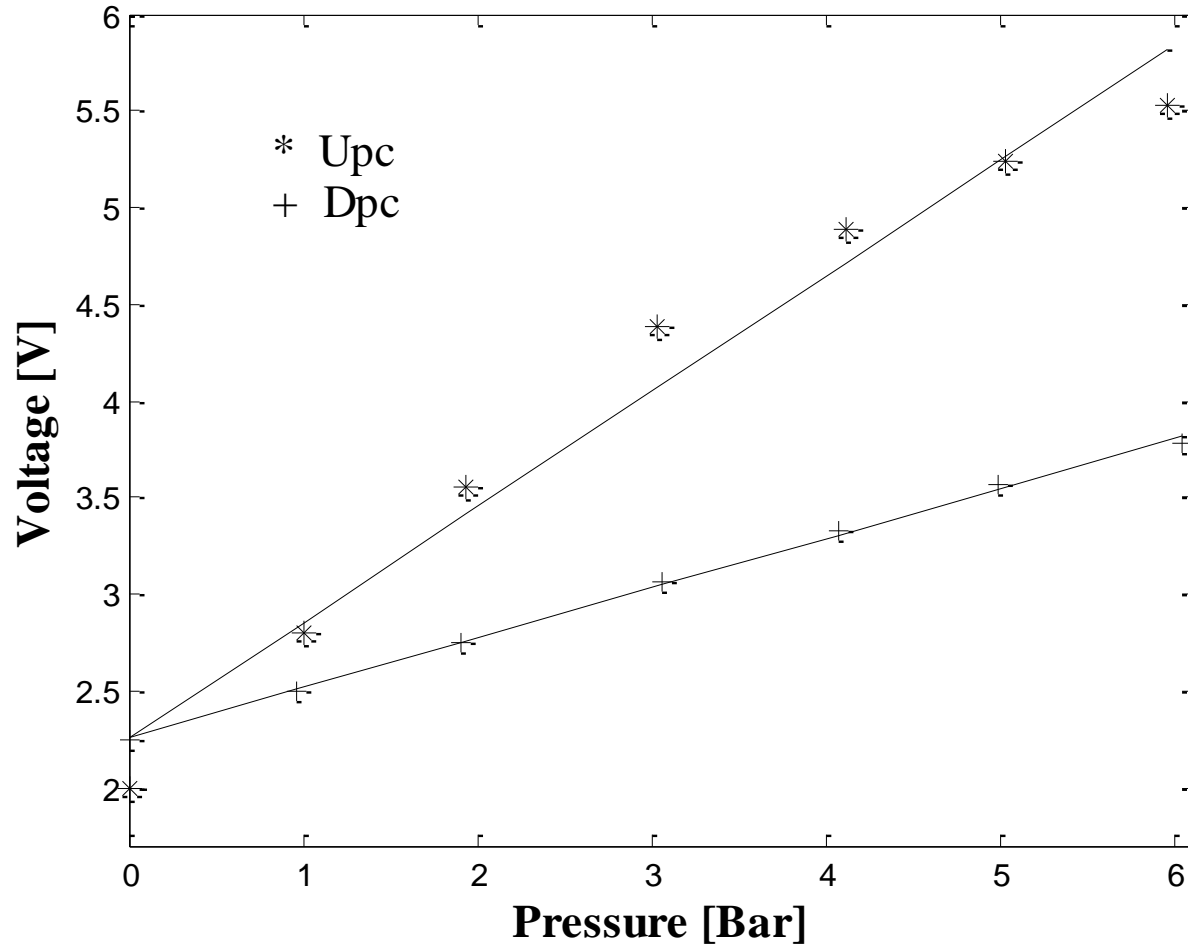
- Tanque acumulador
- Filtro trampa de agua
- Celdas de presión Danfoss® p/m. presión c. arriba y c. abajo (4 to 20mA, 500 Ω)
- Válvula de control direccional de 3/2 vías modelo VRPP 6L-L-1-G18-0L10H-V1 Festo®, $V_{ref} = 0-10V_{cc}$, modo de operación rápido, **universal** y preciso. Se usaron 2 tipos de señales de referencia: continua (escalón 0-5 V y periódica de 0.4-1.5 Hz (frec. marcha), rango 0-5V, ciclo de trabajo 50%).



- Instrumentos de medida
- Placa DAQ NI USB-6009 para celdas de presión, V_{ref} VRPP e instrumentos de medida.



Curva de calibración de la válvula para una presión absoluta de suministro de 7 bars.



Curvas de calibración para las celdas de presión c. arriba (U_{pc}) y c. abajo (D_{pc}).

Características de regulación de la válvula

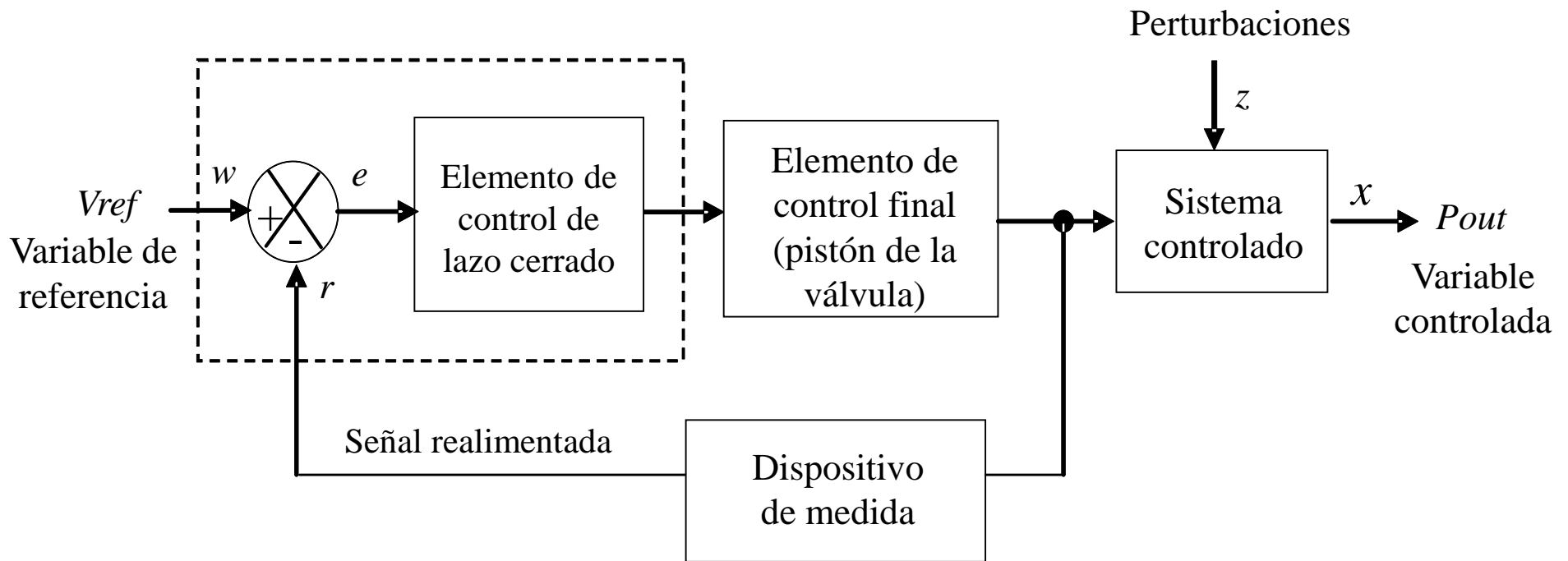


Diagrama de bloques del sistema de control de lazo cerrado de la válvula.

Modelo global de la válvula

- Se obtuvieron dos funciones de transferencia (FT) que caracterizan la relación entre la presión de salida de la válvula y sus entradas individuales para la condición de carga variable impuesta por la operación del músculo neumático.
- Ambas FT se combinaron luego en un modelo global de lazo cerrado de acuerdo al principio de superposición.

Relación P_{out} / V_{ref} de la válvula

- Registro y acondicionamiento de datos de entrada y salida, puerto de salida cerrado.
- Identificación paramétrica a partir de datos registrados.
- Información adquirida subdividida en rangos de datos para evaluación (60%) y validación (40%) del modelo mediante Matlab.
- Se optó por un modelo de 2° orden y se evaluó (vacío, tanque c.a. y músculo c.a.) y validó su desempeño en el dominio temporal y frecuencial:

$$G_{Vref}(s) = \frac{1.01}{9.725 \times 10^4 s^2 + 6.46 \times 10^2 s + 1}$$

Relación P_{out} / Q_{in} de la válvula

- Velocidad de flujo de entrada estimada en condiciones isotérmicas en base a la carga y descarga de un tanque de volumen cte, según estándar ISO 6358.

$$q_{out} = Cp_1 \sqrt{\frac{T_1}{T_2}} \sqrt{1 - \left(\frac{P_{out} - b}{P_1 - b} \right)^2} \quad \text{for } \frac{P_{out}}{P_1} > b \quad \text{flujo subsónico}$$

$$q_{out} = Cp_1 \sqrt{\frac{T_1}{T_2}} \quad \text{for } \frac{P_{out}}{P_1} \leq b \quad \text{flujo sónico}$$

$$\dot{p}_{out} = \frac{\kappa RT}{V} q - P_{out} \frac{\dot{V}}{V}$$

- q_{out} : veloc. flujo volumétrico (m^3/s);
- p_1, p_{out} : presiones c. arriba y c.abajo (bars);
- T_1, T_2 : temperatura c. arriba y c.abajo (298 °K).

Se estimaron los valores de b y C , no proporcionados por el fabricante.

Si el músculo neumático está conectado a la salida de la válvula, la velocidad de flujo de entrada se estima a partir de la ecuación de continuidad:

$$q = \frac{V_{PAM}}{\kappa RT} \dot{p}_{PAM} + \frac{1}{\kappa RT} \frac{dV_{PAM}}{dx} \dot{x} p_{PAM}$$

$$V_{PAM}(x) = ax^3 + bx^2 + cx + d$$

\dot{p}_{PAM} : - derivada de presión actuador

V_{PAM} : - volumen actuador

\dot{x}_{PAM} : - variación de contracción actuador

Una vez calculado el flujo, se obtuvo la FT P_{out} / Q_{in} :

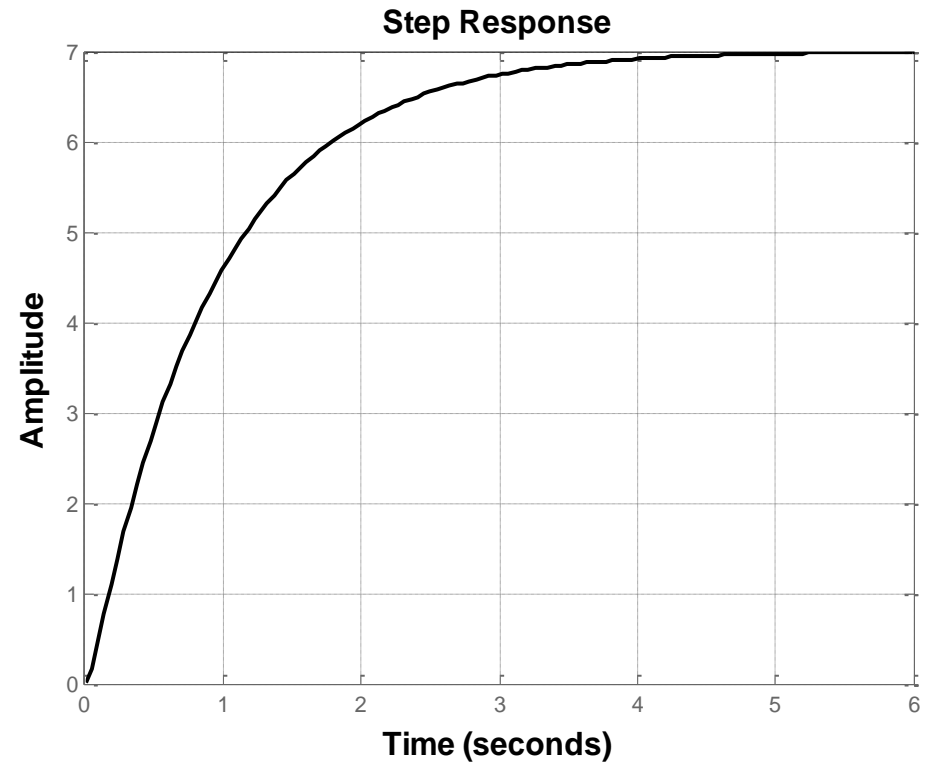
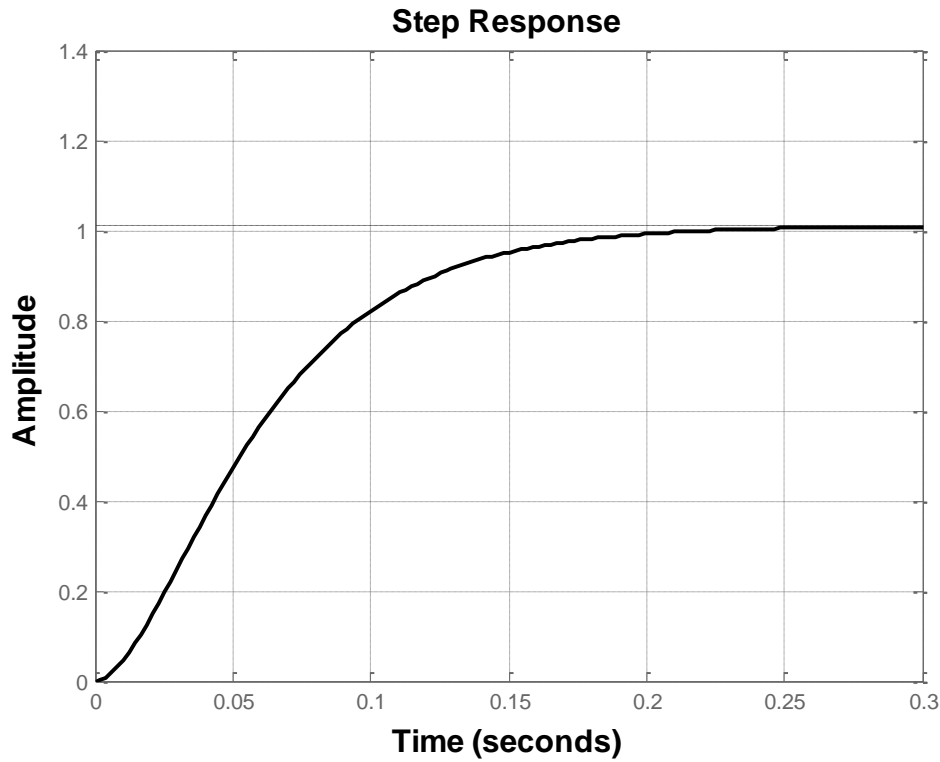
$$G_{Q_{in}}(s) = \frac{7(s + 35.09)}{(s + 1.11)(9.725 \times 10^{-4} s^2 + 6.46 \times 10^{-2} s + 1)}$$

3° orden, polos y ceros reales negativos.

Luego, la FT global se obtiene aplicando el P. Superposición:

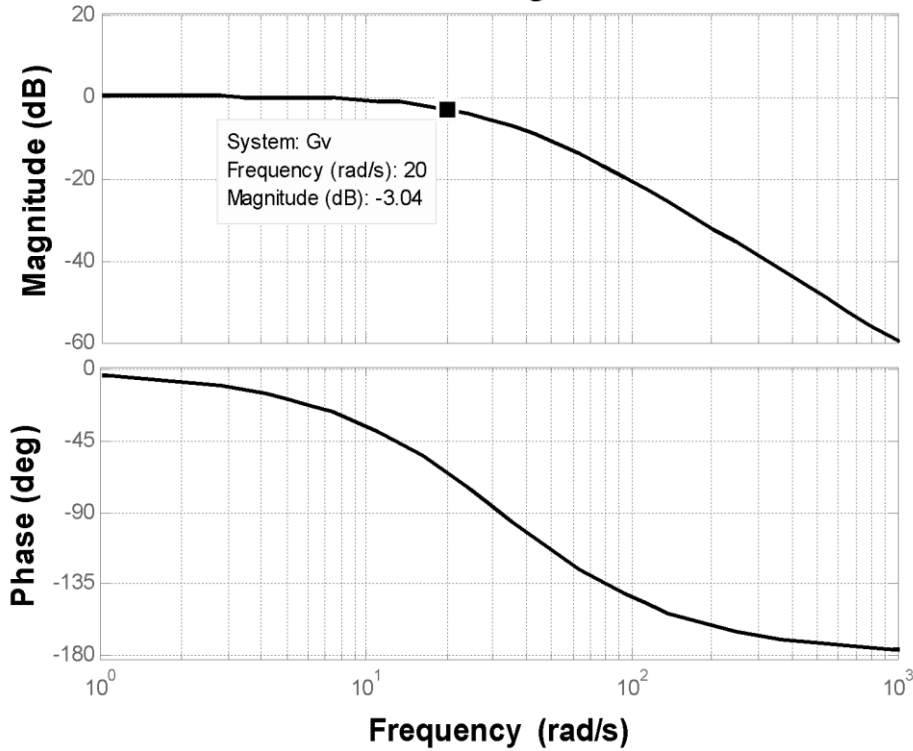
$$P_{out} = \frac{K_1 * G_{Vref}(s) * G_{Qin}(s)}{1 + G_{Vref}(s) * G_{Qin}(s)} V_{ref} + \frac{K_2 * G_{Qin}(s)}{1 + G_{Vref}(s) * G_{Qin}(s)} Q_{in}$$

que muestra un comportamiento estable.

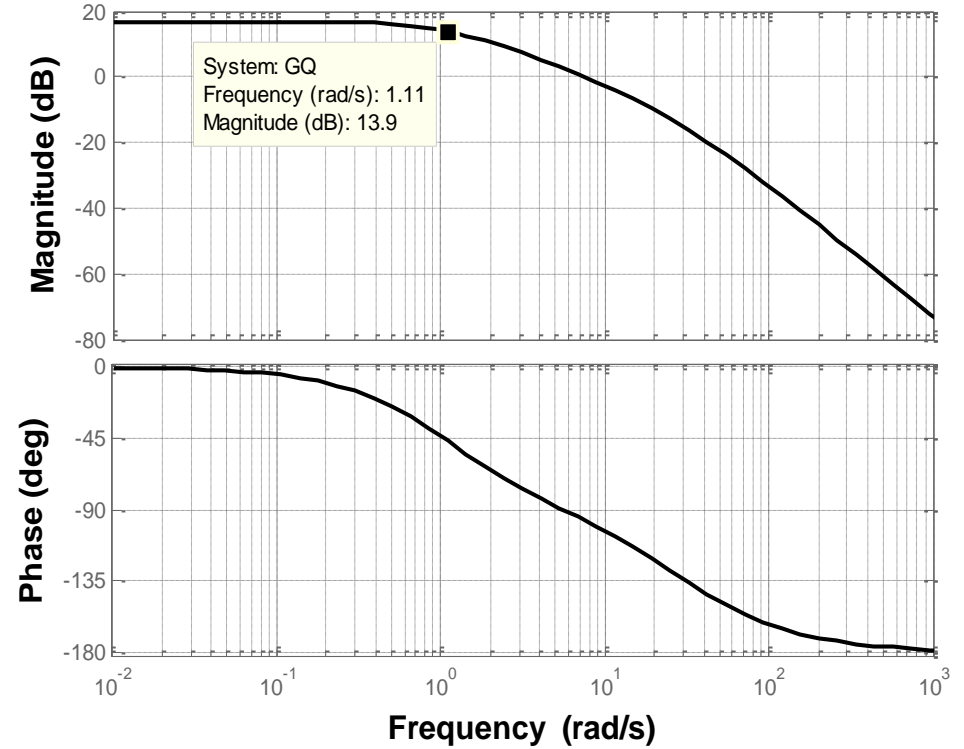


Respuesta escalón para las FT que representan las relaciones P_{out}/V_{ref} y P_{out}/Q_{in} .

Bode Diagram

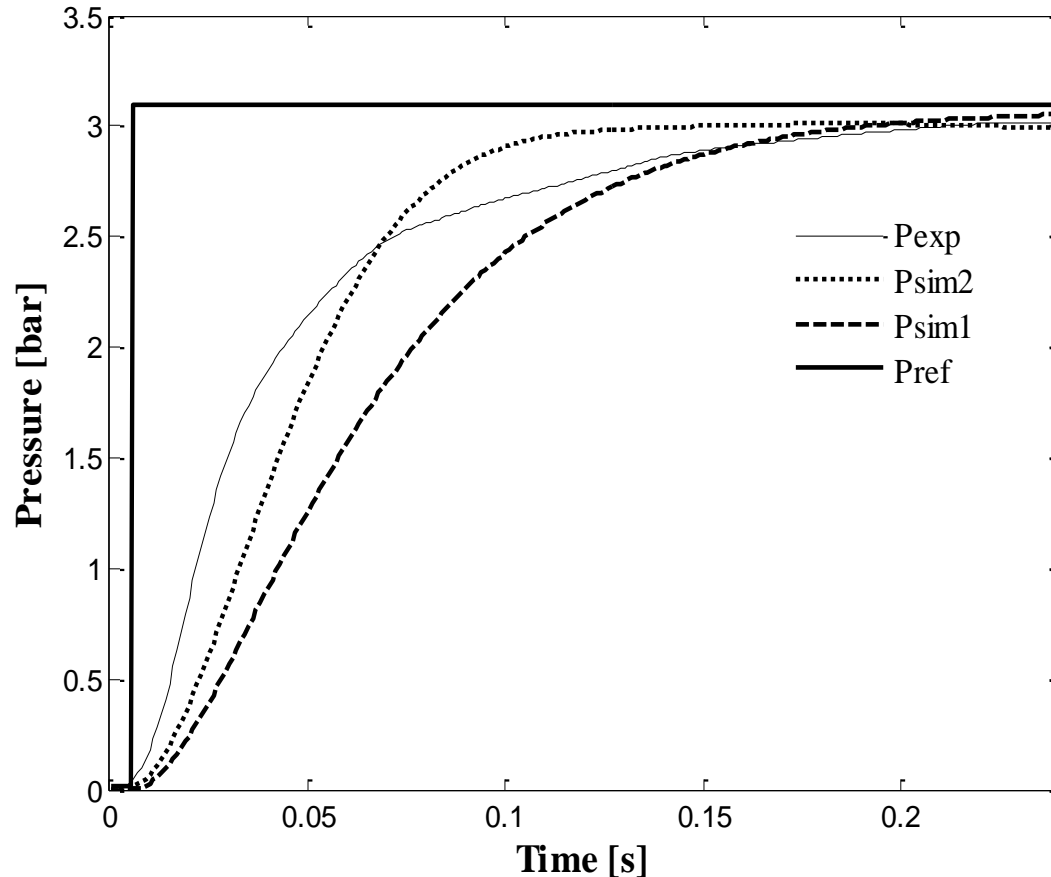


Bode Diagram



Respuesta frecuencial para las FT que representan las relaciones P_{out}/V_{ref} y P_{out}/Q_{in} .

Validación del Modelo Global



Validación lograda a partir de los datos experimentales y simulados, $V_{ref}=3$ bars, válvula conectada al PAM.
 P_{ref} : presión de referencia; P_{sim1} : respuesta simulada para la FT P_{out}/V_{ref} (en vacío); P_{sim2} : respuesta simulada para el modelo global (PAM c.a.); P_{exp} : presión de salida medida.

Evaluación de la Performance del Modelo Lineal

MSE	P_{SIM1}	P_{SIM2}
Entrada Escalón 0 a 3V	0.1663	0.2842

P_{SIM1} : modelo en vacío evaluado con el PAM c.a

P_{SIM2} : modelo global evaluado con PAM c.a.

CONCLUSIONES

Principales contribuciones:

- Obtención de un modelo global de la válvula neumática para la condición de carga variable impuesta por la operación del músculo artificial neumático.
- Análisis y validación del modelo en el dominio temporal.

❖ BW relación P_{out}/V_{ref} : 3 Hz

❖ BW relación P_{out}/Q_{in} : 0.2 Hz

Para evaluar este BW, consideramos un equivalente eléctrico del sistema neumático:

- R_p : resistencia en tuberías c. arriba y c. abajo
- R_v : resistencia al flujo de aire a través del circuito neumático
- C_{PAM} : capacitancia o complianza del músculo artificial neumático.

En estas condiciones, el BW del sistema neumático se estima como:

$$f_c = \frac{1}{2\pi(R_p + R_v)C_{PAM}}$$

El análisis de esta expresión muestra que:

- \downarrow en R_p , ligadas a \downarrow longitud o \uparrow diámetro tubería, \uparrow BW sistema neumático
- \downarrow en C_{PAM} causan \uparrow BW sistema neumático.
- Además, BW circuito neumático \uparrow con la presión de suministro y el V_{ref} .

En trabajos futuros se prevé explorar estas alternativas para \uparrow BW sistema neumático.

Si bien el modelo global de la válvula no tiene en cuenta las alinealidades típicas de sistemas neumáticos, los resultados de la validación temporal muestran que es adecuado como una primera aproximación para definir un esquema de control adecuado para el músculo artificial en una AAFO para rehabilitación de marcha en pacientes con lesión medular de bajo nivel.