



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ARAGÓN

Caracterización y control de un músculo

neumático tipo McKibben

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Mecánico

PRESENTA

Jesús Alexis Colín Pérez

DIRECTOR DE TESIS:

Dr. José Daniel Castro Díaz



Nezahualcóyotl, Estado de México, 2022



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: DR. ALEJANDRO ANTONIO VEGA RAMÍREZ

VOCAL: DR. JOSÉ DANIEL CASTRO DÍAZ

SECRETARIO: M. EN I. HUMBERTO MANCILLA ALONSO

1ER. SUPLENTE: ING. NEFTALÍ ELORZA LÓPEZ

2DO. SUPLENTE: ING. JULIO CARRERA CRUZ

Esta tesis se realizó con el invaluable apoyo del Club de Mecatrónica de la Facultad de Estudios Superiores Aragón, a cargo del M. en I. Humberto Mancilla Alonso.

ASESOR:

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'J. Castro Díaz', written in a cursive style.

Dr. José Daniel Castro Díaz

Agradecimientos

A Dios por el regalo de la vida.

A mis padres, Jesús Colín y Herlinda Pérez, sin los cuales no podría ser la persona que soy.

A mi abuela Lucina Valdez que siempre me motivó a ser un buen estudiante.

A mi hermano Gerardo Colín que sé que siempre me acompaña.

A mi casa de estudios, la Universidad Nacional Autónoma de México, por brindarme la oportunidad de pertenecer a su comunidad desde el bachillerato, poder cursar estudios profesionales y, permitirme realizar un intercambio académico.

A la Facultad de Estudios Superiores Aragón, a cada uno de los profesores que compartieron su conocimiento y dedicación en las aulas para ser parte de mi formación como ingeniero.

Al Club de Mecatrónica por permitirme ser miembro desde el primer semestre que inicie la carrera, incluirme en sus proyectos, y compartirme del conocimiento de todos y cada uno de sus integrantes.

A mi asesor, profesor y amigo Humberto Mancilla por compartir sus conocimientos desde el principio de la carrera, su dedicación, consejos, por creer en mi y por estar al inicio del desarrollo de este proyecto.

IV

A mi asesor, Daniel Castro que con su sabiduría y conocimiento me guió en las etapas de realización de este proyecto, dispuso de su tiempo y de su equipo aún sin conocerme.

A mis amigos, Eduardo Rojas, Joshua Pérez, Diego Cruz, Fabián Ajá, Sebastián Nava, Cristian Hernández, Jhovani Luna, Luis Rodríguez, Cesar Camacho, Roland Borghi, Ana Zaragoza, Monserrat Espinosa; que tuve la fortuna de conocer en la carrera de ingeniería mecánica, y que sin su amistad y compañía no sería lo mismo.

A María Sorroza por todos sus consejos, el apoyo incondicional y sobre todo por su cariño.

A todos aquellos que no mencione y han estado presentes en distintas etapas de mi vida, he aprendido mucho de ustedes.

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Motivación	2
1.2. Estado del Arte	3
1.3. Objetivo general	4
1.4. Objetivos específicos	5
1.5. Organización de la tesis	5
2. Fundamento teórico	7
2.1. Principio de funcionamiento	8
2.1.1. Modelo estático	9
2.1.2. Modelo dinámico	13
2.2. Instrumentación	15
2.2.1. Sensores y transductores	17
2.2.2. Etapa de acondicionamiento	18
2.2.3. Adquisición de Datos	21
2.2.4. Procesamiento de señal	24
2.3. Control de sistemas	25
2.3.1. Controlador PID	27
2.3.2. Control Digital	29
2.3.3. Sintonización PID para actuadores blandos	30
2.4. Bancos de pruebas para actuadores blandos	31

2.4.1.	Banco de pruebas de Chou y Hannaford	31
2.4.2.	Banco de pruebas de Reynolds et al.	32
2.4.3.	Banco de pruebas de Najmuddin y Mustaffa	32
2.4.4.	Banco de pruebas de Tang y Chong	33
2.4.5.	Banco de pruebas de Caballero y Carbonell	33
2.4.6.	Banco de pruebas de Tondu y Lopez	34
3.	Caracterización y control	37
3.1.	Caracterización del músculo	37
3.2.	Caracterización del sensor de distancia	42
3.3.	Diseño de la aplicación	47
3.3.1.	Controlador PID	47
3.3.2.	Comunicación con el usuario	49
4.	Implementación y validación experimental	51
4.1.	Construcción del músculo neumático	51
4.2.	Diseño conceptual de un banco de pruebas	53
4.3.	Fabricación y selección de materiales	54
4.4.	Instrumentación mecánica y electrónica	57
4.4.1.	Montaje del sensor de distancia	62
4.4.2.	Instrumentación mecatrónica	64
4.5.	Adquisición de datos y procesamiento de señal	65
4.6.	Programación	72
4.6.1.	Sintonización del controlador	73
5.	Conclusiones	83
5.1.	Trabajo a futuro	84
A.	Modelo viscoelástico de Kelvin-Voigt	89

B. Instrumentación	93
B.1. Manómetro	94
B.2. Hojas de especificaciones del sensor Sharp GP2Y0A21	96
B.3. Hojas de especificaciones válvula proporcional ITV series	105
C. Planos y diagramas	121
C.1. Plano de estructura del banco de pruebas	122
C.2. Plano de base para sensor Sharp	123
C.3. Diagrama de conexiones	124

Capítulo 1

Introducción

La automatización de procesos y la robótica son áreas que se desarrollan en la mayoría de los sectores industriales como el manufacturero, alimenticio, energético, automotriz, farmacéutico, aeroespacial, agroindustrial, electrónico, de electrodomésticos, de la salud y otros más. Hoy en día existe una tendencia cada vez mayor a dichas áreas, ya que ayudan en la mejora de los procesos y también contribuyen a la mejora de la calidad de los productos y servicios que se comercializan.

Es por ello que se estudia el desarrollo de nuevos dispositivos especializados, entre los que se encuentran los actuadores blandos. Éstos se desarrollan con materiales de gran capacidad de deformación elástica, por lo que, pueden conformar un dispositivo que se ajuste al entorno real, resultando su utilización como una alternativa segura, robusta y eficiente. Lo más destacable es que permite establecer un nuevo paradigma respecto al tipo de transmisión de fuerzas rígido que se utiliza en la actualidad. Entre las ventajas de un actuador blando respecto a un actuador rígido se encuentran que las capacidades de respuesta y transmisión no están basadas solamente en el sistema de control, sino también en las propiedades de los materiales que componen al actuador y de la morfología de dicha composición [Medina y Vélez, 2014].

A nivel teórico, una diferencia importante entre los actuadores rígidos y los actuadores blandos es la formulación del modelo matemático con el cual se implementa la ley de control que lo rige [Khan et al., 2020]. La desventaja de no poder tener una ecuación

lineal para los actuadores blandos es que la etapa de control se complica. Es por ello que se realiza investigación de este tipo de actuadores, con el fin de desarrollar un modelo matemático idóneo y así implementar un algoritmo de control acorde a su principio de funcionamiento. La sustitución de actuadores rígidos por blandos presenta un avance no solamente para el sector industrial y la automatización de procesos, sino también en el desarrollo de órtesis y prótesis. Estos dispositivos ayudan a los seres humanos que han sufrido algún tipo de lesión, o bien la amputación de alguno de sus miembros. La idea de implementarlos es que el individuo pueda recuperar la movilidad que perdió; además de tener un mejor proceso de rehabilitación. También lo que se busca es que el dispositivo se adapte al individuo y no el individuo al dispositivo.

Existe una gran variedad de actuadores blandos, sin embargo, en el presente trabajo se estudia el músculo neumático tipo McKibben. Se pretende caracterizar este actuador y posteriormente implementar una ley de control que sea la base de futuros trabajos de investigación.

1.1. Motivación

El ser humano es propenso a sufrir lesiones que tengan que ser atendidas mediante rehabilitación o bien que conlleven la pérdida de alguna extremidad, es por ello que surgen las órtesis y las prótesis. Éstas pueden ser desarrolladas con varias tecnologías, una de ellas es la implementación de músculos artificiales ya que su diseño está inspirado en el funcionamiento de músculos biológicos. En este sentido, el músculo neumático McKibben es capaz de ejecutar movimientos rápidos y con gran fuerza. Otra de sus principales características es que ocupa muy poco espacio y es de fácil montaje, lo que podría llegar a generar un gran impacto en la rehabilitación de pacientes que tengan movimientos limitados en sus extremidades o bien, sufran alguna lesión. El Club de Mecatrónica de la FES Aragón participa en el desarrollo de proyectos que vinculen a sus miembros con la sociedad y generen un impacto benéfico para las personas. Por ello es que se pretende establecer las bases que permitan implementar un prototipo de órtesis o prótesis con el

fin de contribuir en el desarrollo de dispositivos que estén en favor de las personas que por algún motivo perdieron la movilidad de alguna extremidad. Sin embargo, la incorporación del músculo neumático McKibben a los dispositivos, al igual que la de otros actuadores blandos, es complicada ya que no se ha podido establecer un modelo matemático que describa exactamente el funcionamiento de este actuador, y por ende, no es posible diseñar una ley de control acorde.

1.2. Estado del Arte

La automatización permite que un sistema desarrolle ciertos procesos o tareas sin la intervención del ser humano. Una de las practicas más comunes en la automatización, es la inclusión de robots. Actualmente la mayoría de ellos se componen por eslabones rígidos, sin embargo, recientemente se han diseñado e implementado robots blandos que son accionados por actuadores como el músculo McKibben.

Un músculo neumático es un actuador cuyo principio de funcionamiento está inspirado en el de los músculos biológicos. En la década de los cincuenta el físico e ingeniero Joseph McKibben desarrolló el músculo neumático que lleva su nombre, tratando de asistir a su hija que tenia paralizadas las manos debido a la polio [Gurstelle, 2015]. Los materiales con los que se desarrolló el actuador fueron un tubo interno de caucho que era cubierto por una malla entrelazada de fibras, hechas de polietileno. El principio de funcionamiento de esta primera versión del músculo neumático era que, cuando en el tubo interior entraba el aire y aumentaba la presión interna, el músculo aumentaba su volumen y al mismo tiempo se contraía. Por el contrario cuando la presión interna disminuía se reducía su volumen y su longitud se extendía. Debido a la configuración de los materiales con los que se construye el músculo McKibben, tiene características similares a las de un resorte de rigidez variable y elasticidad pasiva no lineal, además de ser ligero comparado con otros tipos de músculos artificiales [Chou y Hannaford, 1996].

Paulatinamente se demostraron ciertas ventajas frente a los actuadores convencionales, como los servomotores, motores de corriente directa y pistones hidráulicos y neumáticos,

etc, tal y como su comportamiento dinámico, la ligereza con la que contaban y su bajo costo de fabricación. Sin embargo, fueron desechados porque en el año en que se desarrolló este actuador se utilizaban enormes tanques de CO_2 para alimentarlo [Caballero y Carbonell, 2003]. Posteriormente, en la década de los ochenta el músculo McKibben es retomado por la empresa Bridgeston en Japón, con la marca “Rubbertuator”, y fue utilizado principalmente para accionar brazos robóticos industriales. A lo largo del tiempo también se han desarrollado otro tipo de músculos neumáticos como lo son: el plisado, enredado, Yarlott, Kukolj, músculo artificial bajo presión (UPAM), por mencionar algunos. Sin embargo, el músculo neumático tipo McKibben presenta propiedades que no tiene ninguno de estos músculos, lo que hace el actuador ideal para la robótica. Sus propiedades son: una gran fuerza inicial superior, gran velocidad de respuesta, mayor robustez y que puede ser usado en ambientes peligrosos, además de ser montado en cualquier posición sin perder sus propiedades [Daerden y Lefeber, 2000].

Actualmente una de las principales empresas que se dedica a fabricar músculos neumáticos industriales es Festo. El músculo que desarrolla esta compañía se basa en el músculo McKibben con el que se han desarrollado aplicaciones para tareas como sujetar, elevar, prensar, cortar, desplazar y posicionar. Una de las principales sustituciones del cilindro convencional se encuentra en bombas, donde se cambian los pistones por músculos McKibben, los cuales transmiten la fuerza necesaria al fluido y así realizar la transformación de energía mecánica en hidráulica. Otra sustitución importante se da en los mecanismos de actuación de órtesis y prótesis, accionando movimientos de brazos y piernas con el músculo McKibben. Por lo tanto, el campo de acción de este actuador es muy amplio, sustituyendo así a los actuadores rígidos, como los cilindros neumáticos e hidráulicos [Hesse, 2003].

1.3. Objetivo general

El objetivo general del presente trabajo es caracterizar un músculo neumático tipo McKibben de fabricación casera. Además, obtener un modelo matemático que será comparado con los modelos ya disponibles en la literatura para posteriormente implementar

un esquema de control para su accionamiento.

1.4. Objetivos específicos

Dentro de los objetivos particulares se encuentran:

- Implementar un músculo neumático tipo McKibben con materiales fáciles de conseguir.
- Fabricar un banco de pruebas y seleccionar los componentes necesarios para caracterizar al músculo y obtener su modelo matemático.
- Implementar una sistema de control mediante una tarjeta de adquisición de datos, usando software especializado en procesamiento de señales.

1.5. Organización de la tesis

Esta tesis está organizada de la siguiente manera: en el Capítulo 2 se presenta el fundamento teórico del músculo McKibben. En el Capítulo 3 se muestra la base técnica de la implementación del banco de pruebas. El Capítulo 4 muestra la validación experimental de la construcción de un músculo McKibben. Por último el Capítulo 5 muestra las conclusiones de la tesis, así como algunas recomendaciones para el trabajo a futuro.

Adicionalmente, se presentan los anexos A, B y C donde se encuentran el modelo viscoelástico de Kelvin-Voigt, hojas de especificaciones de los dispositivos utilizados así como los diagramas y planos que se diseñaron para la fabricación de componentes.

Capítulo 2

Fundamento teórico

En este capítulo se presenta la teoría necesaria para comprender el principio de funcionamiento del músculo neumático tipo McKibben, incluyendo las leyes y propiedades físicas que lo rigen. Así mismo, se introduce la teoría de instrumentación de sistemas, la cual abarca desde como captar una señal física y convertirla en una señal eléctrica hasta el procesamiento de la misma. Además, se presentan conceptos acerca del control de sistemas y de las distintas configuraciones que existen, y que pueden ser aplicadas, dependiendo de la necesidad y requerimientos de algún sistema o proceso.

También, se incluyen las partes más importantes de algunos bancos de pruebas que se han desarrollado para someter experimentalmente al músculo neumático a ciertas condiciones de trabajo, con las cuales se obtienen sus características físicas hasta hoy estudiadas y que contribuyen al desarrollo de este actuador para obtener su máximo rendimiento. Por último, se presentan algunas leyes de control que han sido aplicadas al músculo, así como sus principales ventajas y desventajas para el buen funcionamiento de éste.

Existen distintos modelos matemáticos que pueden ser estáticos y dinámicos con los que se intenta describir el comportamiento de los sistemas físicos. Para formular estos modelos, se parte de ciertas hipótesis. En el caso de los modelos estáticos, se parte de la hipótesis de que el trabajo de entrada es igual al de salida. Por otro lado, en el caso de los dinámicos, se utilizan modelos viscoelásticos como el de Kelvin-Voigt, el cual se presenta Apéndice A.

Para controlar un sistema es necesario conocer sus características. Para ello, es indispensable contar con plataformas experimentales con las que se evalué el comportamiento de dicho sistema siendo sometido a distintas pruebas, bajo la observación y supervisión de expertos. Estas plataformas experimentales son denominadas bancos de pruebas y cuentan con sistemas de adquisición de datos, sistemas de instrumentación y sistemas de control. Por todos estos sistemas que componen a las plataformas experimentales es que en sus aditamentos se encuentran sensores, etapas de amplificación de señales, procesamiento de datos, algoritmos de control, señales de respuesta y actuadores.

2.1. Principio de funcionamiento

El músculo neumático McKibben está conformado por un tubo interno y una malla entrelazada. Un extremo está sellado, y en el otro se encuentra la entrada de alimentación. Al introducir aire a presión, el tubo comienza a expandirse en sentido transversal, lo que provoca que la malla comience a ejercer una tensión en sentido tangencial a la cámara interna de dicho tubo y perpendicular a su eje axial.

Como se muestra en la Figura 2.1, la malla se encuentra entrelazada en forma de rombo. Gracias a esta geometría, las fibras ejercen una fuerza perpendicular al eje axial del tubo, lo que provoca un desplazamiento, y por lo tanto, la elongación en el actuador.

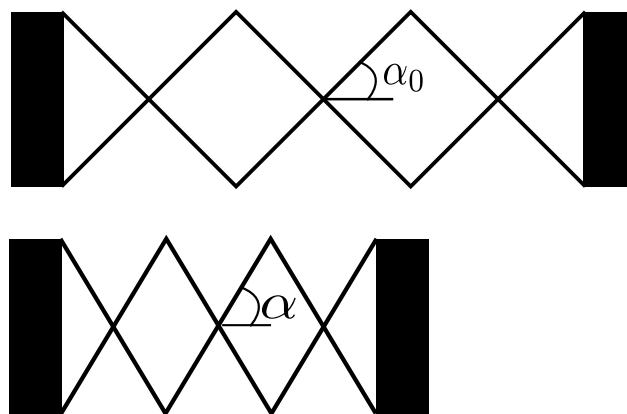


Figura 2.1: Fibras entrelazadas geométricamente [Caballero y Carbonell, 2003]

El proceso descrito tiene un máximo y un mínimo de elongación y está en función del ángulo que se forma entre las fibras entrelazadas de la malla y el eje axial del tubo interno.

A partir del principio descrito, Tondu y Lopez [2000] proponen una parametrización del actuador. Con ello se obtiene un modelo matemático, el cual es importante para describir su comportamiento. A continuación se enlistan dichos parámetros.

- α_0 se forma por la intersección del eje del tubo interno, con cada hilo de la malla trenzada antes de su expansión.
- ℓ_0 se define como la longitud inicial activa, es decir, la longitud de la capa muscular, antes de que el aire ejerza alguna presión.
- r_0 se define como el radio del tubo interior que esta en contacto con la malla entrelazada, lo que implica considerar una cámara de pared muy delgada. Gracias a ello se puede transmitir completamente la presión hacia dicha malla.

Usando los parámetros anteriores, tanto Tondu y Lopez [1997] como Chou y Hanaford [1994], establecen el modelo matemático del músculo, partiendo del principio de conservación de la energía.

2.1.1. Modelo estático

Se usa el principio de conservación de la energía debido a que el músculo McKibben es un actuador que transforma energía neumática en mecánica. Asumiendo que el actuador se encuentra en condiciones ideales se puede decir que la energía que entra al sistema es la misma energía que sale, por lo tanto se cumple la ecuación

$$dW_{\text{sal}} = dW_{\text{ent}} , \quad (2.1)$$

donde dW_{ent} es el trabajo de entrada que se realiza cuando el aire empuja la superficie interna por lo que

$$dW_{\text{ent}} = P dV , \quad (2.2)$$

donde $P' = P - P_o$ es la presión relativa, P es la presión interna, P_o es la presión atmosférica y dV es la razón de cambio del volumen del músculo.

El trabajo de salida dW_{sal} se realiza cuando el actuador se comprime, esto asociado al cambio de volumen, y siendo igual a

$$dW_{\text{sal}} = -FdL, \quad (2.3)$$

donde $F =$ Tensión axial, $dL =$ Cambio de desplazamiento

Sustituyendo las ecuaciones (2.2) y (2.3) en (2.1) se obtiene

$$-FdL = P'dV \quad (2.4)$$

y

$$F = -P' \frac{dV}{dL} \quad (2.5)$$

Ahora bien, es necesario considerar la geometría del músculo para describir el cambio de posición de las fibras de la malla respecto al volumen. Dichas fibras forman un ángulo θ con respecto al eje axial del músculo como se muestra en la Figura 2.2. Aunque no es un cilindro perfecto, trabaja como si lo fuese, lo que permite que la ecuación (2.5) quede en función de θ , simplificando así el modelo matemático.

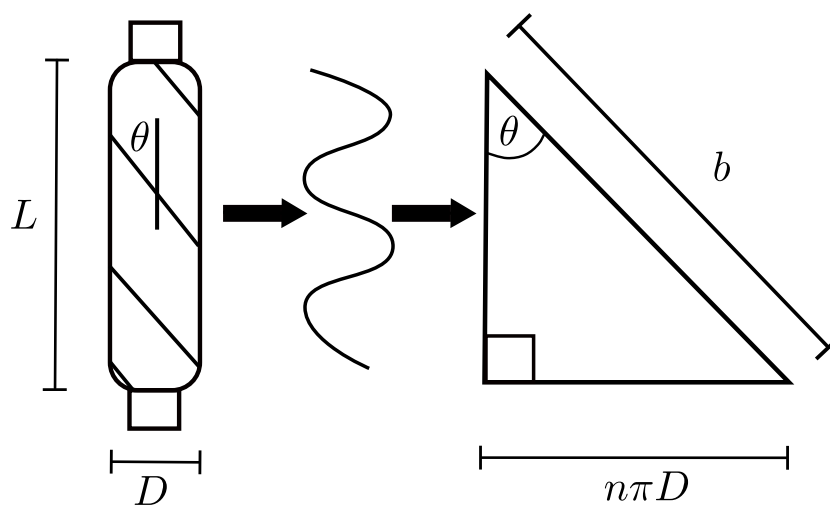


Figura 2.2: Geometría del músculo McKibben [Chou y Hannaford, 1996]

En la Figura 2.2 se observa un triángulo rectángulo que representa la intersección de un hilo de la malla con el eje axial, donde θ es el ángulo formado entre el eje axial y la malla, b es la longitud entre valle y cresta, n es el número de vueltas del hilo, D es el diámetro y L es la longitud del músculo. Utilizando identidades trigonométricas se puede establecer

$$D = \frac{b \sin \theta}{n\pi} \quad (2.6)$$

y

$$L = b \cos \theta. \quad (2.7)$$

Además, el volumen de un cilindro se define como

$$V = \frac{1}{4}\pi D^2 L \quad (2.8)$$

Sustituyendo (2.6) y (2.7) en (2.8) se obtiene

$$V = \frac{b^3 \sin^2 \theta \cos \theta}{4\pi n^2}. \quad (2.9)$$

Para que la ecuación (2.5) quede en términos de θ es necesario derivar (2.7) y (2.9), obteniendo

$$\frac{dL}{d\theta} = -b \sin \theta \quad (2.10)$$

y

$$\frac{dV}{d\theta} = \frac{b^3 \sin \theta (2 \cos^2 \theta - \sin^2 \theta)}{4\pi n^2}. \quad (2.11)$$

Sustituyendo (2.10) y (2.11) en (2.5) se obtiene

$$F = \frac{P' b^2 (3 \cos^2 \theta - 1)}{4\pi n^2}. \quad (2.12)$$

La ecuación (2.12) establece que la fuerza que actúa en el músculo es linealmente proporcional a la presión y está en función del ángulo θ que se forma en la malla respecto al eje axial del actuador y cuyo rango se encuentra entre 0° y 90° . El encogimiento máximo se alcanza cuando $F = 0$, esto es $\theta = 54.7^\circ$. Por otro lado cuando $\theta = 90^\circ$ la ecuación (2.12) cambia a

$$F = \frac{\pi D_0^2 P'}{4} (3 \cos^2 \theta - 1), \quad (2.13)$$

donde $D_0 = b/n\pi$ es el diámetro cuando $\theta = 90^\circ$. Aunque el modelo de la ecuación (2.13) se obtuvo partiendo de un cilindro ideal, la fuerza siempre se puede obtener conociendo la derivada dV/dL de cualquier actuador de forma arbitraria mediante la ecuación (2.5) [Chou y Hannaford, 1996].

Basándose en lo anterior, Tondu y Lopez [1997] desarrollaron un modelo matemático aproximado del músculo. El actuador es visto como un cilindro presurizado de pared delgada definido por su longitud inicial ℓ_0 y su radio inicial r_0 . De forma similar que en el modelo propuesto por Chou y Hannaford [1994], se forma un ángulo α , como se muestra en la Figura 2.3. Cuando el músculo se encuentra en condiciones iniciales, el ángulo es llamado α_0 .

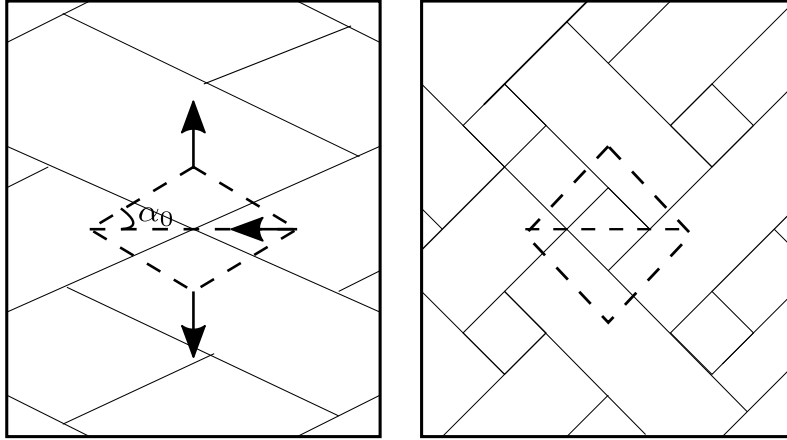


Figura 2.3: Representación del ángulo α [Tondu y Lopez, 1997]

También se toma en cuenta un coeficiente k , esto debido a que durante la contracción el músculo no puede mantener su forma cilíndrica en los extremos si se considera el modelo en función de la elongación máxima. La ecuación

$$F(\varepsilon) = \pi r_0^2 P \left[a(1 - k\varepsilon)^2 - b \right], \quad 0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{\max} \quad (2.14)$$

donde $a = 3/\tan^2(\alpha_0)$, $b = 1/\sin^2(\alpha_0)$ y $\varepsilon_{\max} = (1/k)(1 - \sqrt{b/a})$ expresa la fuerza F generada por el actuador para una presión P dada, en función de la relación de contracción dada por la diferencia de elongación ε . También se deben de definir los parámetros iniciales

en función del músculo, es decir, ℓ_0 , r_0 , α_0 y k que cambiaran al tratarse de un músculo diferente.

Los modelos de las ecuaciones (2.12) y (2.14) parten del principio de conservación de la energía. Haciendo una comparación observamos que las ecuaciones son similares y que ambos modelos sirven para analizar el actuador. Sin embargo, al hacer tantas suposiciones, no son del todo precisos, además de que no toman en cuenta fenómenos como lo son la histéresis. Esto provoca que el músculo no siempre tenga la misma repetibilidad en cuanto al cambio de longitud, aún cuando parte del mismo valor de presión de entrada. También hay que tomar en cuenta de que se parte de condiciones ideales sin contemplar, por ejemplo, deformaciones en el entrelazado de la malla o la deformación del tubo interno. A pesar de todo lo anterior la teoría presentada es útil para entender el principio físico de funcionamiento del músculo neumático McKibben, y también da paso al desarrollo de nuevos modelos matemáticos.

2.1.2. Modelo dinámico

Uno de los principales problemas con los músculos neumáticos McKibben y en general con todos los actuadores neumáticos, es la alta compresibilidad del gas [Reynolds et al., 2003]. Además, el sistema presenta no linealidades en el tubo interno dado que su área se expande proporcionalmente al cuadrado de su diámetro. Como se demuestra en los modelos estáticos, la longitud del músculo depende de de las relaciones trigonométricas del entrelazado de la malla, lo que implica también la existencia de no linealidades.

Tras las consideraciones mencionadas y tomando en cuenta la Figura 2.4, Reynolds et al. [2003] proponen el modelo dinámico

$$M\ddot{y} + B\dot{y} + Ky = F_{Ce} - Mg, \quad (2.15)$$

donde K es la constante de proporcionalidad elástica, B el coeficiente de amortiguamiento, M la masa que se desea desplazar, $M\ddot{y}$ es la carga inercial, Mg es la fuerza externa y F_{Ce} es la fuerza contráctil que depende de factores geométricos, así como del espesor formado entre la malla y el tubo interno.

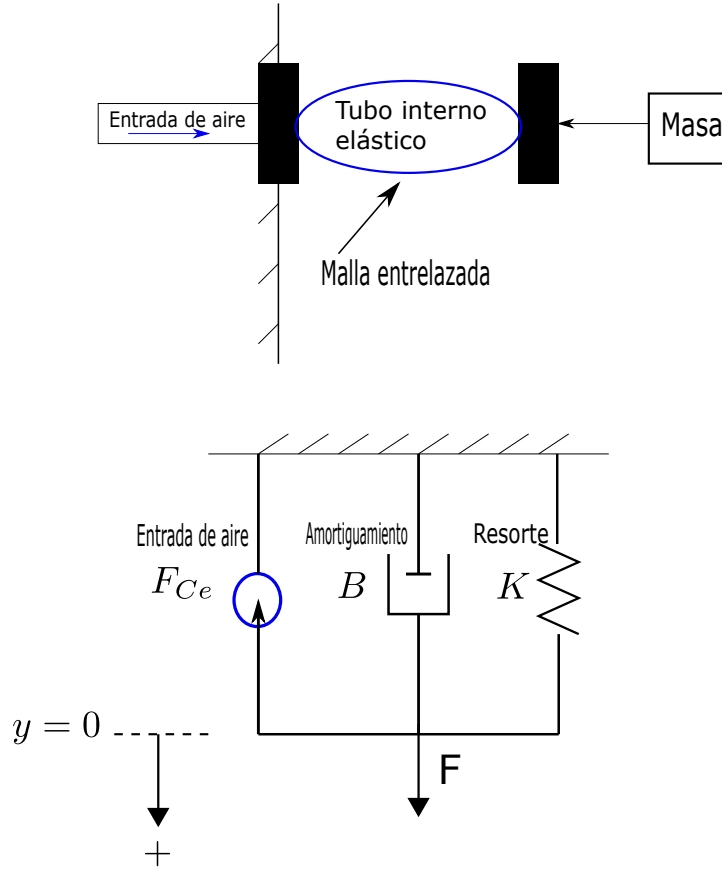


Figura 2.4: Representación mecánica del músculo McKibben [Reynolds et al., 2003]

Tomando en cuenta la Figura 2.5, Caballero y Carbonell [2003] proponen la ecuación

$$M(t)\ddot{x} + B(\dot{x})\dot{x} + K(x)x = u + d(t, x, \dot{x}, \ddot{x}, u), \quad (2.16)$$

basada en las propiedades mecánicas y neumáticas del músculo y donde $K(x)$ es la constante de proporcionalidad elástica, $B(\dot{x})$ es el coeficiente de amortiguamiento, $d(t, x, \dot{x}, \ddot{x}, u)$ son no linealidades y términos de desviación y $M(t)$ es la masa que se desea mover.

Se observa que los modelos presentados en las ecuaciones (2.15) y (2.16) son muy parecidos y parten de los mismos principios, es decir, ambos presentan un elemento viscoso, un elemento elástico y una fuente de presión. También se tiene que la configuración es la misma, se encuentran en paralelo el uno del otro y los dos pretenden mover una carga. En la ecuación (2.15) la perturbación se considera como el peso del objeto a mover, mientras que en la ecuación (2.16) representa las no linealidades. Ambas ecuaciones ayudan a

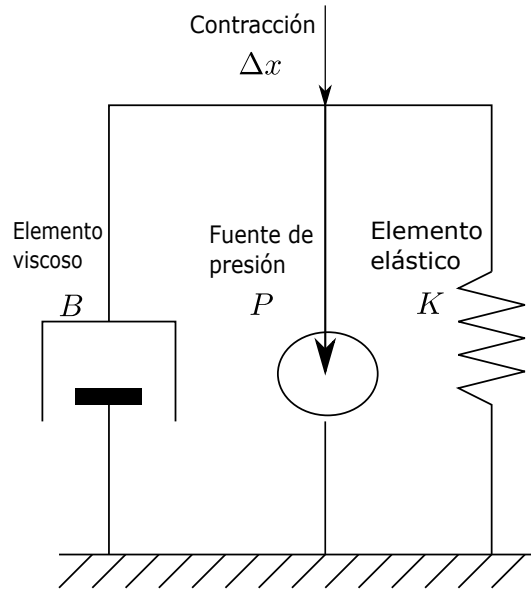


Figura 2.5: Representación del músculo McKibben [Caballero y Carbonell, 2003]

comprender mejor el funcionamiento del músculo McKibben. Sin embargo, no son del todo exactas, sucediendo lo mismo que con los modelos estáticos. .

2.2. Instrumentación

La instrumentación es una rama de la ingeniería cuyo objetivo es obtener información del entorno, de un sistema o de un proceso, haciendo uso de cualquier tipo de técnicas para la identificación y cuantificación de sus variables [Pérez García, 2014]. La más utilizada hoy en día es la instrumentación electrónica, que se encarga de la conversión de mediciones físicas en magnitudes eléctricas y de su posterior tratamiento digital. El objetivo final es proporcionar información de un sistema de control a un operador [Álvarez et al., 2006].

En la Figura 2.6 se tiene la estructura básica de un sistema de instrumentación electrónica. El sensor capta la información de una variable x que es la que interesa medir. Al momento de que el sensor capta la información de la variable, en la salida se produce una señal eléctrica. Después, esta señal entra a un bloque de acondicionamiento para obtener a la salida un valor aceptable de voltaje o corriente.

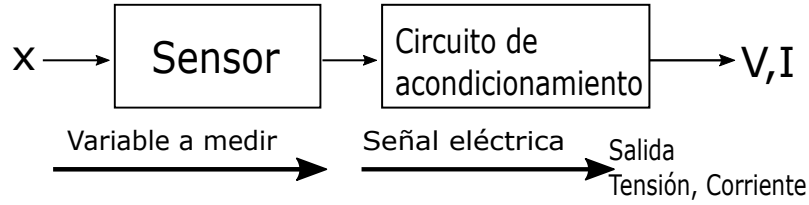


Figura 2.6: Instrumentación electrónica [Pérez García, 2014]

Otra técnica de instrumentación es la mecánica, la cual es utilizada principalmente para medir flujo, presión, temperatura y nivel de líquidos. Los instrumentos de medición mecánica como los indicadores de nivel, manómetros y termómetros se encuentran principalmente en la industria y en laboratorios de investigación, debido a su fiabilidad en las mediciones y a que son de fácil instalación.

Los sistemas que se encargan de captar las señales físicas de un sistema y transformarlas en señales eléctricas se denominan sistemas de instrumentación. Como se muestra en la Figura 2.7, están compuestos principalmente por una etapa de adquisición de datos, una etapa de procesamiento y una etapa de envío de datos.

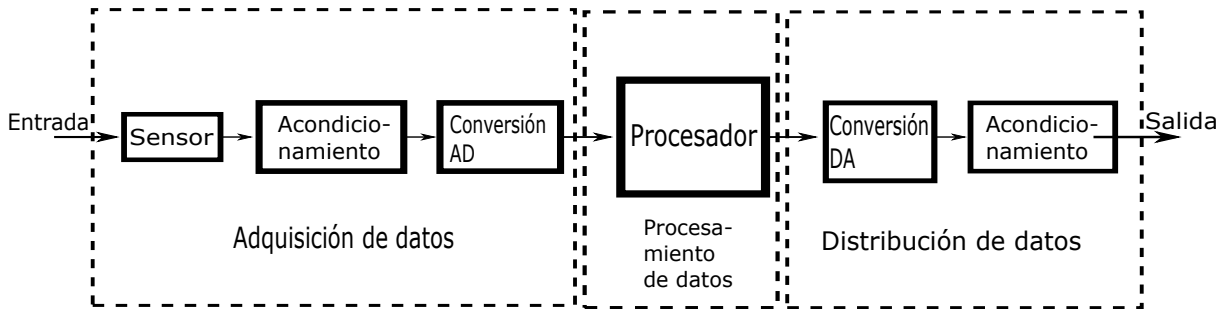


Figura 2.7: Estructura de un sistema de instrumentación [Álvarez et al., 2006]

Los sensores son aquellos dispositivos que capturan el comportamiento de las variables físicas de interés. Posteriormente, dicho comportamiento se convierte en una señal eléctrica que ingresa a una etapa de acondicionamiento donde será tratada para usarse en el sistema de instrumentación. Después, pasa a un módulo de conversión para ser transformada digitalmente. Al final ingresará a un controlador, el cuál será el encargado de llevarla a un proceso de envío de datos. En muchas ocasiones se utiliza un sistema de

instrumentación para acoplarlo a un sistema de control, de tal forma que con se tenga un mejor aprovechamiento del proceso.

2.2.1. Sensores y transductores

Actualmente los sensores y transductores son indispensables en la automatización industrial, el control de procesos, la robótica, los sistemas de ahorro de energía y en todo aquel sistema cuyas variables sean medibles. En un sistema de adquisición de datos, así como en un sistema de instrumentación, la utilización de sensores y transductores es indispensable. Se denomina transductor a todo dispositivo que convierte una magnitud física en otra de distinta naturaleza. Normalmente un transductor convierte señales mecánicas, térmicas, magnéticas, ópticas y químicas en señales eléctricas. Por otra parte, un sensor es un dispositivo que a partir del medio en donde se encuentra proporciona una señal de salida transducible que es función de la variable medida [Areny, 2005].

Los sensores y transductores pueden ser analógicos o digitales. El término analógico hace referencia a una salida que cambia de forma continua y es proporcional al tamaño de la variable que se mide. En cambio, el término digital se emplea cuando la salida del sensor arroja un valor discreto cuyo valor se relaciona con el tamaño de la variable que se esta midiendo [Bolton, 2002]. Muchas veces lo que determina que un sensor sea analógico o digital depende de la variable medida. También puede referirse a si viene acompañado de una etapa de acondicionamiento de señal. En algunas ocasiones los fabricantes de sensores implementan etapas de acondicionamiento, en donde se procesan la señales de manera digital o analógica dependiendo de la estructura interna del sensor. En otras ocasiones, el fabricante diseña dichos sensores con la posibilidad de que se maneje ambas configuraciones y al final quien decide si es mejor usarlo como analógico o digital es el usuario. Es muy importante saber utilizar los sensores y transductores ya que fungen como el vinculo que se tiene con el proceso y son quienes brindan la información necesaria para saber qué esta pasando en cualquiera de sus etapas.

Se debe de tomar en cuenta que no todos los sensores miden de forma exacta y precisa,

casi todos necesitan de una calibración, una linealización o una caracterización para producir una medida confiable. Por lo tanto, es importante someterlos a pruebas necesarias bajo las condiciones en las que trabajarán para así reducir errores de medición.

2.2.2. Etapa de acondicionamiento

La etapa de acondicionamiento de señal consiste en una serie de circuitos electrónicos que constan de etapas de amplificación, filtrado y en algunos casos convertidores analógicos-digitales. En un sistema de instrumentación, como el que se muestra en la Figura 2.7, se observa que en el bloque de adquisición de datos y a la salida del sensor, se encuentra el bloque de acondicionamiento. Este bloque tiene como objetivo amplificar las señales producidas por los sensores ya que suelen ser pequeñas y, por tanto, susceptibles de verse perturbadas por desplazamientos y ruido, o bien, resultan complejas de manejar en las siguientes etapas de procesamiento [Areny, 2005]. Las etapas mencionadas se describen a continuación.

- **Amplificación:** El objetivo de esta etapa es transformar la señal de entrada en una con la magnitud necesaria para ser admitida por el siguiente bloque. Esto se realiza mediante un amplificador operacional con la capacidad de realizar dicha operación de amplificación mediante el ajuste de una ganancias [Pérez García, 2014]. El bloque de amplificación podrá estar constituido por una o varias etapas y también podrá contener uno o mas amplificadores.
- **Filtrado:** Los filtros son circuitos que se emplean para recortar el ancho de banda al estrictamente necesario y reducir la posibilidad de que señales no deseadas pasen a formar parte de la información que el sensor capta. Existen muchos tipos de filtros en función de cómo se implementen, desde los formados solamente por componentes pasivos, hasta los realizados por complejas funciones matemáticas en los procesos digitales de señal [Pérez García, 2014]. El término pasivo describe un filtro en el cual solo esta conformado por resistencias, capacitores e inductores. El término activo se refiere a un filtro en el que también hay un amplificador operacional. Los filtros

pasivos tienen la desventaja de que la corriente que absorbe el siguiente elemento puede modificar la frecuencia del filtro. Este problema no se presenta en los filtros activos [Bolton, 2002].

Normalmente se utilizan los filtros activos para el procesamiento de señales de instrumentación y fundamentalmente están enfocados en mejorar la relación señal-ruido. En la Figura 2.8 se muestran los cuatro tipos de filtros que se utilizan y qué los diferencia a cada uno de ellos.

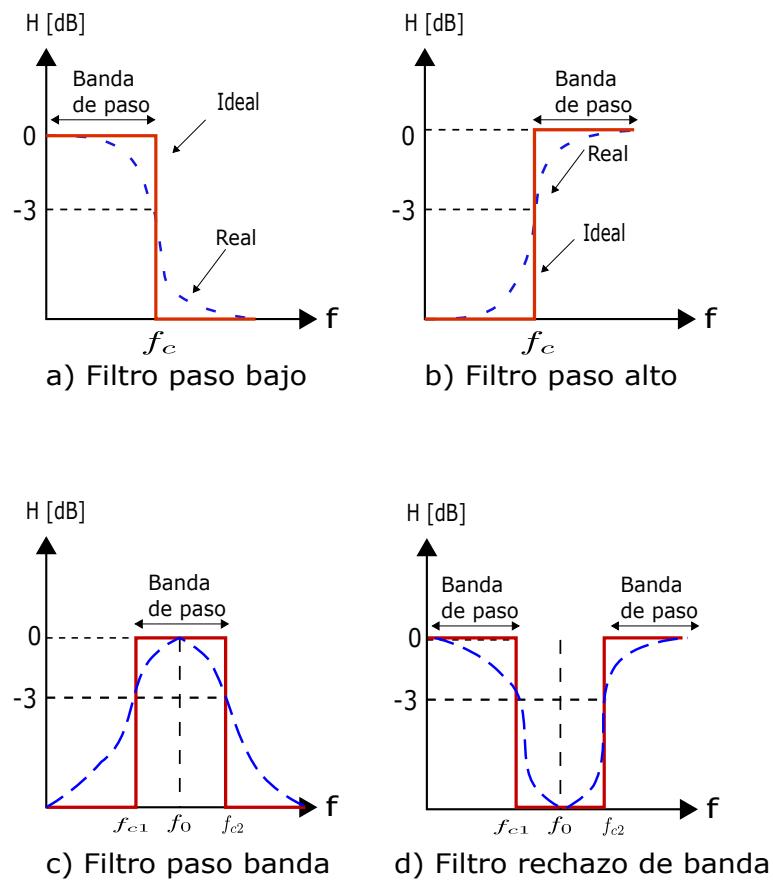


Figura 2.8: Tipos de filtros [Pérez García, 2014]

- a) Filtro pasa-bajas: pone un límite superior a la máxima frecuencia que deja pasar.
- b) Filtro pasa-altas: limitan la máxima frecuencia que deja pasar.

- c) Filtro pasa-banda: limita la máxima frecuencia y también la mínima.
 - d) Filtro de rechazo de banda: evita el paso de señales entre dos determinadas frecuencias.
- Conversión analógico-digital: La mayoría de los sensores proporcionan una salida analógica y los microcontroladores y microprocesadores trabajan con señales digitales. Es por eso que en la parte de acondicionamiento de señal, la etapa de conversión analógico-digital es importante ya que es lo que vincula a la etapa de adquisición de datos con la de procesamiento de datos.

Una variable analógica es aquella que puede presentar cualquier valor dentro de su rango de medición. Lo que implica que tiene resolución infinita ya que el hecho de contar con valores intermedios entre dos cualesquiera, lleva a que el número total de valores sea infinito. Por otro lado, una variable digital es aquella que solo puede presentar un conjunto finito de valores en su rango de medición. En comparación con las variables analógicas, en las digitales no siempre es posible encontrar valores intermedios, por lo que su resolución es finita.

En los sistemas de instrumentación actuales, la mayoría de las variables se procesan en el ámbito digital mediante algún microprocesador o microcontrolador por lo que es necesario pasar de uno a otro contexto mediante un dispositivo específico denominado convertidor analógico-digital. En la Figura 2.9 se muestra el diagrama de bloques de un convertidor Analógico-Digital.

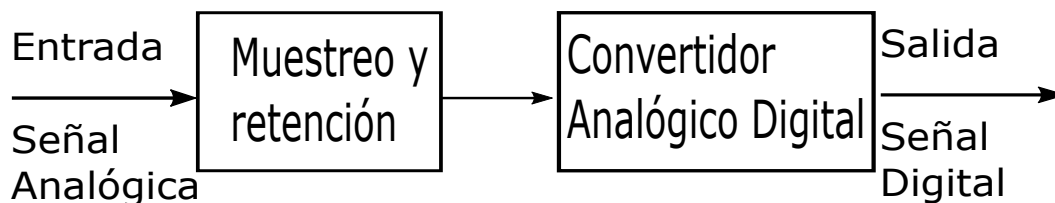


Figura 2.9: Convertidor Analógico-Digital [Pérez García, 2014]

En la Figura 2.10 se muestra cómo se convierte una señal analógica en una digital.

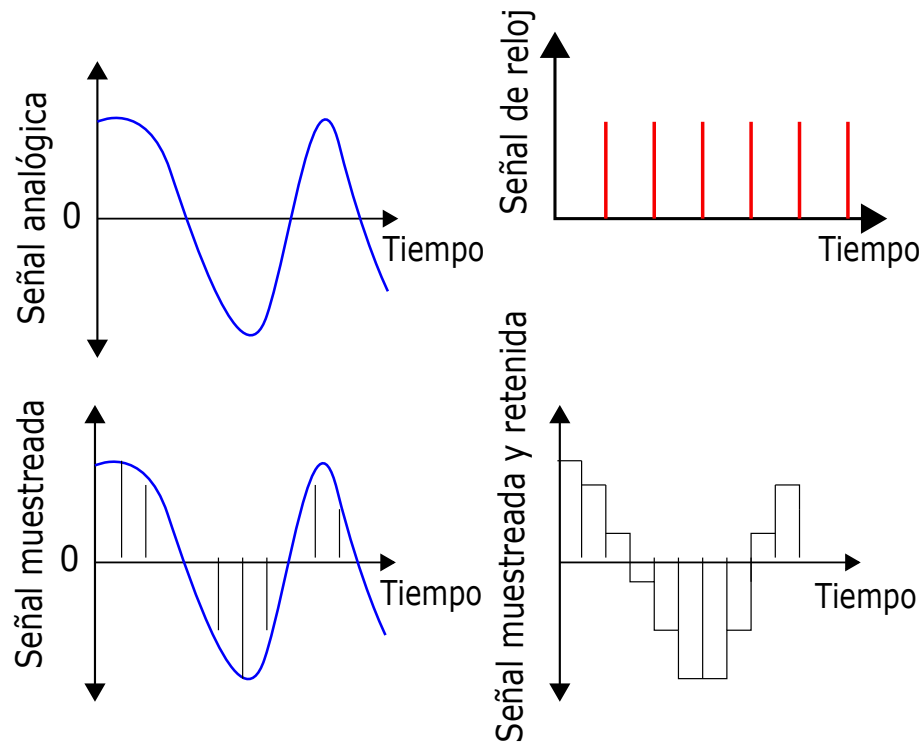


Figura 2.10: Conversión Analógico-Digital [Bolton, 2002]

El proceso consta de un reloj que manda pulsos de señales a tiempos regulares a un convertidor analógico-digital y cada vez que éste recibe un pulso de la señal analógica, el resultado del muestreador es una serie de pulsos angostos. Una unidad de muestreo y retención se utiliza para mantener cada valor muestreado hasta que el siguiente pulso ocurra. Esto es muy importante ya que el convertidor requiere una cantidad finita de tiempo, llamado tiempo de muestreo, para convertir la señal analógica en digital.

2.2.3. Adquisición de Datos

Una parte fundamental de un sistema de instrumentación es el sistema de adquisición de datos, que es aquel cuyas entradas provenientes de los sensores están convertidas a la forma digital para su procesamiento, análisis y exhibición en una computadora [Bolton, 2002]. Está conformado por sensores, conexiones y una etapa de acondicionamiento de

señal. A su vez, dicho acondicionamiento está compuesto por etapas de amplificación, filtrado, linealización y conversión, como se muestra en la Figura 2.11.

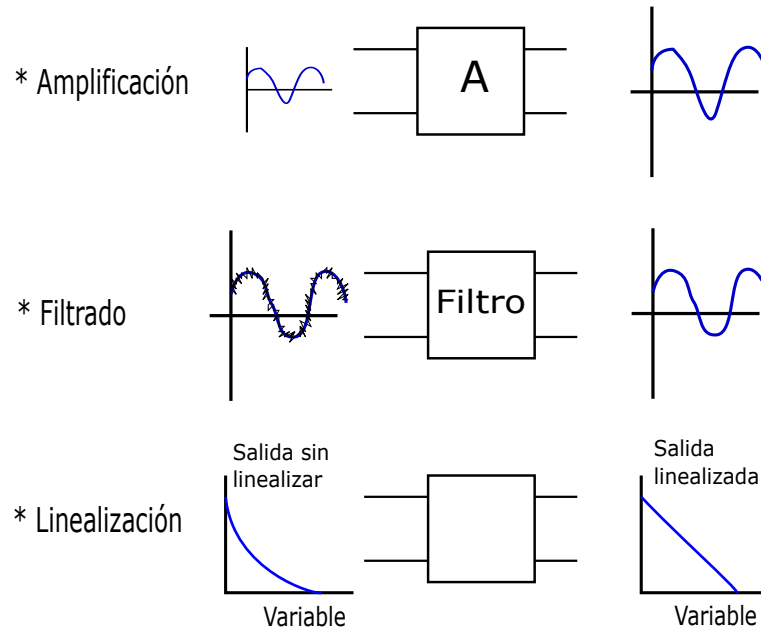


Figura 2.11: Acondicionamiento de una señal eléctrica

En la Figura 2.12 se muestra la composición de un sistema de adquisición de datos. También se observa que la parte de acondicionamiento de la señal está conectada a una tarjeta. Hoy en día, con el avance de la instrumentación y la electrónica, se han desarrollado tarjetas de adquisición que son capaces de procesar los datos obtenidos.

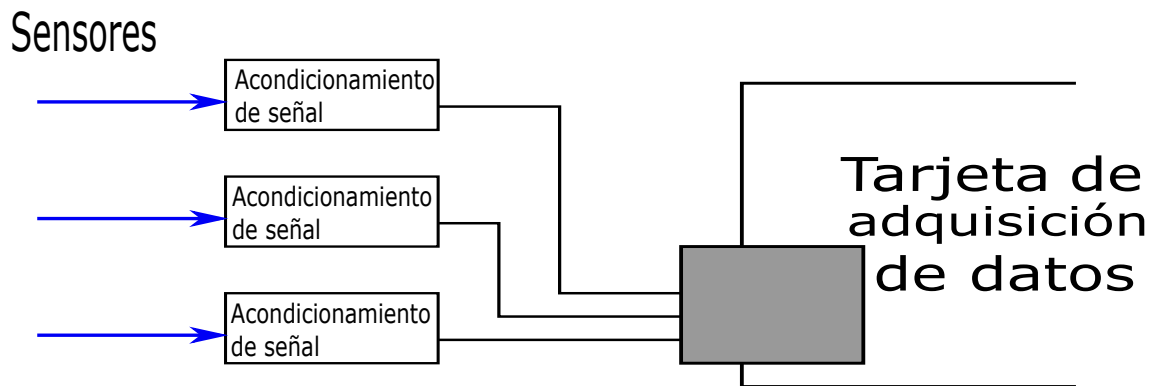


Figura 2.12: Sistema de adquisición de datos [Bolton, 2002]

En la Figura 2.13 se muestran los elementos básicos de una tarjeta de adquisición de datos, los cuales son las entradas y salidas digitales, entradas y salidas analógicas, convertidores analógico-digital, convertidores digital-analógico y también interfase de bus a PC.

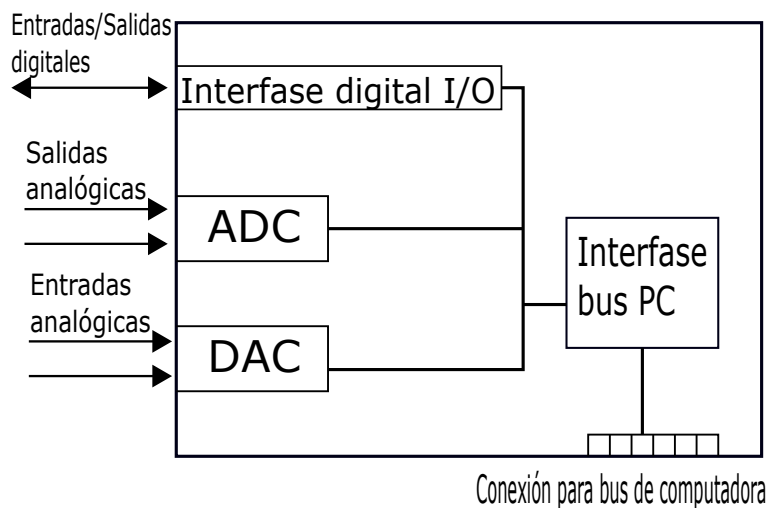


Figura 2.13: Tarjeta de adquisición de datos [Bolton, 2002]

Otro aspecto importante a mencionar es que un sistema de adquisición de datos está compuesto por hardware y software. En este caso, la parte de hardware la conforman los sensores, le electrónica de acondicionamiento y la tarjeta de adquisición de datos. Dichas tarjetas utilizan un software, el cual es desarrollado por el mismo fabricante de la tarjeta y es utilizado para comunicarla con la computadora. La mayoría de software que ha sido desarrollado para sistemas de adquisición de datos tiene implementados instrumentos virtuales de medición. Estos imitan a instrumentos reales, como se muestra en la Figura 2.14. Un instrumento virtual cuenta con tres partes: un panel frontal o interfaz de usuario, botones y displays gráficos.

Los instrumentos virtuales tienen una gran ventaja sobre los instrumentos tradicionales ya que en un instrumento virtual el usuario puede determinar sus características, como lo son el rango, la resolución, y el tipo de interfaz de acuerdo a sus necesidades. En cambio, en un instrumento real todas estas características vienen determinadas por los fabricantes y se debe de seleccionar el que mejor se adapte a las necesidades de medición, de acuerdo

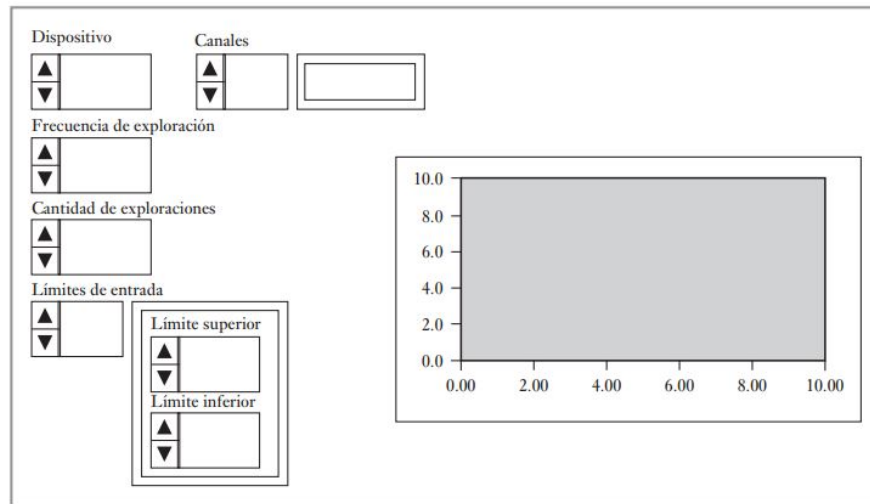


Figura 2.14: Instrumento virtual [Bolton, 2002]

a un catálogo que el mismo fabricante proporciona.

2.2.4. Procesamiento de señal

El término procesamiento de señales se refiere al procesamiento que realiza un microprocesador o un microcontrolador a una señal. Las señales digitales son de tiempo discreto, es decir, no son funciones continuas del tiempo, sino que existen sólo en momentos discretos. El acondicionamiento de una señal digital se puede llevar a cabo mediante la programación de un microcontrolador o microprocesador, es decir, que la señal digital puede ser manipulada mediante un programa que éstos ejecutan. El microcontrolador es capaz de manipular la señal obtenida a la entrada, guardarla y procesarla de acuerdo a las necesidades del usuario. El microprocesador es capaz de tomar un nuevo valor y a ese mismo valor sumarle la salida del valor anterior como si de un método iterativo se tratase.

Los microcontroladores y microprocesadores trabajan con señales digitales. Sin embargo, la mayoría de los actuadores trabajan con señales analógicas a su entrada, lo cual quiere decir que a la salida de un microprocesador o microcontrolador, deberá de utilizarse otra conversión pero ahora de digital a analógica. Trabajar con microcontroladores y microprocesadores es muy habitual en la instrumentación electrónica, ya que facilitan el

procesamiento de los datos.

2.3. Control de sistemas

El control se ha convertido en una parte importante en los procesos de fabricación, sistemas autónomos y medición e instrumentación de cualquier tipo de operación que requiera variables físicas como la temperatura, presión, humedad, flujo, distancia, entre otras. Existen distintos tipos de leyes de control con las cuales funcionan los dispositivos con los que se cuentan hoy en día. La teoría de control clásica trata los sistemas con una entrada y una salida (SISO), en donde la entrada es una señal deseada que queremos que ejecute el sistema y la salida es la respuesta del mismo. A continuación se enlistan los conceptos y definiciones que caracterizan a los sistemas de control [Ogata, 2010].

- Variable controlada: Es la cantidad o condición que se mide y controla, normalmente es la salida del sistema.
- Señal de control: La señal de control es la cantidad o condición que el controlador produce para afectar el valor de la variable controlada.
- Controlar: Significa medir el valor de la variable controlada del sistema y aplicar la señal de control al sistema, esto para corregir o limitar la desviación del valor medido respecto al valor deseado.
- Planta: Puede ser una parte de un equipo, un conjunto de elementos de una máquina cuyo objetivo es efectuar una operación particular. También se entiende por planta al objeto físico que se desea controlar.
- Sistema: Es una combinación de componentes que actúan juntos y realizan un objetivo determinado.
- Perturbación: Se define como una señal que tiende a afectar negativamente el valor de la salida de un sistema. Dicha afectación puede ocurrir dentro del sistema y se

considera interna, mientras que cuando la perturbación se presenta fuera del sistema se le considera externa.

Existen dos configuraciones de los sistemas de control, las cuales son implementadas de acuerdo a la precisión y exactitud que el proyecto demanda. Estas configuraciones son conocidas como sistemas de control en lazo abierto y sistemas de control en lazo cerrado.

Los sistemas en los cuales la salida no tiene efecto sobre la acción de control se denominan sistemas de control en lazo abierto. En un sistema de este tipo no se mide la salida, ni se realimenta para compararla con la entrada. Así, a cada entrada de referencia le corresponde una condición de operación fija, como resultado de ello, la precisión depende de la calibración. Además ante la presencia de perturbaciones, un sistema de control en lazo abierto no realiza la tarea deseada, por lo tanto, un sistema de control en lazo abierto sólo se usa si se conoce la relación entre la entrada y la salida y si no existen perturbaciones internas y externas [Ogata, 2010]. Todo esto se puede observar en la Figura 2.15 en donde se presenta el diagrama de bloques de este tipo de control.

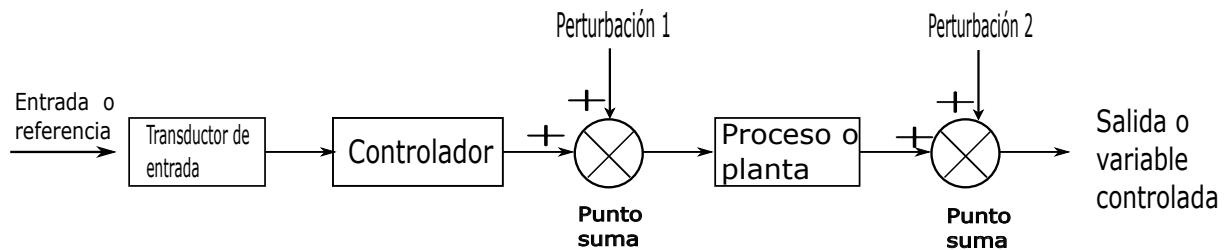


Figura 2.15: Representación de un sistema de control en lazo abierto [Nise y Romo, 2002]

La contraparte de los sistemas con lazo abierto son los sistemas en control en lazo cerrado que también se denominan sistemas de control realimentados. Un sistema realimentado es aquel que mantiene una determinada relación entre la salida y la entrada de referencia. Estas señales son comparadas y su diferencia es utilizada como entrada al controlador con el fin de reducir dicha diferencia o señal de error y llevar la salida del sistema a un valor deseado. En la Figura 2.16 se muestra el diagrama de bloques de un sistema de control de este tipo.

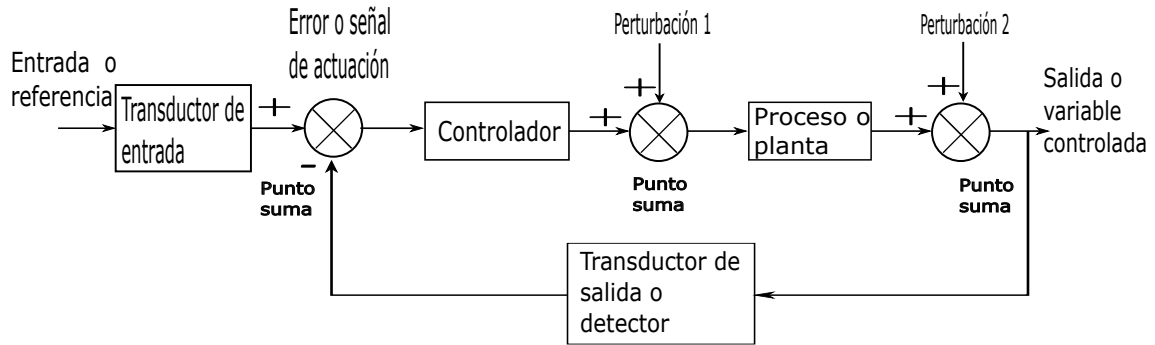


Figura 2.16: Representación de un sistema de control en lazo cerrado [Nise y Romo, 2002]

2.3.1. Controlador PID

Existe una gran variedad de controladores, sin embargo, en esta sección se presentan los más utilizados en el control de procesos, que son el control proporcional, el control integral y el control derivativo. Estas también llamadas acciones de control son muy conocidas debido a que pueden llegar a combinarse para implementar un controlador más eficiente. Los controladores trabajan con una señal de error, la cual es presentada como la diferencia del valor de la señal deseada con el valor de la señal medida, esta es definida como

$$e(t) = \text{valor deseado} - \text{valor leído} \quad (2.17)$$

Por separado las acciones de control son;

- **Acción Proporcional.** La magnitud de la salida del controlador es proporcional al tamaño del error, lo que nos indica que se tiene un error muy grande el controlador tratará de ajustarse en proporción al tamaño del error, si el error es pequeño la salida del controlador será pequeña, y si el error es grande la salida también será grande. Matemáticamente esta acción de control se expresa como:

$$u_P(t) = K_P e(t), \quad (2.18)$$

donde K_P es una constante denominada ganancia proporcional y $e(t)$ es el error en función del tiempo.

- **Acción Integral.** Esta relacionada con la tasa de cambio de la salida de control y es proporcional a la señal de error de entrada e . Cuando la salida del controlador es constante, el error es cero y cuando la salida del controlador varía a una tasa constante el error tiene un valor constante. La acción integral del controlador aumenta en proporción con el aumento del área bajo la curva de error en el tiempo y se expresa como:

$$u_I(t) = K_I \int e(t) dt, \quad (2.19)$$

donde K_I es una constante denominada ganancia integral y $e(t)$ es el error y se integra respecto al tiempo.

- **Acción Derivativa.** La salida cambia respecto al valor de referencia y este es proporcional a la rapidez de cambio en el tiempo de la señal de error. Cuando se utiliza un controlador con acción derivativa se producen respuestas iniciales rápidas. Los controladores derivativos no responden al error en estado estable por lo que siempre se combina con el control proporcional. Matemáticamente, el control derivativo se expresa como:

$$u_D(t) = K_D \frac{de(t)}{dt}, \quad (2.20)$$

donde K_D es una constante denominada ganancia derivativa y $\frac{de(t)}{dt}$ es la razón de cambio de la señal de error respecto del tiempo.

Se deduce que la acción proporcional es la corrección del error actual, esto considerando el control como un proceso de iteraciones sucesivas. Por otro lado, el control integral proporciona una corrección sumando los errores anteriores junto con el error actual. Finalmente, el control derivativo se considera como una forma de control anticipativo, ya que realiza la corrección en función de la rapidez con la que cambia la señal de error.

Se puede encontrar procesos que sólo contengan la acción proporcional. Sin embargo, no es común encontrar a las acciones derivativa e integral de manera individual ya que por si solas no generan la respuesta de salida deseada. A sus combinaciones se les conoce como control PI, control PD, pero también se tiene la combinación de las tres acciones

de control, que se denomina control PID y que se expresa como

$$u_{\text{PID}}(t) = K_P e(t) + K_I \int e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt}, \quad (2.21)$$

Cuando se tiene un control PID, la señal de salida será la suma de las señales producidas por cada acción de control. Una de las razones para utilizar el control PID en los actuadores blandos es que no se requiere un modelo matemático exacto de ellos.

2.3.2. Control Digital

El control digital se implementa con microcontroladores o microprocesadores, los cuales ejecutan programas de control mediante software. Como se mencionó anteriormente, las señales que se obtienen a partir de los sensores necesitan ser convertidas a señales digitales, es por ello que la mayoría de los microcontroladores y microprocesadores tienen integrados un reloj digital para determinar el tiempo de muestreo adecuado, y también convertidores analógico-digital y digital-analógico. La tarea del microcontrolador, es comparar la señal de referencia que es determinada por el usuario mediante software. Esta señal de referencia es comparada con las emitidas por los sensores que analógicamente están obteniendo información del proceso. El microcontrolador procesa la señal de error de la ecuación (2.17) y produce una señal digital, todo mediante software. En la Figura 2.17 se tiene el diagrama de bloques de la implementación de un control digital.

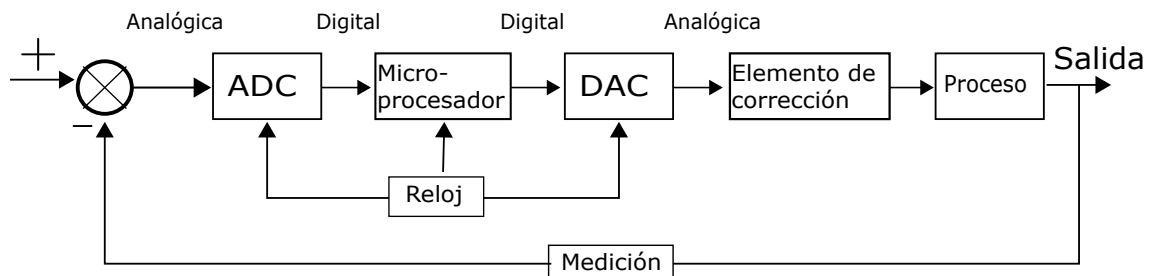


Figura 2.17: Diagrama de bloques del sistema de control digital [Bolton, 2002]

Cualquiera de las formas de control descritas en las ecuaciones (2.18)-(2.21) puede ser utilizada en su forma digital. Sin embargo, en el contexto de este trabajo, lo mas

importante es describir la forma digital de un controlador PID. Lo que se hace es introducir una ecuación en forma de diferencias, la cual estará sometida a un proceso iterativo tal como

$$u(nT) = K_P e(nT) + K_I \sum_{n=0}^m e(nT) + \frac{K_D}{T} (e(nT) - e(nT - T)) \quad (2.22)$$

La ecuación (2.22) es una ecuación en diferencias de (2.21), y es llamada Aproximación de Tustin [Bolton, 2002]. Lo que realiza el microcontrolador es resolver esta ecuación manipulando la señal de error mediante el valor anterior e_{n-1} y el valor actual e_n y tomando en cuenta el tiempo de muestreo T .

Se denomina como un proceso iterativo o una aproximación iterativa porque se toma la variable de medida y se compara con el valor predeterminado para definir el error. Mediante la ecuación (2.22), el microcontrolador realiza los cálculos basados en la magnitud del error, así como los valores guardados en memoria de las señales de entrada y salida anteriores. Posteriormente, la señal de salida es enviada a un convertidor digital-analógico. Después de esto el proceso se vuelve a repetir.

2.3.3. Sintonización PID para actuadores blandos

Una de las grandes desventajas de los actuadores blandos es la complejidad de poder establecer una ley de control que se ajuste a sus respuestas dinámicas. Las estrategias de control hasta ahora desarrolladas requieren de equipos de computación de alto costo, los cuales ejecutan sistemas en tiempo real. Otra desventaja es que los actuadores presentan desgaste después de varios ciclos de uso, lo cual implica que el control sea modificado. Una de las principales causas de estos problemas es que no se ha podido establecer un modelo matemático preciso para actuadores blandos, en este caso, para el músculo neumático McKibben.

En el afán de desarrollar e implementar controladores para los actuadores blandos, se han hecho comparaciones entre distintas variantes del control PID. También se han realizado comparaciones respecto a la sintonización de estos controladores de forma manual, utilizando el criterio de Ziegler-Nichols y el ajuste de ganancias de forma automática

mediante algoritmos de control robusto.

El método de sintonización manual de Ziegler-Nichols consiste en observar visualmente el rendimiento del sistema con diferentes valores de las ganancias y seleccionar el valor óptimo [Khan et al., 2020]. Esto quiere decir que los parámetros K_P , K_I y K_D se ajustan de acuerdo a cómo reacciona el sistema al cambiar dichos valores. Una vez que se logra obtener una respuesta medianamente deseada, se fija ese valor y no se mueve más.

Se han presentado estudios que establecen que en los actuadores blandos el ajuste de los parámetros para conseguir la respuesta dinámica deseada depende de la señal de referencia, es decir, si ésta cambia, también deben de cambiar dichos parámetros [Khan et al., 2020]; por lo que las ganancias deben de ser variables en función de la referencia.

2.4. Bancos de pruebas para actuadores blandos

Un banco de pruebas es un dispositivo, máquina o instalación que sirve para obtener datos de funcionamiento de un sistema bajo la supervisión de expertos. Las señales que se logran medir en un banco de pruebas son las que determinan el correcto o incorrecto funcionamiento de dicho sistema. Es por ello que los bancos de pruebas son diseñados en función del sistema y de las señales que se desea medir. En el músculo neumático McKibben interactúan variables físicas como presión, longitud, caudal, etc., las cuales determinan el comportamiento del actuador. Para medirlas se han desarrollado distintos bancos de pruebas y aunque algunos son parecidos, su diseño y funcionamiento llegan variar.

A continuación se presentan bancos de pruebas desarrollados por distintos equipos de investigación y que fueron tomados como modelos para el desarrollo de esta tesis.

2.4.1. Banco de pruebas de Chou y Hannaford

En la Figura 2.18 se muestra el diagrama del banco de pruebas utilizado por Chou y Hannaford [1994], el cual consta de una computadora, una interfaz de bus de datos, circuitos digitales y analógicos, sensores de presión, reguladores de presión, electroválvulas,

galgas de tensión extensométricas, un motor de corriente directa, un encoder para conocer posición, partes mecánicas y el músculo neumático McKibben.

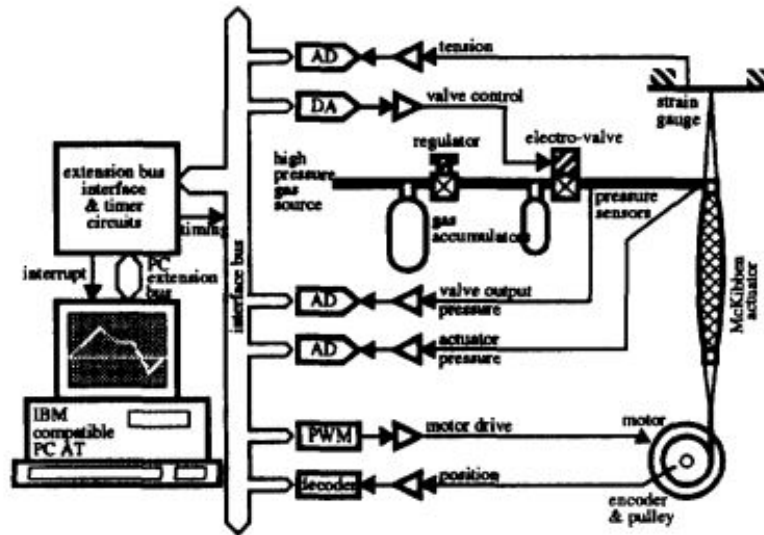


Figura 2.18: Diagrama del banco de pruebas de Chou y Hannaford

2.4.2. Banco de pruebas de Reynolds et al.

En la Figura 2.19 se muestra el banco de pruebas de Reynolds, Repperger, Phillips y Bandry, que consta de dos músculos neumáticos tipo McKibben orientados verticalmente. Para medir el cambio de longitud en el actuador, se utilizó un potenciómetro lineal de baja fricción y un sensor de presión a la entrada del músculo. En cuanto a la adquisición de datos, utilizaron un multicanal de datos conectado a una PC. También programaron la apertura de una servoválvula para la alimentación del músculo y que ésta se realizara de manera lineal.

2.4.3. Banco de pruebas de Najmuddin y Mustaffa

En la Figura 2.20 se muestra el diagrama neumático y el banco de pruebas. Se aprecia un tanque, un compresor de aire, una válvula reguladora de presión, el actuador, conectores y una carga.

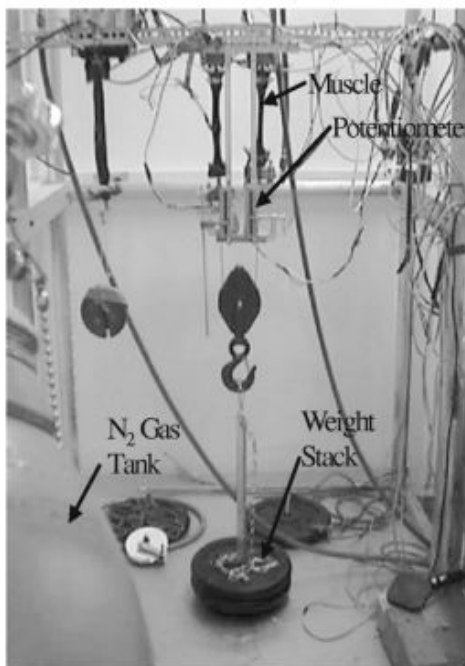


Figura 2.19: Banco de pruebas desarrollado por Reynolds et al. [2003]

2.4.4. Banco de pruebas de Tang y Chong

Como se muestra en la Figura 2.21, se utilizan dos músculos neumáticos, una entrada de alimentación de aire comprimido, una válvula proporcional, sensores de presión y un encoder lineal. También es utilizado un sistema de adquisición de datos para procesar las señales recibidas de los sensores y una computadora con el software MATLAB/Simulink.

2.4.5. Banco de pruebas de Caballero y Carbonell

En la Figura 2.22 se muestra el diagrama de un banco de pruebas desarrollado en la Universidad Politécnica de Valencia. Dicho banco consta de un músculo neumático, una válvula reguladora de presión, un sensor de presión, un encoder y una célula de carga para medir la fuerza ejercida por el músculo. Este banco mide cuatro señales analógicas que son: la presión de entrada, la presión al extremo opuesto del músculo, la contracción y la fuerza ejercidas por dicho actuador.

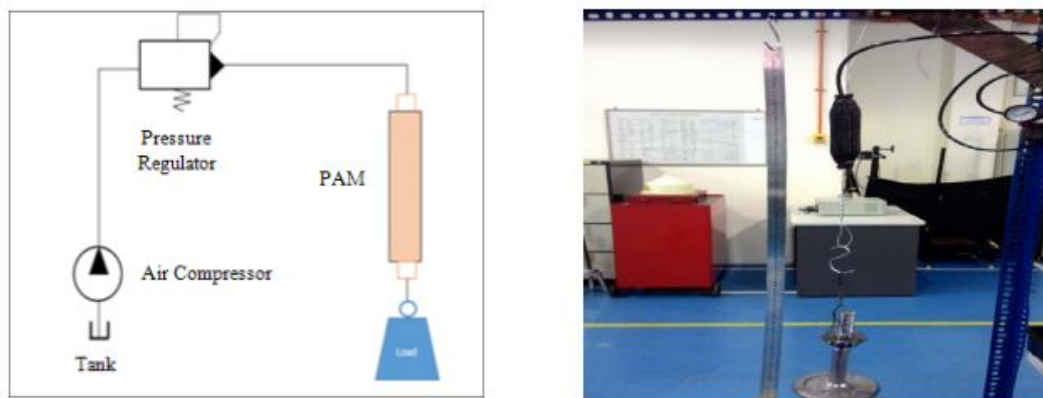


Figura 2.20: Banco de pruebas desarrollado por Najmuddin y Mustafa [2017]

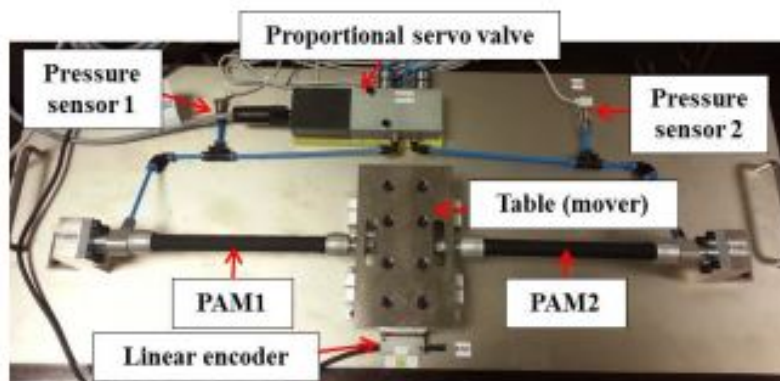


Figura 2.21: Banco de pruebas desarrollado por Tang y Chong [2017]

2.4.6. Banco de pruebas de Tondu y Lopez

En la Figura 2.23 se muestra el diagrama del banco de pruebas, el cual consta de un tensor, un sensor de fuerza, un encoder y un sensor de presión. Todos ellos están conectados a una interfaz de comunicación mediante una etapa de adquisición de datos y estos mismos se muestran en una computadora.

Los bancos de pruebas presentados tienen como propósito obtener datos del funcionamiento de uno o más músculos neumáticos tipo McKibben. Al compararlos se tiene que no todos miden las mismas señales físicas del sistema, aunque en algunos de ellos se miden las mismas variables. Los programas, protocolos de comunicación, la interfaz de datos y en general el software y el hardware pueden llegar a ser distintos. Sin embargo, todos estos

bancos proporcionan datos que son de gran utilidad para comprender cómo funciona un músculo neumático, caracterizarlo y posteriormente implementar leyes de control acordes a su funcionamiento.

Es importante establecer que todos los bancos presentan un sistema de adquisición de datos, así como un sistema de instrumentación. Éstos toman las señales de distintos sensores y transductores mismas que son llevadas a una etapa de acondicionamiento y convertidas de analógicas a digitales. Posteriormente las señales digitales son enviadas a algún microprocesador o microcontrolador, el cual contiene la programación adecuada de alguna ley de control. Después de que la señal es procesada, sale de la etapa de procesamiento en su forma digital y es convertida nuevamente a analógica, para ser transmitida a algún actuador y que éste sea el encargado de regular el proceso.

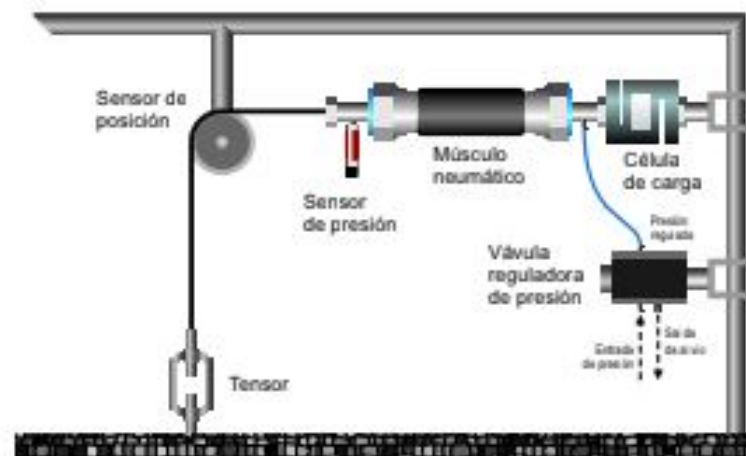


Figura 2.22: Diagrama del banco de pruebas desarrollado por Caballero y Carbonell [2003]

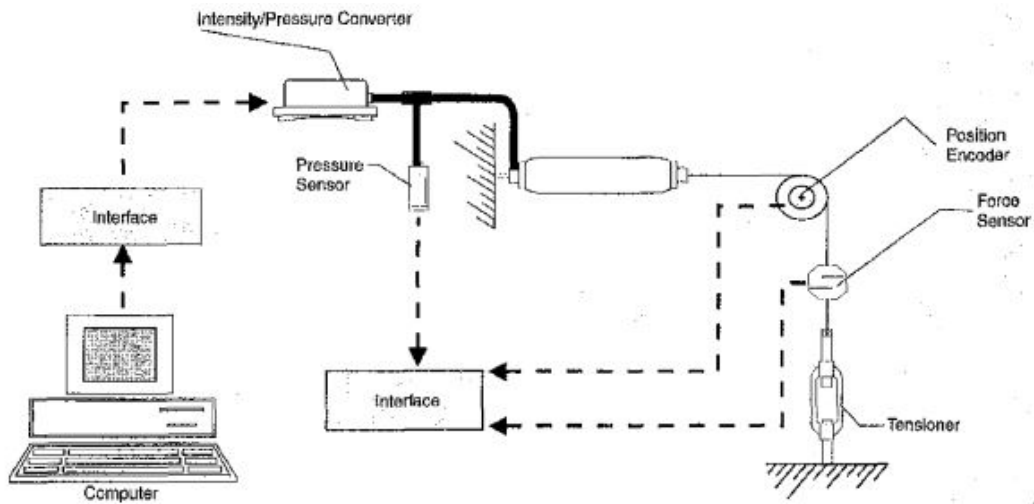


Figura 2.23: Diagrama del banco de pruebas desarrollado por Tondu y Lopez [2000]

Capítulo 3

Caracterización y control

En este capítulo se presenta la caracterización de un músculo neumático McKibben y de un sensor analógico de distancia con la que se obtienen sus ecuaciones de funcionamiento y se comparan con las ya existentes en la literatura. También se presenta la implementación de un control PID en su forma digital, así mismo, se explica su código y cómo se establece comunicación para que los datos sean almacenados en una tabla de Excel.

3.1. Caracterización del músculo

El proceso de caracterización del actuador consiste en alimentar el músculo con aire comprimido a cierto valor de presión y medir cuánto se contrae, es decir, registrar el cambio de longitud que sufre el músculo. El aire comprimido es alimentado con un compresor y con la ayuda de un manómetro, se mide la presión. Por otro lado, el cambio de longitud se mide con una cinta métrica. A continuación se muestran los resultados experimentales, así como los datos recabados de la caracterización realizada.

En la Tabla 3.1 se muestran los datos obtenidos a partir de los valores de presión con lo que se alimenta al actuador. Se observan datos de longitud, partiendo de un valor inicial cuando la presión es cero y un valor de contracción, igualmente de cero. A medida de que el músculo se alimenta con distintos valores de presión, la contracción y la longitud del

Primera caracterización		
Longitud [cm]	Contracción [cm]	Presión [PSI]
14.5	0	0
14	0.5	3.5
13.5	1	4
12	2.5	6
11.5	3	7
11	3.5	9
10.5	4	13

Tabla 3.1: Datos de la primera caracterización

músculo cambian.

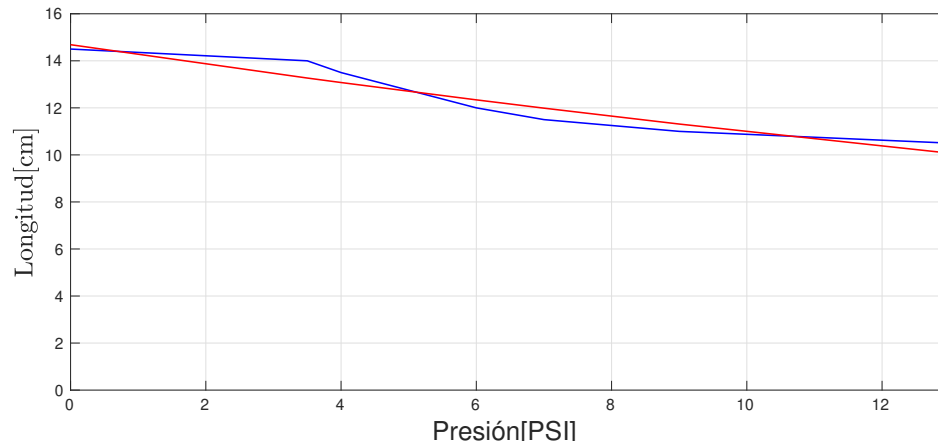


Figura 3.1: Primera caracterización del músculo McKibben

En la Figura 3.1 se muestran los datos de la Tabla 3.1 de forma gráfica. Esta curva contiene los valores de longitud [cm] vs. presión [PSI]. La curva de tendencia de color azul contiene los valores de la tabla y usando Excel se busca una curva de tendencia, la cual se muestra en color rojo. La ecuación que se ajusta a dicha curva de tendencia, es

$$y = 14.685e^{-0.029x}. \quad (3.1)$$

Una vez obtenidos estos resultados, se establece que es necesario realizar una segunda caracterización para corroborar que los datos son correctos.

En la Tabla 3.2 se muestran los datos obtenidos de la segunda caracterización, en donde se consideran los mismos parámetros de la primera, mientras que en la Figura 3.2 se muestra la gráfica correspondiente. La curva azul muestra los datos de la tabla y la curva de tendencia roja es una regresión del tipo exponencial, con el que se encuentra la ecuación característica del actuador que es

$$y = 13.301e^{-0.023x}. \quad (3.2)$$

Segunda caracterización		
Longitud [cm]	Contracción [cm]	Presión [PSI]
14.4	0	0
12.5	1.9	3
12	2.4	2
11.5	2.9	5
11	3.4	10
11	3.4	10
10.5	3.9	7

Tabla 3.2: Datos de la segunda caracterización

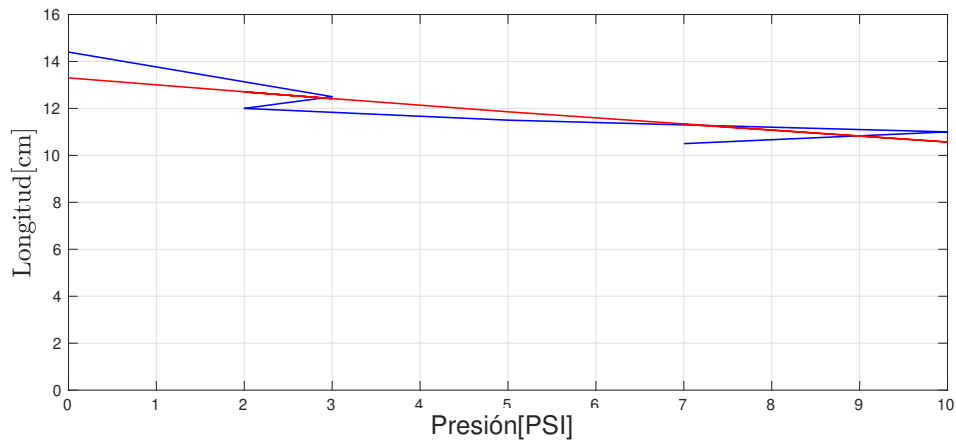


Figura 3.2: Segunda caracterización del músculo McKibben

Comparando la ecuación (3.1) con la ecuación (3.2) se tiene que las ecuaciones halladas

son similares, pero tienen una diferencia en las constantes de la ecuación. Por ello se determina que es necesaria una tercera caracterización.

Tercera caracterización		
Longitud [cm]	Contracción [cm]	Presión [PSI]
14.3	0	0
14	0.3	0.1
12.8	1.5	3
11.2	3.1	7
10.5	3.8	10
10.2	4.1	14
10	4.3	17

Tabla 3.3: Datos de la tercera caracterización

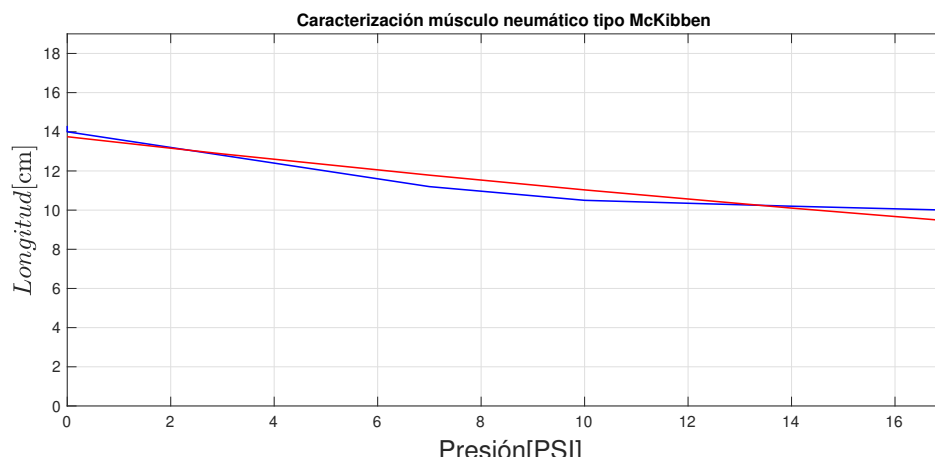


Figura 3.3: Tercera caracterización del músculo neumático McKibben

En la Tabla 3.3 se muestran los datos obtenidos de la tercera caracterización del actuador, mientras que en la Figura 3.3 se muestra en color azul la gráfica correspondiente a los datos de dicha tabla. Al igual que en las gráficas anteriores la curva de tendencia roja representa la ecuación hallada mediante una función exponencial que se ajusta a la ecuación

$$y = 13.748e^{-0.02x}. \quad (3.3)$$

Comparando las ecuaciones (3.1), (3.2) y (3.3) se observa que también son similares

entre sí, sin embargo, lo que cambia son sus constantes. Al observar dichas expresiones se puede inferir que son soluciones particulares a una ecuación diferencial. A partir de ellas se encuentra una solución general, la cual será la que representa al principio de funcionamiento del músculo. Sustituyendo las constantes de la solución particular por unas constantes de una solución general, se obtiene la ecuación

$$y = Ce^{-Kx}. \quad (3.4)$$

En las gráficas obtenidas, el eje de las abscisas corresponde a la presión P [PSI] y el eje de las ordenadas a la longitud L [cm]. Reescribiendo la ecuación (3.4) se tiene que

$$L = Ce^{-KP}. \quad (3.5)$$

Ahora, se determina a partir de la solución general, la ecuación diferencial que corresponde a esta solución. Esta solución corresponde al teorema de crecimiento exponencial, por lo tanto la ecuación diferencial es

$$\frac{dy}{dx} = -Ky. \quad (3.6)$$

Poniendo la ecuación (3.6) en términos de la presión y la longitud se tiene que

$$\frac{dL}{dP} = -KL. \quad (3.7)$$

Comparando la ecuación (3.7) con las ecuaciones (2.15) y (2.16) se puede determinar que son similares, es decir, si en dichas ecuaciones se considera masa nula (esto se debe a que la masa del actuador se considera despreciable). También se consideran las perturbaciones nulas ya que la caracterización para obtener (2.15) y (2.16) fue realizada colocando una masa en el extremo del músculo. Sin embargo, en la caracterización presentada en (3.7) fue realizada sin masa, por lo tanto

$$\beta \frac{dy}{dt} + Ky = 0. \quad (3.8)$$

Esta ecuación es muy parecida a la ecuación presentada en el Apéndice A.5, la cual corresponde al modelo viscoelástico de Kelvin-Voigt.

Normalizando

$$\frac{dy}{dt} = -\frac{K}{\beta}y, \quad (3.9)$$

se observa que (3.9) es parecida a la ecuación (3.6). Realizando el cambio de variable K/β por K_0 se obtiene

$$\frac{dy}{dt} = -K_0y. \quad (3.10)$$

Las ecuaciones halladas corresponden a los modelos dinámicos establecidos previamente en la literatura y también concuerdan con el modelo viscoelástico de Kelvin-Voigt. Por lo tanto, la constante K_0 se relaciona al cociente que existe entre la constante de proporcionalidad elástica K y el coeficiente de amortiguamiento β , que dependen de las propiedades mecánicas de los materiales del actuador.

3.2. Caracterización del sensor de distancia

En sus hojas de especificaciones, el sensor del a marca Sharp, modelo GP2Y0A21 contiene distintas gráficas de funcionamiento, entre las cuales se encuentra la gráfica de voltaje [V] vs. distancia [cm], que es una caracterización que proporciona el fabricante. Sin embargo, en ésta se consideran condiciones ideales, por lo que fue importante que el sensor se caracterizara en las condiciones de funcionamiento del entorno en el que se trabajó.

La caracterización del sensor se realizó con la tarjeta de desarrollo Arduino Mega, con 16 entradas analógicas y un convertidor analógico-digital con resolución de 10 bits que se utiliza para convertir la señal analógica emitida por el sensor en a una digital. La tarjeta se comunica mediante un software desarrollado por la misma compañía conocido como Arduino IDE, donde la programación del microcontrolador se realiza en el lenguaje C++. Es en dicho microcontrolador donde se ejecuta el programa para realizar una primera caracterización del sensor Sharp y cuyo código es

```
void setup() {
  Serial.begin(9600);
```

```
    }  
    void loop(){  
        int SIR = promedio(60);  
        Serial.println(SIR);  
        delay(1000);  
    }  
    int promedio(int n)  
    {  
        long suma = 0;  
        for(int i = 0; i < n; i++)  
        {  
            suma = suma + analogRead(A0);  
        }  
        return(suma/n);  
    }  
}
```

Primero se inicializan las configuraciones del puerto serial a una velocidad de 9600 bits por segundo. Posteriormente, se establece un código que se está repitiendo de manera continua y en donde se inicializa una variable entera que se iguala a la función promedio. Después, el valor de dicha variable se imprime en la pantalla. Esto se realiza continuamente con un retardo de 1000 [ms]. Después, se declara la función promedio como un entero y como argumento contiene otro entero denominado n , el cual es el mismo que está en el argumento de la igualdad de la variable entera SIR. La función está encargada de realizar una suma desde 0 hasta el valor de n , realizando un incremento de una unidad. La suma está declarada como el valor anterior de suma más el valor leído por el sensor en el pin analógico A0. Por último, el valor que retorna la función es el promedio de las mediciones. En la Figura 3.4 se muestra el sensor Sharp montado sobre una caja de madera. Entre los pines de alimentación V_{CC} y tierra GND, se encuentra un capacitor de 10 [μF] como lo recomienda el fabricante. Esto para reducir los errores de medición ya que dicho capacitor funciona como un filtro. La conexión del pin de alimentación del sensor se conecta al pin



Figura 3.4: Obtención de resultados para caracterizar el sensor

de 5 [V] que contiene la tarjeta, mientras que el pin de salida se conecta al pin A0. Este pin es la entrada al microcontrolador, es decir, el que recibe los datos sensados. Por último, el Arduino se conecta a la computadora mediante un cable con el cual se alimenta, y también establece comunicación con el IDE para cargar el programa y visualizar los datos obtenidos de forma analógica.

Una vez que se ha ejecutado el programa y se comienzan a visualizar los datos en la pantalla, es momento de registrar la distancia que se mide con la cinta métrica, es decir, el valor de la lectura analógica y convertir ese valor en voltaje mediante una regla de tres. Ya que el microcontrolador contiene un convertidor analógico-digital con resolución de 10 bits, éste tiene la capacidad de transformar un rango de 0 a 5 [V] a otro de 0 a 1023 combinaciones, por ello resultado obtenido se divide por 1023. Estos datos se observan en la Tabla 3.4 y son con los que se caracteriza el sensor.

Se usan estos datos para obtener una gráfica y buscar la curva de tendencia que proporcione la relación entre el valor del voltaje [V] y la distancia [cm]. Una vez realizada la regresión, se obtiene la ecuación de la caracterización del sensor

$$y = 8.4039x^{-0.583} \quad (3.11)$$

En la Figura 3.5 se muestran dos líneas curvas, la curva azul representa los valores

Datos experimentales del sensor Longitud-Voltaje		
Longitud [cm]	Lectura analógica	V_{out} [V]
5	652	3.187
10	508	2.483
10.5	486	2.375
11	462	2.258
11.2	455	2.224
12.3	421	2.058
14	370	1.808
15.5	338	1.652
18	295	1.442
21	273	1.334
23	266	1.300
23.5	263	1.285
25	237	1.158
25.2	238	1.163
27	225	1.099
29	222	1.085
33	217	1.061
35	213	1.041
37	210	1.026
40	209	1.021
80	170	0.831
90	127	0.621

Tabla 3.4: Datos experimentales obtenidos para la caracterización del sensor Sharp

de la Tabla 3.4 mientras que la curva roja los datos a partir de la función hallada. Es importante comparar esta gráfica con la que se encuentra en las hojas de especificaciones técnicas del sensor en el Apéndice B.2. Se observa que hay una coincidencia, con lo que se puede afirmar que la caracterización realizada es correcta y que la función hallada corresponde al principio de funcionamiento establecido por el fabricante. Si se tabula la función, los valores de x serán la distancia deseada, mientras que los valores arrojados por la función, es decir y , serán los valores de voltaje correspondientes a dicha distancia.

Gracias a la ecuación (3.11) se garantiza que no habrá errores de medición por falta de caracterización. Dicha ecuación se captura en el siguiente programa

```
void setup() {
  Serial.begin(9600);
}
void loop(){
```

```
int SIR = promedio(60);  
Serial.println(SIR);  
delay(1000);  
}  
  
int promedio(int n)  
{  
    long suma = 0;  
    for(int i = 0; i < n; i++)  
    {  
        suma = suma + analogRead(A0);  
    }  
    return(suma/n);  
}
```

y se ejecuta en el Arduino. De este modo, se obtiene el valor analógico registrado por el sensor y su valor correspondiente en distancia.

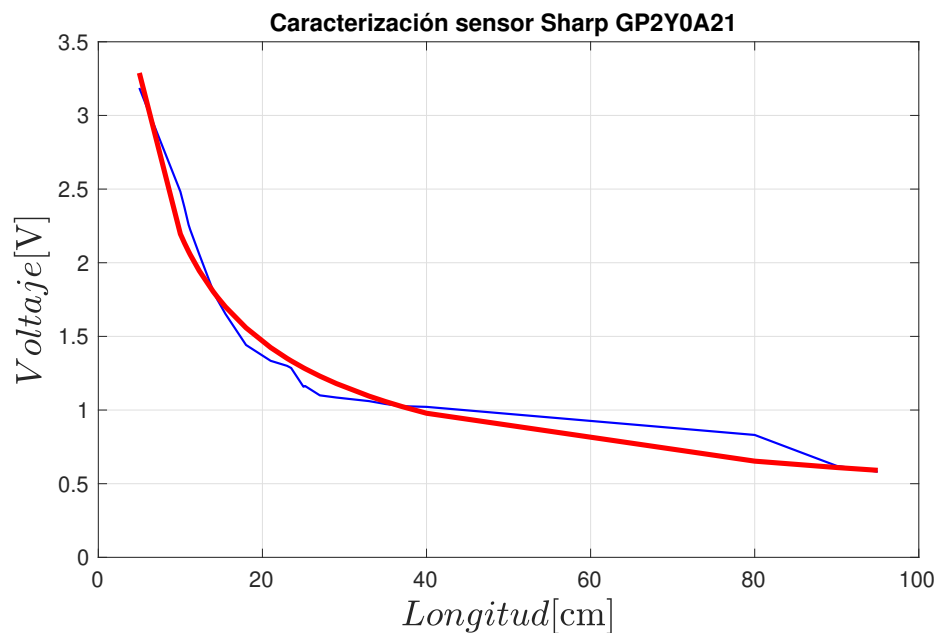


Figura 3.5: Caracterización del sensor analógico Sharp GP2Y0A21

Ahora el programa contiene la función que se halló durante la caracterización del sensor. De esta manera se muestra en pantalla el valor de distancia leído, así como su valor analógico correspondiente. En las pruebas realizadas se constató que a partir de los 5 [cm] el error era mínimo, mostrando una repetibilidad en la medición de la distancia. Sin embargo, con medidas mayores a los 27 [cm], mostraba un incremento sustancial del error, por lo tanto, se establece que el sensor debe de estar montado a una distancia de entre 5 y 25 [cm].

3.3. Diseño de la aplicación

Las variables de interés para el músculo son la distancia, es decir, la variación de longitud del actuador y la presión. Para registrar el cambio de longitud, se usó el sensor de distancia, mientras que para conocer los valores de presión se colocó un manómetro. Finalmente, el actuador del sistema de control es una válvula proporcional, la cual tiene un sensor de presión integrado.

3.3.1. Controlador PID

La ecuación (2.22) es una aproximación matemática de un controlador PID para ser implementada en forma digital. La Figura 3.6 muestra el código implementado del control PID digital en un nodo de fórmula en LabVIEW. En la parte superior del código se establece comunicación entre LabVIEW y la tarjeta de adquisición de datos. También se declara un pin de lectura analógica, que en este caso será la señal de entrada. Se observa que la señal es ingresada al nodo de fórmula, en donde también se declara un pin de salida de PWM que fue obtenida mediante el código y que es ley de control PID.

Dentro del bloque nodo de fórmula, lo que se hace primero es declarar las variables de entrada donde son: X es el valor arrojado por el sensor en [V], K_p la ganancia proporcional, K_i la ganancia integral, K_d la ganancia derivativa, T es el tiempo de muestreo en [ms], j es el número de iteraciones y e_1 es el error anterior. Por otra parte, también se declaran variables de inicialización que son e como el error, z es la ecuación encargada de convertir la

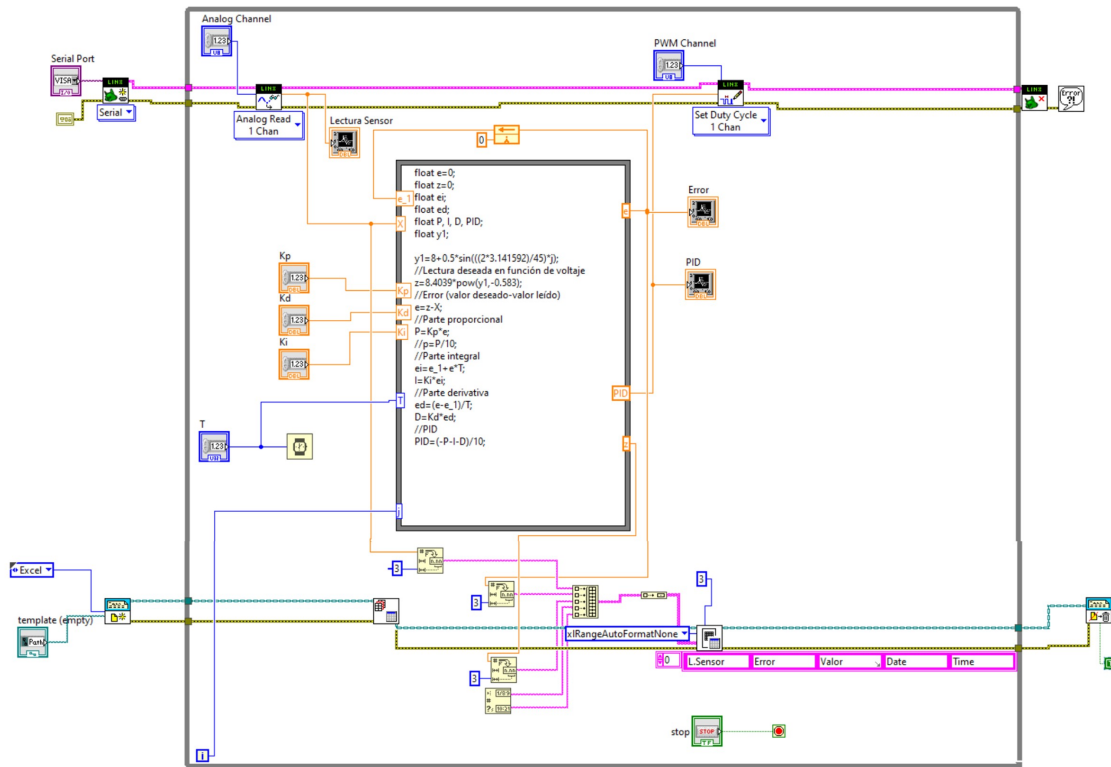


Figura 3.6: Control PID digital programado en LabVIEW

distancia en voltaje, obtenida en la caracterización del sensor Sharp, e_i es error integral, e_d es error derivativo, P es la parte proporcional, I es la parte integral, D es la parte derivativa y y_1 es el set point.

La parte proporcional declarada en el nodo de formula es la multiplicación de la ganancia proporcional K_p por el error e , donde a su vez es la diferencia que existe entre el valor deseado z menos el valor que arroja el sensor X . La parte integral se establece como la multiplicación de la ganancia integral K_i por el error integral e_i , y el error integral se define como el error anterior e_1 más el error multiplicado por el tiempo T . La parte derivativa es el resultado de la multiplicación de la ganancia derivativa K_d multiplicada por el error derivativo e_d , que se define como el resultado de la diferencia entre el error actual e menos el error anterior e_1 por el periodo de muestreo T . El control PID es la suma de las tres partes, la proporcional, la integral y la derivativa. Con esto la parte del

control PID programada es la misma que se muestra en la ecuación (2.22), solamente que en la implementación se declara cada parte de manera independiente y al final se realiza la suma.

De igual forma que en el nodo formula existen entradas, también existen salidas que se encuentran declaradas en la parte derecha. Algunas salidas son retroalimentadas y se vuelven entradas pero se convierten en el valor anterior. El más claro ejemplo que se tiene es el del error e que se declara como salida pero contiene un nodo de retroalimentación que lo lleva a declararse como entrada e_1 para el actual proceso iterativo. Otras salidas que se declaran son la señal z y la señal de PID. Esta última es la que se conecta a la salida de PWM declarada en la parte superior donde se establece comunicación con la tarjeta de adquisición de datos.

Ahora que ya se explico el código de programación del nodo de fórmula, queda por explicar lo que ocurre en la parte inferior del programa. En esta parte lo que sucede es que se establece comunicación con otro software para transferir los datos obtenidos. En este caso la conexión se realiza con el software Microsoft Excel, donde los datos del valor leído, el error, el valor deseado y el tiempo son multiplexados y enviados por un canal de comunicación, el cual forma automáticamente una tabla por cada iteración del programa. Con esto se tiene un registro de datos para poder presentarlos en una forma gráfica.

3.3.2. Comunicación con el usuario

La Figura 3.7 muestra el panel frontal del código programado. Se tienen tres gráficas que muestran el error actual, la señal del controlador PID y la lectura del sensor. En los controles del lado inferior izquierdo se selecciona el puerto serial al que se conecta la tarjeta de adquisición de datos, así como el puerto del canal analógico de entrada y el puerto PWM de salida. En los recuadros de K_p , K_i y K_d se insertan los valores deseados de las ganancias, que pueden ser modificados al mismo tiempo de que el código se está ejecutando. El recuadro de T es para determinar el tiempo de muestreo y el recuadro de template es para seleccionar la ubicación de la hoja de cálculo de Excel en donde se

registraran los datos que se obtienen cuando se esta ejecutando el código. Por último, pero no menos importante, se muestra un botón de STOP el cual, al ser presionado, hace que el programa se detenga.

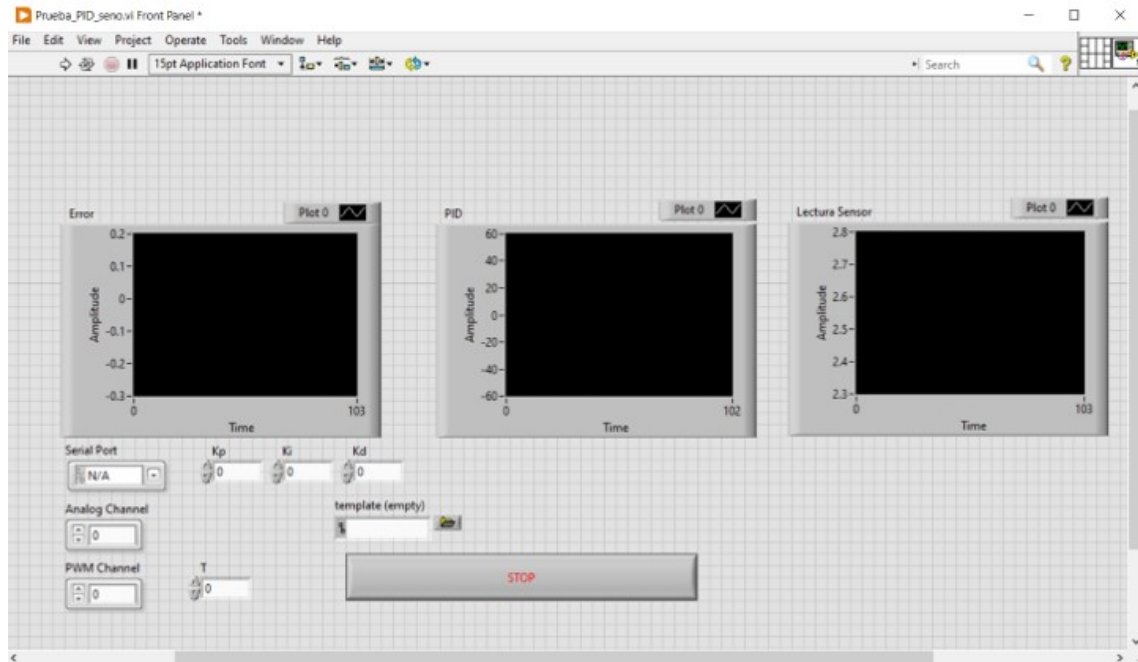


Figura 3.7: Panel frontal del programa para un control PID

Capítulo 4

Implementación y validación experimental

En este capítulo se muestra a detalle la construcción, de manera artesanal, de un banco de pruebas para un músculo neumático tipo McKibben. Se presenta la selección de materiales, pruebas de funcionamiento de los componentes y su posterior ensamble. El objetivo es poder observar el actuador bajo distintas condiciones de trabajo, obtener resultados experimentales y compararlos con los fundamentos teóricos del Capítulo 2. Por último, se presenta la implementación de un PID digital utilizando el software LabVIEW y cuyos resultados determinan, de manera gráfica, qué tan precisa fue la sintonización del controlador.

4.1. Construcción del músculo neumático

Gracias a las investigaciones que se han ido desarrollando se pueden encontrar distintos tutoriales para fabricar un músculo neumático, los cuales consisten en la utilización de un tubo interno puede ser de látex o de un material que pueda inflarse, también de una malla entrelazada y una manguera para alimentarlo con aire. A continuación se muestran los materiales utilizados para su fabricación:

- Bomba de aire
- Cinchos de plástico
- Cinta métrica
- Globos de plástico tipo fiesta
- Malla organizadora de cable
- Manguera de acuario
- Pegamento tipo Kola Loka
- Silicón
- Tijeras
- Válvula para balón

La fabricación del actuador consistió en cortar el globo a una longitud deseada. En este caso la longitud fue de 15 [cm]. Posteriormente se realiza el corte de la malla entrelazada cuya longitud será del tamaño del globo, más 2 [cm] de cada lado, es decir, de 19 [cm]. Ahora que se tienen estas dos partes, se procede a ensamblar. Se necesita pasar el globo dentro de la malla y, una vez que quede centrado, se procede a sellar la parte inferior. Se hace un pequeño doblés que contenga al globo y la malla, se colocan dos cinchos en la punta y se les coloca Kola Loka, al mismo tiempo de que se aprieta el cincho. Por el otro extremo, se pone la manguera de acuario y se inserta aproximadamente a 1 [cm] dentro del globo, y se comienza a rellenar de silicón para sellar la unión del actuador con la manguera y que no exista fuga de aire. Después, se le colocan los cinchos y Kola Loka como en el paso anterior. Por último, se coloca la válvula en el extremo libre de la manguera, se le agrega silicón y cinchos para que tampoco exista una fuga de aire. El último paso es embonar la válvula con la bomba y comenzar a inflar el músculo.

En la Figura 4.1 se muestra el actuador ya fabricado junto con los materiales utilizados para su unificación. Cuando a un globo se le introduce aire, este comienza a inflarse y su



Figura 4.1: Fabricación de un músculo neumático McKibben

longitud incrementa, sin embargo, cuando esta cubierto por la malla entrelazada y uno de sus extremos esta sellado con cinchos, su longitud sufre un cambio decreciente. Esta es una de las principales características que hace interesante a este actuador, y que se explicó en el Capítulo 2.

4.2. Diseño conceptual de un banco de pruebas

Para estar en condiciones de diseñar una ley de control que haga que el músculo se comporte de acuerdo a ciertas necesidades de funcionamiento, es necesario fabricar un banco de pruebas. Primero fue necesario inflar el actuador para saber si presentaba alguna fuga y era necesario repararlo. En la Figura 4.2 se muestra la prueba realizada sin la cual, se corre el riesgo de una mala medición, así como de daño del actuador.

Después de determinar que el músculo se encuentra en perfectas condiciones, es necesario saber dónde irá montado, lo que conlleva a contemplar el uso de una estructura para el banco de pruebas. La Figura 4.3 muestra el dibujo conceptual de la estructura propuesta, mismo que este fue realizado en Solidworks. También se muestran cotas de dimensionamiento que están expresadas en milímetros, siendo solamente una propuesta



Figura 4.2: Pruebas de presión

conceptual ya que el diseño final puede variar.

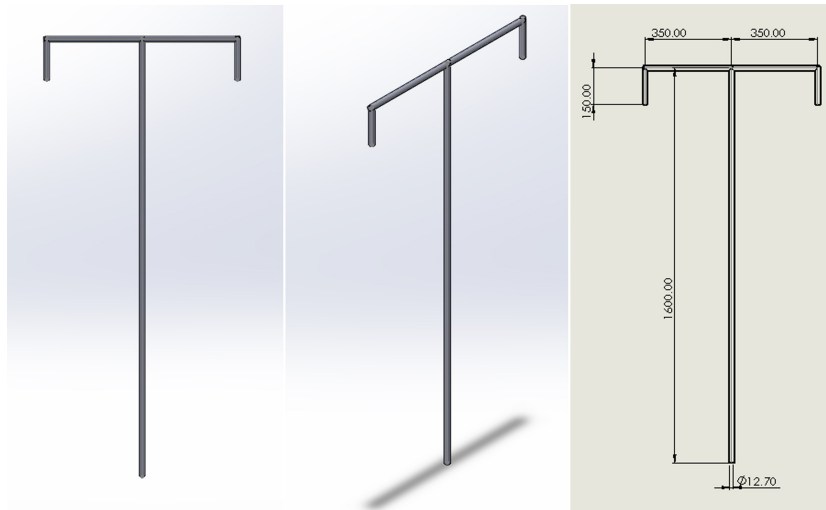


Figura 4.3: Dibujo conceptual de la estructura del banco de pruebas

4.3. Fabricación y selección de materiales

Se busca que el banco de pruebas sea portátil, por ende, es necesario que los materiales a elegir sean ligeros y de fácil ensamble. Debido a ésto, el diseño conceptual sufrió algunas modificaciones en cuanto al dimensionamiento. En la Figura 4.4 se muestran los cambios respecto a la Figura 4.3, mientras que en el Apéndice C se encuentra el plano de dimensionamiento para la fabricación de la estructura.



Figura 4.4: Corrección de dimensiones del diseño estructural del banco de pruebas

Una vez que se tienen las dimensiones, es preciso establecer el material del cual se fabricará la estructura. Primero se propuso que la estructura fuera fabricada en acero, sin embargo, ésto no era compatible con que fuese de fácil ensamble y portátil. Posteriormente, se propuso de aluminio, y surgió el problema de ensamble ya que elevaba el costo de la estructura. Finalmente se propuso tubo de PVC de 1 [in], lo que cumplía perfectamente con las dos condiciones establecidas, además de un costo bajo de fabricación.

Una vez definidas las dimensiones, se pudieron determinar las piezas necesarias para armar la estructura, mismas que se enlistan a continuación:

- 2 tramos de 25 [cm]
- 2 tramos de 35 [cm]
- 1 tramo de 50 [cm]

Además para unir estas piezas se utilizó:

- 2 codos de 90° de 1 [in] de diámetro
- 1 conexión en “T” de 1 [in] de diámetro

Una vez que se tienen las piezas y aditamentos, se realiza una presentación de como quedaría el ensamble final. En este paso es en donde se determinó que era necesaria una base sobre la cual se fijaría el tramo de 50 [cm] para sostener la estructura.



Figura 4.5: Base para la estructura del banco de pruebas

En la Figura 4.5 se muestra la base de manera utilizada y para ensamblar el tubo de PVC de 50 [cm] fue necesario utilizar una broca plana de 1 1/4 [in], así como también se utilizó un taladro y un flexómetro para determinar el centro de la madera rectangular y ahí barrenar para insertar el tubo. Ya que se tiene el barreno, se inserta el tubo y se pega con pegamento tipo Kola Loka y bicarbonato de sodio, para que la unión quede firme.



Figura 4.6: Estructura ensamblada del banco de pruebas.

En la Figura 4.6 se muestra la estructura y la base ya ensambladas. Las medidas corresponden a las mostradas en el plano del Apéndice C. Sin embargo, a la hora de montar

el músculo neumático surge el problema de que es difícil introducirlo en los extremos. También será difícil observar el funcionamiento del actuador ya que el tubo de PVC no es transparente.



Figura 4.7: Corrección de los extremos de la estructura

Posteriormente, se realizaron cortes de media caña en los extremos de 35 [cm], que comienzan a partir de los 10 [cm] medidos desde donde embona el codo de 90°, lo que significa que la longitud del corte de media caña es de 25[cm] por cada extremo. En la Figura 4.7 se muestra la mejora implementada a la estructura, dónde también se sobrepone el músculo McKibben para visualizar como estará empotrado.

4.4. Instrumentación mecánica y electrónica

En un banco de pruebas es muy importante la selección de los instrumentos de medición. En este banco se utilizaron técnicas de instrumentación mecánicas y electrónicas debido a que las variables de interés en el músculo son la de presión y longitud, por lo que se deben de seleccionar los instrumentos de medición adecuados para estas dos variables. También es importante conocer los rangos de trabajo del actuador para que la selección de componentes sea adecuada.

Para medir la variable de presión se ha decidido implementa un manómetro, que es un dispositivo utilizado para medir la presión de un fluido, sea neumático o hidráulico. La medición de la presión manométrica se realiza mediante la diferencia de la presión absoluta menos la presión atmosférica.

Para la selección adecuada del manómetro se realizó una prueba de presión máxima y de presión mínima. Dicha prueba se hizo con una bomba para inflar llantas, que cuenta con un manómetro incluido, con la que se determinó que la presión mínima del actuador es de cero [PSI] y que la presión máxima soportada por el actuador es de 20 [PSI]. Por lo tanto, el manómetro que se necesita debe de contener el rango de cero a veinte [PSI]. Entre los distintos tipos de manómetros que se encuentran en el mercado y considerando el presupuesto se optó por la selección del manómetro Instrutek de la serie 3000, cuyo interior esta lleno de glicerina para reducir los efectos de las cargas de pulsaciones, vibraciones y golpes.



Figura 4.8: Manómetro instrutek 0-60 [PSI]

En el Apéndice B.1 se encuentran las hojas de especificaciones técnicas de los manómetros de la serie 3000, que se usaron para seleccionar el manómetro que se adecuaba a los requerimientos. Se comenzó con la selección del diámetro de la carátula del manómetro, la cual tiene una medida de 2 1/2 [in]. Después, se seleccionó el tipo de conexión que fue a 1/4 de rosca tipo NPT. Posteriormente, se seleccionó el rango de presión del manómetro. En este caso, como ya se contaba con la prueba que determinaba el rango de presiones a las que trabaja el actuador, se optó por el rango de 60 [PSI]. Por último, se seleccionó

la parte de accesorios en donde se escoge el tipo de ventana, en este caso se eligió vidrio de seguridad. En la Figura 4.8 se muestra el manómetro descrito anteriormente. Para adquirirlo se necesita un código de especificación, el cual es “63-300-60PSI-SGL”. El primer número corresponde a la selección del diámetro de la carátula, el segundo al tipo de conexión, el tercero al rango de presión y la última parte que corresponde a una serie de letras es para determinar los accesorios.

Para montarlo se utiliza un racor que es simplemente una conexión rápida neumática, y que se muestra en la Figura 4.9.



Figura 4.9: Racor neumático en Tee, conexión 1/4 NPT hembra

Instrutek también es el fabricante de este dispositivo pero no se cuenta con una hoja de especificaciones técnicas, solamente con la descripción del componente en su página oficial.

El montaje del racor con el ensamble del manómetro se realiza en la conexión en “T” de PVC, de tal manera que el manómetro quede centrado y alineado con la estructura del banco de pruebas. En la Figura 4.10 se muestra el racor montado en la pieza “T” de PVC.

Ya que se tiene el manómetro montado y fijado en la conexión, se ensamblan los tramos de PVC de 25[cm] tal como se aprecia en la Figura 4.11. Una vez que se ensamblan los codos de 90°, se puede apreciar que el manómetro queda en medio de la estructura superior del banco de pruebas y también que la visualización de la carátula y la aguja que indica el valor de presión es apropiada para observarse por cualquier usuario de dicho banco.

Es importante que se pueda observar claramente el valor de presión que marca la aguja del manómetro ya que esto reduce errores de medición por una mala visualización por



Figura 4.10: Montaje del manómetro en la conexión tipo “T” de PVC

parte del usuario.

Ahora que se tiene ensamblada la parte superior del banco de pruebas, es necesario ensamblar la base y los tramos de 35 [cm], así como conectar el racor al circuito neumático. Esto se realiza conectando la manguera neumática por ambos extremos, uno de ellos viene de la alimentación del compresor y otro es el que alimenta al actuador. En la Figura 4.12 se tiene en la parte frontal, el banco montado con el manómetro y con un músculo neumático. En la parte posterior se muestra la conexión de la manguera neumática al racor, el cual se conecta al manómetro. También, a un extremo se le implemento una cinta métrica con la finalidad de medir la variación de longitud de acuerdo al cambio de presión en el actuador.

En cuanto a la instrumentación electrónica, se implementó un sensor que mide constantemente la distancia para saber cual es el valor de longitud que se contrae el músculo a ciertos valores de presión. Esta medición es muy importante ya que permitirá caracterizar al actuador. Para la selección de dicho instrumento de medición se tenían varias opciones las cuales incluían sensores digitales y analógicos. Sin embargo, por el tipo de implementación, se seleccionó el sensor Sharp ya mencionado en el Capítulo 3.

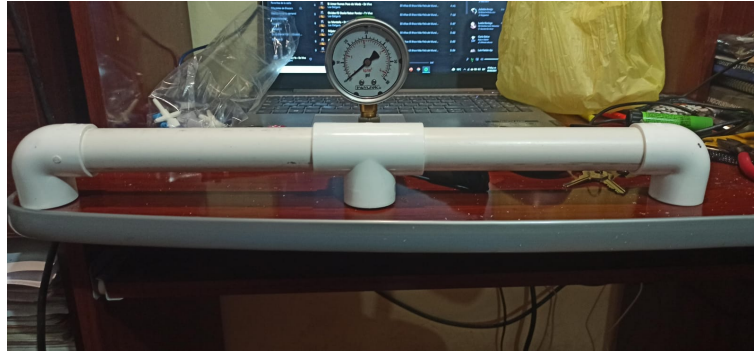


Figura 4.11: Montaje del manómetro en la parte superior del banco de pruebas

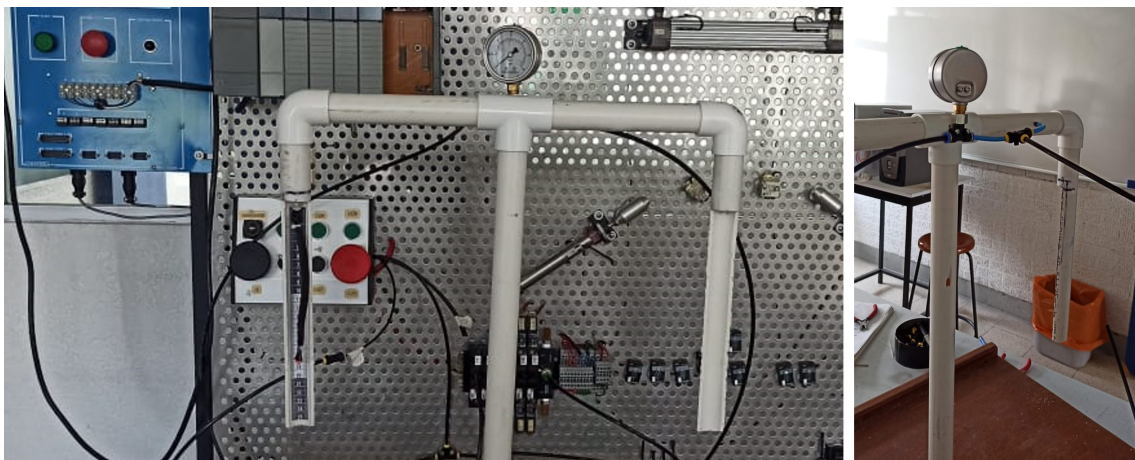


Figura 4.12: Manómetro montado y manguera neumática conectada

En la Figura 4.13 se muestra el sensor analógico Sharp modelo GP2Y0A21, el cual es utilizado en equipos sanitarios, control de iluminación, robots de limpieza, videojuegos, robots de competencia y otras aplicaciones. En el Apéndice B.2 se muestran las hojas de especificaciones de dicho sensor, en donde se encuentran sus gráficas características, así como circuitos de implementación y valores de funcionamiento. Su encapsulado contiene un circuito de procesamiento de señal y la medición de distancia la realiza a través de un método de triangulación, ocupando tecnología infrarroja para realizar dicha medición. En las hojas de especificaciones la alimentación tiene un rango de 4.5 a 5.5 [V], con un consumo de corriente aproximado de 30 [mA], además de que su rango de medida es de 10 - 80 [cm]. A la salida muestra valores de voltaje, los cuales deben de ser convertidos

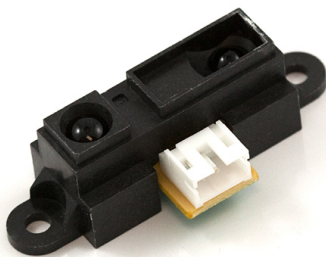


Figura 4.13: Sensor analógico Sharp GP2Y0A21

para poder determinar la distancia en función del voltaje de salida.

4.4.1. Montaje del sensor de distancia

El sensor necesita una base para que las mediciones estén dentro del rango deseado, ya que de esta manera el error de medición será mínimo en comparación con un sensor alejado del extremo del músculo.

En la Figura 4.14 se muestra el dibujo de la base y también se le presenta ya montada. El sensor se sujeta con dos tornillos con sus respectivas tuercas, de esta manera permanece fijo, evitando problemas con la medición por un mal ensamble. Así mismo, la base está sujeta a la base de madera del banco de pruebas con 4 tornillos y su respectiva tuerca.

En el Apéndice C.2 se encuentra el plano con las dimensiones de la base. Al diseño se le da un sobredimensionamiento para su fabricación ya que el proceso se mediante manufactura aditiva, es decir, utilizando una impresora 3D con filamento tipo ABS. Tratándose de un proceso en donde el material se calienta para ser extruido, éste sufre una dilatación y posteriormente, al momento de que comienza a enfriarse y a endurecerse sufre una contracción del dimensionamiento real, la cual ronda entre el tres y siete por ciento de las dimensiones con las cuales se manda a imprimir. En la Figura 4.15 se muestra la pieza ya fabricada.

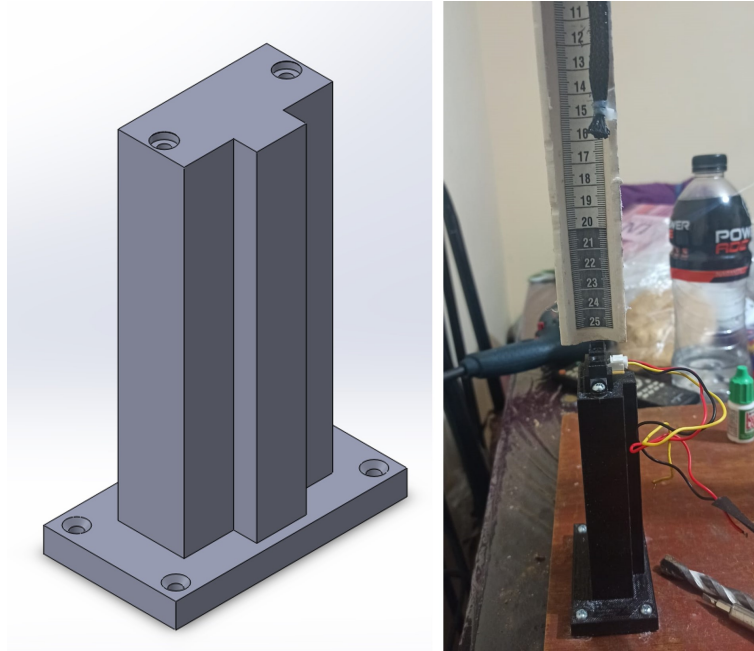


Figura 4.14: Diseño y montaje de la base del sensor

Teniendo lista la pieza y una vez montada junto con el sensor, se procede a realizar pruebas de funcionamiento. Se determinó que la señal que emite el sensor para medir la distancia no era captada de regreso, lo cual significa que hay una falla en el proceso de medición. Por lo tanto, se modificó el banco de pruebas para que se tenga una correcta medición de la contracción del músculo.

Las modificaciones realizadas consisten en insertar en el extremo del musculo un dispositivo de masa despreciable, como lo es un abatelenguas, para no afectar el funcionamiento del actuador. Lo que se le hizo fue barrenar por el centro del abatelenguas para insertar la punta del extremo del músculo neumático. Posteriormente, se realizó un corte en “T” en el extremo en contacto con el la sección de 35 [cm] del tubo, implementando una guía tipo canal por donde se inserta el abatelenguas para que pueda correr. De este modo, se asegura que la señal emitida por el sensor regrese al receptor y con ello se tenga una medida adecuada. Cuando el músculo se contrae, sube y con ello el abatelenguas, por lo que el funcionamiento es óptimo para realizar la caracterización del actuador.

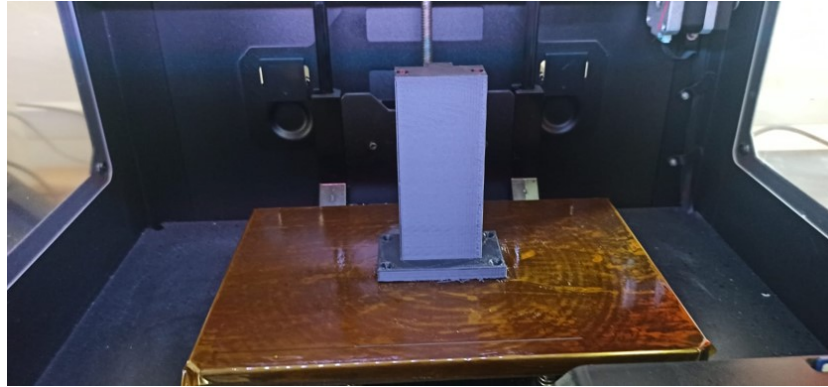


Figura 4.15: Manufactura de la base del sensor



Figura 4.16: Modificación del banco de pruebas

4.4.2. Instrumentación mecatrónica

Las válvulas proporcionales se utilizan para proporcionar respuestas rápidas, también porque se utilizan en control de alta precisión. Son dispositivos que dirigen y regulan el aire comprimido, muchas veces utilizados como elementos finales de control de un actuador cuya magnitud física es caudal o presión. Se involucran en técnicas de instrumentación mecatrónica ya que son capaces de convertir una señal analógica de entrada en alguna de sus posiciones, dando así una salida correspondiente de presión o caudal. Además cuenta con un sensor de presión y dos válvulas solenoides, una de alimentación y otra de alivio.

La válvula utilizada es una fabricada por la empresa SMC, cuyo modelo es ITV0010-3S y se muestra en la Figura 4.17. Su hoja de especificaciones se encuentra en el Apéndice B.3. Funciona con una señal analógica de entrada de 0 a 10 [V], su alimentación de aire comprimido es como máximo de 0.2 [MPa] y la salida de presión esta en el rango de 0.001 a 0.1 [MPa]. Por otro lado, su alimentación es de 24 [V] de corriente directa, tiene un consumo de 0.12 [A] y utiliza una manguera neumática de 4 [mm] de diámetro.



Figura 4.17: Válvula proporcional ITV0010-3S

El principio de funcionamiento es el siguiente: cuando la señal eléctrica de entrada es detectada, la alimentación de aire se abre y la la presión es medida por el sensor. El valor de la presión de salida es convertida a una señal eléctrica y esta es retroalimentada al circuito de control hasta que la presión de salida se vuelve proporcional a la señal de entrada.

Hasta este punto se han seleccionado los instrumentos de medición usados en la implementación del banco de pruebas. También se ha modificado el diseño con el que se comenzó la construcción de dicho banco y agregándole ciertos aditamentos, como es la base del sensor y el abatelenguas. Todo esto para implementar una ley de control para el actuador con ayuda del banco de pruebas, la instrumentación y la adquisición de datos.

4.5. Adquisición de datos y procesamiento de señal

En las secciones anteriores se abordaron algunas técnicas de instrumentación usadas en la implementación del banco de pruebas. Esta sección se enfoca en la adquisición,

procesamiento de señales y registro datos, y el posterior diseño de una ley de control que regule el comportamiento del músculo neumático tipo McKibben.

Para la parte de procesamiento de señal, se utiliza el software de LabVIEW, del fabricante National Instruments. Este software necesita de hardware para poder realizar la adquisición de datos. Así como el fabricante desarrolla el software, también tiene un amplio catálogo de tarjetas de adquisición de datos mediante las cuales se realiza el procesamiento de señal. Sin embargo, al no contar con una tarjeta de National Instruments se decidió utilizar la tarjeta de desarrollo Arduino Mega 2560. La ventaja de utilizar Arduino es que su costo de adquisición es bajo comparándolo con el costo de una tarjeta de National Instruments. Una vez seleccionado el hardware, es importante saber cuáles y de qué tipo son sus valores de entradas y salidas permitidos, si contiene entradas de tipo analógicas o digitales y también conocer que tipo de salidas puede proporcionar, por ejemplo PWM.

La tarjeta Arduino tiene un microcontrolador ATmega2560 que incluye un reloj de 16 MHz de frecuencia, tiene 54 entradas y salidas digitales, 16 entradas analógicas, 4 puertos seriales UART, 15 pines de salida de PWM con resolución de 8 bits y también un convertidor analógico-digital con resolución de 10 bits.

Es importante determinar si se necesita algún tipo de acondicionamiento antes y después de procesar la señal. El sensor de distancia Sharp tiene una etapa de acondicionamiento de señal en su encapsulado, por lo tanto, no se necesita un acondicionamiento adicional. Además, la tarjeta de adquisición cuenta con entradas analógicas, pudiéndose ingresar de manera directa la señal proveniente del sensor. La alimentación de éste es de 5 [V] de corriente directa y se toma directamente del Arduino ya que contiene un pin especial para alimentar sensores a 5 [V]. También el pin de GND se conecta al pin de GND del Arduino. Gracias a todo lo anterior, al sensor no se le aplica ningún tipo de acondicionamiento de señal.

La válvula proporcional es alimentada con 24 [V] de corriente directa y no puede ser alimentada directamente desde el Arduino. Por ello, fue indispensable utilizar una fuente regulada de voltaje que se muestra en la Figura 4.18.



Figura 4.18: Fuente reguladora simétrica variable de -24 a 24 [V]

La hoja de especificaciones de la válvula proporcional indica que ésta funciona con una señal analógica de de 0 a 10 [V] de corriente directa. Sin embargo, la tarjeta de adquisición de datos no proporciona salidas analógicas, pero si salidas de PWM que pueden ser convertidas a salidas analógicas mediante un módulo de conversión. En la Figura 4.19 se muestra el módulo utilizado y la disposición de sus pines. Su alimentación es de 12 a 30 [V] de corriente directa, por lo tanto, se puede alimentar con la fuente variable de 24 [V] con la que ya se cuenta. También es necesaria una selección de voltaje de PWM. En este caso, como la tarjeta de adquisición de datos es la que proporciona la salida de voltaje PWM y su salida corresponde a un rango de 0 a 5 [V], se selecciona el puente número 2. En la parte inferior de la figura hay dos borneras, la primera de izquierda a derecha corresponde a la entrada de voltaje de tipo PWM, por lo tanto, se conecta al pin de Arduino que proporciona la salida de dicho voltaje y la entrada de GND se conecta al pin de GND de Arduino. Por otro lado, la segunda bornera proporciona el voltaje de salida pero ya convertido a voltaje analógico en un rango de 0 a 10 [V]. Esta es una gran ventaja ya que la válvula proporcional trabaja con un voltaje de entrada analógico de 0

a 10 [V], por lo tanto, se puede conectar la salida del módulo directamente a la entrada de la válvula. Por último, en la imagen se muestra un potenciómetro con el que se calibra el voltaje de salida el cual oscila entre los 0 a 10 [V].

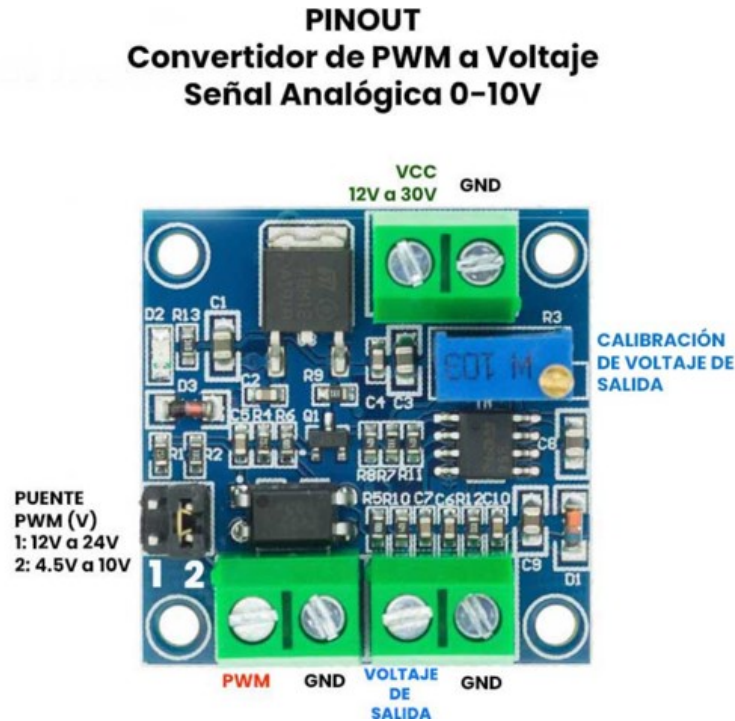


Figura 4.19: Módulo convertidor de voltaje PWM a voltaje analógico

La Figura 4.20 muestra el proceso de calibración del módulo, el cual consiste en alimentarlo con 24 [V] directamente con la fuente de voltaje. Posteriormente, con la tarjeta de desarrollo se ejecuta un código en el cual a la salida del PWM proporciona 5 [V] y este pin es conectado a la entrada del módulo, con el potenciómetro se ajusta el valor de salida de voltaje analógico que debe de ser de 10 [V], lo cual se corrobora con el multímetro que se muestra en la imagen. Posteriormente, se ingresa el valor de 2.5 [V] a la salida del microcontrolador y a la salida se deben obtener 5 [V] ya que la correspondencia es lineal, lo que se corrobora con el multímetro. En dado caso de que no sea así, se ajusta nuevamente el potenciómetro. La implementación corresponde a un acondicionamiento de señal posterior a ser procesada mediante el microcontrolador.

Una vez establecidas las condiciones óptimas para realizar el procesamiento de señal,

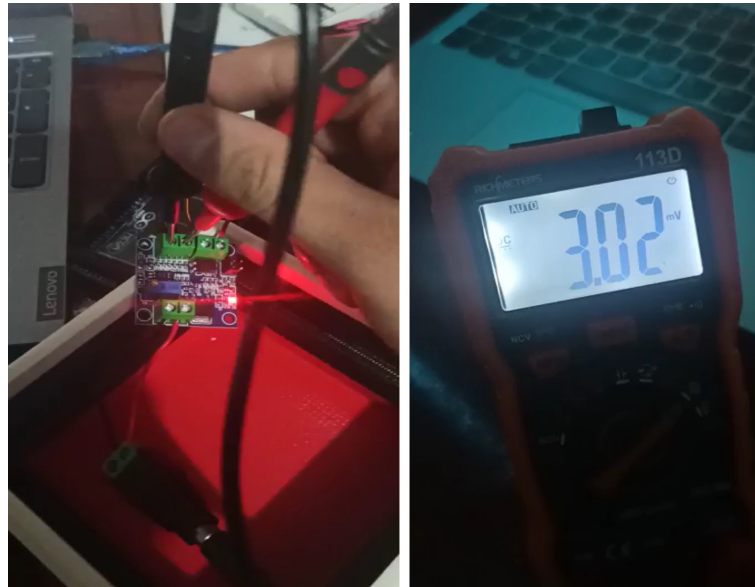


Figura 4.20: Calibración del módulo PWM

se realizaron las conexiones. La tarjeta de adquisición de datos es alimentada directamente desde la computadora mediante un cable USB, con el que también se realiza la transferencia de datos. Como la tarjeta Arduino cuenta con pines para alimentar sensores a 5 [V], el sensor Sharp fue alimentado directamente desde dicha tarjeta de adquisición de datos. Por otro lado, el cable que transmite la señal que emite el sensor es conectado directamente a un pin analógico de la tarjeta. Sin embargo, la válvula proporcional debe de ser alimentada a 24 [V], al igual que el módulo de conversión de voltaje. Por lo que, es necesario tener en cuenta el uso de un dispositivo que pueda conectar todas estas alimentaciones en una sola. Se debe de tener en cuenta que las tierras de Arduino, la válvula y el módulo deben de ir conectadas en un mismo punto. Por último, pero no menos importante, la salida del módulo de conversión de voltaje debe de conectarse a la entrada de accionamiento de la válvula. Por todo lo anteriormente descrito, se diseñó e implementó una tarjeta electrónica que contuviera estas conexiones.

Ya que se tienen un diagrama de conexiones, es importante implementarlo y corroborar su funcionamiento sobre una protoboard. En la Figura 4.21 se muestra la conexión implementada. Una vez que se validó que las conexiones fueran adecuadas, se procedió

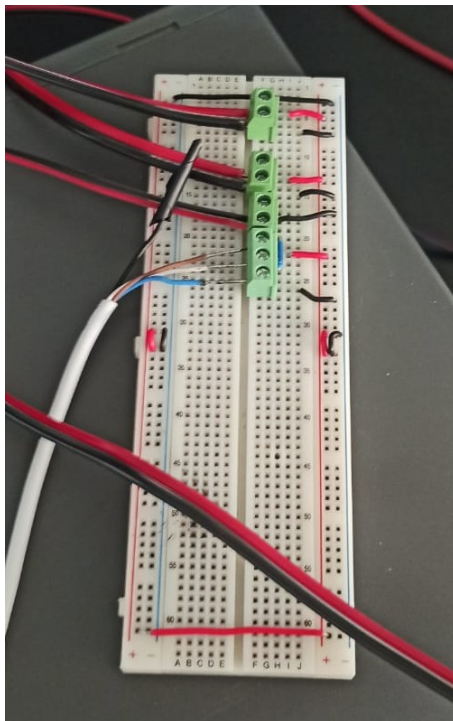


Figura 4.21: Pruebas de conexión en una protoboard

a la fabricación de una PCB, tomando como base el diagrama que se encuentra en el Apéndice C.3.

Para realizar las conexiones y poder visualizarlas en 3D, se utilizó el software Altium Designer. Es importante esta fabricación ya que, si se dejan las conexiones en la protoboard, se corre el riesgo de tener errores en las mediciones. En la Figura 4.22 se muestra el diseño de la tarjeta PCB, en donde se observa el plano de conexiones, así como el montaje de los componentes. También contiene la leyenda de cada conexión para saber qué cable se conecta en cada uno de ellos, así como su enumeración. Ya que se cuenta con el diseño, se puede fabricar la placa PCB. En esta ocasión, se optó por la fabricación del método de la plancha, el cual consiste en imprimir los planos de las pistas en hoja tipo fotografía mediante una impresora láser. Una vez que se imprime al tamaño requerido, se corta y se coloca en una placa de baquelita, en donde la parte de las pistas va sobre la parte de cobre, y se plancha por aproximadamente 10 minutos. Después se deposita en un recipiente con agua para quitar el papel, con lo que queda impregnada la tinta de la impresión en la

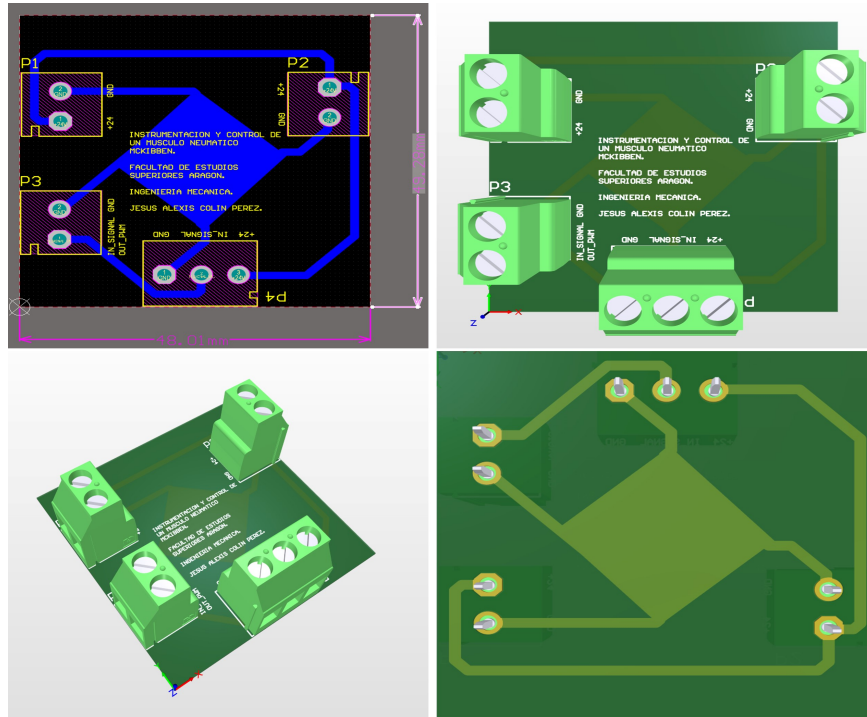


Figura 4.22: Diseño de la tarjeta PCB utilizando el software Altium Designer

parte de cobre. Si alguna sección con tinta no queda impregnada correctamente se dibuja la parte que no quedo con plumón negro permanente. Una vez hecho esto, se procede a barrenar la placa con un dremel. Posteriormente, la baquelita ya perforada es metida a un recipiente que contiene cloruro férrico, lo cual provocará que la parte con cobre se desprenda de la baquelita y la parte que contiene la tinta no, esto tarda alrededor de 15 minutos. Una vez que todo el cobre que no se utiliza es desprendido de la placa, se procede a lijar la parte con tinta con una lija de agua, quedando el cobre de las pistas desprendiéndose la tinta. Ya que se tiene este proceso, la parte superior es cortada y puesta sobre la parte de la baquelita que no contiene las pistas. Se debe verificar que los barrenos coincidan con los barrenos marcados por la impresión, con lo que se asegura un correcto ensamble de los componentes, así como que el nombre de las señales y la numeración de los componentes quede completamente plasmado en la placa. Una vez que esta todo listo se ensamblan y soldan los componentes.

En la Figura 4.23 se muestra la placa PCB ya fabricada. Adicionalmente se le realizaron

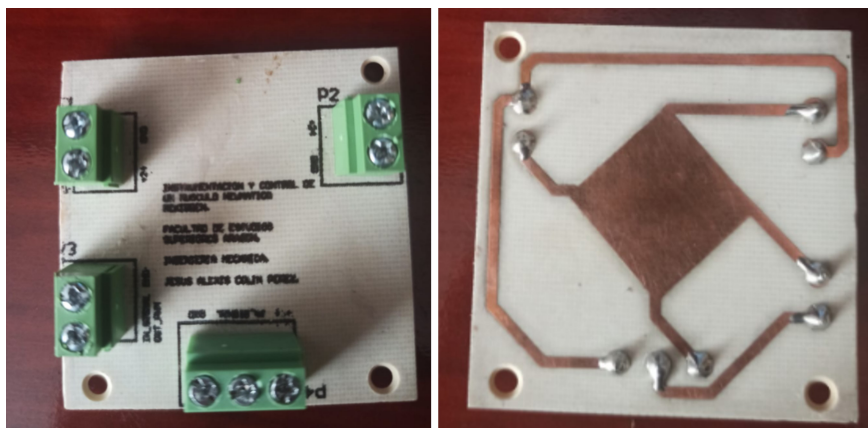


Figura 4.23: Fabricación de la tarjeta de conexiones por el método de la plancha

pruebas de continuidad para confirmar que las pistas no tienen alguna fisura por errores de fabricación.

4.6. Programación

La Figura 4.24 muestra el programa para establecer comunicación entre LabVIEW y Arduino. Primero se coloca un ciclo, que representado por el recuadro gris, donde se encuentra la programación por bloques gráficos. En el caso de la imagen, se muestra el seteo de un canal de tipo *duty cycle* el cual produce una salida en la tarjeta de tipo PWM.

En el bloque de *PWM channel* se escoge el pin de salida en la tarjeta de adquisición de datos, en donde el bloque naranja es un elemento de instrumentación gráfica que permite seleccionar los valores de salida del PWM. En la parte derecha, fuera del loop, lo que se hace es abrir un puerto serial, el cual establece comunicación con la tarjeta y posteriormente es conectado al programa que se estará ejecutando. Posteriormente es conectado a otro bloque (en la parte izquierda del recuadro) que finaliza la comunicación con la tarjeta de adquisición de datos. En la parte inferior el reloj se muestra el retardo del programa que sirve para establecer la duración de cada ciclo, en este caso es de 10 [ms] y también hay un botón de stop para parar el programa.

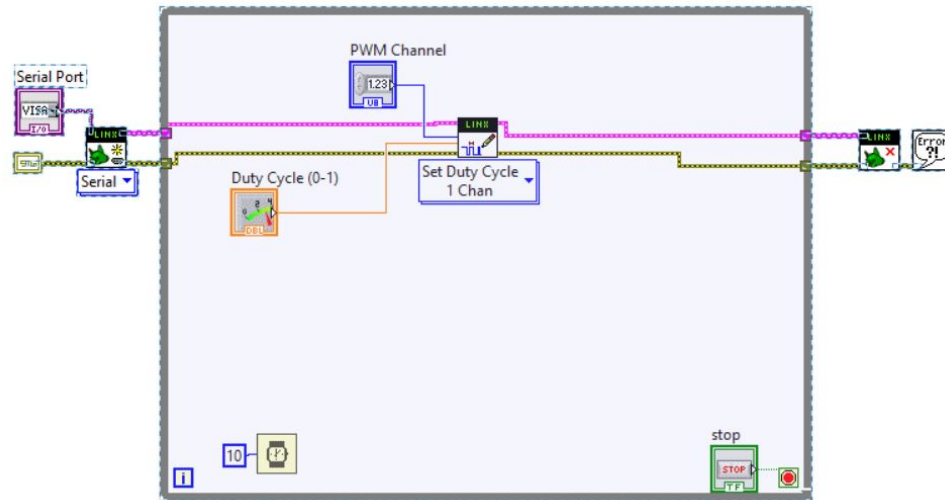


Figura 4.24: Conexión de la tarjeta de adquisición de datos con LabVIEW

En la Figura 4.24 se muestra la prueba de funcionamiento de la conexión de LabVIEW con Arduino. Una vez que se ejecuta el programa, se muestra un panel frontal en donde, mediante una aguja se visualiza la salida de PWM. Los dos recuadros que se muestran a la izquierda son para seleccionar el pin de salida analógico y el puerto serial con el que se establece la comunicación. Con esta prueba se demuestra que es posible utilizar Arduino como tarjeta de adquisición de datos y también la funcionalidad de las salidas de PWM.

4.6.1. Sintonización del controlador

Una vez que el banco se encuentra montado y que el programa para programar la ley de un control PID está listo, es momento de sintonizarlo. Por sintonización se entiende el hecho de determinar valores de ganancias con los cuales el actuador funcionará de acuerdo a los requerimientos del proceso en donde se utiliza. La función del programa es hacer que el músculo neumático McKibben reproduzca valores deseados, en este caso, de distancia. Esto se hace variando las ganancias proporcional, integral y derivativa mediante el panel frontal del programa. es decir, sintonizando el controlador.

En la Figura 4.26 se aprecia la selección de los distintos parámetros de sintonización. Los datos que arroja el proceso son representados en las gráficas lo cual sirve para verificar

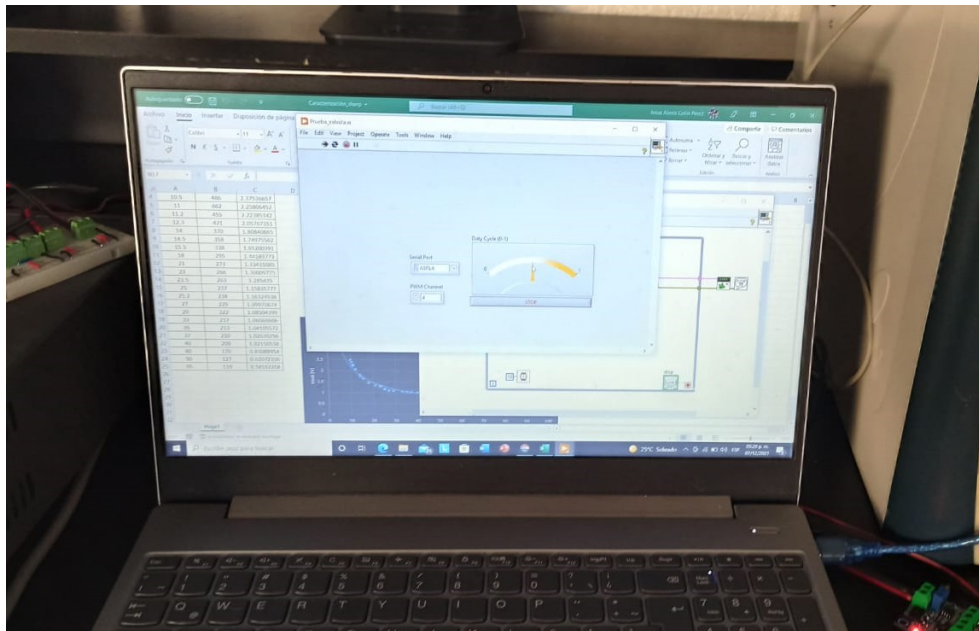


Figura 4.25: Ejecución del programa de prueba

si en el tiempo que se ejecuta el código, el desempeño del controlador es óptimo así, se pueden realizar los cambios necesarios para que el sistema funcione de manera correcta. Al mismo tiempo que esto sucede, los datos obtenidos se guardan en una hoja de Excel que se encuentra en la ubicación seleccionada en el recuadro *template*, lo cual ayuda a tener un registro de los cambios realizados y lo que sucedió durante la ejecución del programa.

A continuación se muestran las gráficas que se obtuvieron durante la etapa de sintonización del controlador y que representan la distancia deseada en términos de voltaje [V], así como el seguimiento de dicha distancia. Con ello se evalúa el comportamiento del músculo de acuerdo al algoritmo de control.

En la Figura 4.27 se muestra la gráfica de los resultados que se obtuvieron al momento de poner en funcionamiento el controlador. La línea roja es el valor de referencia al que tiene que llegar el músculo. El valor de referencia tiene unidades de volts porque la señal procesada es de voltaje. Sin embargo, la señal de referencia se captura como una distancia deseada en el panel frontal de la aplicación. Por otro lado, la curva azul representa la señal de respuesta, en este caso la distancia a la que se encuentra el músculo neumático. Por

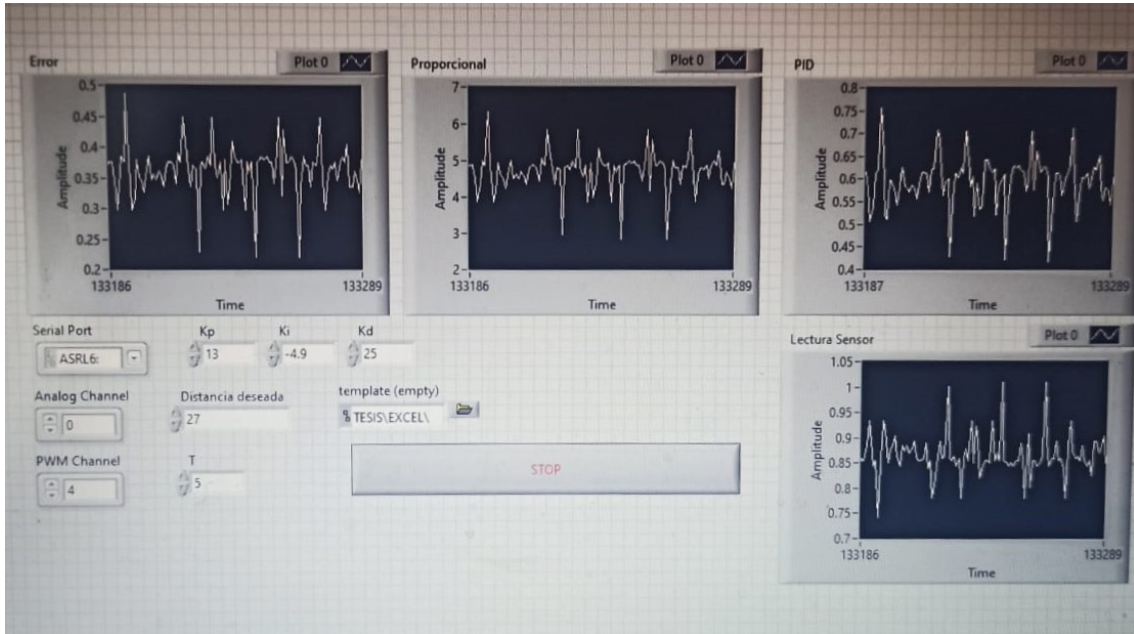


Figura 4.26: Introducción de parámetros para la sintonización del controlador

otro lado, el sensor de distancia es el encargado de retroalimentar al controlador para que este conozca si el músculo se encuentra trabajando sobre línea de referencia. En este caso, las ganancias no fueron las favorables para que esto sucediera y son las mostradas en la Tabla 4.1.

Sintonización del PID			
Distancia [cm]	K_p	K_i	K_d
27	10	5	-5
27	15	-5	-5
27	20	5	5

Tabla 4.1: Ajuste de ganancias de la prueba 1

La Figura 4.28 muestra un experimento distinto en la sintonización del controlador. En este caso, lo que se hizo fue variar la referencia y sin cambiar las ganancias establecidas previamente. Por ello es que la línea roja se muestra con distintas variaciones, observándose que el actuador trata de responder, lo que indica una sintonización del controlador incorrecta. La Tabla 4.2 contiene los valores de las distancias con ganancias

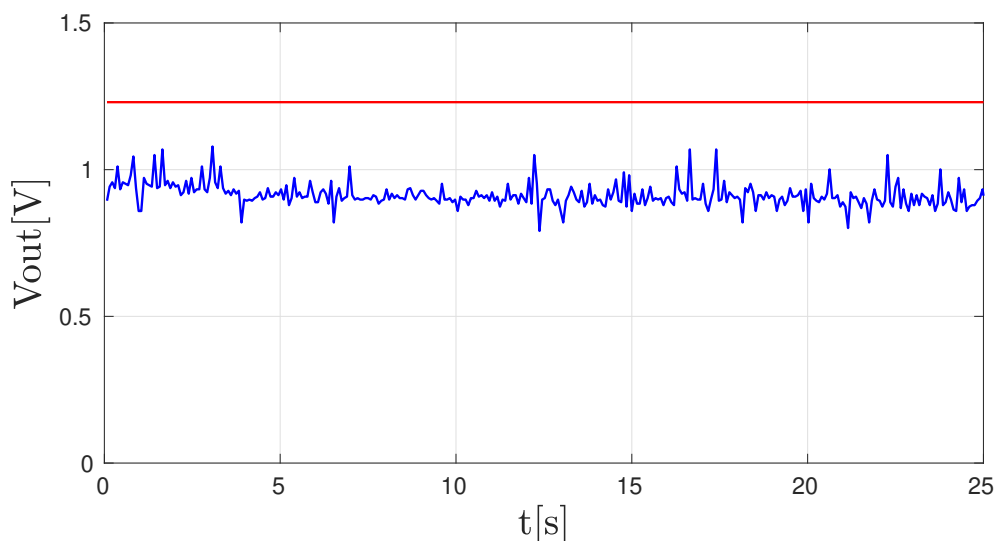


Figura 4.27: Representación gráfica de la sintonización del controlador

constantes.

Sintonización del PID			
Distancia [cm]	K_p	K_i	K_d
10	12.5	7	7.55
12	12.5	7	7.55
17	12.5	7	7.55
7	12.5	7	7.55

Tabla 4.2: Ajuste de ganancias de la prueba 2

En la Figura 4.29 se tiene el método de sintonización en donde la línea de referencia permanece constante se modifican las ganancias, las cuales se muestran en la Tabla 4.3. Desde el segundo 200 se observa como el actuador comienza a alejarse del valor de referencia en forma ascendente y entre el segundo 400 y 500 es cuando alcanza un valor máximo sin acercarse aún a la línea de referencia. Posteriormente, en el segundo 450 aproximadamente, el actuador comienza a descender y a acercarse a la línea de referencia, lo cual implica que las ganancias fueron ajustadas correctamente. Todo esto se visualiza en las gráficas del panel frontal de la aplicación en tiempo real al mismo tiempo que los datos se guardaron en Excel.

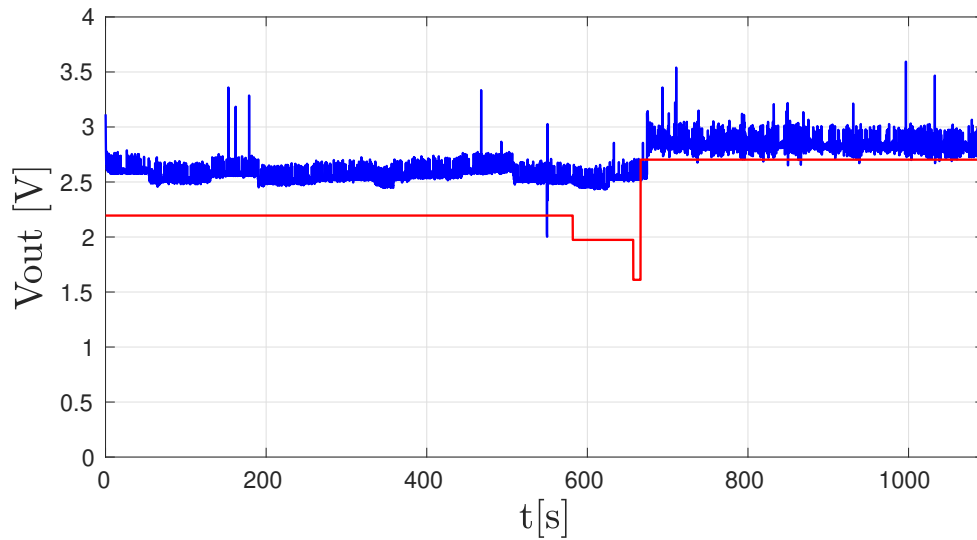


Figura 4.28: Representación gráfica de la sintonización del controlador

Sintonización del PID			
Distancia [cm]	K_p	K_i	K_d
7	10	-7	7.55
7	12	5	-5
7	12.5	12	12
7	125	7	7.55
7	140	9	-9

Tabla 4.3: Ajuste de ganancias de la prueba 3

La Figura 4.30 corresponde a una mejora en la sintonización del control ya que la línea azul oscila sobre la línea roja, lo cual quiere decir que se comienzan a encontrar valores adecuados de las ganancias para que el músculo se aproxime al valor de referencia, los valores de las dichas ganancias se muestran en la Tabla 4.4 En este caso, la línea de referencia continúa siendo constante, por lo tanto, es deseable cambiar la referencia para observar cómo funciona el actuador ante estos cambios, es decir, si produce una respuesta adecuada al ajustar su comportamiento.

Una vez que se han encontrado valores de las ganancias a las cuales el actuador responde de una manera adecuada, es preciso realizar una prueba de seguimiento a una

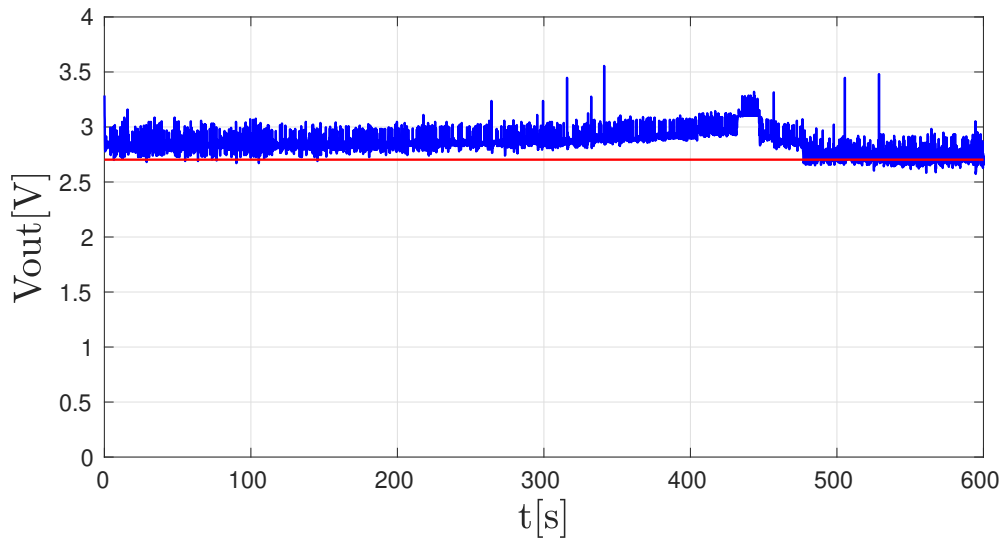


Figura 4.29: Representación gráfica de la sintonización del controlador

Sintonización del PID			
Distancia [cm]	K_p	K_i	K_d
7	130	-7	7.55
7	135	5	-5
7	126	12	12
7	125	7	7.55
7	127	5	15

Tabla 4.4: Ajuste de ganancias de la prueba 4

función $f(x)$ para corroborar que el sistema efectivamente, responde así a los cambios de referencia. En la Figura 4.31 se muestra el seguimiento a una función seno programada en LabVIEW. Como se observa, la variación de los valores no es muy grande. Sin embargo, el seguimiento lo realiza de una forma adecuada, lo que significa que el controlador responde a los cambios de valores de referencia.

La Figura 4.32 muestra otra prueba de seguimiento realizada con otra función seno $f(x)$ pero con mayor amplitud. En este caso se puede observar que el actuador contiene más variaciones con respecto a la línea de referencia, sin embargo, sigue respondiendo de forma adecuada a la función de seguimiento. Lo anterior prueba que las ganancias

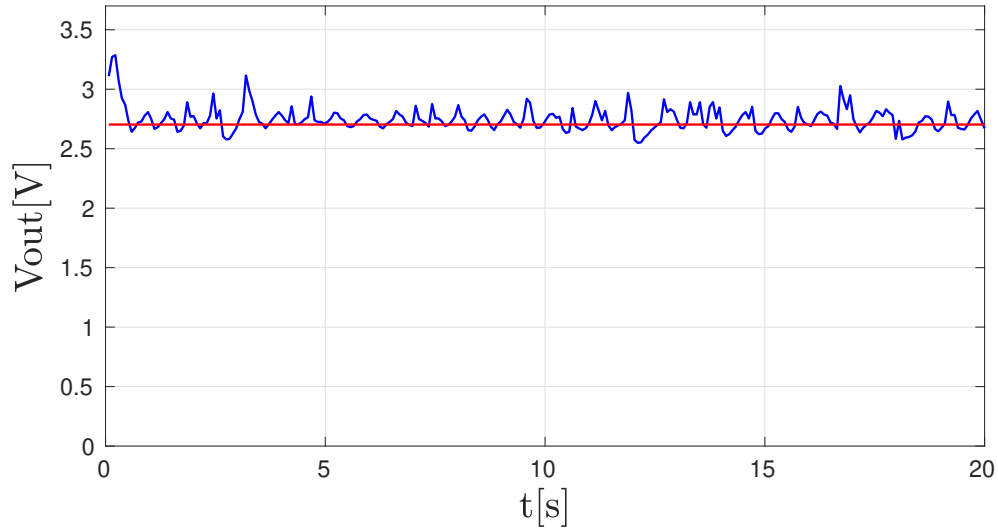


Figura 4.30: Representación gráfica de la sintonización del controlador

obtenidas en la sintonización del controlador son adecuadas para este rango de operación.

Es conveniente aclarar que se realizaron muchas pruebas para determinar cuáles ganancias eran las mejores para que se realizará el seguimiento a cualquier línea de referencia y se encontró que las ganancias deben ajustarse para los distintos valores que se desean establecer. Por lo tanto, el ajuste de ganancias se debe realizar siempre que la referencia cambia, es decir, las ganancias no pueden ser las mismas para distintos valores.

Sintonización del PID			
Distancia [cm]	K_p	K_i	K_d
27	13	-4.9	25
23	7	10	7.5
15	120	5	5
12	123	5	-3
7	127	5	15

Tabla 4.5: Ganancias obtenidas para distintos valores de distancia

La Tabla 4.5 muestra las ganancias K_p , K_i y K_d . Se observa que siempre existe una variación para distintas distancias. Es importante mencionar que estas ganancias se obtuvieron con un tiempo de muestreo $T = 1$ [ms], por lo que, si se desea obtener las

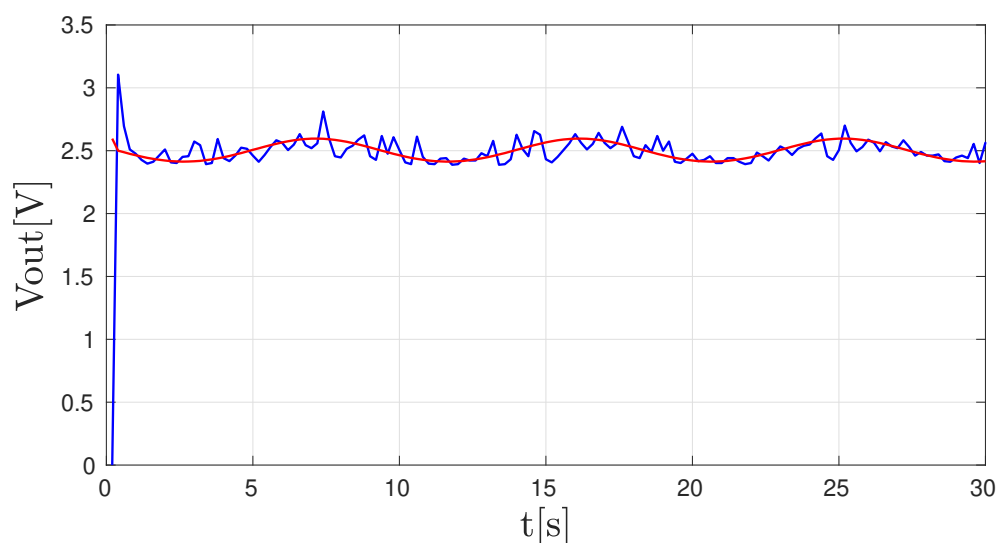
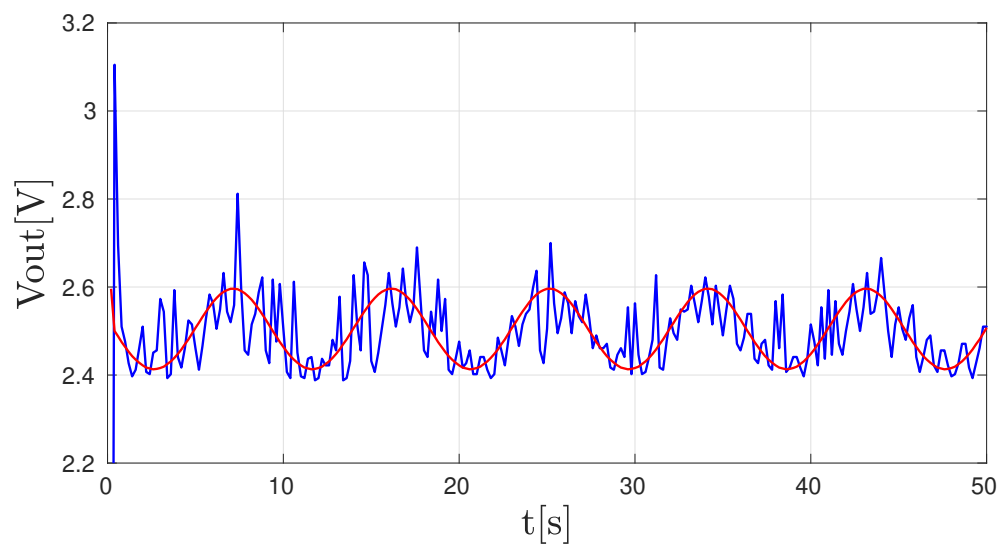


Figura 4.31: Seguimiento de $f(x)$

ganancias para estas distancias pero con otro valor de tiempo de muestreo es probable que no funcionen, y se tenga que realizar todo el proceso mencionado anteriormente. Esto se debe a que el modelo matemático del actuador no es lineal. Sin embargo, la ecuación 3.7 es una aproximación lineal de este modelo pero que no es exacta y no contiene todos los elementos que describen de manera adecuada el funcionamiento del músculo. Principalmente esto se debe al desgaste de los materiales que lo conforman, además de que esto provoca que la constante elástica K y el coeficiente de amortiguamiento β sean variables. Es por ello que si cambiamos de distancia o el tiempo de muestreo se deben de ajustar las ganancias.

Comparando los bancos de pruebas de la literatura con el que se fabricó artesanalmente es importante marcar las semejanzas que existen, entre las cuales se encuentran que todos contienen sistemas de adquisición de datos, procesamiento de señales, sistemas de instrumentación y una etapa de control. Por otra parte, entre las diferencias más sobresalientes son que los bancos de la literatura tienen mejores componentes, que en su mayoría no fueron fabricados artesanalmente, las tarjetas de adquisición de datos que ocupan son industriales y que pueden funcionar con más de un músculo. Sin embargo, este banco de

Figura 4.32: Seguimiento de $f(x)$

pruebas cumplió con los parámetros necesarios para poner a prueba al actuador.

Capítulo 5

Conclusiones

Uno de los principales objetivos de este trabajo de tesis era el poder establecer un modelo matemático que caracterizara a un músculo neumático tipo McKibben, compararlo con las ecuaciones halladas por distintas investigaciones y posteriormente implementar una ley de control para él. Para ello, en el Capítulo 2 se presentó la información encontrada respecto al actuador y sus modelos matemáticos. En el Capítulo 3 se mostró la implementación de un músculo McKibben desde cero, lo cual implicó realizar la selección de materiales y someterlo a diversas pruebas que permitieron conocer sus rangos de funcionamiento. Con dichos datos se realizó una selección de componentes para fabricar un banco de pruebas que permitiera observar el comportamiento del actuador bajo distintas condiciones.

Una vez que el banco de pruebas y el actuador estaban listos, éste último fue sometido a distintos ensayos, con los cuales se pudo caracterizar su principio de funcionamiento respecto a las variables de presión y longitud. Con los resultados obtenidos, se obtuvo un modelo matemático que corresponde a la solución de una ecuación diferencial. A partir de dicha solución se halló la ecuación diferencial general para este actuador. Ya que se contó con este modelo, se comparó con los establecidos en investigaciones previas, determinando que es similar a ellos. Por lo tanto, se considera que la caracterización llevada a cabo es idónea.

En el Capítulo 4 se implementó un control PID digital mediante el software LabVIEW

y utilizando un Arduino como una tarjeta de adquisición de datos. Con ello se obtuvieron buenos resultados de seguimiento mediante la sintonización del controlador, en donde se medía la distancia del actuador y con una válvula neumática proporcional se regulaba la presión de alimentación. Sin embargo, con los resultados obtenidos se constató que las ganancias de sintonización deben de ser autoajustables para distintos valores de referencia. Lo cual implica que, aunque el controlador fue capaz de hacer que el sistema realizara un seguimiento para una función de referencia programada, éste debería ser capaz de modificar sus ganancias en línea.

Los resultados de esta tesis fueron buenos ya que se cumplieron los objetivos principales: realizar la caracterización de un músculo McKibben y también implementar una ley de control para el mismo. Se pudo constatar que los datos de las pruebas son similares a las investigaciones ya publicadas y que son el sustento teórico de este trabajo. También se comprobó que se puede implementar un músculo y un banco de pruebas experimentales desde cero. Esto fue muy importante para esta tesis ya que se sustenta la correcta selección de materiales mediante los resultados experimentales obtenidos.

5.1. Trabajo a futuro

Los resultados en el presente trabajo de tesis fueron satisfactorios, sin embargo, existen una serie de modificaciones y mejoras que se pueden realizar para mejorarlos. Para la parte del músculo McKibben la mejora que se propone para trabajos posteriores es la obtención de la caracterización de la constante elástica K y del coeficiente de amortiguamiento β de los materiales que constituyen al actuador. También se propone la realización de un sistema de músculos en donde se caracterice a uno como abductor y al otro como aductor, imitando la morfología de un músculo humano.

Para el banco de pruebas se propone como mejora la selección de un manómetro con una mejor resolución, además de implementar un sensor de distancia que tenga mejores características al utilizado. Finalmente, para la parte de control se propone la implementación de alguna ley de control que cuente con ganancias autoajustables en función de los

valores de referencia del sistema. Con todas las modificaciones recomendadas es posible establecer las bases que permitirán implementar prototipos de órtesis o prótesis utilizando músculos McKibben, tal y como se indicó en la motivación de este trabajo. Haber implementado un banco de pruebas para un músculo neumático de este tipo, contribuirá con el desarrollo de estos dispositivos en la Facultad de Estudios Superiores Aragón, lo que a mediano y largo plazo beneficiará de la sociedad, en particular a las personas que por alguna razón hayan perdido la movilidad de alguna de sus extremidades.

Bibliografía

- Álvarez, J. C., Campo, J., Ferrero, F., Grillo, G., y Pérez, M. (2006). Instrumentación electrónica. *Editorial Thomson, (España, 2004)*.
- Areny, R. P. (2005). *Sensores y acondicionadores de señal 4a*. Marcombo.
- Balart Gimeo, R., Montañés Muñoz, N., Quiles Carrillo, L., Torres Giner, S., Lascano Aïmacaña, D., Rojas Lema, S., y Ivorra Martínez, J. (2021). Viscoelasticidad. modelo básico de kelvin-voigt. *Universitat Politècnica de València*.
- Bolton, W. (2002). *Mecatrónica: Sistemas de control electrónico en ingeniería mecatrónica*. Alfaomega.
- Caballero, A. H. y Carbonell, P. (2003). Prototipo experimental para la identificación y control de actuadores por músculo neumático. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, páginas 42–50.
- Chou, C.-P. y Hannaford, B. (1994). Static and dynamic characteristics of McKibben pneumatic artificial muscles. En *Proceedings of the 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, páginas 281–286 vol.1.
- Chou, C.-P. y Hannaford, B. (1996). Measurement and modeling of mckibben pneumatic artificial muscles. *IEEE Transactions on robotics and automation*, 12(1):90–102.
- Daerden, F. y Lefeber, D. (2000). Pneumatic artificial muscles: actuators for robotics and automation. *European Journal of Mechanical and Environmental Engineering*, 47:10–21.

- Gurstelle, W. (2015). Making a Simple Air Muscle - Make:. [Online; accessed 2. May 2022].
- Hesse, S. (2003). El músculo neumático y sus aplicaciones. *Festo AG & Co. KG*, páginas 1–145.
- Khan, A. H., Shao, Z., Li, S., Wang, Q., y Guan, N. (2020). Which is the best PID variant for pneumatic soft robots? an experimental study. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 7(2):451–460.
- Medina, J. y Vélez, P. (2014). “soft robotic”: Una nueva generación de robots. *Maskana*, 5:109–118.
- Najmuddin, W. y Mustafa, M. (2017). A study on contraction of pneumatic artificial muscle (pam) for load-lifting. En *Journal of Physics: Conference Series*, volume 908, página 012036. IOP Publishing.
- Nise, N. S. y Romo, J. H. (2002). *Sistemas de control para ingeniería*. Patria Cultural.
- Ogata, K. (2010). *Ingeniería de control moderna*.
- Pérez García, M. Á. (2014). *Instrumentación electrónica*. Ediciones Paraninfo, SA.
- Reynolds, D., Repperger, D., Phillips, C., y Bandry, G. (2003). Modeling the dynamic characteristics of pneumatic muscle. *Annals of biomedical engineering*, 31(3):310–317.
- Tang, T. y Chong, S. (2017). Practical controller design for ultra-precision positioning of stages with a pneumatic artificial muscle actuator. En *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, volume 210, página 012056. IOP Publishing.
- Tondu, B. y Lopez, P. (1997). The mckibben muscle and its use in actuating robot-arms showing similarities with human arm behaviour. *Industrial Robot: An International Journal*.
- Tondu, B. y Lopez, P. (2000). Modeling and control of McKibben artificial muscle robot actuators. *IEEE Control Systems Magazine*, 20(2):15–38.

Apéndice A

Modelo viscoelástico de Kelvin-Voigt

La viscoelasticidad define una naturaleza dual, es decir, sólidos elásticos y líquidos viscosos. Para un sólido elástico su modelo correspondiente es un resorte, y para un líquido viscoso es un amortiguador.

El elemento físico representativo del comportamiento elástico es un resorte, y el modelo matemático que rige su comportamiento es la ley de Hooke [Balart Gimeo et al., 2021].

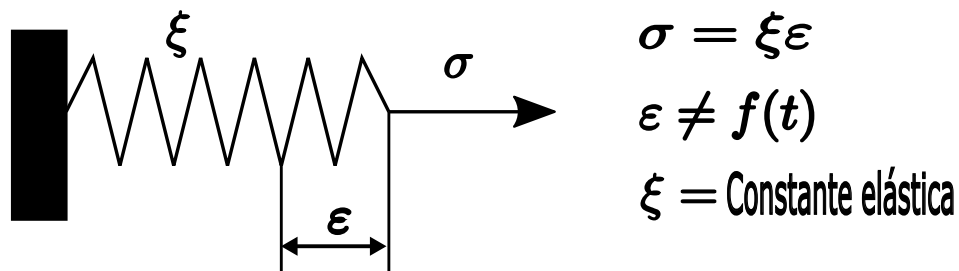


Figura A.1: Resorte [Balart Gimeo et al., 2021]

Como se muestra en la Figura A.1, la Ley de Hooke establece la proporcionalidad entre la tensión aplicada σ con la elongación producida ϵ , a través de una constante de proporcionalidad elástica ξ . La expresión matemática hace referencia a que la tensión aplicada al resorte (sistema elástico), es igual a la elongación que este sufre, tomando como referencia un punto inicial, este se toma cuando al resorte no se le ha aplicado ninguna tensión, por lo tanto, en ese punto no hay un cambio de elongación; pero al momento de

aplicar la tensión la elongación cambia, tomando como referencia el punto inicial. Esta elongación, o también conocida como cambio de longitud debe de ser multiplicada por una constante elástica, ya que dicha constante establece la proporción que hay entre la tensión aplicada y la diferencia de elongación.

La ecuación representativa de este fenómeno es la siguiente

$$\sigma = \xi \varepsilon \quad (\text{A.1})$$

El elemento representativo del elemento viscoso es un amortiguador, es decir un embolo en el cual en su interior se encuentra un determinado fluido. La expresión matemática que relaciona las tensiones y las elongaciones esta dada por la ley de Newton, que establece la proporcionalidad entre la tensión aplicada σ , la variación de elongación con respecto del tiempo $d\varepsilon/dt$, y la constante de proporcionalidad que esta ligada a la naturaleza del fluido, y se le conoce como constante de viscosidad η [Balart Gimeo et al., 2021].

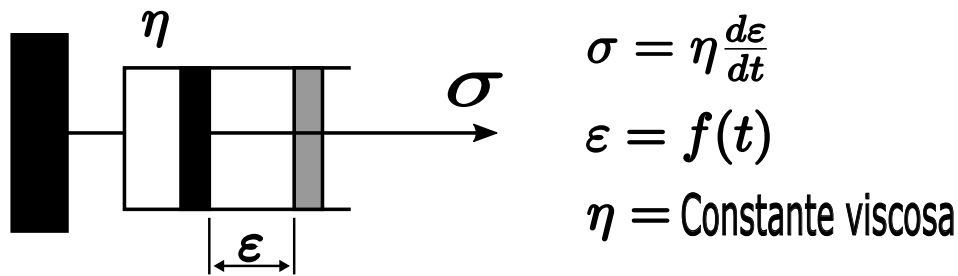


Figura A.2: Amortiguador[Balart Gimeo et al., 2021]

La Figura A.2 muestra que la respuesta del amortiguador depende del tiempo, cuando se le aplica una tensión al sistema. La variación de la elongación esta en función del tiempo, el cual es proporcional a la tensión aplicada, no sin antes tener en cuenta que esto se ve afectado por la constante de viscosidad, la cual se define como la relación que existe entre el tiempo en que tarda en modificarse la elongación del sistema, en función de la tensión aplicada.

La ecuación representativa es la siguiente

$$\sigma = \eta \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (\text{A.2})$$

Como se muestra en la Figura A.3, el modelo básico de viscosidad de Kelvin-Voigt considera el acoplamiento en paralelo del resorte y el amortiguador, a los cuales se les aplica una tensión σ .

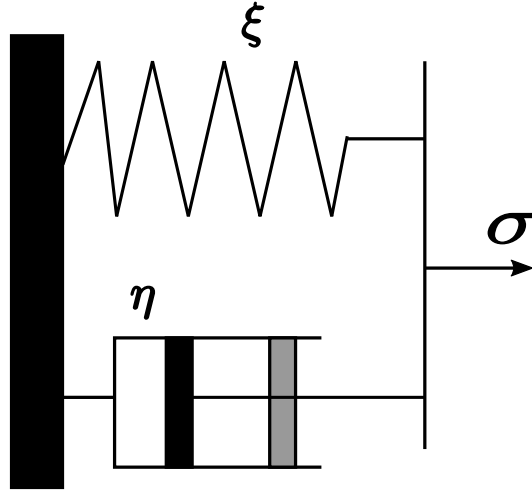


Figura A.3: Acoplamiento paralelo[Balart Gimeo et al., 2021]

Observando la Figura A.4, se tiene que la tensión aplicada σ , la comparten tanto el resorte como el amortiguador, por lo tanto podemos decir que la suma de las tensiones es igual a la tensión total.

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 \quad (\text{A.3})$$

Donde σ = Tensión total, σ_1 = Tensión aplicada en el resorte, σ_2 = Tensión aplicada en el amortiguador

Como se puede observar en la Figura A.4 las elongaciones son las mismas para el resorte como para el amortiguador, por lo tanto se define de la siguiente manera

$$\varepsilon = \varepsilon_1 = \varepsilon_2 \quad (\text{A.4})$$

Donde ε = Elongación total, ε_1 = Elongación aplicada en el resorte, ε_2 = Elongación aplicada en el amortiguador. Por lo tanto, se tienen las ecuaciones (A.1) y (A.2), expresadas con la elongación total ε . Y sustituyéndolas en (A.3) se tiene la siguiente expresión

$$\sigma = \xi\varepsilon + \eta\frac{d\varepsilon}{dt} \quad (\text{A.5})$$

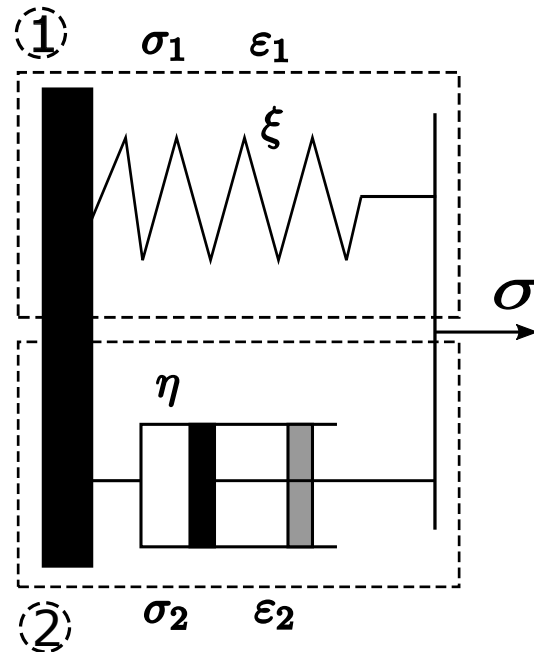


Figura A.4: Diagrama de los elementos presentes en el modelo de Voigt[Balart Gimeo et al., 2021]

La ecuación (A.5) obtenida a partir del diagrama presentado en la FiguraA.4, es conocida como la expresión general del modelo viscoelástico de Kelvin-Voigt [Balart Gimeo et al., 2021]. Los modelos dinámicos presentados en la sección anterior se basan en esta ecuación, sin embargo, contienen algunas modificaciones, esto es porque aunque el modelo es muy bueno para definir el comportamiento de materiales viscoelásticos, no siempre es preciso, pero si ayuda para tener una referencia. Y esto es lo que pasa con el músculo neumático McKibben, que si bien el modelo no describe como tal todo su comportamiento, si ayuda a implementar mejores leyes de control. Todo lo anterior es debido a las no linealidades que presenta el actuador.

Apéndice B

Instrumentación

B.1. Manómetro



Manómetros
Lleno de líquido OEM



Instrutek
Measure. Control



SERIE

300

CARACTERÍSTICAS

- Lleno de líquido para prolongar su tiempo de vida útil y proveer resistencia a vibraciones.
- Disponibilidad de rangos desde vacío hasta 10,000 psi.
- Diámetro de carátulas de 2-1/2 y 4 pulgadas – conexiones inferior y posterior.
- Caja de acero inoxidable 304.
- Mecanismo en aleación de cobre.
- Relleno de glicerina, que disminuye los efectos de las cargas de pulsaciones, vibraciones y golpes.
- Disponibilidad en almacén.

APLICACIONES

Hidráulica
Aplicaciones industriales donde la pulsación, vibración e impacto están presentes

PRECISIÓN

Manómetros Serie 350 de 2-1/2 pulgadas: $\pm 2.5\%$

ESPECIFICACIONES OPERATIVAS

1. Limitaciones de presión de trabajo
 - a. **Presión dinámica**
La presión de trabajo debe limitarse al 60% del rango total.
 - b. **Presión estática**
La presión de trabajo, donde no se producen grandes fluctuaciones, debe limitarse al 90% del rango total.
2. Temperatura de proceso

	MODELOS	ESPECIFICACIONES
Caja	63-300, 63-310, 100-300, 100-310.	Acero inoxidable 304.
Bisel	63-300, 63-310, 100-300, 100-310.	Acero inoxidable 304.
Ventana	63-300, 63-310, 100-300, 100-310.	Vidrio de seguridad.
Tubo Bourdon	63-300, 63-310, 100-300, 100-310.	Tubo "c" de bronce fosforado "C".
Conexión	63-300, 100-300, 63-310, 100-310.	Conexión inferior en latón de 1/4" NPT. Conexión posterior en latón de 1/4" NPT.
Mecanismo	63-300, 63-310, 100-300, 100-310.	Latón.
Precisión	63-300, 63-310, 100-300, 100-310.	$\pm 2.5\%$ $\pm 2.0\%$
Aguja	63-300, 63-310, 100-300, 100-310.	Aluminio, acabados en negro.
Carátula	63-300, 63-310, 100-300, 100-310.	Aluminio, fondo blanco psi en negro y kg
	63-300, 63-310,	Glicerina.

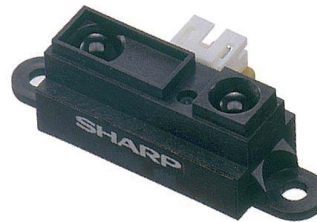
B.2. Hojas de especificaciones del sensor Sharp GP2Y0A21

SHARP

GP2Y0A21YK0F

GP2Y0A21YK0F

Distance Measuring Sensor Unit
 Measuring distance: 10 to 80 cm
 Analog output type



■ Description

GP2Y0A21YK0F is a distance measuring sensor unit, composed of an integrated combination of PSD (position sensitive detector), IRED (infrared emitting diode) and signal processing circuit.

The variety of the reflectivity of the object, the environmental temperature and the operating duration are not influenced easily to the distance detection because of adopting the triangulation method.

This device outputs the voltage corresponding to the detection distance. So this sensor can also be used as a proximity sensor.

■ Features

1. Distance measuring range : 10 to 80 cm
2. Analog output type
3. Package size : 29.5×13×13.5 mm
4. Consumption current : Typ. 30 mA
5. Supply voltage : 4.5 to 5.5 V

■ Agency approvals/Compliance

1. Compliant with RoHS directive (2002/95/EC)

■ Applications

1. Touch-less switch
(Sanitary equipment, Control of illumination, etc.)
2. Robot cleaner
3. Sensor for energy saving
(ATM, Copier, Vending machine)
4. Amusement equipment
(Robot, Arcade game machine)

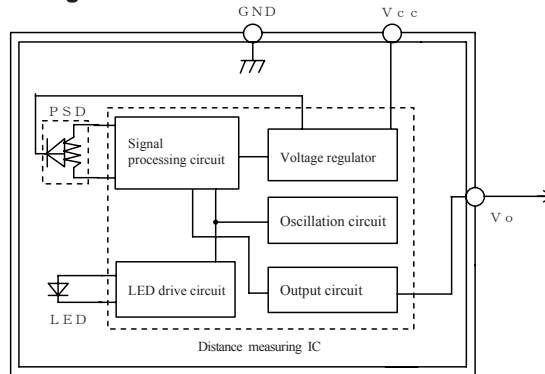
Notice The content of data sheet is subject to change without prior notice.

In the absence of confirmation by device specification sheets, SHARP takes no responsibility for any defects that may occur in equipment using any SHARP devices shown in catalogs, data books, etc. Contact SHARP in order to obtain the latest device specification sheets before using any SHARP device.



GP2Y0A21YK0F

■ Block diagram



■ Outline Dimensions

(Unit : mm)

(Stamp)

Stamp(Example)
SHARP
2Y0A21 F 4Z
Model name 4 Z
 Month(1 to 9,X,Y,Z)
 Year(2005.5)

Light emitter

Light detector

Connector

PWB

Lens case

Dimensions: 6.3, 2, 8.4, 7.2, 1.2, 13, (18.9/0.3), (3.3)

Connector signal

signal name	Connector :
① Vo	J.S.T.TRADING COMPANY,LTD, S3B-PH
② GND	
③ Vcc	

Materials

- Lens :Acrylic acid resin
(Visible light cut-off resin)
- Case :Carbonic ABS
(Conductive resin)
- PWB :Paper phenol

Note 1. The dimensions marked * are described the dimensions of lens center position.

Note 2. Unspecified tolerances shall be ± 0.3 mm.

Note 3. The dimensions in parenthesis are shown for reference.

Product mass : Approx. 3.6g

SHARP**GP2Y0A21YK0F****■ Absolute Maximum Ratings** (Ta=25°C, Vcc=5V)

Parameter	Symbol	Rating	Unit
Supply voltage	V _{CC}	-0.3 to +7	V
Output terminal voltage	V _O	-0.3 to V _{CC} +0.3	V
Operating temperature	T _{opr}	-10 to +60	°C
Storage temperature	T _{stg}	-40 to +70	°C

■ Electro-optical Characteristics (Ta=25°C, Vcc=5V)

Parameter	Symbol	Conditions	MIN.	TYP.	MAX.	Unit
Average supply current	I _{CC}	L=80cm (Note 1)	—	30	40	mA
Distance measuring	ΔL	(Note 1)	10	—	80	cm
Output voltage	V _O	L=80cm (Note 1)	0.25	0.4	0.55	V
Output voltage differential	ΔV _O	Output voltage difference between L=10cm and L=80cm (Note 1)	1.65	1.9	2.15	V

* L : Distance to reflective object

Note 1 : Using reflective object : White paper (Made by Kodak Co., Ltd. gray cards R-27•white face, reflectance; 90%)

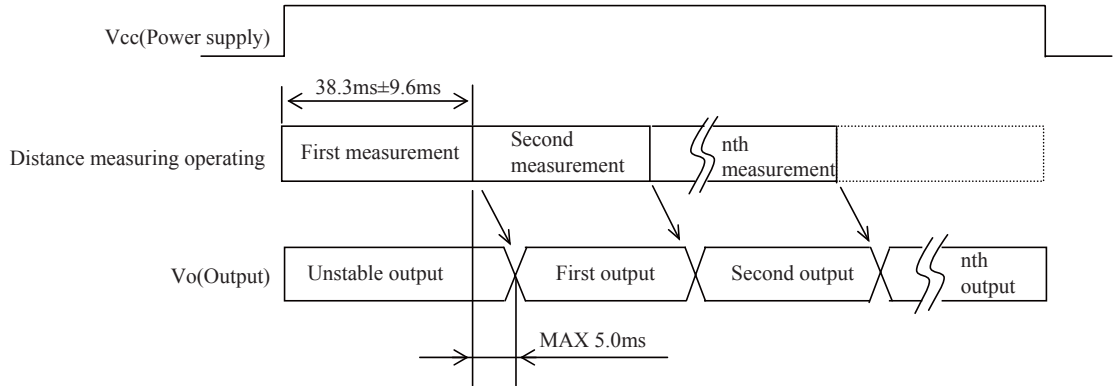
■ Recommended operating conditions

Parameter	Symbol	Rating	Unit
Supply voltage	V _{CC}	4.5 to 5.5	V



GP2Y0A21YK0F

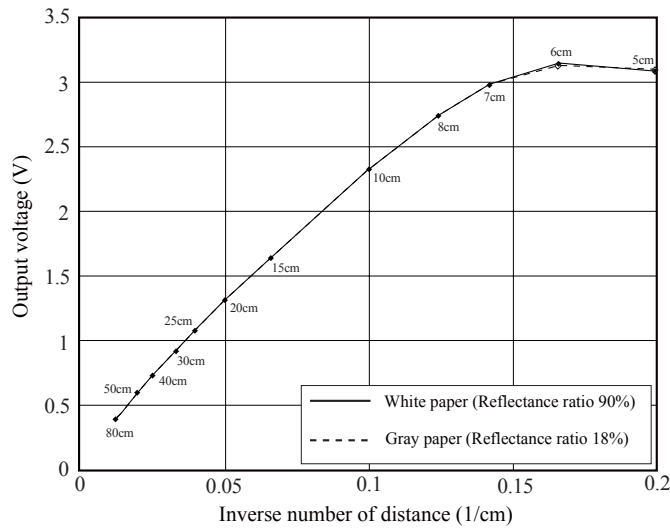
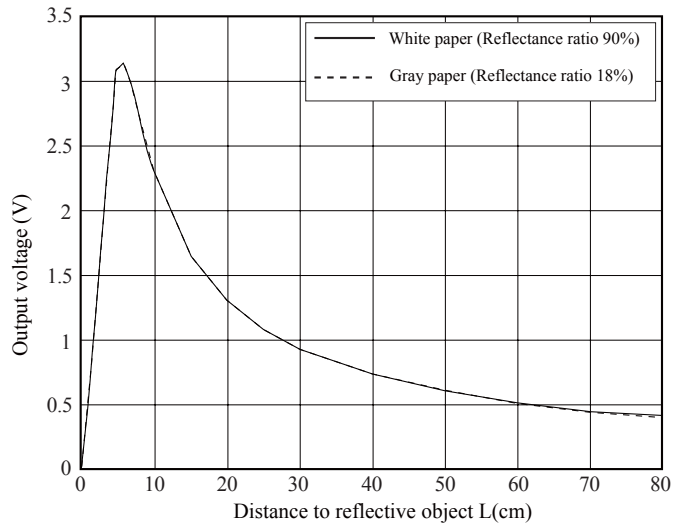
Fig. 1 Timing chart





GP2Y0A21YK0F

Fig. 2 Example of distance measuring characteristics(output)

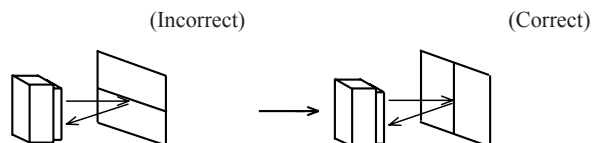


SHARP**GP2Y0A21YK0F****■ Notes****● Advice for the optics**

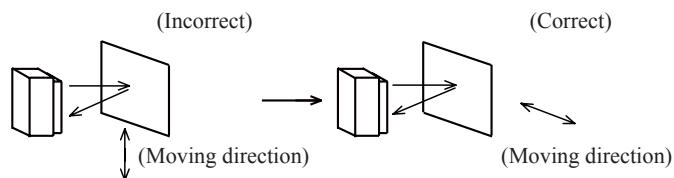
- The lens of this device needs to be kept clean. There are cases that dust, water or oil and so on deteriorate the characteristics of this device. Please consider in actual application.
- Please don't do washing. Washing may deteriorate the characteristics of optical system and so on. Please confirm resistance to chemicals under the actual usage since this product has not been designed against washing.

● Advice for the characteristics

- In case that an optical filter is set in front of the emitter and detector portion, the optical filter which has the most efficient transmittance at the emitting wavelength range of LED for this product ($\lambda = 870 \pm 70\text{nm}$), shall be recommended to use. Both faces of the filter should be mirror polishing. Also, as there are cases that the characteristics may not be satisfied according to the distance between the protection cover and this product or the thickness of the protection cover, please use this product after confirming the operation sufficiently in actual application.
- In case that there is an object near to emitter side of the sensor between sensor and a detecting object, please use this device after confirming sufficiently that the characteristics of this sensor do not change by the object.
- When the detector is exposed to the direct light from the sun, tungsten lamp and so on, there are cases that it can not measure the distance exactly. Please consider the design that the detector is not exposed to the direct light from such light source.
- Distance to a mirror reflector can not be sometimes measured exactly.
In case of changing the mounting angle of this product, it may measure the distance exactly.
- In case that reflective object has boundary line which material or color etc. are excessively different, in order to decrease deviation of measuring distance, it shall be recommended to set the sensor that the direction of boundary line and the line between emitter center and detector center are in parallel.



- In order to decrease deviation of measuring distance by moving direction of the reflective object, it shall be recommended to set the sensor that the moving direction of the object and the line between emitter center and detector center are vertical.

**● Advice for the power supply**

- In order to stabilize power supply line, we recommend to insert a by-pass capacitor of $10\mu\text{F}$ or more between Vcc and GND near this product.

● Notes on handling

- There are some possibilities that the internal components in the sensor may be exposed to the excessive mechanical stress. Please be careful not to cause any excessive pressure on the sensor package and also on the PCB while assembling this product.

SHARP**GP2Y0A21YK0F**

● Presence of ODC etc.

This product shall not contain the following materials.

And they are not used in the production process for this product.

Regulation substances : CFCs, Halon, Carbon tetrachloride, 1.1.1-Trichloroethane (Methylchloroform)

Specific brominated flame retardants such as the PBB and PBDE are not used in this product at all.

This product shall not contain the following materials banned in the RoHS Directive (2002/95/EC).

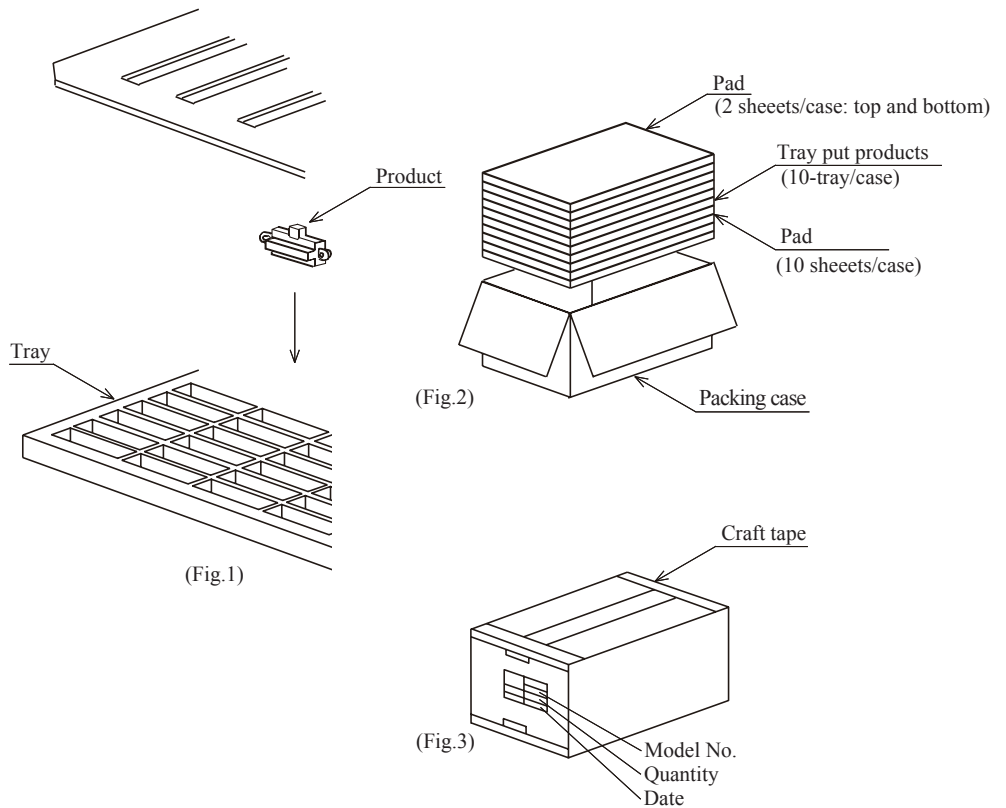
- Lead, Mercury, Cadmium, Hexavalent chromium, Polybrominated biphenyls (PBB), Polybrominated diphenyl ethers (PBDE).



GP2Y0A21YK0F

■ Package specification

Package composition



Packaging method

1. Put products of 100pcs. in tray. packing method is showed in the above fig.(Fig.1)
2. Put them(10-tray) in the packing box. Put pads on their top and bottom.
And put pads on each trays(Total 10 sheets) (Fig.2).
3. Seal the packing box with craft tape.
Print the model No.,quantity,inspection date (1000 pcs./a packing box)(Fig.3).

SHARP**GP2Y0A21YK0F****■ Important Notices**

· The circuit application examples in this publication are provided to explain representative applications of SHARP devices and are not intended to guarantee any circuit design or license any intellectual property rights. SHARP takes no responsibility for any problems related to any intellectual property right of a third party resulting from the use of SHARP's devices.

· Contact SHARP in order to obtain the latest device specification sheets before using any SHARP device. SHARP reserves the right to make changes in the specifications, characteristics, data, materials, structure, and other contents described herein at any time without notice in order to improve design or reliability. Manufacturing locations are also subject to change without notice.

· Observe the following points when using any devices in this publication. SHARP takes no responsibility for damage caused by improper use of the devices which does not meet the conditions and absolute maximum ratings to be used specified in the relevant specification sheet nor meet the following conditions:

(i) The devices in this publication are designed for use in general electronic equipment designs such as:

- Personal computers
- Office automation equipment
- Telecommunication equipment [terminal]
- Test and measurement equipment
- Industrial control
- Audio visual equipment
- Consumer electronics

(ii) Measures such as fail-safe function and redundant design should be taken to ensure reliability and safety when SHARP devices are used for or in connection

with equipment that requires higher reliability such as:

- Transportation control and safety equipment (i.e., aircraft, trains, automobiles, etc.)
- Traffic signals
- Gas leakage sensor breakers
- Alarm equipment
- Various safety devices, etc.

(iii) SHARP devices shall not be used for or in connection with equipment that requires an extremely high level of reliability and safety such as:

- Space applications
- Telecommunication equipment [trunk lines]
- Nuclear power control equipment
- Medical and other life support equipment (e.g., scuba).

· If the SHARP devices listed in this publication fall within the scope of strategic products described in the Foreign Exchange and Foreign Trade Law of Japan, it is necessary to obtain approval to export such SHARP devices.

· This publication is the proprietary product of SHARP and is copyrighted, with all rights reserved. Under the copyright laws, no part of this publication may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, for any purpose, in whole or in part, without the express written permission of SHARP. Express written permission is also required before any use of this publication may be made by a third party.

· Contact and consult with a SHARP representative if there are any questions about the contents of this publication.

B.3. Hojas de especificaciones válvula proporcional ITV series

Electro-Pneumatic Regulator/Electronic Vacuum Regulator

Series *ITV*

- Stepless control of air pressure proportional to an electrical signal
- Series **ITV1000/2000/3000** are compatible with various input specifications, including serial communications.



RoHS IP65

ARJ

AR425
to 935

ARX

AMR

ARM

ARP

IR

IRV

VEX

SRH

SRP

SRF

VCHR

ITV

IC

ITVX

PVQ

VEF
VEP

VER

VEA

VY1

VBA
VBAT

AP100

Serial communications specifications

Applicable Fieldbus protocols



Built-in communication board, so no converter needed.

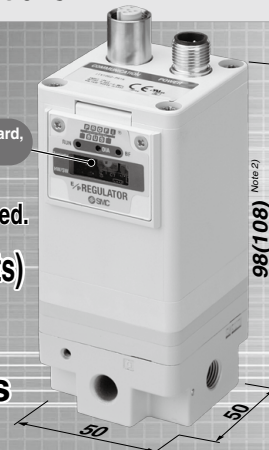
- RS-232C specification to serial communications is standardized.

Compact/lightweight (Integrated communication parts)

Weight: **350 g** ^{Note 1)} (ITV1000)

Power consumption: **4 w** ^{Note 1)} or less

Note 1) Value for communications type. (PROFIBUS DP)



Note 2) ITV1000. Dimensions in parentheses () are for the CC-Link or PROFIBUS DP.

▼ Electro-Pneumatic Regulators

Series *ITV0000*

Maximum flow rate
6 L/min (ANR)
Set pressure: 0.6 MPa
Supply pressure: 1.0 MPa



Series *ITV1000*

Maximum flow rate
200 L/min (ANR)
Set pressure: 0.6 MPa
Supply pressure: 1.0 MPa
Grease-free specification (wetted parts)



Series *ITV2000*

Maximum flow rate
1500 L/min (ANR)
Set pressure: 0.6 MPa
Supply pressure: 1.0 MPa



Series *ITV3000*

Maximum flow rate
4000 L/min (ANR)
Set pressure: 0.6 MPa
Supply pressure: 1.0 MPa



▼ Electronic Vacuum Regulators

Series *ITV009* □



Series *ITV209* □



Compact Electro-Pneumatic Regulator Series ITV0000
Compact Vacuum Regulator Series ITV009

Compact **15 mm**

With a simplified high-density circuit board design, an extremely compact size has been achieved.



Lightweight **100 g**

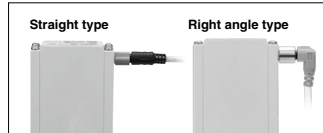
Realizes space-saving and reduction of weight for manifold use.

Stations can easily be increased or decreased due to DIN rail mount design.



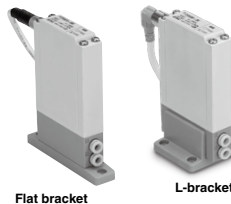
■ **Cable connectors**

Straight type and right angle type are available.



- **Built-in One-touch fittings**
- **With error indication LED**
- **Brackets**

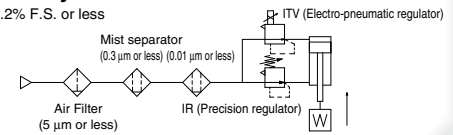
Flat and L-brackets are available.



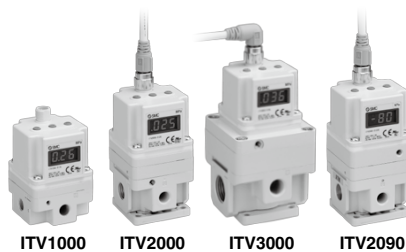
Model	Pressure range	Power supply voltage	Input signal	Output signal	Option
ITV001	0.1 MPa	24 VDC 12 VDC	4 to 20 mA DC	Analog output 1 to 5 VDC	<ul style="list-style-type: none"> • Cable connectors • Straight type • Right angle type • Brackets • Flat bracket • L-bracket
ITV003	0.5 MPa		0 to 20 mA DC		
ITV005	0.9 MPa		0 to 5 VDC		
ITV009	-100 kPa		0 to 10 VDC		

- **Equivalent to IP65**
- **Linearity: ±1% F.S. or less**
- **Hysteresis: 0.5% F.S. or less**
- **Repeatability: ±0.5% F.S. or less**
- **High-speed response time: 0.1 sec** (Without load)
Note) This is not a guaranteed value as it depends on the operating environment.
- **High stability**

Sensitivity 0.2% F.S. or less



Electro-Pneumatic Regulator Series ITV1000/2000/3000
Electronic Vacuum Regulator Series ITV209



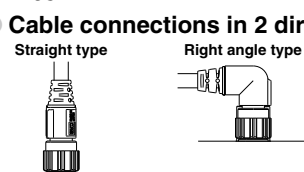
Serial communications specifications to Series ITV1000/2000/3000 are standardized.

- **Reduced wiring**
- **Applicable Fieldbus protocols**



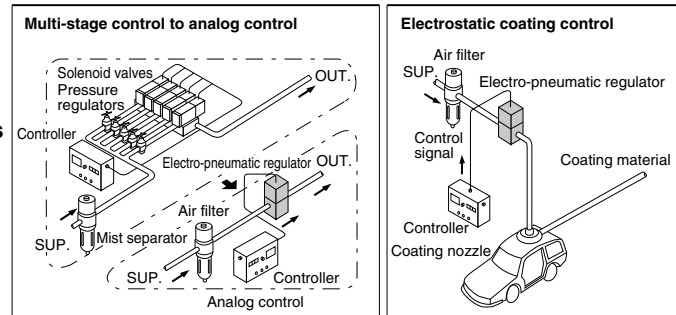
RS-232C specification to serial communications is standardized.

- **Sensitivity: 0.2% F.S. or less**
- **Linearity: ±1% F.S. or less**
- **Hysteresis: 0.5% F.S. or less**
- **IP65**
- **Cable connections in 2 directions**



- **Grease-free specification** (Series ITV1000)

● **Application examples**



Electro-Pneumatic Regulator Electronic Vacuum Regulator

Series ITV

● Stepless control of air pressure proportional to an electrical signal.

	Series	Model	Set pressure range	Input signal	Port size	Page	
Electro-Pneumatic Regulator	Series ITV0000	ITV001□	0.001 to 0.1 MPa	Current type: 4 to 20 mA DC (Sink type) Current type: 0 to 20 mA DC (Sink type) Voltage type: 0 to 5 VDC Voltage type: 0 to 10 VDC	Built-in One-touch fittings Metric size: ø4 Inch size: ø5/32	806	ARJ
		ITV003□	0.001 to 0.5 MPa				AR425 to 935
		ITV005□	0.001 to 0.9 MPa				ARX
	Series ITV1000	ITV101□	0.005 to 0.1 MPa	Current type: 4 to 20 mA DC (Sink type) Current type: 0 to 20 mA DC (Sink type) Voltage type: 0 to 5 VDC	1/8, 1/4	814	ARM
		ITV103□	0.005 to 0.5 MPa				ARM
		ITV105□	0.005 to 0.9 MPa				ARP
	Series ITV2000	ITV201□	0.005 to 0.1 MPa	Current type: 4 to 20 mA DC (Sink type) Current type: 0 to 20 mA DC (Sink type) Voltage type: 0 to 5 VDC Voltage type: 0 to 10 VDC Preset input (4 points/16 points) 10 bit digital input CC-Link compatible	1/4, 3/8	814	IR
		ITV203□	0.005 to 0.5 MPa				IRV
		ITV205□	0.005 to 0.9 MPa				VEX
Series ITV3000	ITV301□	0.005 to 0.1 MPa	DeviceNet™ compatible PROFIBUS DP compatible RS-232C communication	1/4, 3/8, 1/2	814	SRH	
	ITV303□	0.005 to 0.5 MPa				SRP	
	ITV305□	0.005 to 0.9 MPa				SRF	
Series ITV009□	ITV009□	-1 to -100 kPa	Current type: 4 to 20 mA DC (Sink type) Current type: 0 to 20 mA DC (Sink type) Voltage type: 0 to 5 VDC Voltage type: 0 to 10 VDC	Built-in One-touch fittings Metric size: ø4 Inch size: ø5/32	836	VCHR	
	ITV209□	-1.3 to -80 kPa				ITV	
	ITV209□	-1.3 to -80 kPa				IC	
Electronic Vacuum Regulator	Series ITV209□	ITV209□	-1.3 to -80 kPa	Current type: 4 to 20 mA DC (Sink type) Current type: 0 to 20 mA DC (Sink type) Voltage type: 0 to 5 VDC Voltage type: 0 to 10 VDC Preset input (4 points/16 points) 10 bit digital input CC-Link compatible DeviceNet™ compatible PROFIBUS DP compatible RS-232C communication	1/4	843	ITVX
		ITV209□	-1.3 to -80 kPa				PVQ

Compact Electro-Pneumatic Regulator Series *ITV0000*



How to Order

For single unit and single unit for manifold

ITV00 1 0 - 0 [] [] [] [] **N**

Pressure range

1	0.1 MPa
3	0.5 MPa
5	0.9 MPa

Power supply voltage

0	24 VDC ±10%
1	12 to 15 VDC

Input signal

0	Current type 4 to 20 mA DC (Sink type)
1	Current type 0 to 20 mA DC (Sink type)
2	Voltage type 0 to 5 VDC
3	Voltage type 0 to 10 VDC

Built-in One-touch fittings type

For single unit

Symbol	SUP ¹	OUT ²	EXH ³
Nil	Metric size (Light gray)	ø4	
U	Inch size (Orange)	ø5/32"	

For manifold

Symbol	SUP ¹	OUT ²	EXH ³	
Nil	Metric size (Light gray)	ø6	ø4	ø6
U	Inch size (Orange)	ø1/4"	ø5/32"	ø1/4"

Cable connector (Option)

N	Without cable connector
S	Straight type 3 m
L	Right angle type 2 m

Bracket/Option for single unit only

Nil	Without bracket
B	Flat Bracket
C	L-bracket

Base type

Nil	For single unit
M	For manifolds

Manifold

IITV00 - 02 [] - **n**

Stations

02	2 stations
03	3 stations
⋮	⋮
10	10 stations

Option
If a DIN rail longer than the specified stations is required, specify the applicable stations in two digits.
(Maximum 10 stations)
Example) **IITV00-05-07**

One-touch fitting size for supply/exhaust parts (End plate)

Nil	ø6 (Light gray)
U	ø1/4" (Orange)

Note) A DIN rail with the length specified by the number of stations is attached to the manifold. For dimensions of the DIN rail, refer to the external dimensions.

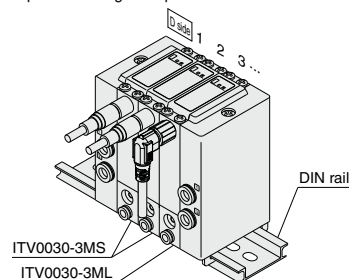
How to Order Manifold Assembly (Example)

Indicate the part numbers of electro-pneumatic regulators to be mounted below the manifold part number.

Example)
Due to the common supply/exhaust feature, note that different pressure range combinations are not available.

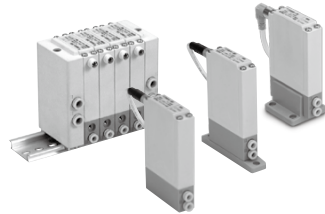
IITV00-03.....1 set (Manifold part no.)
*ITV0030-3MS.....2 sets (Electro-pneumatic regulator part no. (1, 2 stations))
*ITV0030-3ML.....1 set (Electro-pneumatic regulator part no. (3 stations))

Indicate part numbers in order starting from the first station on the D side.
Note)Combination with having different pressure ranges is not available due to common supply/exhaust features.
The asterisk (*) specifies mounting. Add an asterisk (*) at the beginning of electro-pneumatic regulator part numbers to be mounted.



Compact Electro-Pneumatic Regulator **Series ITV0000**

Specifications



Model	ITV001□	ITV003□	ITV005□
Minimum supply pressure	Set pressure +0.1 MPa		
Maximum supply pressure	0.2 MPa	1.0 MPa	
Set pressure range	0.001 to 0.1 MPa	0.001 to 0.5 MPa	0.001 to 0.9 MPa
Power supply	Voltage	24 VDC ±10%, 12 to 15 VDC	
	Current consumption	Power supply voltage 24 VDC type: 0.12 A or less Power supply voltage 12 to 15 VDC type: 0.18 A or less	
Input signal	Voltage type	0 to 5 VDC, 0 to 10 VDC	
	Current type	4 to 20 mA DC, 0 to 20 mA DC (Sink type)	
Input impedance	Voltage type	Approx. 10 kΩ	
	Current type	Approx. 250 Ω	
Output signal ^{Note 4)}	Analog output	1 to 5 VDC (Output impedance: Approx. 1 kΩ) Output accuracy: ±6% F.S. or less	
Linearity		±1% F.S. or less	
Hysteresis		0.5% F.S. or less	
Repeatability		±0.5% F.S. or less	
Sensitivity		0.2% F.S. or less	
Temperature characteristics		±0.12% F.S./°C or less	
Operating temperature range		0 to 50°C (No condensation)	
Enclosure		Equivalent to IP65 *	
Connection type		Built-in One-touch fittings	
Connection size	For single unit	Metric size	1, 2, 3: ø4
		Inch size	1, 2, 3: ø5/32"
	Manifold	Metric size	1, 3: ø6, 2: ø4
		Inch size	1, 3: ø1/4", 2: ø5/32"
Weight ^{Note 1)}		100 g or less (without option)	

- ARJ
- AR425 to 935
- ARX
- AMR
- ARM
- ARP
- IR
- IRV
- VEX
- SRH
- SRP
- SRF
- VCHR
- ITV
- IC
- ITVX
- PVQ
- VEF
- VEP
- VER
- VEA
- VY1
- VBA
- VBAT
- AP100

Note 1) Indicates the weight of a single unit.
For IITV00-n
Total weight (g) Stations (n) x 100 + 130 (Weight of end block A, B assembly) + Weight (g) of DIN rail

Note 2) When there is a downstream flow consumption, pressure may become unstable depending on piping conditions.

Note 3) When the input signal is at 0%, the exhaust solenoid valve is controlled to reduce the outlet pressure to zero. For this reason, a noise may be generated. This noise is normal and does not indicate a fault.

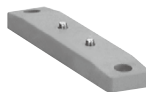
Note 4) When measuring ITV analog output from 1 to 5 VDC, if the load impedance is less than 100 kΩ, the analog output monitor accuracy of ±6% F.S. or less may not be available. The product with the accuracy of within ±6% is supplied upon your request. Output pressure remains unaffected.

* When using under the conditions equivalent to IP65, connect the fitting or tube to the breathing hole prior to use. (For details, refer to "Specific Product Precautions 1" on page 849)

Accessories (Option)

Bracket

Flat bracket assembly (includes 2 mounting screws)
P39800022



L-bracket assembly (includes 2 mounting screws)
P39800023



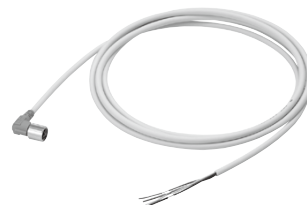
Tightening torque when assembling is 0.3 N·m.

Cable connector

Straight type
M8-4DSX3MG4



Right angle type
P398000-501-2

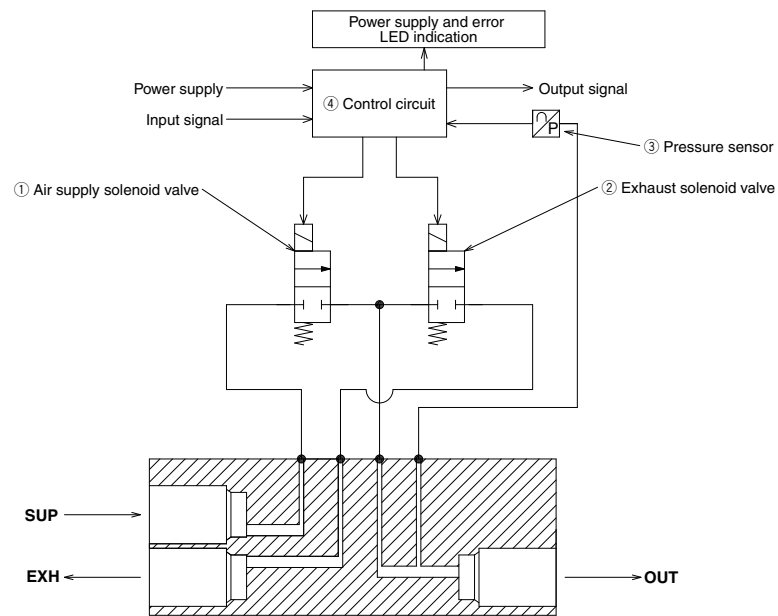


Series ITV0000

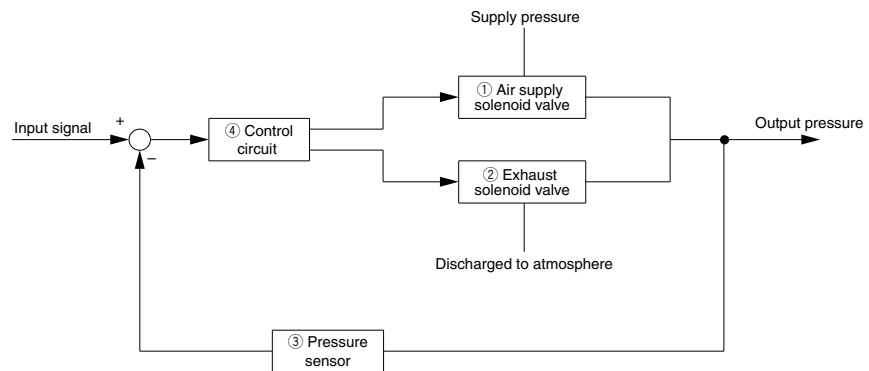
Working Principle

When the input signal rises, the air supply solenoid valve ① turns ON. Due to this, part of the supply pressure passes through the air supply solenoid valve ① and changes to output pressure. This output pressure feeds back to the control circuit ④ via the pressure sensor ③. Here, pressure corrections continue until output pressure becomes proportional to the input signal, enabling output pressure that is proportional to the input signal.

Working Principle Diagram



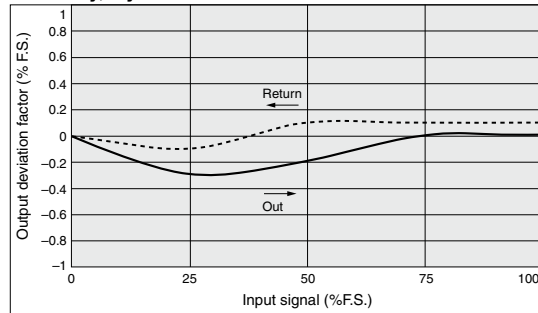
Block Diagram



Compact Electro-Pneumatic Regulator **Series ITV0000**

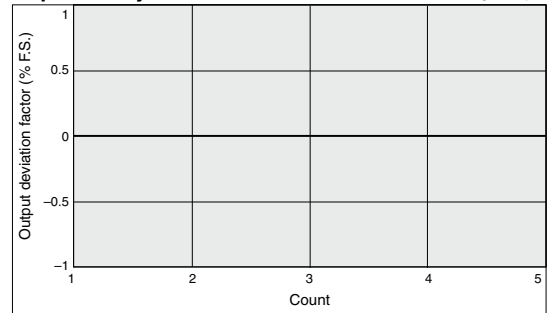
Series ITV001 □

Linearity, Hysteresis



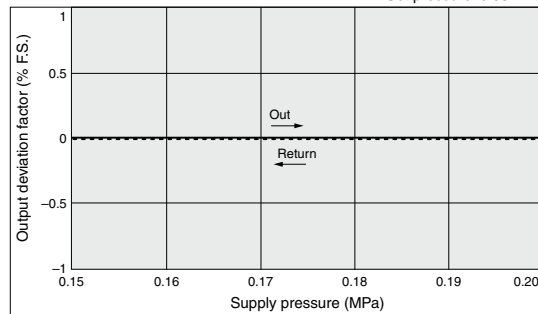
Repeatability

With 50% of signal input



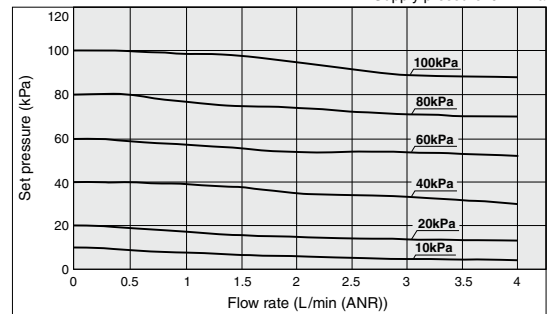
Pressure Characteristics

Set pressure: 0.05 MPa



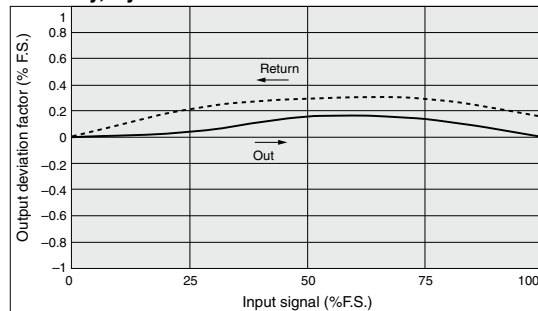
Flow Characteristics

Supply pressure: 0.2 MPa



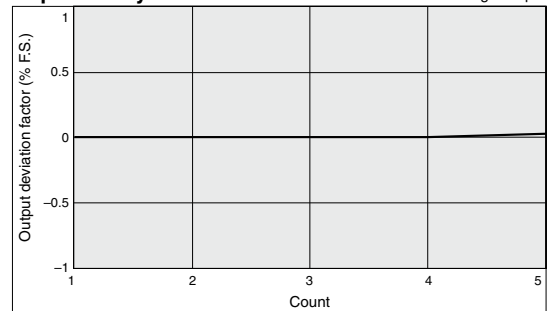
Series ITV003 □

Linearity, Hysteresis



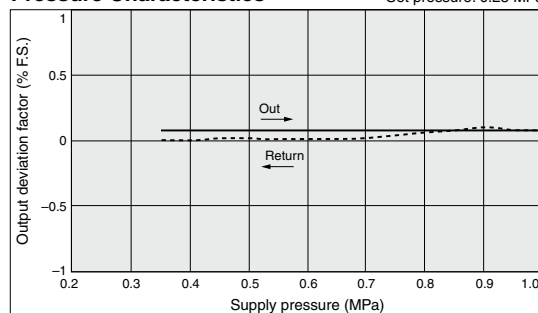
Repeatability

With 50% of signal input



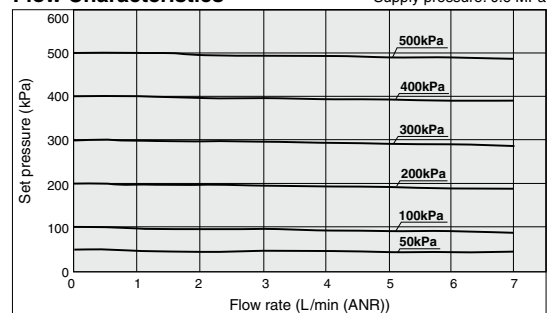
Pressure Characteristics

Set pressure: 0.25 MPa



Flow Characteristics

Supply pressure: 0.6 MPa

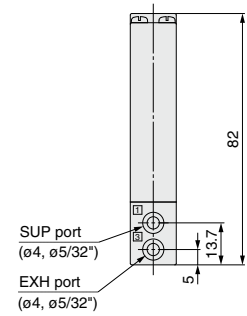
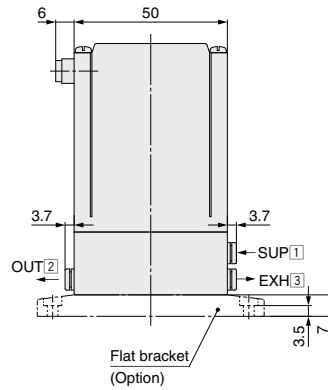
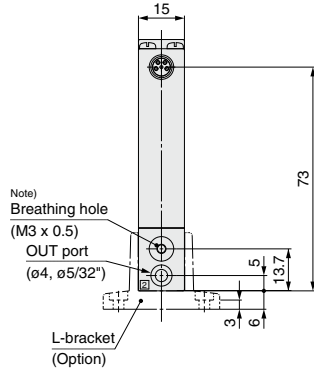
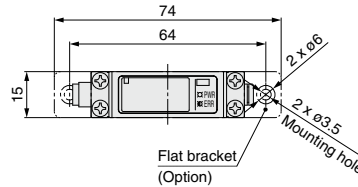
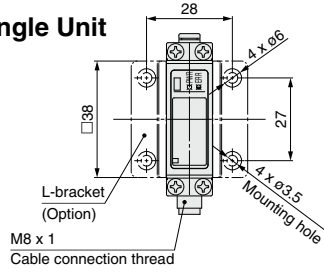


- ARJ
- AR425 to 935
- ARX
- AMR
- ARM
- ARP
- IR
- IRV
- VEX
- SRH
- SRP
- SRF
- VCHR
- ITV**
- IC
- ITVX
- PVQ
- VEF
- VEP
- VER
- VEA
- VY1
- VBA
- VBAT
- AP100

Compact Electro-Pneumatic Regulator **Series ITV0000**

Dimensions

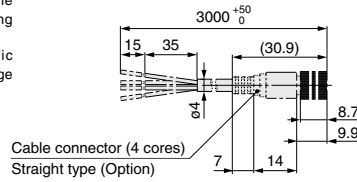
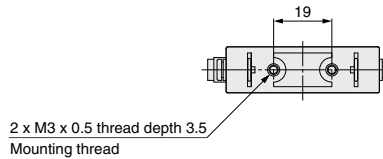
For Single Unit



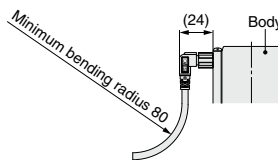
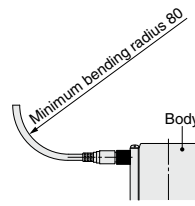
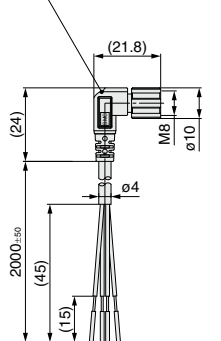
Port Location

No.	1	2	3
ITV003	SUP	OUT	EXH
5			

Note) When using under the conditions equivalent to IP65, connect the fittings or tube to the breathing hole prior to use.
(For details, refer to "Specific Product Precautions 1" on page 849)



Cable connector (4 cores)
Right angle type (Option)

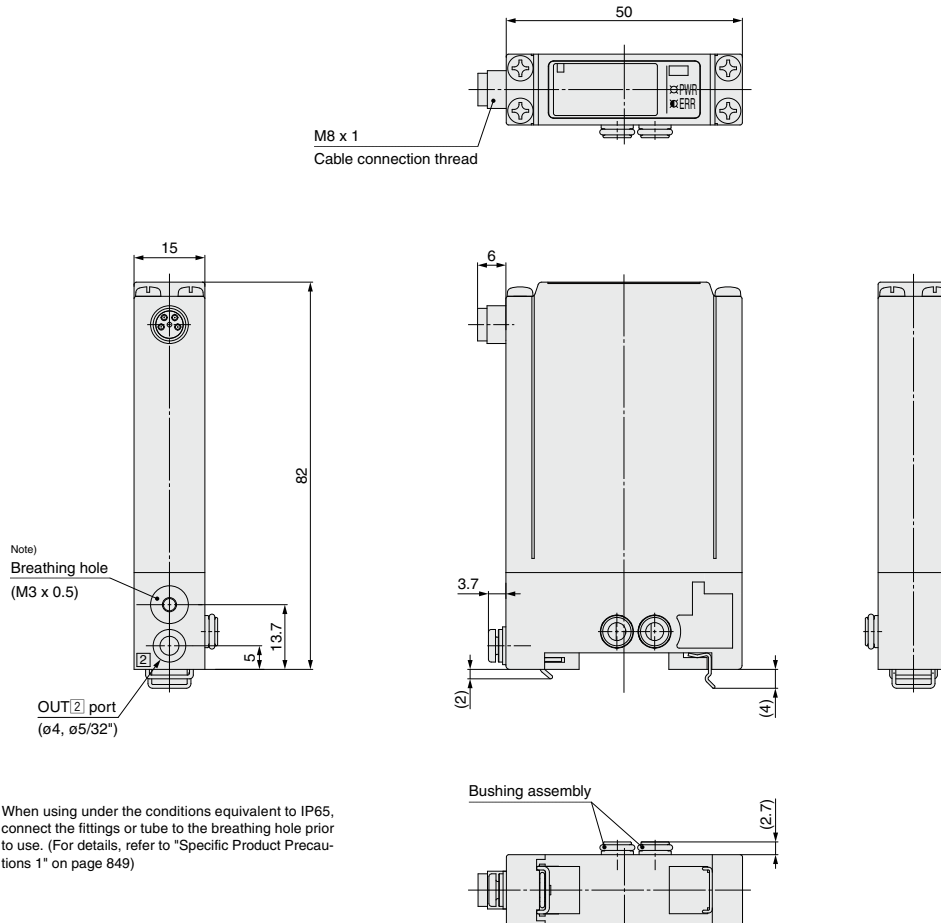


- ARJ
- AR425 to 935
- ARX
- AMR
- ARM
- ARP
- IR
- IRV
- VEV
- SRH
- SRP
- SRF
- VCHR
- ITV**
- IC
- ITVX
- PVQ
- VEF
- VEP
- VER
- VEA
- VY1
- VBA
- VBAT
- AP100

Series *ITV0000*

Dimensions

Single unit for manifold



Note) For dimensions of the cable connector, refer to single unit on page 811.



Series ITV0000/1000/2000/3000 Specific Product Precautions 1

Be sure to read before handling. Refer to front matter 43 for Safety Instructions and pages 365 to 369 for Common Precautions.

Series ITV0000/009 Precautions

Air Supply

⚠ Caution

1. Install an air filter near this product on the supply side. Select a filtration degree of 5 μm or less.
2. Compressed air containing large amounts of drainage can cause malfunction of this product and other pneumatic equipment. As a countermeasure, install an aftercooler, air dryer or Drain Catch, etc.
3. If large amounts of carbon dust are generated by the compressor, it can accumulate inside this product and cause malfunction.

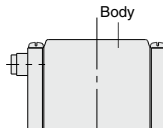
For details on the above compressed air quality, refer to SMC's "Air Preparation Systems".

Wiring

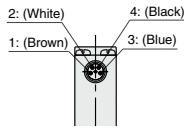
⚠ Caution

Connect the cable to the connector on the body with the wiring arranged as shown below. Proceed carefully, as incorrect wiring can cause damage.

Further, use DC power with sufficient capacity and a low ripple.



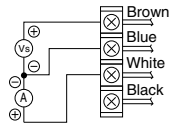
Terminal No.	1	2	3	4
Lead wire color	Brown	White	Blue	Black
Wiring	Power	Signal	COM	Monitor



Note) A right angle type cable is also available. The entry direction for the right angle type connector is to downwards (SUP port side). Never turn the connector as it is not designed to turn. Using force to turn the connector will damage the connector coupling.

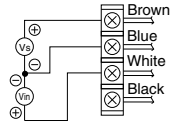
Wiring Diagrams

Current signal type



Vs: Power Supply 24 VDC ±10%
12 to 15 VDC
A: Input signals 4 to 20 mA DC
0 to 20 mA DC

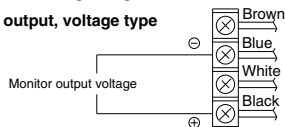
Voltage signal type



Vs: Power Supply 24 VDC ±10%
12 to 15 VDC
Vin: Input signals 0 to 5 VDC
0 to 10 VDC

Monitor output wiring diagram

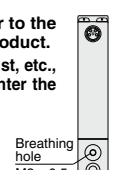
Analog output, voltage type



Handling

⚠ Caution

1. Do not use a lubricator on the supply side of this product, as this can cause malfunction. When lubrication of terminal equipment is necessary, connect a lubricator on the output side of this equipment.
2. If electric power is shut off while pressure is being applied, pressure will be retained on the output side. However, this output pressure is held only temporarily and is not guaranteed. If exhausting of this pressure is desired, shut off the power after reducing the set pressure, and discharge the air using a residual pressure exhaust valve, etc.
3. If power to this product is cut off due to a power failure, etc. when it is in a controlled state, output pressure will be retained temporarily. Handle carefully when operating with output pressure released to the atmosphere, as air will continue to flow out.
4. If supply pressure to this product is interrupted while the power is still on, the internal solenoid valve will continue to operate and a humming noise may be generated. Since the life of the product may be shortened, shut off the power supply also when supply pressure is shut off.
5. This product is adjusted for each specification at the time of shipment from the factory. Avoid careless disassembly or removal of parts, as this can lead to malfunction.
6. The optional cable connector is a 4 wire type. When the monitor output (analog output or switch output) is not being used, keep it from touching the other wires as this can cause malfunction.
7. Please note that the right angle cable does not rotate and is limited to only one entry direction.
8. Take the following steps to avoid malfunction due to noise.
 - 1) Remove power supply noise during operation by installing a line filter, etc. in the AC power line.
 - 2) For avoiding the influence of noise or static electricity, install this product and its wiring as far as possible from strong electric fields such as those of motors and power lines, etc.
 - 3) Be sure to implement protective measures against load surge for induction loads (solenoid valves, relays, etc.).
9. The product characteristics are confined to the static state. When air is consumed on the output side, and especially used in the system with large leakage, pressure cannot approach the set pressure and the service life is drastically shortened with a humming noise of the solenoid valve.
10. For details on the handling of this product, refer to the operation manual which is included with the product.
11. In locations where the body is exposed to water, dust, etc., there is a possibility that moisture or dust could enter the body through the breathing hole.



Breathing hole
M3 x 0.5
12. If this product will be used in a sealed environment, such as inside an inspection box, a ventilation fan should be installed to ensure adequate ventilation as this product can generate heat in some operating conditions.

When the power is turned on, a noise may be generated as a means of checking the operating condition of the solenoid valve. This noise is normal and does not indicate a fault.
13. Each product needs to be powered by one power supply unit. The wiring of this product has the same common between the GND for power and the signals; there is a possibility that a wrong current occurs and prevents a proper operation if one power supply unit controls multiple electro-pneumatic regulators.
14. This product does not have a shut-off valve function. If air pressure is supplied without electric power being applied, output pressure may increase to the pressure equivalent of the supply pressure. Operate the system to shut off the supply pressure when not operating the product.

- ARJ
- AR425 to 935
- ARX
- AMR
- ARM
- ARP
- IR
- IRV
- VEV
- SRH
- SRP
- SRF
- VCHR
- ITV
- IC
- ITVX
- PVQ
- VEF VEP
- VER
- VEA
- VY1
- VBA VBAT
- AP100



Series ITV0000/1000/2000/3000 Specific Product Precautions 2

Be sure to read before handling. Refer to front matter 43 for Safety Instructions and pages 365 to 369 for Common Precautions.

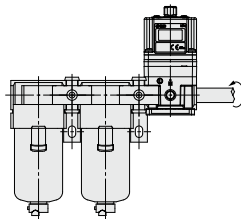
Series ITV1000/2000/3000/209 □ Precautions

Piping

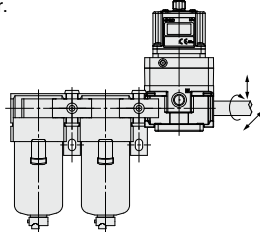
⚠ Warning

- Screw piping together with the recommended proper torque while holding the side that has female threads.**
Looseness or faulty sealing will occur if tightening torque is insufficient, while thread damage will result if the torque is excessive. Furthermore, if the side with the female threads is not held while tightening, excessive force will be applied directly to piping brackets, etc. causing damage or other problems.

Recommended proper torque: N · m				
Connection thread	1/8	1/4	3/8	1/2
Torque	3 to 5	8 to 12	15 to 20	20 to 25



- Do not allow twisting or bending moment to be applied other than the weight of the equipment itself.**
Provide separate support for external piping, as damage may otherwise occur.



- Since excessive moment loads and the propagation of vibrations, etc. can easily result from inflexible piping made of materials such as steel, avoid these problems by using flexible tubing for intermediate connections.**

⚠ Caution

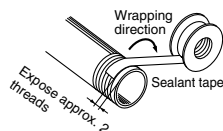
1. Preparation before piping

Before piping is connected, it should be thoroughly blown out with air (flushing) or washed to remove chips, cutting oil and other debris from inside the pipe.
If chips, sealing material or other debris enter into this product, the solenoid valve may buzz, or the outlet pressure may not be output normally.

2. Wrapping of sealant tape

When screwing together pipes and fittings, etc., be certain that chips from the pipe threads and sealing material do not get inside the piping.

Also, when sealant tape is used, leave 1.5 to 2 thread ridges exposed at the end of the threads.



Operating Environment

⚠ Warning

- Do not operate in locations having an atmosphere of corrosive gases, chemicals, sea water, or where there will be contact with the same.**
- Do not operate in locations where vibration or impact occurs.**

⚠ Caution

- In locations where the body is exposed to water, steam, dust, etc., there is a possibility that moisture or dust could enter the body through the EXH (solenoid) ports, thereby causing problems.**
- To overcome this, simply install tubing to each port, using the fittings, and extend the tubing so that the other end is at a location where no water splash, etc. occurs. Make sure not to bend, or block the I.D. of the tubing as this will have a detrimental affect on the pressure control.**
- Do not operate in locations where vibration or impact occurs.**
- In locations which receive direct sunlight, provide a protective cover, etc.**
- In locations near heat sources, block off any radiated heat.**
- In locations where there is contact with spatter from water, oil or solder etc., implement suitable protective measures.**

Air Supply

⚠ Warning

- Type of fluids**
Please consult with SMC when using the product in applications other than compressed air.
- Do not use compressed air that contains chemicals, synthetic oils including organic solvents, salt or corrosive gases, etc., as it can cause malfunction.**

⚠ Caution

- Install an air filter near this product on the supply side. Select a filtration degree of 5 μm or less.**
- Compressed air containing large amounts of drainage can cause malfunction of this product and other pneumatic equipment. As a countermeasure, install an aftercooler, air dryer or Drain Catch, etc.**
- If large amounts of carbon dust are generated by the compressor, it can accumulate inside this product and cause malfunction. For details on the above compressed air quality, refer to SMC's "Air Preparation Systems".**



Series ITV0000/1000/2000/3000 Specific Product Precautions 3

Be sure to read before handling. Refer to front matter 43 for Safety Instructions and pages 365 to 369 for Common Precautions.

Series ITV1000/2000/3000/209 Precautions

Handling

⚠ Caution

- Do not use a lubricator on the supply side of this product, as this can cause malfunction. When lubrication of terminal equipment is necessary, connect a lubricator on the output side of this equipment.
- If electric power is shut off while pressure is being applied, pressure will be retained on the output side. However, this output pressure is held only temporarily and is not guaranteed. If exhausting of this pressure is desired, shut off the power after reducing the set pressure, and discharge the air using a residual pressure exhaust valve, etc.
- If power to this product is cut off due to a power failure, etc. when it is in a controlled state, output pressure will be retained temporarily. Handle carefully when operating with output pressure released to the atmosphere, as air will continue to flow out.
- If supply pressure to this product is interrupted while the power is still on, the internal solenoid valve will continue to operate and a humming noise may be generated. Since the life of the product may be shortened, shut off the power supply also when supply pressure is shut off.
- The setting side pressure cannot be completely released from this product in the range below 0.005 MPa (or -1.3 kPa for Vacuum models). In cases where the pressure needs to be reduced completely to 0 MPa, install a 3 port valve, etc. on the setting side to discharge the residual pressure.
- This product is adjusted for each specification at the time of shipment from the factory. Avoid careless disassembly or removal of parts, as this can lead to malfunction.
- The optional cable connector is a 4-wire type. When the monitor output (analog output or switch output) is not being used, keep it from touching the other wires as this can cause malfunction.
- When connecting the cable to this product, turn the lock ring of the cable. If a portion other than the lock ring of the cable is turned, it may damage the connector on the body. Turn the lock ring by hand without using a tool.
- The right angle cable does not rotate and is limited to only one entry direction. If the right angle cable is rotated forcibly, the cable may be broken or damaged, or may damage the connector on the body.
- Take the following steps to avoid malfunction due to noise.
 - Remove power supply noise during operation by installing a line filter, etc. in the AC power line.
 - For avoiding the influence of noise or static electricity, install this product and its wiring as far as possible from strong electric fields such as those of motors and power lines, etc.
 - Be sure to implement protective measures against load surge for induction loads (solenoid valves, relays, etc.).
- Due to the large volume of the output side, a loud exhaust noise will be produced when being used for the purpose of a relief function. Therefore, install a silencer (SMC Series AN20 or AN40) on the exhaust port (EXH port). The port sizes are Rc 1/8, Rc 1/4 and Rc 1/2.
- Specifications on page 815 and 844 is in case of static environment. Pressure may fluctuate when air is consumed at the output side.

Handling

⚠ Caution

- For details on the handling of this product, refer to the operation manual which is included with the product.
- This product does not have a shut-off valve function. If air pressure is supplied without electric power being applied, output pressure may increase to the pressure equivalent of the supply pressure. Operate the system to shut off the supply pressure when not operating the product.
- The solenoid valves built into this product are consumables. Perform periodic maintenance in environments where the solenoid valves are operated at a high frequency. The parts can be replaced with a solenoid valve assembly. Please contact SMC for the part number.

Design and Selection

⚠ Caution

1. Use the following UL approved products for DC power supply combinations.

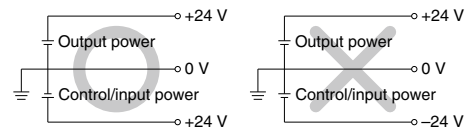
- Limited voltage current circuit in accordance with UL 508. A circuit in which power is supplied by the secondary coil of a transformer that meets the following conditions.
 - Maximum voltage (with no load): 30 Vrms (42.4 V peak) or less
 - Maximum current:
 - 8 A or less (including when short circuited)
 - limited by circuit protector (such as fuse) with the following ratings.
- A circuit (class 2 circuit) with maximum 30 Vrms (42.4 V peak) or less, and a power supply consisting of a class 2 power supply unit conforming to UL1310, or a class 2 transformer conforming to UL1585.

No load voltage (V peak)	Max. current rating
0 to 20 [V]	5.0
Over 20 and 30 or less [V]	100
	Peak voltage

- A circuit (class 2 circuit) with maximum 30 Vrms (42.4 V peak) or less, and a power supply consisting of a class 2 power supply unit conforming to UL1310, or a class 2 transformer conforming to UL1585.

2. Operate these products only within the specified voltage. Using voltages beyond the specified levels could cause faults or malfunctions.

3. Use 0 V as the baseline for the power supplied to the unit for output, control and input.



4. Each product needs to be powered by one power supply unit.

The wiring of this product has the same common between the GND for power and the signals; there is a possibility that a wrong current occurs and prevents a proper operation if one power supply unit controls multiple electro-pneumatic regulators.

5. Consult SMC for the usage when the downstream side is released to atmosphere.

This product is a pressure controller. The downstream side being released to atmosphere makes the inlet valve full open, allowing a large amount of atmosphere flow into the body. Consult SMC for the appropriate usage when you use the product under such condition since the product may not meet the specification or the life of the product may be shortened.

- ARJ
- AR425 to 935
- ARX
- AMR
- ARM
- ARP
- IR
- IRV
- VEV
- SRH
- SRP
- SRF
- VCHR
- ITV
- IC
- ITVX
- PVQ
- VEF VEP
- VER
- VEA
- VY1
- VBA VBAT
- AP100



Series ITV0000/1000/2000/3000 Specific Product Precautions 4

Be sure to read before handling. Refer to front matter 43 for Safety Instructions and pages 365 to 369 for Common Precautions.

Series ITV1000/2000/3000/209 Precautions

Wiring

Caution

Connect the cable to the connector on the body with the wiring arranged as shown below. Proceed carefully, as incorrect wiring can cause damage. Further, use DC power with sufficient capacity and a low ripple.

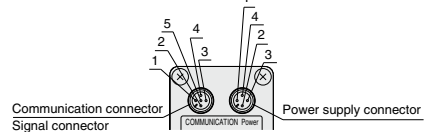
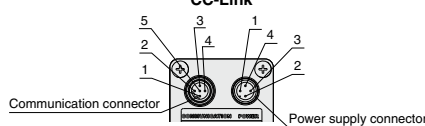
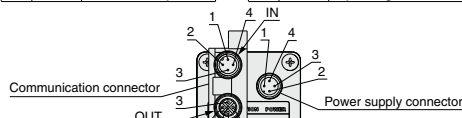


Current Signal Type Voltage Signal Type

1	Brown	Power supply
2	White	Input signal
3	Blue	GND (COMMON)
4	Black	Monitor output

Preset Input Type

1	Brown	Power supply
2	White	Input signal 1
3	Blue	GND (COMMON)
4	Black	Input signal 2



DeviceNet™, RS-232C, 16 points preset

Pin No.	IN/OUT communication connector				Signal connector
	CC-Link	DeviceNet™	PROFIBUS DP	RS-232C	16 points preset
1	SLD [-]	DRAIN [-]	No connection	No connection	Input signal 1 [Brown]
2	DB [White]	V+ [Red]	RxD/TxD-N [Green]	TxD [White]	Input signal 2 [White]
3	DG [Yellow]	V- [Black]	No connection	RxD [Blue]	Input signal 3 [Blue]
4	DA [Blue]	CAN_H [White]	RxD/TxD-P [Red]	GND [Black]	Input signal 4 [Black]
5	No connection	CAN_L [Blue]	No connection	No connection	Common [Gray]

Pin No.	Power supply connector					16 points preset
	CC-Link	DeviceNet™	PROFIBUS DP	RS-232C	16 points preset	
1 [Brown]	Vcc	Vcc	Vcc	Vcc	Vcc	Vcc
2 [White]	FG	Can not connect	FG	No connection	No connection	No connection
3 [Blue]	GND	GND	GND	GND	GND	GND
4 [Black]	No connection	Can not connect	No connection	FG	Monitor output	

Note 1) The indicated wire colors are when a cable connector made by SMC is used.
 Note 2) The cable is also available in a right angle type. (Communication cable: straight type only)
 A right angle type connector is attached facing left (towards the SUP port). On communication models, the connector faces backwards (towards the EXH port). Do not attempt to rotate, as the connector does not turn.

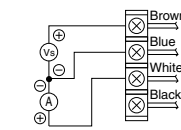
■ **Trademark Information**
 DeviceNet™ is a trademark of ODVA.

Knock-down connectors * Order separately.

Part number	CC-Link compatibility		DeviceNet™ compatibility		PROFIBUS DP compatibility			
	Plug	Socket	Plug	Socket	Terminal Plug	Plug	Socket	
PCA-1557617	PCA-1557620		PCA-1557659	PCA-1557662	PCA-1557675	PCA-1557701	PCA-1557714	PCA-1557727

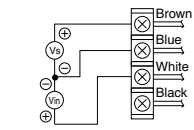
Wiring diagram

Current signal type



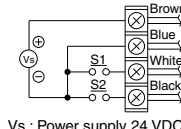
Vs : Power supply 24 VDC
 12 to 15 VDC
 A : Input signal 4 to 20 mA DC
 0 to 20 mA DC

Voltage signal type



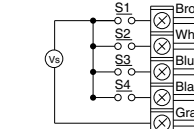
Vs : Power supply 24 VDC
 12 to 15 VDC
 Vin : Input signal 0 to 5 VDC
 0 to 10 VDC

4 points preset input type



Vs : Power supply 24 VDC
 12 to 15 VDC
 (Negative common)

16 points preset input type



Vs : Power supply 24 VDC (No polarity)

One of the preset pressures P1 through P4 is selected by the ON/OFF combination of S1 and S2.

S1	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON
S2	OFF	OFF	ON	ON	OFF	ON	OFF	ON
S3	OFF	OFF	OFF	OFF	ON	ON	ON	ON
S4	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	ON	ON	ON
Preset pressure	P01	P02	P03	P04	P05	P14	P15	P16

* For safety reasons, it is recommended that one of the preset pressures be set to 0 MPa.

* Preset pressures are set based on the minimum unit for output display.

MPa	kgf/cm ²	bar	psi	kPa
0.001	0.01	0.01	0.1	1

Note that this is 1 psi for 130 psi types.

10 bit digital input type

Wire Color	Signal name
Pink-Black 2	Power supply (24 VDC)
Green-Black 2	Power supply (GND)
Blue	Signal Common (No Polarity)
Blue-Black 2	MSB 10 bit
Gray-Black 1	9 bit
Orange-Black 1	8 bit
Green-Black 1	7 bit
Pink-Black 1	6 bit
Blue-Black 1	5 bit
Gray	4 bit
Orange	3 bit
Green	2 bit
Pink	LSB 1 bit

Note) The wire color is shown for when an option cable is used.



Series ITV0000/1000/2000/3000 Specific Product Precautions 5

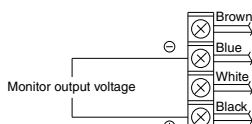
Be sure to read before handling. Refer to front matter 43 for Safety Instructions and pages 365 to 369 for Common Precautions.

Series ITV1000/2000/3000/209□ Precautions

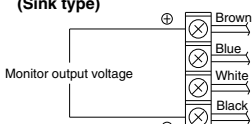
Wiring

Monitor output wiring diagram

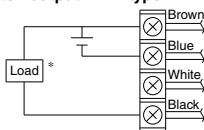
Analog output: Voltage type



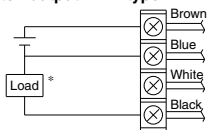
Analog output: Current type (Sink type)



Switch output: NPN type



Switch output: PNP type



* When 80 mA DC or more is applied, detecting device for overcurrent starts activating and then emits an error signal. (Error number "5")

Set Pressure Range

The set pressure range, by unit of standard measured pressure, is shown in the table below.

Set pressure range, by unit of standard measured pressure

Unit	Set pressure range			
	ITV□01□	ITV□03□	ITV□05□	ITV209□
MPa	0.005 to 0.1	0.005 to 0.5	0.005 to 0.9	—
kgf/cm ²	0.05 to 1	0.05 to 5	0.05 to 9	—
bar	0.05 to 1	0.05 to 5	0.05 to 9	—
psi	0.7 to 15	0.7 to 70	0.7 to 130	—
kPa	5 to 100	5 to 500	5 to 900	-1.3 to -80

CE Marking

• Series ITV0000

Model	Ferrite core necessity	Recommended power supply cable
ITV0000-□□-Q	Unnecessary	M8-4DSX3MG4 (Straight type) P398000-501-2 (Right angle type)

Note) Recommended power supply cable length is 3 m. (P398000-501-2 is 2 m.) If any other length is desired, please consult with SMC.

• Series ITV1000/2000/3000

Model	Ferrite core necessity	Recommended power supply cable
ITV□□-□□	—	P398020-500-3 (Straight type) P398020-501-3 (Right angle type)
ITV□□-52□	Power	P398020-500-3 (Straight type) P398020-501-3 (Right angle type)
ITV□□-53□	Signal	P398020-502-3 (Straight type) P398020-503-3 (Right angle type)
ITV□□-60□	—	INI-398-0-59 (Straight type)
ITV□□-CC□	Power	P398020-500-3 (Straight type) P398020-501-3 (Right angle type)
Note 2) Note 3)	Communication	PCA-1567720 (Socket type) PCA-1567717 (Plug type)
ITV□□-DE□	Power	P398020-500-3 (Straight type) P398020-501-3 (Right angle type)
Note 2) Note 4)	Communication	PCA-1557633 (Socket type) PCA-1557646 (Plug type)
ITV□□-PR□	Power	P398020-500-3 (Straight type) P398020-501-3 (Right angle type)
Note 2) Note 4)	Communication	PCA-1557688 (Socket type) PCA-1557691 (Plug type)
ITV□□-RC□	Power	P398020-500-3 (Straight type) P398020-501-3 (Right angle type)
	Communication	P398020-502-3 (Straight type) P398020-503-3 (Right angle type)

Note 1) Recommended power supply cable length is 3 m. If any other length is desired, please consult with SMC.

Note 2) Even when the "with cable connector" type is selected, the communication connector is not included. Refer to the catalog [M8/M12 Connector] CAT.ES100-73 for the details of the communication cable.

Note 3) For CC-Link compatible products, a dedicated Bus adapter is included with the product.

Note 4) For DeviceNet™ compatible products, and PROFIBUS DP compatible products, a T-branch connector is not included with the product.

ARJ

AR425 to 935

ARX

AMR

ARM

ARP

IR

IRV

VEX

SRH

SRP

SRF

VCHR

ITV

IC

ITVX

PVQ

VEF

VEP

VER

VEA

VY1

VBA

VBAT

AP100



Series ITV0000/1000/2000/3000 Specific Product Precautions 6

Be sure to read before handling. Refer to front matter 43 for Safety Instructions and pages 365 to 369 for Common Precautions.

Series ITV009□/209□ Precautions

Handling

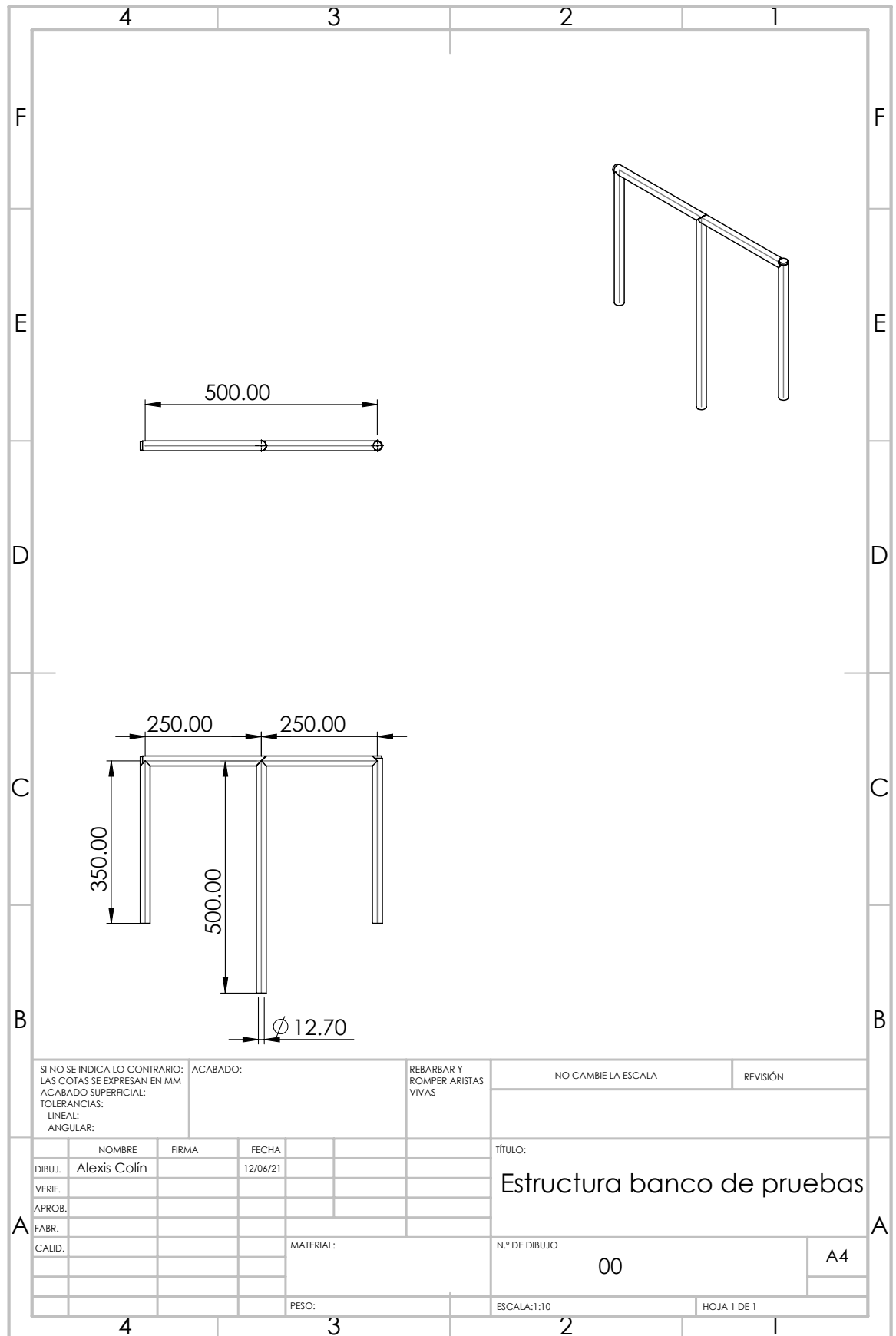
Caution

1. Connect the vacuum pump to the port, which is labeled "VAC".
2. Pressure adjustment changes from "atmospheric pressure to vacuum pressure" when the input signal is increased, and from "vacuum pressure to atmospheric pressure" when the input signal is decreased.
3. When adjusting the vacuum pressure, be careful not to block the atmospheric pressure inlet port labeled "ATM".
4. Since this product is designed exclusively for use with negative pressure, be careful not to apply positive pressure in error.
5. In cases where the vacuum pump being used has a relatively small capacity, or the piping has a small inside diameter, etc., large variations in the set pressure (the range of pressure variation when changing from no flow to flow state) may appear. In this situation, the vacuum pump or the piping, etc. should be changed. In cases where it is not practical to change the vacuum pump, install a capacity tank (volume depending on the operating conditions) on the VAC side.
6. The vacuum pressure response time after a change in the input signal is influenced by the internal volume on the setting side (including piping). Since the capacity of the vacuum pump also influences the response time, give careful consideration to these points before operation.
7. If the electric power is shut off when in a control state, the pressure on the setting side will go into a holding condition. However, this setting side pressure will be held only temporarily and is not guaranteed. In addition, when atmospheric pressure is desired, shut off the power after reducing the set pressure, and then introduce atmospheric pressure by using a vacuum release valve, etc.
8. If the power for this product is cut off by a power failure, etc. when it is in a controlled state, the setting side pressure will be held temporarily. Further, if operated without sealing the setting side so that atmospheric air is sucked in, handle with care as air will continue to be sucked in.
9. If the VAC side pressure to this product is interrupted while the power is still on, the internal solenoid valve will continue to operate and may cause a humming noise. Since this may shorten the life of the product, be sure to shut off the power when the VAC side pressure is shut off.
10. The setting side pressure cannot be completely released from this product in the range below -1.3 kPa. In cases where the pressure needs to be reduced completely to 0 kPa, install a 3 port valve, etc. on the setting side to discharge the residual pressure.
11. This product is adjusted for each specification at the factory before shipment. Avoid careless disassembly or removal of parts, as this can cause failure.
12. The optional cable connector is a 4-wire type. When the monitor output (analog output, switch output) is not being used, keep it from touching the other wires, as this can cause malfunction.
13. Use caution that the right angle cable does not rotate and is limited to only one entry direction.
14. Take the following steps to avoid malfunction due to noise.
 - 1) Eliminate power supply noise during operation by installing a line filter, etc. in the AC power line.
 - 2) For avoiding the influence of noise or static electricity, install this product and its wiring as far as possible from strong electric fields such as those of motors and power lines, etc.
 - 3) Make sure to take protective measures against load surge for an induction load (solenoid valves, relays, etc.).
15. Refer to the operation manual included with the product for details on its handling.

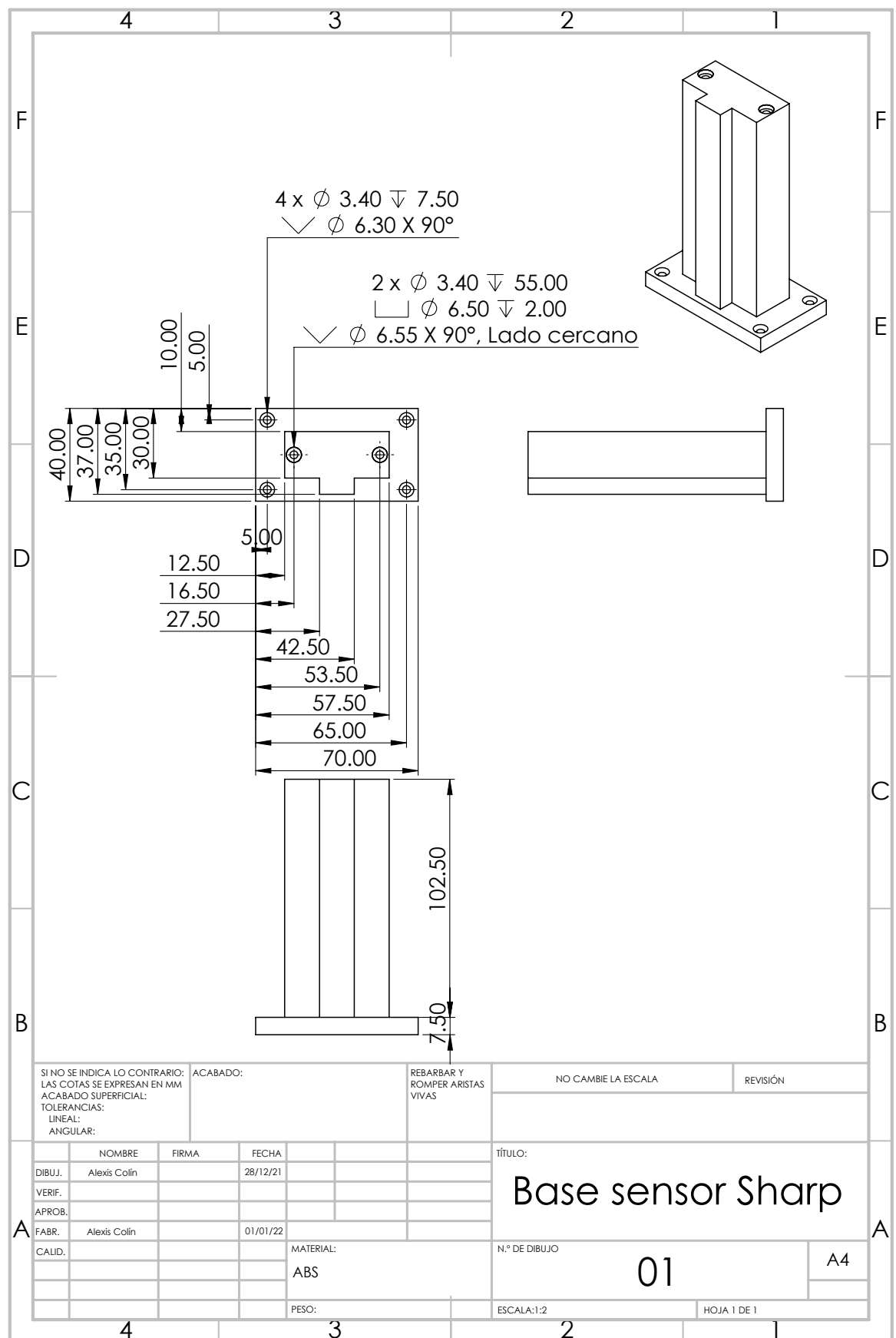
Apéndice C

Planos y diagramas

C.1. Plano de estructura del banco de pruebas



C.2. Plano de base para sensor Sharp



C.3. Diagrama de conexiones

