

### Caso práctico

**Adrián** trabaja en una empresa de montajes eléctricos industriales y ha decidido matricularse en el Ciclo Formativo de Gestión del Agua de la FPaD (Formación Profesional a Distancia) ya que abandonó sus estudios al finalizar bachillerato porque le apetecía trabajar. Ahora busca obtener una titulación aprovechando los conocimientos adquiridos de su experiencia laboral.



**Tamara** es una estudiante del Ciclo Formativo de Automatización y Robótica Industrial, que realizó el módulo de Formación en Centros de Trabajo en una consultoría de ingeniería, al finalizar sus estudios la contrataron debido a que consiguieron un "gran proyecto".

El proyecto que han encargado al estudio en el que trabaja **Tamara** tiene como objeto la actualización de los equipos de medida y la elaboración de un nuevo SCADA para el control de una planta potabilizadora de agua, procedente de un manantial, para el abastecimiento de un ayuntamiento. Para proyectar el sistema de control y mando de la central necesitan revisar los accionamientos que tienen que instalar para realizar las acciones de control necesarias sobre la instalación.



[Ministerio de Educación y Formación Profesional](#). (Dominio público)

**Materiales formativos de FP Online propiedad del Ministerio de Educación y Formación Profesional.**

[Aviso Legal](#)

# 1.- Accionamientos todo-nada.

## Caso práctico



Debido a la experiencia profesional de **Adrián**, conoce bien los accionamientos todo-nada, ya que lleva varios años instalando sistemas de calefacción y equipos frigoríficos industriales.

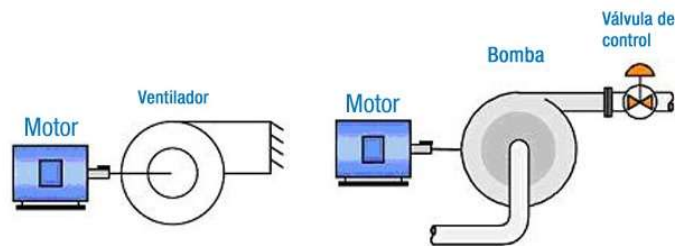
Una vez vistos los sensores utilizados para captar la medida y cómo podemos acondicionar la señal para transmitirla, se van a ver los diferentes tipos de accionamientos.

Después de la medida y de su procesamiento, si las condiciones del proceso no son las que deseamos, es necesario modificarlas en el sentido adecuado para que las variables que controlamos vuelvan a estar dentro de los valores que deseamos. La modificación de los valores de estas variables se realiza con los accionamientos.

El primer tipo de accionamientos que vamos a detallar son los del tipo todo-nada. En estos accionamientos, la salida cambia bruscamente entre dos valores, sin tener ningún valor intermedio de actuación. Veremos sus características básicas y los tipos principales de accionamientos todo-nada que existen.

El otro tipo básico de accionamientos que revisaremos son los accionamientos proporcionales. En este tipo, la salida del accionamiento tiene una gama de valores intermedios entre los dos extremos, al contrario de los accionamientos todo-nada.

También revisaremos cómo se realiza el montaje de los accionamientos y los cálculos necesarios de fuerza, el par y velocidad que van a ser necesarios que cumpla el accionamiento para que tenga utilidad en la aplicación en la que queremos instalarlo.



[Desconocido \(CC0\)](#)

## Citas para pensar

"A lo largo de espacio hay energía. ... es una mera cuestión de tiempo hasta que los hombres tengan éxito en sus mecanismos vinculados al aprovechamiento de esa energía".

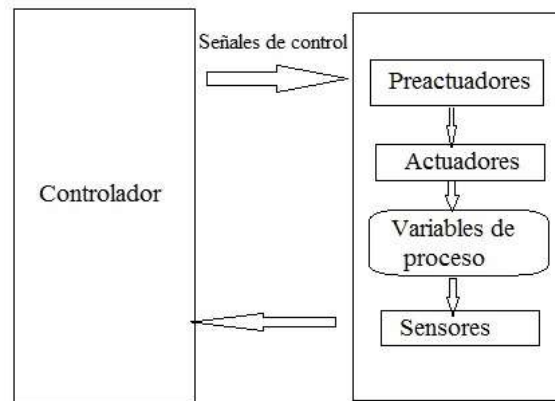
**Nikola Tesla**

## 1.1.- Generalidades.

Se denominan accionamientos o actuadores, a los elementos finales que permiten modificar las variables a controlar en una instalación automatizada. Son componentes de potencia, que transforman señales, generalmente de carácter eléctrico en magnitudes físicas que permiten actuar sobre el proceso que se desea controlar. A su vez, aíslan la parte de control del sistema de las cargas que gobiernan el proceso.

Entre los accionamientos más habituales se encuentran los destinados a producir movimiento (motores y cilindros), los destinados al trasiego de fluidos (bombas) y los de tipo térmico (hornos, intercambiadores, etc.)

Dentro de los accionamientos se pueden distinguir los **preactuadores** y los **actuadores**. Los primeros transforman la señal de control, generalmente débil, en otra más fuerte para activar los actuadores. Dentro de éstos se encuentran los transistores, los relés, contactores, electroválvulas, etc.

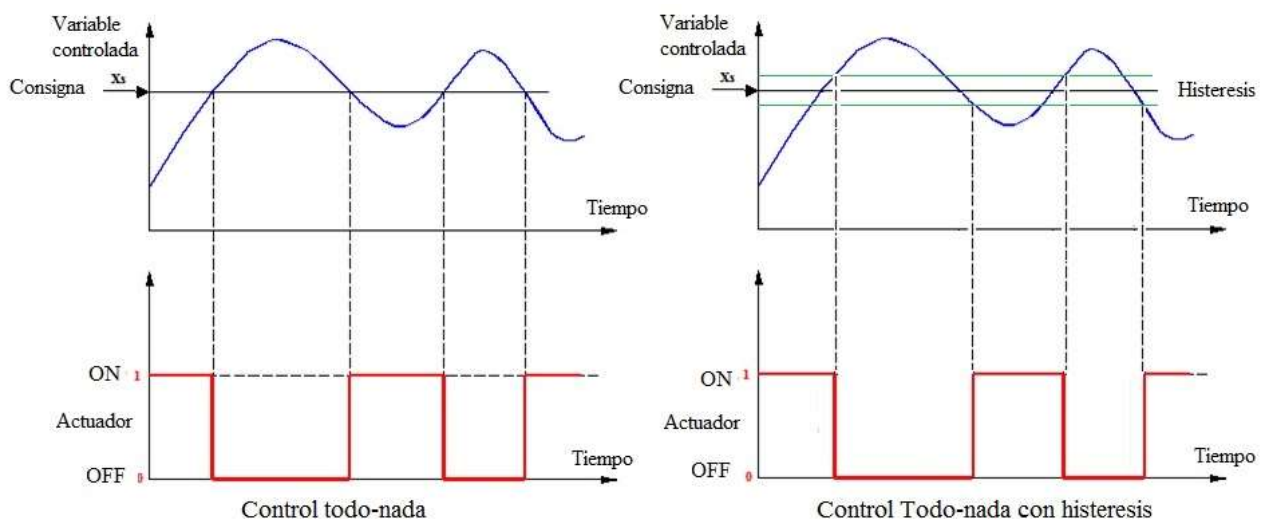


Licencia: [CC BY-NC-SA](#)

Para los accionamientos todo-nada, existen dos tipos de control automático: El control todo-nada o control On-Off y el control todo-nada con histéresis.

**Control todo-nada:** En este tipo de control se parte de una consigna, que es el nivel de la variable que se quiere conseguir. El actuador permanece activo mientras el nivel de la variable está por debajo del punto de consigna y se desactiva cuando supera este nivel. Este tipo de control tiene el inconveniente de que el actuador puede conectarse y desconectarse con mucha frecuencia, lo que acortaría su vida. Pensando en un sistema de refrigeración, por ejemplo un frigorífico, si la consigna son 4°C, a nada que cambien las condiciones, por la apertura de la puerta o por la inserción de un producto, el compresor se pondría en marcha. En sistemas de poca inercia, este tipo de control no es adecuado.

**Control todo-nada con histéresis:** En este tipo de control, la consigna tiene un margen, llamado histéresis. El actuador se activa mientras la variable esté por debajo del punto de consigna menos la histéresis y se desactiva cuando la variable esté por encima de la consigna más la histéresis. En control de temperatura donde no se requiera gran precisión, se puede dar una histéresis de algún grado.



Licencia: [CC BY-NC-SA](#)

## Autoevaluación

Los accionamientos todo-nada son todos del mismo tipo.

Verdadero.

Falso.

No es correcto. Recuerda que hay accionamientos todo-nada con histéresis.

Estás en lo cierto.

## Solución

1. Incorrecto
2. Opción correcta

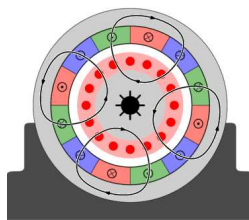
## 1.2.- Accionamientos eléctricos.

Los primeros accionamientos que vamos a describir son los eléctricos. Hoy en día, los motores eléctricos están gobernados, en la mayoría de las aplicaciones industriales, por la electrónica de potencia. Gracias al desarrollo de la electrónica de potencia, se ha conseguido mejorar el control y el funcionamiento de los motores eléctricos.

Los accionamientos eléctricos están basados, como ya hemos visto, en los **motores eléctricos**. El motor eléctrico es una máquina eléctrica que genera energía mecánica a partir de la energía eléctrica. El motor eléctrico está constituido por dos partes. La parte estática se denomina estator, mientras que la parte que gira recibe el nombre de rotor. En la mayoría de los motores eléctricos, la parte exterior es el estator, siendo el rotor la parte interior, aunque hay aplicaciones muy específicas en las que la disposición de estas partes está invertida. Cada una de estas partes, estator y rotor, utiliza corriente eléctrica que recorre los bobinados dispuestos en ellas. Debido a los principios del electromagnetismo, la interacción entre los campos electromagnéticos de ambas partes es lo que genera el movimiento mecánico.

Podemos clasificar los motores eléctricos en dos grandes grupos en función del tipo de corriente eléctrica que utilizan:

- Motores de **corriente continua**: tanto el estator como el rotor están recorridos por corriente continua. Estos motores pueden utilizar imanes para suplir uno de los bobinados. Son motores con muy buen comportamiento a diferentes velocidades aunque más complicados de construir que los de corriente alterna.
- Motores de **corriente alterna**: utilizan la corriente alterna en los dos devanados. El más utilizado es el denominado motor asíncrono de rotor en jaula de ardilla, por su facilidad de construcción. Son motores con peor característica mecánica que los motores de continua, aunque gracias a la electrónica de potencia han conseguido superar estos problemas.



[BurnsBurnsBurns \(CC0\)](#)

En un principio, los accionamientos eléctricos se realizaban con motores de corriente continua ya que presentan mejores características en cuanto a la regulación de la velocidad y la entrega del par motor para las necesidades mecánicas de cualquier aplicación. El motor de corriente continua tiene los inconvenientes de la dificultad de construcción, ya que necesita un colector de delgas y unas escobillas para comunicar eléctricamente el rotor con el exterior. Debido a la conmutación que se produce en las escobillas y en el colector de delgas, éstas sufren mucho desgaste y con el chisporroteo eléctrico que se produce también se deterioran. Por tanto, se hace preciso realizar frecuentemente mantenimiento sobre los motores de corriente continua si queremos que estos sigan en funcionamiento.

Con la evolución de la electrónica de potencia, se ha conseguido regular tanto el arranque como el par a diferentes velocidades de los motores de corriente alterna. Gracias a la sencillez constructiva del motor asíncrono, que repercute en escasas averías, y a la electrónica de potencia, este tipo de motores está imponiéndose en la mayoría de las aplicaciones industriales.



[Cyborg](#) (Dominio público)

Para pasar de estados, es decir, motores en funcionamiento o motores parados, el dispositivo más utilizado es el contactor. El contactor es un interruptor modificado para soportar la potencia necesaria en las conmutaciones de la corriente eléctrica.

## 1.3.- Accionamientos neumáticos.

¿Crees que en las instalaciones domésticas se encuentran aplicaciones neumáticas habitualmente? En el entorno industrial, las instalaciones neumáticas son las más comunes y utilizadas en gran cantidad de aplicaciones, después de los sistemas eléctricos. Por ello, otros de los accionamientos que vas a ver más a menudo en la industria son los del tipo neumático. Los accionamientos neumáticos están movidos por aire a presión. Mediante un **compresor** conseguimos aumentar la presión del aire hasta los valores necesarios, generalmente 6 bar, para obtener la energía necesaria para el movimiento de los dispositivos neumáticos.

Los accionamientos neumáticos están basados en válvulas y cilindros.

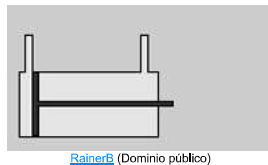
Las válvulas controlan el flujo de aire a través de las tuberías, modificando los circuitos de aire a presión y provocando el cambio de estados en el sistema neumático.

Los cilindros de aire son los encargados de transformar la presión del aire en movimiento mecánico.

Ya hemos visto que el control del circuito se realiza con válvulas. Generalmente, las válvulas de control se designan por el número de entradas o salidas de aire y el número de posiciones internas de que disponen para modificar el flujo del aire. De este modo una válvula 3/2, será una válvula con 3 conexiones de aire que tiene 2 posiciones internas diferentes para comunicar neumáticamente estas vías. Otro tipo muy común en la industria es la 5/3, es decir, 5 vías con 3 estados diferentes. El cambio de posición de estas válvulas puede realizarse de diferentes maneras:

- Señal eléctrica: electroválvula.
- Señal mecánica: manual, acción de un muelle, etc.

Los **cilindros** se clasifican en función de las vías de entrada de aire que tienen. Si solo tienen una vía de entrada de aire, se denominan cilindros de **simple efecto**. Para recuperar la posición inicial o de partida, generalmente, se utiliza la fuerza de un muelle que se ha comprimido en el paso previo. Si disponen de dos vías de entrada de aire, una a cada extremo, se denominan cilindros de **doble efecto**. Introduciendo aire por una vía movemos el émbolo hacia un lado, al cambiar a la otra vía, volvemos al estado inicial.



Existen gran cantidad de accesorios y válvulas de control (antirretornos, agujas, reguladores) que se disponen a lo largo del circuito neumático para modificar la presión y el flujo del aire y de esta manera, ajustar la velocidad de los movimientos mecánicos a las necesidades de nuestro proceso industrial.

También existen motores neumáticos aunque su uso está limitado a aplicaciones muy específicas.

### Autoevaluación

La diferencia entre los cilindros de simple y doble efecto es:

- Los de simple efecto tiene dos vías de aire y los de doble una.
- Los de doble efecto tienen muelle y los de simple no.
- Los de doble tienen muelle y dos vías de aire, mientras que los de simple tienen una vía de aire.
- Los de doble tienen dos vías de aire, mientras que los de simple tienen una vía y muelle.

No es correcta porque es justo al contrario.

Incorrecta porque el funcionamiento es al contrario.

No es la respuesta correcta porque los de doble efecto no necesitan muelle.

Efectivamente es correcto, es importante que recuerdes bien este concepto.

## Solución

1. Incorrecto
2. Incorrecto
3. Incorrecto
4. Opción correcta

## 1.4.- Accionamientos hidráulicos.

Recuerda que tanto líquidos como gases son fluidos y presentan muchos comportamientos similares. Los accionamientos hidráulicos son muy similares a los accionamientos neumáticos que acabamos de ver. Los principios de funcionamiento son los mismos y la tecnología utilizada es muy similar. La diferencia principal estriba en que el fluido utilizado en estos accionamientos es un líquido, generalmente **aceite**. Ya que los líquidos son mucho menos compresibles que los gases, existen pequeñas diferencias constructivas en los equipos.



[Chris Allen \(CC BY-SA\)](#)

Para conseguir presión en el aceite que va a circular por las tuberías se utilizan grupos de presión. Estos grupos consisten en una **bomba** accionada por un motor eléctrico para comprimir el aceite hasta los valores deseados. La presión de trabajo de los accionamientos hidráulicos suele ser muy superior a la de los accionamientos neumáticos, generalmente superior a **60 bar**.

Si tenemos una pérdida en un accionamiento neumático, se nos escapará aire y puede ser que no detectemos la fuga en el momento de producirse. En cambio, las fugas de fluido en los accionamientos hidráulicos se detectan con mucha mayor rapidez debido a los siguientes motivos:

- Los accionamientos hidráulicos trabajan con un circuito cerrado para el aceite, por lo que de producirse una fuga, el nivel de aceite del sistema disminuye.
- Si tenemos una fuga de aceite, y más a estas presiones de trabajo, el chorro de aceite que sale por la fuga suele ser bastante considerable.

Los equipos utilizados en estos accionamientos son también las válvulas de control y los cilindros. **Las válvulas de control** se utilizan para modificar el flujo de aceite por las tuberías del sistema y los **cilindros hidráulicos** para transformar la energía contenida en la presión del aceite en movimiento.

Los sistemas hidráulicos suelen utilizarse en aplicaciones donde se requiere una gran fuerza, que no puede ser alcanzada con los accionamientos neumáticos.

### Debes conocer

Artículo en Wikipedia sobre la oleohidráulica. Contiene la tabla de símbolos más utilizados en los esquemas hidráulicos.

[Artículo en Wikipedia sobre la oleohidráulica.](#)

### Autoevaluación

**Los accionamientos hidráulicos trabajan a mayores presiones que los neumáticos.**

- Verdadero.
- Falso.

Es correcto. Los hidráulicos alcanzan presiones mayores de 60 bar, mientras que los neumáticos suelen trabajar a 6 bar.

Creo que te falta poner más atención. Recuerda que los hidráulicos alcanzan presiones mayores de 60 bar, mientras que los neumáticos suelen trabajar a 6 bar.

### Solución



1. Opción correcta
2. Incorrecto

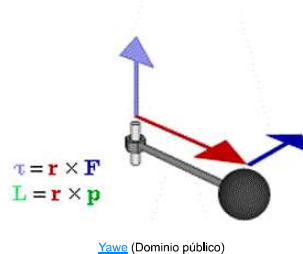
## 2.- Cálculos de fuerza, par y velocidad.

### Caso práctico

**Adrián y Tamara** son conscientes de la necesidad de realizar correctamente el dimensionado de los accionamientos en función de la aplicación en la que se van a utilizar. Si los accionamientos no están correctamente dimensionados, puede surgir una avería en el momento más crítico y poner en peligro toda la instalación.



En los accionamientos que vamos a dimensionar y montar es necesario que soporten los requerimientos mecánicos a los que van a estar sometidos. Por ello, se hace necesario calcular la fuerza, el par y la velocidad con la que deben actuar en la aplicación en la que se encuentren instalados. Antes de ver cómo los dimensionamos, repasemos estos conceptos físicos.



La fuerza es una magnitud vectorial, que puede definirse como la acción que causa una aceleración o cierta reacción en un cuerpo.

$$F = m \cdot a$$

El par mecánico es el producto vectorial de la fuerza por el radio de giro. Se mide en Newtons por metro (N.m)

$$T = F \cdot r$$

La velocidad es una magnitud física vectorial que expresa el desplazamiento de un objeto por unidad de tiempo.

$$V = e/t$$

Para la aplicación en cuestión, donde vayamos a colocar nuestro accionamiento, necesitaremos unos adecuados valores de estas magnitudes físicas para que el sistema trabaje adecuadamente.

En los motores eléctricos, el par mecánico vendrá dado por el **par motor**. Depende de la potencia y de la velocidad de giro. La relación entre ellas es  $P=2\pi \cdot T \cdot n$ , siendo P la potencia en vatios y n la velocidad en revoluciones por segundo. Si se quieren modificar los valores del par motor, se puede utilizar un conjunto reductor con ruedas dentadas que modifique la velocidad. Para una misma potencia, el par aumenta proporcionalmente a la disminución de la velocidad.

En los accionamientos neumáticos e hidráulicos, el elemento actuador final suele ser un cilindro. Una de las características destacables de los sistemas de potencia neumáticos e hidráulicos es que la fuerza, generada por un sistema de presión, controlada y dirigida por las válvulas convenientes, y transportada por las tuberías, puede ser convertida fácilmente a casi cualquier clase de movimiento mecánico deseado en el mismo lugar que sea necesario.

Si nuestro manómetro indica la presión en  $\text{kg/cm}^2$  o  $\text{bar}$  la regla para hallar la fuerza total de empuje de un determinado cilindro es: "**La fuerza es igual a la presión manométrica multiplicada por la superficie total del pistón**".

$$F=P \cdot S, \text{ Fuerza en Newtons, presión en pascales y superficie en metros cuadrados.}$$

La velocidad de desplazamiento de un cilindro hidráulico es fácil de calcular si se emplea una bomba de desplazamiento positivo. Veamos un ejemplo: tenemos una bomba que alimenta un cilindro hidráulico con un caudal de 40 litros por minuto. El área del pistón es de  $78 \text{ cm}^2$ . Para encontrar la velocidad de desplazamiento primero convertiremos los litros en  $\text{cm}^3$  por minuto es decir:  $40 \cdot 1000 = 40000 \text{ cm}^3/\text{min}$ . Luego dividimos este valor por el área del pistón obteniendo la velocidad:  $40000/78 = 512,8 \text{ cm}/\text{min}$ .

### Para saber más

En internet hay calculadoras online y vídeos donde se pueden ver cómo se resuelven los cálculos de fuerza y velocidades de avance y retroceso de cilindros hidráulicos.

## Autoevaluación

Un motor eléctrico tiene una potencia útil de 5 cv ( $1\text{cv}=736\text{W}$ ) y gira a 1800 rpm. Determinar el par motor.

- 19,5 N.m
- 32,84 N.m

Es correcto

No es correcto.

## Solución

1. Opción correcta
2. Incorrecto

## 3.- Montaje de los accionamientos.

### Caso práctico

**Tamara** va a ser la encargada de supervisar, controlar y gestionar toda la información técnica aportada en los manuales de los equipos que van a utilizar. Ella revisará todos los manuales de los fabricantes para realizar correctamente el montaje de todos los accionamientos.



Una vez que hemos comentado algunos accionamientos y hemos visto cómo podemos dimensionarlos en sus características básicas, podemos proceder al montaje de los accionamientos.

Es muy importante seguir detenidamente las instrucciones indicadas por los fabricantes de los equipos que vamos a utilizar para evitar accidentes y averías. Debemos tener en cuenta las especificaciones indicadas en estos equipos y comprobar que se adecúan a las características de nuestra instalación.

Si hablamos de un sistema eléctrico o electrónico, tenemos que comprobar:

- Tensión nominal.
- Frecuencia nominal.
- Intensidad de trabajo.
- Tensión de aislamiento de los equipos.

Si estamos hablando de un sistema neumático o hidráulico:

- Presión de trabajo del fluido.
- Caudal necesario.

Una vez que nos hemos asegurado que las características de los equipos son acordes a las de la instalación, podemos comenzar el montaje del accionamiento, siguiendo cuidadosamente las instrucciones de montaje y los esquemas de diseño del accionamiento. Antes de realizar la puesta en marcha del accionamiento y de conectar la alimentación, es conveniente repasar el conexionado de los equipos y ver que no existe ningún tipo de error que pueda provocar una avería en la instalación o un accidente.

Revisado el montaje, conectamos la alimentación y podemos realizar la puesta en marcha del accionamiento para comprobar que todo funciona de manera adecuada y que no hay ningún tipo de riesgo para la instalación y las personas.

### Autoevaluación

**Una vez realizado el montaje del accionamiento, conectaremos la alimentación.**

- Verdadero.
- Falso.

¿Estás seguro? Por tu seguridad, te recomiendo que revises antes el conexionado.

Es necesario revisar el conexionado antes.

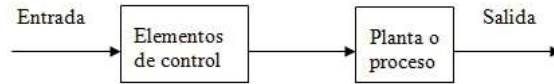
### Solución

1. Incorrecto
2. Opción correcta

## 4.- Principios de regulación

Los sistemas de regulación se pueden clasificar en:

**Sistemas de bucle o lazo abierto:** son aquellos en los que la acción de control es independiente de la salida. Sistemas de bucle o lazo cerrado: son aquellos en los que la acción de control depende en cierto modo, de la salida. Sistemas de control en lazo abierto Un sistema de control en lazo o bucle abierto es aquél en el que la señal de salida no influye sobre la señal de entrada. La exactitud de estos sistemas depende de su calibración, de manera que al calibrar se establece una relación entre la entrada y la salida con el fin de obtener del sistema la exactitud deseada. El diagrama de bloque de un sistema en lazo abierto es:



Licencia: [CC BY-NC-SA](#)

Una lavadora automática sería un claro ejemplo de sistema de control en lazo abierto. La blancura de la ropa (señal de salida) no influye en la entrada. La variable tiempo presenta una importancia fundamental: si está bien calibrada, cada proceso durará el tiempo necesario para obtener la mejor blancura.

Otro ejemplo de sistema en lazo abierto sería el alumbrado público controlado por interruptor horario. El encendido o apagado no depende de la luz presente, sino de los tiempos fijados en el interruptor horario.

Otro ejemplo sería el control de velocidad de un motor mediante variador. Al variador se le da un punto de consigna de frecuencia con un potenciómetro, pero la velocidad del motor dependerá de su carga.

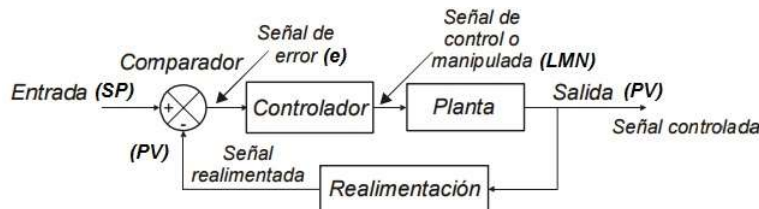
**Sistemas de control en lazo cerrado:** Si en un sistema en lazo abierto existen perturbaciones, no se obtiene siempre la variable de salida deseada. Conviene, por tanto, utilizar un sistema en el que haya una relación entre la salida y la entrada.

Un sistema de control de lazo cerrado es aquél en el que la acción de control es, en cierto modo, dependiente de la salida. La señal de salida influye en la entrada. Para esto es necesario que la entrada sea modificada en cada instante en función de la salida. Esto se consigue por medio de lo que llamamos realimentación o retroalimentación (feedback). La realimentación es la propiedad de un sistema en lazo cerrado por la cual la salida (o cualquier otra variable del sistema que esté controlada) se compara con la entrada del sistema (o una de sus entradas), de manera que la acción de control se establezca como una función de ambas.

A veces también se le llama a la realimentación transductor de la señal de salida, ya que mide en cada instante el valor de la señal de salida y proporciona un valor proporcional a dicha señal.

Por lo tanto, podemos definir también los sistemas de control en lazo cerrado como aquellos sistemas en los que existe una realimentación de la señal de salida, de manera que ésta ejerce un efecto sobre la acción de control.

El diagrama de bloques correspondiente a un sistema de control en lazo cerrado es:



Licencia: [CC BY-NC-SA](#)

El controlador está formado por todos los elementos de control y a la planta también se le llama proceso.

En este esquema se observa cómo la salida es realimentada hacia la entrada. Ambas se comparan, y la diferencia que existe entre la entrada, que es la señal de referencia o consigna (señal de mando), y el valor de la salida (señal realimentada) se conoce como error o señal de error. La señal que entrega el controlador se llama señal de control o manipulada y la entregada por la salida, señal controlada.

El error, o diferencia entre los valores de la entrada y de la salida, actúa sobre los elementos de control en el sentido de reducirse a cero y llevar la salida a su valor correcto. Se intenta que el sistema siga siempre a la señal de consigna. El diagrama de bloques anterior se puede sustituir por el siguiente:

Es importante retener los siguientes términos:

**Set Point (SP)** es la consigna o valor de la salida que queremos conseguir.

**Variable del proceso (PV)** es el valor que tiene el sistema en cada momento ("process value"). Un ejemplo de variable de proceso es la temperatura, la cual mide el instrumento controlador mediante un termopar o una Pt 100.

Ejemplos adicionales de PV pueden ser velocidad, presión, humedad, etc cada una de las cuales se mide con el sensor apropiado.

**Error(E):** es la diferencia entre las anteriores  $E = (SP-PV)$

Por ejemplo, en un horno la temperatura actual es 155 °C y el controlador está programado para 200°C, entonces  $PV=155$  y  $SP=200$ . El error será 45°C.

**Variable manipulada (LMN):** Es una variable de salida del regulador que actuará sobre el control. Toma valores entre 0 y 100.

## 4.1.- Control proporcional

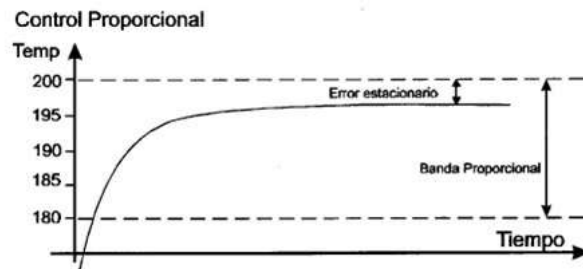
El control proporcional actúa sobre el error, o diferencia entre el punto de consigna y el valor de la variable que se quiera controlar. A veces interesa establecer unos límites entre los cuales se desea que trabaje el regulador, a estos límites se le llama banda proporcional.

Si por ejemplo se quiere regular la temperatura de un sistema a 200°C, pero el control de temperatura se quiere que sea en el rango de 180 a 200°C. A este margen se le llama banda proporcional  $P_b$  y se expresa en tanto por ciento, en este caso  $P_b=10\%$ . (10% de 200°C = 20°C).

El regulador actuará sobre el error, de forma que hasta los 180°C, dará la máxima salida,  $LMN=100\%$  y a partir de 180°C, la salida irá disminuyendo, según la ecuación  $LMN = [100\% * E / banda]$ . Si se sobrepasa en punto de consigna, la salida será 0%.

Se puede realizar una tabla para ver cómo variará la salida en función del error.

SP	Pb	PV	E	LMN
200	10%	210	-10	0%
		202	-2	0%
		200	0	0%
		199	1	5%
		198	2	10%
		195	5	25%
		190	10	50%
		185	15	75%
		182	18	90%
		181	19	95%
		180	20	100%
		170	30	100%
		110	90	100%



Licencia: [CC BY-NC-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

En gráfico de temperatura\_tiempo se observa el comportamiento típico de un control proporcional.

Se produce un error permanente, llamado error estacionario. El valor de la temperatura del proceso nunca alcanzará el valor prefijado. La razón es fácil de entender recurriendo a nuestro ejemplo. Supongamos que la temperatura se estacionara en 200 °C en forma estable y permanente, entonces la salida sería 0%, pero siempre es necesario suministrarle al horno algo de potencia, por lo menos como para compensar las pérdidas de calor cedido al medio ambiente. Es evidentemente imposible que el horno se mantenga a 200°C con los calefactores permanentemente apagados. Para evitar esto se recurre al control PID.

### Ejercicio Resuelto

Un control proporcional tiene programado:  $SP=500$  y  $P_b=5\%$ . Si  $PV=490$  cuál será el valor de la salida de control.?

Mostrar retroalimentación

LMN=40%

### Ejercicio Resuelto

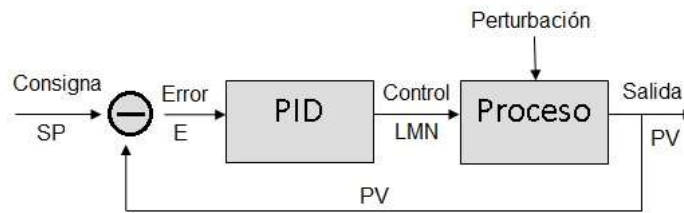
Un control proporcional de temperatura tiene programado:  $SP=300^\circ\text{C}$  y  $P_b=20\%$ . A que temperatura la salida de control será 50%.?

Mostrar retroalimentación

PV=270°C.

## 4.2.- Control PID

El control PID combina las acciones Proporcional (P), Integral (I) y Derivativa (D) mediante un regulador. El esquema es el siguiente:



Licencia: [CC BY-NC-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Se pueden combinar las tres acciones o no.

### Efecto Proporcional:

Genera una acción de control proporcional al error. Es el efecto más corriente y más intuitivo: si el error es positivo (velocidad excesivamente baja), es necesario aumentar la tensión sobre el motor para aumentar la velocidad; si es negativo (velocidad excesiva), será necesario reducir la tensión de entrada al motor. Existe una constante de proporcionalidad que llamaremos **KP** que relaciona el error con la acción de control, de modo que para errores grandes las variaciones de intensidad serán también grandes. Si llamamos **e(t)** a la señal de error y **u(t)** a la acción sobre el sistema (tensión a aplicar sobre el motor), quedará:

$$u(t) = K_P \cdot e(t)$$

Si  $K_p$  es pequeña, la acción proporcional será pequeña. Si  $K_p$  es grande, la acción proporcional será grande.

### Efecto integral:

En algunos casos, la aplicación de un efecto proporcional no consigue que el sistema alcance el valor de referencia indicado, aún después de un prolongado periodo de tiempo. Se dice que el sistema presenta error en régimen permanente. En estos casos la mejor opción es recurrir a un efecto integral. Esta acción se basa en la operación matemática de integración, que consiste en ir sumando el error de regulación en el tiempo. Es decir, si existe un error positivo, y éste dura en el tiempo, la salida de esta acción irá aumentando progresivamente según una determinada constante. Si es negativo el error la salida irá disminuyendo.

$$Y_i(t) = \frac{1}{T_i} \int \text{error}(t) \cdot dt$$

$T_i$  pequeño  $\Rightarrow$  Acción integral grande  
 $T_i$  grande  $\Rightarrow$  Acción integral pequeña

Licencia: [CC BY-NC-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

En definitiva, la acción integral corrige el offset producido por la acción proporcional.

### Efecto derivativo:

Este efecto busca conseguir un comportamiento más suave del sistema de control. Utilizando exclusivamente los efectos anteriores, la forma de alcanzar el valor de referencia puede ser excesivamente brusca, presentando picos de sobreoscilación excesivos.

Esta acción se basa en la operación matemática de derivación, que consiste en la pendiente del error de regulación en el tiempo. Es decir, la salida de la acción derivativa es proporcional a la velocidad de variación de la señal del error.

$$Y_d(t) = T_d \frac{d \text{ error}(t)}{dt}$$

$T_d$  pequeño  $\Rightarrow$  Acción derivativa pequeña  
 $T_d$  grande  $\Rightarrow$  Acción derivativa grande

Donde:  $Y_d(t)$ : salida de la acción derivativa.  
 $\text{error}(t)$ : error de regulación (SP-PV).  
 $T_d$ : tiempo de acción derivativa medida en segundos.

Licencia: [CC BY-NC-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

La acción derivativa es importante porque no actúa sobre el valor absoluto del error, sino sobre la velocidad de cambio de dicho error. En este sentido la acción derivativa tiene un **efecto anticipativo** porque tiende a corregir el error en el momento en que se detecta que éste tiende a cambiar.

Esta acción derivativa tiene una constante  $k_d = T_d$  medida en segundos de tal forma que cuanto más grande sea más importante será la acción derivativa y viceversa, cuanto más pequeña sea menos importancia tiene.

Un controlador PID presenta los tres efectos simultáneamente. La salida del controlador PID tiene por ecuación:

$$S(t) = K_p * \left[ e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) * dt + T_d * \frac{de(t)}{dt} \right]$$

La correcta elección de los parámetros del regulador, hará que el sistema funcione correctamente o no.

A continuación, se presenta una tabla donde se resumen de una forma general el comportamiento de cada una de esas acciones.

PID	Grande	Adecuado	Pequeño
<b>k</b>	Picos, Oscilaciones	Corrige Picos y oscilaciones	Offset, Alcance lento al SP
<b>Ti</b>	Offset	Corrige Offset	Oscilación
<b>Td</b>	Inestabilidad	Corrige perturbación	Corrección lenta de perturbación

El **ajuste** o la **sintonización** de un regulador consiste en elegir los valores para **KP**, **KI** y **KD** que consiguen un funcionamiento adecuado del sistema (en términos de tiempo de respuesta aceptable, pico de sobreoscilación aceptable, etc).

En cada proceso se deben ajustar los valores del PID para hacer que el proceso se comporte como nosotros deseamos. A este ajuste se llama **sintonización** de los parámetros del PID. Hoy en día, debido al gran desarrollo de los microprocesadores, existen controladores con **autosintonía**, es decir, ellos mismos chequean al proceso y ajustan sus parámetros.

De las figuras anteriores se puede observar lo siguiente:

- 1.- Con **regulador P**, el sistema reacciona pero mantiene un cierto offset.
- 2.- Con **regulador PD**, el comportamiento es más suave.
- 3.- Con **regulador PI**, desaparece el offset, transcurrido un tiempo.
- 4.- Añadiendo la acción derivativa (**regulador PID**) se consigue mejor sobrepasamiento sobre el punto de consigna y una mayor rapidez.

En la práctica, en la industria el control de procesos es un **control digital**. Por eso existen multitud de algoritmos que realizan la función PID. La diferencia entre unos y otros es que unos son más eficaces que otros y que unos son para procesos específicos, mientras otros lo son para procesos generales. No hay que olvidar que los procesos industriales son muy diferentes unos de otros y por lo tanto no pueden regularse de la misma manera.

#### UTILIZACIÓN DE LOS PID EN PROCESOS TÍPICOS

A continuación, se presenta una tabla donde se muestra la utilización concreta de los PID en procesos industriales.

<b>PID</b>	En servosistemas que son sistemas de control de posición o dirección, velocidad y aceleración se utilizan habitualmente las tres acciones del controlador PID (autopilotos de navegación, control de un manipulador,)
<b>PI</b>	En sistemas de regulación de caudal y presión de líquidos es esencial aplicar una acción integral. No obstante, es perjudicial una acción derivativa, ya que el ruido inherente a los sensores de estas variables no permite su aplicación. Control PI.
<b>P</b>	En regulación de presión de gas son innecesarias las acciones integral y derivativa, ya que estos procesos son muy estables y es posible aplicar una elevada acción proporcional que prácticamente elimina el error de regulación. Control P.
<b>P - PI</b>	En regulación de niveles de líquidos no se utiliza la acción derivativa. Es necesaria la acción integral si el proceso es continuo, y no si el propio proceso ya dispone de un elemento integrador. Control P o PI.
<b>PID</b>	La regulación de temperatura y de presión de vapor es necesaria la acción integral, y es esencial la acción derivativa si se desea acelerar la respuesta de estos procesos. Control PID.
<b>PID</b>	En composición de PH es esencial la acción integral, y la acción derivativa es recomendable dada la inestabilidad intrínseca de estos procesos continuos. Control PID.



## 5.- Salidas de los reguladores

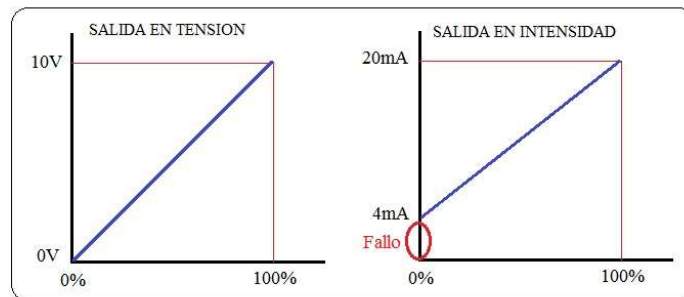
### Caso práctico

**Tamara y Adrián** son conscientes de las limitaciones que tienen los accionamientos todo-nada, incluso aquellos que tienen banda diferencial. Están estudiando los accionamientos proporcionales para mejorar el control sobre las variables de la planta. Quieren controlar de una manera precisa la dosificación de los aditivos. Para ello van a utilizar unas servoválvulas.

La salida de un regulador proporcional o PID, normalmente toma valores entre 0 y 100%. La salida del regulador, que ha de actuar sobre el elemento de potencia del sistema que se desee regular, puede ser del tipo continuo o mediante pulsos.

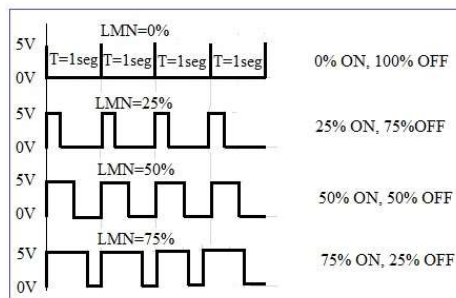
**Salida continua:** En este tipo de salida, se cambia el valor de la tensión o de la intensidad. Los valores de tensión más usuales están comprendidos entre 0 y 10V y los valores de intensidad entre 4 y 20 mA. Los límites de la tensión o de la intensidad, coinciden con los límites del regulador, 0% y 100%.

Se suele utilizar más el control de corriente 4-20mA ya que presenta una ventaja frente al sistema 0-10V. Si por cualquier avería en el sistema o por cortarse el cable, con el control de 0-10V no sabemos si es que la medida está en 0V o si tenemos una avería. En el sistema de corriente, el valor mínimo es de 4mA, por lo que, si se produce la rotura del cable o una avería en el sistema de control, detectamos que el valor es de 0mA con lo que podemos establecer una alarma para indicar la presencia del fallo.



Licencia: [CC BY-NC-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

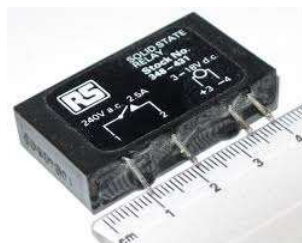
**Control PWM:** PWM son siglas en inglés que significan **Pulse Width Modulation** y que lo podemos traducir a español como Modulación de ancho de pulso. Este control se caracteriza por emitir pulsos de tensión constante, por ejemplo 5V, en un periodo de tiempo también constante, por ejemplo 1 segundo. Lo que varía es el tiempo de activación de la salida durante el periodo de tiempo. En la imagen se puede apreciar este tipo de control.



Licencia: [CC BY-NC-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Este tipo de control se utiliza para variar la velocidad de un motor de corriente continua, para variar la iluminación de un led, para controlar la temperatura en un proceso de calentamiento, a través de un relé de estado sólido, etc.

Este tipo de salida no va bien en un relé electromecánico, pues la continua activación y desactivación de sus contactos, acabaría destruyéndolo en poco tiempo. Un relé de estado sólido, al estar formado por semiconductores y no tener partes móviles, soporta este tipo de salida, para alimentar un elemento calefactor.



[Mike1024](#) (Dominio público)

## Reflexiona

En un control de temperatura, se desea mantener un líquido a 80°C, pero el control se debe realizar entre 60 y 80°C.

¿Cuánto vale la banda proporcional en %?.

¿Cuánto vale el error si la temperatura es de 75°C?

¿Cuánto vale la salida del regulador en %?.

Si la salida del regulador es mediante PWM, con un periodo de 2 segundos, ¿Cuánto tiempo estará activada la salida dentro de ese periodo?.

Mostrar retroalimentación

Banda = 25%

Error = 5°C

LMN = 20%

0,4 segundos ON, 1,6 segundos OFF.

## 6.- Accionamientos Proporcionales

---

### Caso práctico

En la planta se van a instalar variadores de velocidad de motores asíncronos para gobernar los agitadores de los decantadores, es necesario que se lean los manuales de instalación y ajusten de parámetros para su correcto funcionamiento.

En un control todo-nada, el elemento actuador funciona o no, deja pasar la corriente o no, abre un circuito o lo cierra. Sus estados son 0% y 100%.

En los accionamientos proporcionales, los dispositivos pueden tener, en teoría, infinitos estados de funcionamiento, entre el 0% y el 100%. Nos podemos encontrar con diferentes elementos de acción proporcional:

- En neumática, válvulas que controlen la presión en un rango.
- En hidráulica, válvulas que controlan presiones y caudales, para regular fuerzas, velocidades y posiciones de cilindros hidráulicos.
- En accionamientos eléctricos (bombas, ventiladores, cintas transportadoras,...), se puede variar la velocidad de los motores eléctricos a través de los convertidores de frecuencia.
- En instalaciones hidráulicas, servoválvulas que controlan caudales y mezclas de fluidos.

A continuación se van a ver los variadores de velocidad de motores asíncronos y las válvulas proporcionales, por ser los accionamientos más comunes en instalaciones hidráulicas.

## 6.1.- Variadores de velocidad

En muchos procesos industriales es posible variar el proceso variando la velocidad de los motores. Por ejemplo en un bombeo de agua si variamos la velocidad del motor que acciona la bomba podemos hacer que el caudal aumente o disminuya a voluntad. En una refrigeración por ventilación, variando la velocidad del ventilador logramos refrigerar más o menos. En definitiva existen multitud de procesos donde variando la velocidad de los motores eléctricos se produce una actuación gradual en el proceso.

En la actualidad los motores más utilizados son los de inducción, que son motores de corriente alterna con rotor en jaula de ardilla (rotor en cortocircuito). Es por eso que se ha diseñado un bloque electrónico llamado variador de velocidad o convertidor de frecuencia para cambiar la velocidad, con una señal de consigna, de estos motores.

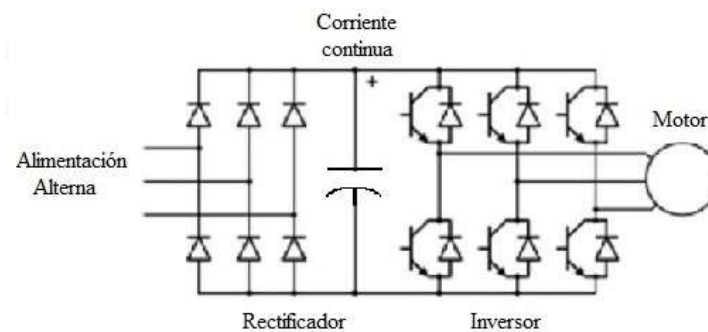
La velocidad de un motor asíncrono, depende de la frecuencia, según la ecuación  $n = 60 \cdot f / P$ , siendo  $n$  el número de revoluciones por minuto,  $f$  la frecuencia y  $P$  el número de pares de polos del motor.

Según sea el valor del número de pares de polos, nos podemos encontrar diferentes velocidades de sincronismo: 3000 Rpm para  $P=1$ ; 1500 Rpm para  $P=2$ ; 1000 Rpm para  $P=3$ , etc.

Un variador de velocidad consta de tres partes, un rectificador para convertir la corriente alterna en continua, un filtro para estabilizar la tensión continua y un ondulator que convierte la tensión continua en alterna de tensión y frecuencia variables. Existen variadores con alimentación monofásica para motores de pequeña potencia y trifásicos para el resto.



C. J. Cowie (CC BY-SA)



Licencia: CC BY-NC-SA

En un variador se pueden distinguir las siguientes partes:

- **Rectificador:** Formado por diodos, se encarga de convertir la corriente alterna en pulsante.
- **Condensador:** convierte la corriente pulsante en continua.
- **Inversor:** Formado por transistores, convierte la corriente continua en alterna de frecuencia variable.

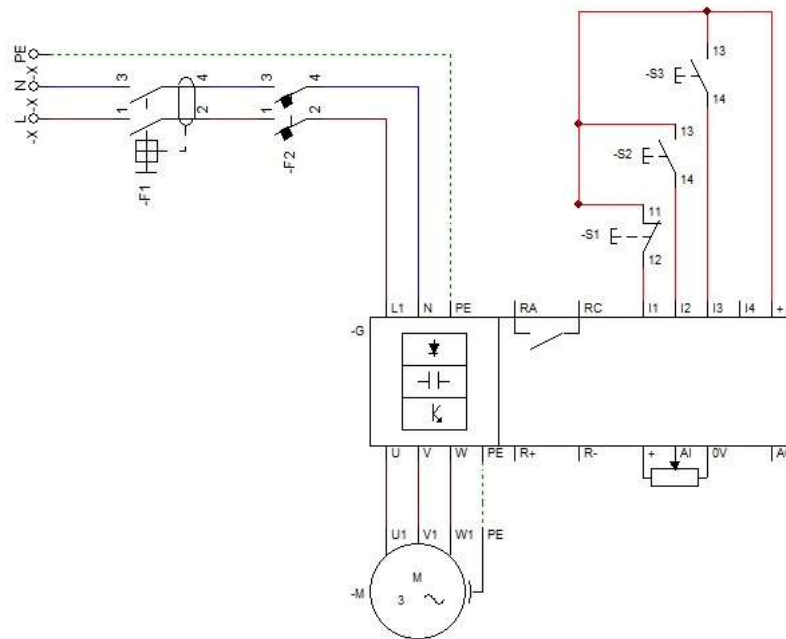
Los transistores de los variadores de velocidad tienen una frecuencia de conmutación elevada, por lo que tienden a producir interferencias en la red. Para evitarlas, conviene instalar un **filtro** a su salida.

Estos variadores son programables, donde se puede controlar las rampas de aceleración o deceleración, velocidad mínima o máxima, entre otras variables. La programación se puede realizar a través de su consola o mediante programas específicos de ordenador.

Mediante un potenciómetro, una señal de tensión 0 a 10V o una señal de intensidad 4-20mA, se consigue que el variador trabaje entre las frecuencias mínima y máxima programadas.

En el esquema de la figura, se ha conectado el variador con tres pulsadores, uno de paro y dos de marcha. Esta conexión se denomina a tres hilos. Accionando una marcha, el motor gira en un sentido, accionando la otra marcha, el motor girará en sentido contrario. Accionando el paro se parará.

Mediante el potenciómetro se consigue variar la frecuencia y la velocidad del motor.



Licencia: [CC-BY-NC-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

## Autoevaluación

¿Cuáles son los pasos, en orden correcto, para el funcionamiento del variador de frecuencia?

- Filtrar, invertir y rectificar la señal.
- Rectificar, invertir y filtrar la señal.
- Filtrar, rectificar e invertir la señal.
- Rectificar, filtrar e invertir la señal.

Incorrecto

Correcta. Muy bien. Has captado la idea principal del funcionamiento del variador de frecuencia.

No es correcto.

No es correcto.

## Solución

1. Incorrecto
2. Opción correcta
3. Incorrecto
4. Incorrecto

## 6.2.- Válvulas proporcionales

---

Las servoválvulas se utilizan en sistemas hidráulicos para controlar caudales, pudiendo regular variables de proceso como niveles, presiones, temperaturas, composiciones en mezclas, etc.

Según el número de vías se distinguen las de dos, tres y cuatro vías.

Según su accionamiento, pueden ser eléctricas o neumáticas. Las primeras llevan un pequeño servomotor, o motor eléctrico con un control de posición, que puede ser a través de un potenciómetro. La apertura se controla con una señal en tensión o intensidad.

Las neumáticas llevan un "globo" con una membrana interna, que hace mover el obturador a través de la presión del aire.



[Rafal Rygielski \(CC0\)](#)