

**CONTROL Y MEDIDA DE NIVEL DE LÍQUIDO POR MEDIO DE UN SENSOR
DE PRESIÓN DIFERENCIAL**

**JOHN ALEXANDER ARIAS LOZADA
COD: 1088238260
ALEJANDRO MARULANDA GRAJALES
COD: 10888269895**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE TECNOLOGÍA
PROGRAMA DE TECNOLOGÍA ELÉCTRICA
PEREIRA
2010**

**CONTROL Y MEDIDA DE NIVEL DE LÍQUIDO POR MEDIO DE UN SENSOR
DE PRESIÓN DIFERENCIAL**

**JOHN ALEXANDER ARIAS LOZADA
COD: 1088238260
ALEJANDRO MARULANDA GRAJALES
COD: 10888269895**

**Proyecto de grado
Presentado como requisito para optar al título de:
Tecnólogo Eléctrico**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE TECNOLOGÍA
PROGRAMA DE TECNOLOGÍA ELÉCTRICA
PEREIRA
2010**

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Pereira, 10 de Marzo de 2010

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a los docentes de la Universidad Tecnológica que nos brindaron sus conocimientos durante el proceso académico y por su contribución a nuestra formación personal. También agradecemos a nuestras familias por el apoyo incondicional en todos los momentos de nuestra vida universitaria, al Ingeniero Sigilfredo Arregocés quien acompañó la realización de este proyecto de grado y en especial a Dios, que nos dió la sabiduría, entendimiento, por medio de nuestros docentes, y las herramientas para aplicar el conocimiento adquirido durante los años de universidad.

TABLA DE CONTENIDO

	<i>Pág.</i>
LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DE TABLAS	11
INTRODUCCIÓN	12
OBJETIVOS	13
ANTECEDENTES.....	14
1. CONCEPTOS GENERALES	17
1.1 PRESIÓN.....	17
1.2 UNIDADES Y CLASES DE PRESIÓN	17
1.2.1 Presión absoluta.....	19
1.2.2 Presión atmosférica	19
1.2.3 Presión relativa.....	19
1.2.4 Presión diferencial	19
1.2.5 Presión manométrica	20
1.2.6 Vacío.....	20
1.3 ¿QUÉ ES UN SENSOR?.....	21
1.4 ESPECIFICACIÓN DE UN SENSOR	21
2. INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN.....	23
2.1 ELEMENTOS MECÁNICOS.....	23
2.1.1 El tubo Bourdon.	23
2.1.2 El elemento en espiral.....	24
2.1.3 El diafragma.....	24
2.1.4 El fuelle.....	24
2.1.5 Los medidores de presión absoluta.	24
2.2 ELEMENTOS NEUMÁTICOS.....	26
2.2.1 Transmisores neumáticos.....	26
2.2.2 Desventajas del sistema Tobera-Obturador y válvula piloto.....	28
2.3 ELEMENTOS ELECTROMECAÑICOS ELECTRÓNICOS	29
2.3.1 Transmisores electrónicos de equilibrio de fuerzas	29
2.3.2 Transmisores electrónicos de equilibrio de fuerzas	29
2.3.3 Transductores resistivos	30
2.3.4 Transductores magnéticos.....	31

2.3.5	Transductores capacitivos	33
2.3.6	Galgas extensométricas	34
2.3.7	Transductores piezoeléctricos	37
2.3.8	Elementos Electrónicos de Vacío	38
3.	TRANSMISOR DE PRESIÓN SITRANS P	39
3.1	DISPOSICIÓN DEL MONTAJE.....	40
3.1.1	Montaje con vapor o líquido.....	40
3.2	CONEXIÓN DEL APARATO	41
3.3	INDICACIONES ACERCA DEL MANEJO	42
3.4	ELEMENTOS DE LA PANTALLA DIGITAL	42
3.5	INDICACIÓN DEL MODO	43
3.6	INDICACIÓN DE ESTADO.....	44
3.7	ELEMENTOS DE MANDO	46
3.8	AJUSTE CON PRESION DE REFERENCIA	46
4.	ARQUITECTURA INTERNA DE UN AUTÓMATA PROGRAMABLE.....	48
4.1	LOS AUTÓMATAS PROGRAMABLES	48
4.2	ARQUITECTURA Y CONFIGURACIÓN	49
4.2.1	Interfaces de Entrada/Salida	52
4.3	PROGRAMACIÓN.....	55
4.4	REGISTROS.....	66
4.4.1	Acumuladores (ACU1 y ACU2).....	66
4.4.2	Registro o palabra de estado.	66
4.4.3	Registros 1 Y 2 de direcciones.	68
4.4.4	Registros de módulos de datos (DB).	68
4.5	TEMPORIZADORES Y CONTADORES	69
4.5.1	Temporizadores (T).....	69
4.5.2	Contadores (Z).....	69
4.6	CLASIFICACIÓN DE LAS DIFERENTES ÁREAS DE MEMORIA DE ACUERDO A SU FUNCIÓN.....	69
4.6.1	Memoria de trabajo de la Cpu S7	70
4.7	DIRECCIONAMIENTO FÍSICO DE LOS PUERTOS DE ENTRADA Y SALIDA	74
4.7.1	Tipos de datos.	76
4.7.2	Memoria de marcas	76
4.7.3	Entradas y salidas	77

4.8	REGISTROS DE MÓDULOS DE DATOS.....	78
4.8.1	Módulos de organización (OB).....	78
4.8.2	Módulos de código (FC).....	79
4.8.3	Módulos de funciones (FB).....	79
4.8.4	Módulos de datos (DB).	80
4.8.5	Módulos de funciones especiales (SFB).	80
4.8.6	Módulos de funciones del sistema (SFC).....	80
5.	<i>MODULO ANÁLOGO DE ENTRADA SM331; AI 8 X 12 BIT</i>	83
5.1	PROPIEDADES DEL MÓDULO ANALÓGICO.....	83
5.2	REPRESENTACIÓN DE LOS VALORES ANALÓGICOS.....	84
5.2.1	Representación de los valores analógicos de entrada y salida.	84
5.2.2	Representación de los valores analógicos de los márgenes de medida de las entradas analógicas.	85
5.3	MÁRGENES DE MEDIDA PARA LA MEDIDA DE TENSIÓN	88
5.4	MÁRGENES DE MEDIDA PARA MEDIDA DE INTENSIDAD	89
5.5	ADAPTADORES DE MARGEN DE MEDIDA	90
5.6	CABLEADO DEL MÓDULO ANALÓGICO.....	92
5.7	CABLES APANTALLADOS PARA SEÑALES ANALÓGICAS.....	92
6	<i>VÁLVULAS DE SOLENOIDE</i>	93
6.1	QUÉ ES UNA VÁLVULA DE SOLENOIDE?	93
6.2	PRINCIPIO DE OPERACIÓN.....	94
6.3	TIPOS DE VÁLVULAS DE SOLENOIDE.....	95
6.4	ACCIÓN DIRECTA.....	96
6.5	DIFERENCIAL MÁXIMO DE PRESIÓN DE APERTURA (MOPD)	97
6.6	OPERADAS POR PILOTO	97
6.7	DIFERENCIAL MÍNIMO DE PRESIÓN DE APERTURA (MINOPD)....	100
6.8	VÁLVULAS DE DOS VÍAS	101
7	<i>SELECCIÓN DE LA ELECTROVALVULA</i>	106
7.1	VALVULA ELECTROMAGNETICA SERIE UW 2/2	106
7.1.1	Características y especificaciones.	106
8.	<i>IDENTIFICACIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL SISTEMA</i>	108
8.1	SISTEMA.....	108
8.2	FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA.....	109

8.3 SISTEMA DE PRIMER ORDEN	110
8.4 SISTEMAS DE SEGUNDO ORDEN	113
9. <i>MODELAMIENTO DEL SISTEMA DINÁMICO</i>	118
10. <i>SISTEMA EN LAZO ABIERTO</i>	121
11. <i>SISTEMA EN LAZO CERRADO</i>	122
12. <i>MÉTODO DE LA RESPUESTA EN FRECUENCIA</i>	124
12.1 MARGEN DE GANANCIA Y DE FASE.....	124
12.1.1 Margen de ganancia.....	125
12.1.2 Margen de fase.	125
13. <i>CONTROLADORES PID</i>	128
13.1 ACCION DE CONTROL PROPORCIONAL.....	129
13.2 CONTROL PROPORCIONAL INTEGRAL.....	131
14. <i>MONTAJE DEL SISTEMA HIDRÁULICO</i>	132
15. <i>DINÁMICA DEL SISTEMA</i>	133
16. <i>PROGRAMACIÓN DEL CONTROLADOR EN EL SIMATIC S7 300</i> ...	144
16.1 REGULACIÓN CONTINUA FB 41"CONT_C"	144
16.1.1 Algoritmo PID.....	144
16.2 FORMACIÓN DE IMPULSOS CON EL FB 43"PULSEGEN"	149
16.2.1 Estructura por software Simatic S7-300 para el control y medida de nivel de líquido del sistema hidráulico.....	153
17. <i>CONCLUSIONES</i>	156
<i>BIBLIOGRAFIA</i>	158

LISTA DE FIGURAS

Pág.

Figura 1. Presión.....	17
Figura 2. Clases de presión	18
Figura 3. Esquema de transmisor	21
Figura 4. Tipos de sellos	25
Figura 5. Sistema tobera-obturador	27
Figura 6. Curva de respuesta de un sistema Tubera-Obturador	27
Figura 7. Válvula Piloto (amplificador neumático)	28
Figura 8. Válvula piloto, diagrama de bloques, característica de presión	28
Figura 9. Transductor resistivo	30
Figura 10. Transductor de inductancia variable.....	31
Figura 11. Transductor de inductancia variable.....	32
Figura 12. Transductor capacitivo.....	33
Figura 13. Galga cementada y Galga sin cementar	34
Figura 14. Puente de Wheatstone para galga extensométrica.....	35
Figura 15. Transductor de presión de silicio difundido.....	35
Figura 16. Transductor piezoeléctrico	37
Figura 17. Vista de aparato del transmisor	40
Figura 18. Disposición de medición con el depósito abierto.....	41
Figura 19. Conexión del aparato.....	42
Figura 20. Elementos de la pantalla digital.....	43
Figura 21. Indicación del modo	43
Figura 22. Elementos de mando	46
Figura 23. Arquitectura interna de un autómata programable.....	64
Figura 24. Registros de la CPU.....	65
Figura 25. Primera consulta de la palabra de estado	67
Figura 26. Clasificación de las diferentes áreas de memoria de acuerdo a su función.....	70
Figura 27. Modulo analógico.....	83
Figura 28. Adaptadores de margen de medida	90
Figura 29. Solenoide energizado	94
Figura 30. Válvula de solenoide típica de acción directa, normalmente cerrada de dos vías	95
Figura 31. Válvula de solenoide operada por piloto, normalmente cerrada, de dos vías con pistón flotante.	98

Figura 32. Válvula de solenoide de dos vías, normalmente cerrada, operada por piloto con diafragma flotante	99
Figura 33. Válvula de solenoide operada por piloto	99
Figura 34. Válvula de solenoide de dos vías, de acción directa, normalmente cerrada.....	102
Figura 35. Válvula de solenoide de dos vías operada por piloto, normalmente cerrada, con diafragma flotante.	103
Figura 36. Válvula de solenoide de dos vías, de acción directa, normalmente abierta.....	104
Figura 37. Válvula de solenoide de dos vías, operada por piloto, normalmente abierta, con diafragma flotante.	105
Figura 38. Válvula electromagnética serie uw 2/2.....	106
Figura 39. Respuesta de sistema de primer orden a escalón unitario	112
Figura 40. Relación entre las raíces y polos de la ecuación característica de los sistemas de segundo orden y $\zeta, \omega_n, \sigma, \omega_d$	116
Figura 41. Sistema dinámico para controlar nivel	118
Figura 42. Esquema del sistema físico del llenado de un tanque	119
Figura 43. Sistema en lazo abierto	121
Figura 44. Sistema en lazo cerrado	123
Figura 45. Margen de ganancia y margen de fase	126
Figura 46. Respuesta de las acciones de control P, Pi, Pid a una entrada de error escalón unitario	129
Figura 47. Vinculación de los sistemas de control	132
Figura 48. Montaje real del sistema.....	132
Figura 49. Dinámica del sistema.....	135
Figura 50. Respuesta de la planta con perturbación de escalón unitario	136
Figura 51. Margen de fase y margen de ganancia	138
Figura 52. Margen de fase y margen de ganancia con función Margin....	139
Figura 53. Nuevos ancho de banda, márgenes de ganancia y de fase	142
Figura 54. Respuesta del sistema con control	143
Figura 55. Esquema de bloques del CONT_C	145
Figura 56. Bloques de función CONT_C Y PULSEGEN	149
Figura 57. Ciclo PER_TM, Ciclo PULSEGEN	150
Figura 58. Esquema de bloques del PULSEGEN	151

LISTA DE TABLAS

Pág.

Tabla 1. Conversión de unidades de medidas	18
Tabla 2. Aplicación apropiada de los sensores	22
Tabla 3. Elementos mecánicos	26
Tabla 4. Elementos electromecánicos	38
Tabla 5. Significado de las flechas en las distintas funciones.	45
Tabla 6. Áreas de memoria de la CPU	72
Tabla 7. Rangos o márgenes máximos de direcciones para diferentes áreas de memoria.	74
Tabla 8. Esquema de direccionamiento por defecto E/S digitales	75
Tabla 9. Esquema de direccionamiento E/S análogas.....	75
Tabla 10. Clases de alarmas y sus OB correspondientes	81
Tabla 11. Eventos de error asíncrono a los cuales se puede reaccionar llamando el OB correspondiente.....	82
Tabla 12. Representación de valores analógicos	85
Tabla 13. Configuración binaria de un valor analógico codificado en 15, 12, 8 bits.....	85
Tabla 14. Codificaciones posibles de valores analógicos (resolución)	86
Tabla 15. Representación de valores de medida digitalizados de un modulo de entrada analógico (márgenes de tensión).	87
Tabla 16. Representación de los valores de medida digitalizados de un modulo de entradas analógicas (márgenes de tensión y de intensidad).....	88
Tabla 17. Márgenes de medida de tensión	89
Tabla 18. Márgenes de medida para medida de intensidad, transductores de medida a 2 y 4 hilos	90
Tabla 19. Posiciones posibles de los adaptadores de margen de medida	91
Tabla 20. Posicionamiento de los adaptadores del margen de medida.....	92
Tabla 21. Partes de electroválvula serie UW 2/2	107
Tabla 22. EFECTO DE LAS ACCIONES DE CONTROL K_p , K_i Y K_d	131
Tabla 23. Tabla dinámica del sistema	134
Tabla 24. Parámetros de entrada del CONT_C	146
Tabla 25. Parámetros de salida CONT_C	148
Tabla 26. Parámetros de entrada del PULSEGEN	151
Tabla 27. Parámetros de salida del PULSENGEN	152

INTRODUCCIÓN

En la industria se observa la necesidad de automatizar y controlar el nivel de gases, vapores y líquidos los cuales pueden ser agresivos, no agresivos y peligrosos, así también cada uno de estos con sus respectivos niveles de viscosidad y densidad.

En los sistemas de control automático, es de vital importancia que los dispositivos que actúan como elementos integradores del mismo, ofrezcan un nivel de seguridad que permita garantizar el desarrollo completo del proceso en ejecución en industrias tales como las alimenticias, refresqueras, manufactureras, comerciales, entre otras.

Esta es la razón por la cual se debe utilizar un sensor de presión diferencial en la medida de nivel de líquidos en los sistemas hidráulicos.

OBJETIVOS

➤ **OBJETIVO GENERAL**

Utilizar un sensor de presión diferencial el cual ejerce un control de nivel de líquido en un sistema hidráulico y así poder controlar los niveles de un sistema de llenado y vaciado mediante un autómata programable siemens.

➤ **OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Modelar la dinámica del sistema de llenado; censando el nivel a través del sensor de presión diferencial e ingresar los datos al autómata para su posterior tratamiento.
- Simular la dinámica del sistema de llenado y vaciado utilizando Matlab.
- Diseñar la ley de control utilizando el simulador Matlab.
- Implementar el sistema de control de nivel con el sensor de presión diferencial y un autómata programable.

ANTECEDENTES

AJUSTE, CONFIGURACIÓN Y CONTROL DE CUATRO TANQUES ACOPLADOS. En este trabajo se estudia el sistema de cuatro tanques de agua acoplados. Éste es un proceso multivariable 2x2 en el que se intenta controlar el nivel de dos depósitos mediante la tensión de dos bombas que alimentan a los tanques bajo control y a dos tanques superiores que producen el acoplamiento entre las entradas y salidas del sistema. La planta se implementa físicamente y tras su identificación se lleva a cabo el diseño de un control multivariable descentralizado con dos controladores PI. Los resultados de dicha estrategia tanto experimentales como en simulación son comparados, comprobándose que ambos presentan una respuesta muy similar y que se ajustan a las especificaciones deseadas. [1]

Control de nivel con sensores capacitivos. A menudo es necesario controlar nivel de producto en un recipiente o una tolva, detectando simplemente un nivel máximo y un mínimo, para actuar sobre el sistema de llenado y/o vaciado. Para esta aplicación pueden utilizarse sensores de proximidad capacitivos como detectores de nivel, conectados a una lógica simple para el comando del sistema de llenado. El recipiente puede contener fluidos, polvos o materiales granulados tales como PVC, colorantes, harina, azúcar, leche en polvo, por nombrar algunos. Los sensores de proximidad capacitivos detectan la presencia de todo tipo de material metálico o no. Disponen de un ajuste de sensibilidad multivoltas en su parte posterior mediante el cual se ajusta el punto de actuación de acuerdo al material a detectar.

Un LED indica el estado de accionamiento. Los medios con constante dieléctrica alta, tales como los fluidos, pueden ser detectados a través de materiales con una baja constante dieléctrica, como es generalmente el caso del receptáculo (plástico, vidrio, fibra de vidrio). En este caso es posible controlar mediante la aplicación externa de dos sensores capacitivos, el nivel alto o bajo de casi cualquier líquido o sólido presente en el interior del recipiente. En el caso de recipientes metálicos, el sensor capacitivo debe montarse atravesando la pared del recipiente de modo

de detectar el líquido o granulado presente en el interior o en su defecto, medir desde el exterior a través de ventanas o visores de vidrio, plástico, etc. En la figura de abajo se ilustran los tres tipos de montaje. Se puede regular desde el exterior la sensibilidad del sensor capacitivo de modo de determinar una zona de actuación bien definida. Los sensores no blindados son especialmente convenientes para aplicaciones de contacto directo, por ejemplo cuando el polvo o líquido toca directamente el detector. El campo electrostático del sensor tiene más alcance lo cual es una ventaja en esas aplicaciones. [2]

CONTROL DE NIVEL PARA TANQUES DE AGUA CON REALIMENTACIÓN. Sistema de control de nivel de líquido que también abarca temas como el manejo de potencias para el accionamiento de una electro válvula y una bomba electro sumergible. Este proyecto está completamente controlado por un microcontrolador con aplicaciones como la conversión análoga- digital, el manejo del teclado matricial y del display de cristal líquido (LCD), el operador del sistema podrá ingresar el valor del nivel de agua deseado en el tanque almacenador y este por medio del sistema de sensado implementado con poleas y de la bomba se llenará posicionándose en dicho valor, el líquido proviene de un tanque distribuidor haciéndolo un circuito cerrado de control.[3]

MODULO DIDÁCTICO PARA EL CONTROL DE NIVEL DE LIQUIDOS. El modulo de control de nivel de líquidos es un equipo que permite realizar acciones de control sobre la variable nivel de liquido de un tanque a través de un sistema de control cuyo elemento principal es un PLC que comanda la apertura de una válvula ubicada a la salida del tanque desde un tanque de almacenamiento.

Un sensor de presión diferencial que realiza una medición indirecta a través de una sonda llena de aire, determina la presión de la columna de líquido y proporciona una salida continua que permite determinar el nivel de líquido en el tanque. El PLC (Controlador Lógico Programable) es el encargado de ejecutar el proceso al ejecutar los lazos de control programados.

El modulo ha sido diseñado para operar en modo manual, en el cual se tiene control individual sobre cada parte del equipo, o automático el cual

requiere el ingreso de un set-point de nivel deseado a fin de que se realicen las acciones de control.

El ingreso de parámetros se lo puede realizar desde un panel de operado ubicado en la parte frontal del modulo o desde el computador por medio de una interfaz grafica (HMI) que permite además la supervisión y adquisición de datos. [4]

1. CONCEPTOS GENERALES

1.1 PRESIÓN

La presión es una fuerza que ejerce sobre un área determinada, y se mide en unidades de fuerzas por unidades de área. Esta fuerza se puede aplicar a un punto en una superficie o distribuirse sobre esta. Cada vez que se ejerce se produce una deflexión, una distorsión o un cambio de volumen o dimensión.

Las mediciones de presión pueden ser desde valores muy bajos que se consideran un vacío, hasta miles de toneladas de por unidad de área. Se define **presión media** como la razón entre la fuerza normal que actúa sobre un área plana y dicha área. En la siguiente figura se ilustra:

$$P_m = \Delta F / \Delta A$$

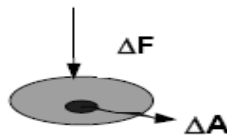


Figura 1. Presión

La fuerza que ejerce un fluido en equilibrio sobre un cuerpo sumergido en cualquier punto es perpendicular a la superficie del cuerpo. La presión es una magnitud escalar y es una característica del punto del fluido en equilibrio, que dependerá únicamente de sus coordenadas.

1.2 UNIDADES Y CLASES DE PRESIÓN

La presión es una fuerza por unidad de superficie y puede expresarse en unidades tales como pascal, bar, atmosferas, kilogramos por centímetro cuadrado y psi (libras por pulgada cuadrada). En el Sistema Internacional (S.I.) está normalizada en pascal de acuerdo con las Conferencias

Generales de Pesas y Medidas que tuvieron lugar en Paris en octubre de 1967 y 1971, y según la Recomendación Internacional número 17, ratificada en la III Conferencia General de la Organización Internacional de Metrología Legal. El pascal es 1 newton por metro cuadrado (1 N/m²), siendo el newton la fuerza que aplicada a un cuerpo.

$$1[\text{Pascal}] = 1 \left[\frac{\text{Newton}}{\text{m}^2} \right] \quad [1]$$

En los países de habla inglesa se utiliza:

$$1[\text{PSI}] = 1 \left[\frac{\text{Pound}}{\text{inch}^2} \right] \quad [2]$$

La equivalencia entre la unidad de medida inglesa y la del sistema internacional de medidas resulta:

$$1[\text{PSI}] = 6.985[\text{KPascal}] \quad [3]$$

	Pascal	bar	N/mm ²	kp/m ²	kp/cm ²	atm	Torr
1Pa (N/m²)	1	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	0.102	0.102×10 ⁻⁴	0.987×10 ⁻⁵	0.0075
1bar (daN/cm²)	100.000	1	0.1	10200	1.02	0.987	750
1 N/mm²	10 ⁶	10	1	1.02×10 ³	10.2	9.87	7500
1 kp/m²	9.81	9.81×10 ⁻⁵	9.81×10 ⁻⁶	1	10 ⁻⁴	0.968×10 ⁻⁴	0.0736
1 kp/cm² (1 at)	98100	0.981	0.0981	10000	1	0.968	736
1 atm (760 Torr)	101325	1.103	0.1013	10330	1.033	1	760
1 Torr (mmHg)	133	0.00133	1.33×10 ⁻⁴	13.6	0.00132	0.00132	1

Tabla 1. Conversión de unidades de medidas

La presión puede medirse en valores absolutos o diferenciales. En la figura 2 se indican las clases de presión que los instrumentos miden comúnmente en las industrias.

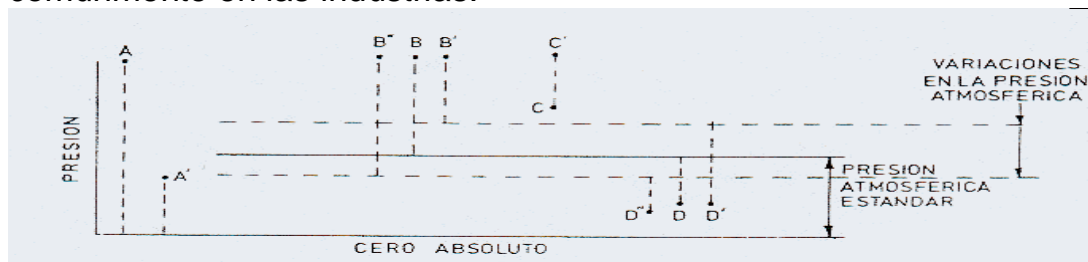


Figura 2. Clases de presión

1.2.1 Presión absoluta

Es la presión de un fluido medido con referencia al vacío perfecto o cero absoluto (puntos A y A' de la figura 1). La presión absoluta es cero únicamente cuando no existe choque entre las moléculas lo que indica que la proporción de moléculas en estado gaseoso o la velocidad molecular es muy pequeña. Este término se creó debido a que la presión atmosférica varía con la altitud y muchas veces los diseños se hacen en otros países a diferentes altitudes sobre el nivel del mar por lo que un término absoluto unifica criterios.

1.2.2 Presión atmosférica

El hecho de estar rodeados por una masa gaseosa (aire), y al tener este aire un peso actuando sobre la tierra, quiere decir que estamos sometidos a una presión (atmosférica), la presión ejercida por la atmósfera de la tierra, tal como se mide normalmente por medio del barómetro (presión barométrica). Al nivel del mar o a las alturas próximas a este, el valor de la presión es cercano a 14,7lb/plg² (101,35kpa), disminuyendo estos valores con la altitud.

1.2.3 Presión relativa

Es la determinada por un elemento que mide la diferencia entre la presión absoluta y la atmosférica del lugar donde se efectúa la medición (punto B de la figura). Hay que señalar que al aumentar o disminuir la presión atmosférica, disminuye o aumenta respectivamente la presión leída (puntos (B y B')), si bien ello es despreciable al medir presiones elevadas.

1.2.4 Presión diferencial

Es la diferencia entre dos presiones, puntos C y C'. El vacío es la diferencia de presiones entre la presión atmosférica existente y la presión

absoluta, es decir, es la presión medida por debajo de la atmosférica (puntos D, D' y D"). Viene expresado en mm columna de mercurio, mm columna de agua o pulgadas de columna de agua. Las variaciones de la presión atmosférica influyen considerablemente en las lecturas del vacío.

1.2.5 Presión manométrica

Son normalmente las presiones superiores a la atmosférica, que se mide por medio de un elemento que se define la diferencia entre la presión que es desconocida y la presión atmosférica que existe, si el valor absoluto de la presión es constante y la presión atmosférica aumenta, la presión manométrica disminuye; esta diferencia generalmente es pequeña mientras que en las mediciones de presiones superiores, dicha diferencia es insignificante, es evidente que el valor absoluto de la presión puede obtenerse adicionando el valor real de la presión atmosférica a la lectura del manómetro.

La presión puede obtenerse adicionando el valor real de la presión atmosférica a la lectura del manómetro.

Presión Absoluta = Presión Manométrica + Presión Atmosférica.

1.2.6 Vacío

Se refiere a presiones manométricas menores que la atmosférica, que normalmente se miden, mediante los mismos tipos de elementos con que se miden las presiones superiores a la atmosférica, es decir, por diferencia entre el valor desconocido y la presión atmosférica existente. Los valores que corresponden al vacío aumentan al acercarse al cero absoluto y por lo general se expresa a modo de centímetros de mercurio (cmHg), metros de agua, etc.

De la misma manera que para las presiones manométricas, las variaciones de la presión atmosférica tienen solo un efecto pequeño en las lecturas del indicador de vacío.

Sin embargo, las variaciones pueden llegar a ser de importancia, que todo el intervalo hasta llegar al cero absoluto solo comprende 760mmHg.

[5]

1.3 ¿QUÉ ES UN SENSOR?

Se llama sensor al instrumento que produce una señal, usualmente eléctrica (anteriormente se utilizaban señales hidráulicas), que refleja el valor de una propiedad, mediante alguna correlación definida (su ganancia).

En términos estrictos, un sensor es un instrumento que no altera la propiedad censada. Por ejemplo, un sensor de temperatura sería un instrumento tal que no agrega ni cede calor a la masa censada, es decir, en concreto, sería un instrumento de masa cero o que no contacta la masa a la que se debe medir la temperatura (un termómetro de radiación infrarroja).

Existe, además, el concepto estricto de **transductor**: un instrumento que convierte una forma de energía en otra (o una propiedad en otra). Por ejemplo, un generador eléctrico en una caída de agua es un conocido transductor de energía cinética de un fluido en energía eléctrica; sobre esta base se podría pensar, por ejemplo, en un transductor de flujo a señal eléctrica consistente de un pequeño generador a paletas movilizadas por el caudal a medir.

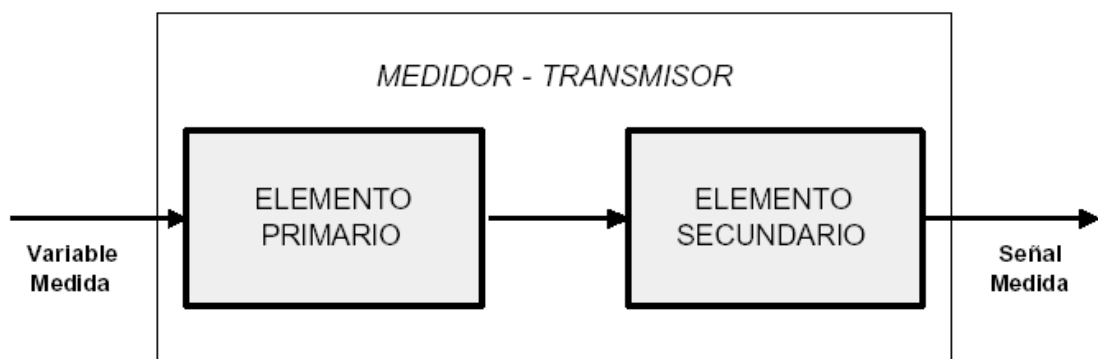


Figura 3. Esquema de transmisor

1.4 ESPECIFICACIÓN DE UN SENSOR

Todos los instrumentos deben ser especificados a un punto tal que aseguren la operación del proceso y que permita la estimación de sus costos. Estas especificaciones se pueden sistematizar, aplicándolas tanto a sistemas sensores como a sistemas actuadores, sin que todas y cada una de las definiciones que siguen a continuación sean aplicables a todo sensor o actuador.

- Precisión (o exactitud)
- Error
- Error de No-Linealidad
- Repetitividad
- Reproducibilidad.
- Sensibilidad
- Resolución
- Rango
- Rango de Trabajo u Operación
- Banda Muerta
- Corrimiento del Cero
- Tiempo de Respuesta
- Histéresis
- Función de Transferencia

Aspectos a tener en cuenta al decidir si los sensores son apropiados para una aplicación determinada:	
<ul style="list-style-type: none"> • Tiempos de respuesta, tiempos de reacción, velocidad de conmutación • Sistema de conexiones (sistema de 2, 3 ó 4 hilos, conexión serie o paralela, etc.) • Seguridad del funcionamiento, frecuencia de fallos, fiabilidad • Posibilidad de control automático) • Margen de la temperatura de funcionamiento • Posibilidad de ajustar los puntos de detección, la sensibilidad y el umbral de respuesta • Resolución, precisión de la medición • Resistencia a la corrosión • Duración, vida útil • Límites del rendimiento, margen de rendimiento • Propiedades del objeto (material, grado de emisión, estructura de la superficie, etc.) • Montaje (dimensiones, masa, condiciones para el montaje, adaptación al lugar de la detección) • Redundancia de la unidad de evaluación de datos • Ausencia de reacciones secundarias 	<ul style="list-style-type: none"> • Distancia de detección • Variación del punto de detección, histéresis del punto de detección • Clase de protección • Alimentación de tensión (tensión de funcionamiento, fluctuación de la tensión, picos de tensión, • Supresión de interferencias (insensibilidad frente a interferencias externas, tales como vibraciones, golpes, luz externa, etc.) • Disponibilidad • Resistencia a temperaturas • Protección ante sobrecargas (anticortocircuitaje, polos inconfundibles, resistencia a sobrecargas) • Economía (relación entre costo y rendimiento, incluyendo los costos de montaje y puesta en funcionamiento) • Homologación para aplicaciones especiales (sala limpia, resistencia a explosiones, protección de operarios, etc.) • Precisión de repetición del punto de detección

Tabla 2. Aplicación apropiada de los sensores

2. INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN

El campo de aplicación de los medidores de presión es amplio y abarca desde valores muy bajos (vacío) hasta presiones de miles de bar. Los instrumentos de presión se clasifican en tres grupos: **mecánicos, neumáticos, electromecánicos y electrónicos.**

2.1 ELEMENTOS MECÁNICOS

Se dividen en:

Elementos primarios que miden la presión comparándola con la ejercida por un líquido de densidad y altura conocida.

- Barómetro de Cubeta
- Manómetro de tubo U
- Manómetro de Tubo inclinado
- Manómetro de toro pendular
- Manómetro de Campana.

Elementos primarios elásticos que se deforman por la presión interna del fluido que contienen. Los elementos primarios elásticos más empleados son: el tubo Bourdon, el elemento en espiral, el helicoidal, el diafragma y el fuelle.

2.1.1 El tubo Bourdon.

Es un tubo de sección elástica que forma un anillo casi completo, cerrado por un extremo. Al aumentar la presión en el interior del tubo, éste tiende a enderezarse y el movimiento es transmitido a la aguja indicadora, por un sector dentado y un piñón. La Ley de deformación del tubo Bourdon es bastante compleja y ha sido determinada empíricamente a través de numerosas observaciones y ensayos en

varios tubos. El material empleado normalmente en el tubo Bourdon es de acero inoxidable, aleación de cobre o aleaciones especiales como hastelloy y monel.

2.1.2 El elemento en espiral.

Se forma arrollando el tubo Bourdon en forma de espiral alrededor de un eje común, y el helicoidal arrollando más de una espira en forma de hélice. Estos elementos proporcionan un desplazamiento grande del extremo libre y por ello, son ideales para los registradores.

2.1.3 El diafragma.

Consiste en una o varias capsulas circulares conectadas rígidamente entre sí por soldadura, de forma que al aplicar presión, cada capsula se deforma y la suma de los pequeños desplazamientos es amplificada por un juego de palancas. El sistema se proyecta de tal modo que, al aplicar presión, el movimiento se aproxima a una relación lineal en un intervalo de medida lo más amplio posible con un mínimo de histéresis y de desviación permanente en el cero del instrumento.

El material del diafragma es normalmente aleación de níquel o inconel x. Se utiliza para pequeñas presiones.

2.1.4 El fuelle

Es parecido al diafragma compuesto, pero de una sola pieza flexible axialmente, y puede dilatarse o contraerse con un desplazamiento considerable.

2.1.5 Los medidores de presión absoluta.

Consisten en un conjunto de fuelle y muelle opuesto a un fuelle sellado al vacío absoluto. El movimiento resultante de la unión de los dos fuelles

equivale a la presión absoluta del fluido. El material empleado para los fuelles es latón o acero inoxidable. Se utilizan para la medida exacta y el control preciso de bajas presiones, a las que puedan afectar las variaciones en la presión atmosférica. Por ejemplo, en el caso de emplear un vacuometro (medidor de presión) para el mantenimiento de una presión absoluta de 50 mm de mercurio en una columna de destilación, el punto de consigna sería de 710mm, con una presión atmosférica de 760 mm. Si la presión atmosférica cambiase a 775mm el vacuometro indicaría: $710 + 15 = 725$ mm con lo cual la presión absoluta en la columna sería controlada a $50 + 15 = 65$ mm, es decir, a un 30 % más de la deseada.

En la medida de presiones de fluidos corrosivos pueden emplearse elementos primarios elásticos con materiales especiales en contacto directo con el fluido. Sin embargo, en la mayoría de los casos es más económico utilizar un fluido de sello cuando el fluido es altamente viscoso y obtura el elemento (tubo Bourdon, por ejemplo), o bien, cuando la temperatura del proceso es demasiado alta. Tal ocurre en la medición de presión del vapor de agua en que el agua condensada aísla el tubo Bourdon de la alta temperatura del vapor figura 4 a.

Se emplean asimismo sellos volumétricos de diafragma y de fuelle figura b y c que contienen un líquido incompresible para la transmisión de la presión.

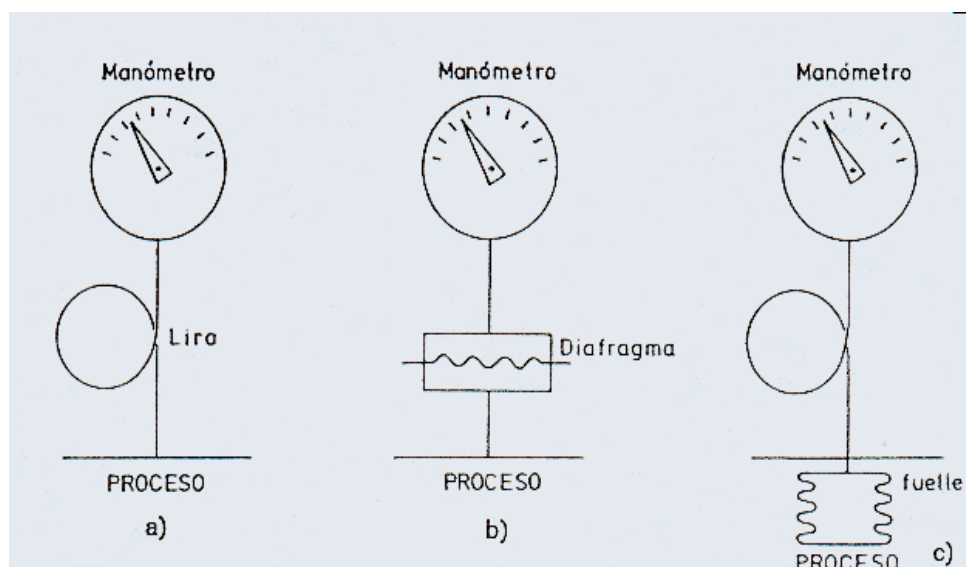


Figura 4. Tipos de sellos

En la tabla 3 pueden verse las características de los elementos mecánicos descrito.

	<i>Campo de medida</i>	<i>Precisión en % de toda la escala</i>	<i>Temperatura máxima de servicio</i>	<i>Presión estática máxima</i>	
Barómetro cubeta	0,1-3 m cda	0,5-1 %	Ambiente	6 bar	
Tubo en U	0,2-1,2 m cda	0,5-1 %	↓	10 bar	
Tubo inclinado	0,01-1,2 m cda	↓		↓	↓
Toro pendular	0,5-10 m cda		100-600 bar		
Manómetro campana	0,005-1 m cda		Atmosférica		
Tubo Bourdon	0,5-6000 bar		90° C	6000 bar	
Espiral	0,5-2500 bar		↓	2500 bar	
Helicoidal	0,5-5000 bar		↓	5000 bar	
Diafragma	50 mm cda-2 bar		↓	2 bar	
Fuelle	100 mm cda-2 bar		↓	↓	
Presión absoluta	6-760 mm Hg abs		1 %	Ambiente	Atmosférica
Sello volumétrico	3-600 bar		0,5-1 %	400° C	600 bar

Tabla 3. Elementos mecánicos

2.2 ELEMENTOS NEUMÁTICOS

Como elementos neumáticos consideramos los instrumentos transmisores neumáticos.

2.2.1 Transmisores neumáticos.

Los transmisores neumáticos se basan en el sistema tobera-obturador que convierte el movimiento del elemento de medición en una señal neumática.

2.2.1.1 El sistema tobera-obturador.

Consiste en un tubo neumático aumentado a una presión constante P, con una reducción en su salida en forma de tobera, la cual puede ser obstruida por una lámina llamada obturador cuya posición depende del elemento de medida. En la figura 5. se presenta el conjunto.

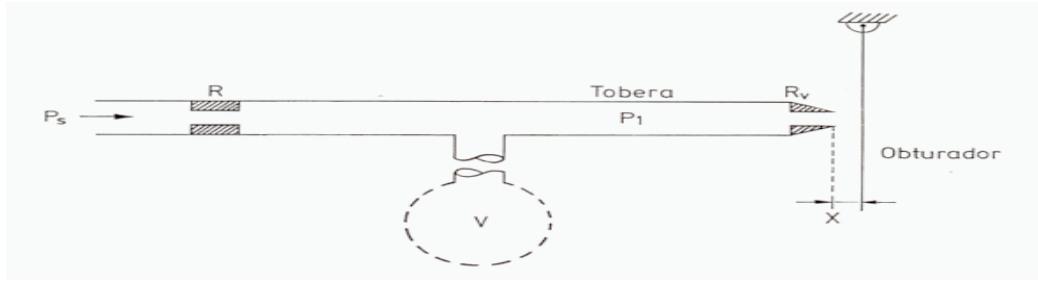


Figura 5. Sistema tobera-obturador

Curva de respuesta de un sistema Tubera-Obturador

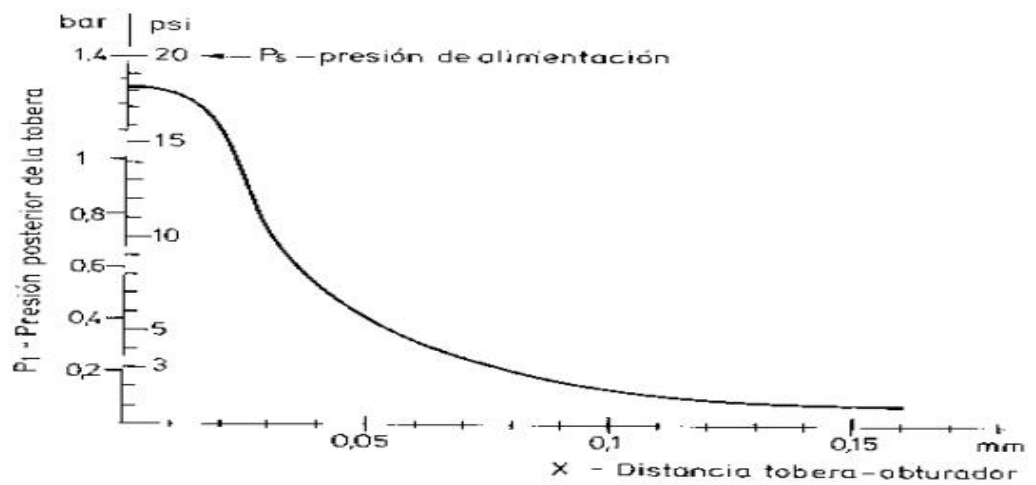


Figura 6. Curva de respuesta de un sistema Tubera-Obturador

2.2.1.2 Válvula Piloto (amplificador neumático)

Empleada en el amplificador de dos etapas cumple las siguientes funciones:

- Aumento del caudal de aire suministrado, o del caudal de escape para conseguir tiempos de respuesta inferiores al segundo.
- Amplificación de presión (ganancia) que suele ser de 4 a 5, en general, para obtener así la señal neumática estándar 3-15 psi (0,2-1 bar).



Figura 7. Válvula Piloto (amplificador neumático)

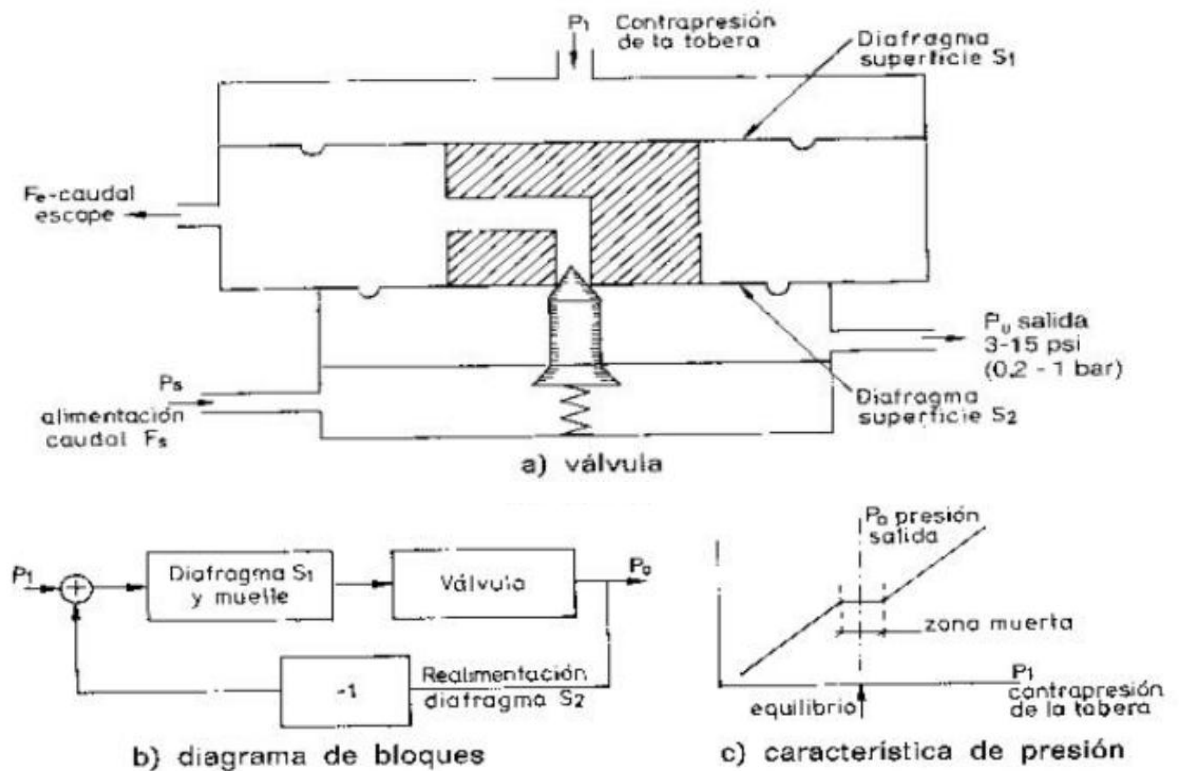


Figura 8. Válvula piloto, diagrama de bloques, característica de presión

2.2.2 Desventajas del sistema Tobera-Obturador y válvula piloto.

- 1.- Las variaciones en la presión del aire de alimentación influyen en la señal de salida.
- 2.-Las vibraciones que pueden existir en el proceso influyen en el juego mecánico entre el Obturador y el elemento de medida y dan lugar a

pulsaciones en la señal de salida, ya que el factor de amplificación del sistema tobera-obturador es muy grande.

2.3 ELEMENTOS ELECTROMECAÑICOS ELECTRÓNICOS

Los elementos electromecánicos de presión utilizan un elemento mecánico elástico combinado con un transductor eléctrico que genera la señal eléctrica correspondiente. El elemento mecánico consiste en un tubo Bourdon, espiral, hélice, diafragma, fuelle o una combinación de los mismos que, a través de un sistema de palancas convierte la presión en una fuerza o en un desplazamiento mecánico.

Los elementos electromecánicos de presión se clasifican según el principio de funcionamiento en los siguientes tipos:

2.3.1 Transmisores electrónicos de equilibrio de fuerzas

Resistivos.

Magnéticos

Capacitivos.

Extensométricos.

Piezoeléctricos.

2.3.2 Transmisores electrónicos de equilibrio de fuerzas

Para cada valor de la presión, la barra adopta una posición determinada excitándose un transductor de desplazamiento tal como un detector de inductancia, un transformador diferencial o bien un detector fotoeléctrico. Un circuito oscilador asociado con cualquiera de estos detectores alimenta una unidad magnética y la fuerza generada reposiciona la barra de equilibrio de fuerzas. Se completa así un circuito de realimentación variando la corriente de salida en forma proporcional al intervalo de presiones del proceso.

Los transductores electrónicos de equilibrio de fuerzas se caracterizan por tener un movimiento muy pequeño de la barra de equilibrio, poseen realimentación, una elasticidad muy buena y un nivel alto en la señal de salida. Por su constitución mecánica presentan un ajuste del cero y del alcance (span) complicado y un alta sensibilidad a vibraciones y su estabilidad en el tiempo es de media a pobre.

Su intervalo de medida corresponde al del elemento mecánico que utilizan (tubo Bourdon, espiral, fuelle, diafragma...) y su precisión es del orden de 0,5 - 1 %

2.3.3 Transductores resistivos

Constituyen, sin duda, uno de los transmisores eléctricos más sencillos. Consisten en un elemento elástico (tubo Bourdon o capsula) que varia la resistencia óhmica de un potenciómetro en función de la presión. El potenciómetro puede adoptar la forma de un solo hilo continuo o bien estar arrollado a una bobina siguiendo un valor lineal o no de resistencia. Existen varios tipos de potenciómetro según sea el elemento de resistencia: potenciómetros de grafito, de resistencia bobinada, de película metálica y de plástico moldeado. En la figura 9 puede verse un transductor resistivo representativo que consta de un muelle de referencia, el elemento de presión y un potenciómetro de precisión. El muelle de referencia es el corazón del transductor ya que su desviación al comprimirse debe ser únicamente una función de la presión y además debe ser independiente de la temperatura, de la aceleración y de otros factores ambientes externos.

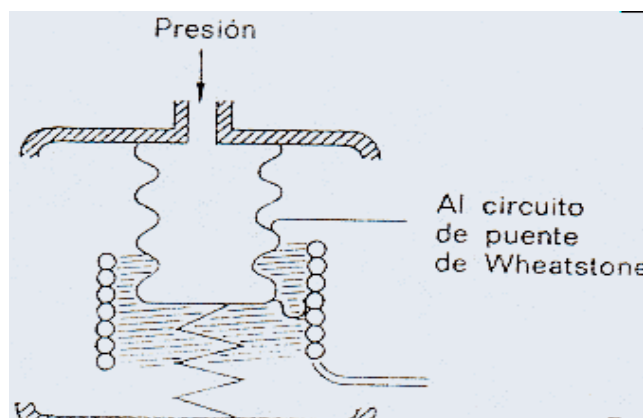


Figura 9. Transductor resistivo

El movimiento del elemento de presión se transmite a un brazo móvil aislado que se apoya sobre el potenciómetro de precisión. Este está conectado a un circuito de puente de Wheatstone.

Los transductores resistivos son simples y su señal de salida es bastante potente como para proporcionar una corriente de salida suficiente para el funcionamiento de los instrumentos de indicación sin necesidad de amplificación. Sin embargo, son insensibles a pequeños movimientos del contacto del cursor, muy sensibles a vibraciones y presentan una estabilidad pobre en el tiempo.

El intervalo de medida de estos transmisores corresponde al elemento de, presión que utilizan (tubo Bourdon, fuelle...) y varía en general de 0-0,1 a 0-300 kg/cm². La precisión es del orden de 1-2 %

2.3.4 Transductores magnéticos.

Se clasifican en dos grupos según el principio de funcionamiento.

a) Transductores de inductancia variable figura 5. en los que el desplazamiento de un núcleo móvil dentro de una bobina aumenta la inductancia de esta en forma casi proporcional a la porción metálica del núcleo contenida dentro de la bobina.

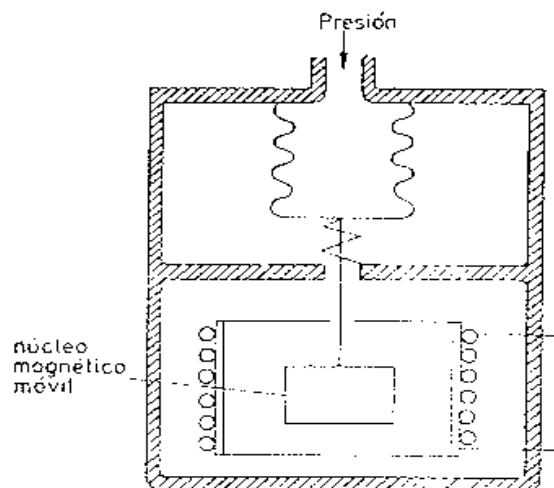


Figura 10. Transductor de inductancia variable

El devanado de la bobina se alimenta con una corriente alterna y la f.e.m. (fuerza electromotriz) de autoinducción generada se opone a la f.e.m. de alimentación, de tal modo que al ir penetrando el núcleo móvil dentro de

la bobina la corriente presente en el circuito se va reduciendo por aumentar la f.e.m. de autoinducción.

El transformador diferencial estudiado en los transmisores electrónicos de equilibrio de fuerzas es también un transductor de inductancia variable, si bien, en lugar de considerar una sola bobina con un núcleo móvil, se trata de tres bobinas en las que la bobina central o primaria es alimentada con una corriente alterna y el flujo magnético generado induce tensiones en las otras dos bobinas, con la particularidad de que si el núcleo está en el centro, las dos tensiones son iguales y opuestas y si se desplaza a la derecha o a la izquierda, las tensiones son distintas.

Es decir, que el transformador diferencial es más bien un aparato de relación de inductancias.

Los transductores de inductancia variable tienen las siguientes ventajas: no producen rozamiento en la medición, tienen una respuesta lineal, son pequeños y de construcción robusta y no precisan ajustes críticos en el montaje. Su precisión del orden de $\pm 1\%$.

b) Los transductores de inductancia variable figura 6. consisten en un imán permanente o un electroimán que crea un campo magnético dentro del cual se mueve una armadura de material magnético.

El circuito magnético se alimenta con una fuerza magnetomotriz (causa productora de los campos magnéticos creados por las corrientes eléctricas) constante con lo cual al cambiar la posición de la armadura varía la reluctancia y por lo tanto el flujo magnético. Esta variación del flujo da lugar a una corriente inducida en la bobina que es, por tanto, proporcional al grado de desplazamiento de la armadura móvil.

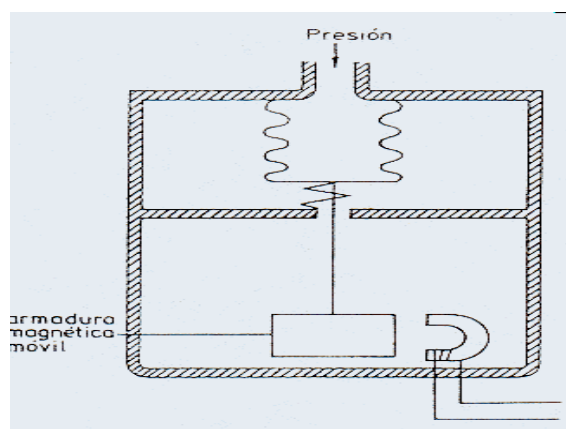


Figura 11. Transductor de inductancia variable

El movimiento de la armadura es pequeño (del orden de un grado como máximo en armaduras giratorias) sin contacto alguno con las partes fijas, por lo cual no existen rozamientos eliminándose la histéresis mecánica típica de otros instrumentos. Los transductores de reluctancia variable presentan una alta sensibilidad a las vibraciones, una estabilidad media en el tiempo y son sensibles a la temperatura. Su precisión es del orden de $\pm 0,5 \%$.

Ambos tipos de transductores posicionan el núcleo o la armadura móviles con un elemento de presión (tubo Bourdon, espiral...) y utilizan circuitos eléctricos bobinados de puente de inductancias de corriente alterna.

2.3.5 Transductores capacitivos

Se basan en la variación de capacidad que se produce en un condensador al desplazarse una de sus placas por la aplicación de presión figura 12. La placa móvil tiene forma de diafragma y se encuentra situada entre dos placas fijas. De este modo se tienen dos condensadores uno de capacidad fija o de referencia y el otro de capacidad variable, que pueden compararse en circuitos oscilantes o bien en circuitos de puente de Wheatstone alimentados con corriente alterna.

Los transductores capacitivos se caracterizan por su pequeño tamaño y su construcción robusta, tienen un pequeño desplazamiento volumétrico y son adecuados para medidas estáticas y dinámicas. Su señal de salida es débil por lo que precisan de amplificadores con el riesgo de introducir errores en la medición. Son sensibles a las variaciones de temperatura y a las aceleraciones transversales y precisan de un ajuste de los circuitos oscilantes y de los puentes de c.a. a los que están acoplados.

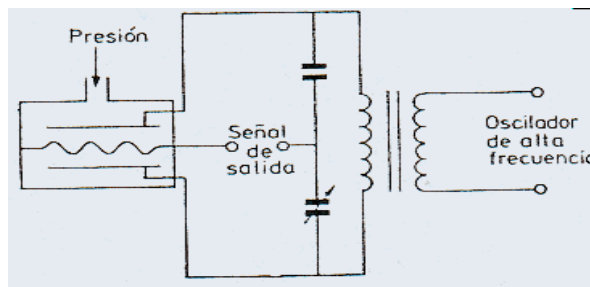


Figura 12. Transductor capacitivo

Su intervalo de medida es relativamente amplio, entre 0,05-5 a 0,5-600 bar y su precisión es del orden de $\pm 0,2$ a $\pm 0,5$ %.

2.3.6 Galgas extensométricas

Se basan en la variación de longitud y de diámetro, y por lo tanto de resistencia, que tiene lugar cuando un hilo de resistencia se encuentra sometido a una tensión mecánica por la acción de una presión.

Existen dos tipos de galgas extensométricas: galgas cementadas figura 13 formadas por varios bucles de hilo muy fino que están pegados a una hoja base de cerámica, papel o plástico, y galgas sin cementar en las que los hilos de resistencia descansan entre un armazón fijo y otro móvil bajo una ligera tensión inicial.

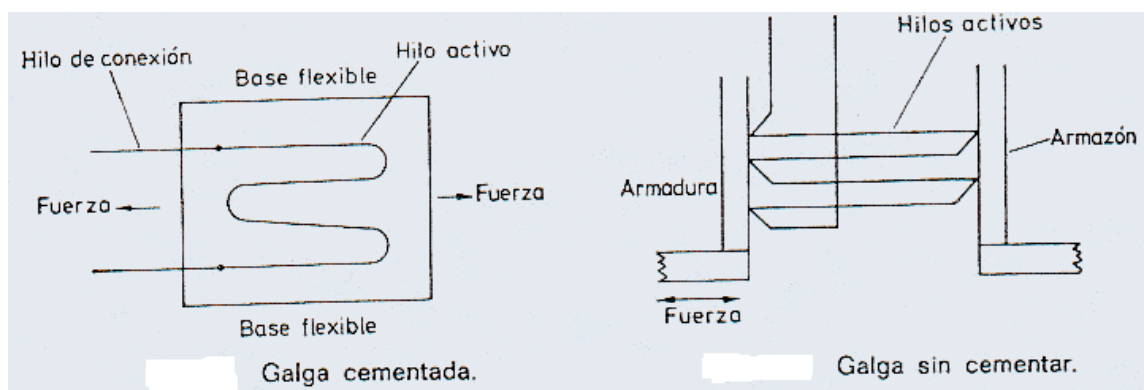


Figura 13. Galga cementada y Galga sin cementar

En ambos tipos de galgas, la aplicación de presión estira o comprime los hilos según sea la disposición que el fabricante haya adoptado, modificando pues la resistencia de los mismos.

La galga forma parte de un puente de Wheatstone figura 14 y cuando está sin tensión tiene una resistencia eléctrica determinada. Se aplica al circuito una tensión nominal tal que la pequeña corriente que circula por la resistencia crea una caída de tensión en la misma y el puente se equilibra para estas condiciones.

Cualquier variación de presión que mueva el diafragma del transductor cambia la resistencia de la galga y desequilibra el puente.

El intervalo de medida de estos transductores varía de 0-0,6 a 0-10 000 bar y su precisión es del orden de $\pm 0,5\%$

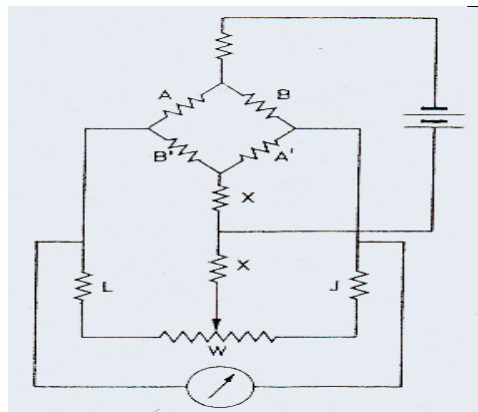


Figura 14. Puentes de Wheatstone para galga extensométrica

Una innovación de la galga extensométrica la constituyen los transductores de presión de silicio difundido. Consisten en un elemento de silicio situado dentro de una cámara conteniendo silicona que está en contacto con el proceso a través de un diafragma flexible. El sensor está fabricado a partir de un monocristal de silicio en cuyo seno se difunde boro para formar varios puentes de Wheatstone constituyendo así una galga extensométrica auto- contenida. El espesor del sensor determina el intervalo de medida del instrumento.

El sensor con su puente Wheatstone incorporado forma parte del circuito de la figura 15.

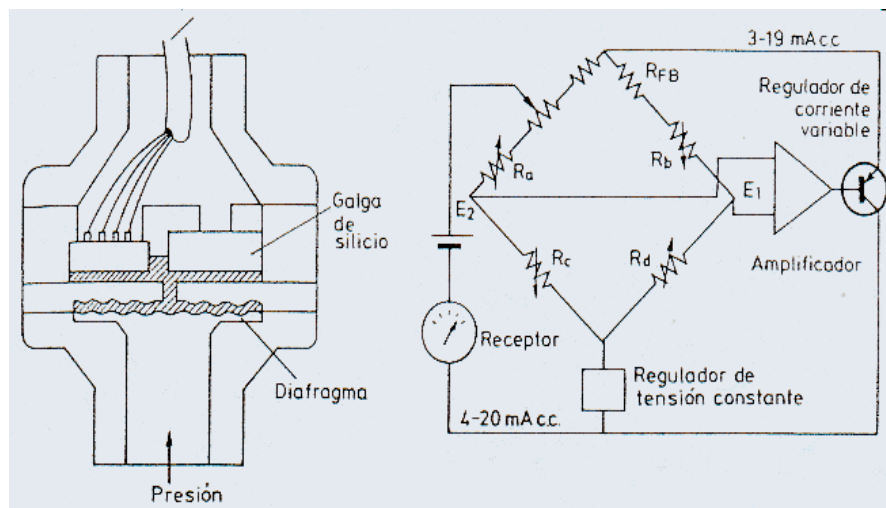


Figura 15. Transductor de presión de silicio difundido

Cuando no hay presión, las tensiones E1 y E2 son iguales y, al aplicar la presión del proceso Rb y Rc, disminuyen su resistencia y Ra y Rd la aumentan dando lugar a caídas de tensión distintas y a una diferencia entre E1 y E2.

Esta diferencia se aplica a un amplificador diferencial de alta ganancia que controla un regulador de corriente variable. Un margen de corriente continua de 3 a 19 mA con 1 mA del puente produce una señal de salida de 4 a 20 mA c.c. Esta corriente circula a través de la resistencia de realimentación Rfb y produce una caída de tensión que equilibra el puente. Como esta caída es proporcional a Rfb esta resistencia fija el intervalo de medida del transductor. El cero del instrumento se varía intercalando resistencias fijas en el brazo izquierdo del puente (cero basto) y un potenciómetro en el brazo derecho (cero fino).

La adición de un microprocesador permite añadir <<inteligencia>> al instrumento al hacer posible funciones adicionales, tales como la compensación de temperatura ambiente, proporcionando un aumento de la precisión de la medida, en particular si la señal de salida del instrumento es enteramente digital en lugar de la analógica de 4-20 mA c.c.

El intervalo de medida de los transductores de silicio difundido varía de 0-2 a 0-600 bar, con una precisión del orden de $\pm 0,2$ %.

Las galgas extensométricas pueden alimentarse con cc o ca. Tienen una respuesta frecuencial excelente y pueden utilizarse en medidas estáticas y dinámicas. Presentan una compensación de temperatura relativamente fácil y generalmente no son influidas por campos magnéticos. Con excepción de las galgas de silicio difundido poseen las siguientes desventajas: señal de salida débil, pequeño movimiento de la galga, alta sensibilidad a vibraciones y estabilidad dudosa a lo largo del tiempo de funcionamiento. La galga de silicio difundido tiene la ventaja adicional de estar en contacto directo con el proceso sin mecanismos intermedios de medición de la presión pudiendo así trabajar correctamente aunque el fluido se deposite parcialmente sobre el diafragma del elemento ya que mide directamente la presión del fluido y no la fuerza que éste hace sobre el diafragma.

2.3.7 Transductores piezoeléctricos

Los elementos piezoeléctricos figura 16 son materiales cristalinos que, al deformarse físicamente por la acción de una presión, generan una señal eléctrica. Dos materiales típicos en los transductores piezoeléctricos son el cuarzo y el titanato de bario, capaces de soportar temperaturas del orden de 150°C en servicio continuo y de 230°C en servicio intermitente.

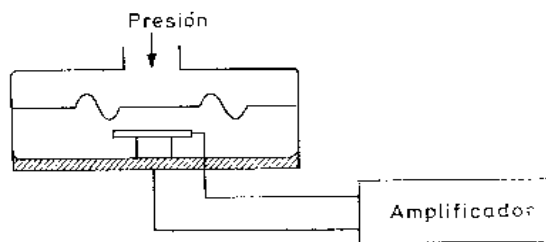


Figura 16. Transductor piezoeléctrico

Son elementos ligeros, de pequeño tamaño y de construcción robusta. Su señal de respuesta a una variación de presión es lineal y son adecuados para medidas dinámicas, al ser capaces de respuestas en frecuencia de hasta un millón de ciclos por segundo. Tienen la desventaja de ser sensibles a los cambios en la temperatura y de experimentar deriva en el cero y precisar ajuste de impedancias en caso de fuerte choque. Asimismo, su señal de salida es relativamente débil por lo que precisan de amplificadores y acondicionadores de señal que pueden introducir errores en la medición. [5]

En la tabla 4 pueden verse las características de los elementos electromecánicos descritos.

	Margen en bar	Precisión en % de toda la escala	Estabilidad en el tiempo	Sobre-carga	Temp. máx. de servicio °C	Nivel señal salida	Impedancia salida	Error de cero por influencia temperat. ambiente	Resolución	Sensibilidad a vibraciones
Equilibrio de fuerzas	2-6000	0,5	Media a mala	150 %	65	10 V	600 Ω	0,9-2,3 %	Continua	Alta
Resistivos	0-0,1 a 0-300	1	Mala	150 %	80	Variac. res.	0-Res. total	0,7-3 %	0,25 %	↓
Magnéticos	Inductancia variable ↓ Reluctancia variable	0,5	Media	150 %	↓	0-5 V	2 kΩ	0,9-2,3 %	Continua	↓
		1	Media	150 %	↓	0-5 V	2 kΩ	0,6-2,4 %	↓	
Capacitivos	0,05-5 a 0,05-600	1	Media a buena	150 %	150	↓	5 kΩ	0,5-1,9 %	↓	Media
Galgas extenso-métricas	Cementadas	0-0,5 a 0-3000	0,5	Mala	↓	120	35 mV	350 Ω	0,5-2,4 %	Alta
	Sin cementar	0-0,01 a 0-600	1	Mala	200 %	↓	↓	350 Ω	↓	↓
	Silicio difundido	0-2 a 0-600	0,3	Muy buena	200 %	107	2-10 V	600 Ω	0,4-1 %	↓	Despreciable
Piezoeléctricos	0,1-600	1	Mala	↓	90	600 mV/bar	1000 MΩ	1-4,8 %	1/5000	Baja

Tabla 4. Elementos electromecánicos

2.3.8 Elementos Electrónicos de Vacío.

Los transductores electrónicos de vacío se emplean para la medida de alto vacío, son muy sensibles y se clasifican en los siguientes tipos:

- Mecánicos Fuelle y Ionización Filamento caliente
- Diafragma Cátodo frío
- Radiación
- Medidor McLeod -
- Térmicos Termopar
- Pirani
- Bimetal

3. TRANSMISOR DE PRESIÓN SITRANS P

Según el modelo, el transmisor mide gases, vapores y líquidos que pueden ser agresivos, no agresivos y peligrosos.

Se puede emplear en los siguientes tipos de medición:

- Presión relativa
- Presión absoluta
- Presión diferencial

Con una parametrización adecuada también se puede utilizar en los siguientes tipos de medición:

- Nivel de relleno
- Volumen
- Masa
- Flujo de volumen
- Flujo de masa

La señal de salida es una corriente continua aplicada de 4 a 20 mA. Los transmisores cuya ejecución de aparato contempla el tipo de protección "seguridad intrínseca" o "envolvente antideflagrante" se pueden montar en áreas con peligro de explosión. Los transmisores con separadores también están disponibles en distintas formas constructivas para casos de aplicaciones especiales. Un caso de aplicación especial, por ejemplo, es la **medición de sustancias altamente viscosas**.

En la figura 17 se puede apreciar la vista de aparato del transmisor:

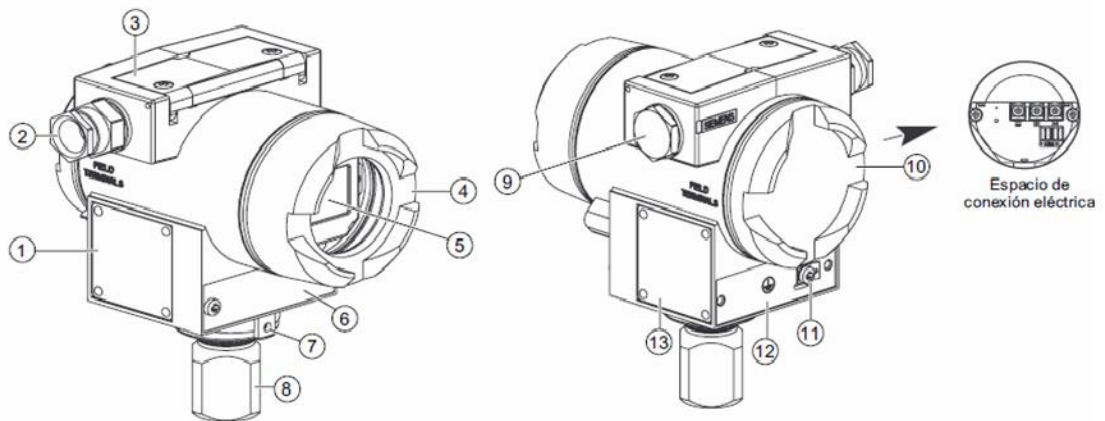


Figura 17 Vista de aparato del transmisor

- ① Placa de característica
- ② Alimentación con pasacables
- ③ Tapa para acceder a las teclas de manejo
- ④ Tapa destornillable, opcionalmente con mirilla
- ⑤ Indicador digital
- ⑥ Placa de puntos de medición
- ⑦ Tornillo de retención
- ⑧ Conexión al proceso
- ⑨ Tapón
- ⑩ Tapa destornillable para acceder al espacio de conexión eléctrica
- ⑪ Conexión del conductor de protección
- ⑫ Placa alternativa de puntos de medición

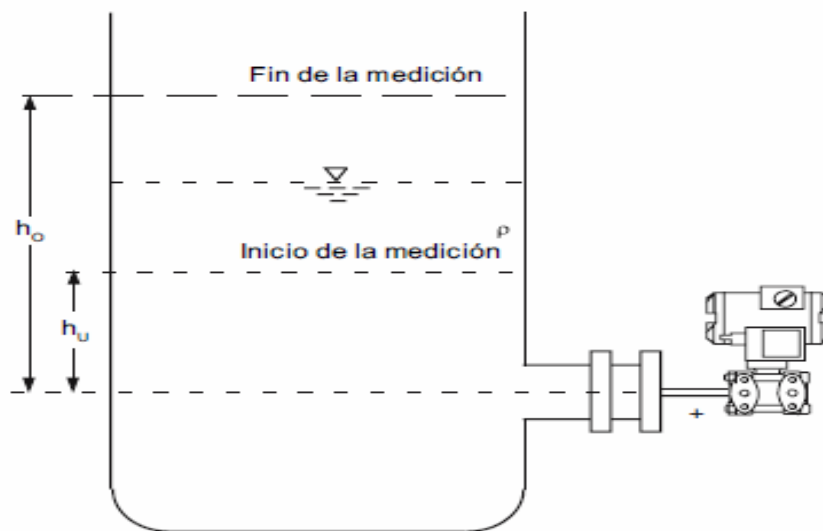
Figura 17. Vista de aparato del transmisor

3.1 DISPOSICIÓN DEL MONTAJE

En principio, el transmisor se puede colocar encima o debajo del punto de toma de presión. La posición recomendada depende del fluido.

3.1.1 Montaje con vapor o líquido.

Instale el transmisor situándolo por debajo del punto de toma de presión. Coloque la tubería de presión con una caída constante respecto al punto de toma de presión para que las inclusiones gaseosas puedan escapar por la tubería principal.



Disposición de medición con el depósito abierto

h_u	Inicio de la medición
h_o	Fin de la medición
p	Presión

Figura 18. Disposición de medición con el depósito abierto

3.2 CONEXIÓN DEL APARATO

- ① Separador de alimentación con carga incorporada
- ② Energía auxiliar
- ③ Introducción del cableado para energía auxiliar/terminal analógico
- ④ Bornes de conexión
- ⑤ Conector de prueba para amperímetro de corriente continua u opción de conexión para indicador externo
- ⑥ Base apantallada
- ⑦ Conexión de conductor de protección/borne de compensación de potencial
- ⑧ Introducción del cableado para señal del sensor

Figura 19. Conexión del aparato

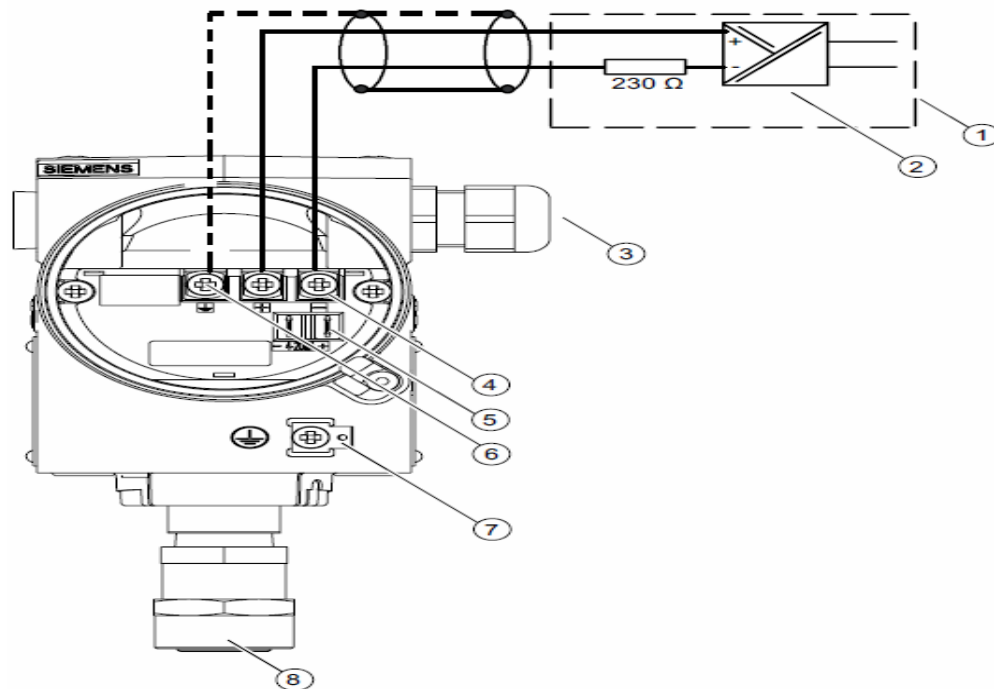


Figura 19. Conexión del aparato

3.3 INDICACIONES ACERCA DEL MANEJO

En el manejo del transmisor de presión se aplican las reglas siguientes:

- El aparato siempre incrementa progresivamente los valores numéricos desde el punto visualizado con el valor más bajo.

Si mantiene la tecla pulsada durante un tiempo prolongado, se incrementa el siguiente punto visualizado de valor más alto. Este método sirve para efectuar un rápido ajuste aproximativo en un rango de números extenso. Si desea efectuar un ajuste preciso, suelte de nuevo la tecla [↑] o [↓]. Vuelva a pulsar la tecla. Si el valor medido se sobrepasa o no se alcanza, esto se muestra en el indicador digital con las flechas [↑] o [↓].

- Si va a utilizar el aparato con el teclado, es preciso anular el bloqueo de las teclas de manejo.

3.4 ELEMENTOS DE LA PANTALLA DIGITAL

Estructura

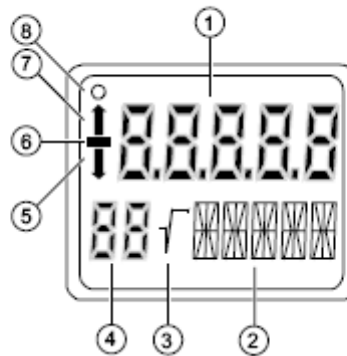


Figura 20. Elementos de la pantalla digital

- | | | | |
|---|---------------------------|---|------------------------------------|
| ① | Valor medido | ⑤ | Valor límite inferior no alcanzado |
| ② | Unidad/diagrama de barras | ⑥ | Signo precedente al valor medido |
| ③ | Indicación de raíz | ⑦ | Valor límite superior sobrepasado |
| ④ | Modo/bloqueo de teclas | ⑧ | Indicación de comunicación |

3.5 INDICACIÓN DEL MODO

Descripción:

La indicación del modo muestra el modo seleccionado que está activado. En el ejemplo, se ha ajustado en el modo 4 una atenuación de 0,2 segundos.

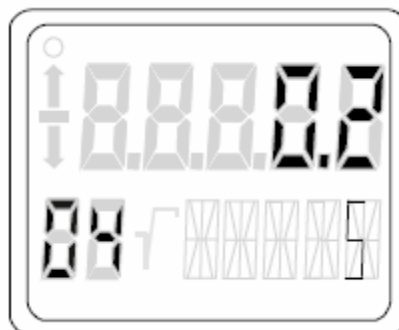


Figura 21. Indicación del modo

3.6 INDICACIÓN DE ESTADO

Descripción:

El significado de las flechas de la indicación de estado varía en función del ajuste de modo.

En la tabla 4 se describe el significado de las flechas en las distintas funciones.

Función	Modo	Función de tecla			Indicación, aclaraciones	
	[M]	[↑]	[↓]	[↑] y [↓]		
Valor medido	Active los modos en este punto.				El valor medido actual se muestra tal y como se haya ajustado en la función "indicación de valor medido, modo 13".	
Inicio de la medición (sólo con el tipo de medición "presión")	2	Corriente superior	Corriente inferior	Establezca 4 mA	Corriente de salida en mA	
Fin de la medición (sólo con el tipo de medición "presión")	3	Corriente superior	Corriente inferior	Establezca 20 mA	Corriente de salida en mA	
Atenuación eléctrica	4	Atenuación superior	Atenuación inferior	Establezca 0	Constante de tiempo T63 en segundos Rango de ajuste: de 0,0 s a 100,0 s	
Inicio de la medición en el denominado ajuste ciego	5	Presión superior	Presión inferior	Fije el inicio de la medición en 0	Inicio de la medición en la unidad de presión seleccionada	
Fin de la medición en el denominado ajuste ciego	6	Presión superior	Presión inferior	Fije el fin de la medición en el límite superior de medida	Fin de la medición en la unidad de presión seleccionada	
Compensación del cero (corrección de posición)	7	Valor de corrección superior	Valor de corrección inferior	Ejecute	Aíre el transmisor de presión relativa, presión diferencial, caudal o nivel de relleno. Evacue el transmisor de presión absoluta (< 0,1% del margen de medición). (El inicio de la medición no se ve influenciado.) Valor medido en la unidad de presión	
Sensor de corriente	8	Corriente superior	Corriente inferior	Conecte	Corriente de salida constante en mA "3,6"; "4", "12", "20" ó "22,8" Desconecte con la tecla [M].	
Corriente de salida en caso de fallo	9	Cambie entre la corriente de defecto inferior y la corriente de defecto superior.		Corriente de defecto inferior	Corriente de salida seleccionada posible: límites de la corriente de defecto ajustados por el usuario	
Bloqueo de teclas o bloqueo de función	10	Cambie entre las cinco funciones.		-	0	Ninguna
					LA	Todas bloqueadas
					LO	Todas bloqueadas excepto el inicio de la medición
					LS	Todas bloqueadas excepto el inicio y el fin de la medición
					L	Uso de la protección contra escritura no posible mediante HART
Curva característica ¹⁾	11	Cambie entre las cuatro funciones		Lineal	lin	Lineal
					srlin	Con extracción de raíz (lineal hasta el punto de aplicación)

Función	Modo	Función de tecla			Indicación, aclaraciones
	[M]	[↑]	[↓]	[↑] y [↓]	
					sroff Con extracción de raíz (desconectada hasta el punto de aplicación)
					sri2 Con extracción de raíz (lineal hasta el punto de aplicación 10%)
Punto de aplicación de la curva característica con extracción de raíz ¹⁾	12	Superior	Inferior	Caudal del 10%	Rango de ajuste con un caudal del 5 al 15%
Indicación de valor medido	13	Seleccione entre las tres opciones.		–	<ul style="list-style-type: none"> • Tipo de indicación (valor de entrada) • Corriente de salida en mA • Valor medido en %
Unidad	14	Seleccione en la tabla de indicación de valor medido.		Cada primer valor de la tabla de la unidad física	Unidad física

¹⁾ No relevante para presión relativa y presión absoluta

Tabla 5. Significado de las flechas en las distintas funciones.

El transmisor se utiliza in situ mediante las teclas de manejo. Los modos ajustables permiten activar y ejecutar las funciones descritas en la tabla.

En el ajuste básico, el aparato se encuentra en la indicación de valor medido. Para ajustar las funciones de manejo, proceda de la siguiente manera:

1. Suelte los dos tornillos situados en la tapa de las teclas y abra la tapa hacia arriba.
2. Pulse la tecla [M] repetidas veces hasta que aparezca el modo que desea.
3. Pulse la tecla [↑] o [↓] hasta que aparezca el valor deseado.
4. Pulse la tecla [M].

A continuación, los valores quedan guardados y el aparato pasa al modo siguiente.

5. Cierre la tapa de las teclas con los dos tornillos.

3.7 ELEMENTOS DE MANDO

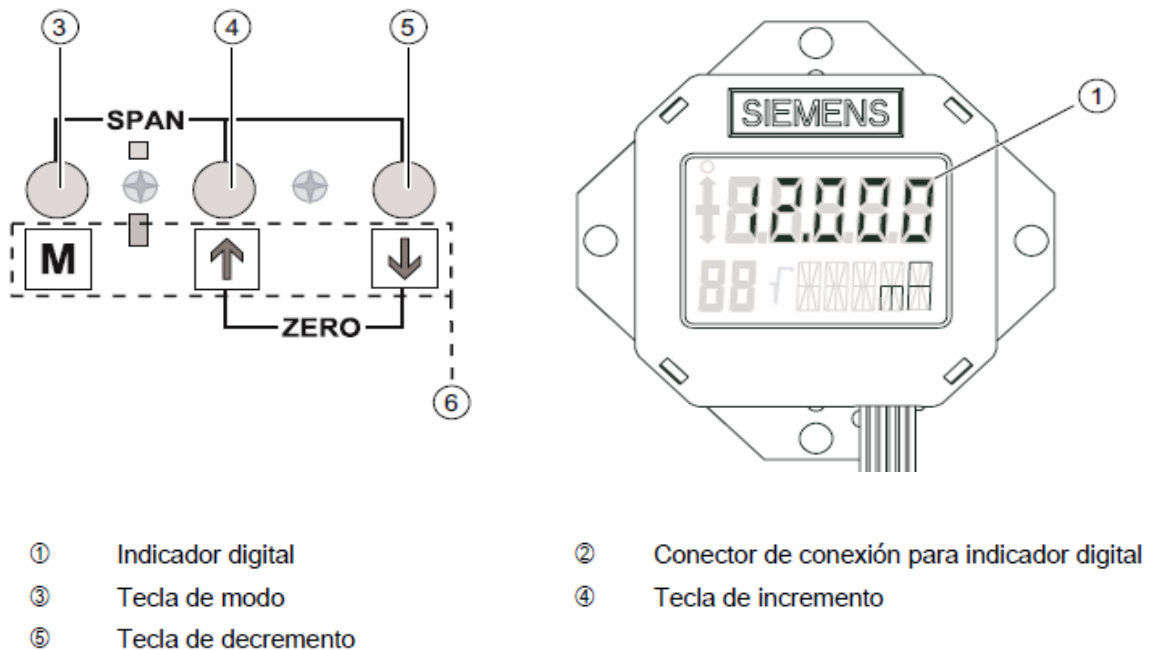


Figura 22. Elementos de mando

3.8 AJUSTE CON PRESION DE REFERENCIA

REQUISITO:

La presión de referencia existente, el inicio de la medición ajustado y el fin de la medición ajustado se conocen. Con el ajuste, al valor de corriente que desee se le puede asignar el inicio o el fin de la medición mediante una presión de referencia dentro de los límites de medida. Esta función resulta muy adecuada para aquellos casos en los que las presiones requeridas no están disponibles para el inicio y el fin de la medición. Una vez efectuado el ajuste, es posible que el rango de medida indicado en la placa de característica ya no coincida con el ajuste realizado.

Para calcular las corrientes de salida en el ajuste del inicio o del fin de la medición, es preciso seleccionar la presión de referencia de modo que para la corriente se obtenga un valor entre 4 y 20 mA. [6]

4. ARQUITECTURA INTERNA DE UN AUTÓMATA PROGRAMABLE

4.1 LOS AUTÓMATAS PROGRAMABLES

Un autómata es una máquina industrial susceptible de ser programada (autómata programable industrial API) al estar basada en un sistema de microprocesador dotado de un hardware estándar independiente del proceso a controlar. Se adapta a tal proceso mediante un programa de usuario específico (software), escrito en algún lenguaje de programación y que contiene la secuencia de operaciones a realizar.

El programa, realizado y depurado en una unidad de programación propia o ajena al autómata, se incorpora a la memoria de programa del mismo, para su ejecución por la Unidad Central de Proceso (CPU) del autómata.

La secuencia de operaciones del programa se realiza sobre señales de entrada y salida del proceso, llevadas al bus interno del autómata a través de las correspondientes interfaces de entrada y salida (E/S). El autómata gobierna las señales de salida según el programa de control previamente almacenado en su memoria de programa, a partir del estado de las señales de entrada. Los tipos de interfaces de E/S son muy variados, según las características de las señales procedentes del proceso o las que se van a aplicar al mismo (señales analógicas de tensión o corriente, pulsos de 0/5 V, 0/24V, tensiones alternas 110V, 220 V, tensiones continuas 12/24/48V, etc). En la mayoría de los APIs, el número (hasta la capacidad permitida por la CPU), tipo y ubicación de las interfaces lo define el usuario, adaptando así el autómata, junto con su programa, a las necesidades de su proceso.

Ejemplos de señales de entrada son las procedentes de elementos digitales, como interruptores, finales de carrera y detectores de proximidad, o analógicos, como tensiones de dinamos tacométricas, tensiones de termopares, etc.

Ejemplos de señales de salida son las órdenes digitales todo o nada o analógicas en tensión o corriente, que se envían a los elementos indicadores y actuadores del proceso, tales como lámparas, contactores, válvulas, etc.

Ha de hacerse constar como característica esencial de los APIS, el disponer de un hardware estándar que posibilita la realización de sistemas de control de acuerdo con las necesidades del usuario. La elección del API (gama baja, media o alta) será función de las necesidades de potencia de cálculo y número y tipo de señales de entrada y de salida.

4.2 ARQUITECTURA Y CONFIGURACIÓN

La configuración del autómata, llamada arquitectura interna, como en todo sistema microprocesador, incluye fundamentalmente los siguientes cuatro bloques básicos: una CPU o unidad central de proceso, una memoria interna de trabajo (RAM), una memoria de programa (RAM, EPROM, EEPROM), y las interfaces de entradas y salidas conectadas al bus interno. A su vez, tanto la CPU como la memoria de programa están conectadas a dicho bus interno.

Las instrucciones de un programa de usuario almacenado en la memoria de un API son ejecutadas correlativamente generando unas órdenes o señales de control a partir de las señales de entrada leídas de la planta. Cuando se detectan cambios en las señales, el autómata reacciona de acuerdo con el programa hasta que obtiene las órdenes de salida necesarias. Esta secuencia se ejecuta continuamente a fin de conseguir el control actualizado del proceso.

Además de ejecutar las instrucciones del programa, el autómata realiza un conjunto de acciones que aseguran su funcionamiento correcto: test de CPU y memoria, comprobación del reloj de guarda, etc. La secuencia o ciclo de operación consta básicamente de las siguientes etapas:

1. Test del sistema.
2. Lectura de señales desde la interface de entrada.
3. Escritura de señales en la interface de salida.

4. Procesado del programa a fin de obtener las señales de control.

Para reducir los tiempos de acceso a las interfaces de E/S, la lectura y escritura de las entradas y salidas involucradas se realiza a la vez, guardando las entradas leídas en una memoria temporal o imagen de entradas a la que accede la CPU mientras ejecuta el programa, en tanto que los resultados o señales de control se van guardando en otra memoria temporal o imagen de salidas a medida que se van obteniendo. Al terminar la ejecución del programa los resultados se colocan de una sola vez en la interface de salida.

Aparte de las cuatro etapas descritas anteriormente, el autómata eventualmente puede establecer comunicación con periféricos exteriores, por ejemplo para sacar datos por impresora, comunicación con otros autómatas u ordenadores, conexión con la unidad de programación, etc.

Las anteriores acciones, repitiéndose periódicamente, definen un ciclo de operación que requiere un cierto tiempo (dependiendo del número de entradas y salidas, y de la longitud del programa) para ser ejecutado, de modo que el autómata no puede responder en tiempo real a sucesos que ocurren en el sistema exterior. Este tiempo será determinante cuando con el autómata se pretendan controlar procesos rápidos, con señales de muy corta duración o alta frecuencia de conmutación.

Los retardos aportados por entradas o salidas son debidos, respectivamente, al filtrado de señal que incorporan (filtro pasa bajo), y a los tiempos de respuesta del interruptor (relé, transistor, etc.) o convertidor digital/analógico.

Para las entradas, los retardos típicos oscilan entre 10 ms y 100 ms, aunque hay autómatas que permiten ajustes del tiempo de filtro menores.

Para los tiempos típicos, la frecuencia máxima de señal de entrada queda limitada entre 100 Hz y 10 Hz, de forma que cualquier señal de frecuencia superior, o de periodo T menor que el tiempo de filtro, no podrá ser leída desde las entradas estándar del autómata.

Los anteriores problemas debidos a los retardos pueden reducirse de las siguientes maneras:

- Para las entradas, con elementos de entrada de proceso rápido: filtrado débil asociado a programa de ejecución rápida, entradas detectoras de flancos o entradas de contador rápido.
- Para el tiempo de procesado del programa: escribiendo subprogramas rápidos contenidos en el principal asociado a algún elemento de proceso rápido y activado periódicamente.
- Para las salidas: utilizando elementos semiconductores en sustitución de relés electromecánicos.

En general se dice que un autómatas es capaz de controlar en tiempo real un proceso, cuando sus tiempos de respuesta o retardo son muy pequeños comparados con los tiempos de reacción del mismo.

La configuración del autómatas es la estructura que tiene su sistema físico (hardware), fundamentalmente la unidad de control, el sistema de E/S y la memoria, de modo que pueda adaptarse a las características particulares de la aplicación industrial en que vaya a usarse.

Siendo la modularidad una de las características fundamentales de los autómatas, la elección de la configuración adecuada resulta fácil al ofrecer sus fabricantes una amplia variedad de módulos y ampliaciones.

En cuanto a la unidad de control las configuraciones son:

- Unidad de control compacta (control centralizado). Es el caso en el que una única CPU gestiona tanto el programa como las entradas y salidas asociadas, agrupadas en módulos que contienen exclusivamente interfaces E/S. Esta configuración se usa en aplicaciones de poca complejidad, dando lugar a los llamados microautómatas y miniautómatas.
- Unidad de control modular (control distribuido). En aplicaciones de mayor complejidad, en lugar de una única CPU, existen varios módulos con tarjetas o unidades de proceso propias e incluso con sus interfaces de E/S. Es lo que se denomina estructura de multiprocesadores o con control distribuido. Cada procesador trabaja sobre subprogramas (partes del programa de usuario) o específicamente sobre otras aplicaciones concretas (regulación, posicionamiento, etc.) con su propio programa de tratamiento. En la estructura de multiprocesadores las unidades de proceso están conectadas a una unidad central (CPU maestra o principal) que gestiona el sistema en conjunto y permite el intercambio de datos entre el resto de las unidades e interfaces. En algunas aplicaciones es interesante duplicar la CPU o algún otro elemento del autómatas, configuración de seguridad, de modo que esta redundancia

permite un funcionamiento ininterrumpido aún en caso de avería, por conmutación al elemento de reserva.

El sistema de entradas-salidas de un autómata es el conjunto de interfaces E/S que hacen posible la conexión de la CPU con la planta y la identificación de las señales de ésta mediante una tabla de direcciones. Dada la modularidad característica de los autómatas, en casi todos ellos puede ampliarse el número de E/S mediante la conexión a la CPU de módulos de expansión con interfaces de E/S adicionales. En cuanto al sistema de entradas/salidas, las configuraciones pueden ser:

- Sistema de E/S centralizado. Es aquel en el que las interfaces de E/S se comunican con el autómata directamente a través de su bus interno, o a lo sumo mediando un amplificador de bus si se emplea un bastidor de ampliación, pero sin mediar procesadores de comunicación.
- Sistema de E/S distribuido. Es aquel en el que se necesitan procesadores de enlace de E/S conectados sobre el bus interno para la comunicación entre los módulos de E/S y la CPU. Estos procesadores de enlace son los encargados de amplificar, serializar y transmitir las informaciones entre las expansiones y la CPU del autómata base, mediante una línea común. En función de las distancias de conexión y de las prestaciones del enlace distribuido, éste puede ser local o remoto.

En cuanto a la capacidad de almacenamiento (memorias), en general los autómatas disponen de suficiente memoria como para realizar el mando y control de la mayoría de los procesos industriales, si bien en casos de aplicaciones con gran volumen de información a gestionar puede ser necesaria la instalación de una memoria de masa adicional que, conectada directamente a las unidades de programación y bajo el control de la CPU puede intercambiar datos con la memoria de trabajo.

En resumen, dada la amplia gama de autómatas existente en el mercado y la modularización de sus elementos, es posible en cualquier caso encontrar la configuración adecuada para una determinada aplicación.

4.2.1 Interfaces de Entrada/Salida

Son muchos los automatismos industriales que necesitan de una cadena de realimentación para poder ejecutar un control en lazo cerrado con una regulación precisa y rápida. La cadena de realimentación se alimenta de

las magnitudes de la planta a controlar (entradas), que son captadas mediante sensores o transductores y cuyas salidas han de adaptarse en unos circuitos llamados de interface para su procesamiento por el autómata.

Por otra parte, las débiles señales de control generadas por el autómata han de actuar, generalmente previa amplificación, sobre la parte de potencia de la planta. A los elementos finales que actúan sobre la parte de potencia de la planta se les denomina accionamientos, y a los elementos intermedios que interpretan las señales de control y las amplifican se les denomina preaccionamientos.

En el control de cualquier proceso ha de existir un diálogo entre el operador y la máquina a controlar (diálogo hombre-máquina), y una comunicación entre el sistema de control y la máquina a controlar.

Traducido lo anterior a un autómata, supone que a éste le lleguen un conjunto de señales, de mando y de realimentación que se denominan entradas.

Por otra parte, el operador ha de conocer ciertos datos sobre la evolución del proceso y los accionamientos han de recibir las órdenes precisas para controlarlo, a todo lo cual se denominan salidas.

A todo el conjunto de entradas-salidas (E/S), es a lo se le denomina comúnmente "medios de diálogo operador-máquina y máquina-controlador".

Tanto las entradas como las salidas pueden consistir en señales todonada (final de carrera, electroválvula, etc.), señales analógicas (velocidades, temperaturas, presiones) y señales digitales (contadores).

Una característica ventajosa y esencial de los autómatas programables, frente a otros controladores digitales, es el disponer de un bloque de interfaces E/S muy potente que les capacita para conectarse directamente con los sensores y accionamientos del proceso. De ahí que de la adecuada elección de las interfaces E/S se derive una alta fiabilidad y disponibilidad del sistema.

Teniendo en cuenta lo anterior, es frecuente que sistemas de control complejos que incorporan un ordenador central con gran potencia de cálculo, utilicen como elemento de interface con el proceso industrial un autómata programable.

Además de los tipos de interface que intervienen en el proceso industrial propiamente dicho, existen otros tipos de interface dedicados a funciones específicas que incluso incluyen su propia CPU.

Además de las interfaces estándar digitales y analógicas, disponibles para todas las gamas de autómatas, existen otros tipos de interfaces llamadas específicas que, de modo opcional, pueden ser incorporadas al autómata base como tarjetas o módulos en las máquinas de las gamas media y alta.

Tales interfaces específicas hacen posible la conexión con elementos o procesos particulares de la planta, pudiendo realizar funciones muy variadas: manejo de señales particulares (códigos binarios, impulsos, señales analógicas débiles, etc.), regulación (PID, comparadores, control numérico), presentación de sinópticos y control (SCADA), posicionamiento de ejes, contadores rápidos, etc.

Por la función que realizan, las interfaces específicas pueden clasificarse como: de E/S especiales, de E/S inteligentes, y procesadores periféricos inteligentes.

Las interfaces con E/S especiales son interfaces análogas a las estándar pero que tratan señales particulares por su forma o por su aplicación, pero sin ningún control sobre las variables de la planta. El tratamiento de las señales está predeterminado y no es modificable por el usuario que sólo puede actuar sobre los modos de trabajo o algún parámetro de la tarjeta mediante instrucciones de programa o por microsuiches externos.

Las interfaces con E/S inteligentes permiten diferentes modos de configuración ordenados por programa, e incorporan un control elemental que posibilita, utilizando señales binarias propias de la tarjeta, establecer lazos de regulación ON-OFF sobre variables de la planta, en funcionamiento transparente para la CPU. Desde la CPU y por el programa de usuario se envían las consignas y controles necesarios a estas interfaces.

Tal forma de actuar descarga de trabajo a la unidad central y mejora de paso la capacidad de direccionamiento al poder acceder a señales de E/S que no han de aparecer en su memoria imagen.

Finalmente, los procesadores periféricos inteligentes son tarjetas o módulos que disponen de su propio procesador, memoria y puntos auxiliares de E/S. Tales procesadores incorporan de origen un programa o intérprete de programa especializado para la ejecución de una tarea específica, al que sólo se le han de fijar las consignas y los parámetros de aplicación para que, de forma autónoma y sin intervención de la CPU principal ejecute el programa de control.

Los procesadores periféricos, de uso mucho más general que las interfaces con E/S inteligentes, necesitan de mucha más información para definir, además de la configuración del periférico: las condiciones de

aplicación y de entorno, las condiciones de control (respuesta en función de la evolución del proceso) y las consignas a seguir. A todos los anteriores valores, que en definitiva no programan sino que parametrizan la tarjeta, se les denomina programa de la interface y son enviados al periférico desde la CPU principal o desde la unidad de programación.

Aunque las tareas que realizan las interfaces específicas podrían realizarse por el programa de usuario desde la CPU principal, su especialización permite evitar o minimizar problemas tales como: a) Parte de las E/S estándar del autómata serían ocupadas para el tratamiento, a veces sin éxito, de señales específicas que por su naturaleza (por ejemplo tiempo de respuesta), pueden requerir un tratamiento especial, b) El aumento de la dificultad de programación, y c) El incremento del tiempo de ciclo del autómata que retardaría las reacciones del mismo ante el proceso y que, en el caso de procesamiento rápido de señales causaría problemas. [7]

4.3 PROGRAMACIÓN

El autómata es una máquina electrónica integrando elementos de hardware que son capaces de comunicarse físicamente con un proceso para:

- a) Recibir desde el proceso algunas variables (analógicas o digitales) que determinan su estado y que se denominan señales de entrada.
- b) Enviar otras variables que modifiquen tal estado en un determinado sentido, y que se denominan señales de salida.

Por su condición de programable, es necesaria la intervención de un operador humano que defina cómo ha de evolucionar el proceso y que intercambie información con el autómata para:

- a) Establecer mediante una secuencia de instrucciones (programa), cuál ha de ser la ley general de mando. De la ejecución de tal programa se obtienen las señales de salida o de control.
- b) Intervenir, esporádica o continuamente sobre el proceso a efectos de informarse de su estado o de modificar su evolución.

Al apartado a) se le denomina programación del autómata y a la secuencia de instrucciones programa de la aplicación.

Al apartado b) se le llama comúnmente explotación de la aplicación, mediante la cual se pueden modificar ciertos parámetros (consignas, tiempos, módulos de cuenta, etc.), pero no modificar el programa.

Las intervenciones sobre la planta se realizan normalmente mediante el autómatas, si bien en casos de fuerza mayor (parada de emergencia por motivos de seguridad), el operador puede actuar directamente sobre el proceso.

El intercambio de información entre autómatas y proceso corre a cargo de las interfaces de E/S, en tanto que la comunicación con el operador para programación/explotación requiere de un software que haga de intérprete entre el sistema real y los deseos del usuario.

De este modo puede decirse que este software es "el conjunto de programas que posibilitan la utilización del hardware para el control y la explotación de las aplicaciones".

De acuerdo con la anterior definición, las herramientas de software son clasificables como: a) Sistemas operativos residentes en el propio autómatas que tienen la misión de establecer las secuencias de intercambios de información, interpretar y ejecutar las instrucciones del usuario y vigilar el correcto funcionamiento del equipo, y b) Software de edición/depuración de programas, que permite al usuario introducir su propio programa sobre soportes físicos tipo cinta, disco, etc., modificarlo para perfeccionarlo, obtener la documentación que se precise del proceso y, en su caso sacar copias de seguridad.

Según los casos, el software de edición/depuración puede ser residente, es decir está instalado en la máquina o, es instalable sobre un terminal denominado unidad de programación que a su vez puede ser autónoma o dependiente de la CPU. Las misiones de la unidad de programación son fundamentalmente: a) Permitir la edición, depuración y modificación del programa y, b) Servir de interface física entre el usuario y el autómatas, a fin de poder transferir programas y realizar la supervisión y el control del equipo.

Las instrucciones u órdenes que el usuario introduce en el programa han de ser entendibles por el autómatas, es decir que han de ser codificadas mediante los lenguajes de programación y explotación prefijados por el fabricante.

Por tanto, el lenguaje de programación puede definirse como "el conjunto de símbolos y textos, entendibles por la unidad de programación, que utiliza el usuario para codificar sobre un autómatas las leyes de control que desea". Asimismo, el lenguaje de explotación se definiría como "el conjunto de comandos y órdenes que, desde la CPU u otro terminal

adecuado, puede enviar el usuario para conocer el estado del proceso, y en su caso para modificar alguna variable".

En esencia, el usuario introduce su secuencia de instrucciones (programa) en la unidad de programación, en un lenguaje que entienden ambos. La unidad de programación compila (convierte) las instrucciones del programa a unos códigos binarios, únicos que entiende el autómata (código máquina del autómata) y los almacena en la memoria.

Finalmente el sistema operativo residente interpreta tales códigos binarios para activar los recursos físicos que requiere la ejecución del programa (procesador, interfaces E/S, etc.).

En la tarea de programación del autómata, es decir de establecer el programa a introducir en la unidad de programación, han de seguirse los siguientes pasos:

1. Establecer mediante un diagrama de flujo, una descripción literal o gráfica (GRAFSET, RdP, etc.) que indique qué es lo que se quiere que haga el sistema y en qué orden.
2. Identificar las señales de E/S del autómata.
3. Representar de forma algebraica (instrucciones literales o de textos) o gráfica (símbolos gráficos) un modelo del sistema de control con las funciones que intervienen, con las relaciones entre las mismas y con la secuencia a seguir.
4. Asignar a cada uno de los elementos que figuran en el modelo direcciones de E/S o internas.
5. Codificar la representación del paso 3 en instrucciones o símbolos entendibles por la unidad de programación (lenguaje de programación). Cada instrucción del programa consta de dos partes: el código de operación, que dice qué se ha de hacer y el código de los operandos (identificados por su dirección) que dicen sobre qué variables, o constantes, se ha de operar.
6. Transferir el conjunto de instrucciones escrito en la unidad de programación a la memoria del autómata.
7. Depurar, poner a punto el programa y guardar una copia de seguridad.

En cuanto a los lenguajes de programación a utilizar: literales o gráficos ha de decirse que depende de la aplicación a que se destina e incluso de la costumbre o hábito del programador. No obstante seguidamente se comentan las características fundamentales de ambos:

- Lenguajes literales: Formados por instrucciones elementales del programa, cada una de las cuales es una secuencia de textos. Las instrucciones disponibles dependen de la complejidad del lenguaje y van desde muy sencillas funciones lógicas (AND, OR, NOR) hasta las estructuras complejas de programación de alto nivel (FOR...NEXT, DO, WHILE, etc.), o instrucciones de manipulación de textos y valores numéricos, o instrucciones de acceso a bloques secuenciales (TIM, CNT, etc.).
- Lenguajes gráficos: Tienen su origen en los esquemas eléctricos de relés y utilizan símbolos de contactos y bobinas para las instrucciones básicas y símbolos de bloques lógicos para las extensiones al lenguaje, con una potencia similar a la de los lenguajes literales de alto nivel y con la ventaja de visión de conjunto que proporciona la representación gráfica.

En la automatización de procesos usuales, de no mucha complejidad (cadenas de montaje, control de máquinas, etc.), puede utilizarse indistintamente un programa a base de lista de instrucciones o uno a base de diagrama de contactos, lenguajes básicos para la mayoría de autómatas. Tanto es así que varios fabricantes prevén en su software de programación sobre PC la posibilidad de transcodificación entre ellos con sencillas operaciones de compilación/descompilación.

Para aplicaciones complejas que requieran manipular largas cadenas de caracteres, realizar muchos cálculos, utilizar subrutinas o bloques de programación específicos (regulación PID, posicionamiento de ejes, conteo rápido, etc.), podría ser necesaria la utilización de lenguajes literales de alto nivel que también permiten programar sencillas sentencias booleanas o manejar contadores y temporizadores como listas de instrucciones.

La tendencia actual de los fabricantes en cuanto a los lenguajes de programación se centra en integrar los lenguajes antedichos en un lenguaje mixto que aúne la claridad de los lenguajes gráficos para las funciones combinatorias y secuenciales con la compacidad de los literales para el manejo de textos y los cálculos matemáticos.

Para el logro del mencionado lenguaje mixto se ha de actuar en los siguientes campos:

- a) Potenciar el uso de estructuras de programación avanzada en los lenguajes gráficos (GRAFSET a menor nivel y RdP a nivel

superior) y aumentar el número de las actuales instrucciones de expansión.

- b) Permitir el uso de instrucciones literales dentro de un programa gráfico, tratándolas como tales instrucciones dentro del programa o como subrutinas accesibles desde él.
- c) Desarrollar herramientas de edición con las que el usuario pueda almacenar sus sentencias en un bloque de expansión dentro de la librería disponible.

En definitiva y en lo referente a los lenguajes de programación, se prevé una evolución de los lenguajes gráficos en el sentido de hacerlos más potentes, más abiertos y de más fácil manejo por el usuario que, progresivamente podrá desarrollar sus aplicaciones sobre terminales tipo PC.

Los bloques funcionales, de mayor o menor complejidad, añaden al lenguaje básico instrucciones preprogramadas por el fabricante, de uso general en automatización (contadores, temporizadores, transferencias, registros, etc.) aumentando así la potencia de cálculo del autómeta y simplificando su programación.

Tales bloques, que pueden introducirse en programas escritos en lenguajes literales, lenguajes de alto nivel y lenguajes gráficos, se clasifican en dos grupos en función de su forma de operar y su disponibilidad en el programa:

- Bloques secuenciales básicos: Aquellos que son de uso generalizado en todo tipo de autómetas, incluidos los de la gama baja (contadores, biestables, temporizadores y registros de desplazamiento).
- Bloques de expansión o funciones: Son los que hacen posible el tratamiento de variables numéricas y el registro de datos, con sentencias aritméticas (comparación, transferencias, etc.), aumentando así la potencia del lenguaje.

Los bloques secuenciales básicos se pueden considerar parte de los lenguajes básicos del autómeta, en tanto que los bloques de expansión son extensiones de aquellos.

El usuario ha de adaptar los anteriores bloques funcionales a sus particulares necesidades fijando las condiciones de trabajo: nombre de los registros con los que desea operar (direcciones), valores de temporizaciones en los temporizadores, direcciones de origen y destino en las transferencias, etc.

Los bloques funcionales, en su caso más general hacen intervenir tres tipos de variables asociadas: a) Condiciones de operación (entradas).- Son las que definen la habilitación y control del bloque, b) Operandos de función.- Son aquellos sobre los que actúan las sentencias preprogramadas del bloque funcional, y c) Salidas asociadas cuyo estado depende de la ejecución del bloque.

A su vez, los operandos de función pueden ser: a) Parámetros iniciales que normalmente permanecen inalterados una vez fijados por programa o transferidos desde consola, y b) Datos de operación (constantes o variables expresadas en palabras de 8/16 bits y que muestran el estado de valores internos, E/S, resultados, etc.

Los datos (numéricos o alfanuméricos) que se usan como operandos pueden corresponder a:

- a) Constantes (números o caracteres ASCII) definidos en el programa.
- b) Textos preprogramados escritos en alguna unidad de memoria o dispositivo exterior.
- c) Variables numéricas (caso más usual) en: contadores o temporizadores (valores actuales), registros internos, canales de datos de 8/16 bits de E/S (p.e. resultado binario de una conversión A/D).

A pesar de que el usuario puede definir en su programa los anteriores datos en cualquier base (decimal, BCD, hexadecimal, etc), siendo que los datos internos que maneja el autómata son siempre binarios, han de ser convertidos automáticamente por el intérprete a tal base.

Según los fabricantes, un bloque funcional es considerado como elemento de un diagrama de contactos o como una sentencia literal en lista de instrucciones (con ciertas reglas de sintaxis).

Los programas de autómata para un proceso determinado pueden escribirse según estructuras monotarea y multitarea.

Si se define la tarea como "un conjunto de sentencias ejecutables que describen un tratamiento limitado y concreto sobre ciertas variables de un proceso", una estructura monotarea sobre una aplicación determinada es la que se desarrolla sobre una tarea única incluyendo la totalidad del programa, con todas sus variables de E/S y todas las sentencias de operación. Por el contrario, una estructura multitarea es aquella en que el programa está integrado por subprogramas, independientes o no, dando

lugar a tareas aisladas referidas a tratamientos parciales y particulares de la aplicación

(Comunicaciones, supervisión, etc.).

Cuando la estructura es monotarea, la totalidad del programa (tarea única) se ejecuta periódicamente siguiendo un ciclo único de operación, en tanto que en estructuras multitarea se desarrollan varios ciclos a la vez durante la ejecución, uno por tarea, pudiendo además ejecutarse periódicamente o no las distintas tareas.

En cualquier caso, el ciclo de operación de cualquier tarea (tanto en estructuras mono como multi), recorre la típica secuencia de cuatro pasos:

1. Recogida de entradas.
2. Escrutinio del programa (de la tarea en operación).
3. Actualización de salidas
4. Servicio a terminales de explotación y/o periféricos.

Como puede verse, en una estructura multitarea cada tarea constituye una unidad de programación completa, con sus propias E/S, variables internas e instrucciones de control, lo cual permite optimizar la ejecución cuando se dispone de un hardware con varios procesadores adaptados a los distintos tipos de tratamiento de la información (tratamiento de textos, booleano, regulación, etc.). Como contrapartida, este hardware multiprocesador ha de ser coordinado por un gestor de recursos (software) que asegure a cada tarea el acceso a los mismos y evite la conflictividad en su uso compartido.

En efecto, el gestor de recursos es un ente software que puede ser parametrizado por el usuario a fin de fijar las prioridades de las tareas de su programa, y que dependiendo del fabricante puede correr sobre una CPU coordinadora (específica) o sobre la CPU principal.

Del mismo modo que los procesadores periféricos montados en bastidor pueden considerarse como parte de una misma unidad de control, los programas que se ejecutan sobre ellos (con lectura y generación de señales sin intervención de la CPU principal) pueden también considerarse como parte de un tratamiento multitarea.

La clasificación anterior de estructuras de programación (mono y multitarea), fuertemente dependiente de la configuración del hardware de la unidad de control, no ha de confundirse con las metodologías de programación a utilizar.

En efecto, una vez elegida para la aplicación a desarrollar un tipo de estructura mono o multitarea para su programación, cada una de las tareas parciales ha de ser programada en una secuencia de sentencias que puede obedecer a una metodología de programación lineal o estructurada.

En cuanto a la metodología a utilizar se dice que la programación es lineal cuando las sentencias están ordenadas en el mismo orden en que se van a consultar, y en su caso a ejecutar. Por el contrario, se dice que la programación es estructurada cuando la tarea de control está repartida en módulos o subprogramas relativos a distintas funciones y cuya ejecución puede ser necesaria varias veces dentro de un mismo ciclo de ejecución del autómata.

A pesar de que la programación estructurada de una tarea se realiza con mayor eficiencia en autómatas con coprocesadores en su CPU que estén especializados en las funciones de cada subprograma, resulta también posible sobre autómatas con CPU única, que ejecutará los subprogramas o módulos en el orden en que sean llamados por el programa principal. En este sentido ha de hacerse constar que existen módulos pregrabados por el fabricante (para realizar tareas concretas o gobernar interfaces específicas) que pueden ser adaptados por el usuario a su aplicación concreta con sólo parametrizarlos adecuadamente.

En resumen, puede decirse que si bien, tanto los tratamientos monotarea como los multitarea pueden desarrollarse en autómatas con un solo procesador o con varios procesadores, ha de ser el programador quien según la complejidad de la aplicación, la estructure o subdivida de la forma más eficiente posible de acuerdo con los recursos hardware de que disponga.

Finalmente, obsérvese como la programación en lenguajes gráficos (GRAFCET o RdP) también puede ser considerada como una programación estructurada especialmente útil para la programación de los procesos secuenciales.

En cualquier aplicación con autómata programable, tanto durante la fase de concepción, edición y depuración del programa como durante la fase de operación o explotación del sistema, es necesaria una comunicación o diálogo hombre-máquina. En la primera fase el hombre (programador) carga el programa en la memoria del autómata, verifica su funcionamiento observando la evolución de las variables (monitorización) y en su caso modifica su estado en variables lógicas o su valor en variables alfanuméricas (forzado).

En la segunda fase o fase de explotación, sigue siendo conveniente y a menudo imprescindible la comunicación entre el hombre (operador) y la planta, a fin de conocer (monitorizar) a través del autómata los valores de ciertas variables claves para el correcto desarrollo del proceso y su control, variables que en su caso pueden modificarse (forzado).

Las comunicaciones descritas entre el hombre (programador/operador/usuario) y el autómata se realizan mediante dispositivos específicos o mediante la utilización de un entorno software que corre sobre un PC. Los dispositivos específicos, genéricamente denominados "Unidades de Programación y Servicio" proporcionan la comunicación entre el programador y la máquina en la fase de programación y la comunicación entre la planta y el usuario en la fase de observación y control (explotación).

Las anteriores comunicaciones se realizan siempre sobre el autómata, que para ello dispone de los conectores adecuados, en la CPU para la programación y en la CPU o procesadores auxiliares de comunicaciones para la explotación y el servicio.

En general existe una gran variedad de dispositivos conectables a un autómata, bien directamente o vía modem, aportando soluciones a necesidades del proceso muy dispares: unidades específicas de programación o entornos software sobre PC, para la edición y puesta a punto de programas de autómata; unidades de explotación desde un visualizador de baja funcionalidad hasta un terminal gráfico interactivo pasando por visualización de mensajes asociados a la evolución del programa, impresión de textos, intercambio de datos con otros equipos, etc.

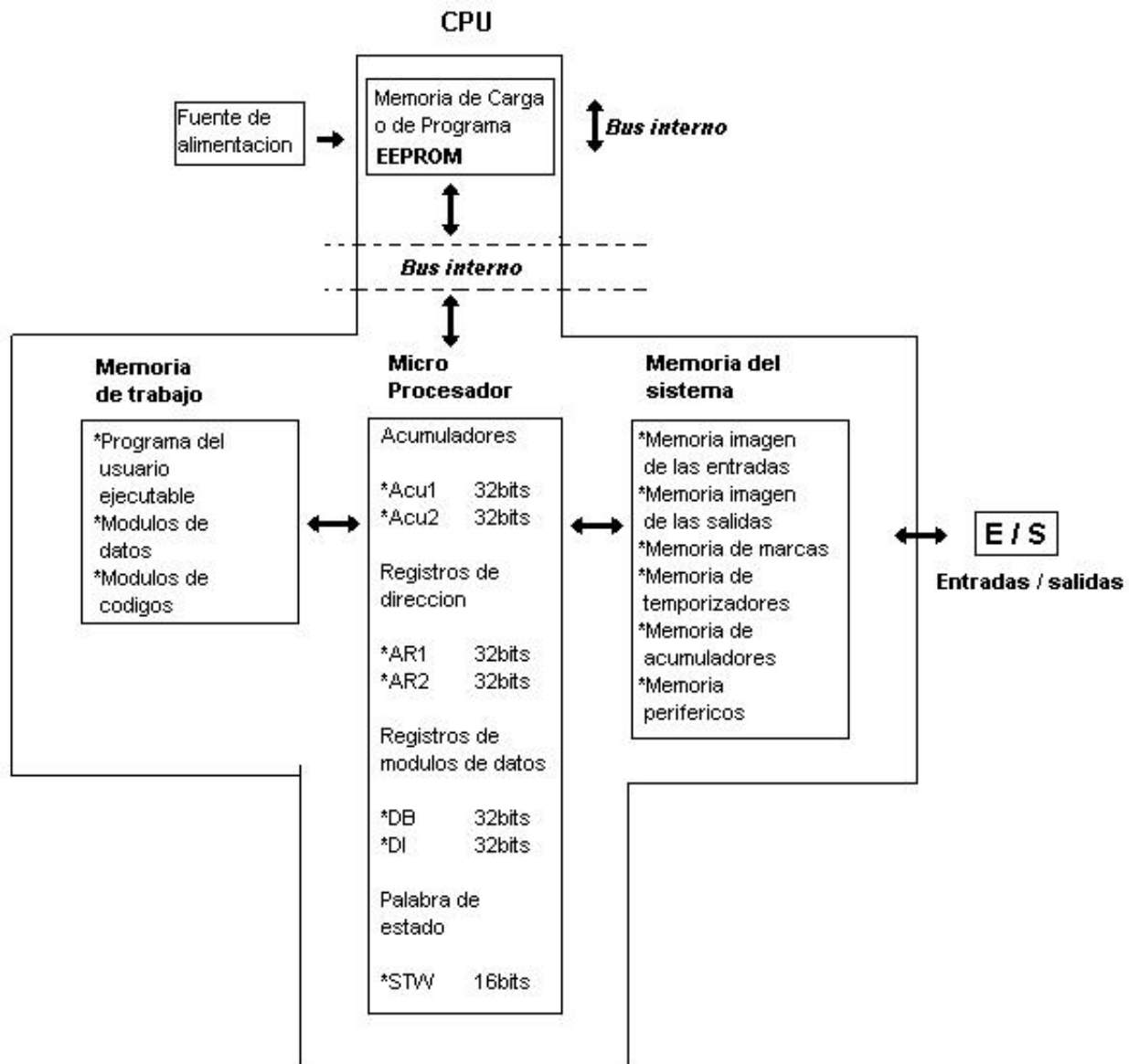


Figura 23. Arquitectura interna de un autómata programable

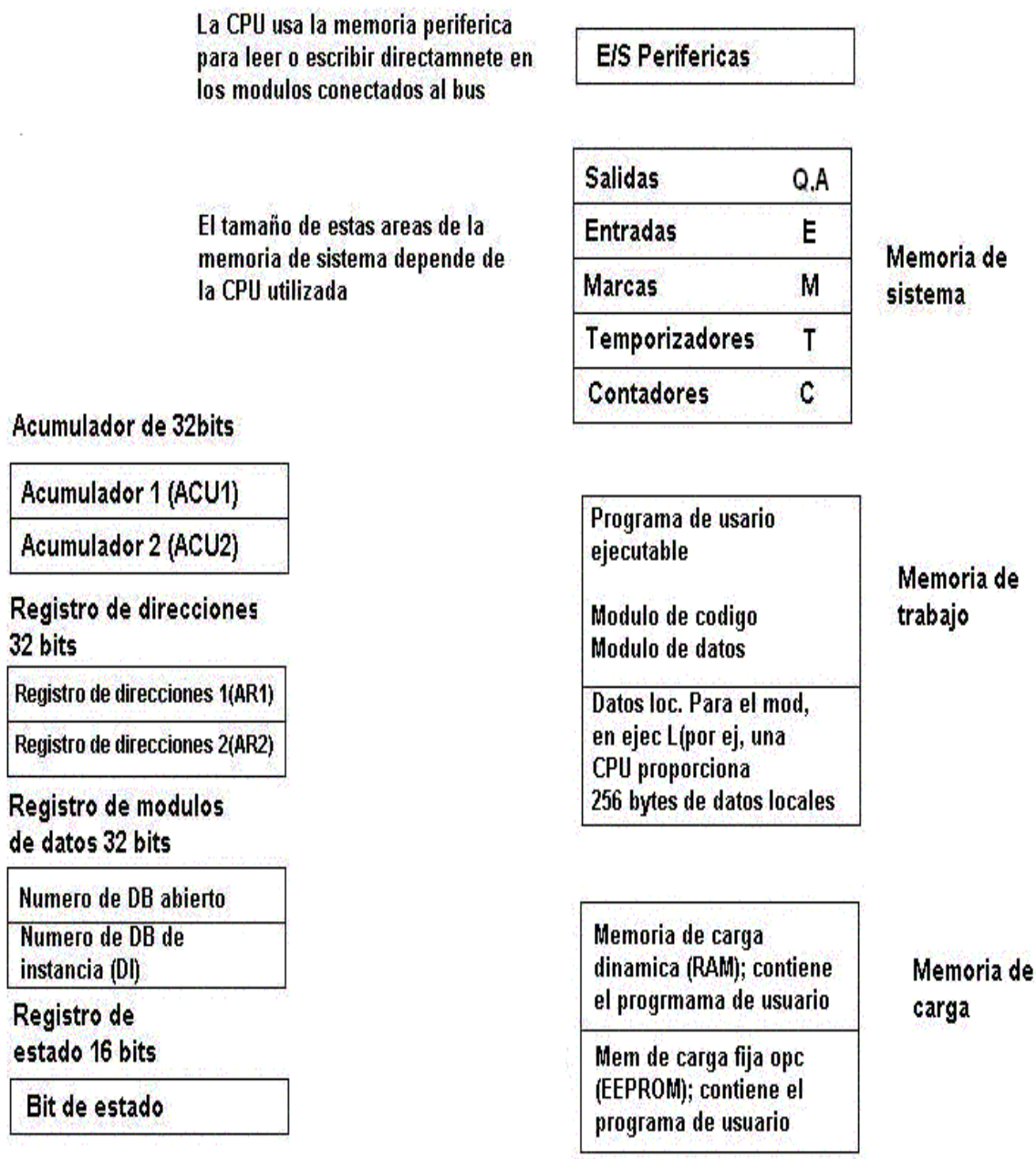


Figura 24. Registros de la CPU

En las figuras se puede observar las partes de la **CPU** del autómata **Simatic S7**. Como sé observar la unidad central de procesamiento contiene los siguientes registros:

4.4 REGISTROS

Todas las CPU Simatic S7 disponen de una serie de registros que se emplean durante la ejecución del programa de usuario. No vamos a comentar todos ellos, sólo los que realmente empleemos en la programación:

4.4.1 Acumuladores (ACU1 y ACU2)

El acumulador 1 (ACU 1) y el acumulador 2 (ACU 2) son dos registros universales de 32 bits que se emplean para procesar bytes, palabras y palabras dobles. En estos acumuladores se pueden cargar constantes o valores depositados en la memoria como operandos y ejecutar operaciones lógicas con ellos. También es posible transferir el resultado en ACU 1 a una dirección (un módulo de datos, una salida, etc.).

Cada acumulador puede descomponerse en dos palabras de 16 bits (palabra baja y alta). La palabra baja contiene los bits de menor peso y la alta los de mayor peso lógico.

Todas las posibles operaciones que pueden realizarse son:

- Cargar: que siempre actúa sobre ACU 1 y guarda el antiguo contenido en ACU 2 (perdiéndose el valor antiguo de ACU 2). La carga de una palabra actúa sobre la palabra baja del ACU 1.
- Transferir: copia el contenido de ACU 1 en una dirección de memoria, sin perder el valor de los acumuladores.
- Intercambiar el contenido de los acumuladores: Mediante la instrucción TAK.
- Realizar una operación entre los acumuladores, almacenando el resultado en ACU 1 sin variar ACU 2. Las operaciones pueden ser de comparación, de lógica digital y de aritmética

4.4.2 Registro o palabra de estado.

La palabra de estado contiene bits que pueden accederse en él operando de las operaciones lógicas con bits y con palabras, la siguiente figura muestra la estructura de la palabra de estado.

2^{15} ...	...	2^9	2^8	2^7	2^6	2^5	2^4	2^3	2^2	2^1	2^0
			RB	AI	AO	OV	OS	OR	STA	RLO	/ER

- BIT 0 (ER): el bit 0 de la palabra de estado se denomina bit de primera consulta (bit/ER). Si la señal del bit /ER es 0 significa que la siguiente operación lógica da inicio a otra cadena lógica (la barra delante de ER significa su negación), cada operación lógica consulta el estado del bit/ER, así como el estado de señal del operando, si el bit/ER es 0 la operación almacenara el resultado en el bit RLO de la palabra de estado (bit RLO) y se pone el bit/ER a 1 este proceso se denomina primera consulta.

Cada operación lógica comprueba el estado de señal del bit /ER así como el estado de señal del contacto direccionado, El estado de señal del bit /ER determina en qué lugar debe almacenar la operación el resultado de la consulta del contacto direccionado. Si el bit /ER es "0" la operación almacena el resultado en el bit RLO de la palabra de estado; este proceso se denomina primera consulta. El "1" o "0" almacenado en el bit RLO tras la primera consulta de denomina resultado de la primera consulta.

Programa AWL		Estado de señal en la entrada (E) o salida (A)	Resultado consulta de memoria	Bit RLO	Bit /ER	Explicación
					0	Bit /ER=0, indica que la próxima operación inicia una cadena lógica
U	E	1.0	1	1	1	El resultado de la primera consulta se almacena en el bit RLO, el bit /ER se pone a "1"
UN	E	1.1	0	1	1	El resultado de la consulta se combina con el RLO precedente de acuerdo con la tabla de verdad "Y". El bit /ER permanece en "1"
=	A	4.0	1	1	0	El RLO se asigna a la bobina de salida El bit /ER se pone a "0"

Figura 25. Primera consulta de la palabra de estado

- BIT 1 (RLO): este bit se conoce como bandera de resultado lógico este bit almacena el resultado de una operación lógica binaria o de una comparación aritmética.

La operación SET coloca en 1 lógico el bit RLO y la instrucción CLR borra el estado lógico.

- BIT 2 (STA): este bit se conoce como de estado, se coloca en 1 con las operaciones de escritura en memoria como
 - Operaciones de almacenamiento de memoria (set reset)
- Operaciones de transferencia o escritura en memoria del contenido del ACC, el bit STA se coloca en 1 con las operaciones de lectura en memoria: U, UN, O, ON, X, XN
- BIT 3 (OR): se requiere para el proceso Y delante de O. Este bit indica que una operación Y ha dado valor 1, en las restantes operaciones es 0.
- BIT 4 (OV): bit de desbordamiento. Se activa (1) por una operación aritmética o de comparación de coma flotante tras producirse un error (desbordamiento, operación no admisible, o relación incorrecta).
- BIT 5 (OS): bit de desbordamiento memorizado. Se activa junto con OV e indica que previamente se ha producido un error. Solo puede cambiar a cero con la instrucción SPS, una operación de llamada a módulo, o porque se ha alcanzado el fin del módulo.
- BITS 6 (A0) y 7 (A1): códigos de condición. Dan información sobre los resultados o bits siguientes:
 - Resultado de una operación aritmética.
 - Resultado de una comparación.
 - Resultado de una operación digital.
 - Bits desplazados por una instrucción de desplazamiento o rotación.
- BIT 8 (RB): resultado binario. Permite interpretar el resultado de una operación de palabras como resultado binario e integrarlo en la cadena de combinaciones lógicas binarias.

4.4.3 Registros 1 Y 2 de direcciones.

Son dos registros de 32 bits cada uno. Se emplean como punteros en operaciones que utilizan un direccionamiento indirecto de registros.

4.4.4 Registros de módulos de datos (DB).

Dos registros con los números de los DB abiertos (activos). Se puede abrir 2 DB a la vez; uno como modulo de datos y el otro como modulo de datos de instancia (un DB global es el de uso general para todos los módulos de código de programa mientras un DB “de instancia” proporciona la memoria utilizada por una llamada específica o “instancia”, de un FB). Por ejemplo, se abre un modulo de datos global con la instrucción u operación de AWL “abrir DB” y se abre un DB de instancia llamado un FB y asignándolo un DB como su DB de instancia. La instrucción “abrir DI” permite abrir otro DB distinto como DB de instancia.

4.5 TEMPORIZADORES Y CONTADORES

4.5.1 Temporizadores (T)

En el Simatic S7 vamos a disponer de una serie de temporizadores que nos van a permitir realizar una serie de acciones:

- Realizar tiempos de espera.
- Supervisar acciones durante un tiempo determinado (tiempo de vigilancia).
- Generar impulsos.
- Medir tiempos de proceso.

4.5.2 Contadores (Z)

Al igual que los temporizadores vamos a disponer de una serie de contadores que nos permitirán efectuar contajes, tanto hacia adelante como hacia atrás.

4.6 CLASIFICACIÓN DE LAS DIFERENTES ÁREAS DE MEMORIA DE ACUERDO A SU FUNCIÓN

Las áreas de memoria interna a la CPU de un autómata programable (en nuestro caso un S7) posee las siguientes áreas de memoria:

- Memoria de sistema
- Memoria de trabajo
- Memoria de carga

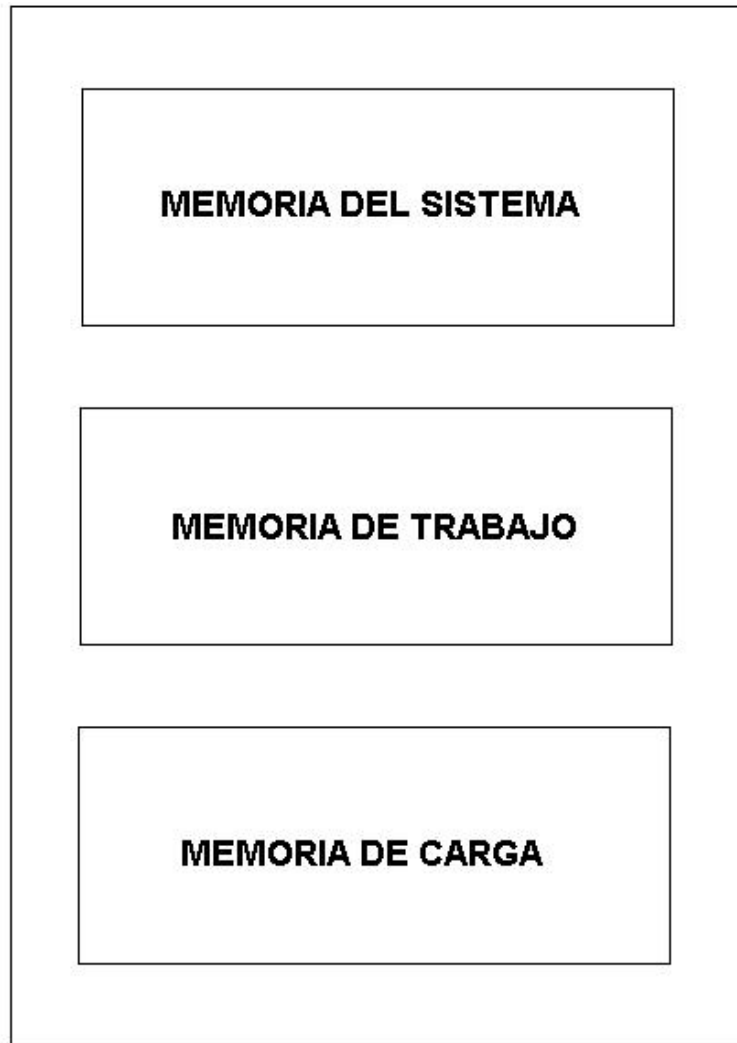


Figura 26. Clasificación de las diferentes áreas de memoria de acuerdo a su función

4.6.1 Memoria de trabajo de la Cpu S7

Las áreas de memoria básicas están organizadas en grupos funcionales. La tabla describe estas áreas de memoria. Las instrucciones en su

programa utilizan estas áreas de memoria para direccionar o manejar los datos:

Nombre	Área de memoria	Descripción
<i>Entrada(E)</i>	Imagen de proceso de las entradas	<p>Al principio del ciclo de trabajo, el sistema operativo lee las entradas del proceso y almacena los valores en esta imagen del proceso. El programa utiliza estos valores durante su procesamiento normal</p> <p>En cada ciclo de trabajo de CPU se almacena el estado de las entradas en la imagen de proceso correspondiente, la cual corresponde a los 128 primeros bytes de la memoria de entradas periféricas.</p>
<i>Salida (A)</i>	Imagen de proceso de las salidas	<p>Durante el ciclo de trabajo, el programa calculo los valores de salida y los escribe en esta imagen de proceso. Al final del ciclo de trabajo, el sistema operativo lee en esta imagen los valores de salida calculados y los transfiere a las salidas del proceso</p> <p>La imagen del proceso de las salidas corresponde a los 128 primeros bytes de la memoria de salidas periféricas</p>
<i>Marca(M)</i>	Marcas	<p>Esta área sirve para almacenar los resultados intermedios calculados por el programa. El usuario define si hay que acceder a los datos en formato de bit, byte, palabra, etc.</p> <p>Como ejemplos de esta memoria se tienen los relés de control o las marcas internas usadas por el programa</p>
<i>Entrada periférica(P E)</i>	E/S: Entradas internas	La memoria periférica permite acceso directo a los dispositivos de campo (físicos o entradas y salidas externas)

<i>Salida periférica(PA)</i>	E/S: Salidas externas	La memoria periférica puede ser direccionada en formato de byte, palabra y palabra doble, pero no como bits.
<i>Temporizador(T)</i>	Temporizadores	Esta área sirve para almacenar las celdas de tiempo. El temporizador accede a las celdas en esta área para actualizarse disminuyendo el valor de tiempo existente en ellas. Las instrucciones de temporización acceden aquí a las celdas de tiempo.
<i>Contador(Z)</i>	Contadores	Esta área sirve para almacenar valores de contadores, las instrucciones de contaje acceden aquí a ellas
<i>Datos locales temporales (L)</i>	Pila de datos locales (pila L)	Esta área es asignada cuando se ejecuta un FB, FC u OB. El tamaño de esta área está definido en parte por las variables temporales (TEMP) expresadas en la tabla que de declaración de variables del módulo y que sirven como búferes intermedios. La pila L proporciona también espacio para transferir ciertos tipos de parámetros así como para el almacenamiento provisional de los resultados de segmentos KOP. Cuando acaba la ejecución del módulo la memoria temporal vuelve a ser asignada. Las diversas CPU ofrecen diferentes tamaños de memoria local por lo que si desea más información habrá de consultar las hojas de datos para su CPU
<i>Módulo de datos (DB)</i>	Parte del programa	Los módulos de datos (DB) almacenan información para el programa. Pueden ser diseñados para uso general por cualquier módulo de código (DB globales) o específicamente para un FB (DB de instancia).

Tabla 6. Áreas de memoria de la CPU

Rangos o márgenes máximos de direcciones. La tabla 6 relaciona los rangos o márgenes máximos de direcciones para las diferentes áreas de memoria.

Nombre del área	Acceso al área vía unidades del siguiente tamaño	Abreviación	Máximo
Imagen de proceso de entradas	Bit de entrada	E	0.0 a 65,535.7
	Byte de entrada	EB	0 a 65,535
	Palabra de entrada	EW	0 a 65,534
	Palabra doble de entrada	ED	0 a 65,532
Imagen de proceso de salidas	Bit de salida	A	0.0 a 65,535.7
	Byte de salida	AB	0 a 65,535
	Palabra de salida	AW	0 a 65,534
	Palabra doble de salida	AD	0 a 65,532
Marcas	Bit de memoria	M	0.0 a 255.7
	Byte de memoria	MB	0 a 255
	Palabra de memoria	MW	0 a 254
	Palabra doble de memoria	MD	0 a 252
E/S entradas externas E/S salidas externas	Byte de entrada periférica	PEB	0 a 65,535
	Palabra de entrada periférica	PEW	0 a 65,534
	Palabra doble de entrada periférica	PED	0 a 65,532
	Byte de salida periférica	PAB	0 a 65,535
	Palabra de salida periférica	PAW	0 a 65,534
	Palabra doble de salida periférica	PAD	0 a 65,532
	Temporizadores	Temporizadores(17	T	0 a 255
Contadores	Contadores	Z	0 a 255
Módulos de Datos	Bit modulo de datos abierto con la instrucción "AUF DB"		

	Bit de datos		
	Byte de datos	DBX	0.0 a 65,535.7
	Palabra de datos	DBB	0 a 65,535
	Palabra doble de datos	DBW	0 a 65,534
		DBD	0 a 65,532
	Modulo de datos abierto con la instrucción "AUF D"		
	Bit de datos		
	Byte de datos	DIX	0.0 a 65,535.7
	Palabra de datos	DIB	0 a 65,535
	Palabra doble de datos	DIW	0 a 65,534
		DID	0 a 65,532
Datos locales temporales	Bit de temporales	L	0.0 a 65,535.7
	Byte de temporales	LB	0 a 65,535
	Palabra de temporales	LW	0 a 65,534
	Palabra doble de temporales	LD	0 a 65,532
Módulos de datos	Modulo de datos	DB 1	1 a 65,532

Tabla 7. Rangos o márgenes máximos de direcciones para diferentes áreas de memoria.

4.7 DIRECCIONAMIENTO FÍSICO DE LOS PUERTOS DE ENTRADA Y SALIDA

La dirección de las posiciones de memoria se pueden asignar por defecto teniendo en cuenta la posición del modulo con respecto a la posición de la CPU del sistema, suponiendo que el hardware sistema se encuentra configurado.

Direcciones digitales E/S por defecto		Fila 3	IM recepcion + Alimen- tacion	96.0 a 99.7	100.0 a 103.7	104.0 a 107.7	108.0 a 111.7	112.0 a 115.7	116.0 a 118.7	120.0 a 123.7	121.0 a 127.7
		Fila 2	IM recepcion + Alimen- tacion	64.0 a 67.7	68.0 a 72.0	72.0 a 75.7	76.0 a 79.7	80.0 a 83.7	84.0 a 87.7	88.0 a 91.7	92.0 a 95.7
		Fila 1	IM recepcion + Alimen- tacion	32.0 a 35.7	36.0 a 39.7	40.0 a 43.7	44.0 a 47.7	48.0 a 51.7	52.0 a 55.7	56.0 a 59.7	60.0 a 63.7
		Fila 0	CPU + Alimen- tacion	IM emisión	0.0 a 3.7	4.0 a 7.7	8.0 a 11.7	12.0 a 15.7	16.0 a 19.7	20.0 a 23.7	24.0 a 27.7	28.0 a 31.7

Tabla 8. Esquema de direccionamiento por defecto E/S digitales

Direcciones analogicas E/S por defecto		Fila 3	IM recepcion + Alimen- tacion	640 a 655	656 a 671	672 a 687	688 a 703	704 a 719	720 a 735	736 a 751	752 a 767
		Fila 2	IM recepcion + Alimen- tacion	512 a 527	528 a 543	544 a 559	560 a 575	575 a 591	592 a 607	608 a 623	624 a 639
		Fila 1	IM recepcion + Alimen- tacion	394 a 399	400 a 415	416 a 431	432 a 447	448 a 453	467 a 479	480 a 495	496 a 511
		Fila 0	CPU + Alimen- tacion	IM emisión	256 a 271	272 a 287	288 a 303	304 a 319	320 a 335	336 a 351	352 a 367	368 a 383

Tabla 9. Esquema de direccionamiento E/S análogas

4.7.1 Tipos de datos.

Los operandos de las instrucciones se componen de un dato que puede ser de distintos tipos. Los tipos de datos posibles son:

E	entrada
A	salida
M	marca
P	periferia (acceso directo)
L	datos locales
T	temporizador
Z	contador
DB	módulo de datos

Cada uno de estos tipos se puede direccionar en 4 posibles modos (salvo T y Z):

- Por defecto (X para DB): Bit.
- B: byte (8 bits).
- W: palabra (16 bits).
- D: palabra doble (32 bits).

4.7.2 Memoria de marcas

Cuando realicemos nuestro programa y operemos en el ámbito de bit en operaciones lógicas (and, or, etc.) puede que nos aparezca la necesidad de almacenar el resultado lógico que tengamos en un determinado momento. Para ello disponemos de 256 marcas de memoria de 1 byte, es decir un total de 2048 marcas de 1 bit, que podemos direccionar como:

Marcas	M	0.0 a 255.7
Byte de marcas	MB	0 a 255

Palabra de marcas	MW	0 a 254
Palabra doble de marcas	MD	0 a 252

4.7.3 Entradas y salidas

Tal y como comentamos anteriormente, manejaremos una imagen de las entradas y las salidas. El número de e/s disponibles dependerá del tipo de CPU que empleemos, además de los módulos externos que tengamos conectados. Como máximo el autómata puede manejar hasta 65536 bytes para cada tipo de e/s. En cada caso podemos direccionar como:

IMAGEN DEL PROCESO DE LAS ENTRADAS (PAE):

Entrada	E	0.0 a 65535.7
Byte de entrada	EB	0 a 65535
Palabra de entrada	EW	0 a 65534
Palabra doble de entrada	ED	0 a 65532

IMAGEN DEL PROCESO DE LAS SALIDAS (PAA):

Salida	A	0.0 a 65535.7
Byte de salida	AB	0 a 65535
Palabra de salida	AW	0 a 65534
Palabra doble de salida	AD	0 a 65532

ENTRADAS EXTERNAS:

Byte de entrada de la periferia	PEB	0 a 65535
Palabra de entrada de la periferia	PEW	0 a 65534
Palabra doble de entrada de la periferia	PED	0 a 65532

SALIDAS EXTERNAS:

Byte de salida de la periferia	PAB	0 a 65535
Palabra de salida de la periferia	PAW	0 a 65534
Palabra doble de salida de la periferia	PAD	0 a 65532

Todas estas entradas y salidas pueden ser de tres tipos:

- E/S digitales: son las e/s más frecuentes y que en mayor cantidad vamos a tener. Ocupan 4 bytes de memoria de direcciones, comenzando desde la 0.0 hasta la 127.7.
- E/S digitales de alarma/error: no son e/s adicionales, se configuran dentro de Step7 y ocupan una de las e/s digitales normales.
- E/S analógicas: estas si son e/s adicionales, pero no obstante hay que configurarlas también desde Step7 para especificar el rango de direcciones que van a ocupar. Ocupan 2 bytes de memoria de e/s (16 bytes por módulo) y se sitúan en el rango de direcciones 256 a 383.

4.8 REGISTROS DE MÓDULOS DE DATOS

El Simatic S7 dispone de una serie de módulos que dividen la memoria de programa y la de datos en secciones, permitiendo una programación estructurada y un acceso ordenado a los datos. El número de módulos va a depender del tipo de CPU empleada, disponiendo en general de los siguientes:

4.8.1 Módulos de organización (OB)

Constituyen la forma de comunicación entre el sistema operativo de la CPU y el programa de usuario. Existen 3 tipos de OB, los cuales están accesibles o no según el tipo de CPU:

- OB 1 (ciclo libre): es el módulo principal, el que se ejecuta cíclicamente y del que parten todos los saltos a otros módulos.

+-----+

```

| | ==> +-----+
| | | |
| | <=== +-----+
| OB1 |
| | ==> +-----+
| | | | ==> +-----+
| | | | | |
| | | | <=== +-----+
| | <=== +-----+
+-----+

```

- OB de error y alarma: son los que contienen la secuencia de acciones a realizar en caso de que se produzca una alarma o error programado.

OB de arranque: en este módulo podemos introducir valores por defecto que permiten el arranque definido a la instalación, bien en un arranque inicial o tras un fallo en la alimentación.

4.8.2 Módulos de código (FC).

Son módulos en los que podemos incluir parte del programa de usuario con lo que obtenemos un programa mucho más estructurado. A estos módulos se pueden acceder desde otro módulo FC o desde un módulo OB.

En total podemos manejar hasta 128 módulos de código.

4.8.3 Módulos de funciones (FB).

Son módulos de programa especiales. Aquí se introducen las partes de programa que aparecen con frecuencia o poseen gran complejidad. Posee una zona de memoria asignada para guardar variables (módulo de

datos de instancia). Lo que se hace es enviar parámetros al FB y guardar algunos de los datos locales en el módulo de datos de instancia.

En total podemos manejar hasta 128 módulos de funciones.

4.8.4 Módulos de datos (DB).

Son áreas de memoria destinadas a contener datos del programa de usuario. Existen módulos de datos globales y de instancia. A los datos contenidos en un módulo de datos es posible acceder de forma absoluta o simbólica. Los datos complejos o compuestos pueden depositarse en forma de estructura. Los módulos de datos pueden ser de dos tipos:

- **Módulos de datos globales:** se pueden utilizar por cualquier módulo del programa.
- **Módulos de datos de instancia:** se asignan a un determinado módulo de función y solo pueden manejarse desde dicho módulo. Pueden asignarse varios módulos de datos de instancia a un módulo de función.

En total podemos manejar hasta 127 módulos de datos.

4.8.5 Módulos de funciones especiales (SFB).

Se tratan de módulos ya programados, los cuales están preparados para realizar acciones complejas como regulación PID (lazo cerrado), medida de frecuencia, etc.

4.8.6 Módulos de funciones del sistema (SFC).

Son funciones integradas en el sistema operativo de la CPU y que se pueden llamar en caso de necesidad desde el programa de usuario.

La serie Simatic S7 dispone de la capacidad de poder interrumpir el programa de usuario para poder atender de forma inmediata o retardada a un determinado evento. Las respuestas a las alarmas se deben programar, para definir los módulos OB a los cuales se saltará cuando se produzcan.

Se puede definir la prioridad de las alarmas, dando un orden de preferencia en la respuesta de las mismas, lo cual es imprescindible en aquellas situaciones en que se presenten varias alarmas.

También se puede bloquear el tratamiento de las alarmas y eventos de error, aunque no puede ser desactivado por la llamada de una FC estándar, si esta FC estándar incluye también los citados eventos que se habilitan nuevamente.

Para la programación de los eventos de alarma y error asíncrono se emplean las SFC 39 a 42 (ver Manual STEP7 Diseño de programas). [7]

Las alarmas están subdivididas en diferentes clases. La siguiente tabla contiene todas las clases de alarmas y sus OB correspondientes:

Clase de alarma	OB
Alarmas horarias	OB 10 a OB 17
Alarmas de retardo	OB 20 a OB 23
Alarmas cíclicas	OB 30 a OB 38
Alarmas de proceso	OB 40 a OB 47
Alarmas de comunicación	OB 50 y OB 51
Alarmas de error asíncrono	OB 80 a OB 87 (siguiente tabla)
Alarmas de error síncrono	OB 121 y OB 122 El tratamiento de las alarmas de error asíncrono se enmascara o desenmascara con las SFC 36 a 38.

Tabla 10. Clases de alarmas y sus OB correspondientes

La siguiente tabla contiene los eventos de error asíncrono, a los cuales se puede reaccionar llamando el OB correspondiente en el programa de usuario.

Eventos de error asíncrono	OB
Error de tiempo (ej. sobrepasar el tiempo de ciclo)	OB

	80
Fallo de la alimentación (ej. pila agotada)	OB 81
Alarma de diagnóstico (ej. fusible defectuoso en un módulo de señales)	OB 82
Fallo de inserción del módulo (ej. módulo sacado o mal insertado)	OB 83
Error de hardware de la CPU (ej. cartucho de memoria sacado)	OB 84
Error de proceso del programa (ej. OB no fue cargado)	OB 85
Ha fallado toda la fila	OB 86
Error de comunicación (ej. error de datos globales)	OB 87

Tabla 11. Eventos de error asíncrono a los cuales se puede reaccionar llamando el OB correspondiente

5. MÓDULO ANALÓGICO DE ENTRADA SM331; AI 8 X 12 BIT

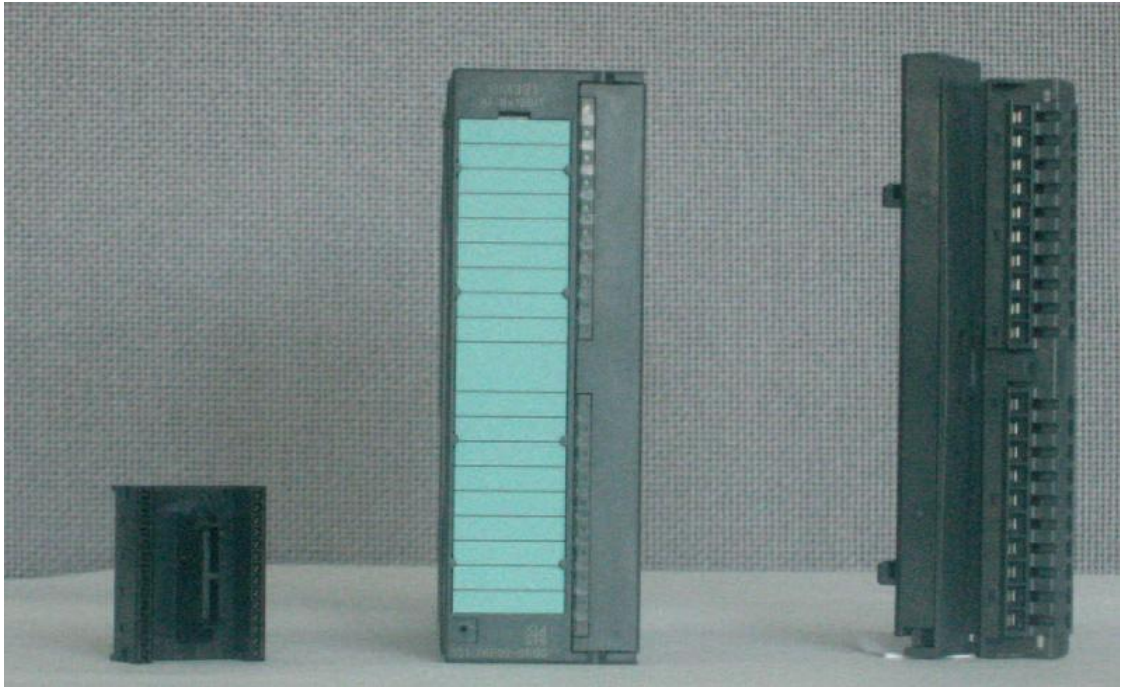


Figura 27. Módulo analógico

5.1 PROPIEDADES DEL MÓDULO ANALÓGICO

Este módulo es un módulo analógico universal usado en las aplicaciones más corrientes.

El tipo de medida deseado se ajusta directamente en el módulo utilizando los adaptadores de margen de medida al efecto

- 8 entradas en 4 grupos de canales (cada grupo tiene dos entradas del mismo tipo)
- La resolución de medida es ajustable para cada grupo de canales
- Margen de medida ajustable para cada grupo de canales:
 - Tensión
 - Intensidad
 - Resistencia

- Temperatura
- Alarma de diagnóstico parametrizable
- Dos canales con alarmas de límite (parametrizable sólo en canal 0 y canal 2)
- Aislamiento galvánico respecto a la interfaz al bus posterior
- Aislamiento galvánico respecto a la tensión de carga (excepción: como mínimo un adaptador de margen de medida esté enchufado en la posición D).

5.2 REPRESENTACIÓN DE LOS VALORES ANALÓGICOS

La representación binaria de los valores analógicos es la misma que para todos los módulos analógicos del S7-300

Los valores analógicos para todos los márgenes de medida o márgenes de salida que pueden utilizarse con los módulos analógicos S7-300 se presentan en este apartado.

5.2.1 Representación de los valores analógicos de entrada y salida.

La CPU solo puede tratar valores analógicos en forma binaria.

Los módulos de entrada analógicas convierten una señal analógica procedente del proceso en una señal digital.

Los módulos de salida analógicas convierten una señal de salida digital en una señal analógica.

Un valor analógico digitalizado de un mismo margen nominal es el mismo, tanto si se trata de un valor de entrada como de salida.

Los valores analógicos se representan en forma de complemento a 2.

La tabla 11 representa los valores analógicos de los módulos analógicos.

Resolución	Valor analógico															
Numero de bit	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0

Peso del bit	S 2 ¹⁴ 2 ¹³ 2 ¹² 2 ¹¹ 2 ¹⁰ 2 ⁹ 2 ⁸	2 ⁷ 2 ⁶ 2 ⁵ 2 ⁴ 2 ³ 2 ² 2 ¹ 2 ⁰
--------------	---	---

Tabla 12. Representación de valores analógicos

El signo “S” de un valor analógico se codifica siempre con el bit número 15:

- “0” → +
- “1” → --

Si un modulo analógico tiene una resolución inferior a 15 bits, los valores analógicos se registran en el ACU comenzando por la izquierda. Las posiciones libres se llenan con “0”.

El ejemplo de la tabla 12 muestra una configuración de bits de baja resolución donde las posiciones libres están llenas de “0”.

Resolución	Valor analógico															
Numero de bit	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
Codificación en 15b bits(+S)	0	1	0	0	0	1	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1
Codificación en 12b bits(+S)	0	1	0	0	0	1	1	0	0	1	1	1	0	0	0	0
Codificación en 8b bits(+S)	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 13. Configuración binaria de un valor analógico codificado en 15, 12, 8 bits.

5.2.2 Representación de los valores analógicos de los márgenes de medida de las entradas analógicas.

Las tablas del presente apartado contienen los valores analógicos digitalizados de los márgenes de medida de los módulos analógicos.

La tabla 14 incluye las representaciones de los valores analógicos digitalizados y las representaciones decimales y hexadecimales de las unidades de los valores analógicos.

Las tablas 15 y 16 incluyen los valores analógicos digitalizados para los diferentes márgenes de medida.

Como la representación binaria de los valores analógicos es siempre la misma, las tablas incluyen únicamente una comparativa de los márgenes de medida y de las unidades.

La resolución de un valor de medida depende del tipo de modulo analógico y de su parametrización. En el caso de codificaciones en menos de 15bits, se pone a “0” los bits marcados con “x”

Codificaciones en bits (+S)	Unidades		Valor analógico	
	Decimal	Hexadecimal	Byte alto	Byte bajo
8	128	80	S0000000	1xxxxxxx
9	64	40	S0000000	01xxxxxx
10	32	20	S0000000	001xxxxx
11	16	10	S0000000	0001xxxx
12	8	8	S0000000	00001xxx
13	4	4	S0000000	000001xx
14	2	2	S0000000	0000001x
15	1	1	S0000000	00000001

Tabla 14. Codificaciones posibles de valores analógicos (resolución)

5.2.2.1 Márgenes de medida de tensión.

La tabla 15 representa los valores de medida digitalizados para los márgenes de medida de tensión $\pm 80\text{mV}$, $\pm 250\text{mV}$, $\pm 500\text{mV}$, $\pm 1\text{V}$, $\pm 2,5\text{V}$.

Margen de medida $\pm 80\text{mV}$	Margen de medida $\pm 250\text{mV}$	Margen de medida $\pm 500\text{mV}$	Margen de medida $\pm 1\text{V}$	Margen de medida $\pm 2,5\text{V}$	Unidades		Margen
					Decimal	Hexadecimal	
>94,071	>293,97	>587,94	>1,175	>2,9397	32767	7FFFH	Desbordamiento

94.071	293,97	587,94	1,175	2,9397	32511	7EFFH	Rebase
.	
.	
80.003	250,01	500,02	1,00004	2,5001	27649	6C01H	Nominal
80,000	250,00	500,00	1,000	2,500	27648	6C00H	
60,000	187,50	375,00	0,750	1,875	20736	5100H	
.	
.	
-60,000	-187,50	-375,00	-0,750	-1,875	-20736	AF00H	
-80,000	-250,00	-500,00	-1,000	-2,500	-27648	9400H	Rebase
-80.003	-250,01	-500.02	-1,00004	-2,5001	-27649	93FFH	
.	
.	
-94,074	293,98	-587,96	-1,175	-2,93398	-32512	8100H	
<-94,074	<-293,98	<-587,96	<-1,175	<-2,93398	-32768	8000H	Desbor- damiento

Tabla 15. Representación de valores de medida digitalizados de un modulo de entrada analógico (márgenes de tensión).

5.2.2.2 Márgenes de medida de tensión y de intensidad.

La tabla 16 representa los valores de medida digitalizados

- Para los márgenes de medida de tensión de 1 a 5V
- Para los márgenes de intensidad de 0 a 20mA, 4 a 20mA

Margen de medida de 1 a 5 V	Margen de medida de 0 a 20 mA	Margen de medida de 4 a 20 mA	Unidades		Margen
			Decimal	Hexadecimal	
>5,7036	>23,515	>22,810	32767	7FFF _H	desbordamiento
5,7036	23,515	22,818	32511	7EFF	Rebase
.	
.	
5,0001	20,0007	20,005	27649	6C00 _H	Nominal
5,000	20,000	20,000	27648	6C00 _H	
4,000	14,998	16,000	20736	5100 _H	
.	Rebase
.	
1,000	0,000	4,000	0	0 _H	
0,9999	-0,0007	3,9995	-1	FFFF _H	Desbordamiento
.	
.	
0,2936	-3,5185	1,1852	-4865	ED00 _H	Desbordamiento
<0,2936	<-3,5185	<1,1852	-32768	8000 _H	

Tabla 16. Representación de los valores de medida digitalizados de un módulo de entradas analógicas (márgenes de tensión y de intensidad)

5.3 MÁRGENES DE MEDIDA PARA LA MEDIDA DE TENSIÓN

La tabla 17 incluye los márgenes de medida (y el tipo de sensor) utilizados para medir tensiones así como las posiciones correspondientes del adaptador de margen de medida.

Tipo de medida seleccionado	Explicación	Margen de medida (tipo de sensor)	posición del adaptador de margen de medida
Tensión	Los valores analógicos digitalizados se presentan en las tablas 13-26 y 13-27 en el margen de medida de tensión	+/- 80mV +/- 250mV +/-500mV +/-1000mV	A
		+/-2,5V +/-5V de 1 a 5 V +/-10V	B
termopares + compensación interna (medida de tensión termoeléctrica)	los valores analógicos digitalizados se presentan en la tabla 13-26 en el margen de medida de tensión $\pm 80\text{mV}$	Tipo N [NiCrSi-NiSi] Tipo e[NiCr-CuNi] Tipo j [Fe-CuNi] Tipo K [NiCr-Ni] Tipo L[Fe-CuNi]	A
Termopares + compensación externa (medida de tensión termoeléctrica)	los valores analógicos digitalizados se presentan en la tabla 13-26 en el margen de medida de tensión $\pm 80\text{mV}$	Tipo N [NiCrSi-NiSi] Tipo e[NiCr-CuNi] Tipo j [Fe-CuNi] Tipo K [NiCr-Ni] Tipo L[Fe-CuNi]	A

Tabla 17. Márgenes de medida de tensión

5.4 MÁRGENES DE MEDIDA PARA MEDIDA DE INTENSIDAD

La tabla 18 incluye todos los márgenes que sirven para medir intensidad con un transductor de medida a 2 o 4 hilos así como las posiciones correspondientes del adaptador de margen de medida.

Tipo de medida seleccionado	Explicación	Margen de medida	Posición del adaptador de margen de medida

Transductor de medida a 2 hilos	Los valores analógicos digitalizados se presentan en las tablas 13-27 en el margen de medida de intensidad	De 4 a 20mA	D
Transductores de medida a 4 hilos	Los valores analógicos digitalizados se presentan en las tablas 13-26 y 13-27 en el margen de medida de intensidad	+/- 3,2mA +/- 10mA De 0 a 20mA De 4 a 20mA +/- 20mA	C

Tabla 18. Márgenes de medida para medida de intensidad, transductores de medida a 2 y 4 hilos

5.5 ADAPTADORES DE MARGEN DE MEDIDA

El módulo analógico SM331 tiene a un costado 4 adaptadores de margen de medida (uno por grupo de canales). Cada adaptador puede enchufarse en 4 posiciones diferentes (A, B, C o D). La posición define qué transductor se conecta al grupo de canales respectivo.

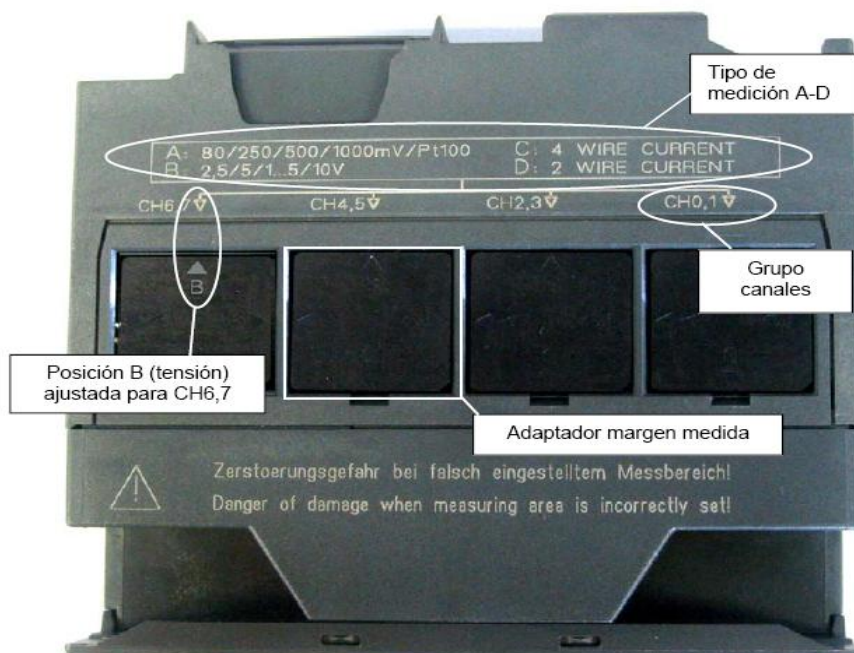


Figura 28. Adaptadores de margen de medida


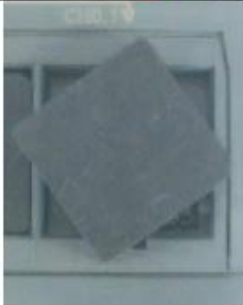
Posición	Tipo de medida
A	Termopar / medida de resistencia
B	Tensión (ajuste de fábrica)
C	Intensidad/Corriente (transductor a 4 hilos)
D	Intensidad/Corriente (transductor a 2 hilos)

Tabla 19. Posiciones posibles de los adaptadores de margen de medida

En la tarea de nuestro ejemplo se conecta en el grupo de canales 1, entrada 0, un sensor con un transductor de medida a 2 hilos de 4 a 20mA.

En el grupo de canales 2, entradas 2 y 3, se conecta un transductor de medida a 4 hilos.

El primer adaptador del margen de medida debe encontrarse por tanto en la posición D y el segundo en la posición C.

Paso	Gráfico	Descripción
1		Extraiga los dos adaptadores del margen de medida con un destornillador
2		Gire los adaptadores a la posición deseada:

Paso	Gráfico	Descripción
3		<p>Vuelva a colocar los adaptadores del margen de medida en el módulo</p> <p>En nuestro ejemplo los adaptadores deben estar en las siguientes posiciones:</p> <p>CH0,1: D</p> <p>CH2,3: C</p>

Tabla 20. Posicionamiento de los adaptadores del margen de medida.

5.6 CABLEADO DEL MÓDULO ANALÓGICO

El cableado del módulo analógico SM331 depende del tipo de transductor analógico.

5.7 CABLES APANTALLADOS PARA SEÑALES ANALÓGICAS

Para señales analógicas conviene usar cables apantallados y trenzados por pares de hilos. Esto aumenta la inmunidad a perturbaciones. La pantalla de los cables analógicos debe ponerse a tierra en ambos extremos.

Si hay diferencia de potencial entre los extremos del cable, entonces puede circular corriente por la pantalla que perturbe las señales analógicas. En tal caso la pantalla sólo deberá ponerse a tierra en un extremo o se tenderá un cable equipotencial adecuadamente dimensionado. [8]

6 VÁLVULAS DE SOLENOIDE

6.1 QUÉ ES UNA VÁLVULA DE SOLENOIDE?

La válvula de solenoide es un dispositivo operado eléctricamente, y es utilizado para controlar el flujo de líquidos o gases en posición completamente abierta o completamente cerrada. A diferencia de las válvulas motorizadas, las cuales son diseñadas para operar en posición moduladora, la válvula de solenoide no regula el flujo aunque puede estar siempre completamente abierta o completamente cerrada. La válvula de solenoide puede usarse para controlar el flujo de muchos fluidos diferentes, dándole la debida consideración a las presiones y temperaturas involucradas, la viscosidad del fluido y la adaptabilidad de los materiales usados en la construcción de la válvula.

La válvula de solenoide es una válvula que se cierra por gravedad, por presión o por la acción de un resorte; y es abierta por el movimiento de un émbolo operado por la acción magnética de una bobina energizada eléctricamente, o viceversa.

Una válvula de solenoide consiste de dos partes accionantes distintas, pero integrales: un solenoide (bobina eléctrica) y el cuerpo de la válvula.

Un electroimán es un imán en el cual las líneas de fuerza son producidas por una corriente eléctrica. Este tipo de imanes es importante para el diseño de controles automáticos, porque el campo magnético puede ser creado o eliminado al activar o desactivar una corriente eléctrica.

El término "solenoide" no se refiere a la válvula misma, sino a la bobina montada sobre la válvula, con frecuencia llamada "el operador". La palabra "solenoide" se deriva de las palabras griegas "solen", que significa canal, y "oide" que significa forma. La bobina proporciona un canal, en el cual se crea una fuerte fuerza magnética al energizar la bobina. El solenoide es una forma simple de electroimán que consiste de una bobina de alambre de cobre aislado, o de otro conductor apropiado, el cual está enrollado en espiral alrededor de la superficie de un cuerpo cilíndrico, generalmente de sección transversal circular (carrete). Cuando se envía corriente eléctrica a través de estos devanados, actúan como electroimán, tal como se ilustra en la figura 29. El campo magnético que se crea, es la fuerza motriz para abrir la válvula. Este campo atrae materiales magnéticos, tales como el hierro y muchas de sus aleaciones.

Dentro del núcleo va un émbolo móvil de acero magnético, el cual es jalado hacia el centro al ser energizada la bobina.

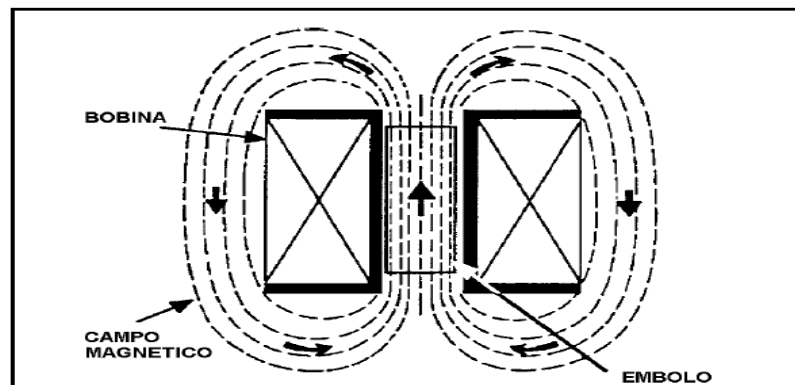


Figura 29. Solenoide energizado

El cuerpo de la válvula contiene un orificio (puerto), a través del cual fluye el líquido cuando está abierta. La aguja o vástago que abre y cierra el puerto de la válvula, se une directamente a la parte baja del émbolo, en el otro extremo el vástago o aguja tiene una superficie sellante (asiento). De esta forma, se puede abrir o detener el flujo al energizar o desenergizar la bobina solenoide. Este principio magnético, constituye la base para el diseño de todas las válvulas solenoide.

6.2 PRINCIPIO DE OPERACIÓN

En la figura 30 pueden apreciarse las partes principales ya integradas de una válvula de solenoide típica. La aguja de la válvula está unida mecánicamente a la parte inferior del émbolo. En esta válvula en particular, cuando se energiza la bobina, el émbolo es levantado hacia el centro de la bobina, levantando la aguja del orificio donde está sentada, permitiendo así el flujo. Cuando se desenergiza la bobina, el peso del émbolo hace que caiga por gravedad y cierre el orificio, deteniendo el flujo. En algunos tipos de válvulas, un resorte empuja el émbolo para que cierre la válvula; esto permite que la válvula pueda instalarse en otras posiciones diferentes a la vertical.

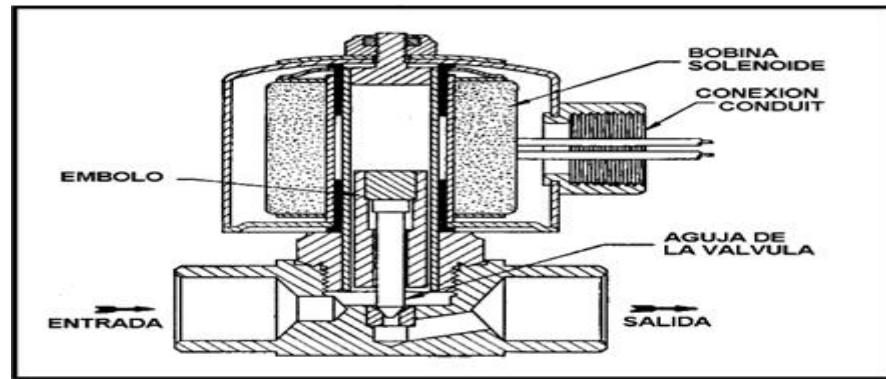


Figura 30. Válvula de solenoide típica de acción directa, normalmente cerrada de dos vías

6.3 TIPOS DE VÁLVULAS DE SOLENOIDE

Existe una amplia variedad de tipos de válvulas solenoide, los cuales se pueden dividir de acuerdo a su aplicación, su construcción y su forma. Entre los fabricantes de válvulas no existe un consenso para diferenciar los tipos por orden de importancia. Aunque recientemente, la práctica más generalizada es dividirlos primeramente, de acuerdo a su aplicación; es decir, a la capacidad del sistema donde va a ser instalada la válvula. Con base en esto, las válvulas solenoide pueden dividirse de manera general, en dos tipos:

- 1) De acción directa,
- 2) Operadas por piloto.

También por su construcción, las válvulas solenoide pueden ser:

- 1) Normalmente cerradas,
- 2) Normalmente abiertas
- 3) De acción múltiple.

Por su forma, hay tres tipos de válvulas solenoide de uso común:

- 1) De dos vías
- 2) de tres vías
- 3) de cuatro vías o reversibles.

Puede haber válvulas solenoide con combinaciones de los tipos mencionados arriba. Por ejemplo, hay válvulas operadas por piloto

normalmente abiertas y también normalmente cerradas. La válvula que se muestra en la figura 23, es una válvula de acción directa, de dos vías, normalmente cerrada.

6.4 ACCIÓN DIRECTA

El solenoide de acción directa, se utiliza en válvulas con baja capacidad y puertos de tamaño pequeño. El émbolo está conectado mecánicamente a la aguja de la válvula. Al energizar la bobina, el émbolo se eleva hacia el centro de la misma, levantando la aguja. Puesto que para operar, este tipo de válvula depende únicamente de la potencia del solenoide, para un diferencial de presión determinado, el tamaño de su puerto está limitado por el tamaño del solenoide. No se utiliza en sistemas de grandes capacidades, porque se requeriría una bobina de gran tamaño para contra-actuar el gran diferencial de presión. La bobina requerida sería grande, costosa y no sería factible para circuitos de capacidad muy grande.

Este tipo de válvula opera desde una presión diferencial de cero, hasta su Diferencial Máximo de Presión de Apertura (MOPD por sus siglas en inglés), independientemente de la presión en la línea. Para mantenerla abierta, no se requiere caída de presión a través de la válvula.

Las siguientes fuerzas actúan sobre una válvula de solenoide para mantenerla cerrada o abierta y fluyendo. Cuando está cerrada:

- a.** La presión interna empuja al émbolo hacia abajo al orificio.
- b.** La gravedad jala al émbolo hacia abajo al orificio. En algunas válvulas, la presión de un resorte también ayuda a mantenerlas cerradas.
- c.** La diferencia entre la presión alta en la entrada y baja en la salida, mantiene al émbolo sobre el orificio.

Nota: Mientras más grande es el diferencial de presión entre la entrada y la salida, más difícil es abrir la válvula.

Cuando está abierta:

- a.** El flujo interno que pasa a través del orificio, ayuda a mantener al émbolo abierto.
- b.** La atracción magnética sostiene arriba al émbolo.

6.5 DIFERENCIAL MÁXIMO DE PRESIÓN DE APERTURA (MOPD)

Mientras más grande sea la presión interna, o mientras más grande sea la diferencia entre las presiones de entrada y salida, más firme se mantiene el émbolo sobre el orificio. Mientras más grande el orificio, más grande es el área afectada por el diferencial de presión, manteniendo cerrado al émbolo. Por lo tanto, un orificio pequeño con bajo diferencial de presión, es fácil de abrir magnéticamente. Si aumenta el tamaño del orificio o el diferencial de presión, más difícil se vuelve para jalar al émbolo. Si tanto el área del émbolo, como el diferencial de presión son grandes, es posible que se exceda la capacidad del imán para jalar al émbolo y abrir o cerrar el orificio de la válvula. Cuando esta capacidad del imán es vencida por las fuerzas que mantienen abajo al émbolo, se dice que se ha excedido el MOPD.

Cuando el MOPD es bajo (el área del orificio es chica y la diferencia entre las presiones de entrada y salida es pequeña), la bobina solenoide no requiere de mucho esfuerzo para levantar al émbolo. Al hacerse más grande el orificio y más grande la caída de presión, se requiere una bobina magnética de mayor tamaño, para crear la fuerza magnética que se requiere para accionar el émbolo.

El MOPD se determina por qué tanta atracción magnética se requiere para contrarrestar la fuerza que mantiene abajo el émbolo. Cuando el diferencial de presión está por abajo de la clasificación de MOPD, la válvula de solenoide abrirá o cerrará rápida y fácilmente al ser energizada. Cuando se exceda el MOPD, la válvula no abrirá o cerrará al ser energizada, y podrá sobrecalentarse ocasionando riesgos de peligro, a menos que sea desenergizada rápidamente.

La válvula de acción directa se usa solamente en circuitos de pequeña capacidad. Para grandes capacidades se utilizan válvulas de solenoide operadas por piloto.

6.6 OPERADAS POR PILOTO

Las válvulas de solenoide operadas por piloto, utilizan un combinación de la bobina solenoide y la presión de la línea.

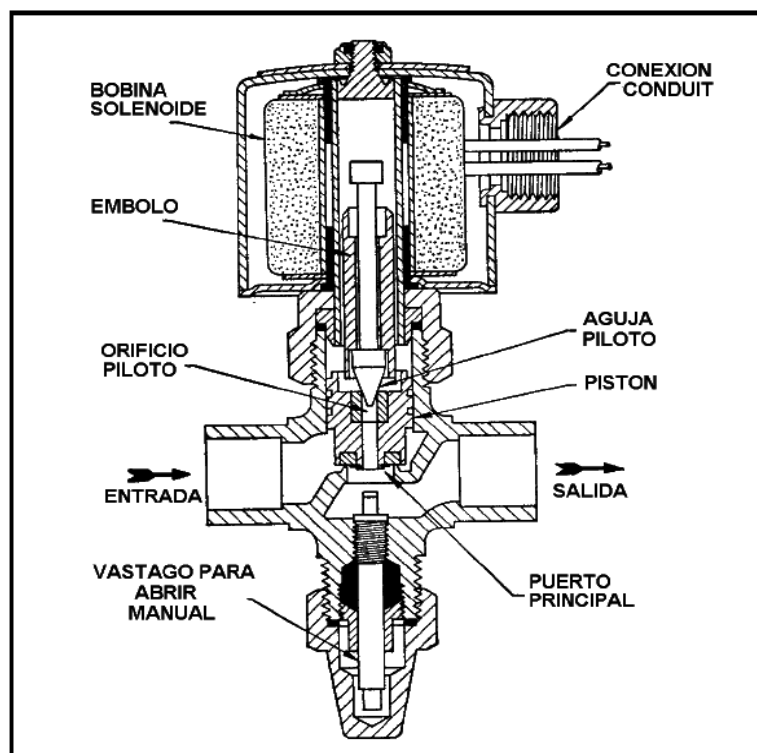


Figura 31. Válvula de solenoide operada por piloto, normalmente cerrada, de dos vías con pistón flotante.

En estas válvulas, el émbolo está unido a un vástago de aguja que cubre un orificio piloto en lugar del puerto principal, tal como se ilustra en la figura 31. La presión de la línea mantiene cerrado un pistón flotante o independiente contra el puerto principal, aunque en algunos modelos de válvulas puede ser un diafragma. Hay tres tipos básicos de válvulas operadas por piloto; de pistón flotante, de diafragma flotante y de diafragma capturado.

Cuando la bobina es energizada, el émbolo es accionado hacia el centro de la bobina, abriendo el orificio piloto. Cuando este orificio se abre, la presión atrapada arriba del pistón se libera a través del orificio piloto, creando así un desbalance de presión a través del pistón; la presión abajo ahora es mayor que la presión arriba, forzándolo a subir y abrir el puerto principal. Cuando se desenergiza la bobina solenoide, el émbolo cae y la aguja cierra el orificio piloto, luego, las presiones de arriba y abajo del pistón se igualan nuevamente, y el pistón cae cerrando el puerto principal. En algunos diseños de válvulas de solenoide operadas por piloto, se usa un diafragma en lugar de pistón, para cerrar el puerto principal, tal como se muestra en la figura 32. Ordinariamente, en válvulas de tamaño mediano, el orificio piloto se localiza encima del pistón o del diafragma. En válvulas grandes, donde es mayor el movimiento del pistón o diafragma, con frecuencia es

necesario ubicar el orificio piloto en un punto Remoto del pistón o diafragma, por cuestión de diseño práctico, como la mostrada en la figura 33.

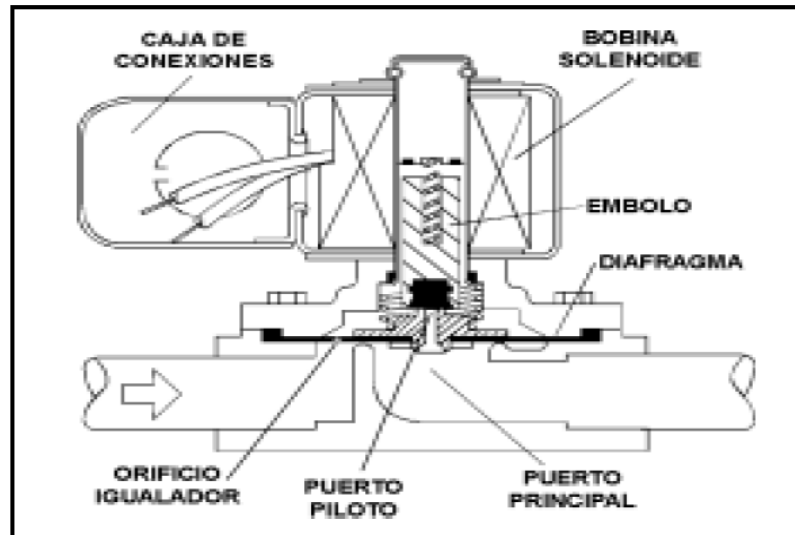


Figura 32. Válvula de solenoide de dos vías, normalmente cerrada, operada por piloto con diafragma flotante

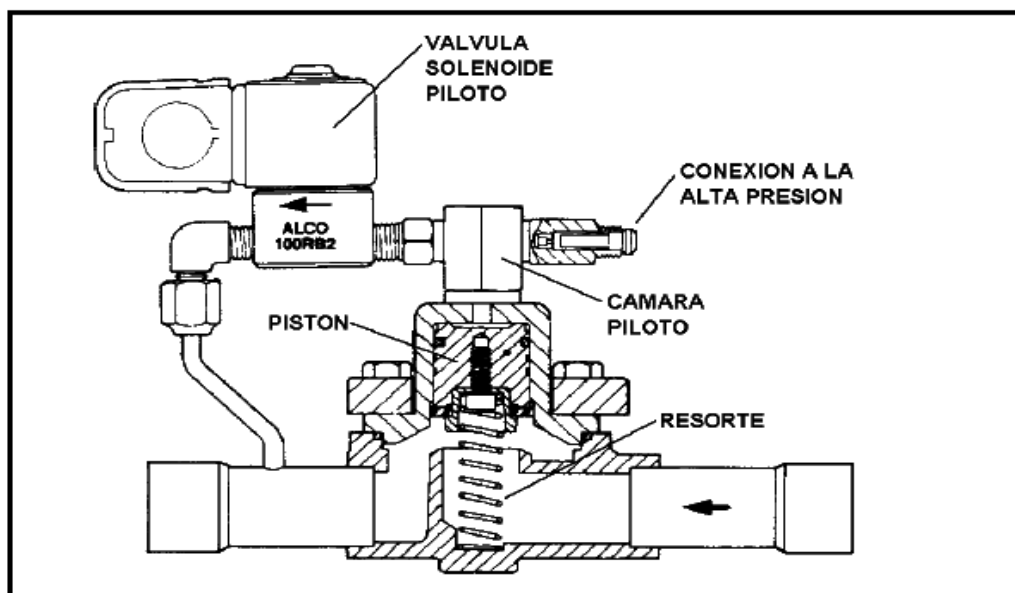


Figura 33. Válvula de solenoide operada por piloto

Cuando el solenoide piloto está desenergizado, se acumula la presión alta en la cámara piloto, forzando a que cierre el pistón. Cuando se energiza el solenoide piloto, como se muestra en la figura 33, se libera

la presión de la cámara piloto y el resorte levanta el pistón del asiento, abriendo la válvula.

Las válvulas de solenoide operadas por piloto, requieren un diferencial mínimo de presión de apertura entre la entrada y la salida (aproximadamente 0.5 psi o más), para abrir el puerto principal y mantener al pistón o al diafragma en posición abierta.

6.7 DIFERENCIAL MÍNIMO DE PRESIÓN DE APERTURA (MINOPD)

Tal como se explicó anteriormente, la válvula de solenoide de acción directa no debe exceder su MOPD, o no abrirá al ser energizada. Si el diferencial de presión es muy grande, o los orificios son de diámetro grande, se necesitaría una bobina demasiado grande y costosa para contrarrestar el MOPD. Por lo tanto, la válvula operada por piloto se usa en tamaños grandes. La idea principal es abrir el orificio piloto con tan poco esfuerzo como sea posible. Sin embargo, se requiere una cierta cantidad de diferencial de presión para levantar al pistón o diafragma del puerto principal, después que el orificio piloto ha permitido que se igualen las presiones de entrada y salida. Esta pequeña cantidad de presión requerida se conoce como el Mínimo Diferencial de Presión de Apertura (Min OPD).

Una válvula de solenoide operada por piloto, requiere de un Min OPD para levantar al pistón o diafragma del puerto principal. Los solenoides de acción directa no lo requieren, pero ambas tienen que evitar exceder su MOPD para que haya un flujo adecuado.

Aunque se pueden encontrar ciertas variantes mecánicas en su construcción, los principios básicos de operación anteriores, aplican a todas las válvulas de solenoide de refrigeración, Algunos ejemplos de estas variantes son:

- 1.** Émbolos de carrera corta, los cuales están rígidamente conectados a la aguja (éstos siempre serán del tipo de "acción directa").
- 2.** Émbolos de carrera larga, los cuales durante la apertura imparten un "golpe de martillo" a la válvula.
- 3.** Construcción interconectada mecánicamente de pistón a émbolo, la cual se usa donde no hay disponible diferencial de presión para flotar el pistón. Esta construcción, permite que una válvula de solenoide grande abra y permanezca en posición abierta, con una mínima caída

de presión a través de la válvula. Se usa principalmente para trabajos en líneas de succión.

4. Válvulas operadas por piloto y cargadas con resorte, utilizadas en puertos de diámetros grandes.

5. Válvulas de paso para condensador con la fuerza de la presión, las cuales utilizan una conexión piloto de alta presión.

Las válvulas de solenoide que tienen un émbolo cargado con resorte, pueden instalarse y operarse en cualquier posición. En la actualidad, la mayoría de las válvulas de solenoide para refrigeración son de este tipo. [9]

6.8 VÁLVULAS DE DOS VÍAS

Hasta ahora, hemos explicado de manera general cómo opera una válvula de solenoide. En seguida, discutiremos los diferentes tipos de válvulas.

Los tres tipos principales de válvulas son: de dos vías, de tres vías y de cuatro vías.

La válvula de dos vías es el tipo de válvula de solenoide más común, tiene una conexión de entrada y una de salida, y controla el flujo del fluido en una sola línea. Puede ser de acción directa u operada por piloto, dependiendo de la capacidad del sistema. Cada una de éstas puede ser “normalmente cerrada” o “normalmente abierta”. En la figura 34, se muestra una válvula de dos vías de acción directa, normalmente cerrada. Cuando la bobina está desenergizada, el peso del émbolo y la acción del resorte mantienen cerrada la válvula. Cuando se energiza la bobina, se forma el campo magnético, el cual atrae al émbolo hacia el centro y la aguja se levanta del asiento, abriendo el orificio del puerto y permitiendo el flujo a través de la válvula. Cuando nuevamente se desenergiza la bobina, la fuerza que retiene al émbolo es liberada, haciéndolo que caiga por su propio peso y por la acción del resorte, cubriendo el orificio del puerto y deteniendo el flujo a través de la válvula.

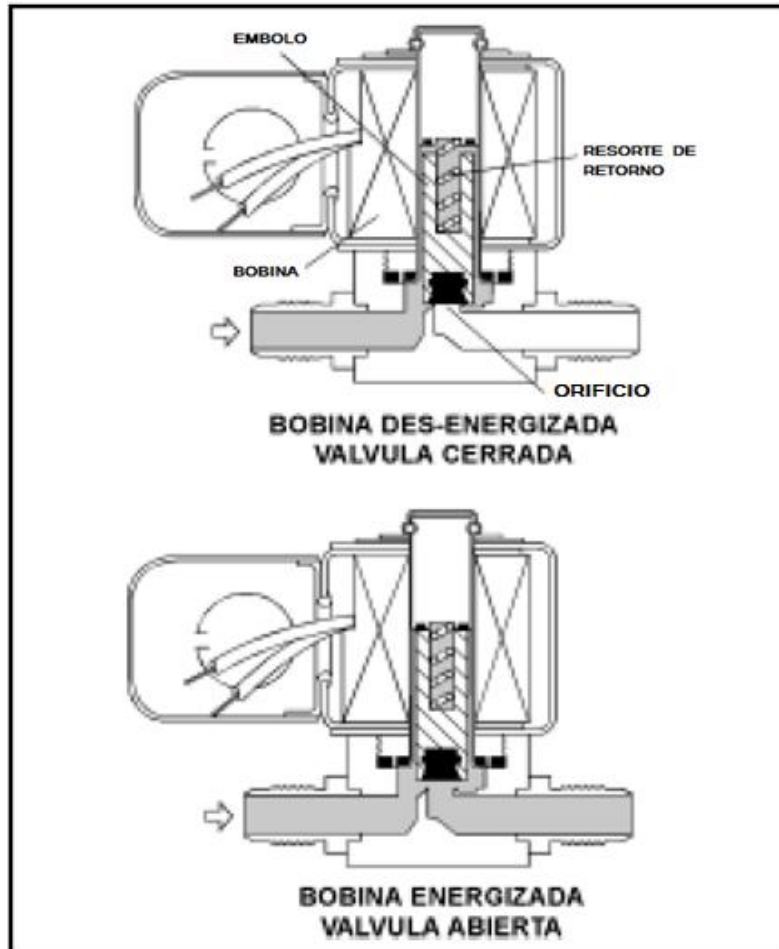


Figura 34. Válvula de solenoide de dos vías, de acción directa, normalmente cerrada.

Las válvulas de solenoide de dos vías operadas por piloto y normalmente cerradas, como la que se muestra en la figura 35, operan de la siguiente manera: estas válvulas tienen un orificio igualador que comunica la presión de la entrada con la parte superior del diafragma (o pistón), empujándolo contra el asiento y manteniendo de esta manera cerrada la válvula. El orificio piloto es más grande que el orificio igualador. Cuando se energiza la bobina, el émbolo es atraído por el campo magnético y levanta la aguja del orificio piloto. La presión arriba del diafragma se reduce y se iguala con la de salida. El diferencial de presión resultante a través del diafragma, crea una fuerza que lo levanta del puerto principal haciendo que se abra la válvula. Al desenergizar la bobina se cierra el orificio piloto, y la presión de entrada se va por el orificio igualador e iguala las presiones, arriba y abajo del diafragma, permitiéndole que se vuelva a sentar y cierre la válvula.

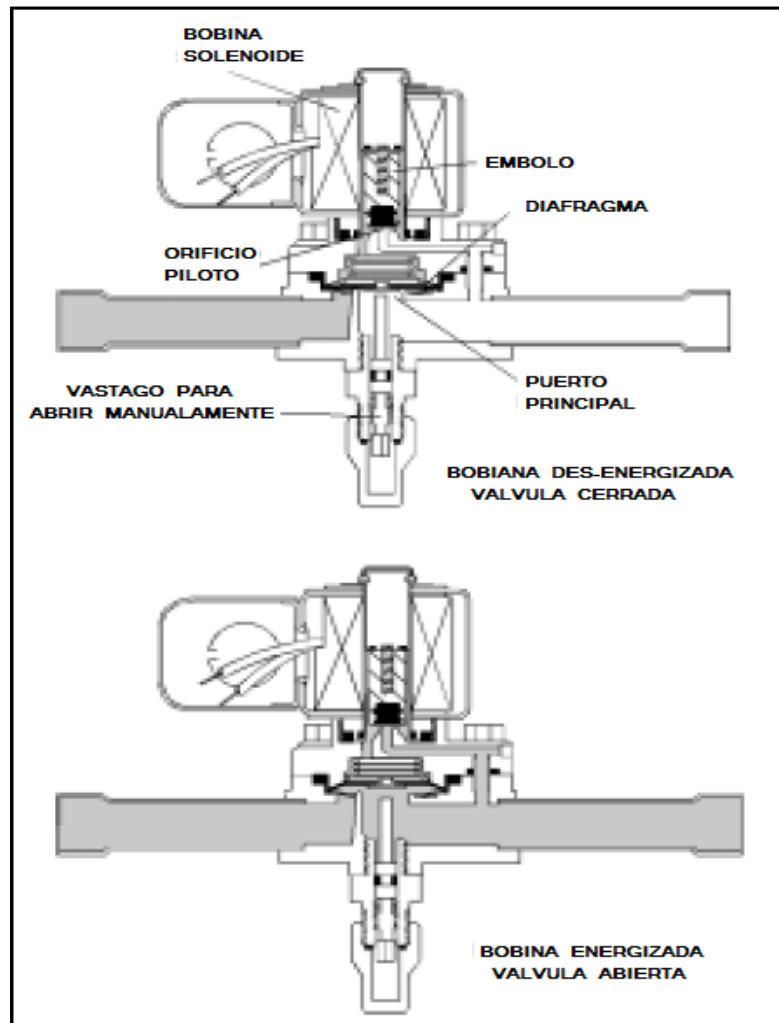


Figura 35. Válvula de solenoide de dos vías operada por piloto, normalmente cerrada, con diafragma flotante.

Aunque las válvulas normalmente cerradas son las que más se usan, también se fabrican válvulas de dos vías “normalmente abiertas”, tanto de acción directa como operadas por piloto. En este tipo de válvulas, la secuencia es a la inversa de las normalmente cerradas.

En las válvulas de dos vías, de acción directa normalmente abiertas, como la que se muestra en la figura 36, cuando la bobina está desenergizada, el puerto principal está abierto, ya que el émbolo está liberado de la fuerza de la bobina solenoide y está siendo levantado

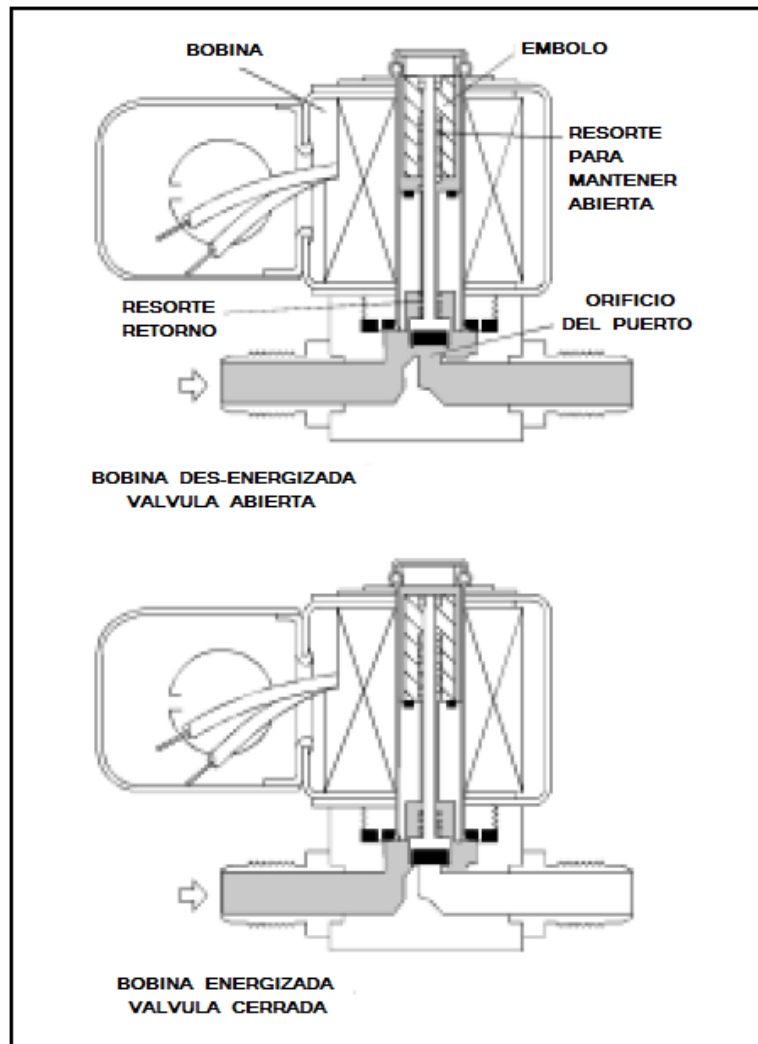


Figura 36. Válvula de solenoide de dos vías, de acción directa, normalmente abierta.

del asiento, lo que permite el flujo a través de la válvula. Cuando el solenoide se energiza, atrae al émbolo hacia el centro de la bobina y cubre el puerto principal, deteniendo el flujo a través de la válvula. Este tipo de válvulas es para aplicaciones donde se requiere que la válvula permanezca abierta la mayor parte del tiempo, o donde se requiere que la válvula abra en caso de una falla eléctrica. Además de ahorrar energía, dichas válvulas son a prueba de falla durante los "apagones", permaneciendo en la posición abierta. En la figura 37, se muestra una válvula de solenoide de dos vías operada por piloto y normalmente abierta. Cuando la bobina está desenergizada, libera la fuerza sobre el émbolo y el orificio piloto permanece abierto. Al reducirse la presión del sistema sobre la parte superior del diafragma, la presión total del sistema actúa sobre el lado opuesto del diafragma para levantarlo del puerto principal, permitiendo así un flujo completo a través de la válvula. Cuando el solenoide es energizado, atrae el émbolo hacia el centro de la bobina y

la aguja cubre el orificio piloto. Entonces se acumula la presión del sistema sobre el diafragma, a través del orificio igualador, forzando al diafragma hacia abajo, hasta que cubre el puerto principal y detiene el flujo a través de la válvula. [9]

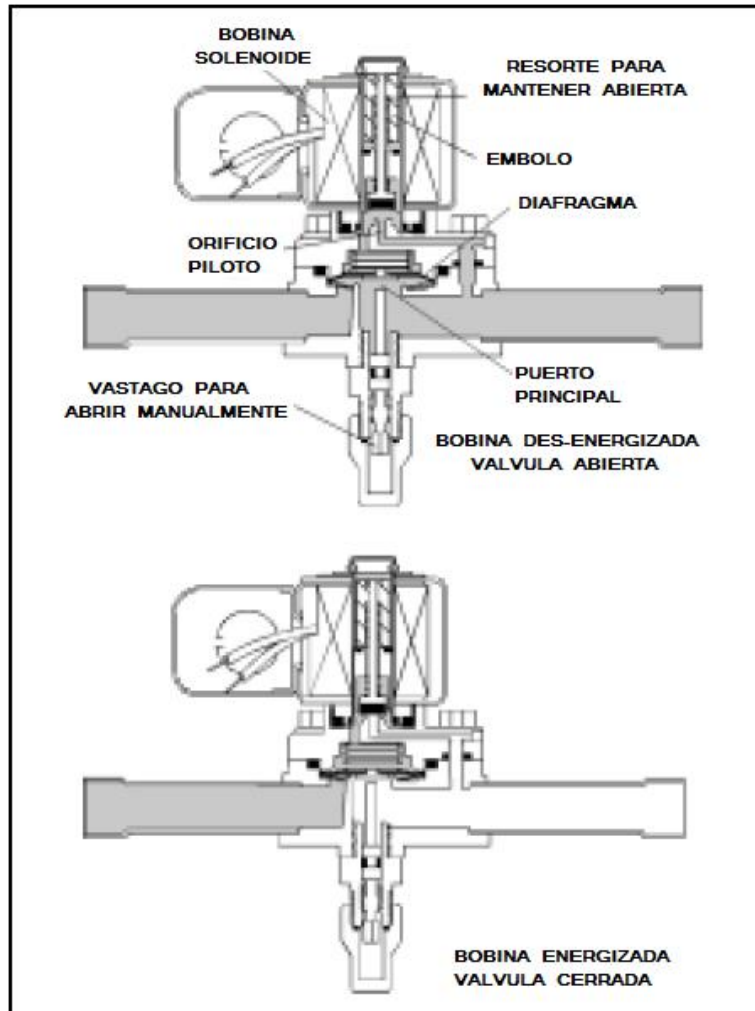


Figura 37. Válvula de solenoide de dos vías, operada por piloto, normalmente abierta, con diafragma flotante.

7 SELECCIÓN DE LA ELECTROVALVULA

Su función básica es la misma que una válvula de paso operada manualmente; pero, siendo accionada eléctricamente, se puede instalar en lugares remotos y puede ser controlada convenientemente por interruptores eléctricos simples. Las válvulas de solenoide pueden ser operadas por interruptores termostáticos, de flotador, de baja presión, de alta presión, por reloj, o cualquier otro dispositivo que abra o cierre un circuito eléctrico.

7.1 VALVULA ELECTROMAGNETICA SERIE UW 2/2

7.1.1 Características y especificaciones.

La válvula electromagnética, serie 2W (UD/UW) cero válvula del diferencial, tiene el tamaño del hilo de rosca a partir de la 1/8 a 2. Vienen dos tipos de estas válvulas: válvulas de cobre de cuerpo amarillo y válvulas inoxidables de cuerpo de acero, que pueden ser válvula cerrada normal y válvula abierta normal. Con buena calidad y funcionamiento estable, este tipo de válvulas electromagnéticas es ampliamente utilizado en muchos diversos campos industriales, especialmente circuito de agua. [10]



Figura 38. Válvula electromagnética serie uw 2/2

Válvula electromagnética serie uw 2/2	
PARTS	MATERIAL
Cuerpo	Cobre forjado / bronce fundido
Bobina	Alambre de cobre (H)
Núcleo	Acero inoxidable
Tubo	Acero inoxidable
Resorte	Acero inoxidable
conector	NBR, Viton, Silicio
Arandela	NBR, Viton, Silicon

Tabla 21. Partes de electroválvula serie UW 2/2

1. La serie UW tiene una unidad con diafragma de piloto, normalmente cerrada.
2. El cuerpo de la válvula es de cobre (3/8"~1"), de bronce fundido (1.1/4"~2").
3. La serie UW puede operar directamente sin presión.
4. Tiene un tamaño pequeño y fácil para montar.
5. Voltaje estándar: AC110V/AC220V/DC24V.
6. Final atornillado a: BSPT, NPT o BSP.
7. Viton (130 DEG C), silicio (130 DEG C) NBR (80 DEG C).
8. EN AC Tolerancia de tensión: $\pm 10\%$,
EN DC Tolerancia de tensión: $\pm 1\%$

8. IDENTIFICACIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL SISTEMA

8.1 SISTEMA

Para poder emplear correctamente los sistemas de control es preciso conocer el comportamiento de los distintos parámetros que lo componen.

Un modelo matemático de un sistema dinámico se define como un conjunto de ecuaciones que representan la dinámica del sistema con precisión o, al menos, bastante bien. Hay que tener en cuenta que un modelo matemático no es único para un sistema determinado. Un sistema puede representarse de muchas formas diferentes, por lo que puede tener muchos modelos matemáticos, dependiendo de cada perspectiva.

Los problemas relacionados con los sistemas de control, se resuelve utilizando ecuaciones diferenciales e integrales con el tiempo como variable primaria e independiente. Los cálculos con este método son relativamente largos y complejos. Al emplear su representación en función de transferencia estos se simplifica y se facilita su simulación utilizando la programación en Matlab.

Dentro del ámbito de la teoría de control; un sistema o proceso está formado por un conjunto de elementos en el mundo real que se relacionan entre si y que se caracterizan fundamental mente por la dinámica de su salida en función de la o las señales de entrada. Para conocer su dinámica no es necesario conocer la relación de sus elementos internos que la componen, para ello, en algunos casos solo se precisa conocer la relación que existe entre la salida y la entrada la cual permite predecir la respuesta del sistema y seleccionar la acción de control adecuada para mejorarla.

Los modelos matemáticos pueden adoptar muchas formas distintas. Dependiendo del sistema de que se trate y de las circunstancias específicas, un modelo matemático puede ser más conveniente que otros. Por ejemplo en problemas de control óptimo, es provechoso usar representaciones en el espacio de estados. En cambio, para los análisis de la respuesta transitoria o de la respuesta en frecuencia de los sistemas lineales con una entrada y una salida invariantes en el tiempo, la representación mediante la función de transferencia puede ser más

conveniente que cualquier otra. Una vez obtenido un modelo matemático de un sistema se usan diversos recursos analíticos para estudiarlo y sintetizarlo.

Al obtener un modelo matemático se debe establecer un compromiso entre la simplicidad del mismo y la precisión de los resultados del análisis. Al obtener un modelo matemático razonable simplificado, a menudo resulta necesario ignorar ciertas propiedades físicas inherentes al sistema. En particular, si se pretende obtener un modelo matemático de parámetros concentrados lineal (es decir uno en el que se empleen ecuaciones diferenciales), siempre es necesario ignorar ciertas no linealidades y parámetros distribuidos que pueden estar presentes en el sistema dinámico. Si los efectos que estas propiedades ignoradas tienen sobre la respuesta, son pequeños, se obtendrá un buen acuerdo entre los resultados del análisis del modelo matemático y los resultados del estudio experimental del sistema físico.

8.2 FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA

En la teoría de control, a menudo se usan las funciones de transferencia para caracterizar las relaciones de entrada-salida de componentes o de sistemas que se describen mediante ecuaciones diferenciales lineales e invariantes en el tiempo.

La función de transferencia de un sistema descrito mediante una ecuación diferencial lineal e invariante en el tiempo se define como el cociente entre la transformada de Laplace de salida (función de respuesta) y la transformada de Laplace de la entrada (función de excitación) bajo la suposición de que todas las condiciones iniciales son cero.

Si se conoce la función de transferencia de un sistema, se estudia la salida o respuesta para varias formas de entrada, con la intención de comprender la naturaleza del sistema.

Si se desconoce la función de transferencia de un sistema, puede establecerse experimentalmente introduciendo entradas conocidas y estudiando la salida del sistema. Una vez establecida una función de transferencia, proporciona una descripción completa de las características dinámicas del sistema a diferencia de su descripción física.

Considérese el sistema lineal e invariante en el tiempo descrito mediante la siguiente ecuación diferencial:

$$\begin{aligned}
 a_0 y^{(n)} + a_1 y^{(n-1)} + \dots + a_{(n-1)} y' + a_n y \\
 = b_0 x^{(m)} + b_1 x^{(m-1)} + \dots + b_{(m-1)} x' + b_m y \quad (n \geq m)
 \end{aligned}$$

[4]

Donde y es la salida del sistema y x es la entrada. La función de transferencia de este sistema es el coeficiente de la transformada de Laplace de la salida y la transformada de Laplace de la entrada cuando todas las condiciones son cero.

Función de transferencia:

$$G(s) = \left(\frac{\mathcal{L}[\text{salida}]}{\mathcal{L}[\text{entrada}]} \right) \Big|_{\text{condiciones iniciales cero}}$$

[5]

$$G(s) = \frac{b_0 s^{(m)} + b_1 s^{(m-1)} + \dots + b_{(m-1)} s' + b_m}{a_0 s^{(n)} + a_1 s^{(n-1)} + \dots + a_{(n-1)} s' + a_n}$$

[6]

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)}$$

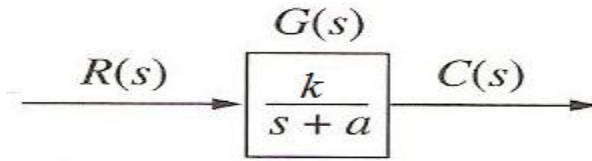
[7]

A partir del concepto de función de transferencia, es posible representar el sistema mediante ecuaciones algebraicas en s . Si la potencia más alta de s es el denominador de la función de transferencia es igual a n , el sistema se denomina sistema de orden n -ésimo.

Generalmente los sistemas dinámicos que encontramos son:

8.3 SISTEMA DE PRIMER ORDEN

Un sistema de primer orden sin ceros puede ser descrito por la función de transferencia que se muestra a continuación, si la entrada es un escalón unitario, donde $R(s) = 1/s$, la transformada de Laplace de la respuesta de escalón unitaria es $C(s)$, donde



$$C(s) = R(s) * G(s) = \frac{k}{s(s+a)} \quad [8]$$

$$G(s) = \frac{k}{(s+a)} = \frac{k/a}{\left(\frac{s}{a}+1\right)} = \frac{k/a}{\tau s+1} \quad [9] \text{ Ecuación canónica}$$

Donde:

$$y(\infty) = \frac{k}{a} \Rightarrow K = y(\infty) * a, \quad [10]$$

$y(\infty)$ es el valor al cual el sistema tiende a estabilizarse

$$\tau = \frac{1}{a} \quad [11]$$

Donde τ es el tiempo que tarda el sistema en alcanzar el 63% del valor final

El termino $1/a$ se llama constante de tiempo de la respuesta, donde la constante de tiempo es el tiempo que toma la respuesta de escalón unitario en alcanzar el 63% de su valor final.

Respuesta de un sistema de primer orden a un escalón unitario

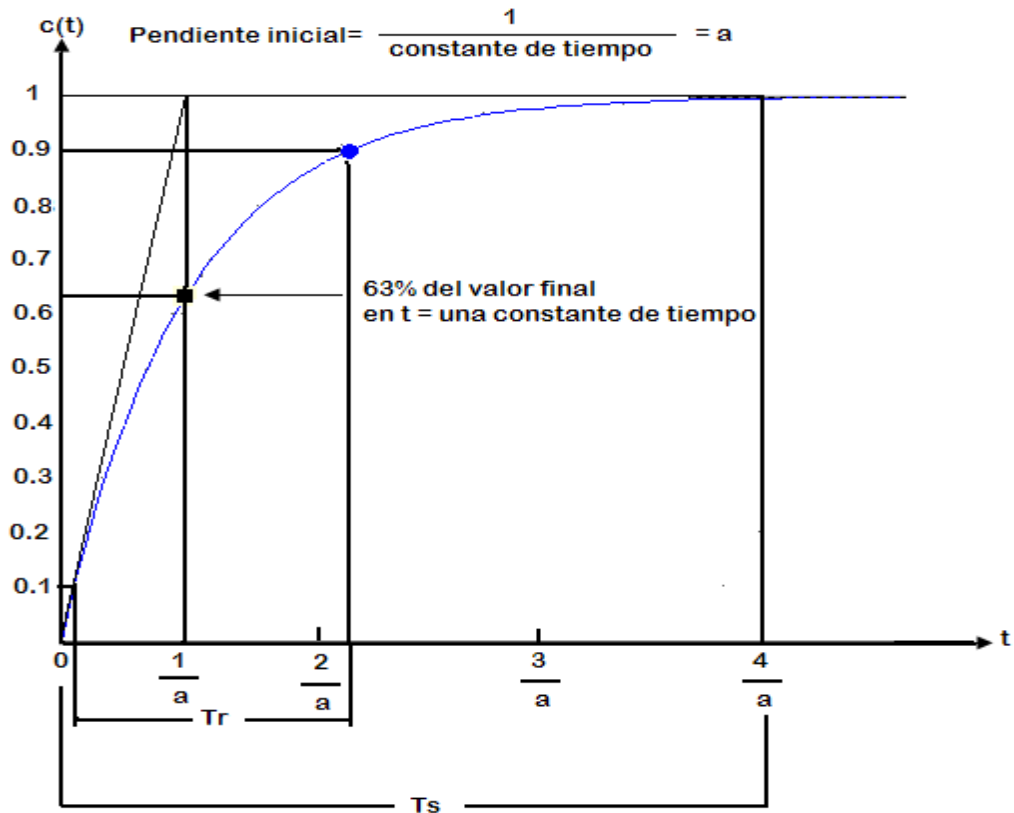


Figura 39. Respuesta de sistema de primer orden a escalón unitario

Veamos otras especificaciones de la respuesta transitoria del sistema. Además, en los sistemas de primer orden podemos encontrar una serie de parámetros que nos permiten identificar como se comporta el sistema y que tan rápido responde este ante cualquier cambio en la entrada; estos parámetros son: tiempo de levantamiento t_r y tiempo de asentamiento T_s , como se muestra en la figura 39.

El tiempo de levantamiento se define como el tiempo necesario para que la forma de onda pase de 0.1 a 0.9 de su valor final.

$$T_r = \frac{2.2}{a} \quad [12]$$

El tiempo de asentamiento se define como el tiempo necesario para que la respuesta alcance el 2% alrededor de su valor final y permanezca en ese valor.

$$T_s = \frac{4}{a} = 4\tau \quad [13]$$

8.4 SISTEMAS DE SEGUNDO ORDEN

En comparación con un sistema de primer orden, un sistema de segundo orden tiene una amplia variedad de respuestas que deben ser analizadas y descritas. Mientras que la variación de un parámetro de un sistema de primer orden simplemente cambia la velocidad de la respuesta, cambios en los parámetros de un sistema de segundo orden, pueden modificar la forma de la respuesta.

Función de transferencia de un sistema de segundo orden

$$G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad [14]$$

La ecuación se conoce como la función de transferencia cuadrática, esta función posee dos polos y ningún cero, son las raíces del denominador y se pueden determinar de la siguiente manera:

$$s_{1,2} = \frac{-2\zeta\omega_n \pm \sqrt{4\zeta^2\omega_n^2 - 4\omega_n^2}}{2} \quad [15]$$

$$s_{1,2} = -\zeta\omega_n \pm \sqrt{\frac{4\omega_n^2(\zeta^2 - 1)}{4}} \quad [16]$$

$$s_{1,2} = -\zeta\omega_n \pm j\omega_n\sqrt{1 - \zeta^2} \quad [17]$$

$$s_{1,2} = -\sigma \pm j\omega_d \quad [18]$$

Donde:

ζ = *factor de amortiguamiento relativo*

ω_n = *frecuencia natural del sistema*

$\omega_d =$ frecuencia amortiguada del sistema

$\sigma =$ factor de amortiguamiento

Para poder obtener un significado físico y real de $\zeta, \omega_n, \omega_d, \sigma$, primero

vamos a obtener la respuesta en el tiempo de la ecuación fundamental, para una entrada escalón unitaria y para $t \geq 0$.

$$Y(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} * \frac{1}{s} \quad [19]$$

De la transformada de L'Place se puede obtener la respuesta en el tiempo $Y(t)$ a partir de la ecuación 6:

$$y(t) = 1 - \frac{1}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{\zeta\omega_n t} \text{sen}(\omega_n \sqrt{1-\zeta^2} t - \theta) \quad [20]$$

$$\zeta < 1$$

$$\theta = \cos^{-1}\zeta$$

$$\theta = \text{tang}^{-1}\left(\frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta}\right) = \text{sen}^{-1}\sqrt{1-\zeta^2} \quad [21]$$

Factor de amortiguamiento relativo ζ Los efectos de los parámetros ζ y

ω_n en la respuesta del sistemas $y(t)$ frente a una respuesta escalón

unitaria del sistema, puede ser estudiado refiriéndonos a las raíces de la ecuación característica de la función de transferencia de la ecuación, donde σ controla el amortiguamiento del sistema. El coeficiente de

amortiguamiento relativo ζ relaciona la frecuencia de decaimiento exponencial σ , con la frecuencia natural del sistema (rad/s).

$$\zeta = \frac{\sigma}{\omega_n} \quad [22]$$

Frecuencia natural del sistema ω_n

El parámetro ω_n de los sistemas de segundo orden se define como la frecuencia natural no amortiguada del sistema. Cuando el coeficiente de amortiguamiento relativo $\zeta = 0$, el amortiguamiento es cero, y las raíces de la ecuación características son imaginarias por lo tanto, ω_n corresponde a la frecuencia de la respuesta sinusoidal no amortiguada. En la ecuación 4 observamos que si $0 < \zeta < 1$, las partes imaginarias de las raíces tienen una magnitud igual ω_d . Entonces cuando $\zeta \neq 0$ la respuesta del sistema $y(t)$ no es periódica. ω_d Se define como la frecuencia amortiguada del sistema. En la figura 40 observamos en el plano la relación entre la frecuencia natural del sistema, el coeficiente de amortiguamiento relativo, la frecuencia amortiguada y el ángulo de fase para un polo complejo.

Relación entre las raíces y polos de la ecuación característica de los sistemas de segundo orden y $\zeta, \omega_n, \sigma, \omega_d$

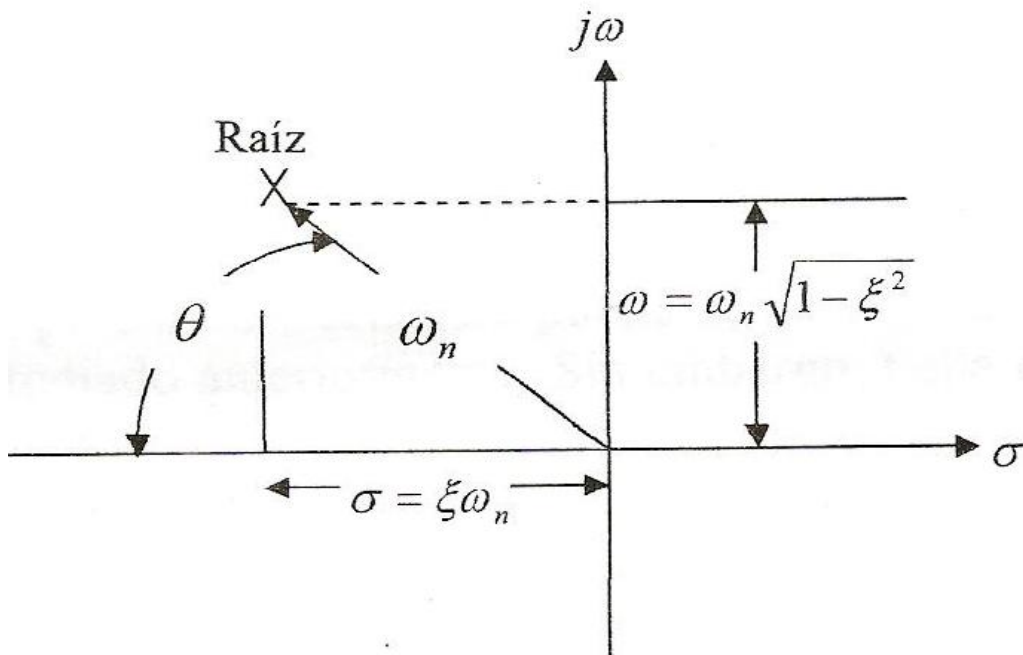


Figura 40. Relación entre las raíces y polos de la ecuación característica de los sistemas de segundo orden y $\zeta, \omega_n, \sigma, \omega_d$

Las regiones en el plano complejo son identificadas en la siguiente forma:

- Semiplano izquierdo del plano complejo, factor de amortiguamiento relativo positivo, un coeficiente de amortiguamiento positivo hace que el amortiguamiento de la respuesta debido al exponente $-\zeta\omega_n$ sea igual a una constante final, haciendo que el sistema sea estable.
- En el semiplano derecho del plano complejo debido a que el factor de amortiguamiento relativo es negativo la respuesta crece en magnitud con el tiempo haciendo que el sistema sea inestable.
- Cuando el factor de amortiguamiento $\zeta = 0$ y $\sigma = 0$ y el sistema es oscilatorio o marginalmente inestable.

Clasificación de la dinámica de los sistemas con respecto al valor del coeficiente de amortiguamiento relativo ζ

$$s_{1,2} = -\zeta\omega_n \pm j\omega_n\sqrt{1-\zeta^2} \quad 0 < \zeta < 1 \quad [23] \text{ Sistema subamortiguado}$$

$$s_{1,2} = -\omega_n \quad \zeta = 1 \quad [24] \text{ Sistema críticamente amortiguado}$$

$$s_{1,2} = -\zeta\omega_n \pm j\omega_n\sqrt{\zeta^2 - 1} \quad \zeta > 1 \quad [25] \text{ Sistema sobreamortiguado}$$

$$s_{1,2} = \pm j\omega_n \quad \zeta = 0 \quad [26] \text{ Sistema no amortiguado}$$

$$s_{1,2} = -\zeta\omega_n \pm j\omega_n\sqrt{1 - \zeta^2} \quad \zeta < 0 \quad [27] \text{ Sistema negativamente amortiguado}$$

9. MODELAMIENTO DEL SISTEMA DINÁMICO

Para obtener una ecuación diferencial podemos utilizar:

- Leyes físicas: de acuerdo a la naturaleza del sistema, rigen la relación causal entre las variables de interés.
- Pruebas experimentales (análisis de la respuesta transitoria del sistema).
- Por analogías de comportamientos entre sistemas que guardan un comportamiento similar, a pesar de ser de naturaleza diferente.
- Aplicación de algoritmos y recursos computacionales para procesar los datos obtenidos de pruebas experimentales.

Una de las maneras para hallar la función de transferencia de un sistema es a través de las leyes físicas, a continuación se mostrará la ecuación fundamental de la función de transferencia a través de los parámetros físicos, cabe decir que para nuestro caso se utilizó una metodología experimental.

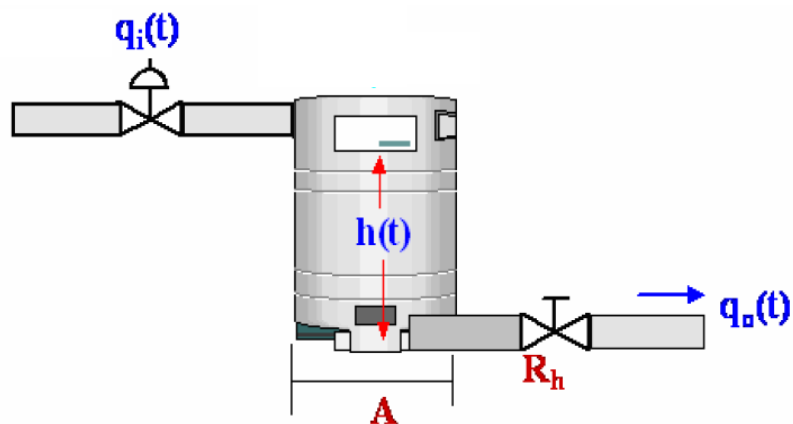


Figura 41. Sistema dinámico para controlar nivel

Donde:

$q_i(t)$ = Caudal de entrada

$q_o(t)$ = Caudal de salida

$h(t)$ = Altura del tanque

A = Área del tanque

Rh = Resistencia hidráulica o Constante de pérdida de la válvula.

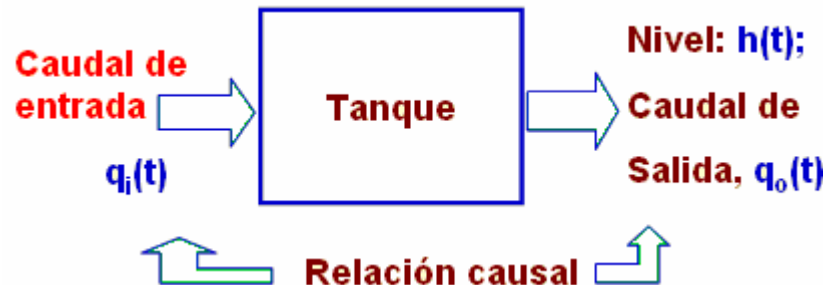


Figura 42. Esquema del sistema físico del llenado de un tanque

Acumulación = Caudal de entrada – Caudal de salida

$$Q_i - Q_o = \frac{A \cdot dh}{dt} = \text{masa almacenada} \quad [28]$$

De donde

$$Q_o = \frac{h}{Rh} \quad [29]$$

Entonces

$$Q_i - \frac{h}{Rh} = \frac{A \cdot dh}{dt} \quad [30]$$

$$Q_i = \frac{h}{Rh} + \frac{A \cdot dh}{dt} \quad [31]$$

Realizando la transformada de L'Place para la ecuación nos queda:

$$Q_{i(s)} = \frac{h(s)}{Rh} + Ahs(s) \quad [32]$$

$$Q_{i(s)}Rh = h(s) + Ahs(s) * Rh$$

[33]

Se define entonces la constante de tiempo

$$A * Rh = \tau \quad [34]$$

$$Q_{i(s)}Rh = h(s) (1 + A * Rh s)$$

[35]

$$\frac{h(s)}{Q_{i(s)}} = \frac{Rh}{(A * Rh s + 1)} \quad [36] \text{ Función de transferencia}$$

La función de transferencia que se obtuvo anteriormente, hace referencia a la dinámica del sistema hidráulico.

10. SISTEMA EN LAZO ABIERTO

Son los sistemas en los cuales la salida no afecta la acción de control. En un sistema en lazo abierto no se mide la salida ni se realimenta para compararla con la entrada.

En cualquier sistema de control en lazo abierto, la salida no se compara con la entrada de referencia. Por tanto a cada entrada de referencia le corresponde una condición operativa fija; como resultado, la precisión del sistema depende de la calibración. Ante la presencia de perturbaciones, un sistema de control en lazo abierto no realiza la tarea deseada. En la práctica, el control en lazo abierto sólo se utiliza si se conoce la relación entre la entrada y la salida y si no hay perturbaciones internas ni externas. Es evidente que estos sistemas no son de control realimentado.

ELEMENTOS BÁSICOS

1. Elemento de control: Este elemento determina qué acción se va a tomar dada una entrada al sistema de control.
2. Elemento de corrección: Este elemento responde a la entrada que viene del elemento de control e inicia la acción para producir el cambio en la variable controlada al valor requerido.
3. Proceso: El proceso o planta en el sistema en el que se va a controlar la variable.

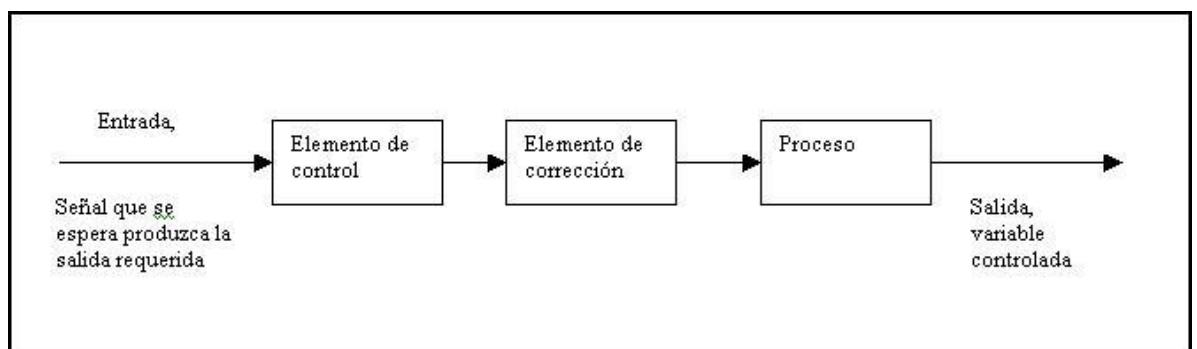


Figura 43. Sistema en lazo abierto

11. SISTEMA EN LAZO CERRADO

Los sistemas de control realimentados se denominan también sistemas de control de lazo cerrado. En la práctica, los términos control realimentado y control en lazo cerrado se usan indistintamente.

En un sistema de control en lazo cerrado, se alimenta al controlador la señal de error de actuación, que es la diferencia entre la señal de entrada y la salida de realimentación (que puede ser la señal de salida misma o una función de la señal de salida y sus derivadas o/y integrales) a fin de reducir el error y llevar la salida del sistema a un valor conveniente. El término control en lazo cerrado siempre implica el uso de una acción de control realimentando para reducir el error del sistema.

ELEMENTOS BÁSICOS

1. Elemento de comparación: Este elemento compara el valor requerido o de referencia de la variable por controlar con el valor medido de lo que se obtiene a la salida, y produce una señal de error la cual indica la diferencia del valor de referencia y el valor obtenido a la salida.
2. Elemento de control: Este elemento decide que acción tomar cuando se recibe una señal de error.
3. Elemento de corrección: Este elemento se utiliza para producir un cambio en el proceso al eliminar el error.
4. Elemento de proceso: El proceso o planta, es el sistema dónde se va a controlar la variable.
5. Elemento de medición: Este elemento produce una señal relacionada con la condición de la variable controlada, y proporciona la señal de realimentación al elemento de comparación para determinar si hay o no error.

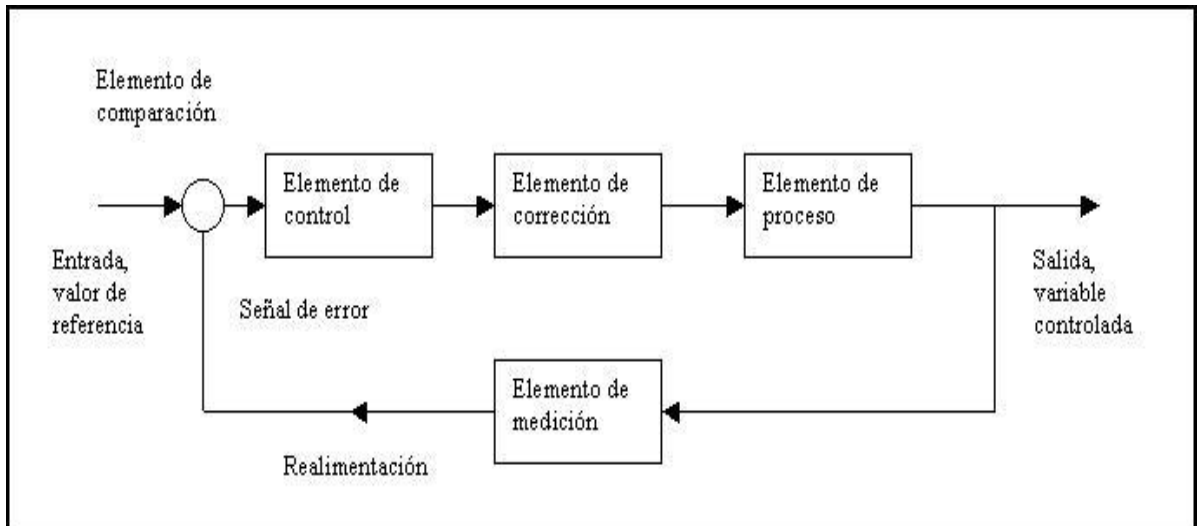


Figura 44. Sistema en lazo cerrado

12. MÉTODO DE LA RESPUESTA EN FRECUENCIA

El método de respuesta de frecuencia puede ser menos intuitivo que otros métodos que se utilizan; Sin embargo, tiene ciertas ventajas, especialmente en situaciones reales de la vida, tales como el modelado de funciones de transferencia de datos físicos.

La respuesta de frecuencia de un sistema puede ser visto de dos maneras diferentes: a través del diagrama de Bode a través del diagrama de Nyquist. Ambos métodos de mostrar la misma información, pero la diferencia radica en la manera en que la información se presenta. Vamos a estudiar para nuestro caso el de bode.

La respuesta de frecuencia es una representación de la respuesta del sistema a entradas sinusoidales a frecuencias diferentes. La salida de un sistema lineal a una entrada sinusoidal es una senoide de la misma frecuencia pero con diferente magnitud y fase. La respuesta de frecuencia se define como la magnitud y las diferencias de fase entre las sinusoides de entrada y de salida. Con la respuesta en frecuencia de lazo abierto de un sistema, podemos predecir su comportamiento en circuito cerrado.

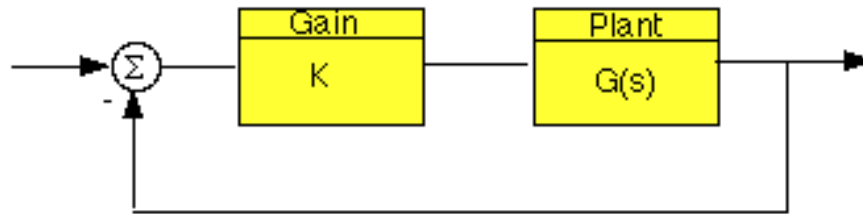
Para trazar la respuesta de frecuencia, creamos un vector de frecuencias (que varía entre cero o "DC" y el infinito) y calcular el valor de la función de transferencia de la planta en esas frecuencias. Si $G(s)$ es la función de transferencia de lazo abierto de un sistema y W es el vector de frecuencias, podemos graficar entonces, $G(j * w)$ vs W . Como $G(j * w)$ es un número complejo, podemos representar tanto en su magnitud y fase (el diagrama de Bode)

Los diagramas de Bode

Como se señaló anteriormente, el diagrama de Bode es la representación de la magnitud y fase de $G(j * w)$ (donde el vector w frecuencia contiene únicamente frecuencias positivas).

12.1 MARGEN DE GANANCIA Y DE FASE

Digamos que tenemos el siguiente sistema, donde K es una variable (constante) y la ganancia G (s) es la planta en cuestión.



12.1.1 Margen de ganancia.

El margen de ganancia se define como el cambio en la ganancia de lazo abierto para que el sistema sea inestable. Los sistemas con mayores márgenes de ganancia pueden soportar mayores cambios en los parámetros del sistema antes de ser inestable en lazo cerrado. Una ganancia unitaria en magnitud es igual a ganancia de cero en decibeles
 $GAN = 0dB$

12.1.2 Margen de fase.

El margen de fase se define como el cambio de fase de lazo abierto necesario para hacer un sistema de circuito cerrado inestable.

$$MP = 180 - 0dB$$

El margen de fase también mide la tolerancia del sistema al tiempo de retardo. Si hay un intervalo de tiempo mayor que $180/W_{pc}$ en el lazo (donde W_{pc} es la frecuencia donde el cambio de fase es de 180 grados), el sistema se vuelve inestable en lazo cerrado. El tiempo de retraso se puede considerar como un componente adicional en la ruta de avance del diagrama de bloques que se añade a la fase del sistema, pero no tiene efecto el incremento. Es decir, un retardo de tiempo puede ser representado como un bloque con una magnitud de 1 y fase $w * \text{time_delay}$ (en radianes / segundo).

El margen de fase es la diferencia de fase entre la curva de la fase y -180 grados en el punto correspondiente a la frecuencia que nos da una ganancia de 0 dB (ganancia de la cruz sobre la frecuencia, W_{gC}). Asimismo, el margen de ganancia es la diferencia entre la curva de magnitud y de 0 dB en el punto correspondiente a la frecuencia que nos da una fase de -180 grados (la cruz de fase en la frecuencia, W_{pC}).

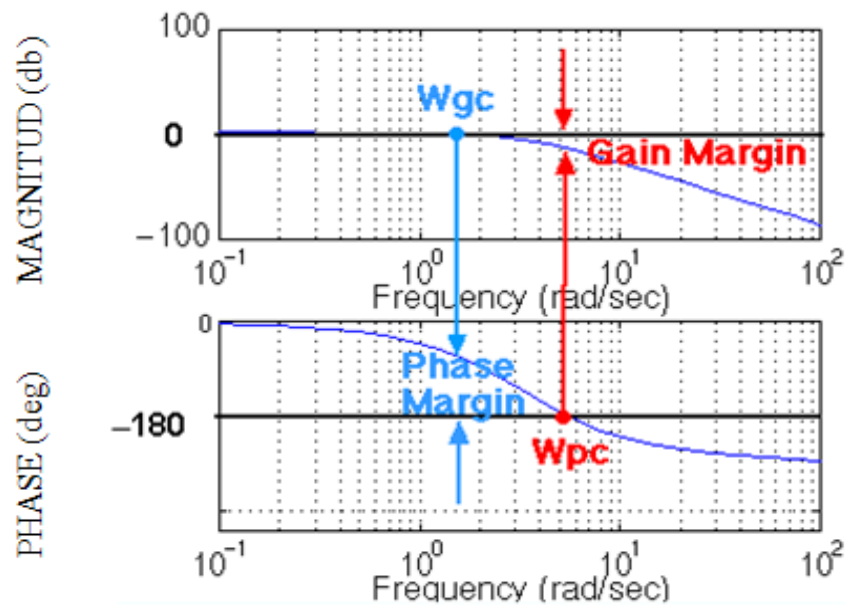


Figura 45. Margen de ganancia y margen de fase

12.1.3 Frecuencia de ancho de banda.

La frecuencia de ancho de banda se define como la frecuencia en donde la respuesta en lazo cerrado alcanza una magnitud igual a -3 dB. El ancho de banda de un sistema se encuentra matemáticamente a partir de la relación de circuito cerrado de amortiguamiento y la frecuencia natural del sistema.

Podemos relacionar la frecuencia de ancho de banda con la frecuencia natural de circuito cerrado y el factor de amortiguamiento. Así, podemos relacionar la frecuencia de ancho de banda para el factor de amortiguamiento y el aumento del tiempo de establecimiento con las siguientes ecuaciones.

$$w_{bw} = w_n \sqrt{(1 - 2\zeta^2) + \sqrt{\zeta^4 - 4\zeta^2 + 2}} \quad [37]$$

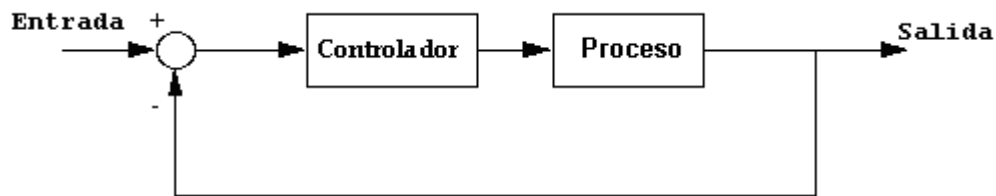
Rendimiento del lazo cerrado

Con el fin de predecir el rendimiento de lazo cerrado a partir de la respuesta de frecuencia en lazo abierto, tenemos que tener claro varios conceptos:

- El sistema debe ser estable a lazo abierto si vamos a diseñar a través de diagramas de Bode.
- Si la frecuencia de cruce de ganancia es menor que la frecuencia de cruce de fase (es decir, $\omega_{gC} < \omega_{pC}$), entonces el sistema de circuito cerrado será estable.
- Para los sistemas de segundo orden, la relación de lazo cerrado de amortiguamiento es aproximadamente igual al margen de fase dividido por 100, si el margen de fase es de entre 0 y 60 grados. Podemos utilizar este concepto con precaución si el margen de fase es superior a 60 grados.
- Para los sistemas de segundo orden, una relación entre el coeficiente de amortiguamiento, la frecuencia de ancho de banda y tiempo de establecimiento es dada por una ecuación se describe en el tema del ancho de banda.
- Una primera estimación que puede utilizar es que el ancho de banda es aproximadamente igual a la frecuencia natural.

13. CONTROLADORES PID

En este capítulo se mostrará las características de los controladores proporcional (P), integral (I), y derivativo (D), y cómo utilizarlos para obtener una respuesta deseada. Consideremos el siguiente sistema de realimentación unitaria:



Proceso: sistema a controlar
Controlador: Provee la excitación de la planta; Se diseña para controlar el comportamiento de todo el sistema.

Términos de la función de control PID:

La función de transferencia del controlador PID es:

$$K_p + \frac{K_I}{S} + K_D S = \frac{K_D S^2 + K_p S + K_I}{S} \quad [38]$$

Kp = Ganancia Proporcional

KI = Ganancia Integral

Kd = Ganancia Derivativa

Señal de control de la planta o proceso (U)

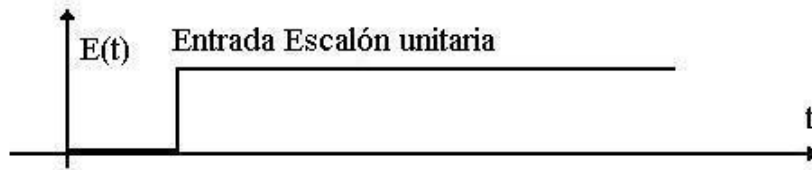
$$U = K_p e + K_I \int e dt + K_D \frac{de}{dt} \quad [39]$$

La señal (u) se enviará a la planta o proceso, y se obtendrá la nueva salida (Y). Esta nueva salida (Y) se re-enviará al sensor para hallar la nueva señal de error (e). El controlador toma esta nueva señal de error y computará su derivada y su integral otra vez. Este proceso sigue sin parar.

13.1 ACCION DE CONTROL PROPORCIONAL

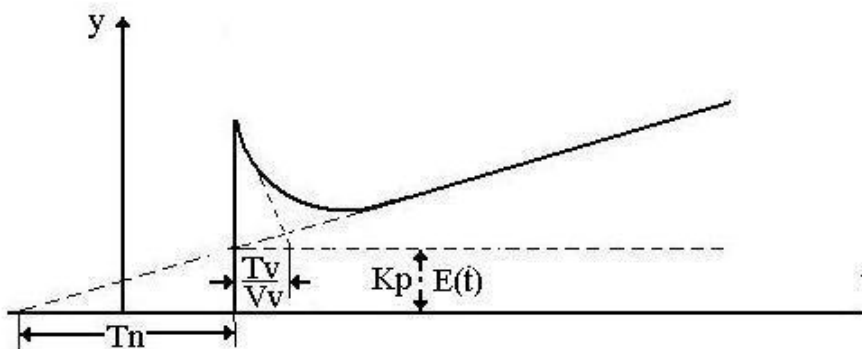
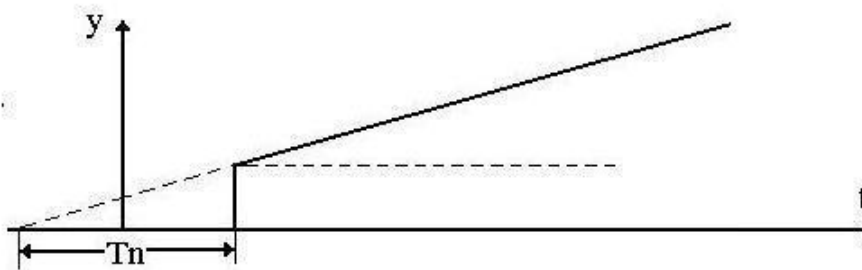
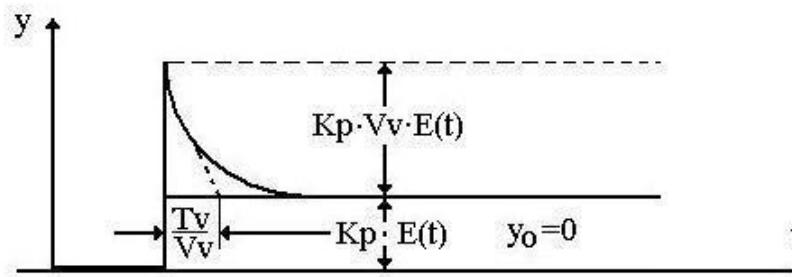
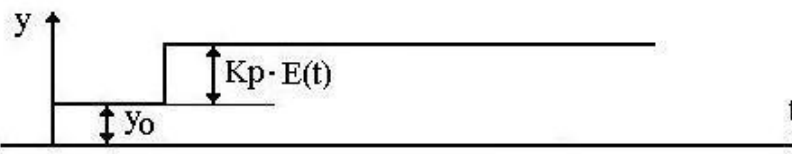
La parte proporcional consiste en el producto entre la señal de error y la constante proporcional como para que hagan que el error en estado estacionario sea casi nulo, pero en la mayoría de los casos, estos valores solo serán óptimos en una determinada porción del rango total de control, siendo distintos los valores óptimos para cada porción del rango. Sin embargo, existe también un valor límite en la constante proporcional a partir del cual, en algunos casos, el sistema alcanza valores superiores a los deseados. Este fenómeno se llama sobreoscilación y, por razones de seguridad, no debe sobrepasar el 30%, aunque es conveniente que la parte proporcional ni siquiera produzca sobreoscilación. Hay una relación lineal continua entre el valor de la variable controlada y la posición del elemento final de control (la válvula se mueve al mismo valor por unidad de desviación). La parte proporcional no considera el tiempo, por lo tanto, la mejor manera de solucionar el error permanente y hacer que el sistema contenga alguna componente que tenga en cuenta la variación respecto al tiempo, es incluyendo y configurando las acciones integral y derivativa.

Figura 46. Respuesta de las acciones de control P, Pi, Pid a una entrada de error escalón unitario



FUNCIONES DE CONTROL

Respuesta a la excitación entrada escalón unitaria



y_0 = Potencia de salida inicial.

T_v =Tiempo de acción derivativa.

V_v =ganancia de acción derivativa.

T_n =tiempo de acción integral, en un valor de T_n es igual en magnitud a la entrada del error

13.2 CONTROL PROPORCIONAL INTEGRAL

La función de transferencia de este controlador

$G_c(S) = K_p + \frac{K_I}{S} = \frac{K_p S + K_I}{S}$ en la figura anterior (respuesta a un error escalón unitario de las funciones de control) se puede apreciar la respuesta del controlador PI. El efecto de combinar las acciones de control proporcional e integral es obtener un cambio en la salida del proceso donde el error en estado estacionario sea nulo, el tiempo de subida T_r decremente y el sobrepaso y el tiempo de establecimiento T_s incrementen.

EFFECTO DE LAS ACCIONES DE CONTROL K_p , K_i Y K_d SOBRE EL TIEMPO DE SUBIDA SOBRE EL SOBREPASO Y SOBRE EL ERROR EN ESTADO ESTACIONARIO

Respuesta en lazo cerrado	Tiempo de subida	sobrepaso	Tiempo de establecimiento	Error en estado estacionario
Kp	decrece	incrementa	Pequeños cambios	decrece
Ki	Decrece	Incrementa	Incrementa	Elimina
Kd	Pequeños cambios	Decrece	Decrece	Pequeños cambios

Tabla 22. EFFECTO DE LAS ACCIONES DE CONTROL K_p , K_i Y K_d

14. MONTAJE DEL SISTEMA HIDRÁULICO

Para desarrollar el proyecto de control y medida de nivel de líquido de un sistema hidráulico se hizo necesario el montaje del sistema como se muestra a continuación:

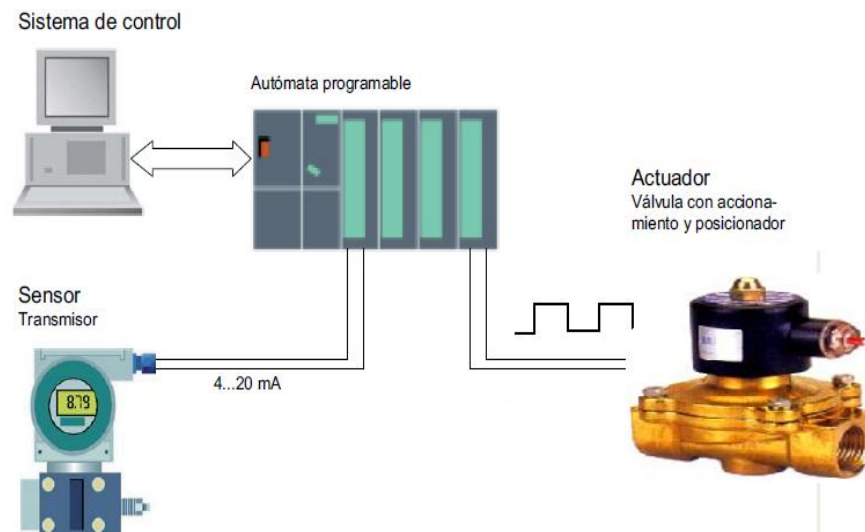


Figura 47. Vinculación de los sistemas de control



Figura 48. Montaje real del sistema

15. DINÁMICA DEL SISTEMA

Para hacer el estudio del comportamiento del sistema hidráulico se utilizó un cilindro aproximadamente de 1.13m, al cual se le tomaron datos de corriente cada 2 segundos a través de un sensor de presión y se obtuvo la siguiente grafica:

La tabla muestra los valores con los que se construyó la dinámica del sistema:

Tiempo(s)	Corriente(mA)	Corriente(mA) Desde El Origen
0	4,1	0,1
2	4,32	0,32
4	4,9	0,9
6	5,39	1,39
8	6,03	2,03
10	6,58	2,58
12	7,17	3,17
14	7,74	3,74
16	8,34	4,34
18	8,8	4,8
20	9,34	5,34
22	9,87	5,87
24	10,45	6,45
26	10,99	6,99
28	11,46	7,46
30	11,91	7,91
32	12,33	8,33
34	12,84	8,84
36	13,33	9,33
38	13,82	9,82
40	14,2	10,2
42	14,81	10,81
44	15,27	11,27
46	15,71	11,71
48	16,12	12,12
50	16,6	12,6

52	16,95	12,95
54	17,32	13,32
56	17,83	13,83
58	18,23	14,23
60	18,63	14,63
62	18,95	14,95
64	19,2	15,2
66	19,33	15,33
68	19,42	15,42
70	19,52	15,52
72	19,57	15,57
74	19,63	15,63
76	19,68	15,68
78	19,71	15,71
80	19,73	15,73
82	19,74	15,74
84	19,75	15,75
86	19,76	15,76
88	19,77	15,77
90	19,78	15,78
92	19,81	15,81
94	19,85	15,85
96	19,9	15,9
98	19,92	15,92
100	19,95	15,95
102	19,96	15,96
104	19,97	15,97
106	19,98	15,98
108	19,99	15,99
110	20	16
112	20,01	16,01
114	20,02	16,02
116	20,03	16,03
118	20,04	16,04
120	20,04	16,04

Tabla 23. Tabla dinámica del sistema

La grafica muestra la dinámica del sistema obtenida con los anteriores datos:

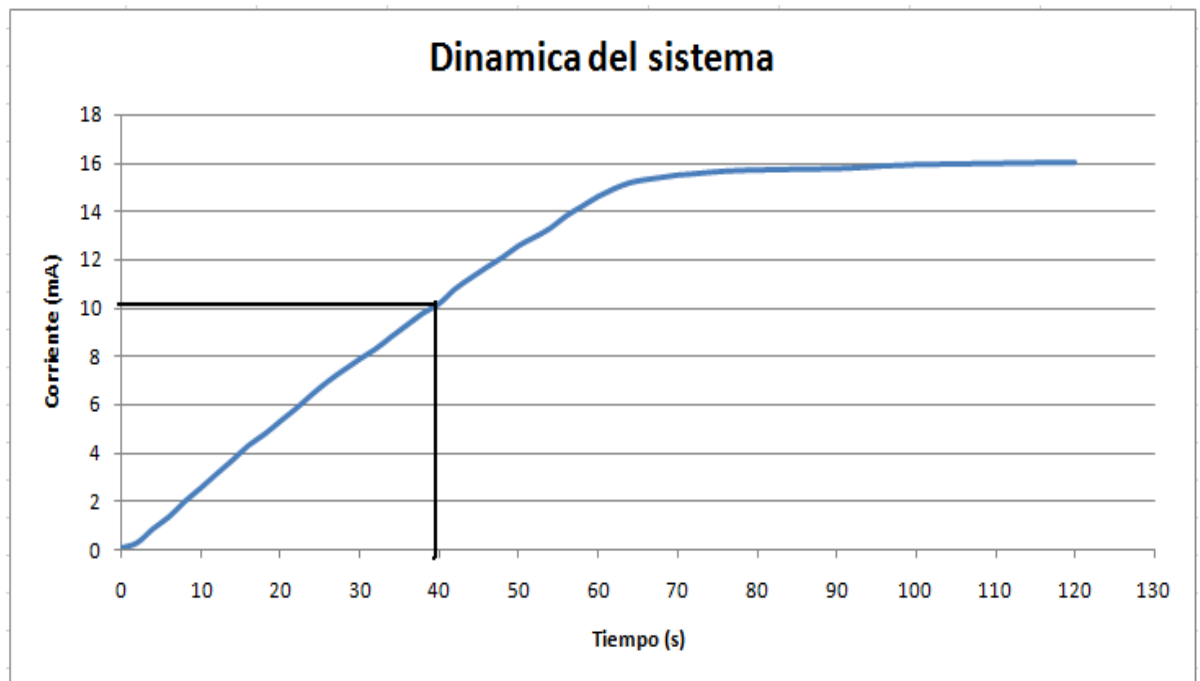


Figura 49. Dinámica del sistema

Con la grafica anterior se miro 63% con respecto a la magnitud y se hallo el tao el cual es de 39s con los siguientes cálculos:

$16,04 * 0,63 = 10,1052$ Con este valor encontrado se busca en la grafica que representa la dinámica del sistema el 10.1052 en magnitud que es donde el sistema alcanza el 63% del valor final ósea cuando pasa de 0.1 a 0.9 y se mira en el tiempo el cual corresponde al valor de tao.

Con los valores encontrados se procede a formar la función de transferencia del sistema:

$$G(s) = \frac{K/a}{\frac{s}{a} + 1} \quad [40]$$

Donde

$$\tau = 39s$$

$$y(\infty) = \frac{K}{a} = 16,04 \quad \tau = \frac{1}{a} \Rightarrow a = \frac{1}{\tau} \Rightarrow a = 0,0256$$

$$K = y(\infty) * a$$

Entonces,

$$K = 0,4106$$

Para lo cual nos queda una función de la siguiente manera:

$$G(s) = \frac{16,04}{\tau s + 1} \Rightarrow G(s) = \frac{16,04}{39s + 1} \quad \text{Función de transferencia}$$

El siguiente programa en Matlab muestra el comportamiento del sistema en lazo abierto.

```

clc
num =[16.04];
dem =[39 1];
G=tf(num,dem)
step(G)
grid on
axis ([0 270  0 16.5])

```

Gráfica de la respuesta de la planta con perturbación de escalón unitario

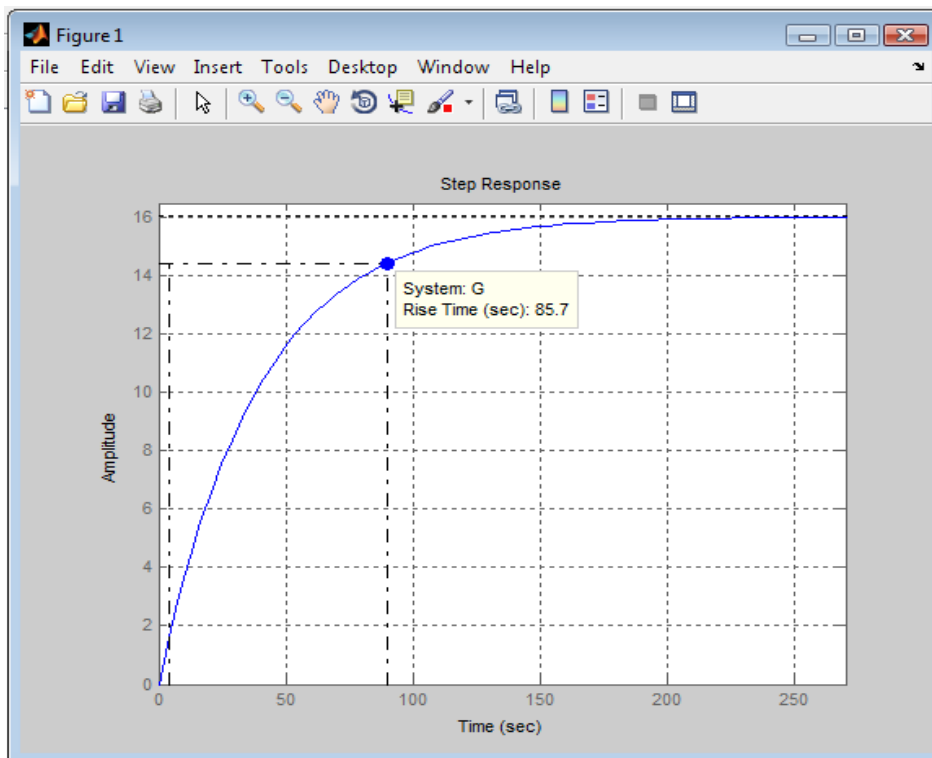


Figura 50. Respuesta de la planta con perturbación de escalón unitario

Con la grafica se tomo el tiempo de subida T_r para el 10% y 90% de la magnitud 16.04.

$$Tr(10\%) = 4.09s$$

$$Tr(90\%) = 88.2s$$

El tiempo de subida T_r fue 84.11s el error de estado estacionario $E_{ss} = \frac{1}{1+kp}$ donde k_p es la ganancia propia del sistema. Para encontrar k_p determinamos el límite cuando S tiende a cero de $G(s)$

$$E_{ss} = \frac{1}{1+kp}$$

$$Kp = \lim_{s \rightarrow 0} G(s) \quad \Rightarrow \quad \lim_{s \rightarrow 0} \frac{16.04}{39s+1} = 16.04$$

Por lo tanto

$$\%E_{ss} = \frac{1}{1+16.04} = 5.87\%$$

El tiempo de establecimiento para este sistema se hallo de la formula expresada en el tema de la función de transferencia de primer orden.

$$T_s = \frac{4}{a} \quad \Rightarrow \quad T_s = \frac{4}{0.0256} = 156.25s$$

Análisis de la respuesta en frecuencia

Con este método se observo el comportamiento del sistema en frecuencia y fase con el siguiente programa:

```
clc
num =[16.04];
dem =[39 1];
G=tf(num,dem)
bode(G,logspace(-3,2))
grid on
```

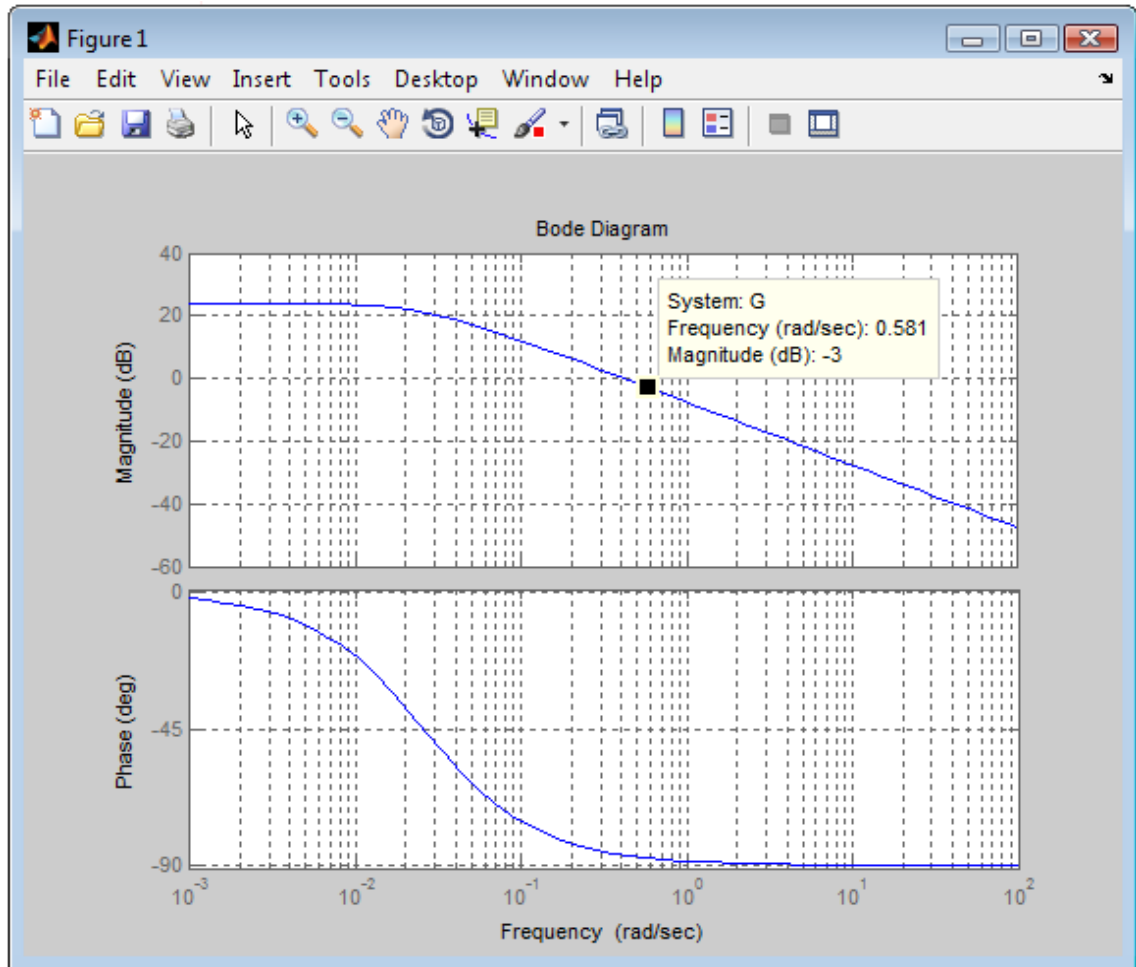


Figura 51. Margen de fase y margen de ganancia

En la figura se puede observar que a -3dB obtenemos un ancho de banda (BW) de 0.581rad/s

A continuación corremos el mismo programa pero con una función de Matlab llamada **margin** que nos muestra el valor de MP:

```
clc
num =[16.04];
dem =[39 1];
G=tf(num,dem)
margin(G)
grid on
```

En la figura se observa que el margen de fase es de 93,6 grados y el margen de ganancia es infinito.

Estos valores que se obtienen son del sistema sin aplicar ningún tipo de control.

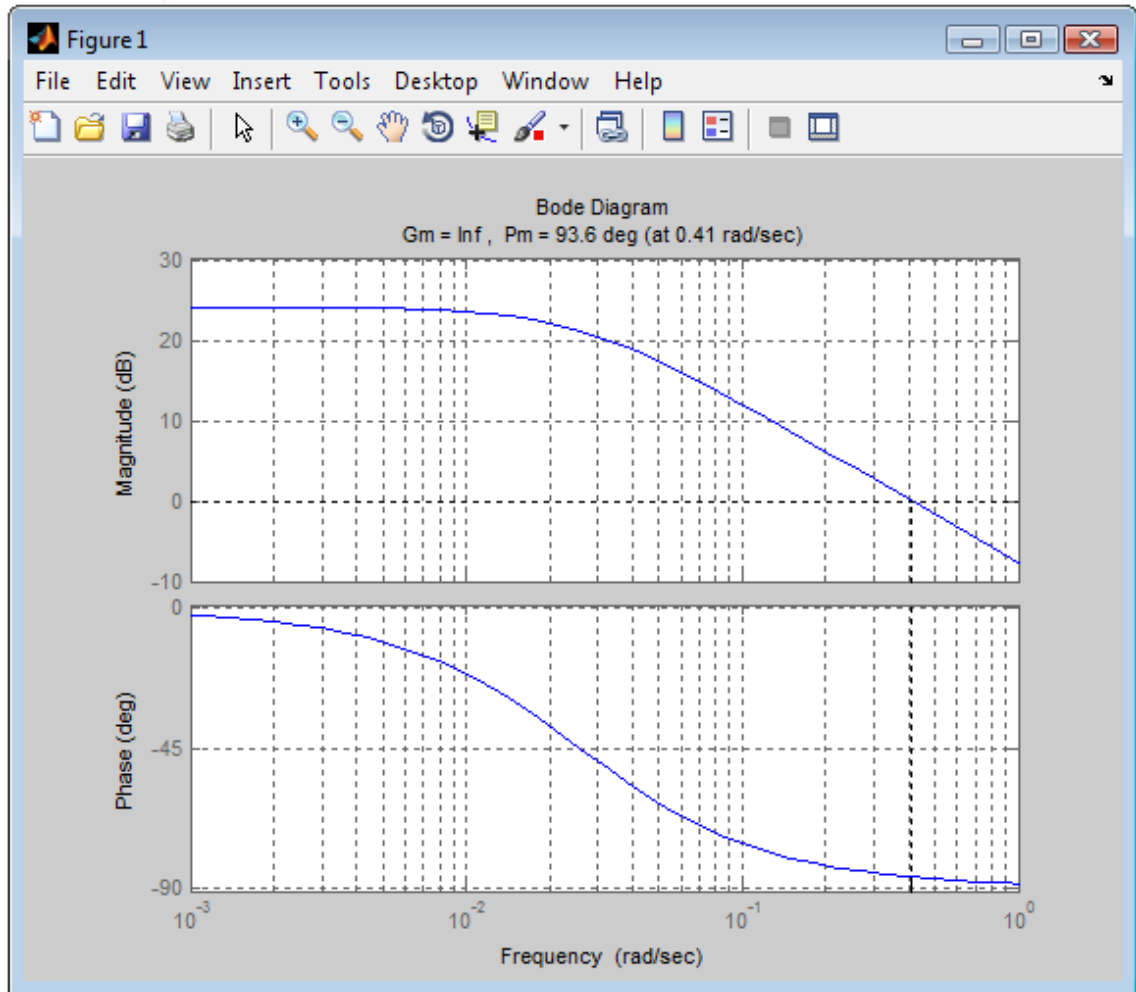


Figura 52. Margen de fase y margen de ganancia con función Margin

Para diseñar el controlador de nuestro sistema se tuvieron en cuenta las siguientes condiciones:

1. Error en estado estacionario lo mínimo posible
2. Sobrepasso entre 0 y 5%
3. Rebajar el tiempo de subida
4. El tiempo de establecimiento lo menor posible

El tiempo de establecimiento que deseamos para este sistema es de 120s, Para lo cual tomamos un sobre paso del 5% para encontrar un valor de zita y el ancho de banda necesario, en donde se utilizaron los siguientes programase en Matlab:

$$\xi = MP/100 \quad [41]$$

El valor de ξ en función del sobrepaso es:

$$\zeta = -\frac{\ln\left(\frac{\%OS}{100}\right)}{\sqrt{\ln^2\left(\frac{\%OS}{100}\right) + \pi^2}} \quad [42]$$

La ecuación que relaciona el sobrepaso y el coeficiente de amortiguamiento

$$\%OS = 100e^{\frac{-\zeta\pi}{\sqrt{1-2\zeta^2}}} \quad [43]$$

Ecuación que relaciona el ancho de banda en función de ζ

$$W_{BW} = w_n \sqrt{(1 - 2\zeta^2) + \sqrt{\zeta^4 - 4\zeta^2 + 2}} \quad [44]$$

$$w_n = \frac{4}{Ts\zeta^2} \quad [45]$$

A continuación se muestran los programas que se diseñaron en Matlab que representan las anteriores ecuaciones y sus respectivos cálculos, para nuestro controlador deseado:

```
pos=input('Ingrese el sobrepaso %os ');
z=(-log(pos/100))/(sqrt(pi^2+log(pos/100)^2))
```

```
z=input('valor amortiguamiento ');
os=100*exp(-pi*z/sqrt(1-z^2))
```

```
Ts=input('ingrese el Ts deseado')
BW=4/(Ts*z)*sqrt(1-2*z^2+sqrt(z^4-4*z^2+2))
```

Con los anteriores programas se encontraron los valores de:

Zita=0.6901

BW=44

PM=100*Zita=69.01

Los datos encontrados son necesarios para encontrar la estabilidad que queremos para nuestro sistema, ya que se varían los valores de las constantes KP (constante proporcional) y KI (constante integral) lo que sea necesario hasta que se encuentre el margen de fase deseado.

El siguiente programa muestra el controlador del sistema:

```
kp=5.7;
ki=5.7;

num =[16.04];
dem =[39 1];

numpi=[kp ki];
demp=[1 0];

newnum=conv(num,numpi);
newdem=conv(dem,dempi);
G = tf (newnum,newdem)
figure(1)

margin(G)
grid on

figure(2)
Glc=feedback(G,1)
t=0:0.1:10

step(Glc,t)
grid on
```

Con el anterior programa podemos calcular el nuevo ancho de banda que tendrá el controlador, el margen de ganancia y de fase:

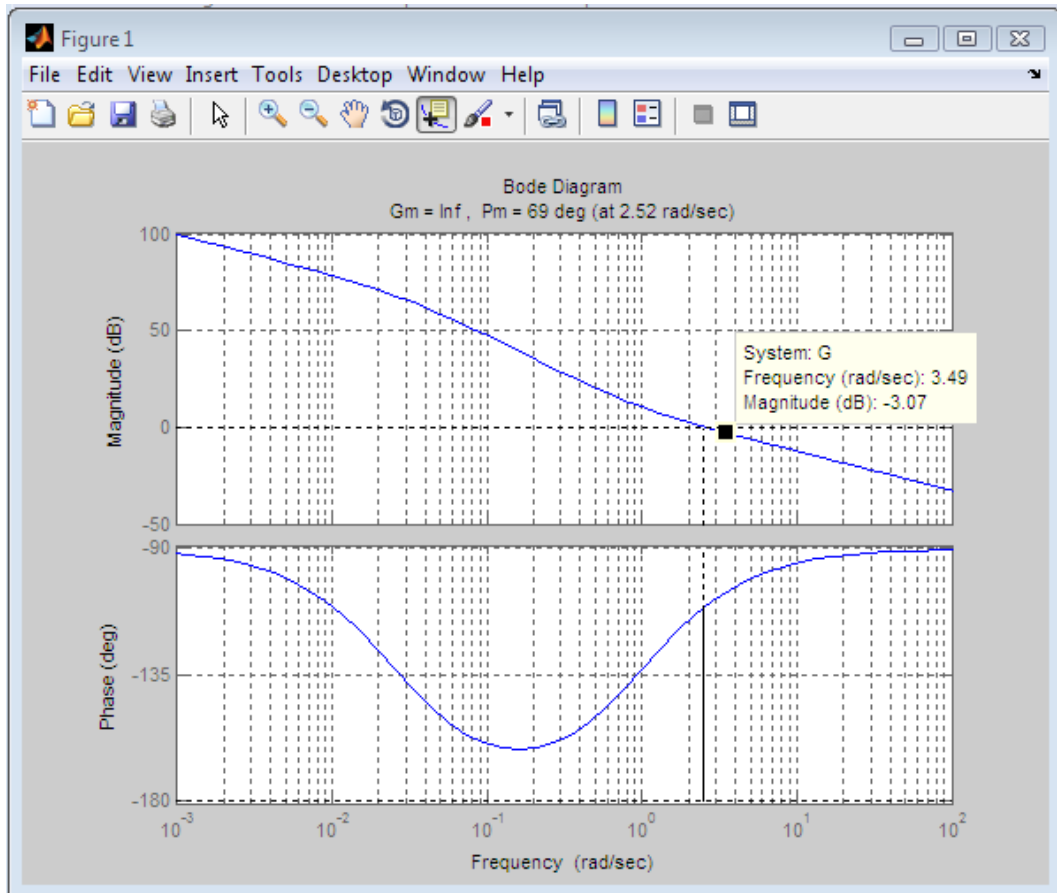


Figura 53. Nuevos ancho de banda, márgenes de ganancia y de fase

En esta grafica se puede ver que el ancho de banda es mayor (BW) de lo que se esperaba, pero esto no afecta el sistema, al contrario mejora nuestro tiempo de subida.

El valor de Pm es el adecuado para un sobrepaso del 5, de acuerdo a la relación mostrada más atrás donde el ζ se relaciona con el sobrepaso y el Pm (margen de fase).

Función de transferencia con control:

$$G(s) = \frac{91,43s + 91,43}{39s^2 + 92,43s + 91,43}$$

En la figura 54 se observa la respuesta del sistema en lazo cerrado, donde se puede apreciar el mejoramiento del sistema en los aspectos requeridos.

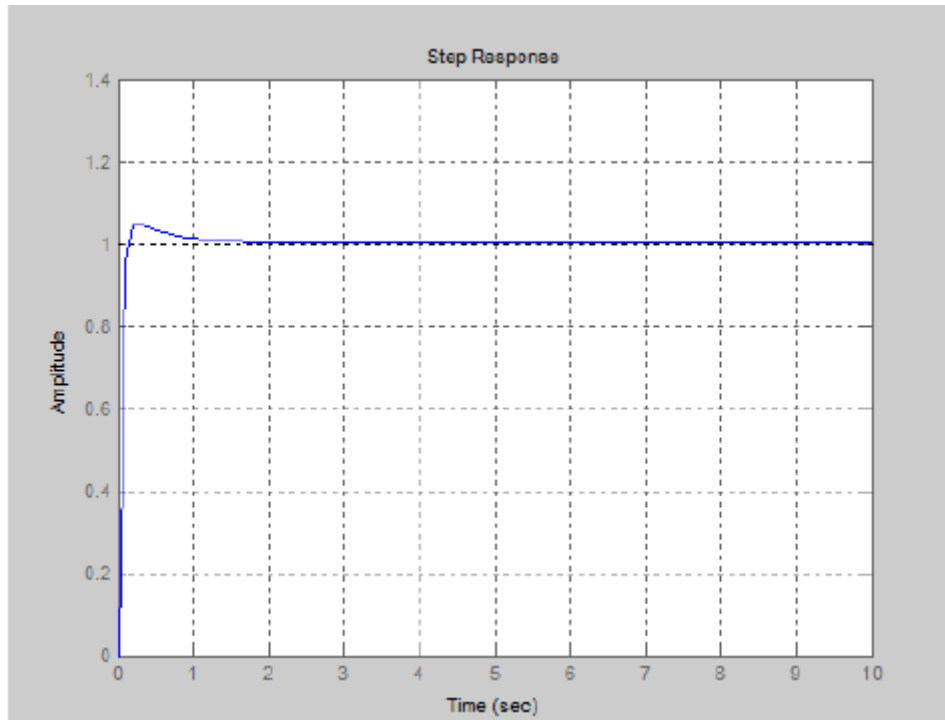


Figura 54. Respuesta del sistema con control

16. PROGRAMACIÓN DEL CONTROLADOR EN EL SIMATIC S7 300

Luego de haber simulado y hallado en el Matlab las constantes para el controlador, se procede a implementar el controlador por medio de un autómata programable, que para el caso de este proyecto es el Simatic S7 300.

Para implementar el controlador, se parametrizan los bloques de función del autómata CONT_C Y PULSEGEN, con las constantes del controlador halladas anteriormente.

16.1 REGULACIÓN CONTINUA FB 41"CONT_C"

El FB"CONT_C" sirve para la regulación de procesos industriales con magnitudes de entrada y salida continuas utilizando sistemas de automatización SIMATIC S7. Mediante la parametrización es posible conectar o desconectar las funciones parciales del regulador PID, adaptándolo así al proceso regulado.

Su modo de trabajo se basa en el algoritmo de regulación PID del regulador muestreado con señal de salida analógica, complementada dado el caso por una etapa de formación de impulsos para la creación de señales de salida con modulación de ancho de impulsos para regulaciones de dos o tres puntos con actuadores proporcionales.

16.1.1 Algoritmo PID

El algoritmo PID trabaja en el algoritmo de posición. Las acciones proporcional, integral (INT) y derivativa (DIF) están conectadas en paralelo y pueden conectarse y desconectarse individualmente. De esta forma pueden parametrizarse reguladores P, PI, PD y PID. Pero también son posibles reguladores I puros. [11]

Figura 55. Esquema de bloques del CONT_C

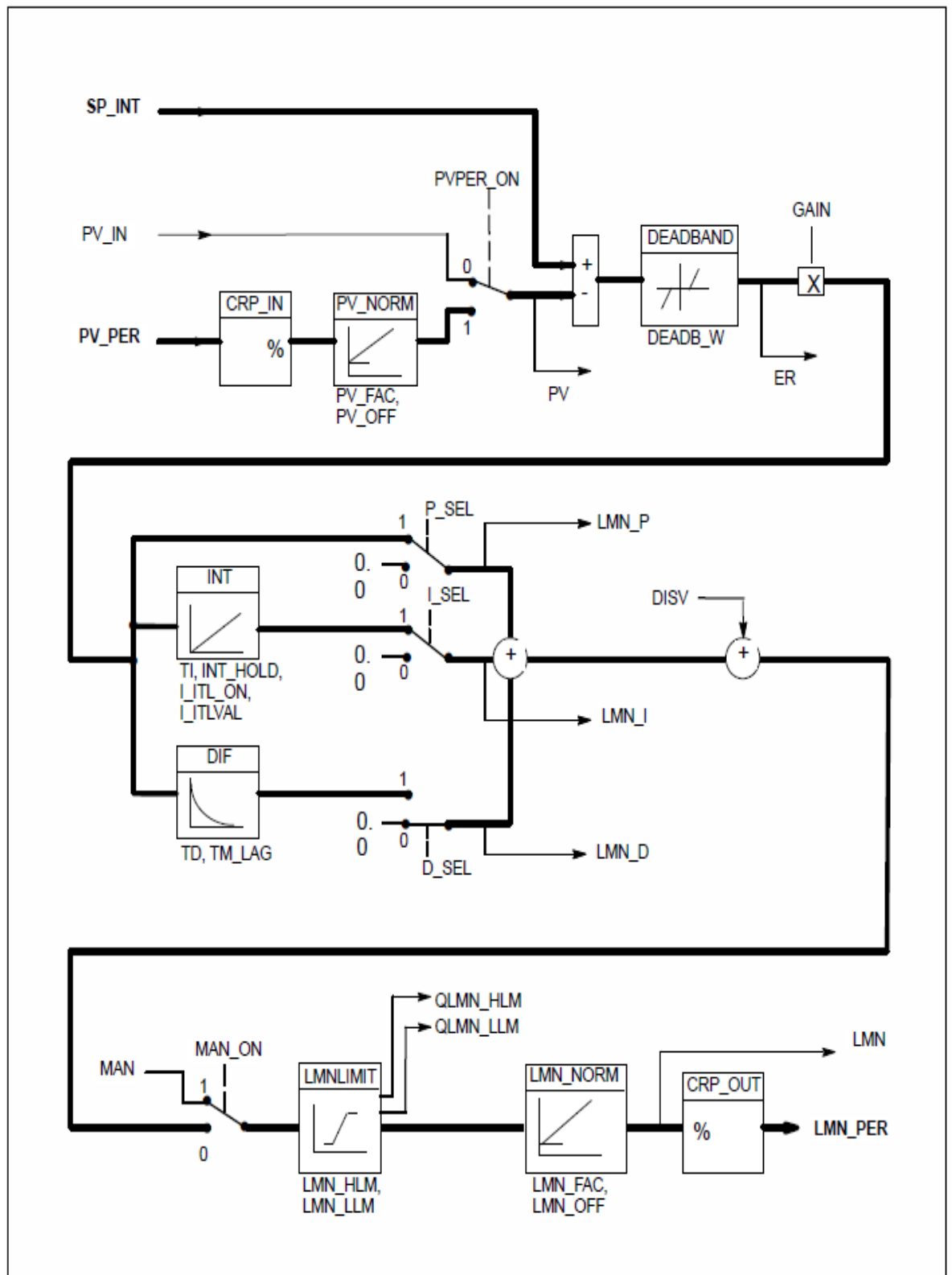


Tabla 24. Parámetros de entrada del CONT_C

Parámetro	Tipo de datos	Valores posibles	Por defecto	Descripción
COM_RST	BOOL		FALSE	COMPLETE RESTART / Rearranque completo El bloque tiene una rutina de rearranque completo que se ejecuta cuando está activada la entrada "Rearranque completo".
MAN_ON	BOOL		TRUE	MANUAL VALUE ON / Conectar modo manual Si está activada la entrada "Conectar modo manual", está interrumpido el lazo de regulación. Como valor manipulado se fuerza un valor manual.
PVPER_ON	BOOL		FALSE	PROCESS VARIABLE PERIPHERY ON / Conectar valor real de periferia Si debe leerse el valor real de la periferia, conectar la entrada PV_PER con la periferia y activar la entrada "Conectar valor real de periferia".
P_SEL	BOOL		TRUE	PROPORTIONAL ACTION ON / Conectar acción P En el algoritmo PID pueden conectarse y desconectarse individualmente las acciones PID. La acción P está conectada si está activada la entrada "Conectar acción P".
I_SEL	BOOL		TRUE	INTEGRAL ACTION ON / Conectar acción I En el algoritmo PID pueden conectarse y desconectarse individualmente las acciones PID. La acción I está conectada si está activada la entrada "Conectar acción I".
INT_HOLD	BOOL		FALSE	INTEGRAL ACTION HOLD / Congelar acción I La salida del integrador puede congelarse. Para ello se ha de activar la entrada "Congelar acción I".
I_ITL_ON	BOOL		FALSE	INITIALIZATION OF THE INTEGRAL ACTION / Inicializar acción I La salida del integrador puede inicializarse a la entrada I_ITLVAL. Para ello se ha de activar la entrada "Inicializar acción I".
D_SEL	BOOL		FALSE	DERIVATIVE ACTION ON / Conectar acción D En el algoritmo PID pueden conectarse y desconectarse individualmente las acciones PID. La acción D está conectada si está activada la entrada "Conectar acción D".
CYCLE	TIME	$\geq 1ms$	T#1s	SAMPLE TIME / Tiempo de muestreo El tiempo entre las llamadas del bloque debe ser constante. La entrada "Tiempo de muestreo" indica el tiempo entre las llamadas del bloque.
SP_INT	REAL	-100.0...100.0 (%) ó magnitud física 1)	0.0	INTERNAL SETPOINT / Consigna interna La entrada "Consigna interna" sirve para ajustar un valor de consigna.
PV_IN	REAL	-100.0...100.0 (%) ó magnitud física 1)	0.0	PROCESS VARIABLE IN / Entrada de valor real En la entrada "Entrada de valor real" puede parametrizarse un valor de puesta en servicio, o aplicarse un valor real externo en formato en coma flotante.

Continuación Tabla 24 parámetros de entrada CONT_C

PV_PER	WORD		W#16#0000	PROCESS VARIABLE PERIPHERY / Valor real de periferia El valor real en formato de periferia se aplica al regulador en la entrada "Valor real de periferia".
MAN	REAL	-100.0...100.0 (%) ó magnitud física 2)	0.0	MANUAL VALUE / Valor manual La entrada "Valor manual" sirve para establecer un valor manual mediante función de manejo/visualización (interface hombre máquina).
GAIN	REAL		2.0	PROPORTIONAL GAIN / Ganancia proporcional La entrada "Ganancia proporcional" indica la ganancia del regulador.
TI	TIME	>= CYCLE	T#20s	RESET TIME / Tiempo de acción integral La entrada "Tiempo de acción integral" determina el comportamiento temporal del integrador.
TD	TIME	>= CYCLE	T#10s	DERIVATIVE TIME / Tiempo de diferenciación (acción derivativa) La entrada "Tiempo de diferenciación" determina el comportamiento temporal del diferenciador.
TM_LAG	TIME	>= CYCLE/2	T#2s	TIME LAG OF THE DERIVATIVE ACTION / Tiempo de retardo de la acción D El algoritmo de la acción D contiene un retardo que puede parametrizarse en la entrada "Tiempo de retardo de la acción D".
DEADB_W	REAL	>= 0.0 (%) ó magnitud física 1)	0.0	DEAD BAND WIDTH / Ancho de zona muerta El error de regulación se conduce por una zona muerta. La entrada "Ancho de zona muerta" determina el tamaño de la zona muerta.
LMN_HLM	REAL	LMN_LLM...100.0 (%) ó magnitud física 2)	100.0	MANIPULATED VALUE HIGH LIMIT / Límite superior del valor manipulado El valor manipulado tiene siempre un límite superior y uno inferior. La entrada "Límite superior del valor manipulado" indica el límite superior.
LMN_LLM	REAL	-100.0...LMN_HLM (%) ó magnitud física 2)	0.0	MANIPULATED VALUE LOW LIMIT / Límite inferior del valor manipulado El valor manipulado tiene siempre un límite superior y uno inferior. La entrada "Valor manipulado, límite inferior" indica el límite inferior.
PV_FAC	REAL		1.0	PROCESS VARIABLE FACTOR / Factor de valor real La entrada "Factor de valor real" se multiplica por el valor real. La entrada sirve para la adaptación del margen de valor real.
PV_OFF	REAL		0.0	PROCESS VARIABLE OFFSET / Offset del valor real La entrada "Offset del valor real" se suma con el valor real. La entrada sirve para la adaptación del margen de valor real.
LMN_FAC	REAL		1.0	MANIPULATED VALUE FACTOR / Factor del valor manipulado La entrada "Factor del valor manipulado" se multiplica por el valor manipulado. La entrada sirve para la adaptación del margen de valor manipulado.

Tabla 24 parámetros de entrada CONT_C (continuación)

Parámetro	Tipo de datos	Valores posibles	Por defecto	Descripción
LMN_OFF	REAL		0.0	MANIPULATED VALUE OFFSET / Offset del valor manipulado La entrada "Offset del valor manipulado" se suma al valor manipulado. La entrada sirve para la adaptación del margen de valor manipulado.
I_ITLVAL	REAL	-100.0...100. 0 (%) ó magnitud física 2)	0.0	INITIALIZATION VALUE OF THE INTEGRAL ACTION / Valor de inicialización de la acción I La salida del integrador puede forzarse con la entrada I_ITL_ON. En la entrada "Valor de inicialización de la acción I" está el valor de inicialización.
DISV	REAL	-100.0...100. 0 (%) ó magnitud física 2)	0.0	DISTURBANCE VARIABLE / Magnitud perturbadora Para control anticipativo de la magnitud perturbadora, ésta se conecta en la entrada "Magnitud perturbadora".

Tabla 25. Parámetros de salida CONT_C

Parámetro	Tipo de datos	Valores posibles	Por defecto	Descripción
LMN	REAL		0.0	MANIPULATED VALUE / Valor manipulado En la salida "Valor manipulado" se saca en formato en coma flotante el valor manipulado que actúa efectivamente.
LMN_PER	WORD		W#16#0000	MANIPULATED VALUE PERIPHERY / Valor manipulado periferia Esta salida entrega el valor manipulado en formato de periferia.
QLMN_HLM	BOOL		FALSE	HIGH LIMIT OF MANIPULATED VALUE REACHED / Alcanzado el límite superior del valor manipulado El valor manipulado tiene siempre un límite superior y un límite inferior. La salida "Alcanzado el límite superior del valor manipulado" indica la superación de la limitación superior.
QLMN_LLM	BOOL		FALSE	LOW LIMIT OF MANIPULATED VALUE REACHED / Alcanzado el límite inferior del valor manipulado El valor manipulado tiene siempre un límite superior y un límite inferior. La salida "Alcanzado el límite inferior del valor manipulado" indica la superación de la limitación inferior.
LMN_P	REAL		0.0	PROPORTIONALITY COMPONENT / Acción P La salida "Acción P" contiene la componente proporcional de la magnitud manipulada.

Tabla 25. Parámetros de salida CONT_C (continuación)

Parámetro	Tipo de datos	Valores posibles	Por defecto	Descripción
LMN_I	REAL		0.0	INTEGRAL COMPONENT / Acción I La salida "Acción I" contiene la componente integral de la magnitud manipulada.
LMN_D	REAL		0.0	DERIVATIVE COMPONENT / Acción D La salida "Acción D" contiene la componente diferencial de la magnitud manipulada.
PV	REAL		0.0	PROCESS VARIABLE / Valor real Por la salida "Valor real" se emite el valor real que actúa efectivamente.
ER	REAL		0.0	ERROR SIGNAL / Error de regulación Por la salida "Error de regulación" se emite la diferencia o error de regulación que actúa efectivamente.

16.2 FORMACIÓN DE IMPULSOS CON EL FB 43 "PULSEGEN"

El FB "PULSEGEN" sirve para construir un regulador PID con salida de impulsos para gobernar actuadores proporcionales.

El FB "PULSEGEN" permite realizar reguladores PID de dos o de tres puntos con salida con modulación de ancho de impulsos. Este bloque de función se aplica casi siempre en combinación con el regulador continuo "CONT_C".

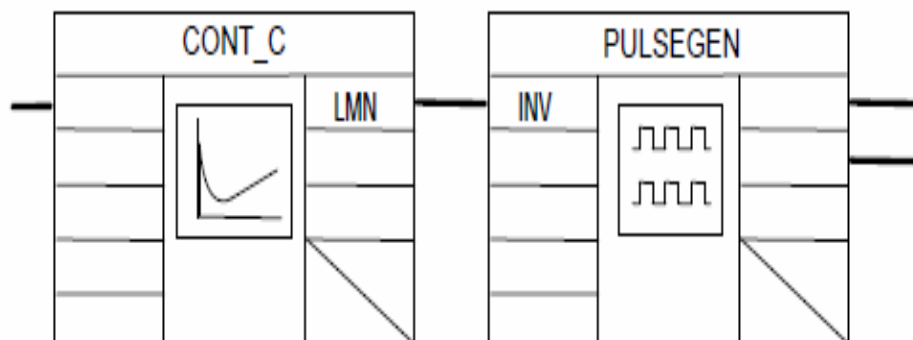


Figura 56. Bloques de función CONT_C Y PULSEGEN

El PULSEGEN transforma la magnitud de entrada INV (= LMN del regulador PID) por modulación del ancho de impulsos en un tren de impulsos de período constante, que corresponde al tiempo de ciclo con el

que se actualiza la magnitud de entrada y que debe parametrizarse en PER_TM.

La duración de un impulso por período es proporcional a la magnitud de entrada. Aquí, el ciclo parametrizado mediante PER_TM no es idéntico al tiempo de procesamiento del FB "PULSEGEN". Por el contrario, un ciclo PER_TM se compone de varios ciclos de procesamiento del FB "PULSEGEN" donde la cantidad de llamadas del FB "PULSEGEN" por cada ciclo PER_TM representa una medida de la precisión de la modulación del ancho de impulsos. [11]

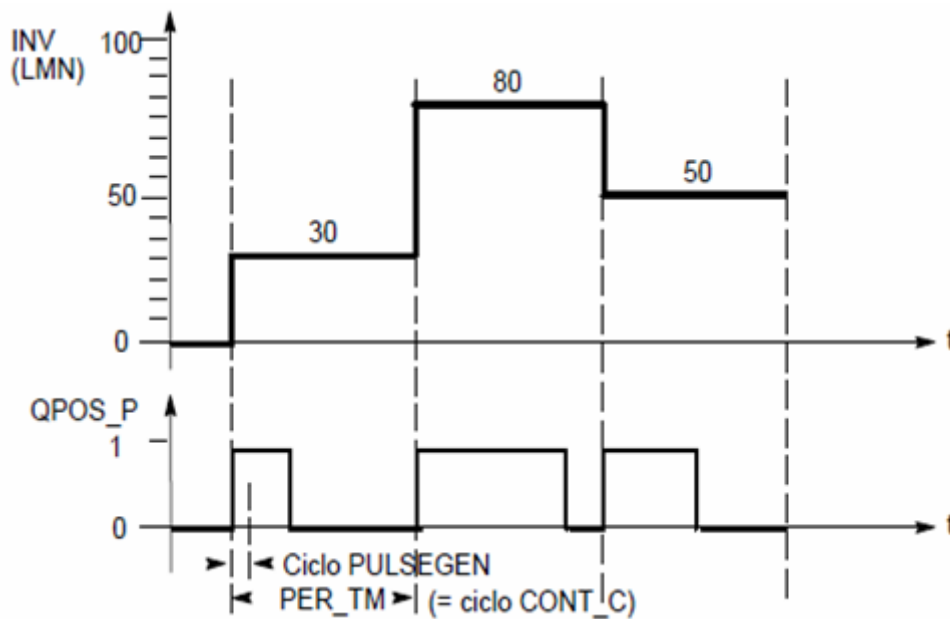


Figura 57. Ciclo PER_TM, Ciclo PULSEGEN

Una magnitud de entrada del 30 % y 10 llamadas del FB "PULSEGEN" por cada PER_TM significan pues:

"uno" en la salida QPOS para las primeras tres llamadas del FB "PULSEGEN" (30 % de 10 llamadas)

"uno" en la salida QPOS para las tres primeras llamadas del FB "PULSEGEN" (70% de 10 llamadas)

Esquema de bloques del PULSEGEN

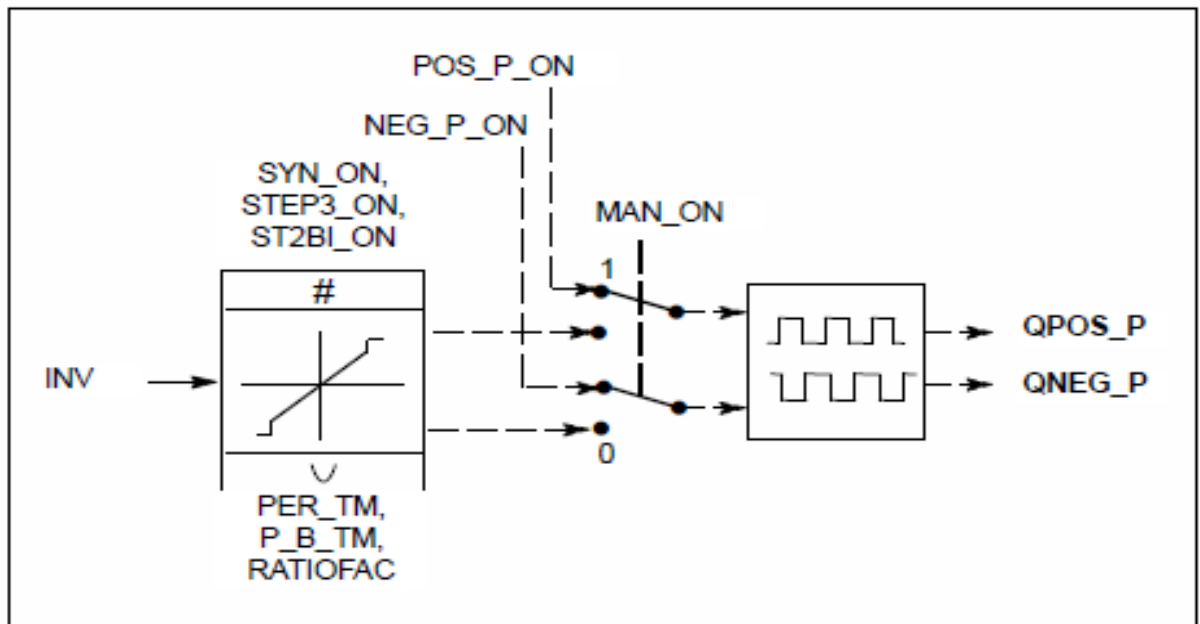


Figura 58. Esquema de bloques del PULSEGEN

Tabla 26. Parámetros de entrada del PULSEGEN

Parámetro	Tipo de datos	Valores posibles	Por defecto	Descripción
INV	REAL	-100.0...100.0 (%)	0.0	INPUT VARIABLE / Variable de entrada En el parámetro de entrada "Variable de entrada" se aplica una magnitud de valor manipulado analógica.
PER_TM	TIME	$\geq 20 \cdot \text{CYCLE}$	T#1s	PERIOD TIME / Período En el parámetro "Período" se introduce la duración de período constante de la modulación de ancho de impulsos. La duración corresponde al tiempo de muestreo del regulador. La relación entre el tiempo de muestreo del formador de impulsos respecto al tiempo de muestreo del regulador determina la precisión de la modulación del ancho de impulsos.
P_B_TM	TIME	$\geq \text{CYCLE}$	T#0ms	MINIMUM PULSE/BREAK TIME / Duración mínima de impulso o duración mínima de pausa En el parámetro "Duración mínima de impulso o duración mínima de pausa" puede parametrizarse una longitud mínima de impulso o de pausa.
RATIOFAC	REAL	0.1 ...10.0	1.0	RATIO FACTOR / Factor de relación Este parámetro permite modificar la relación de la duración de impulsos negativos a impulsos positivos. En un proceso térmico, esto permite compensar diferentes constantes de tiempo para calentar y enfriar (por ejemplo, con calefacción eléctrica o refrigeración por agua).
STEP3_ON	BOOL		TRUE	THREE STEP CONTROL ON / Conectar regulación de tres puntos En el parámetro de entrada "Conectar regulación de tres puntos" se activa el correspondiente modo de operación. En la regulación de tres puntos trabajan ambas señales de salida.

ST2BI_ON	BOOL		FALSE	TWO STEP CONTROL FOR BIPOLAR MANIPULATED VALUE RANGE ON / Conectar regulación de dos puntos para margen de valores manipulados bipolar En el parámetro "Conectar regulación de dos puntos para margen de valores manipulados bipolar" puede seleccionarse entre los modos de operación "Regulación de dos puntos para margen de valores manipulados bipolar" y "Regulación de dos puntos para margen de valores manipulados unipolar". Debe ser aquí STEP3_ON = FALSE.
MAN_ON	BOOL		FALSE	MANUAL MODE ON / Conectar modo manual Activando el parámetro de entrada "Conectar modo manual" es posible forzar a mano las señales de salida.
POS_P_ON	BOOL		FALSE	POSITIVE MODE ON / Impulso positivo ON En modo manual de una regulación de tres puntos, el parámetro de entrada "Impulso positivo ON" permite forzar la señal de salida QPOS_P. En modo manual de una regulación de dos puntos, QNEG_P está siempre invertida respecto a QPOS_P.
NEG_P_ON	BOOL		FALSE	NEGATIVE PULSE ON / Impulso negativo ON En modo manual de una regulación de tres puntos, el parámetro de entrada "Impulso negativo ON" permite forzar la señal de salida QNEG_P. En modo manual de una regulación de dos puntos, QNEG_P está siempre invertida respecto a QPOS_P.

Tabla 27. Parámetros de salida del PULSENGEN

Parámetro	Tipo de datos	Valores posibles	Por defecto	Descripción
SYN_ON	BOOL		TRUE	SYNCHRONISATION ON / Conectar sincronización Activando el parámetro de entrada "Conectar sincronización", es posible sincronizar automáticamente la salida de impulsos con el bloque que actualiza la magnitud de entrada INV. De esta forma queda garantizado que una magnitud de entrada cambiante salga también lo más rápidamente posible como impulso.
COM_RST	BOOL		FALSE	COMPLETE RESTART / Rearranque completo El bloque tiene una rutina de rearranque completo que se ejecuta cuando está activada la entrada "Rearranque completo".
CYCLE	TIME	$\geq 1\text{ms}$	T#10ms	SAMPLE TIME / Tiempo de muestreo El tiempo entre las llamadas de bloque debe ser constante. La entrada "Tiempo de muestreo" indica el tiempo entre las llamadas de bloque.

16.2.1 Estructura por software Simatic S7-300 para el control y medida de nivel de líquido del sistema hidráulico.

Para implementar el proyecto, se establece un programa de acondicionamiento de la señal digitalizada de corriente que proviene de la periferia a través del modulo analógico; para esto Se crea un OB1, el cual contiene el programa principal; a través de él se hacen los llamados de los bloques de función CONT_C Y PULSEGEN; a demás se crea un DB global (base de datos), el cual almacena el valor de la corriente de entrada, salida y erro del sistema. [11]

- En el siguiente tramo de programa se acondiciono la señal digitalizada de corriente:

```
AUF DB 1 // Abrir la base de datos //
L PEW 306 // Cargar el ACC1 con la entrada de la periferia //
ITD // Convertir de entero de 16 bits a entero de 32 bits //
DTR // Convertir de entero de 32 bits a real //
L 2.764800e+004 // Cargar la resolución del modulo análogo en ACC1//
/R // dividir por el número real 2.764800e+004 la periferia //
L 1.600000e+001 // cargar el rango de la medición desde 4mA hasta
20mA//
*R // multiplicar por el rango//
L 4.000000e+000 //cargar la deriva//
+R // sumar la deriva//
T DB1.DBD 2 // Transferir a la base de datos//
```

- El siguiente segmento de programa muestra la configuración y parametrización para la regulación del sistema:

Parametrización de un PI en lenguaje de instrucciones en simatic S7-300

```
CALL "CONT_C", DB2 //Bloque de regulación//
```

COM_RST:=FALSE //Rearranque complete//
MAN_ON:=FALSE //Conectar modo manual//
PVPER_ON:=FALSE //Valor real de la periferia//
P_SEL :=TRUE //Conectar ganancia proporcional//
I_SEL :=TRUE //Conectar acción I//
INT_HOLD:=FALSE //Congelar acción I//
I_ITL_ON:=FALSE //Inicializar acción I//
D_SEL :=FALSE//Conectar acción D//
CYCLE :=T#170MS //Tiempo de ciclo//
SP_INT:=2.000000e+001//Set point//
PV_IN :=DB1.DBD2 //Entrada de valor real//
PV_PER:= //Valor de periferia//
MAN := //Valor manual//
GAIN :=5.700000e+000 //Ganancia de acción proporcional//
TI :=T#170MS //Tiempo de acción integral//
TD := //Tiempo de diferenciación//
TM_LAG:= //Tiempo de acción derivativa//
DEADB_W:=0.000000e+000 //Ancho de la zona muerta//
LMN_HLM:=1.000000e+002 //Limite superior del valor manipulado//
LMN_LLM:=0.000000e+000 //Limite inferior del valor manipulado//
PV_FAC:= //Factor de valor real (si se usa PV_PER)//
PV_OFF:= //Offset de valor real (si se usa PV_PER)//
LMN_FAC:=1.000000e+000 //Factor de valor manipulado//
LMN_OFF:=0.000000e+000 //Offset de valor manipulado//
I_ITLVAL:= //Valor de inicialización de la acción I//
DISV := //Magnitud perturbadora//
LMN :=DB1.DBD6 //Valor manipulado//
LMN_PER:=

QLMN_HLM:= //Valor límite máximo manipulado//
QLMN_LLM:= //Valor límite mínimo manipulado//
LMN_P := //Componente proporcional de la magnitud manipulada//
LMN_I := //Componente integral de la magnitud manipulada//
LMN_D := //Componente derivativa de la magnitud manipulada//
PV :=
ER :=DB1.DBD10 //Señal de error//

- El siguiente fragmento de programa muestra la configuración del modulador de ancho de pulso (PULSEGEN), para poder controlar la válvula de nuestro sistema:

Modulación por ancho de impulsos PWM

CALL "PULSEGEN", DB3 //Bloque de PULSEGEN//
INV :=DB1.DBD6 //Entrada análoga//
PER_TM:=T#35MS //Periodo//
P_B_TM:=T#1MS //Duración mínima de impulso//
RATIOFAC: =1.000000e+000 //Factor de relación//
STEP3_ON:=FALSE //Regulación de tres puntos//
ST2BI_ON:=FALSE //Regulación de dos puntos//
MAN_ON:=FALSE //Conectar modo manual//
POS_P_ON:=TRUE //Forzar impulse positivo//
NEG_P_ON:=TRUE //Forzar impulso negativo//
SYN_ON:=TRUE //Conectar sincronización//
COM_RST:=FALSE //Rearranque completo//
CYCLE :=T#1MS //Tiempo de muestreo//
QPOS_P:=A8.4 //Salida modulada en ancho de impulso positivo//
QNEG_P:= //Salida modulada en ancho de impulso negativo//
BE // Fin del programa//

17. CONCLUSIONES

- El desarrollo de este trabajo de grado se enfocó en la aplicación de los conocimientos adquiridos durante el programa de tecnología eléctrica, como lo es la aplicación de las tecnologías de la automatización. Para este caso fue direccionada a un proceso de llenado de líquido de un tanque de almacenamiento, proceso muy común y de vital importancia en las industrias.
- La acción de control a ser usada en un proceso depende directamente del tipo de respuesta del proceso o planta. La respuesta del módulo de control de nivel es la de un sistema de primer orden, por lo tanto la acción proporcional implementada para el controlador es suficiente para obtener resultados satisfactorios.
- La programación del PLC usado es sencilla y permite enfocarse en la lógica del programa. Se debe tener en cuenta los tiempos de conversión y la toma de los datos ya que se podrían tener lecturas incorrectas lo que implica acciones de control no deseadas.
- A la hora de realizar un control o automatización se requiere de fiabilidad; con este proyecto se puede mostrar que implementando un autómatas se puede realizar un excelente control que cumpla con: un alto grado de precisión, calidad, exactitud, facilidad y velocidad.
- Los errores determinados en las mediciones y adquisición de datos de las diferentes variables dependen en su gran parte del método y dispositivos utilizados. Además, cuando se trabaja con dispositivos no lineales, estos contribuyen a que el sistema presente márgenes de errores en la salida mismo.

- El sensor de presión utilizado para determinar el nivel de líquido en el tanque presenta una característica lineal, estable y con buenos tiempos de respuesta. Esto facilita considerablemente el control de la variable ya que no es necesario realizar una regresión lineal de los datos ni tampoco se tienen tiempos muertos considerables.

BIBLIOGRAFIA

[1] AJUSTE, CONFIGURACIÓN Y CONTROL DE CUATRO TANQUES

ACOPLADOS. Autores: G. Castelo Dpto. de Informática y Análisis Numérico, Universidad de Córdoba; J. Garrido Dpto. de Informática y Análisis Numérico, Universidad de Córdoba; F. Vázquez Dpto. de Informática y Análisis Numérico, Universidad de Córdoba.

[2] CONTROL DE NIVEL CON SENSORES CAPACITIVOS

http://www.silge.com.ar/pdf/ap_03.pdf

[3] CONTROL DE NIVEL PARA TANQUES DE AGUA CON REALIMENTACIÓN.

<http://docentes.uni.edu.ni/fec/Alejandro.Mendez/Nivel1.pdf>

[4] MODULO DIDÁCTICO PARA EL CONTROL DE NIVEL DE LIQUIDOS.

<http://docentes.uni.edu.ni/fec/Alejandro.Mendez/Nivel2.pdf>

[5] EL CONTROL DE LA PRESIÓN EN LOS PROCESOS INDUSTRIALES

Presión - Monografias_com.mht

[6] Transmisor de presión SITRANS P, serie DS III con comunicación HART/ Sitrans.pdf

[7] Siemens Simatic sistemas de automatización S7-300 y M7-300, datos de los módulos

[8] Siemens Simatic S7-300 SM331; AI 8x12 Bit, Getting Started 1ª parte: 4-20mA

[9] <http://www.sapiens.itgo.com/documents/doc68.htm>

[10] <http://spanish.alibaba.com/product-cgs/2w-series-solenoid-valve-224188192.html>

[11] **Software estandar para S7-300/400 PID Control (Regulación PID)**