

MANUAL DEL MÓDULO DE CONTROL DE CAUDAL Mod. PCP-INDU/009



www.inducontrol.com.pe

Tel: (51-1) 440-5225

Fax: (51-1) 221-6787

Copyright enero 2010

Índice General

Ítem	Página
1. Introducción.....	3
2. Fundamento teórico.....	4
2.1. Elementos de Medición y Transmisión.....	4
2.2. Medición de Caudal.....	4
2.3. Cálculo de Caudal.....	5
3. Operación del módulo de Caudal.....	9
3.1. Esquema general del lazo de control.....	9
3.2. Operación en modo manual.....	11
3.2.1. Condiciones previas a la operación.....	11
3.2.2. Operación.....	12
3.3. Operación en modo remoto.....	12
3.3.1. Condiciones para la operación.....	12
3.3.2. Operación.....	12
3.4. Mantenimiento después de la operación.....	13
3.5. Supervisión y control por supervisor-controlador/HMI.....	13
4. Apéndice.....	16
4.1. Apéndice A1: Requerimientos de instalación de los módulos.....	17
4.2. Apéndice A2: Características técnicas del modulo de caudal.....	18
4.3. Apéndice A3: Especificación de instrumentación.....	19
4.4. Apéndice B: Ecuaciones de diseño (SI).....	31
4.5. Apéndice C: Tablas de empleo en transferencia de fluidos.....	33
4.5.1. Apéndice C1: Longitudes equivalentes de accesorios.....	33
4.5.2. Apéndice C2: Coeficientes de resistencia para válvulas y uniones.....	39
4.5.3. Apéndice C3: Densidad del agua y presión de vapor.....	40
4.5.4. Apéndice C4: Factor de fricción.....	43
4.6. Apéndice D: Preguntas frecuentes.....	44
4.7. Apéndice E: Descripción del protocolo de comunicaciones.....	47
4.8. Apéndice F: Descripción del Algoritmo PID del PAC.....	48
4.9. Apéndice G: Hojas técnicas.....	57

1. INTRODUCCIÓN

El flujo de fluidos es una de las variables de operación que más a menudo se presentan en la industria química, farmacéutica, petroquímica, etc. y que están sujetas al control remoto para un control más óptimo del proceso.

El caudal puede cuantificarse por método directo, midiendo la cantidad de materia que circula por unidad de tiempo; como también por vía indirecta, a través de fenómenos relacionados con el caudal de un fluido.

Casi todos los sistemas de medición de flujo tienen dos partes: un elemento primario que produce el fenómeno de medición tales como los diferenciales de presión, la turbina de rotación, los de área variable, etc; y un segundo dispositivo, quien detecta este fenómeno, para cambiar la fuerza interna por un signo de transmisión, éste último puede variar casi siempre sin limitaciones, mientras que los primeros dependen de los principios físicos.

En este módulo para medir el caudal, se utiliza un medidor de flujo tipo Rotativo, el cual trabaja de acuerdo al muy conocido principio de turbina. Una magneto acoplada en la paleta y herméticamente sellada del medio transmite sin contacto el movimiento rotatorio a un sensor de Efecto Hall montado en la cubierta. El sensor convierte el movimiento rotatorio, que es proporcional al caudal, en una señal de frecuencia. Una unidad electrónica conectada en serie envía la señal a una salida analógica, a contactos límite o a una pantalla. Los dispositivos se pueden adaptar a las condiciones predominantes de la planta con las conexiones roscadas rotable 360°.

El equipo está compuesto básicamente por un tanque, red de tuberías y accesorios en acero inoxidable AISI 316; una bomba tipo centrífuga, un transmisor electrónico de caudal, una válvula proporcional, válvulas de posición tipo bola, un PAC, y un supervisor, controlador HMI. La variable de proceso controlada en este equipo es el caudal y presenta como componentes del sistema instrumentos que usualmente se utilizan en la industria.

El propósito de este manual es el de brindar la información necesaria para la instalación, puesta en marcha, mantenimiento del sistema y guías de prácticas para el profesor y/o estudiante que permitan sacar el máximo provecho a este módulo educativo.

Una introducción de cómo funciona el módulo así como de sus características técnicas se dan en el ítem (2), con el propósito de dar una idea del general de funcionamiento del sistema. En esta parte también se dan detalles del funcionamiento, las condiciones estándar de operación y las indicaciones para la operación en modo local y remoto.

Además se dan las indicaciones para el mantenimiento del módulo antes, durante y después de su funcionamiento. En los apéndices del manual están los requisitos para la instalación del módulo, diagramas del sistema así como tablas, fórmulas a emplear en las prácticas, las hojas técnicas y especificaciones de los accesorios y equipos que conforman el sistema.

2. FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1. Elementos de Medición y Transmisión

VARIABLES DE PROCESO

Las variables tradicionales que se miden y controlan en los procesos son cuatro: Presión, Temperatura, nivel y caudal. Estas variables están vinculadas a las condiciones operativas de los procesos.

También interesa en la industria de procesos ciertas características físicas (densidad, viscosidad, etc.) y químicas (composición, conductividad, pH, etc.) que también se miden y controlan, pero en mucha menor escala.

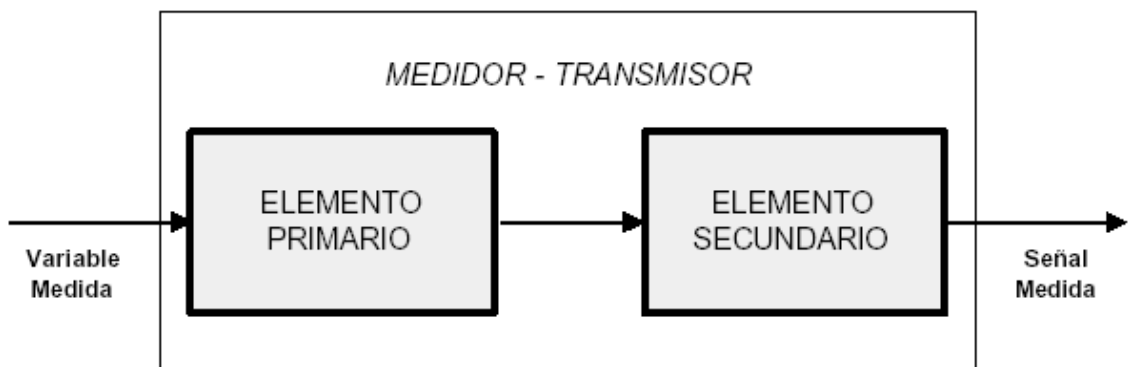
ELEMENTOS DE MEDICIÓN Y TRANSMISIÓN

Son los dispositivos que se encargan de transformar la variable del proceso (temperatura, por ejemplo) en una señal eléctrica que puede ser usada por otros instrumentos (indicadores, controladores, registradores, etc.). Estos dispositivos tienen dos partes:

- *Elemento primario:* es el que capta la variable a medir y produce cambios en propiedades físicas que luego puede transformarse en una señal.
- *Elemento secundario:* capta la señal elaborada por el elemento primario y la transforma en una salida (indicación por ejemplo) o genera una señal estandarizada que puede ser captada por otro instrumento en forma local o remota.

Estas dos partes pueden estar claramente separadas como en el caso de un tubo Venturi (elemento primario) con transmisor de presión diferencial (elemento secundario) o bien ambos elementos están confundidos en un mismo dispositivo (medidor de presión tipo Bourdon con indicación de aguja).

Analizando las relaciones causa efecto, se puede representar a un medidor-transmisor como dos sistemas en serie:



2.2. Medición de Caudal

Esta es una variable muy importante ya que su conocimiento es indispensable en los balances de materia y energía. El costo y las dificultades técnicas para la medición hacen que su uso sea menos difundido. Una clasificación exhaustiva se la puede encontrar en la norma británica BS-7405.

Algunos de los elementos primarios más empleados son los siguientes:

Placa Orificio

Consiste en dos elementos básicos, una placa orificio y un transmisor de presión diferencial. La placa orificio es una placa delgada con un orificio perforado que actúa como restricción en la corriente de flujo. Como el área de la corriente de flujo disminuye a medida que el fluido pasa a través del orificio, su velocidad aumenta.

La energía requerida para incrementar la velocidad del fluido se obtiene a través de una reducción en la presión estática. Midiendo el cambio que se produce en la presión estática con un transmisor de presión diferencial, se puede inferir el caudal volumétrico. La raíz cuadrada de la salida del transmisor de presión diferencial es proporcional al caudal.

Caudalímetro Magnético

El funcionamiento de un caudalímetro magnético se basa en la Ley de Faraday de inducción magnética. Una partícula cargada eléctricamente que pasa a través de un campo magnético produce una tensión que es perpendicular tanto al campo magnético como al vector velocidad y esta tensión es proporcional a la velocidad de la partícula. Puesto que un líquido conductivo contiene partículas cargadas, al pasar a través de un campo magnético, producirá una tensión (Ley de Faraday). Los caudalímetros magnéticos generan un campo magnético perpendicular a la corriente de flujo y miden la tensión producida por el fluido que pasa a través del instrumento. La tensión producida es proporcional a la velocidad media del fluido. Esta tensión es acondicionada y suministrada como salida analógica.

Caudalímetro de Desprendimiento De Vórtices

Los caudalímetros de vórtices miden el caudal con la ayuda de un cuerpo que genera vórtices. El principio básico de un medidor de vórtices es que los remolinos se desprenden del cuerpo a una frecuencia proporcional al caudal volumétrico. Los vórtices son detectados por distintos medios. A medida que los vórtices se van desplazando a través del caudalímetro, crean áreas alternadas de baja y alta presión. Y son estas presiones alternadas las que hacen responder a los elementos sensores.

El elemento de detección produce una señal eléctrica de la misma frecuencia con que se generan los vórtices. Esta frecuencia es acondicionada en una salida de pulsos y/o analógica. La señal de salida es proporcional a la velocidad del fluido.

Caudalímetro de Turbina

El caudalímetro a turbina mide caudal de líquidos claros mediante la detección de la rotación de un alabe de turbina colocada en la corriente de flujo. Las partes básicas de un medidor a turbina son el rotor de turbina y el detector magnético. El fluido que circula sobre los álabes del rotor lo hace girar y la velocidad rotacional es proporcional al caudal volumétrico.

El detector magnético consiste de un imán permanente con devanados de bobina que capta el pasaje de los álabes de turbina. El paso de los álabes delante del detector hace interrumpir el campo magnético y produce una tensión en la bobina. La frecuencia con que se genera esta tensión es proporcional al caudal y se la acondiciona en una salida de pulsos y/o analógica.

Medidor De Engranajes

Es uno de los tipos más populares de medidor de desplazamiento positivo. Consiste de dos ruedas maquinadas y una cavidad de medición. El paso del fluido a través del medidor hace girar las ruedas ovaladas; cada rotación de las ruedas corresponde al paso de una cantidad conocida de fluido a través del medidor. La rotación de las ruedas suele ser detectada por un sensor de proximidad que genera una señal eléctrica con una frecuencia proporcional al caudal. Esta señal es acondicionada luego en una salida de pulsos y/o analógica.

Caudalímetros Ultrasónicos

Son alimentados eléctricamente, y es posible encontrar dos tipos según su principio de medición: de **Efecto Doppler** y de **Tiempo de Tránsito**; este último consiste en medir la diferencia entre el tiempo que le toma a dos señales atravesar una misma distancia, pero en sentido contrario utilizando como medio un fluido. Si el caudal del fluido es nulo, los tiempos serán iguales, pero cuando hay flujo los tiempos serán diferentes, ya que las velocidades de las señales serán afectadas por la del fluido cuyo caudal se desea determinar; esta diferencia de tiempo más el conocimiento sobre la geometría de la cañería y la velocidad del sonido en el medio permiten evaluar la velocidad del fluido o el caudal.

2.3. Cálculo de Caudal

El caudal es el volumen de fluido que pasa por determinado elemento en la unidad de tiempo. Normalmente se calcula a partir del flujo, volumen que pasa por un área dada en la unidad de tiempo.

Dada un área A , y un fluido con velocidad uniforme v y un ángulo θ (respecto de la perpendicular a la superficie), entonces el flujo es

$$\phi = A \cdot v \cdot \cos \theta.$$

En el caso particular que el flujo sea perpendicular al área A (siendo $\theta = 0$ y $\cos \theta = 1$) entonces el flujo es

$$\phi = A \cdot v.$$

Si la velocidad del fluido no es uniforme o si el área no es plana, el flujo debe calcularse por medio de una integral:

$$\phi = \iint_S \mathbf{v} \cdot d\mathbf{S}$$

Donde $d\mathbf{S}$ es la superficie descrita por

$$d\mathbf{S} = \mathbf{n} dA,$$

con \mathbf{n} (vector unitario) normal a la superficie y dA la magnitud diferencial del área.

Si se tiene una superficie S que encierra un volumen V , el teorema de la divergencia establece que el flujo a través de la superficie es la integral de la divergencia de la velocidad \mathbf{v} en ese volumen:

$$\iint_S \mathbf{v} \cdot d\mathbf{S} = \iiint_V (\nabla \cdot \mathbf{v}) dV.$$

El cálculo del caudal en una tubería viene expresado por el **teorema de continuidad**:

$$Q = V \cdot S$$

en la que: Q = caudal (m^3/s)

V = velocidad (m/s)

S = sección del conducto (m^2)

Para que el fluido discurra entre dos puntos a lo largo de una línea de flujo, debe existir una diferencia de energía entre esos dos puntos. Esta diferencia corresponderá, exactamente, a las pérdidas por rozamiento, que son función de la rugosidad del conducto, de la viscosidad del fluido, del régimen de funcionamiento (laminar o turbulento) y del caudal circulante, es decir de la velocidad (a más velocidad, más pérdidas).

El cálculo de caudales se fundamenta en el **Principio de Bernouilli** que, para un fluido sin rozamiento, se expresa:

$$h + \frac{v^2}{2g} + \frac{P}{\rho} = \text{constante}$$

donde: g = aceleración de la gravedad

rho = peso específico del fluido

P = presión

Se aprecia que los tres sumandos, son, dimensionalmente una longitud (o altura), por lo que el Principio normalmente se expresa enunciando que, a lo largo de una línea de corriente, la suma de la altura geométrica, la altura de velocidad y la altura de presión, se mantiene constante. Considerando el rozamiento; la ecuación entre dos puntos 1 y 2, se puede expresar:

$$h_1 + \frac{v_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\rho} = h_2 + \frac{v_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\rho} + \text{perdidas}(1,2)$$

o lo que es igual

$$(h_1 - h_2) + \frac{(v_1^2 - v_2^2)}{2g} + \frac{(P_1 - P_2)}{\rho} = \text{perdidas}(1,2)$$

Donde pérdidas (1,2) es la pérdida de energía (o de altura) que sufre el fluido por rozamiento al circular entre el punto 1 y el punto 2. Esta ecuación es aplicable por igual al flujo por tuberías como por canales y ríos.

Si es **L** la distancia entre los puntos 1 y 2 (medidos a lo largo de la conducción), entonces el cociente (**pérdidas (1,2)**) / **L** representa la pérdida de altura por unidad de longitud de la conducción se le llama pendiente de la línea de energía. Denominémosla **J**

Existen varias fórmulas experimentales que relacionan la pendiente de la línea de energía con la velocidad de circulación del fluido. Cuando éste es agua, quizás la más sencilla y más utilizada sea la **fórmula de Manning**:

$$V = \frac{1}{n} \cdot Rh^{\frac{2}{3}} \cdot J^{0,5}$$

n = Coeficiente de rugosidad, depende del material de la tubería

Rh = Radio hidráulico de la sección = Área / Perímetro mojado (Un cuarto del diámetro para conductos circulares a sección llena)

En general las alturas geométricas son dato. De esta manera, conocidas las condiciones en un punto (por ejemplo un depósito -velocidad nula en la superficie, presión atmosférica-) y la geometría de la conducción, se pueden deducir las características del flujo (velocidad y presión) en cualquier otro.

En el caso de que entre las dos secciones de aplicación del Principio de Bernoulli existan puntos en los que la línea de energía sufra pérdidas localizadas (salidas de depósito, codos, cambios bruscos de diámetro, válvulas, etc.), las correspondientes pérdidas de altura se suman a las correspondientes por rozamiento. En general, todas las pérdidas localizadas son solamente función de la velocidad, viniendo ajustadas mediante expresiones experimentales del tipo:

$$Pérdida localizada = K \cdot \frac{v^2}{2g}$$

Los coeficientes K se encuentran tabulados en la literatura técnica especializada, o deben ser proporcionados por los fabricantes de piezas para conducciones.

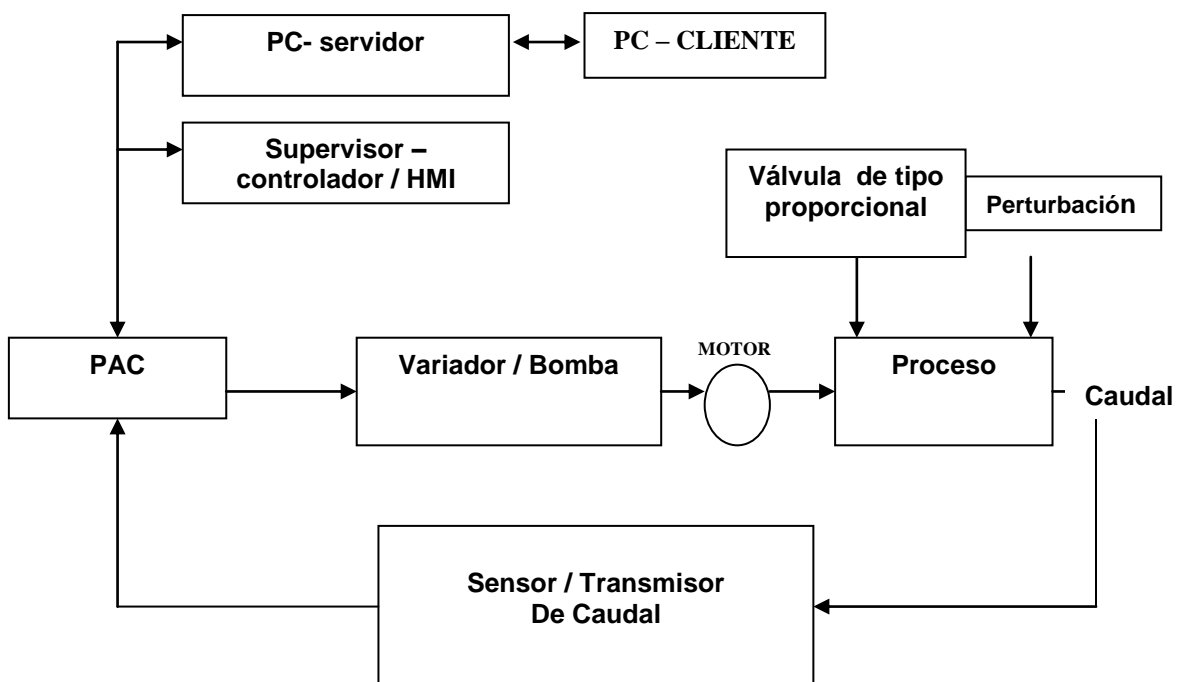
3. OPERACIÓN DEL MÓDULO DE CAUDAL

Este Módulo de Control de Caudal permitirá que el estudiante aprenda y experimente con un sistema de control automático programable (PAC) y un sistema de control y supervisión de datos por computadora (SCADA). Para esto, el fluido (agua) una vez almacenado en el tanque (T1) será bombeado con una electrobomba tipo centrífuga, recirculando por todo el circuito de tuberías (ver diagramas de instrumentación).

El estudiante fijará un valor de flujo o caudal como "valor de consigna", el medidor de caudal tipo paleta torsional enviará señal a un PAC. Cuando en el sistema se produzca una variación de flujo que esté fuera del valor deseado, el PAC enviará una señal al variador de velocidad para que aumente o disminuya la velocidad de la bomba, y de esta manera varíe el caudal de líquido hasta restablecer el valor deseado.

En este sistema, la válvula automática proporcional servirá para producir **perturbaciones simuladas** al sistema, pudiendo controlarse mediante la variación de abertura desde una PC o desde el HMI seleccionándose el porcentaje de abertura de válvula deseada. Al abrir o cerrar las válvulas manuales a un porcentaje determinado, traerá como consecuencia la disminución o aumento de caudal en el sistema, para este caso el sistema debe autorregularse, este es caso de perturbación manual al sistema.

3.1. Esquema general del lazo de control



El Módulo de Control de Caudal consta de los siguientes equipos para llevar a cabo el control remoto o local:

- Bomba tipo paleta centrífuga
- Variador de velocidad
- Válvula proporcional automática
- Sensor /Transmisor de caudal
- PAC
- Supervisor(PC portátil) – Controlador(HMI)
- Válvulas manuales de posición tipo bola
- Tablero eléctrico
- Sistema de tuberías y accesorios

El sistema de control ha sido concebido de tal forma que el PAC, empleando un algoritmo **PID**, se encargue de controlar y mantener el valor de consigna de la variable del proceso (caudal).

Los bloques de Computadora/Supervisor- Controlador/HMI están relacionados con supervisar y modificar los parámetros y variables de control del sistema que interactúan directamente con el algoritmo PID implementado en el PAC.

El PAC dentro del bloque general hace de controlador, es decir, es el encargado de decidir un determinado grado de acción correctiva sobre el actuador. El grado de acción correctiva se calcula a partir de hacer ingresar al bloque PID el valor de Caudal (Obtenido a través del Sensor /Transmisor de caudal), valor de consigna (SetPoint), Tiempo de integración, Tiempo de derivación y Ganancia Proporcional contenido en su memoria. (Ver Apéndice I para descripción del algoritmo PID).

El bloque Variador/Bomba representan el elemento actuador, que en función de la señal resultante del PID enviada desde el PAC modifican la variable manipulada (caudal), que lleva a mantener dicho caudal en el punto de consigna.

La Válvula de posición constituye un elemento que sirve como elemento perturbador del proceso que puede ser variado en cualquier momento para observar sus efectos.

El Proceso lo constituye el control del flujo de caudal. Las perturbaciones al proceso van a ser generadas por la válvula automática de posición y las válvulas manuales tipo bola que pueden ser manipuladas a criterio del operador.

La PC que actúa como SERVIDOR y el HMI están enlazados al PAC mediante un switch. El HMI y el Computador portátil pueden realizar la tarea de supervisar y modificar parámetros de control del PAC (Para que el computador portátil pueda modificar los parámetros de control se le debe poner como controlador esto se hace desde el HMI).



3.2. Operación en modo local

3.2.1. Condiciones previas para la operación

- **ADVERTENCIA:** Antes de manipular el modulo debe haber leído el manual completamente y haber entendido el funcionamiento, pues una mala manipulación puede causar daños en el Equipo.
- Verificar que el sistema se encuentre sin energía.
- Asegurarse que las válvulas **V2**, **V3** y **V4** estén completamente cerradas.
- Abrir la válvulas **V1**
- Revisar que el tanque se encuentre totalmente libre de impurezas.
- Conectar la salida de la válvula **V2** a una toma de agua y abrir para llenar el tanque de carga **T1**
- Una vez llenado el tanque a un nivel de aproximadamente 40cm guiarse por la marca exterior (Para no habilitar el limite superior del tanque), cerrar la válvula **V1**.

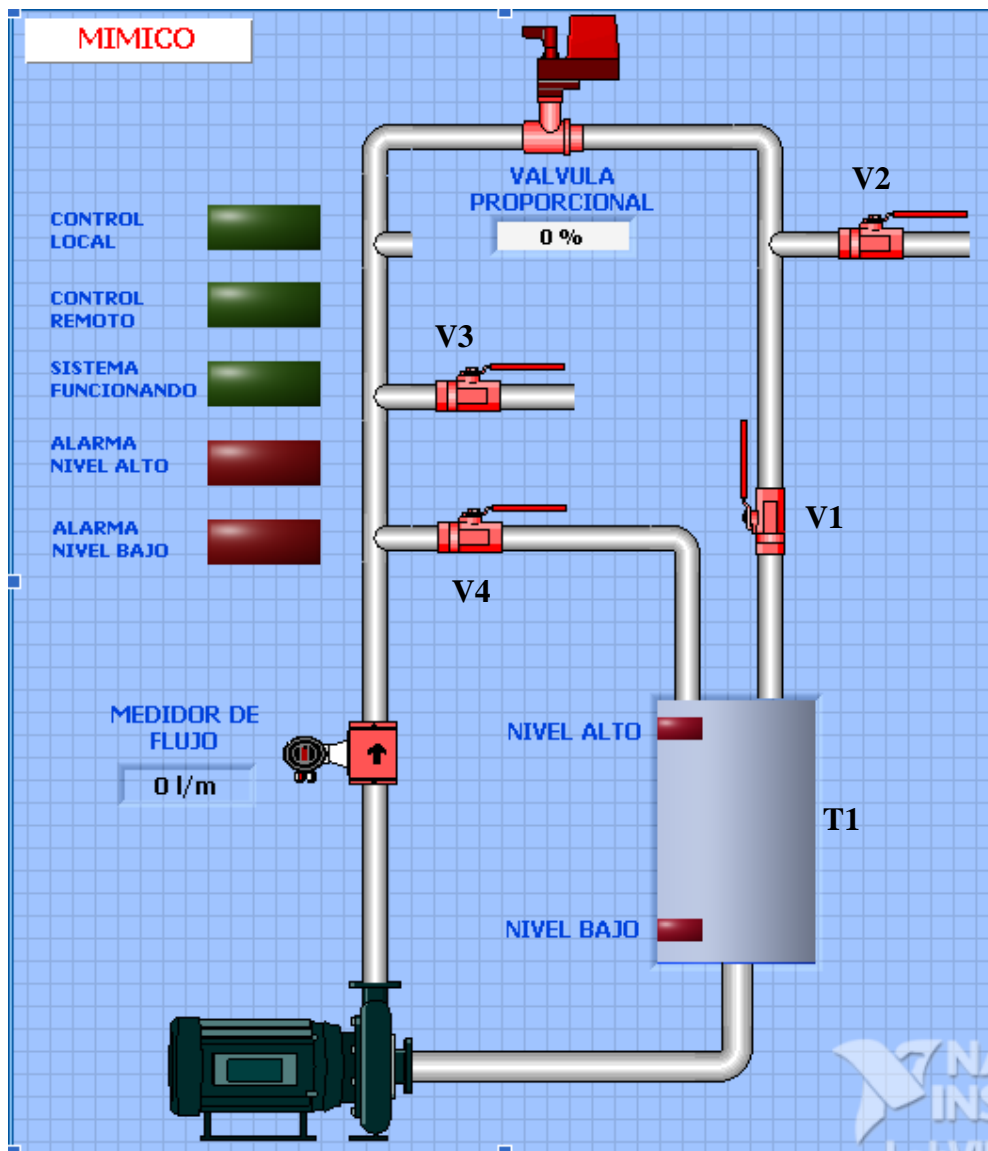


Diagrama del sistema de tuberías y válvulas

- Escoger la apertura de la válvula de control remoto 100%.(Esto lo puede hacer desde el HMI local o desde la PC. Cuando energiza el sistema este valor se encuentra preestablecido a 100% por lo que no es necesario que lo haga a menos que lo haya cambiado).

3.2.2. Operación

- Conectar la alimentación del modulo a la línea trifásica de 220 VAC.
- Abrir el tablero de control y subir la llave trifásica **Q_01** a **ON**, la llave termomagnética **Q02** a **ON** y activar el interruptor diferencial **ID_01** a **ON** para energizar el sistema (Verificar esto con la Lámpara de **SISTEMA ENERGIZADO** en el Tablero). Así mismo **START** al Guardamotor **GV_01**
- Cerrar el tablero y fijar el selector **LOCAL/REMOTO** en la posición **LOCAL**. Estas acciones fijan las condiciones necesarias para controlar el flujo del líquido, controlando directamente la velocidad de la bomba desde el Potenciómetro de **CONTROL LOCAL** en el tablero.
- Presionar el pulsador de **ARRANQUE MANUAL** para arrancar el sistema.
- Realice el control manualmente a través del potenciómetro **CONTROL MANUAL** Puede Ud. Llevar el sistema al nivel de Flujo Deseado de forma manual. Puede ver el valor del Caudal en el HMI o directamente en el Caudalímetro instalado. Se debe recordar que el rango de caudal para el modulo es de 5 l/min como mínimo (para rangos menores la lectura del instrumento es cero y además, no podrán ser mostrados en el HMI) y como máximo es 40 l/min.
- Cuando haya terminado detenga el sistema usando el pulsador **PARADA MANUAL** y finalmente vuelva el Selector **LOCAL/REMOTO** a la posición **NEUTRA**.
- Finalmente, si terminó de usar el Módulo de Caudal, baje la llave trifásica a **OFF**, la llave termomagnética a **OFF** y desactivar el interruptor diferencial a **OFF** para desenergizar el sistema y desconecte la toma de alimentación trifásica.
- Adicionalmente, en este módulo, se podrá observar la presión de trabajo gracias a un manómetro instalado por encima de la válvula **V4**.

3.3. Operación en modo remoto

3.3.1. Condiciones para la operación

- Verificar que el sistema se encuentre sin energía.
- Asegurarse que las válvulas **V1, V3, V6** y **V7** estén completamente cerradas.
- Revisar que el tanque se encuentre totalmente libre de impurezas.
- Asegurarse que las válvulas **V2** y **V5** estén completamente abiertas
- Asegurarse que el tanque este lleno con un nivel de aproximadamente **40 cm** de la base.
- Fijar la apertura de la válvula de control automático a 100%.(Cuando energiza el sistema este valor se encuentra preestablecido a 100% por lo que no es necesario que lo varíe de nuevo a menos que lo haya cambiado. El cambio lo puede hacer desde el HMI local o desde la PC).

3.3.2. Operación

- Conectar la alimentación del modulo a la línea trifásica de 220AC.
- Abrir el tablero de control y subir la llave trifásica **Q_01** a **ON**, la llave termomagnética **Q_02** a **ON** y activar el interruptor diferencial **ID_01** a **ON** para energizar el sistema (Verificar esto con la Lámpara de **SISTEMA ENERGIZADO** en el Tablero), Así mismo **START** al Guardamotor **GV_01**.
- Cerrar el tablero y verificar en el HMI, si los valores de los parámetros de control (SetPoint, Kp, Ti, Td) con los que arrancará el sistema, cuando entre en el **Modo Remoto** son los que desea. Si desea modificarlos puede hacerlo directamente desde el HMI local o desde la PC (Teniendo en cuenta que para que la PC pueda modificar valores debe estar como Controlador. Esto se asigna desde el HMI.)

- Fijar el selector **LOCAL/REMOTO** en **REMOTO** esto arrancará el sistema inmediatamente y el PAC tomará el control del sistema de acuerdo a los parámetros que Ud. ha ingresado, estos parámetros puede modificarlos en cualquier momento incluso en funcionamiento.
- Para salir del modo simplemente retorne el Selector **LOCAL/REMOTO** a posición neutra.
- Finalmente si ya no va a seguir usando el Modulo baje la llave trifásica a **OFF**, la llave termo magnética a **OFF** y desactivar el interruptor diferencial a **OFF** para desenergizar el sistema y desconecte la toma de alimentación trifásica.

NOTA:

El rango de valores en los que se encuentran los parámetros de sintonía del PID, están marcados por defecto.

3.4. Mantenimiento después de la operación

- Desconectar la alimentación trifásica general de 220 VAC
- Vaciar el agua del tanque abriendo la válvula (**V7**).
- Limpiar el interior del tanque con un paño.
- Limpiar las cañerías y estructuras del módulo.

3.5. Supervisión y control por supervisor- controlador HMI

El HMI local es el medio que nos permite ejecutar control y supervisión de la planta de manera inmediata y siempre se encuentra activo. Este HMI tiene una pantalla en entorno LabView, la cual exhibe un programa SCADA que presenta funciones de supervisión solamente así como también nos permite realizar modificaciones de control de mando en el proceso y los parámetros de control del controlador PID.

El SCADA del HMI es un reflejo (en funciones) del SCADA de la PC, en la cual podremos ubicar:

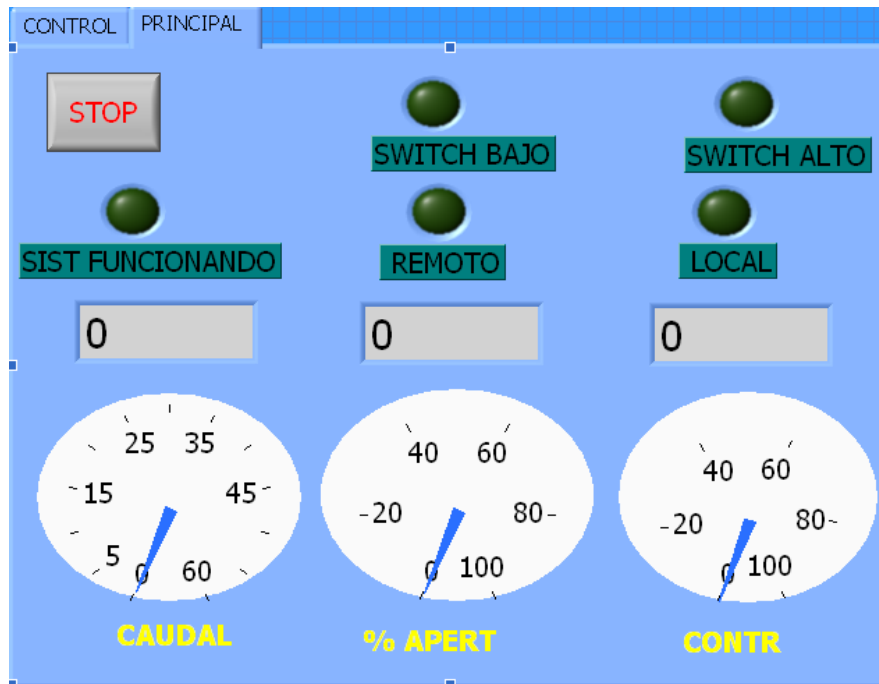
Pantalla Principal:

Esta primera pantalla nos permitirá monitorear las variables del proceso,

- Alarmas de nivel alto y bajo
- Control (Local o Remoto)
- Indicador sistema funcionando
- Porcentaje apertura válvula.
- Señal de Caudal
- Señal de control.

Esta pantalla básicamente nos servirá cuando el HMI tome la función de supervisión (Controlando el PAC). Así mismo también encontrara:

- **Pulsador de STOP:** el cual le permitirá salir de la aplicación del HMI



Pantalla de Control:

Esta pantalla es la que nos permitirá tener el control absoluto sobre el modulo, ya que aquí primeramente podremos seleccionar la función que desempeñara el HMI (Supervisión o control), como sigue:

Pulsador HMI; mediante el cual podremos indicar que el HMI tomara el control del proceso

Pulsador PC; mediante el cual podremos indicar que la PC tomara el control del proceso

Pulsador ARRANQUE; el cual nos permitirá iniciar el proceso de control de caudal

Pulsador PARADA; nos permitirá finalizar el proceso de control de caudal

Barra SET POINT; el cual nos permitirá ingresar el valor deseado a la que será llevado la variable de Control (Caudal)

Barra % APERT VALVULA; nos permitirá controlar la perturbación del sistema

Control "P"; nos permitirá ingresar el parámetro **Proporcional** de sintonización del PID

Control "I"; nos permitirá ingresar el parámetro **Integral** de sintonización del PID

Control "D"; nos permitirá ingresar el parámetro **Derivativo** de sintonización del PID

Indicador SET POINT; nos permitirá gráficamente ver cuál es el valor en la cual se encuentra configurado

Indicador CAUDAL; nos permitirá gráficamente observar cual es el desempeño de la variable de caudal

**OBS:**

1. En cuanto a quien tomara el control del proceso, estos cambios solo se podrán realizar desde el HMI, la PC solo observara.
2. Para ir de una pantalla a otra solo deberá de pulsar sobre las pestañas superiores Principal – Control

4. APÉNDICE

4.1. APENDICE A1:

4.1.1. Requerimientos de instalación de los módulos:

Consumo de Eléctrico del Módulo de Control de Caudal	
Generalidades:	
Alimentación trifásica	220 VAC
Frecuencia	60 Hz
Potencia total (vatios)	2623.95
DESCRIPCIÓN	CONSUMO (vatios)
PAC	30
Fuente de Alimentación	110
Contactador	110
Variador de velocidad (Trifásico)	750
Bomba Hidráulica para Tablero de Caudal	0.89 K
HMI	10
Luces	20
Transmisor de Flujo	0.48 K
Módulo de Entradas Analógicas	1.45
Módulo de Salidas Analógicas	2.5
Válvula de Control	220
Total :	2623.95

4.2. APÉNDICE A2:

4.2.1. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL MÓDULO DE CAUDAL

- Dimensiones 135 x 45 x 175 cm.
- Estructura sobre ruedas en acero inoxidable AISI 316
- Sistema de tuberías de ¾" en acero inoxidable AISI 316.
- Líneas de conexión y válvulas de cierre en acero inoxidable AISI 316.
- 1 tanque de recogida de agua en acero inoxidable AISI 316, capacidad: 30 litros.
- 1 bomba centrífuga Q=30-120 l/min., con todas sus partes húmedas en acero inoxidable AISI 316, altura de elevación 42.2 – 19.8 m.c.a , motor de 0.90 Kw.
- 2 interruptores de nivel en polipropileno, presión máxima 10 bar.
- 1 medidor de caudal, rango: 5 a 140l/min., con una salida de 4 - 20 mA.
- 1 convertidor de frecuencia, voltaje: 200 - 240 VAC, potencia: 0,75 Kw (1 HP).
- 1 tablero electrónico que incluye pulsadores de arranque y parada, botones indicadores de funcionamiento, seleccionador de operación local - remoto.
- 1 PAC cfp 2200, módulos de entrada y salida digital.
- 1 HMI NI Touch Panel.
- 1 llave de alimentación principal, 1 contactor, 1 fuente de alimentación 24 DVC.
- 1 bornera de conexiones
- Rango de operación: (15 a 65) l/min. (Optimo).

4.3. APÉNDICE A3:**ESPECIFICACIÓN DE INSTRUMENTACIÓN****1. BOMBA ELÉCTRICA**

TIPO: CENTRIFUGA
FABRICANTE: PENTAX

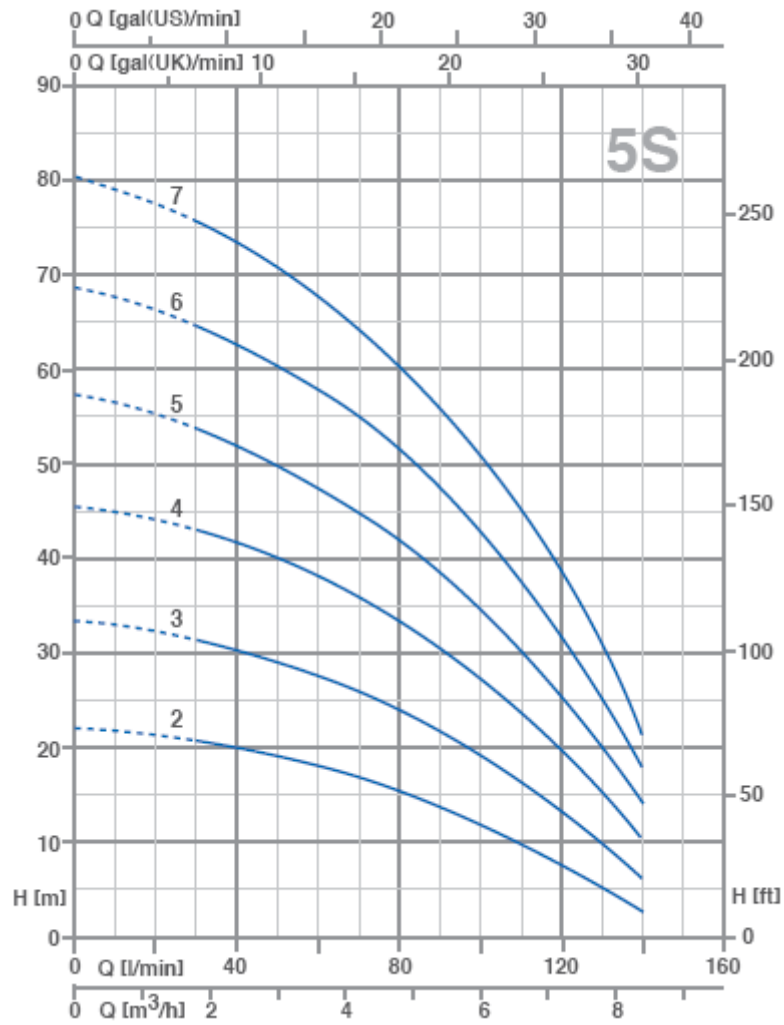
DESCRIPCIÓN

El accionamiento de la bomba centrífuga consiste en un impulsor que gira dentro de una caja circular; el fluido entra a la bomba cerca del centro del impulsor rotatorio (rodete) y es llevado hacia arriba por acción centrífuga. La energía cinética del fluido aumenta desde el centro del impulsor hasta los extremos de las aletas impulsoras.

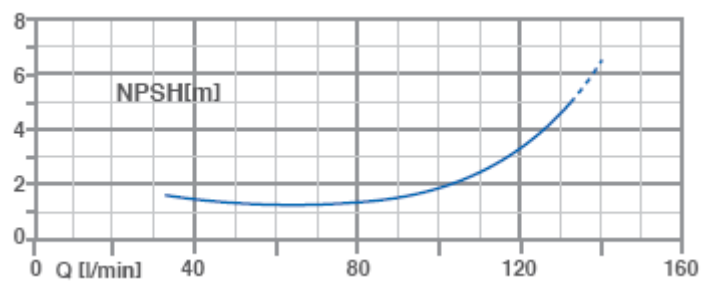
Esta carga de velocidad se convierte en carga de presión cuando el fluido sale de la bomba.

Especificaciones Bomba:

- Modelo : Ultra U5 120/3T.
- Potencia 1.2 HP.
- Frecuencia 60Hz , rpm.
- Motor : Trifásico.



Relación de graficas entre las variables



Relación de graficas entra las variables

Aplicaciones:

- Para líquidos moderadamente agresivos.
- Manejo de fluidos, agua y líquidos mecánicamente no agresivos.
- Suministro de agua.
- Irrigación.
- Circulación de agua (frío, caliente, refrigerado).

2. VÁLVULA AUTOMÁTICA

TIPO: PROPORCIONAL SERVO ACCIONADA DE 2 VÍAS.

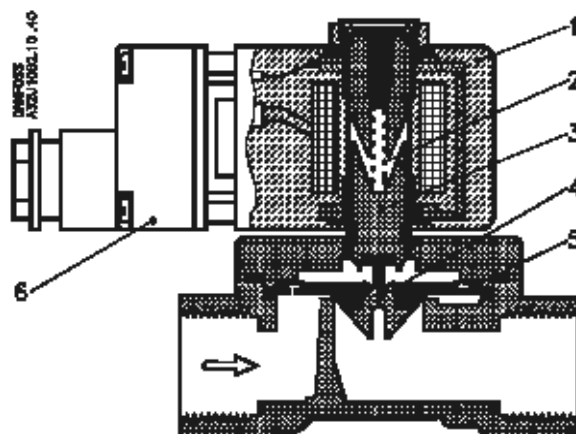
FABRICANTE: DANFOSS

Modelo: EV260B

DESCRIPCIÓN:

Las válvulas proporcionales automáticas de dos vías DANFOSS modelo EV260B son usados para la regulación de caudal en agua, aceite y líquidos neutros similares, la regulación proporcional de la apertura y cierre de las válvulas EV260B se alcanza mediante la regulación progresiva de la corriente de la bobina y de la fuerza de conexión de la bobina.

Cuando aumenta la corriente de la bobina, la fuerza de conexión de ésta (1) excederá en un punto concreto la fuerza equivalente del muelle de cierre (2). La armadura (3) se mueve verticalmente, abriendo el orificio piloto (4) del diafragma (5), el cual debido al efecto servo sigue el movimiento de la armadura. La válvula se abre completamente cuando la corriente de la bobina alcanza su valor máximo. Mediante la regulación progresiva de la corriente de la bobina, la armadura se puede colocar en cualquier posición en el tubo de la armadura y ajustar la válvula a cualquier posición entre completamente cerrada o completamente abierta.



1. Bobina
2. Muelle de cierre
3. Armadura
4. Orificio piloto
5. Diafragma
6. Caja de terminales

VÁLVULA

Características:

- Para agua, aceite y líquidos neutros similares
- Para la regulación progresiva del caudal en plantas industriales.
- Características lineales en el rango de regulación
- Se cierra ante una caída de tensión
- Tensión de 24 VDC
- De 4 a 20 mA estándar o de 0 a 10 V cc para señal de control
- Rango de caudal de agua: 0,5-12,7 m³/h

Datos técnicos de la válvula:

- Rango de presión : 0,5 - 10 bar
- Temperatura ambiente _25 a +50°C
- Temperatura del fluido _10 a +80°C

- Viscosidad Máx. 50 cSt
- Materiales Cuerpo de la válvula: Latón, nº 2.0402
- Armadura: Acero inoxidable, nº 1.4105 / AISI 430 FR
- Tubo de la armadura: Acero inoxidable, nº 1.4306/AISI 304 L
- Muelle: Acero inoxidable, nº 1.4568
- Orificio: Acero inoxidable, nº 1.4305 / AISI 303
- Vástago: Acero inoxidable, nº 1.4105 / AISI 430 FR

BOBINA**Características:**

- Tensión sin generador de señales: 24 V \pm 10%, tensión CA rectificada de onda completa
- Con generador de señales: 21 - 30 V cc
- Señal de control sin generador de señales: 300 - 600 mA
- Con generador de señales: 4 - 20 mA o 0 - 10 V
- Potencia bobina Máx. : 20 W
- Aislamiento del bobinado: 400 KOhm para la señal de control de 0-10 V. 250 Ohm para la señal de control de 4-20 mA.
- Resistencia de la bobina : 23,5 Ohm a una temperatura ambiente de 20°C
- Aislamiento del bobinado: Clase H de conformidad con el IEC 85
- Conexión sin generador de señales: Caja de terminales Pg 13.5
- Con generador de señales: 3 cables núcleo de 2 m, Pg 13.5
- Protección de la bobina, IEC 529 : IP 67
- Temperatura ambiente : -25°C a +50°C
- Régimen de trabajo : Continuo

3. MEDIDOR DE CAUDAL

TIPO: Paleta Rotativa
FABRICANTE: KOBOLD
Modelo: DRG

DESCRIPCIÓN

Los medidores de caudal con paleta rotatoria KOBOLD serie DRG son usados para la medición y el monitoreo de líquidos ligeramente viscosos.

Los medidores de caudal serie DRG trabajan de acuerdo al muy conocido principio de paleta rotatoria. Un magneto acoplado en la paleta y herméticamente sellado del medio transmite sin contacto el movimiento rotatorio a un sensor de Efecto Hall montado en la cubierta. El sensor convierte el movimiento rotatorio, que es proporcional al caudal, en una señal de frecuencia. Una unidad electrónica conectada en serie envía la señal a una salida analógica, a contactos límite o a una pantalla. Los dispositivos se pueden adaptar a las condiciones predominantes de la planta con las conexiones roscadas rotatable 360°.



ESPECIFICACIONES

Rangos de medida: 0.5-12 a 10-140l/min. agua

Precisión de medida: $\pm 3\%$ f. s.

pmax: 40 bar, tmax: 80°C

Material : aluminio bronce ,acero inoxidable, PP

Rango de viscosidad: baja viscosidad

Salida: pulsos, 4-20 mA, indicador LED, Indicador de manecilla

APLICACIONES

- Monitoreo de agua de refrigeración.
- Maquinaria para la agricultura
- Industria de placas de circuitos impresos

DETALLES TÉCNICOS - ELECTRÓNICA

Electrónica compacta

- Indicador: LED de 3-cifras
- Salida analógica: (0)4-20 mA ajustable.
- Salidas de conmutación: 1 (2) semiconductores PNP o NPN configurado en fabrica
- Operación de contacto: contacto NC / NO programable
- Configuración: con 2 botones
- Alimentación: 24 VCD $\pm 20\%$, 3-hilos
- Conexión eléctrica: conector de enchufe M12x1

4. SENSOR DE NIVEL

INTERRUPTOR PLASTICO DE NIVEL

MODELO: NKP

FABRICANTE: KOBOLD

Descripción:

El interruptor de nivel plástico NKP está diseñado para el control económico de líquidos en recipientes. Muchas aplicaciones industriales se pueden realizar con dos versiones plásticas diferentes cada uno con tres diferentes montajes. El interruptor es notable por su diseño libre de mantenimiento, dimensiones pequeñas y contactos reed con alta capacidad de interrupción. El interruptor se monta en la cara del recipiente. Un flotador plástico con bisagras con un imán flota hacia arriba y hacia abajo a través del nivel líquido. El contacto reed encapsulado es manejado por el imán. La función de conmutación (contacto N/A, contacto N/C) es determinada por la posición de la instalación. La función es invertida simplemente rotando el interruptor 180°C.



Aplicaciones

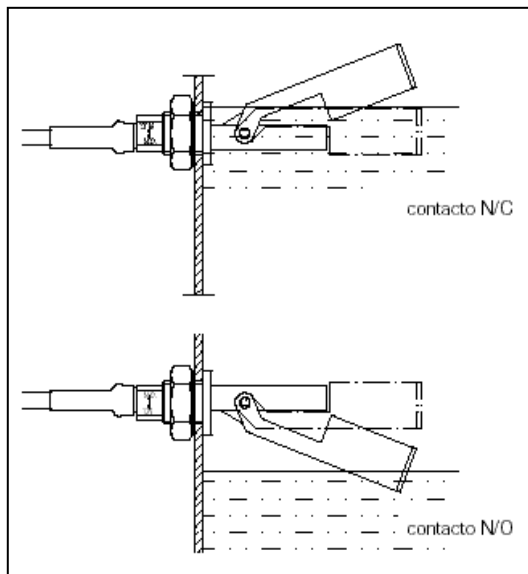
- Lavado de automóviles
- Limpieza de máquinas
- Tanques plásticos
- Refrigeración con Láser

Especificaciones

- Presión : máx. 10 bar
- Temperatura : máx. 100°C
- Conexión : G 1/2 , 1/2" , NPT , M16
- Material : Polipropileno , PVDF

Detalles Técnicos

- Cuerpo del interruptor : polipropileno
- Flotador: polipropileno
- Máx. temperatura: 80°C / 175°F
- Máx. presión: 10 bar / 145 psig
- Posición de instalación: Horizontal ($\pm 30^\circ$ desde el plano horizontal)
- Componentes de cont.: Contacto N/A/contacto N/C (dependiendo de la instalación)
- Conexión eléctrica: Cable trenzado AWG20, 2 núcleos, PVC, 1 m
- Capacidad de contacto: Máx. 250 VAC
- Máx. 50 watt/VA / máx. 1,5 A
- Resistencia de contacto: Máx. 80mOhm
- Fuerza eléctrica mínima: 400 VDC/1 s
- Densidad del medio: >0.6 g/cm.



5. VARIADOR DE VELOCIDAD

FABRICANTE : SHNEIDER ELECTRIC

MODELO : ALTIVAR 12

Funciones:

El Altivar 12 es un convertidor de frecuencia para motores asíncronos trifásicos de jaula para potencias comprendidas entre 0,18 kW y 0.75 kW.

Las principales funciones integradas en el Altivar 12 son :

- Arranque y variación de velocidad.
- Inversión del sentido de giro.
- Aceleración, desaceleración, parada.
- Protecciones del motor y variador.
- Comando 2 hilos/3 hilos.
- 4 velocidades preseleccionadas.
- Guardar la configuración del variador.
- Inyección de corriente continua en la parada.
- Conmutación de rampas.



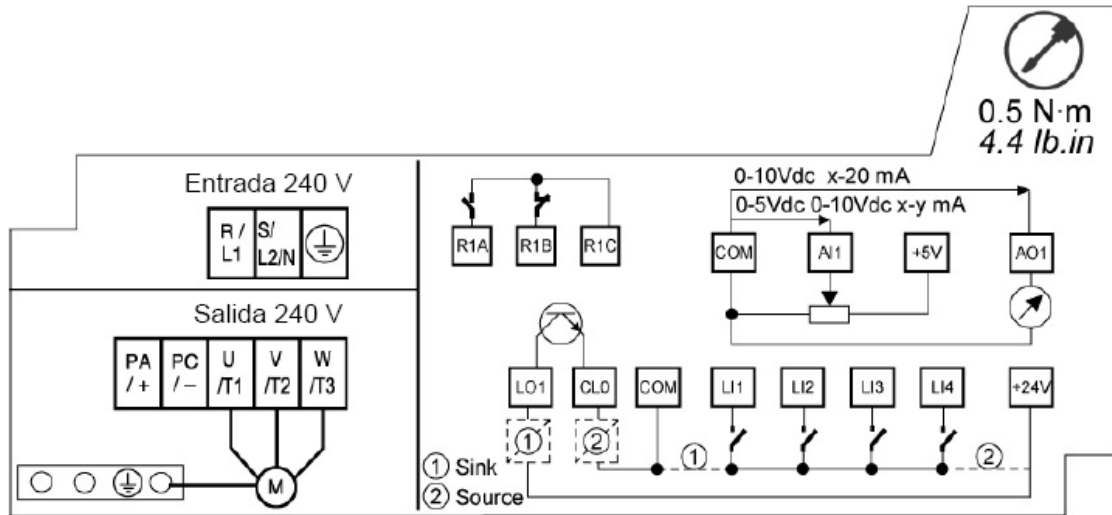
Aplicaciones

- Sistemas de manejo de material.
- Máquinas especiales (mezcladoras, lavadoras, centrifugas,...).
- Ventilación, bombeo, controles de acceso, puertas automáticas.
- Transporte horizontal (pequeños transportes, ...).

Características de los bornes de potencia

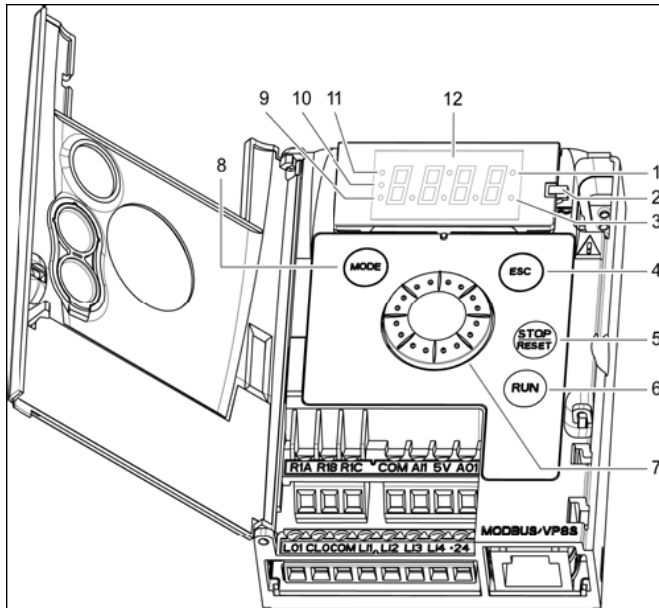
Terminal	Función	Para ATV12
≡	Borna de tierra	Todos los calibres
R/L1 - S/L2/N	Alimentación eléctrica	Monofásica 100...120 V
R/L1 - S/L2/N		Monofásica 200...240 V
R/L1 - S/L2 - T/L3		Trifásica 200...240 V
PA/+	Salida + (CC) hacia el bus CC del módulo de frenado (parte divisible de la rejilla del cableado)	Todos los calibres
PC/-	Salida - (CC) hacia el bus CC del módulo de frenado (parte divisible de la rejilla del cableado)	Todos los calibres
PO	No utilizado	
U/T1 - V/T2 - W/T3	Salidas hacia el motor	Todos los calibres

Borneras de control



R1A	Contacto normalmente abierto (NA) del relé
R1B	Contacto normalmente cerrado (NC) del relé
R1C	Común del relé
COM	Común de las E/S analógicas y lógicas
AI1	Entrada analógica
5 V	Alimentación de +5 V proporcionada por el variador
AO1	Salida analógica
LO1	Salida lógica (colector)
CLO	Común de la salida lógica (emisor)
COM	Común de las E/S analógicas y lógicas
LI1	Entrada lógica
LI2	Entrada lógica
LI3	Entrada lógica
LI4	Entrada lógica
+24V	Alimentación de +24 V proporcionada por el variador
RJ45	Conexión para software SoMove, red Modbus o terminal remoto.

Funciones del visualizador y pulsadores

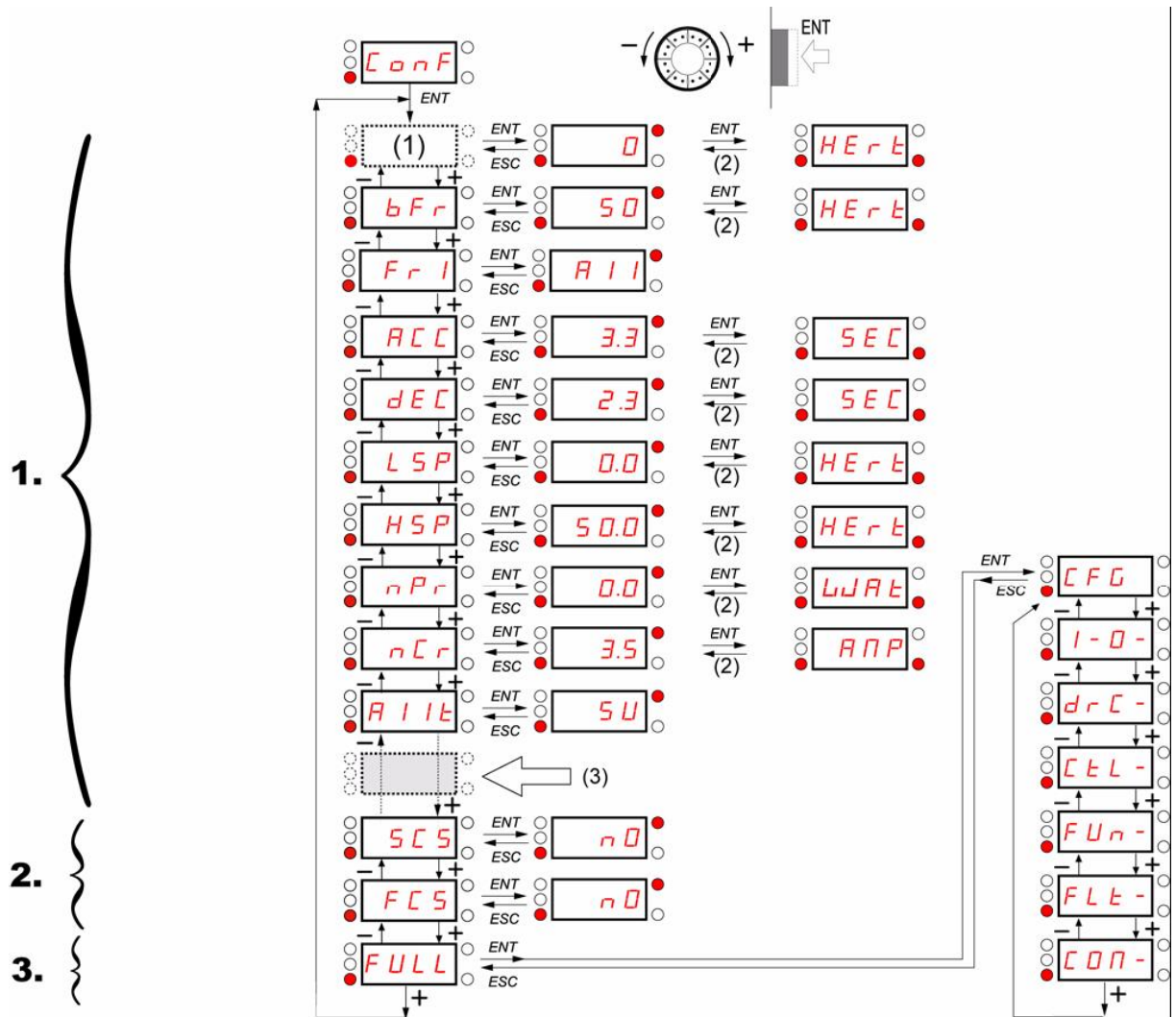


1. LED de valor (a) (b).
2. LED de carga
3. LED de unidad (c)
4. Botón ESC: sale de un menú o parámetro, o cancela el valor mostrado para volver al valor previo de la memoria.
5. Botón STOP/RESET: detiene el motor (puede estar escondido tras una cubierta si la función está desactivada). **Importante:** Consulte las instrucciones sobre la retirada de la cubierta de los botones "RUN/STOP". Se utiliza para rearmar tras un fallo detectado.
6. Botón RUN: pone el dispositivo en funcionamiento si la función está configurada (puede estar escondido tras una cubierta si la función está desactivada).
7. Selector giratorio:
 - Actúa como potenciómetro en modo local.
 - Navegación por las distintas opciones al girarlo hacia la derecha y hacia la izquierda.
 - Selección/validación al pulsarlo. Esta acción se representa mediante este símbolo:
8. Botón MODE: Alternar entre los modos de control y programación. Sólo se puede acceder al botón MODE con la puerta del HMI abierta.
9. LED de modo CONFIGURACIÓN (b)
10. LED de modo SUPERVISIÓN
11. LED de modo REFERENCIA
12. 4 visualizadores de "7 segmentos"

Modo Configuración ConF

El modo Configuración consta de tres partes:

1. Mymenu incluye 11 parámetros de ajuste de fábrica (9 de ellos son visibles de forma predeterminada). Hay un máximo de 25 parámetros disponibles que permiten la personalización mediante el software SoMove.
2. Guardar/cargar conjunto de parámetros: estas dos funciones permiten guardar y cargar ajustes de cliente.
3. FULL: Este menú permite acceder a todos los demás parámetros. Incluye seis submenús:



6. HMI

FABRICANTE: NATIONAL INSTRUMENTS
MODELO: TPC-2106T



ESPECIFICACIONES:

- CPU: Intel XScale PXA 270, 416 MHz.
- VGA: incorporada al CPU.
- DRAM: 64 MB SDRAM incorporada.
- Almacenamiento de memoria: 64 MB NAND FLASH
- Ethernet: Controlador SMSC9115 10/100 Base-T, compatible con protocolo IEEE 802.3u

Eléctricas:

- Voltaje: 18 a 32 VDC
- Máxima corriente: 3.15 A

Mecánicas:

- Dimensiones: 188 x 141 mm.
- Profundidad de instalado: 44.4 mm.

LCD:

- Tipo: Color TFT LCD
- Tamaño: 5.6 pulg.
- Resolución Máxima: 320 x 240 (QVGA)
- Calidad Máxima de Colores: 256K
- Radio Contraste: 400

Pantalla Táctil:

- Tipo: Resistiva
- Resolución: Continua
- Controlador: DMC9000
- Software: Windows CE

Ambientales:

- Temperatura Operación: 0 a 50 °C
- Humedad: 10 a 95%
- Altitud Máxima: 2000 m.s.n.m.

Limpieza de la unidad:

Usar una escobilla suave y no metálica, asegurarse que la unidad este seca y libre de contaminantes antes de regresar al servicio.

Programación del HMI TPC 2106T:

El software de programación utilizado es Labview 2009 con el toolkit para el Touch Panel.

7. PAC

FABRICANTE: NATIONAL INSTRUMENTS

MODELO: COMPACT FIELDPOINT

PAC

Modelo: **cFP-2200**

- Controlador embebido que ejecuta LabVIEW Real-Time para registro de datos, análisis y control de procesos en tiempo real, autónomos y embebidos o interfaz Ethernet para E/S distribuida basada en PC
- Procesador: 400 MHz, 128 MB DRAM
- Memoria: 128 MB no-volátil
- Interfase de red: 10BASE-T y 100BASE-TX Ethernet
- Puerto Serial: 1 puerto serial RS232
- Puerto USB:
 - Tasa max. de transferencia de data: 12 Mb/s
 - Corriente max: 500mA
- Rango de Energía; 11 a 30 VCD
- Temperatura de Operación: -40 a 70 °C
- Temp. de Almacenamiento: -55 a 85 °C
- Humedad de Operación: 10 a 90% RH, no condensado
- Humedad de Almacenamiento: 5 a 95% RH, no condensado
- Altitud Máxima: 2000 m
- Calidad industrial: 50 g shock, 5 g vibración

MÓDULO DE ENTRADA DIGITAL

Modelo: **cFP-DI-300**

01 Unidad

- ocho entradas digitales tipo sinking de 24 VDC
- Operación HotPnP (plug-and-play)
- Rango de operación de -40 a 70 C
- LED indicador de estado on/off por canal

MÓDULO DE RELE

Modelo: **CFP-RLY-423**

01 unidad

- 4 relés electromecánicos, 120 VDC o 250 VAC
- Relés (SPDT) Forma C de un solo polo y doble tiro
- Intercambiable en vivo
- Conecta hasta 1.5 A a 35 VDC o 250 VAC
- Operación HotPnP (plug-and-play)
- Rango de operación de -40 a 60 C
- LED indicador de estado on/off por canal

BLOQUE CONECTOR

Modelo: **CFP-CB-1**

04 unidades

- se monta al plano trasero de los módulos de E/S
- Facilidad de cableado con las terminales con codificación en colores para conexión de voltaje y conexiones comunes.
- Liberación de tensión y ranuras integradas para ataduras de cables
- Se requiere un cFP-CB-1 para cada módulo de E/S Compact FieldPoint

MÓDULO DE ENTRADA Y SALIDA ANALOGICA

Modelo: **cFP-AIO-600**

01 unidad

- 4 canales de entrada analógica para voltaje de hasta ± 36 V o corriente de hasta ± 24 mA
- Rango de actualización de 1.7 kHz
- Protección de entrada de corriente de 100 mA y protección contra corto circuito
- 4 canales de salida de corriente analógica para 0 a 20 o 4 a 20mA
- Resolución de 12 bits
- Rango de operación de -40 a 70 °C



8. GUARDAMOTOR

FABRICANTE: SHNEIDER ELECTRIC
MODELO: GV2ME10

DESCRIPCIÓN

Guardamotor termomagnético con conexión por terminales atornillables con botones pulsadores.

ESPECIFICACIONES:

- Rango de Ajuste para disparo térmico: 4 – 6.3 A
- Corriente de disparo magnético: 78 \pm 20% A

Eléctricas:

- Voltaje de operación: 690 V
- Corriente: 3 A

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS:

- Profundidad: 97 mm
- Altura: 89 mm
- Peso: 0.35 kg
- Ancho: 44.5 mm

9. LLAVE DIFERENCIAL

FABRICANTE: SHNEIDER ELECTRIC
MODELO: ID/RCCB 16234

Eléctricas:

- Voltaje de operación: 240 V
- Corriente Nominal: 0.030 - 25 A

10. LLAVES TERMOMAGNETICAS

FABRICANTE: SHNEIDER ELECTRIC
MODELO: C60H
TIPO: Tripular y Bipolar

Eléctricas:

- Voltaje de operación: 400 V
- Corriente: 16 A

4.4. APÉNDICE B

ECUACIONES DE DISEÑO (SI)

ECUACIONES DE DISEÑO (SI):

DATOS:

1. Caudal de operación : Q (m^3/hr)
2. Presión en 2 puntos : P_1 y P_2 (Kg/m^2)
3. Viscosidad : μ ($kg/m \cdot seg$)
4. Densidad : ρ (Kg/m^3)
5. Diámetro interior de la tubería : D (m)
6. Constante gravitacional : $9,81 \text{ Kg-m/Kgf-}seg^2$

Nota: El agua puede considerarse a temperatura ambiente ($20 \text{ }^\circ C$), y utilizar los siguientes datos:

$$\rho = 998,2 \text{ Kg/m}^3$$

$$\mu = 1,009 \times 10^{-3} \text{ Kg/(m x seg)}$$

CALCULOS:

$$1. \text{ Área de la tubería: } A = \frac{\pi \times D^2}{4}$$

$$2. \text{ Velocidad media del fluido: } \bar{U} = \frac{Q}{A}$$

$$3. \text{ Número de Reynolds: } N_{RE} = \frac{D \times \rho \times \bar{U}}{\mu}$$

$$4. \text{ Asperidad relativa: } \frac{\epsilon}{D} \quad * \epsilon \text{ " se obtiene del apéndice C2}$$

5. Factor de fricción: f , se obtiene del apéndice C7 con los datos de la asperidad relativa y el número de Reynolds.

6. Longitud total: $L_t = L \text{ tubería} + L \text{ accesorios}$

Para determinar la longitud equivalente en accesorios, hay que identificar los codos, tees, nipples, uniones, etc que están dentro del sistema y obtener sus respectivos valores de los apéndices C3 y C4.

$$7. \text{ Pérdidas por fricción: } F = \frac{f \times L_t \times \bar{U}^2}{2g_c \times D}$$

8. Ecuación de Bernoulli:

$$Z_a \frac{g}{g_c} + \frac{\bar{U}_a^2}{2g_c} + \frac{P_a}{\rho} + F = Z_b \frac{g}{g_c} + \frac{\bar{U}_b^2}{2g_c} + \frac{P_b}{\rho} + W \dots \dots \dots (1)$$

9. Potencia de la bomba :
$$P_{teórica} = \frac{Q \times W \times \rho}{factor}$$

factor : 1 Hp = 91.2 Kgf-m/seg

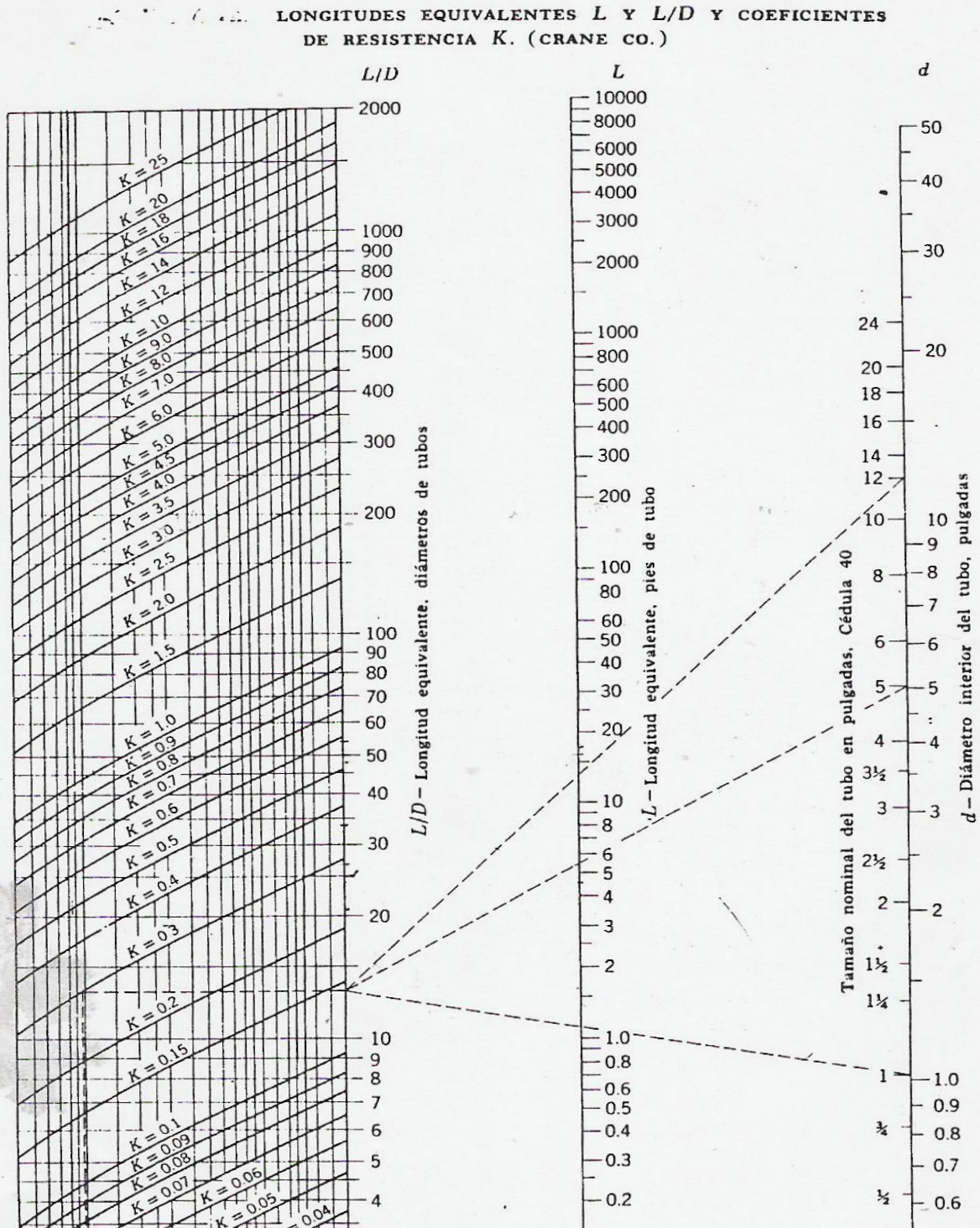
10. Potencia real :
$$P_{real} = P_{teórica} \times \eta$$

η : eficiencia de la bomba.

4.5. APÉNDICE C:

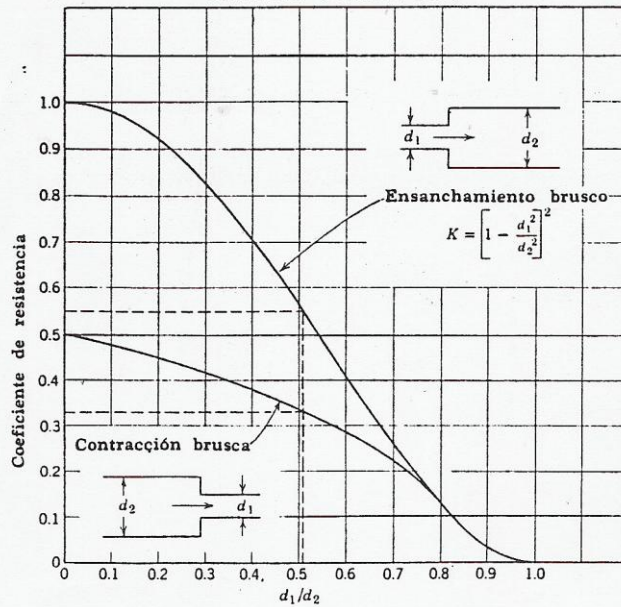
TABLAS DE EMPLEO EN TRANSFERENCIA DE FLUIDOS

4.5.1. APENDICE C1: Longitudes equivalentes de accesorios

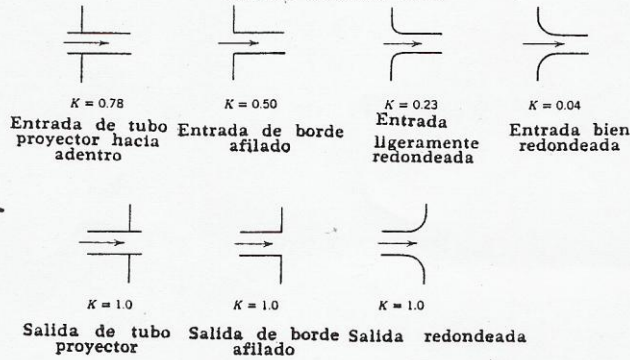


Descripción	Longitud equivalente en diámetros de tubos (L/D)
Conexiones	
Codo normal a 90°	30
Codo normal a 45°	16
Codo de radio largo a 90°	20
Codo para calle a 90°	50
Codo para calle a 45°	26
Codo para esquina cuadrada	57
T normal	
Con flujo a todo lo largo	20
Con flujo a través de la rama	60
Patrón cerrado de tubo de retorno	50

Apéndice C-2b. RESISTENCIA DEBIDA A ENSANCHAMIENTO Y CONTRACCIONES BRUSCAS. (CRANE CO.)

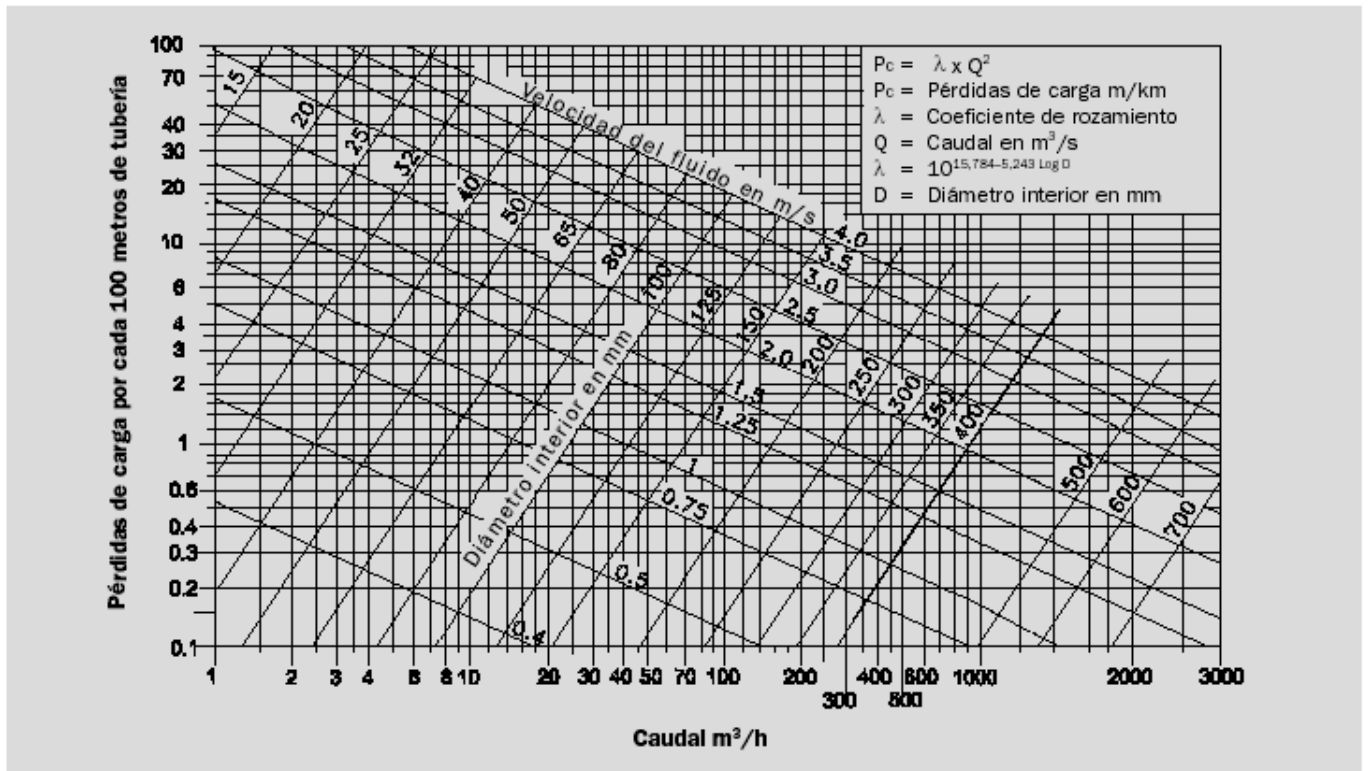


Apéndice C2c. RESISTENCIA DEBIDA A LA ENTRADA Y A LA SALIDA DE LOS TUBOS. (CRANE CO.)



Pérdidas de carga en tubería de hierro fundido

Diagrama para determinar la pérdida de carga y la velocidad del fluido en función del caudal y del diámetro interior de la tubería.



Coeficientes correctores para otras tuberías

PVC	0,6	Fibro-cemento	0,80	Forjada muy usada	2,10
Hierro forjado	0,76	Cemento (paredes lisas)	0,80	Hierro con paredes rugosas	3,60
Acero sin soldadura	0,76	Gres	1,17		

FÓRMULAS PARA EL CÁLCULO DE PÉRDIDAS DE CARGA EN TUBERÍAS

✓ Fórmula general de Darcy-Weisbach: $h_c = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g}$

En función del caudal: $h_c = 0.0826 \cdot f \cdot \frac{Q^2}{D^5} \cdot L$

✓ Hagen-Poiseuille para régimen laminar: $h_c = \frac{32 \cdot \mu \cdot L \cdot v}{\gamma \cdot D^2}$

✓ Coeficiente de fricción (f):

Von Karman: $\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \log \frac{2.51}{Re \cdot \sqrt{f}}$

Colebrook: $\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \log \left(\frac{K/D}{3.71} + \frac{2.51}{Re \cdot \sqrt{f}} \right)$

Nikuradse: $\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \log \frac{K/D}{3.71}$

✓ Blasius (Tuberías de plástico en turbulento liso, PE; $4 \cdot 10^3 < Re < 10^5$):

$$f = \frac{0.316}{Re^{0.25}}$$

$$h_c = \frac{0.0246^{0.25}}{D^{4.75}} \cdot Q^{1.75} \cdot L$$

✓ Cruciani-Margaritora (Tuberías de PE): $J(\%) = \frac{0.099}{D^{4.75}} \cdot Q^{1.75}$

✓ Hazen-Williams (Especialmente para tuberías de fundición y acero)

$$f = \frac{13.69 \cdot g}{c^{1.85} \cdot v^{0.15} \cdot D^{0.17}}$$

c tabulado en el Prontuario

$$h_c = \frac{10.7}{c^{1.85} \cdot D^{4.75}} \cdot Q^{1.85} \cdot L$$

✓ Scobey (Tuberías de aluminio): $h_c = 2.587 \cdot 10^{-3} \cdot K \cdot \frac{v^{1.9}}{D^{1.1}} \cdot L$

✓ Veronesse-Datei (Tuberías de PVC): $J(\%) = \frac{0.092}{D^{4.80}} \cdot Q^{1.80}$

✓ Scimemi (Tuberías de fibrocemento): $Q = 48.3 \cdot D^{2.68} \cdot J^{0.56}$

$$v = 158 \cdot D^{2.68} \cdot J^{0.56}$$

✓ Manning (Turbulento rugoso, $Re > 4000$ y $(Re)_c > 40$): $h_e = \frac{10.3 \cdot n^2}{D^{5.33}} \cdot Q^2 \cdot L$

n , coeficiente de rugosidad de la tubería, tabulado en Prontuario

PÉRDIDAS DE CARGA LOCALIZADAS

$$h_s = K \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad K \text{ tabulado en el Prontuario}$$

FÓRMULAS PARA EL CÁLCULO DEL GOLPE DE ARIETE

✓ Tiempo de parada:

$$T = C + \frac{K \cdot L \cdot v}{g \cdot H_m} \quad (\text{Mendiluce})$$

$$\frac{H_m}{L} < 0.20 \rightarrow c = 1$$

$$\frac{H_m}{L} \geq 40 \rightarrow c = 0$$

$$\frac{H_m}{L} \cong 30 \rightarrow c = 0.6$$

K tabulado en Prontuario

✓ Celeridad:

$$a = \frac{9900}{\sqrt{48.3 + K \cdot \frac{D}{e}}} \quad K, e \text{ en Prontuario}$$

✓ Fórmula de Michaud (cierre lento):

$$\Delta H = \frac{2 \cdot L \cdot v}{g \cdot T}$$

✓ Fórmula de Allievi (cierre rápido):

$$\Delta H = \frac{a \cdot v}{g}$$

✓ Longitud crítica:

$$L_c = \frac{a \cdot T}{2}$$

**COEFICIENTES DE LAS FÓRMULAS DE HAZEN WILLIAMS
PARA VELOCIDAD, CAUDAL Y PÉRDIDAS**

CLASE Y ESTADO DE LA TUBERÍA	K2	K3	K4
Tuberías extremadamente lisas, perfectamente alineadas	1.190	0.935	0.000724
Tuberías muy lisas de hierro fundido nuevas y muy buen estado -concreto lisas y alineadas.	1.105	0.868	0.000831
Tuberías de acero nuevas con flujo en el sentido del traslape- Hierro fundido de 10 años de uso.	0.935	0.734	0.001132
Tuberías de acero nuevas con flujo en contra del traslape - Hierro fundido de 20 años de uso.	0.850	0.668	0.001351
Tuberías en concreto precolado-hierro forjado lisas y bie alineadas	1.020	0.801	0.000963
Tuberías de hierro viejas y en muy malas condiciones- varía entre	0.689 0.510	0.534 0.401	0.002041 0.003399
Tuberías de muy pequeño diámetro, fuertemente incrustadas y en pésimas condiciones.	0.340	0.267	0.007375

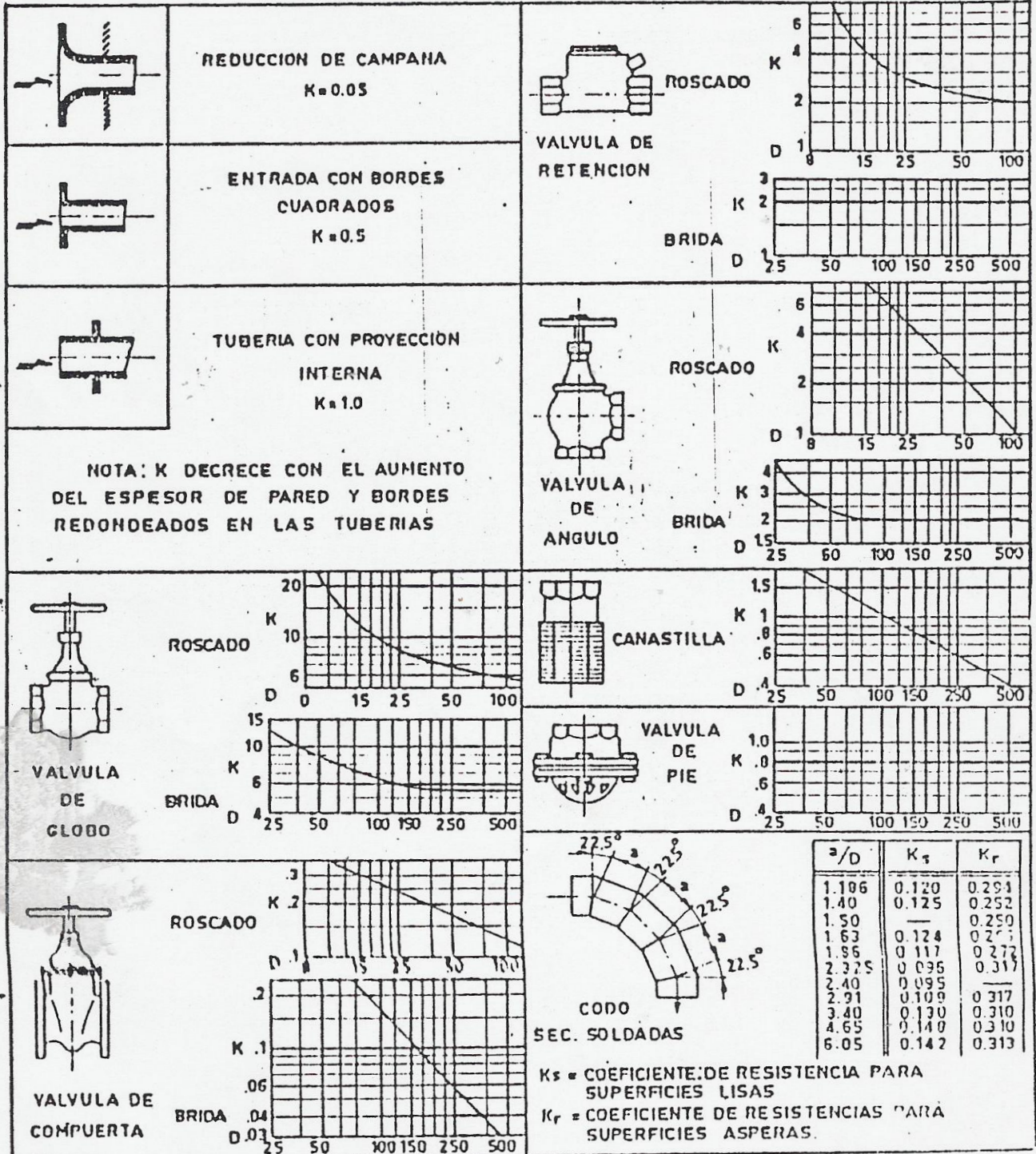
VALORES DE C PARA LA FÓRMULA DE HAZEN-WILLIAMS

TIPO DE TUBERÍA	C
Asbesto cemento	140
Latón	130 - 140
Ladrillo para alcantarillas	100
Hierro colado	
- Nuevo, sin revestir	130
- Viejo, sin revestir	40 - 120
- Revestido de cemento	130 - 150
- Revestido de esmalte bitumástico	140 - 150
- Cubierto de alquitrán	115 -135
De hormigón o revestido de hormigón	
- Cimbras de acero	140
- Cimbras de madera	120
- Centrifugado	135
Cobre	130 - 140
Manguera de incendio (recubierta de hule)	135
Hierro galvanizado	120
Vidrio	140
Plomo	130 - 140
Plástico	140 - 150
Acero	
- Revestido de alquitrán de hulla	145 - 150
- Nuevo, sin revestir	140 - 150
- Remachado	110
Estaño	130

4.5.2. APÉNDICE C2:

COEFICIENTES DE RESISTENCIA PARA VÁLVULAS Y UNIONES

COEFICIENTES DE RESISTENCIA PARA VALVULAS Y UNIONES



D = mm.

$$h = K \frac{v^2}{2g} \text{ METROS DE FLUIDO}$$

4.5.3. APÉNDICE C3:

DENSIDAD DEL AGUA Y PRESIÓN DE VAPOR

Presión de vapor de agua

VAPOR PRESSURES OF PURE SUBSTANCES

UNITS CONVERSIONS

For this subsection, the following units conversions are applicable:

$$^{\circ}\text{F} = \%^{\circ}\text{C} + 32.$$

To convert millimeters of mercury to pounds-force per square inch, multiply by 0.01934.

ADDITIONAL REFERENCES

Additional compilations of vapor-pressure data include Boublik, Fried, and Hala, *The Vapor Pressures of Pure Substances*, Elsevier, Amsterdam, 1984. See also Hirata, Ohe, and Nagahara, *Computer Aided Data Book of Vapor-Liquid Equilibria*, Kodansha/Elsevier, Tokyo, 1975; Weishaupt, *Landolt-Börnstein New Series Group IV*, vol 3; *Thermodynamic Equilibria of Boiling Mixtures*, Springer-Verlag, Berlin, 1975; Wichterle, Linck, and Hala, *Vapor-Liquid Equilibrium Data Bibliography*, Elsevier, Amsterdam, 1973; suppl 1, 1976; suppl 2, 1982.

TABLE 2-3 Vapor Pressure of Water Ice from -15 to 0°C*
mmHg

t, °C	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
-14	1.361	1.348	1.336	1.324	1.312	1.300	1.288	1.276	1.264	1.253
-13	1.400	1.477	1.464	1.450	1.437	1.424	1.411	1.399	1.386	1.373
-12	1.532	1.617	1.602	1.588	1.574	1.560	1.546	1.532	1.518	1.504
-11	1.785	1.769	1.753	1.737	1.722	1.707	1.691	1.675	1.661	1.646
-10	1.950	1.934	1.918	1.899	1.883	1.866	1.849	1.833	1.817	1.800
-9	2.131	2.112	2.093	2.075	2.057	2.039	2.021	2.003	1.985	1.968
-8	2.326	2.306	2.285	2.266	2.246	2.226	2.207	2.187	2.168	2.149
-7	2.537	2.515	2.493	2.472	2.450	2.429	2.408	2.387	2.367	2.346
-6	2.765	2.742	2.718	2.696	2.673	2.649	2.626	2.603	2.581	2.559
-5	3.013	2.987	2.962	2.937	2.912	2.887	2.862	2.838	2.813	2.790
-4	3.280	3.252	3.225	3.198	3.171	3.144	3.117	3.091	3.065	3.039
-3	3.568	3.539	3.509	3.480	3.451	3.422	3.393	3.364	3.335	3.308
-2	3.880	3.848	3.816	3.785	3.753	3.722	3.691	3.660	3.630	3.599
-1	4.217	4.182	4.147	4.113	4.079	4.045	4.012	3.979	3.945	3.913
0	4.579	4.542	4.504	4.467	4.431	4.395	4.359	4.323	4.287	4.252

*For data at 0(0.2)-30(2)-58°C see p. 2324, *Handbook of Chemistry and Physics*, 40th ed., Chemical Rubber Publishing Co.

TABLE 2-4 Vapor Pressure of Liquid Water from -16 to 0°C*
mmHg

t, °C	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
-15	1.495	1.425	1.414	1.402	1.390	1.379	1.368	1.356	1.345	1.334
-14	1.590	1.547	1.534	1.522	1.511	1.497	1.485	1.472	1.460	1.449
-13	1.691	1.678	1.665	1.651	1.637	1.624	1.611	1.599	1.585	1.572
-12	1.824	1.819	1.804	1.790	1.776	1.761	1.748	1.734	1.720	1.705
-11	1.987	1.971	1.955	1.939	1.924	1.909	1.893	1.878	1.863	1.848
-10	2.149	2.134	2.116	2.099	2.084	2.067	2.050	2.034	2.018	2.001
-9	2.326	2.307	2.289	2.271	2.254	2.236	2.219	2.201	2.184	2.167
-8	2.514	2.495	2.475	2.456	2.437	2.418	2.399	2.380	2.362	2.343
-7	2.715	2.695	2.674	2.654	2.633	2.613	2.593	2.572	2.553	2.533
-6	2.931	2.909	2.887	2.866	2.843	2.822	2.800	2.778	2.757	2.736
-5	3.163	3.139	3.115	3.092	3.069	3.046	3.022	3.000	2.976	2.955
-4	3.410	3.384	3.359	3.334	3.309	3.284	3.259	3.235	3.211	3.187
-3	3.673	3.647	3.620	3.593	3.567	3.540	3.514	3.487	3.461	3.436
-2	3.956	3.927	3.898	3.871	3.841	3.813	3.785	3.757	3.730	3.702
-1	4.258	4.227	4.196	4.165	4.135	4.105	4.075	4.045	4.015	3.986
0	4.579	4.546	4.513	4.480	4.448	4.416	4.385	4.353	4.320	4.289

*Computed from the above table with the aid of the thermodynamic equation

$$\log_{10} \frac{p_v}{p_s} = \frac{-1.1489t}{273.1+t} - 1.330 \times 10^{-6}t^2 + 9.084 \times 10^{-8}t^3$$

		mmHg									
t °C	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	
0	4.579	4.613	4.647	4.681	4.715	4.750	4.785	4.820	4.855	4.890	
1	4.905	4.962	4.998	5.034	5.070	5.107	5.144	5.181	5.219	5.256	
2	5.294	5.332	5.370	5.408	5.447	5.486	5.525	5.565	5.605	5.645	
3	5.685	5.725	5.766	5.807	5.848	5.890	5.931	5.973	6.015	6.058	
4	6.101	6.144	6.187	6.230	6.274	6.318	6.363	6.408	6.453	6.498	
5	6.542	6.589	6.635	6.681	6.728	6.775	6.822	6.869	6.917	6.965	
6	7.013	7.062	7.111	7.160	7.209	7.259	7.309	7.359	7.411	7.462	
7	7.513	7.565	7.617	7.669	7.722	7.775	7.828	7.882	7.935	7.990	
8	8.045	8.100	8.155	8.211	8.267	8.323	8.380	8.437	8.494	8.551	
9	8.609	8.668	8.727	8.786	8.845	8.905	8.965	9.025	9.085	9.147	
10	9.209	9.271	9.333	9.395	9.458	9.521	9.585	9.649	9.714	9.779	
11	9.844	9.910	9.976	10.042	10.109	10.176	10.244	10.312	10.380	10.449	
12	10.518	10.588	10.658	10.728	10.799	10.870	10.941	11.012	11.085	11.158	
13	11.231	11.305	11.379	11.453	11.528	11.603	11.678	11.753	11.829	11.904	
14	11.987	12.065	12.144	12.223	12.302	12.382	12.462	12.543	12.624	12.705	
15	12.788	12.870	12.953	13.037	13.121	13.205	13.290	13.375	13.461	13.547	
16	13.634	13.721	13.809	13.898	13.987	14.076	14.166	14.256	14.347	14.438	
17	14.530	14.622	14.715	14.809	14.903	14.997	15.092	15.188	15.284	15.380	
18	15.477	15.575	15.673	15.772	15.871	15.971	16.071	16.171	16.272	16.374	
19	16.477	16.581	16.685	16.789	16.894	16.999	17.105	17.212	17.319	17.427	
20	17.535	17.644	17.753	17.863	17.974	18.085	18.197	18.309	18.422	18.535	
21	18.650	18.765	18.880	18.996	19.113	19.231	19.349	19.468	19.587	19.707	
22	19.827	19.948	20.070	20.193	20.316	20.440	20.565	20.690	20.815	20.941	
23	21.068	21.196	21.324	21.453	21.583	21.714	21.845	21.977	22.110	22.243	
24	22.377	22.512	22.648	22.785	22.922	23.060	23.198	23.337	23.476	23.615	
25	23.755	23.897	24.039	24.182	24.326	24.471	24.617	24.764	24.912	25.060	
26	25.209	25.359	25.509	25.660	25.812	25.964	26.117	26.271	26.425	26.582	
27	26.739	26.897	27.055	27.214	27.374	27.535	27.696	27.858	28.021	28.185	
28	28.349	28.514	28.680	28.847	29.015	29.184	29.354	29.525	29.697	29.870	
29	30.043	30.217	30.392	30.568	30.745	30.923	31.102	31.281	31.461	31.642	
30	31.824	32.007	32.191	32.376	32.561	32.747	32.934	33.122	33.312	33.503	
31	33.685	33.878	34.082	34.276	34.471	34.667	34.864	35.062	35.261	35.462	
32	35.663	35.865	36.068	36.272	36.477	36.683	36.891	37.099	37.308	37.518	
33	37.729	37.942	38.155	38.369	38.584	38.801	39.018	39.237	39.457	39.677	
34	39.808	40.121	40.344	40.569	40.795	41.023	41.251	41.480	41.710	41.942	
35	42.175	42.409	42.644	42.880	43.117	43.355	43.595	43.836	44.078	44.320	
36	44.563	44.808	45.054	45.301	45.549	45.799	46.050	46.302	46.555	46.811	
37	47.067	47.324	47.582	47.841	48.102	48.364	48.627	48.891	49.157	49.424	
38	49.692	49.961	50.231	50.502	50.774	51.048	51.323	51.600	51.879	52.160	
39	52.442	52.725	53.009	53.294	53.580	53.867	54.155	54.445	54.737	55.030	
40	55.324	55.61	55.91	56.21	56.51	56.81	57.11	57.41	57.72	58.03	
41	58.34	58.65	58.96	59.27	59.58	59.90	60.22	60.54	60.86	61.18	
42	61.50	61.82	62.14	62.47	62.80	63.13	63.46	63.79	64.12	64.46	
43	64.80	65.14	65.48	65.82	66.16	66.51	66.86	67.21	67.56	67.91	
44	68.26	68.61	68.97	69.33	69.69	70.05	70.41	70.77	71.14	71.51	
45	71.88	72.25	72.62	72.99	73.36	73.74	74.12	74.50	74.88	75.26	
46	75.55	75.94	76.32	76.72	77.11	77.50	77.89	78.29	78.69	79.09	
47	79.50	80.00	80.41	80.82	81.23	81.64	82.05	82.46	82.87	83.29	
48	83.71	84.13	84.55	84.98	85.42	85.85	86.28	86.71	87.14	87.58	
49	88.02	88.46	88.90	89.34	89.79	90.24	90.69	91.14	91.59	92.05	
t °C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
50	92.51	97.20	102.09	107.20	112.51	118.04	123.80	129.82	136.08	142.60	
60	149.58	156.42	163.77	171.28	179.21	187.54	196.09	204.96	214.17	223.73	
70	233.7	243.9	254.6	265.7	277.2	289.1	301.4	314.1	327.3	341.0	
80	355.1	369.7	384.9	400.6	416.8	433.5	450.9	468.7	487.1	506.1	
90	525.76	527.76	529.77	531.78	533.80	535.82	537.86	539.90	541.95	544.00	
91	545.05	548.11	550.18	552.25	554.35	556.44	558.53	560.64	562.75	564.87	
92	565.09	569.12	573.16	577.20	581.25	585.35	589.41	593.49	597.58	601.68	
93	588.50	593.80	599.10	604.41	609.72	615.03	620.34	625.65	630.96	636.27	
94	610.50	613.17	615.84	617.72	620.01	622.31	624.61	626.92	629.24	631.57	
95	623.50	625.24	628.59	630.94	633.29	635.65	638.01	640.37	642.74	645.12	
96	657.52	660.02	662.45	664.88	667.31	669.75	672.20	674.65	677.12	679.59	
97	682.07	684.55	687.04	689.54	692.05	694.57	697.10	699.63	702.17	704.71	
98	707.27	709.83	712.40	714.98	717.56	720.15	722.75	725.36	727.98	730.61	
99	733.24	735.88	738.53	741.18	743.85	746.52	749.20	751.89	754.58	757.29	
100	760.00	762.72	765.45	768.19	770.93	773.68	776.44	779.22	782.00	784.78	
101	787.57	790.37	793.18	795.99	798.82	801.65	804.50	807.35	810.21	813.06	

Densidad (Kg./m³) de Agua desde 0 hasta 100 °C

4.5.4. APÉNDICE C4:
FACTOR DE FRICCIÓN

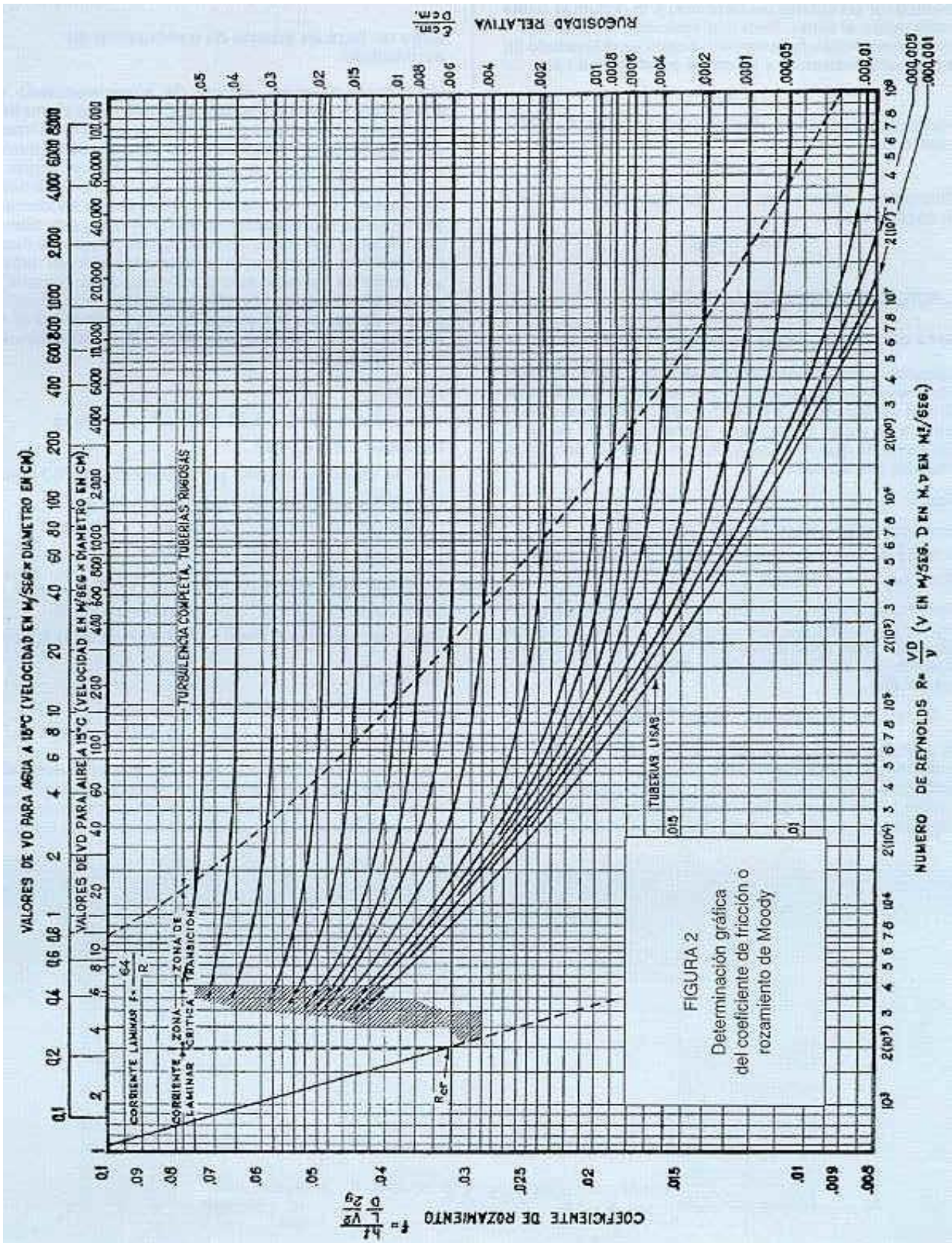


FIGURA 2
Determinación gráfica del coeficiente de fricción o rozamiento de Moody

4.6. APÉNDICE D

PREGUNTAS FRECUENTES

¿Cuál es la diferencia entre cabeza (H) y presión?

La cabeza no es equivalente a la presión. La cabeza es un término que tiene unidades de longitud (metros, pie, etc). En la ecuación de Bernoulli cada uno de los términos es un término de cabeza:

h : cabeza de elevación

p/γ : cabeza de presión.

$v^2/2g_c$: cabeza de velocidad.

La cabeza o carga es igual a la energía específica con unidades: lbf-pie/lbf (S. Inglés). De esta manera la cabeza de elevación es la energía potencial específica, la cabeza de presión, la energía de presión específica y la cabeza de velocidad es la energía cinética específica ("específico" significa por unidad de peso).

$$h + \frac{P}{\gamma} + \frac{v^2}{2g_c} = E = cte$$

Entonces, ¿Cuál es la diferencia? : Cabeza es energía por unidad de masa mientras que la presión es una fuerza por unidad de área.

¿Cómo puede la misma bomba satisfacer diferentes requerimientos de caudal para un mismo sistema?

Si una bomba es dimensionada para un flujo y carga mayor que la requerida para las condiciones presentes, entonces una válvula manual a la salida de la bomba puede ser usada para regular el flujo a los requerimientos actuales. De esta manera, posteriormente el flujo puede ser incrementado simplemente abriendo una válvula. Esto sin embargo ocasiona pérdidas de energía por lo que un variador de velocidad debe ser considerado.

¿Qué información es requerida para determinar la cabeza total de una bomba?

El caudal de circulación a través del sistema.

Los parámetros físicos del sistema: longitud y diámetro de tubería, tipo de conexiones y accesorios, etc.

Equipos en el sistema: válvulas de control, filtros, etc.

Propiedades del fluido: temperatura, viscosidad y gravedad específica.

¿Qué es el NPSH?

La carga de succión neta positiva (NPSH: net positive suction head) es la carga en la pestaña de succión de la bomba menos la presión de vapor convertida a altura de columna de fluido. El NPSH es siempre positivo, debido a que es expresado en términos de altura de columna de fluido absoluto. El término "neto" se refiere a la cabeza actual en la pestaña de succión de la bomba y no a la cabeza estática. El NPSH es independiente de la densidad del fluido así como todos los términos de cabeza.

¿Cuál es la diferencia entre el NPSH disponible y el NPSH requerido?

El NPSH disponible puede ser calculado para una situación específica y depende de la presión atmosférica, la pérdida por fricción entre la entrada del sistema y la pestaña de succión, etc. El NPSH requerido es entregada por el fabricante y depende de la cabeza, flujo y tipo de bomba. El NPSH disponible debe ser siempre mayor que el NPSH requerido por la bomba para que funcione apropiadamente.

¿Cuál es el propósito de instalar un variador de velocidad?

Todos los sistemas requieren un control de flujo. Los requerimientos de salida de una planta pueden cambiar causando una variación en la demanda de flujo y de esta manera los sistemas dentro del proceso deben estar dispuestos a modificar su flujo de salida. Para lograr esto, las bombas son dimensionadas para el máximo caudal anticipado. Una manera frecuente para reducir el flujo de salida es teniendo líneas de recirculación, otro método es tener una válvula en la línea de descarga lo cual reduce el flujo de salida cuando es regulada. Aunque estos métodos trabajen bien, hay un consumo extra de energía por funcionar un sistema que esta sobredimensionado para la demanda de flujo normal. Una solución a este gasto de energía es usando un variador de velocidad. Para una nueva instalación esta alternativa debería ser considerada, esto provee el mismo control de flujo como un sistema con válvulas sin derroche de energía.

¿Cómo trabaja un variador de velocidad?

La cabeza y el flujo producido por una bomba es el resultado de una fuerza centrífuga impartido al fluido por el rodete. La fuerza centrífuga es directamente proporcional al diámetro del rodete y a la velocidad de rotación. Nosotros podemos afectar la fuerza centrífuga si cambiamos el diámetro del rodete, lo cual es difícil, o variando la velocidad del rodete lo cual es posible si usamos un variador de velocidad. La familia de curvas de funcionamiento mostradas en los distintos diagramas de bombas corresponde a una velocidad constante con varios tamaños de rodete; si nosotros mantenemos constante el tamaño del rodete y variamos la velocidad de la bomba, un conjunto de curvas para diferentes velocidades es obtenido. De esta manera cuando un variador de velocidad es usado, solamente el flujo y la cabeza de la bomba requerida es producida resultando en un apropiado consumo de energía.

¿Cuál es el mejor punto de eficiencia (B.E.P)?

El B.E.P (Best efficiency point) es el punto de más alta eficiencia de la bomba. Todos lo puntos a la derecha o izquierda del BEP tienen una baja eficiencia, el rodete está sujeto a fuerzas no simétricas cuando opera fuera del BEP. Estas fuerzas se manifiestan como vibración dependiendo de la velocidad y construcción de la bomba. El área más estable es cerca o en el mismo BEP.

Un sistema sin bomba, ¿tiene una cabeza total?

No, la cabeza o carga total es un término usado solamente para una bomba.

¿Qué es el número de Reynolds?

El número de Reynolds es un número no – dimensional, que combina 2 características importantes del fluido (viscosidad y densidad) además de 2 características del sistema (el diámetro y la velocidad). Uno de los muchos usos de este número es para establecer si el flujo es laminar o turbulento.

$N_{RE} < 2400$ Flujo laminar

$N_{RE} > 4000$ Flujo turbulento

El número de Reynolds es inversamente proporcional a la viscosidad cinemática y proporcional a la velocidad promedio y al diámetro interior de tubería. La viscosidad cinemática (ν) es la razón entre la viscosidad absoluta y la densidad de fluido.

$$N_{RE} = \frac{D \times \bar{U} \times \rho}{\mu} = \frac{D \times \bar{U}}{\nu}$$

4.7. APÉNDICE E

DESCRIPCIÓN DEL PROTOCOLO DE COMUNICACIONES

Ethernet conmutadas ofrecen a los usuarios en la industria. El empleo del protocolo abierto Modbus con TCP proporciona una solución para la gestión desde unos pocos a decenas de miles de nodos.

Prestaciones de un sistema MODBUS TCP/IP

Las prestaciones dependen básicamente de la red y el hardware. Si se usa MODBUS® TCP/IP sobre Internet, las prestaciones serán las correspondientes a tiempos de respuesta en Internet, que no siempre serán las deseables para un sistema de control. Sin embargo pueden ser suficientes para la comunicación destinada a depuración y mantenimiento, evitando así desplazamientos al lugar de la instalación.

Si disponemos de una Intranet de altas prestaciones con conmutadores Ethernet de alta velocidad, la situación es totalmente diferente.

En teoría, MODBUS® TCP/IP, transporta datos hasta $250/(250+70+70)$ o alrededor de un 60% de eficiencia cuando se transfieren registros en bloque, y puesto que 10 Base T proporciona unos 1.25 Mbps de datos, la velocidad de transferencia de información útil será:
 $1.25M / 2 * 60\% = 360000$ registros por Segundo

En 100BaseT la velocidad es 10 veces mayor.

Esto suponiendo que se están empleando dispositivos que pueden dar servicio en la red Ethernet aprovechando todo el ancho de banda disponible.

En los ensayos prácticos realizados por by Schneider Automation utilizando un PLC Ethernet Momentum™ con entradas/salidas Ethernet, demostró que se podían escanear hasta 4000 bloques I/O por segundo, cada uno con hasta 16 I/O analógicas de 12-bits o 32 I/O digitales (se pueden actualizar 4 bases por milisegundo). Aunque estos resultados están por debajo del límite teórico calculado anteriormente, pero debemos recordar que el dispositivo se probó con una CPU de baja velocidad (80186 a 50MHz con 3 MIPS).

Además, el abaratamiento de los ordenadores personales y el desarrollo de redes Ethernet cada vez más rápidas, permite elevar las velocidades de funcionamiento, a diferencia de otros buses que están inherentemente limitados a una sola velocidad.

¿Cómo podemos comunicar dispositivos MODBUS existentes sobre MODBUS TCP/IP?

Puesto que MODBUS® TCP/IP es simplemente un protocolo MODBUS® encapsulado en TCP, es muy sencillo comunicar dispositivos MODBUS® existentes sobre MODBUS® TCP/IP. Para ello se requiere una pasarela que convierta el protocolo MODBUS a MODBUS TCP/IP.

4.8. APÉNDICE F

DESCRIPCIÓN DEL ALGORITMO PID DEL PLC

CONTROLADORES

En un lazo de control cerrado, el controlador es el dispositivo que compara el valor medido (valor actual) con el valor deseado y a continuación calcula y emite una variable manipulada. La sección anterior mostraba que los sistemas controlados pueden tener respuestas muy diferentes. Hay sistemas que responden rápidamente, sistemas que responden muy lentamente y sistemas con propiedades de almacenamiento.

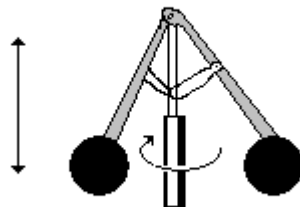
Para cada uno de estos sistemas controlados, los cambios en la variable manipulada y , deben realizarse de forma diferente. Por esta razón hay varios tipos de controladores, cada uno con su propia respuesta.

Respuesta al control

La respuesta al control es la forma en la que el controlador deduce la variable manipulada a partir de la desviación del sistema. Hay dos categorías muy amplias: controladores de acción continua y controladores de acción discontinua.

Controlador de acción Continua

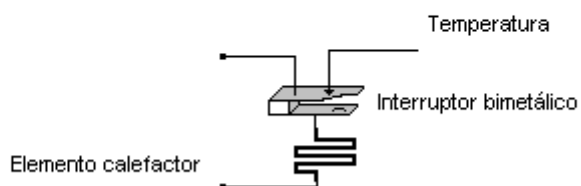
La variable manipulada de un controlador de acción discontinua, cambia continuamente según la desviación del sistema. Los controladores de este tipo dan el valor de la desviación del sistema como una señal de actuación directa para el elemento de manipulación. Uno de este tipo es el controlador centrífugo. Cambia su momento de inercia dependiendo de la velocidad y con ello, tiene una influencia directa sobre la velocidad.



Controlador por acción continua

La variable manipulada en un controlador de acción discontinua sólo puede modificarse en pasos establecidos. El más conocido de los controladores de acción discontinua es el controlador de dos puntos, que sólo puede asumir las condiciones "encendido" o "apagado".

Un ejemplo es el termostato de una plancha. Deja circular o interrumpe la corriente eléctrica para el elemento de calentamiento, según sea la temperatura.



Esta sección trata solamente con los controladores de acción continua ya que estos se utilizan más frecuentemente en la tecnología de la automatización. Además, los fundamentos de la tecnología de control en lazo cerrado pueden explicarse mejor utilizando el controlador de acción continua como ejemplo.

Respuesta temporal de un controlador

Cada sistema controlado tiene su propio tiempo de respuesta. Este tiempo de respuesta depende del diseño de la máquina o sistema y no puede ser influido por el ingeniero de control. La respuesta temporal del sistema controlado debe establecerse experimentalmente o por análisis teóricos. El controlador es también un sistema y tiene su propio tiempo de respuesta. Para alcanzar unas buenas prestaciones del control, el ingeniero de control debe especificar esta respuesta temporal.

La respuesta temporal de un controlador de acción continua es determinada por tres componentes:

Componente proporcional (componente P)

Componente integral (componente I)

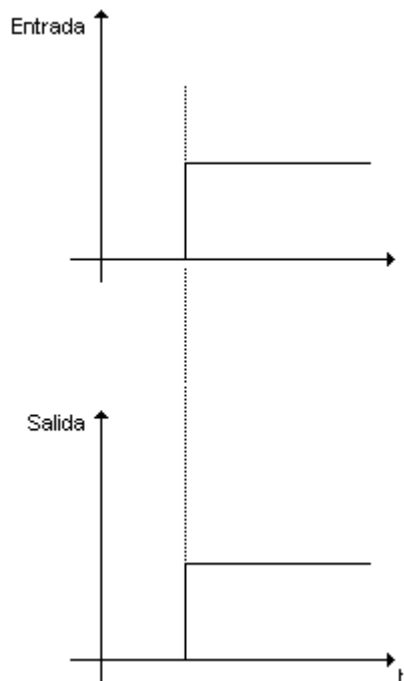
Componente diferencial (componente D)

Las designaciones citadas indican como se calcula la variable manipulada a partir de la desviación del sistema.

Controlador Proporcional

En el controlador proporcional, la salida de la variable manipulada es proporcional a la desviación del sistema.

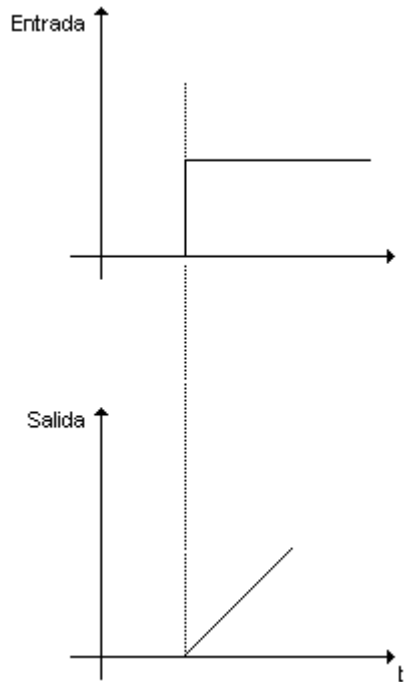
Si la desviación del sistema es grande, el valor de la variable manipulada es grande. Si la desviación del sistema es pequeña, el valor de la variable manipulada es pequeño. Ya que la variable manipulada es proporcional a la desviación del sistema, la variable manipulada sólo está presente si hay una desviación en el sistema. Por esta razón, un controlador proporcional sólo, no puede alcanzar una desviación del sistema de cero. En este caso no estará presente la variable manipulada y por lo tanto no habría control.



Controlador de acción integral

Un controlador de acción integral añade la desviación del sistema respecto al tiempo, es decir, está integrando.

Por ejemplo, si en un sistema hay una desviación constante, el valor de la variable manipulada sigue incrementándose, ya que depende de la suma respecto al tiempo. Sin embargo, a medida que el valor de la variable manipulada sigue creciendo, la desviación del sistema decrece. Este proceso continua hasta que la desviación del sistema es cero. Por ello, para evitar desviaciones permanentes del sistema se utilizan controladores de acción integral o componentes integrales en los controladores.



Controlador de acción Derivativa

El componente diferencial evalúa la velocidad con que se produce la desviación del sistema. A esto se le llama también diferenciación de la desviación del sistema. Si la desviación del sistema cambia rápidamente, la variable manipulada es grande. Si la desviación del sistema cambia lentamente, el valor de la variable manipulada, es pequeño. Un controlador con sólo un componente D no tendría sentido, ya que la variable manipulada solamente estaría presente durante un cambio en la desviación del sistema.

Un controlador puede consistir en un solo componente, por ejemplo, un controlador P o un controlador I. Un controlador también puede ser una combinación de varios componentes la forma más común de un controlador de acción continua es un controlador PID.

DETALLES TÉCNICOS DE LOS CONTROLADORES

En la tecnología de automatización, los controladores son casi exclusivamente eléctricos o electrónicos. Aunque en algunos libros de texto se muestran controladores mecánicos y neumáticos, raramente se hallan en los sistemas industriales modernos.

Los controladores eléctricos y electrónicos trabajan con señales de entrada y salida eléctricas. Los transductores son sensores que convierten las variables físicas en tensión o corriente. Los elementos de manipulación y elementos motrices funcionan por salidas de corriente o de tensión. Teóricamente no hay límite en el margen de estas señales. En la práctica, sin embargo se han establecido márgenes estándar para las señales de los controladores.

Por tensión	0....10V	-10.....+10V
Por corriente	0....20 mA	4.....20 mA

El procesamiento interno de las señales en el controlador es o bien analógico con circuitos amplificadores operacionales o digital con sistemas de microprocesadores.

En los circuitos con amplificadores operacionales, las tensiones y corrientes se procesan directamente en los módulos apropiados.

En el procesamiento digital, las señales analógicas son primero convertidas en señales digitales. Después del cálculo de la variable manipulada en el microprocesador, el valor digital es de nuevo convertido en un valor analógico.

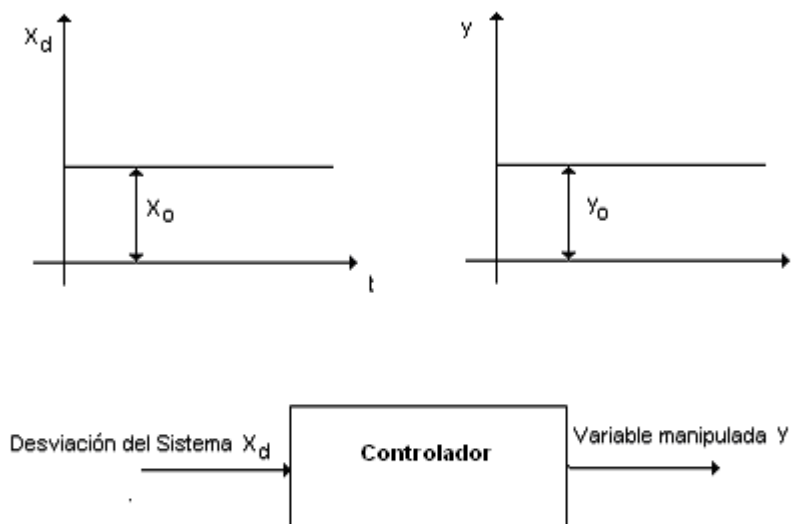
Aunque teóricamente estos dos tipos de procesamiento tienen que tratarse de forma muy diferente, en la práctica no hay diferencia con los controladores clásicos.

MODO DE FUNCIONAMIENTO DE LOS DIFERENTES TIPOS DE CONTROLADOR

Esta sección explica la respuesta al control de varios tipos de controlador y el significado de sus parámetros. Como en la explicación de los sistemas controlados, para esta descripción se utiliza la respuesta a un escalón. La variable de entrada al controlador es la desviación del sistema es decir la diferencia entre el valor deseado y el valor real de la variable controlada.

El controlador Proporcional

En el caso del controlador proporcional, la señal de accionamiento es proporcional a la desviación del sistema. Si la desviación del sistema es grande, el valor de la variable manipulada es grande. Si la desviación del sistema es pequeña, el valor de la variable manipulada es pequeño. La respuesta temporal del controlador P en estado ideal, es exactamente la misma que la variable de entrada.



Respuesta temporal de un controlador P

La relación entre la variable manipulada y la desviación del sistema es el coeficiente proporcional o la ganancia proporcional. Estas se designan por x_p , k_p o similares. Estos valores pueden establecerse en un controlador P. Determinan cómo se calcula la variable manipulada a partir de la desviación del sistema. La ganancia proporcional se calcula como:

$$K_p = y_0/x_0$$

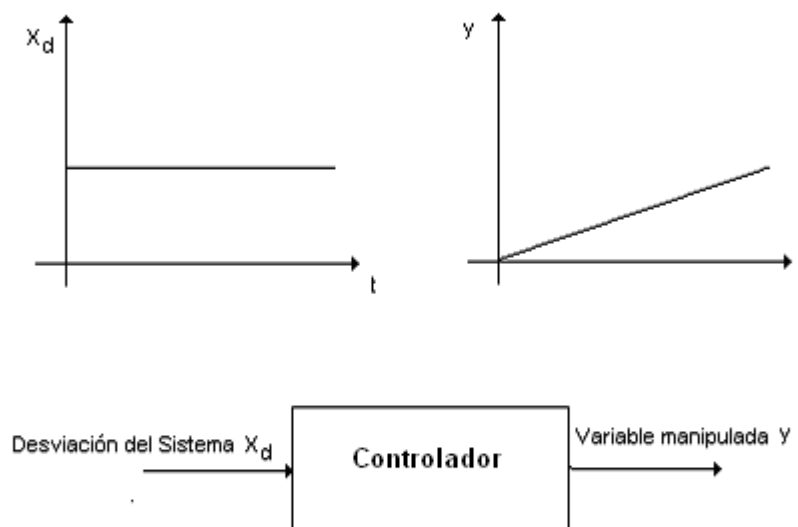
Si la ganancia proporcional es demasiado elevada, el controlador provocará grandes cambios en el elemento manipulador ante ligeras desviaciones de la variable controlada. Si la ganancia proporcional es demasiado pequeña, la respuesta del controlador será demasiado débil lo cual producirá un control no satisfactorio.

Un escalón en la desviación del sistema provocará también un escalón en la variable de salida. El tamaño de este escalón depende de la ganancia proporcional. En la práctica, los controladores a menudo tienen un tiempo de respuesta, es decir, el cambio en la variable manipulada no se realiza hasta transcurrido un cierto tiempo después del cambio en la desviación del sistema. En controladores eléctricos, este retardo del tiempo normalmente puede ajustarse.

Una propiedad importante del controlador P es que como resultado de la rígida relación entre la desviación del sistema y la variable manipulada, siempre queda alguna desviación del sistema. El controlador P no puede compensar esta desviación remanente del sistema.

El controlador I

El controlador integral añade a la desviación del sistema respecto al tiempo. Integra la desviación del sistema. Como resultado, la velocidad de cambio (y no su valor) de la variable manipulada es proporcional a la desviación del sistema. Esto se demuestra por la respuesta a un escalón del controlador I : si la desviación del sistema aumenta repentinamente, la variable manipulada aumenta continuamente. Cuanto mayor sea la desviación del sistema, tanto mayor es el incremento en la variable manipulada.



Respuesta temporal de un controlador I

Por esta razón, el controlador I no es adecuado para una compensación total de la desviación remanente del sistema. Si la desviación del sistema es grande, la variable manipulada cambia rápidamente. Como resultado, la desviación del sistema se vuelve más pequeña y la variable manipulada cambia más lentamente hasta alcanzar el equilibrio.

No obstante, un puro controlador I es inadecuado para muchos sistemas controlados, ya que, o bien causa oscilaciones del lazo cerrado o responde con demasiada lentitud a las desviaciones del sistema, en aquellos sistemas con tiempo de respuesta largos. En la práctica raramente se utilizan controladores I puros.

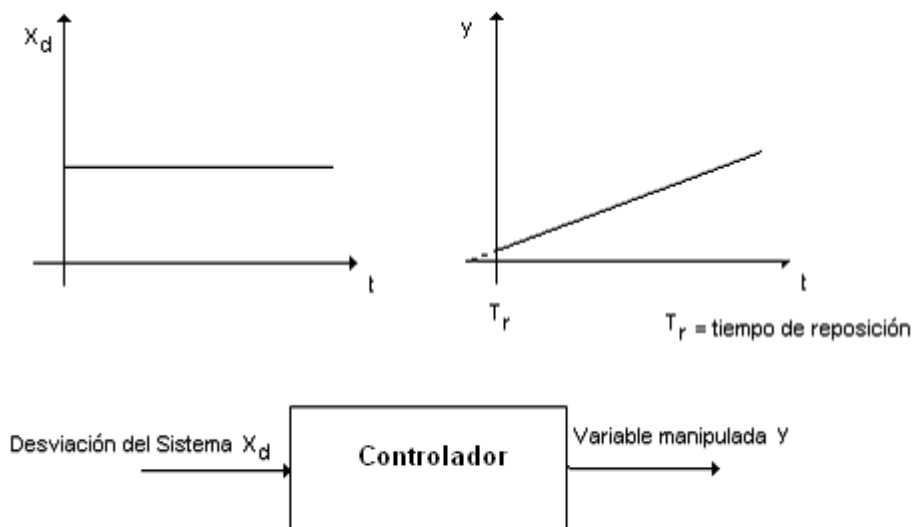
El controlador PI

El controlador PI es una combinación del comportamiento del controlador P y del controlador I. Esto permite combinar las ventajas de ambos tipos de controlador: rápida reacción y compensación de la desviación remanente del sistema. Por esta razón, el controlador PI puede utilizarse para un gran número de sistemas. Además de la ganancia proporcional, el controlador PI tiene un valor característico adicional que indica el comportamiento del componente I: el tiempo de reposición (tiempo de acción integral).

Tiempo de reposición

El tiempo de reposición es una medida de la rapidez con la que el controlador repone la variable manipulada (además de la variable manipulada generada por el componente P)

Para compensar una desviación remanente del sistema. En otras palabras: el tiempo de reposición es el periodo por el cual el controlador PI es más rápido que el puro controlador I. El comportamiento se muestra por la curva del tiempo de respuesta del controlador PI.



Respuesta temporal del Controlador PI

El tiempo de reposición es función de la ganancia proporcional k_p ya que la velocidad de cambio de la variable manipulada es más rápida para una mayor ganancia. En el caso de un tiempo de reposición largo, el efecto de la componente integral es pequeño, ya que la suma de la desviación del sistema es lenta. El efecto del componente integral es grande si el tiempo de reposición es corto.

La efectividad del controlador PI aumenta con el aumento de la ganancia k_p y aumenta en el componente I (es decir, disminuye en tiempo de reposición). Sin embargo si estos dos valores son demasiado extremos, la intervención del controlador es demasiado brusca y todo el lazo de control empieza a oscilar. Entonces la respuesta no es estable. El punto en que la oscilación empieza es diferente para cada sistema controlado y debe ser determinado durante la puesta a punto.

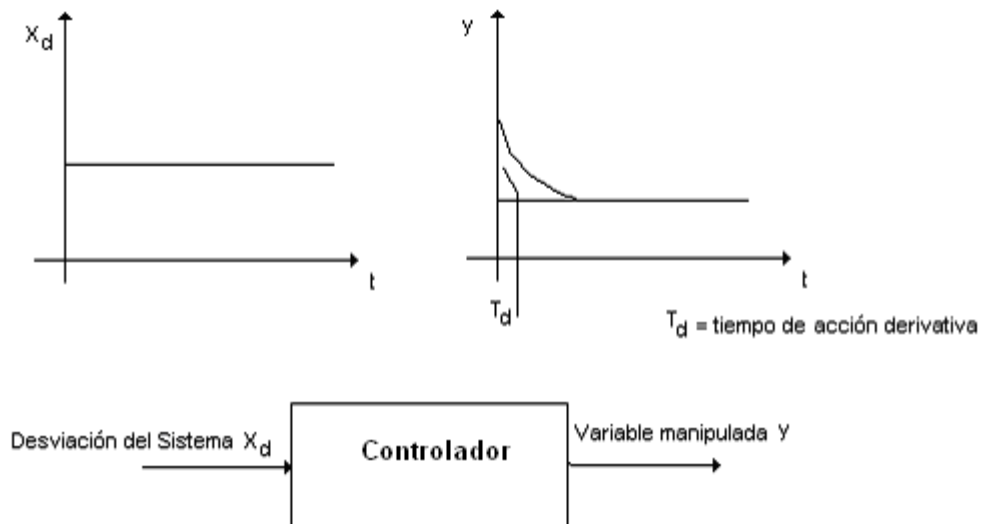
El controlador PD

El controlador PD consiste en una combinación de acción proporcional y acción diferencial. La acción diferencial describe la velocidad de cambio de la desviación del sistema.

Cuanto mayor sea esta velocidad de cambio es decir, la amplitud de la desviación del sistema en un determinado periodo de tiempo, mayor será el componente diferencial. Además de la respuesta del controlador al puro control P, las grandes desviaciones del sistema se encuentran con respuestas muy cortas, pero grande. Esto se expresa con el tiempo de acción derivativa (rate time).

Tiempo de acción derivativa

El tiempo de acción derivativa T_d es una medida de que tan rápido compensa un controlador PD un cambio en la variable controlada, en relación con un controlador P puro. Un salto en la variable manipulada compensa una gran parte de la desviación del sistema antes de que un puro controlador P hubiera alcanzado este valor. Por lo tanto, el componente P aparece para responder más pronto por un periodo igual al tiempo de acción derivativa.



Respuesta temporal del Controlador PD

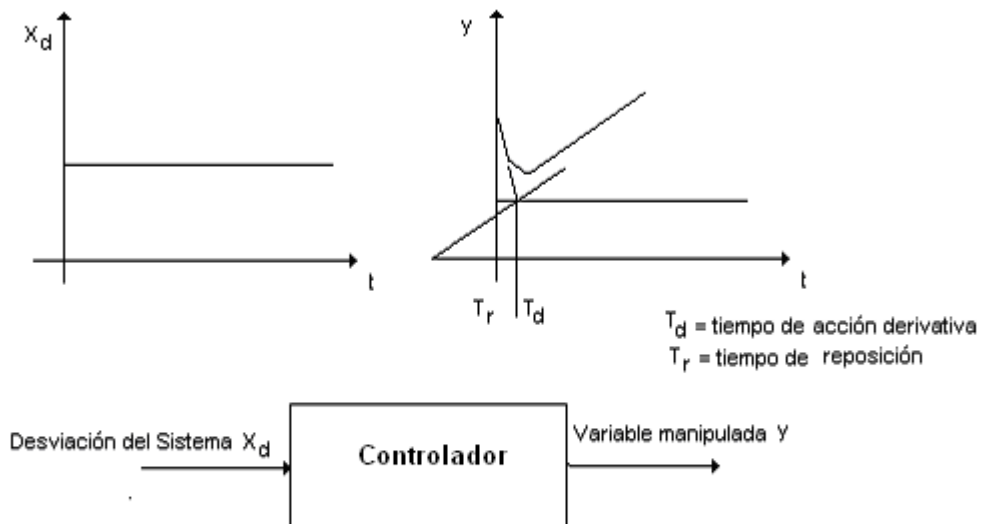
En el controlador PD, raramente se utiliza, hay dos desventajas. Primeramente, no puede compensar completamente las desviaciones remanentes del sistema. En segundo lugar, un componente D ligeramente excesivo, lleva rápidamente a la inestabilidad del lazo de control. Entonces el sistema controlado tiende a oscilar.

El Controlador PID

Además de las propiedades del controlador PI, el controlador PID se complementa con el componente D. Esto tiene en cuenta la velocidad de cambio en la desviación del sistema.

Si la desviación del sistema es grande, el componente D asegura un cambio momentáneo extremadamente elevado en la variable manipulada. Mientras la influencia de la componente D cae inmediatamente, la influencia de la componente I aumenta lentamente. Si el cambio en la desviación del sistema es ligero, el comportamiento del componente D es despreciable.

Este comportamiento tiene la ventaja de una respuesta más rápida y una inmediata compensación de la desviación del sistema en el caso de cambio o variables perturbadoras. La desventaja es que el lazo de control es mucho más propenso a oscilar y que por lo tanto los ajustes son más difíciles de realizar.



Respuesta temporal del Controlador PID

Tiempo de acción Derivativa

Como resultado del componente D, este tipo de controlador es más rápido que un controlador P o un controlador PI. Esto se manifiesta en el tiempo de acción derivativa T_d . El tiempo de acción derivativa es el periodo en el cual un controlador PID es más rápido que un controlador PI.

ALGORITMO PID

En estado estacionario, un regulador PID varía el valor de su salida para llevar a cero el error de regulación (E). EL error es la diferencia entre el valor de consigna (SP) (el punto de trabajo deseado) y la variable de proceso (PV) (el punto de trabajo real). El principio de una regulación PID se basa en la ecuación que se indica a continuación y que expresa la salida $M(t)$ como una función de un término proporcional, uno integral y uno diferencial:

$$M(t) = K_c [(E) + 1/T_i \int (E) dt + T_D \cdot d(PV)/dt + \text{bias}]$$

Donde :

K_c : Ganancia del controlador

$1/T_i$: Término de reinicio (Reset term) ; donde T_i : término integrativo

T_D : Término de tasa (Rate term)

Para poder implementar esta función de regulación en un sistema digital, la función continua deberá cuantificarse mediante muestreos periódicos del valor del error, calculándose seguidamente el valor de la salida. La ecuación que constituye la base de la solución en un sistema digital es:

$$M_n = K_c * e_n + K_I * \int e_n dt + M_{\text{inicial}} + K_D * (e_n - e_{n-1})$$

Salida	Término Proporcional	Término integral	Término Diferencial
--------	----------------------	------------------	---------------------

Donde :

M_n : es el valor de salida del lazo calculado en el muestreo n-esimo

K_c : es la ganancia del lazo

E_n : es el valor del error de regulación en el muestreo n-esimo

E_{n-1} : es el valor previo del error de regulación (en el muestreo (n-1)-esimo)

K_I : es la constante proporcional del termino integral

$M_{inicial}$: es el valor inicial de la salida de lazo

K_D : es la constante proporcional del termino diferencial

Para esta ecuación, el termino integral se muestra en función de todos los términos del error , desde el primer muestreo actual. El termino diferencial es una función del muestreo actual y del muestreo previo; mientras que el muestreo proporcional solo es función del muestreo actual. En un sistema digital no es práctico almacenar todos los muestreos del error, además de no ser necesario.

Como un sistema digital debe calcular el valor de salida cada vez que se muestre el error, comenzando por el primer muestreo, solo es necesario almacenar el valor previo del error y el valor previo del término integral. Debido a la naturaleza repetitiva de la solución basada en un sistema digital es posible simplificar la ecuación a resolver en cada muestreo. La ecuación simplificada es:

$$M_n = K_c * e_n + K_I * e_n + MX + K_D * (e_n - e_{n-1})$$

Salida Término Proporcional Término integral Término diferencial

Donde:

M_n : es el valor de salida del lazo calculado en el muestreo n-esimo

K_c : Es la ganancia del lazo

E_n : Es el valor de error de regulación en el muestreo n-esimo

E_{n-1} : Es el valor previo de regulación en el muestreo (n-1)-esimo

K_i : Es la constante proporcional del termino integral

MX : Es el valor previo del termino integral (en el muestreo (n-1)esimo)

K_D : Es la constante proporcional del termino diferencial

Para calcular el valor de salida del lazo, la CPU utiliza una forma modificada de la ecuación simplificada anterior. Esta ecuación modificada es comp. La siguiente:

$$M_n = MP_n + MI_n + MD_n$$

Salida Término Proporcional Término integral Término Diferencial

Donde:

M_n : es el valor de salida del lazo calculado en el muestreo n-esimo

MP_n : es el valor del termino proporcional de salida del lazo en el muestreo n-esimo

MI_n : es el valor del termino integral de salida del lazo en el muestreo n-esimo

MD_n : es el valor del termino diferencial de salida del lazo en el muestreo n-esimo

