

DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y CONTROL DE UN SISTEMA DE
ALMACENAMIENTO DE LIQUIDOS DE SEGUNDO ORDEN

OSCAR FERNANDO GIL TREJOS
DAVID ROBAYO GARCIA

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE TECNOLOGÍA
PROGRAMA DE TECNOLOGÍA ELÉCTRICA
PEREIRA
2011

DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y CONTROL DE UN SISTEMA DE
ALMACENAMIENTO DE LIQUIDOS DE SEGUNDO ORDEN

OSCAR FERNANDO GIL TREJOS.
1088267483
DAVID FABIAN ROBAYO GARCIA
1088236616

Trabajo de grado
Presentado como requisito para optar al título de:
Tecnólogo eléctrico

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE TECNOLOGÍA
PROGRAMA DE TECNOLOGÍA ELÉCTRICA
PEREIRA
2011

Nota de aceptación:

Firma del director del programa

Firma del director del proyecto

Firma del jurado

Pereira, 1 Febrero del 2012

Dedicatoria

David Fabián Robayo García

Agradezco y dedico este trabajo a mi madre Olga Lucia García M, a mi padre Ramón Robayo S. a mis hermanos Jean camilo Robayo G, Karen Lucia Robayo, Silvana Robayo A. y amigo Carlos gamarra Núñez que a pesar de las circunstancias siempre me han apoyado y ayudado de todas las formas y maneras posibles. También gracias a sus enseñanzas y consejos para no ser una simple persona del mundo, ser bueno, día a día mejorar de mis errores y el poder entregar todo por un trabajo bien hecho.

Oscar Fernando Gil Trejos

Este trabajo va dedicado a mis padres, porque creyeron en mí y porque me sacaron adelante, dándome ejemplos dignos de superación y entrega, porque en gran parte gracias a ustedes, hoy puedo ver alcanzada mi meta, ya que siempre estuvieron impulsándome en los momentos más difíciles de mi carrera, y porque el orgullo que sienten por mí, fue lo que me hizo ir hasta el final. Va por ustedes, por lo que valen, porque admiro su fortaleza y por lo que han hecho de mí. Mis agradecimientos a mis profesores que me instruyeron y a mis amigos que me brindaron su ayuda, su atención y lo más importante su amistad.

Un entero agradecimiento al ingeniero Sigifredo Arregocés y al profesor Jhon Jaime Robby Goez por la gran labor de enseñanza, apoyo a la labor científica, experiencia, paciencia y entrega a la escuela de tecnología eléctrica y estudiantes. Que nos motivan a avanzar para ser mejores profesionales y personas.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCION.....	i
II. OBJETIVOS.....	1
ANTECEDENTES.....	2
GLOSARIO.....	3
1. MEDICIÓN DE NIVEL.....	10
1.1 MÉTODOS DE MEDICIÓN.....	10
1.1.1 Instrumentos de medida directa.....	10
1.1.1.1 Método de la mirilla de nivel.....	10
1.1.1.2 Método de barra calibrada.....	11
1.1.1.3 Interruptor de flotador.....	12
1.1.1.4 Método de flotador/cuerda.....	13
1.1.2 Instrumentos basados en la presión hidrostática.....	14
1.1.2.1 Medidores manométricos y de presión diferencial.....	14
1.1.2.2 Método de burbujeo.....	16
1.1.3 Instrumentos basados en métodos electromecánicos.....	17
1.1.3.1 Método por desplazamiento.....	17
1.1.3.2 Método de supresión de la rotación.....	19
1.1.3.3 Sistemas de medición de plomada.....	19
1.1.4 Instrumentos basados en medición de carga.....	21
1.1.4.1 Método de pesaje.....	21
1.1.5 Medición de nivel por método de horquillas vibrantes.....	21
1.1.6 Detección de niveles por conductividad.....	23
1.1.7 Medición de nivel por capacidad.....	25
1.1.8 Medición de niveles por ultrasonido.....	26
1.1.9 Medición de niveles por microondas en líquidos.....	27
1.1.10 Detección y medición radiométrica de niveles.....	28
2. SENSORES DE PRESION.....	30
2.1 Sensores Mecánicos.....	30
2.1.1 Sensor en tubo Bourdon.....	30
2.1.2 Sensor con Diafragma.....	31
2.1.3 Sensor de fuelle.....	32
2.2 SENSORES NEUMÁTICOS.....	32
2.2.1 Sensor en tipo paleta o tobera.....	32
2.3 SENSORES ELECTROMECAÑICOS.....	33
2.3.1 Sensores de inductancia variable.....	33
2.3.2 Sensor de reluctancia variable.....	33
2.3.3 Sensores Capacitivos.....	34
2.3.4 Sensores resistivos.....	35
2.3.4.1 Sensores piezoresistivos.....	36
3. SELECCIÓN DEL SENSOR.....	38
3.1 DESCRIPCIÓN Y FUNCIONAMIENTO.....	38
3.1.1 Sensor de presión diferencial MPX.....	38

3.1.2	Sección transversal de un sensor de presión diferencial MPX.....	38
3.1.3	Funcionamiento del sensor de presión diferencial MPX2010.....	39
3.1.4	Linealidad.....	40
3.1.5	Especificación de puertos de entrada de presión.....	40
3.1.6	Especificación y diagrama de pines.....	41
4.	MICROCONTROLADOR.....	42
4.1	CARACTERÍSTICAS DE LOS MICROCONTROLADORES.....	42
4.2	PROCESO DE DESARROLLO.....	43
4.3	DESARROLLO DE SOFTWARE.....	44
4.3.1	Programación del microcontrolador.....	45
4.3.2	Prueba y verificación.....	45
4.4	SELECCIÓN DEL MICROCONTROLADOR PIC 16F87X.....	45
4.4.1	Características.....	46
4.4.2	Distribución de pines.....	46
4.4.3	Diagrama de bloques.....	47
4.4.4	Memoria de programa.....	47
4.4.5	Memoria de datos.....	48
4.4.6	Configuración de los puertos e/s.....	50
4.4.7	Conjunto de instrucciones.....	51
4.4.8	Puertos de entrada/salida.....	52
4.4.9	Ensamblador.....	53
5.	INSTRUMENTACION DE SOPORTE.....	54
5.1	TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS DAQ USB-6008/9 DAQ.....	54
5.1.1	Diagrama de pines.....	55
5.1.2	Datos técnicos.....	56
6.	CONTROL DE PROCESOS CON CONTROLADORES PID INDUSTRIALES.....	58
6.1	INTRODUCCION.....	58
6.2	REGULADOR DIGITAL PID.....	58
6.2.1	Ventajas del regulador digital.....	59
6.2.2	Clases de señales de salida.....	59
6.2.3	Estructuras de regulación ampliadas.....	60
6.2.4	Adaptación.....	60
7.	REGULADOR SIPART DR-20.....	62
7.1	FUNCIONAMIENTO.....	62
7.2	CAMPO DE APLICACIÓN.....	62
7.3	ESTRUCTURA.....	63
7.4	SEÑALES DE ENTRADA ANALÓGICAS.....	64
7.5	MAGNITUDES DE AJUSTE DEL REGULADOR.....	65
7.5.1	Entrada binaria (normal o invertida).....	66
7.5.2	Salida binaria.....	66
7.5.3	Puesto de enchufe GW.....	66
7.5.4	Fuente de alimentación.....	66
7.5.5	Sistemas de cero voltios.....	66

7.6	FUNCIONES DE OPERACIÓN E INDICACIÓN.....	67
7.7	OPERACIÓN DEL PROCESO	69
7.7.1	Parametrización.....	69
7.7.2	Estructuración.....	69
7.7.3	Funciones del aparato	69
7.8.	REGULADOR DE VALOR FIJO DE UN COMPONENTE.....	69
7.9.	APARATO DE CONDUCCIÓN Y MANDO MANUAL, APARATO DE MANDO MANUAL-DDC	70
7.10	INDICADOR DE MAGNITUDES DE PROCESO.....	70
7.11	PREPARACIÓN DE LAS SEÑALES DE ENTRADA ANALÓGICAS.....	70
7.12	INDICACIÓN EN UNIDADES FÍSICAS Y LINEALIZACION DE LA MAGNITUD REGULADA PRINCIPAL.....	70
7.13	RAMPA DE VALOR PRESCRITO, LIMITACIÓN DEL VALOR PRESCRITO Y TRACKING X.....	71
7.14	FILTRO Y UMBRAL DE REACCIÓN DE LA DIFERENCIA DE REGULACIÓN	71
7.15	ALGORITMO DE REGULACIÓN.....	71
7.16	LIMITACIÓN DE LA MAGNITUD DE AJUSTE DEL REGULADOR.....	71
7.17	CONSIDERACIONES IMPORTANTES.....	73
7.17.1	Magnitudes del proceso.....	73
7.17.2	Rampas y márgenes del valor prescrito.....	73
7.17.3	Limitación de la magnitud de ajuste.....	73
8.	VALVULAS.....	78
8.1	VÁLVULAS DE BOLA.....	78
8.2	VÁLVULAS DE MARIPOSA.....	79
8.3	VÁLVULAS DE DIAFRAGMA.....	80
8.4	VÁLVULAS DE RETENCIÓN.....	81
8.5	VÁLVULAS DE GLOBO.....	82
8.6	VÁLVULAS DE COMPUERTA.....	83
8.7	VÁLVULAS DE ALIVIO DE PRESIÓN.....	84
8.8	VÁLVULAS CON MIRILLA/INDICADOR.....	85
8.9	VÁLVULA SERVOCONTROLADA.....	85
8.9.1	Servomotor.....	85
8.9.2	Principios de funcionamiento	86
8.9.3	Tipos de servomotores Coreless & Brushless.....	88
8.9.3.1	Motores de servo Coreless.....	88
8.9.3.2	Motores de servo Brushless.....	88
8.9.4	Rodamientos.....	88
8.9.5	Engranajes de metal	89
8.9.6	Servo válvula.....	89
9.	DISEÑO DE CIRCUITOS IMPRESOS MEDIANTE EL METODO DE TRANSFERENCIA DE TONNER (METODO DE LA PLANCHA).....	90
9.1	CONCEPTOS INICIALES.....	90
9.1.1	Placa de circuitos impresos.....	90

9.1.2	Diseño de pistas.....	90
9.1.3	Diseño por ordenador.....	90
9.1.4	Diseño a mano.....	90
9.2	INICIO DEL PROCESO	90
9.2.1	Preparación de la superficie	90
9.2.2	Fijación de las pistas.....	91
9.3	APLICACIÓN DEL QUÍMICO.....	91
9.4	ACABADO FINAL.....	92
9.5	PROCESO DE PERFORACIÓN.....	93
9.6	RECOMENDACIONES EN EL DISEÑO DE CIRCUITOS IMPRESOS.....	94
10.	SISTEMAS DE CONTROL.....	95
10.1	ESTRATEGIA DE CONTROL	96
10.1.1	Lazo abierto.....	97
10.1.2	Lazo cerrado.....	97
11.	MODELADO MATEMATICO.....	98
11.1	SISTEMAS DE PRIMER ORDEN.....	99
11.2	RESPUESTA TEMPORAL ANTE LA ENTRADA EN ESCALÓN.....	100
11.3	SISTEMAS DE SEGUNDO ORDEN.....	103
12.	MODELADO Y SIMULACIÓN DE DOS TANQUES UNIDOS POR SUS BASES	108
12.1	MODELADO DEL SISTEMA.....	108
13.	DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE LÍQUIDOS DE SEGUNDO ORDEN.....	116
13.1	DISPOSICIÓN DEL PANEL DE CONTROL DEL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE LÍQUIDOS DE SEGUNDO ORDEN.....	118
13.2	DESARROLLO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA HIDRÁULICO....	119
13.2.1	Diseño de la estructura del sistema hidráulico.....	119
13.2.2	Construcción de los tanques de almacenamiento.....	120
13.2.3	Salida de presión para la medición del nivel.....	120
13.2.4	Diagrama del circuito para obtención de medidas y adecuación de la señal de medida.....	121
13.3	ELECCIÓN DE LA SERVO VÁLVULA PARA APLICACIÓN.....	122
13.3.1	Selección de la válvula de 1 pulgada y 2 vías.....	122
13.3.2	Selección del servomotor.....	123
	• Características técnicas servomotor 322hd.....	124
	• Funcionamiento del servomotor típico hitec 322hd.....	124
13.4	SERVOVÁLVULA	126
13.4.1	Características técnicas.....	126
13.4.2	Aplicaciones.....	127
13.5	IMPLEMENTACIÓN Y OBTENCIÓN DE DATOS A LA SALIDA DEL SIPAR DR-20 SISTEMA	127
13.5.1	Programación de variables y parámetros de entrada.....	127

13.5.2 Programación de interruptores de configuración “modo de operación”	128
13.5.3 Obtención de datos a la salida del SIPART DR-20.....	128
13.6 PROGRAMACIÓN DEL PIC "P16F873A".....	129
13.6.1 Diagrama de flujo.....	129
13.6.2 Programa del PIC.....	130
13.6.3 Esquema del circuito de la aplicación con PIC "P16F873A".....	138
13.7 CIRCUITO GENERAL OPERATIVO.....	138
13.7.1 Proceso para obtención del circuito impreso en baquela.....	139
13.8 COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA HIDRÁULICO (OBTENCIÓN DE DATOS EXPERIMENTALES Y SIMULACIÓN).....	141
13.8.1 Dinámica del sistema.....	141
13.8.2 Respuesta de la planta con una perturbación tipo escalón unitario	149
13.8.3 Análisis de la respuesta en frecuencia.....	150
13.9 OBTENCIÓN DE DATOS A LA SALIDA DEL SISTEMA DE NIVEL DE LÍQUIDOS DE SEGUNDO ORDEN.....	155
13.9.1 Variable de la salida del sistema abierta al 100%.....	155
13.9.2 Variable de la salida del sistema abierta al 0%.....	156
13.9.3 Resultados comportamiento del sistema.....	158
Recomendaciones.....	161
14. CONCLUSIONES.....	162
BIBLIOGRAFÍA.....	163

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Método de la mirilla de nivel.....	11
Figura 2. Método de barra calibrada	12
Figura 3. Método Smith de flotador.....	13
Figura 4. Método de flotador/cuerda.....	14
Figura 5. Método medidor manométrico.....	15
Figura 6. Método medidor manométrico y presión diferencial.....	16
Figura 7. Método de medición por burbujeo.....	17
Figura 8. Método de medición por desplazamiento.....	18
Figura 9. Método de medición con supresión de la rotación por medio de paletas	19
Figura 10. Método de medición por plomada.....	20
Figura 11. Método de medición por pesaje.....	21
Figura 12. Método de medición por horquillas vibrantes.....	22
Figura 13. Método de medición por detección de niveles por conductividad.....	23
Figura 14. Método de medición por detección de niveles por conductividad Con puente wheatstone.....	24
Figura 15. Calibración por detección de espuma.....	24
Figura 16. Medición de nivel por capacidad o variación en la capacitancia.....	25
Figura 17. Medición de nivel por ultrasonido.....	26
Figura 18. Medición de nivel por microondas en líquidos.....	27
Figura 19. Aplicaciones de la radiación gamma.....	28
Figura 20. Sección interna tubo Bourdon.....	30
Figura 21. Funcionamiento espiral de presión para indicación.....	31
Figura 22. Sección interna funcionamiento sensor de diafragma.....	31
Figura 23. Funcionamiento sensor de fuelle.....	32
Figura 24. Funcionamiento sensor neumático.....	32
Figura 25. Sensores de inductancia variable.....	33
Figura 26. Sensores de reluctancia variable.....	34
Figura 27. Sensor capacitivo.....	35
Figura 28. Ecuación para el Cálculo de la resistencia eléctrica.....	35
Figura 29. Funcionamiento de membrana extenso métrica.....	36
Figura 30. Funcionamiento teórico en elementos piezoresistivos.....	36
Figura 31. Sección transversal de sensor piezoresistivo.....	37
Figura 32. Sensor diferencial MPX.....	38
Figura 33. Sección de un sensor de presión diferencial.....	39
Figura 34. Salida de tensión (mVdc) Vs presión diferencial (kPa).....	40
Figura 35. Sensor MPX especificación de puertos.....	41
Figura 36. Esquema sensor de presión Compensación de temperatura y calibración	41
Figura 37. Alternativas generación de código.....	44
Figura 38. Diagrama general de pines.....	46

Figura 39. Diagrama general de bloques en el PIC	47
Figura 40. Diagrama del mapa de memoria y apilacion.....	48
Figura 41. Diagrama del direccionamiento directo/indirecto.....	49
Figura 42. Diagrama mapa de registro de archivos.....	50
Figura 43. Diagrama configuración de puertos de e/s.....	51
Figura 44. Conjuntos de instrucción y características	51
Figura 45. Tarjeta de adquisición de datos USB 6008/9.....	54
Figura 46. Requisito de comunicación.....	55
Figura 47. Diagrama de pines de conexión.....	55
Figura 48. Información técnica e/s analógicas.....	56
Figura 49. Información técnica e/s digitales.....	57
Figura 50. Diagrama en bloques de un controlador PID	58
Figura 51. Esquema de control adaptativo	61
Figura 52. Regulador SIPART DR20, esquema funcional.....	64
Figura 53. Convertidor de tensión a intensidad e intensidad a tensión.....	65
Figura 54. Convertidor de tensión a intensidad.....	66
Figura 55. Elementos de operación e indicación.....	67
Figura 56. Válvula de bola abierta.....	79
Figura 57. Válvula de bola cerrada	79
Figura 58. Válvula de mariposa cerrada.....	79
Figura 59. Válvula de mariposa con apertura media.....	80
Figura 60. Válvula de mariposa abierta.....	80
Figura 61. Válvula de diafragma abierta.....	81
Figura 62. Válvula de diafragma cerrada.....	81
Figura 63. Válvula de retención a media apertura.....	82
Figura 64. Válvula de globo abierta.....	82
Figura 65. Válvula de globo cerrada.....	83
Figura 66. Válvula de compuerta abierta.....	83
Figura 67. Válvula de compuerta cerrada.....	84
Figura 68. Válvula de alivio de presión mecánica.....	84
Figura 69. Válvula con mirilla de proceso.....	85
Figura 70. Ejemplo de una señal de alimentación del servomotor.....	86
Figura 71. Ejemplo con modulación por ancho de pulsos (PWM).....	87
Figura 72. Diagrama interno Servo válvula de paso de fluidos o gases.....	89
Figura 73. Placa de circuitos impresos.....	90
Figura 74. Fotografía de una placa de circuitos impreso en proceso de limpieza	91
Figura 75. Vista transversal fijación de pistas.....	91
Figura 76. Vista transversal aplicación de químico.....	92
Figura 77. Vista transversal acabado final	92
Figura 78. Fotografía proceso de perforación.....	93
Figura 79. Mapa u orden orientativo de pasos a seguir en el método de transferencia de tinta.....	93
Figura 80. Ángulos de diseño de las pistas.....	94
Figura 81. Esquema general en bloques de un sistema.....	95

Figura 82. Esquema de funcionamiento de un sistema de control genérico	96
Figura 83. Control de lazo cerrado Vs control de lazo abierto.....	97
Figura 84. Respuesta de un sistema de primer orden simple ante una entrada en escalón unitario	102
Figura 85. Tiempos de crecimiento y establecimiento	103
Figura 86. Respuesta en el tiempo de un sistema de segundo orden a una entrada escalón	105
Figura 87. Relación entre las raíces y los polos de la ecuación característica de los sistemas de segundo orden	107
Figura 88. Modelo de dos tanques relacionados.....	108
Figura 89. Diagrama de bloques H_1 , H_2 , Q_1 , Q_2	109
Figura 90. Diagrama de bloques relacionados del sistema con los dos tanques	110
Figura 91. Representación en MATLAB simulink.....	110
Figura 92. Función de transferencia del sistema de dos tanques relacionados.....	111
Figura 93. Modelo en MATLAB relación H_2 y Q_2	112
Figura 94. Modelado del sistema en MATLAB utilizando Simulink con parámetros definidos.....	113
Figura 95. Modelo en MATLAB comportamiento de los tanques.....	113
Figura 96. Modelado con MATLAB de las relaciones entre las variables h_1 , h_2 , Q_1 y Q_2	114
Figura 97. Esquema de relación de los elementos que conforman el control del sistema de almacenamiento de líquidos.....	116
Figura 98. Fotos del montaje del sistema real.....	117
Figura 99. Fotos del montaje del sistema real.....	117
Figura 100. Panel de control del sistema.....	119
Figura 101. Modelo con dimensiones para la estructura de los tanques de almacenamiento.....	119
Figura 102. Modelo con dimensiones para los tanques de almacenamiento.....	120
Figura 103. Esquema de construcción y conexión de la salida de presión.....	121
Figura 104. Circuito implementado para la obtención de medidas.....	122
Figura 105. Principio básico de funcionamiento de la válvula Seleccionada	122
Figura 106. Imagen frontal del servomotor seleccionado.....	123
Figura 107. Imagen frontal del servomotor seleccionado.....	123
Figura 108. Ubicación de piezas dentro del servomotor.....	124
Figura 109. Cambio de posición o ángulo mediante el cambio del ancho de los pulsos.....	125
Figura 110. Aspecto externo e interno de la servoválvula.....	126
Figura 111. Engranajes de apertura servo-válvula.....	127
Figura 112. Curva de respuesta del sistema implementado.....	128

Figura 113. Diagrama de flujo a seguir para programación del PIC.....	129
Figura 114. Circuito de la aplicación con PIC "P16F873A"	138
Figura 115. Diseño de las pistas del circuito general en TraxMaker.....	139
Figura 116. Vista frontal y elementos del circuito general.....	139
Figura 117. Transferencia del circuito impreso por medio de calor.....	140
Figura 118. Limpieza del papel residual.....	140
Figura 119. Verificación de pistas.....	140
Figura 120. Aplicación del químico.....	140
Figura 121. Instalación de los elementos.....	140
Figura 122. Comportamiento del sistema (Altura en cm vs Tiempo en s).....	146
Figura 123. Gráfica del comportamiento del sistema.....	147
Figura 124. Curva de comportamiento del sistema lazo abierto simulada en Matlab	148
Figura 125. Tiempo de subida al 10% y al 90 %.....	149
Figura 126. Análisis de la respuesta en frecuencia.....	150
Figura 127. Margen de fase.....	151
Figura 128. Respuesta en frecuencia con control.....	154
Figura 129. Verificaciones ancho de banda en la respuesta en frecuencia con control.....	154
Figura 130. Comportamiento de la salida con apertura del 100%.....	156
Figura 131. Comportamiento de la salida del sistema con apertura del 0%.....	158
Figura 132. Relación de las curvas de comportamiento.....	158
Figura 133. Tiempo de subida al 10% y 90 %.....	159
Figura 134. Margen de fase.....	160
Figura 135. Grafica de datos a la salida del medidor con problemas de tierras.....	161

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Indicación de ajuste de parámetros.....	72
Tabla 2. Ejemplo programación de parámetros.....	74
Tabla 3. Tablas de conmutadores de estructuración del SIPAR DR-20 Switches 1-37	75
Tabla 4. Tabla de conmutadores de estructuración del SIPAR DR-20 Switches 20-38.....	76
Tabla 5. Tablas de conmutadores de estructuración del SIPAR DR-20 Switches 39-48.....	77
Tabla 6. Valores obtenidos para construir la dinámica del sistema.....	141
Tabla 7. Valores obtenidos aplicando el sistema de control.....	155
Tabla 8. Valores obtenidos aplicando el sistema de control y variable en la salida	156

INTRODUCCIÓN

En el entorno actual de industrialización de los procesos de producción se observa la constante implementación de sistemas de almacenamiento de líquidos de uso general o específico para todo tipo de industrial sea química, textil, metalúrgica, agrícola, etc.

Allí nace la finalidad de este proyecto en el cual se construirá un prototipo de un sistema de segundo de orden en el cual se analizara y aplicara la teoría de control para hacer un sistema seguro, inteligente e independiente para optimizar recursos y uso de personal en dicho proceso.

Se entregará un prototipo o plataforma base para futuros estudios o prácticas por parte de todo el personal vinculado al laboratorio de control o escuela de tecnología eléctrica.

OBJETIVOS

Objetivo general

- Diseño, Construcción, Análisis y Mejora de la dinámica de un sistema propuesto, a través de la implementación de un sistema de control aplicado y controlado por un regulador estándar Siemens referencia SIPART DR-20

Objetivos específicos

- Encontrar y Modelar la dinámica del sistema
- Simulación del modelo en MATLAB
- Estudio de un medidor diferencial de presión e implementación en el prototipo
- Construcción del prototipo
- Aplicación del sistema de control en el prototipo
- Construcción y operación de una servo válvula en el sistema implementado
- Estudio de Estructuración y parametrización de un controlador PID industrial SIPART DR-20
- Obtención de resultados y conclusiones

ANTECEDENTES

- **Control y medida de nivel de líquido con señales de ultrasonido:**

En este trabajo se presenta un sistema combinado de detección de eco ultrasónico para medición de distancias y su implementación en un prototipo de un sistema de primer orden de almacenamiento de líquidos, este control sobre la variable o nivel del líquido de un tanque consta de un elemento principal o actuador del sistema el cual es el autómatas Siemens S7 que toma la medida dada por el sensor de ultrasonido, la interpreta y se encarga de comandar la apertura de una válvula ubicada a la entrada del tanque. [1]

- **Control de nivel para tanques de agua con realimentación:**

En este Documento se abarcan temas como el manejo de potencias para el accionamiento de una electroválvula y una bomba eléctrica sumergible. Este proyecto está completamente controlado por un microcontrolador con aplicaciones como la conversión analógica - 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 censado 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. [2]

- **Control predictivo de tanques acoplados:**

La utilización de la estrategia de control predictivo, que a partir de un modelo del proceso es capaz de hacer que la salida del sistema sea igual a una salida convenientemente predefinida, es altamente atractiva para procesos complejos como el control de tanques acoplados que se presenta. Esta técnica es válida para el control de sistemas que puedan tener grandes retardos, que sean inestables, o no-lineales. En el trabajo se ha empleado tanto la estrategia de control básica como la extendida, basada en la evaluación de las secuencias predichas de entrada y salida dentro de los escalones del horizonte de predicción. Con una identificación del proceso fuera de línea y sin emplear, como es muy usual, ninguna técnica de control adaptativo complementario, se muestran los resultados alcanzados. [9]

GLOSARIO

Atmosfera: Es la capa de aire que rodea la tierra. El aire está retenido por la tierra y no se difunde por el espacio, por su peso. Las capas más próximas a la superficie soportan el peso de las más alejadas y por tanto son más densas.

Caudal: Es el flujo por unidad de tiempo; es decir, la cantidad de fluido que circula por una sección determinada del conducto en la unidad de tiempo

Cinta extensométrica o *strain gage*: es una resistencia eléctrica sensible a la deformación mecánica, pueden tener una gran variedad de forma y tamaño como también de materiales constituyentes y de propiedades mecánicas o eléctricas. La medición eléctrica de magnitudes mecánicas es una de los métodos experimentales de mayor aplicación actual.

DIN: Acrónimo de *Deutsches Institut für Normung* (Instituto Alemán de Normalización) con sede en Berlín, es el organismo nacional de normalización de Alemania. Elabora, en cooperación con el comercio, la industria, la ciencia, los consumidores e instituciones públicas, estándares técnicos (normas) para la racionalización y el aseguramiento de la calidad. El DIN representa los intereses alemanes en las organizaciones internacionales de normalización (ISO, CEI, etc.).

Directivas MPASM: Son comandos del ensamblador que aparecen en el código fuente pero no son trasladados directamente a códigos de operación, son usados para controlar el ensamblador.

Ecuaciones diferenciales lineales y no lineales: Las ecuaciones diferenciales lineales pueden clasificarse en ecuaciones diferenciales lineales invariantes en el tiempo y ecuaciones lineales variantes en el tiempo.

Una ecuación diferencial lineal invariante en el tiempo es aquella en la cual una variable dependiente y sus derivadas aparecen como combinaciones lineales. El siguiente es un ejemplo de esta clase de ecuación.

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 5\frac{dx}{dt} + 10x = 0$$

Puesto que los coeficientes de todos los términos son constantes, una ecuación diferencial lineal invariante en el tiempo también se denomina ecuación diferencial lineal de coeficientes constantes.

En el caso de una ecuación diferencial lineal variante en el tiempo, la variable dependiente y sus derivadas aparecen como combinaciones lineales, pero

algunos de los coeficientes de los términos pueden involucrar a la variable independiente. El siguiente es un ejemplo de este tipo de ecuación diferencial.

$$\frac{d^2x}{dt^2} + (1 - \cos 2t)x = 0$$

Es importante recordar que con objeto de que sea lineal. Entre los ejemplos de ecuaciones diferenciales no lineales se incluyen.

$$\frac{d^2x}{dt^2} + (x^2 - 1)\frac{dx}{dt} + x = 0$$

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{dx}{dt} + x + x^3 = \text{sen}wt$$

Elastomérico: Que posee las propiedades características del elastómero.

Elastómero: Elastómero es un polímetro que cuenta con la particularidad de ser muy elástico pudiendo incluso recuperar su forma luego de ser deformado. Debido a estas características, los elastómeros, son el material básico de fabricación de otros materiales como la goma, ya sea natural o sintética, y para algunos productos adhesivos.

A modo más específico, un elastómero, es un compuesto químico formado por miles de moléculas denominadas monómeros, los que se unen formando enormes cadenas. Es gracias a estas grandes cadenas que los polímeros son elásticos ya que son flexibles y se encuentran entrelazadas de manera muy desordenada

Ensamblador (Assembler): Herramienta de software que traduce el código ensamblador a lenguaje de máquina. Sin embargo, es normal en el uso profesional emplear la palabra ensamblador (*assembler*) en forma ambigua para referirse tanto al lenguaje de programación como a la herramienta de software.

FDT: abreviación de función de transferencia

Flujo: Expresa el movimiento de un fluido, pero también significa para nosotros la cantidad total de fluido que ha pasado por una sección determinada de un conducto.

Flujo magnético: Se denomina flujo magnético a la cantidad de líneas de fuerza que genera un campo magnético. La letra griega Φ representa el flujo magnético. En el sistema de unidades internacionales es la unidad weber (Wb).

Fuerza magnetomotriz: son las líneas de fuerza que es capaz de generar una bobina, lo cual, quiere decir, que está directamente afectada por la intensidad que

pasa por dicha bobina. Al aumentar la intensidad aumentará también la fuerza magnetomotriz.

La letra o el símbolo F o f.m.m representan la fuerza magnetomotriz. En el sistema internacional el amperio-vuelta (Av) es la unidad. La siguiente ecuación es la usada para calcular la fuerza magnetomotriz en una bobina:

$$F = N * I$$

Donde N = Espiras de la bobina. e I = La intensidad.

Función de transferencia: La función de transferencia de un sistema descrito mediante una ecuación diferencial lineal e invariante con el tiempo se define, en términos de Laplace, como el cociente entre la transformada de Laplace de la 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.

Harmonic Drives: Son sistemas de transmisión de potencia de alta precisión más precisos que los trenes de engranajes tradicionales.

Lenguaje Ensamblador o Assembler (Assembly en inglés): Lenguaje de programación de los microcontroladores, microprocesadores, DSP's y en general la mayoría de sistemas embebidos de alta escala de integración.

Mnemónico: palabra que sustituye a un código de operación (en lenguaje de máquina), con lo cual resulta más fácil la programación, es de aquí, de donde se aplica el concepto de lenguaje ensamblador. Un ejemplo de mnemónico es la instrucción *MOV*, que le indica al microprocesador que deben mover datos de un lugar a otro. El microprocesador no entiende palabras, sino números binarios, por lo que es necesario la traducción del término mnemónico a código objeto.

En muchas ocasiones se puede tomar a nivel de usuario como las teclas de acceso rápido que vemos en las ventanas, por ejemplo en un navegador encontramos el menú típico que dice Archivo, Editar, Ver, entre otras opciones, el mnemónico sería el valor de la letra que esta subrayada, así, si presionamos la tecla "Alt" y luego por ejemplo la A, se nos abrirá el menú de archivo, es por esta razón que se puede decir que la A en el menú resulta la tecla mnemónica de Archivo, o la tecla de acceso rápido a la opción Archivo.

Modelos matemáticos: Cualquier tentativa de diseño de un sistema debe empezar a partir de una predicción de su funcionamiento antes de que el sistema pueda diseñarse en detalle o construirse físicamente. Tal predicción se basa en una descripción matemática de las características dinámicas del sistema. A esta descripción matemática se le llama modelo matemático. Para los sistemas físicos,

la mayoría de los modelos matemáticos que resultan útiles se describen en términos de ecuaciones diferenciales. La dinámica de sistemas trata del modelado matemático y el análisis de la respuesta de los sistemas dinámicos.

Pascal: Un pascal equivale a la presión ejercida por una fuerza de 1 N que actúa sobre un área de 1 m².

Perturbaciones: Una perturbación es una señal que tiende a afectar negativamente el valor de la salida de un sistema. Si la perturbación se genera dentro del sistema se denomina interna, en tanto que una perturbación externa se produce fuera del sistema y es una entrada.

Presión: La presión es la magnitud que indica cómo se distribuye la fuerza sobre la superficie a la cual está aplicada. La medida de la presión se puede calcular entonces dividiendo la intensidad de la fuerza por el área de la superficie:

$$P = \frac{F}{A}$$

Por ser el cociente que resulta de dividir dos magnitudes escalares, la presión es también un escalar.

Programación serial en circuito (*In Circuit Serial Programming*): es una tecnología incluida en todos los microcontroladores PIC de Microchip más recientes; la cual posibilita la reprogramación de los mismos sin que se necesaria la remoción de éstos de su circuito de aplicación. Esta característica es extremadamente útil no solamente en la etapa de desarrollo debido a que ahorra tiempo y trabajo, sino que su utilidad se extiende a la etapa de mantenimiento y actualización de los sistemas, dando la posibilidad de reprogramar los mismos "en el campo" en sus respectivas placas ya soldadas, ya sea para corregir errores de software o la mejora del sistema con la implementación de nuevas funciones.

Este método de programación (lectura, escritura y verificación) no es exclusivo de los microcontroladores Microchip, ya que otras marcas como Atmel, Parallax y otros usan también métodos similares conocidos de manera genérica como ISP (In System Programming) y en la arquitectura de Procesadores ARM se utiliza un método similar conocido como JTAG.

PID (Proporcional Integral Derivativo): es un mecanismo de control por realimentación que calcula la desviación o error entre un valor medido y el valor que se quiere obtener, para aplicar una acción correctora que ajuste el proceso. El algoritmo de cálculo del control PID se da en tres parámetros distintos: el proporcional, el integral, y el derivativo. El valor Proporcional determina la reacción del error actual. El Integral genera una corrección proporcional a la integral del error, esto nos asegura que aplicando un esfuerzo de control

suficiente, el error de seguimiento se reduce a cero. El Derivativo determina la reacción del tiempo en el que el error se produce. La suma de estas tres acciones es usada para ajustar al proceso vía un elemento de control como la posición de una válvula de control o la energía suministrada a un calentador, por ejemplo. Ajustando estas tres variables en el algoritmo de control del PID

Regulador Digital PID: El nombre comercial con el que normalmente se conocen a este tipo de instrumentos, que tienen a cargo el control de un solo lazo de control y basados en microprocesadores o microcontroladores, es el de “Instrumentos Unilazo Programables” o “*Single Loop Programmable Instrument*”. SLPI por sus siglas en inglés”).

Esta capacidad no solo implica resolver los algoritmos correspondientes sino también el acondicionamiento de las entradas y salidas variables del proceso, la interfaz del operador, etc.

Reluctancia: Todos los materiales tienen propiedades y, la reluctancia es una de ellas. La reluctancia es la capacidad que tiene un material determinado para dejar formarse las líneas de fuerza. Es un concepto similar al de la resistividad de los materiales o a la resistencia de un circuito eléctrico. De aquí podemos fácilmente deducir que los materiales no ferromagnéticos tienen una alta reluctancia. La letra o símbolo que designa a la reluctancia es la R. La unidad en el sistema internacional es el amperio-vuelta por weber (Av/Wb). La ecuación utilizada para calcular la reluctancia es:

$$R = \frac{F}{\Phi}$$

Sensor: Es un dispositivo que recibe una señal o estímulo y responde con una señal eléctrica. Además los sensores pueden ser activos o pasivos.

Sensor activo: Es un sensor que requiere una fuente externa de excitación como las RTD o células de carga.

Sensor pasivo: Es un sensor que no requiere una fuente externa de excitación como los termopares o fotodiodos.

Setpoint o punto de ajuste: Es cualquier punto elegido de alguna variable de un sistema de control automático. Puede ser: Nivel; presión, temperatura; desplazamiento; rotación; etc

Sistemas lineales y sistemas no lineales: La propiedad más importante de los sistemas lineales consiste en que se les puede aplicar el principio de superposición. Este principio establece que la respuesta producida por la

aplicación simultánea de dos funciones de excitación diferente o entrada, es la suma de dos respuestas individuales. En consecuencia, en los sistemas lineales la respuesta a varias entradas puede calcularse tratando una entrada cada vez y después sumando los resultados. Como resultado del principio de superposición, las complicadas soluciones de las ecuaciones diferenciales lineales se pueden obtener de la suma de las soluciones simples.

Aunque las relaciones físicas con frecuencia se representan mediante ecuaciones lineales, en muchos casos las relaciones reales pueden que no sean del todo lineales. De hecho, un estudio de los sistemas físicos revela que los llamados sistemas lineales son realmente lineales dentro de un rango de operación limitado.

En los sistemas no lineales, la característica más importante es que el principio de superposición no es aplicable. En general, los procedimientos para encontrar la solución de problemas que involucran tales sistemas extremadamente complicados. A causa de la dificultad matemática que representan los sistemas no lineales, con frecuencia es necesario linealizarlos alrededor de una condición de operación. Una vez que un sistema no lineal se aproxima mediante un modelo matemático lineal, se deben usar términos lineales para propósitos de análisis y diseño.

Sistemas de control en lazo abierto: Los sistemas en los cuales la salida no afecta la acción de control se denominan sistemas de control en lazo abierto. En otras palabras, en un sistema de control en lazo abierto no se mide la salida ni se realimenta para compararla con la entrada.

Sistemas de control en lazo cerrado: Los sistemas de control realimentados se denominan también sistemas de control en lazo cerrado. 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 señal de realimentación (que puede ser la señal de salida misma o una función de la señal de salida y sus derivadas y/o 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 realimentado para reducir el error del sistema.

Transformada de Laplace: El método de la transformada de Laplace es un método operativo que aporta muchas ventajas cuando se usa para resolver ecuaciones diferenciales lineales. Mediante el uso de la transformada de Laplace, es posible convertir muchas funciones comunes, tales como las funciones senoidales, las funciones senoidales amortiguadas y las funciones exponenciales, en funciones algebraicas de una variable S compleja. Las operaciones tales como la diferenciación y la integración se sustituyen mediante operaciones algebraicas en el plano complejo. Por tanto, en una ecuación algebraica, una ecuación diferencial lineal se transforma en una variable compleja S . Si se resuelve la ecuación algebraica en S para la variable dependiente, la solución de la ecuación

diferencial (la transformada inversa de Laplace de la variable dependiente) encuentra mediante una tabla de transformadas de Laplace o una técnica de expansión en fracciones parciales.

Una ventaja del método de la transformada de Laplace es que permite el uso de técnicas gráficas para predecir el desempeño del sistema, sin tener que resolver las ecuaciones diferenciales del sistema. Otra ventaja del método de la transformada de Laplace es que, cuando se resuelve la ecuación diferencial, es posible obtener simultáneamente tanto el componente transitorio como el componente de estado estable de la solución.

Transductor: Es un convertidor de un tipo de energía a otra.

1. MEDICIÓN DE NIVEL

El nivel es una de las variables de proceso más utilizada en un entorno industrial, específicamente en el control de almacenamiento de materias primas líquidas y sólidas en general. En la selección del tipo de medidor tienen preferencia, técnicamente, los medidores estáticos frente a los que tienen partes móviles y los que no necesitan contacto con el fluido y se ubican en lugares exteriores al recipiente, así como los que requieren menor modificación en la estructura del recipiente y sus soportes, especialmente cuando éstos están ya construidos.

En cuanto a métodos de medición de nivel, se puede decir que hoy en día se dispone de una amplia gama de técnicas de medición y, por ello, no siempre resulta fácil la elección del método de obtención de lecturas que se adapte mejor a los requerimientos específicos de una instalación. Antes de la llegada de la tecnología de los semiconductores, la mayoría de los métodos se basaban en principios mecánicos y/o neumáticos. Actualmente los métodos de medición más comunes se pueden clasificar de la siguiente forma:

1.1 MÉTODOS DE MEDICIÓN

- Instrumentos de medida directa
- Instrumentos basados en la presión hidrostática
- Instrumentos basados en métodos electromecánicos
- Instrumentos basados en medición de carga
- Detección de nivel por método de horquillas vibrantes
- Detección de niveles por conductividad
- Medición de nivel por capacidad
- Medición y detección de nivel por ultrasonidos
- Medición y detección de nivel por microondas
- Detección y medición radiométrica de niveles

1.1.1 Instrumentos de medida directa

1.1.1.1 Método de la mirilla de nivel. Se puede obtener una indicación visual del nivel en líquidos razonablemente limpios, si parte del tanque o contenedor está fabricado con algún material transparente (Figura 1 (a)). Si la mirilla de nivel se monta en una tubería de derivación con llaves de paso en cada extremo (Figura 1 (b)) se logra aislarla del tanque o contenedor principal, lo cual permite su retiro para mantención.

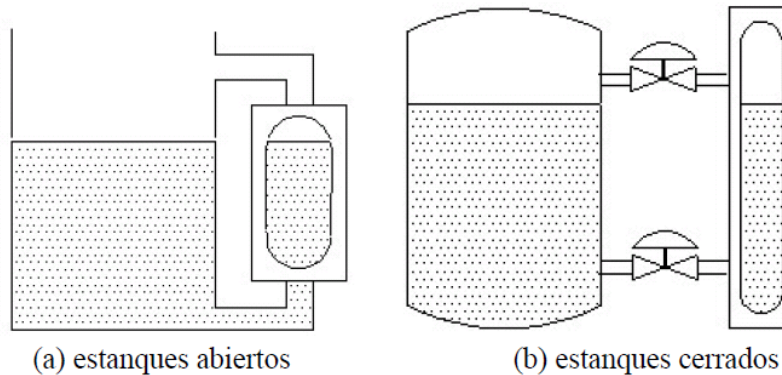
Ventajas:

- Sencillo de implementar
- Fácil mantenimiento
- Relativamente barato

Desventajas:

- Poco apropiado para procesos industriales controlados electrónicamente
- Solo permite inspección visual
- No permite transmisión de la información del nivel

Figura 1. Método de la mirilla de nivel



1.1.1.2 Método de barra calibrada. Este es un método manual muy simple igualmente aplicable a líquidos y a sólidos granulados. En silos muy altos se emplean flejes de acero con un contrapeso en su extremo. La aplicación más familiar de una barra calibrada es la varilla empleada para comprobar el nivel del aceite de un motor de automóvil.

Ventajas:

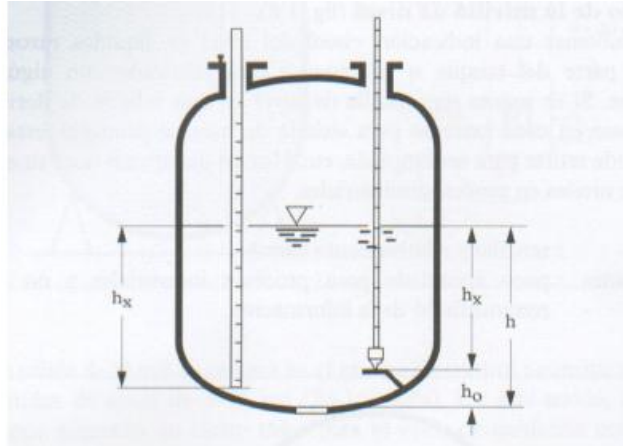
- Sencillo de implementar
- Bajo costo

Desventajas:

- Poco apropiado para procesos industriales controlados
- No dispone de salida electrónica
- Requiere el uso de escaleras

- No es apropiado para recipientes a alta presión

Figura 2. Método de barra calibrada



1.1.1.3 Interruptor de flotador. El interruptor de nivel más conocido y simple, consiste en un cuerpo flotante (flotador) montado sobre un brazo móvil y acoplado magnéticamente a un micro interruptor (externo al proceso) como lo muestra la Figura 3 (a). También hay versiones que consisten en un flotador redondo con un pequeño imán que sube a lo largo del tubo. En el tubo hay uno o varios relés de láminas. Los relés de láminas harán conmutar el relé electromagnético a medida que el flotador (imán) pase (Figura 3 (b)).

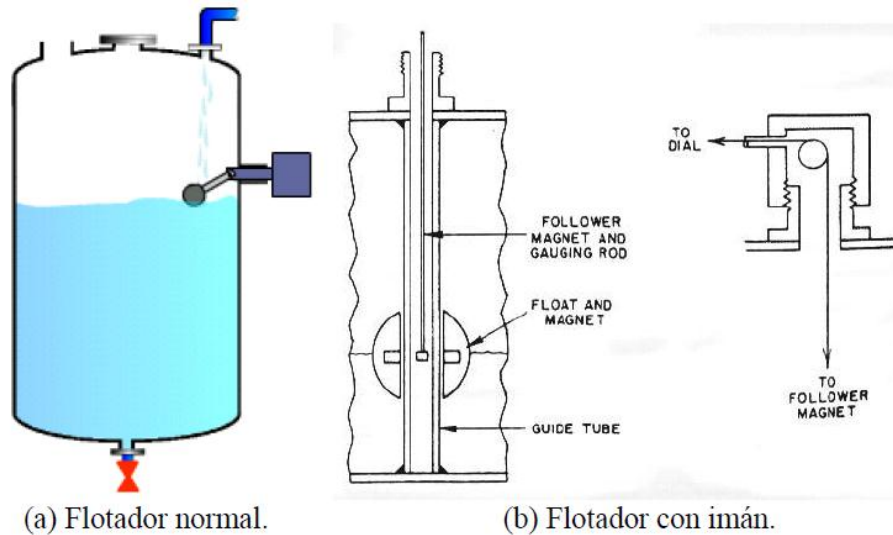
Ventajas:

- Relativamente sencillo
- Adecuado para muchos productos
- Bajo costo

Desventajas:

- Requiere montaje y acoples
- Punto de conmutación no reproducible
- Vida útil corta (aproximadamente 1.000.000 de maniobras de los contactos)
- Requiere mantenimiento periódico para evitar adherencias

Figura 3. Método del interruptor de flotador



1.1.1.4 Método del flotador/cuerda. Al igual que el caso anterior consiste en un flotador, pero en este caso, se utiliza para la medición continua de nivel. La forma más simple de un sistema de este tipo consiste en un flotador, un cable fino, dos agarres y un peso suspendido en la parte exterior del tanque abierto. En la parte exterior se coloca una escala graduada y la posición del peso a lo largo de la escala indica el nivel del contenido del tanque.

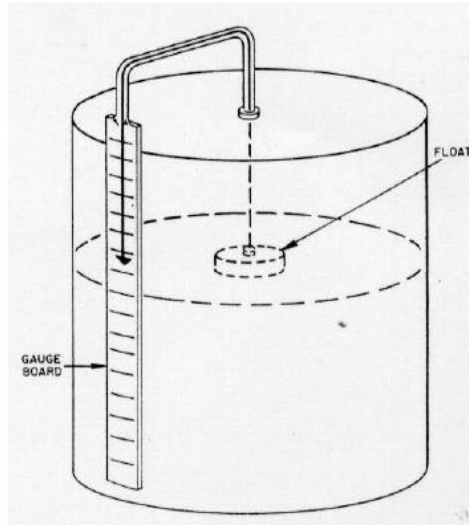
Ventajas:

- Relativamente sencillo
- Adecuados para diversos productos
- Muy preciso

Desventajas:

- Requiere cierta cantidad de equipo mecánico
- No suele ser adecuado para aplicaciones en proceso de los sistemas industriales
- Emplean el sistema de (servo) flotador en conjunto con dispositivos mecánicos y electrónicos

Figura 4. Método del flotador/cuerda



1.1.2 Instrumentos basados en la presión hidrostática

1.1.2.1 Medidores manométricos y de presión diferencial. Este método se basa en la medición de la presión hidrostática correspondiente a una columna de líquido de una altura determinada. La presión se calcula mediante la expresión:

$$P = h * \rho * g$$

Dónde:

P = presión

h = altura de la columna de líquido

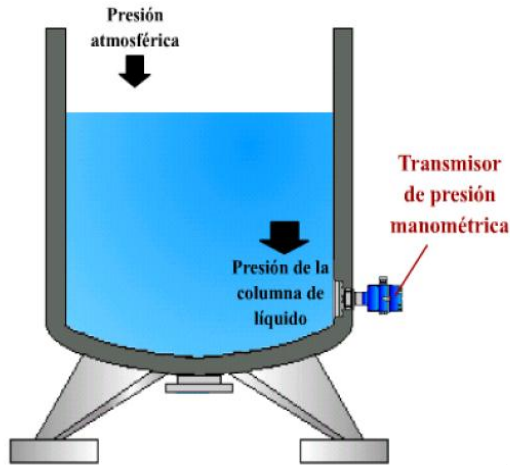
g = aceleración de la gravedad

ρ = densidad relativa

A partir de la fórmula se observa que si la densidad efectiva del medio es constante, la única variable es h , así, la presión es directamente proporcional a la altura h , que corresponde con el nivel del líquido en el tanque. (Figura 5)

La presión hidrostática de la columna de líquido se mide directamente con un transmisor de presión o de presión diferencial.

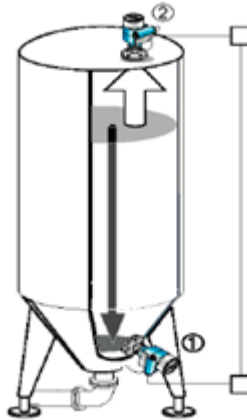
Figura 5. Método del medidor manométrico



La medición de nivel con transmisor de presión se utiliza preferentemente en tanques abiertos expuestos a la atmósfera. En estos casos, la presión medida es igual a la presión de la columna de líquido más la presión atmosférica (presión en la superficie). La presión en la superficie suele ser despreciable porque la mayoría de los sensores de presión disponen de dispositivos que compensan la presión atmosférica. Para estos casos, los transmisores se montan en la parte más baja del tanque. Si el sensor no se puede montar directamente en el lateral del tanque al nivel adecuado, se puede montar en el extremo de una barra o cable y bajarlo desde la parte superior del tanque hasta la profundidad oportuna.

Cuando la presión de la superficie del líquido es mayor que la presión atmosférica (en tanques cerrados y presurizados), se puede emplear un sensor de presión diferencial, el cual mide por un lado la presión total ejercida al fondo del estanque, y por otro lado la presión en la superficie. La presión de la superficie se resta de la presión total, quedando la presión correspondiente a la columna de líquido. La medición de presión diferencial requiere de dos sensores, pero también se puede llevar a cabo directamente con una célula de medición de presión diferencial, como se muestra en la Figura 6.

Figura 6. Método medidor manométrico y presión diferencial



Ventajas:

- Montaje sencillo
- Fácil de ajustar
- Precisión razonable
- Amplio uso en aplicaciones de la industria alimentaria, donde se manejan productos con viscosidades cambiantes

Desventajas:

- Dependiente de la densidad relativa
- Relativamente costoso para mediciones de presión diferencial

1.1.2.2 Método de medición por burbujeo. En este método se mide la presión hidrostática en un tanque insertando un tubo delgado en el líquido y aplicando aire comprimido en el tubo de modo que se empuja hacia abajo la columna de líquido del tubo hasta que salgan burbujas de aire al líquido. Estas burbujas dan su nombre al método. La presión del aire en el tubo es entonces igual a la presión de la columna de líquido y se puede medir con un transmisor de presión, que convierte la presión en una señal eléctrica. El aire comprimido se puede obtener a partir del conducto principal de aire mediante una válvula mano reductora o con un compresor pequeño.

Ventajas:

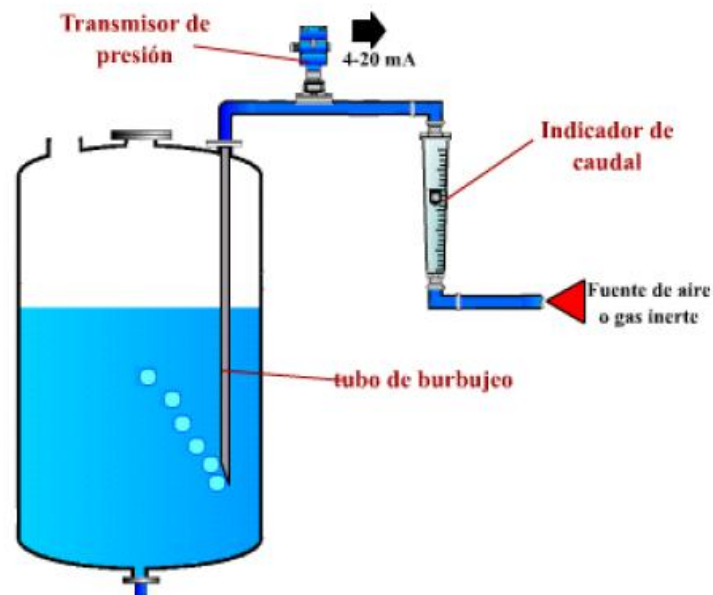
- Montaje sencillo

- Adecuado para sustancias corrosivas

Desventajas:

- Requiere líneas de aire y consumo de aire
- Peligro de acumulación del medio en el tubo
- No es adecuado para uso en recipientes presurizados

Figura 7. Método de medición por burbujeo



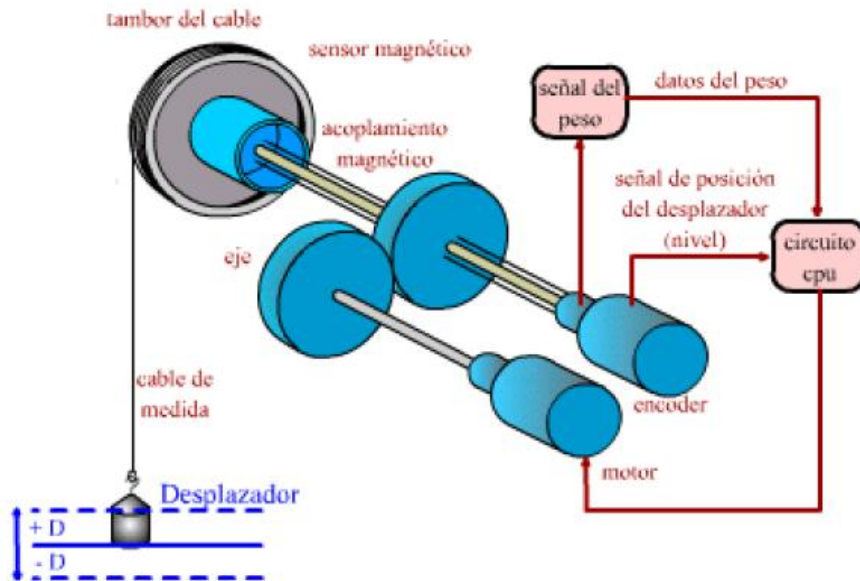
1.1.3 Instrumentos basados en métodos electromecánicos

1.1.3.1 Método por desplazamiento. El método por desplazamiento de un cuerpo se basa en la diferencia entre el peso del cuerpo y la fuerza de flotación hacia arriba que el medio ejerce sobre el cuerpo en desplazamiento (Ley de Arquímedes). La fuerza de flotación hacia arriba depende del volumen del cuerpo en desplazamiento, la densidad relativa y el nivel del medio. Debe cumplirse la condición de que para que el cuerpo se desplace, debe ser más pesado que el medio (densidad específica mayor que el medio). La fuerza diferencial se transmite frecuentemente a un transductor de medición por un sistema de barra de torsión de manera que el equipo se mantenga sellado. El transductor empleado en

el método por desplazamiento de un cuerpo es un transductor de desplazamiento eléctrico o transductor de fuerza.

Un ejemplo de este tipo de instrumentos son los *servo dispositivos de nivel*. Este instrumento mide el peso aparente del “desplazador”. Si el peso aparente del desplazador es muy alto, el desplazador está muy arriba en el producto, y cuando el nivel baja, la fuerza ascendente que ejerce el producto sobre el desplazador es menos intensa. Si el desplazador pesa poco, se hunde mucho en el producto, y cuando el nivel sube, el producto ejerce sobre el desplazador una fuerza ascendente más intensa. El servomotor se basa en las diferencias de nivel y en la fuerza de flotación y se controla de modo que siempre haya una situación de equilibrio. La Figura 8 muestra un servo dispositivo de nivel donde el hilo de medición se desenrolla o se enrolla en un tambor hecho con una gran precisión que va acoplado a un codificador (*encoder*) mediante el cual se puede medir la posición del tambor que corresponde con el nivel del producto.

Figura 8. Método de medición por desplazamiento



Ventajas:

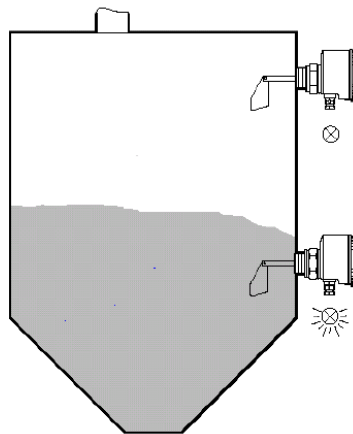
- Alta precisión
- Adecuado para aplicaciones en gases licuados del petróleo gasolinas y otros productos más pesados, tanques subterráneos y almacenamiento criogénico

Desventajas:

- Depende de la densidad relativa del medio
- Requiere equipamiento mecánico

1.1.3.2 Método de supresión de la rotación. En este tipo de interruptor de nivel, un pequeño motor eléctrico sincrónico hace girar una pequeña paleta mediante un mecanismo de engranajes reductor. Cuando el producto ofrece resistencia al movimiento de la paleta, el sistema de transmisión de la rotación montado sobre rodamientos se mueve, activando un micro interruptor que emite una señal de nivel.

Figura 9. Método de medición con supresión de la rotación por medio de paletas



Ventajas:

- Para procesos sencillos y en casos en que se prevean adherencias del producto y para líquidos muy viscosos
- Bajo costo
- No requiere ajuste

Desventajas:

- Sujeto a desgastes
- No es adecuado para productos demasiados ligeros o demasiados densos

1.1.3.3 Sistema de medición por plomada. En estos sistemas se sondea desde la parte superior del silo la superficie del producto y se compara con la altura del

silos, la diferencia de altura es el nivel del producto. Este tipo de indicadores se conocen como *silo pilots*.

Un *silo pilots* consiste en un peso sensor que cuelga en el interior del silo de un cable o fleje enrollado a un tambor impulsado por un motor. Cuando el motor se arranca, ya sea manualmente o automáticamente por un relé temporizador, un contador que representa la altura total del silo en centímetros o decímetros se pone a cero. A medida que el motor hace descender el peso sensor, la rueda envía un impulso a través del fleje de medición por cada centímetro o decímetro bajado y éste se resta de la lectura del contador. Cuando el peso toca la superficie del producto, el fleje afloja, lo cual es detectado y el motor pasa a girar en sentido contrario, los impulsos dejan de enviarse y el fleje se vuelve a enrollar en el tambor. Luego, el peso se queda en la parte superior del silo y el contador permanece con la última altura medida hasta que llega una nueva señal para que la medición se repita.

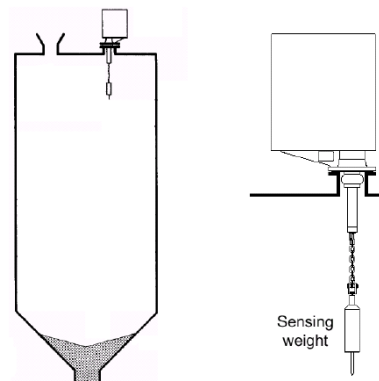
Ventajas:

- Adecuado para silos muy altos de más de 30 m
- Precisión razonable (+/- 100 mm)
- Adecuado para diversos productos, como materiales áridos de grano grueso (como cal, piedra, grava o carbón mineral)

Desventajas:

- Entrega mediciones discretas
- Requiere mantenimiento

Figura 10. Método de medición por plomada



1.1.4 Instrumentos basados en medición de carga

1.1.4.1 Método de pesaje. Este método indirecto de medición de nivel es adecuado para líquidos y áridos, y consiste en montar en el tanque entero o el silo las llamadas células de carga. Los transductores de peso se basan principalmente en el principio del electro elongámetro, pero en este caso no se mide el nivel, sino el peso. Por razones de seguridad, siempre debe haber un interruptor de nivel alto independiente.

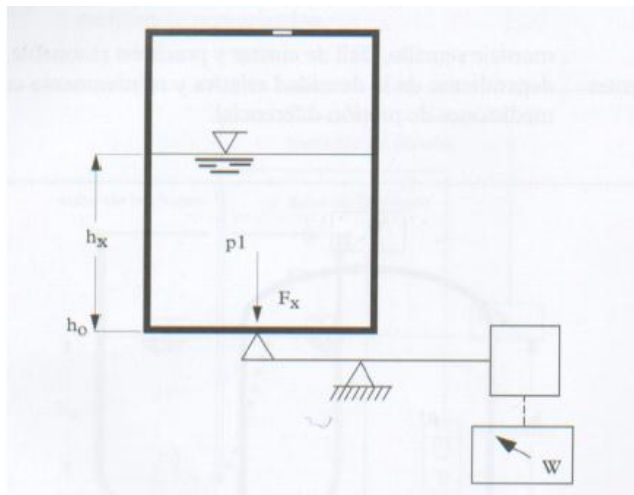
Ventaja:

- Puede proporcionar una medición de nivel muy precisa para productos con densidad relativa constante; mas que le nivel, mide el peso

Desventajas:

- Requiere una gran cantidad de equipamiento mecánico
- Realiza una medida indirecta del nivel
- Es muy caro

Figura 11. Método de medición por pesaje

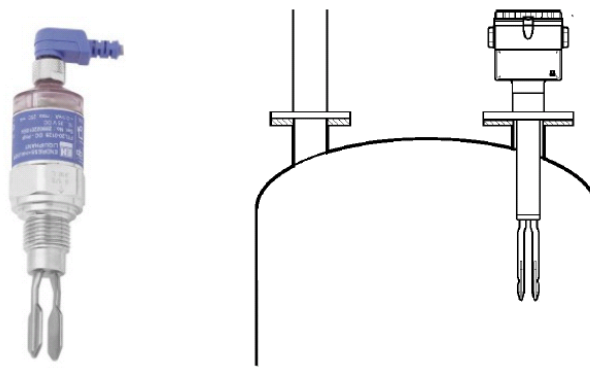


1.1.5 Medición de nivel por método de horquillas vibrantes. Este método solo es adecuado para interruptores de nivel y consiste en una horquilla oscilante o giratoria preparada para que oscile en el aire a su frecuencia de resonancia. Si la

horquilla se recubre de producto, la frecuencia de resonancia se reduce o se amortigua completamente. Esta variación de frecuencia se detecta y se transmite por una señal de salida.

El tipo de horquilla empleada y su frecuencia de resonancia dependerán del producto que se quiera medir. Para áridos granulados o pulverizados se emplea un diapasón a 120 Hz, y para líquidos y lodos se usa una horquilla oscilante a 1000 Hz.

Figura 12. Método de medición por horquillas vibrantes



Ventajas:

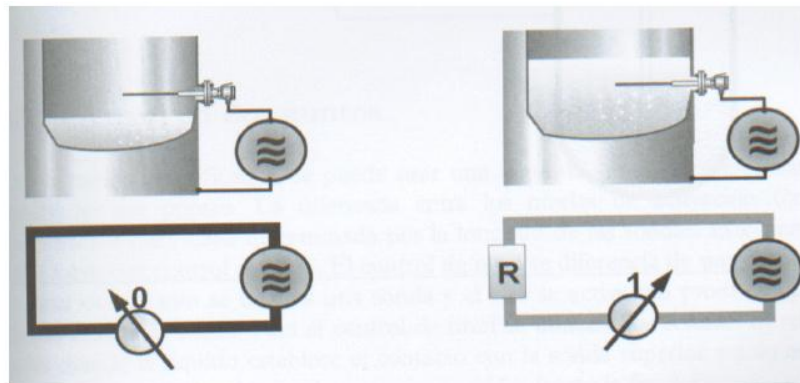
- No se requiere ajuste
- Montaje sencillo
- Funcionamiento seguro
- Relativamente baratos
- Para aplicación universal (líquidos y sólidos). En líquidos apto para aplicaciones con jarabes, salsas y lodos. En sólidos adecuados para muchos tipos de áridos, tales como granulados de poli estireno, leche en polvo, detergentes en polvo, granulados de plástico, aserrín, rebajes o harina

Desventajas:

- No adecuado para tamaños de granos o de partículas en suspensión en líquidos de más de 10 mm, puesto que los gránulos pueden quedar atrapados entre las horquillas
- Limitaciones de presión y temperatura

1.1.6 Detección de niveles por conductividad. Este método solo es adecuado para detección de nivel en líquidos conductivos. Se basa en el principio de que la presencia de un producto causa un cambio en la resistencia entre dos conductores. Se puede obtener fácilmente una indicación de nivel de productos conductores de electricidad en un tanque metálico o en otro contenedor mediante una sonda aislada del recipiente y un amplificador conductivo. Si el producto no está en contacto con la sonda, la resistencia eléctrica entre la sonda y la pared del tanque es muy elevada e incluso infinita. Cuando el nivel del producto se eleva y alcanza la sonda, cierra el circuito entre la sonda y la pared del estanque, y la resistencia disminuye a valores relativamente bajos. (Figura 13).

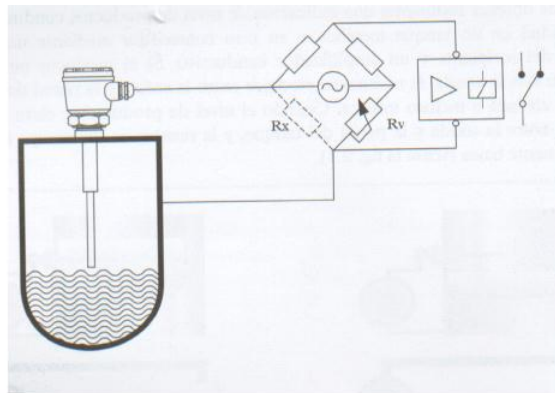
Figura 13. Método de medición por detección de niveles por conductividad



Generalmente la pared metálica del tanque se puede emplear como el segundo electrodo, pero si esto no resulta, se debe introducir otro electrodo en el tanque. Es preferible que la sonda esté conectada a corriente alterna que a corriente continua puesto que, de este modo, se evita el fenómeno de electrólisis, que oxida y causa sulfatación en los electrodos de la sonda. Para detección de niveles mínimos o máximos, se detecta la variación en los valores de resistencia por medio de un filtro amplificador selectivo. Este dispositivo se puede usar como alarma o activando un relé. La Figura 14 muestra el diagrama básico del circuito.

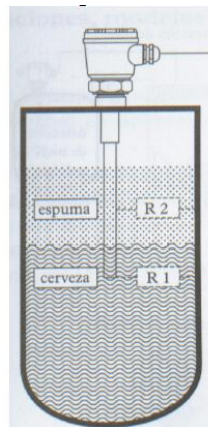
La resistencia de producto R_x se conecta en puente de Wheatstone con la sonda y la conexión a tierra (pared del tanque u otra sonda). Con un potenciómetro, R_v , se equilibra en el puente, entonces, el relé de salida queda a cero. Cuando el producto alcanza el nivel de la sonda, el valor de R_x cambia, el puente se desequilibra y el relé se activa.

**Figura 14. Método de medición por detección de niveles por conductividad
Con puente wheatstone**



La sensibilidad de este tipo de aparatos puede ser modificada, esto permite ajustar el dispositivo para detectar la presencia de espuma en caso necesario (Figura 15).

Figura 15. Calibración por detección de espuma



Ventajas:

- Sencillo
- Bajo costo
- Adecuado para control en dos puntos

Desventajas:

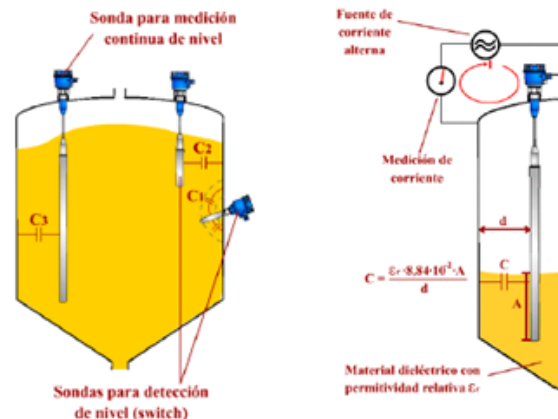
- Se debe evitar que la sonda se ensucie de grasa u otros materiales de deposición
- No es aplicable a la medición de líquidos y sólidos inflamables o explosivos

- Está restringido a productos de conductividad variable

1.1.7 Medición de nivel por capacidad. En este tipo de dispositivos, una sonda metálica y la pared misma del tanque o silo actúan como dos placas de un condensador. La capacidad de este condensador depende del medio que haya entre la sonda y la pared. Si solo hay aire, es decir, si el tanque o silo está vacío, la capacidad del conductor es baja. Cuando parte de la sonda esté cubierta por el producto, la capacidad se incrementará. El cambio de capacidad se convierte mediante un amplificador en una acción de relé o en una señal de salida analógica. Por ello, este método es igualmente adecuado como indicador de nivel (disposición vertical de la sonda) y como interruptor de nivel (sonda en disposición horizontal).

Para realizar la medición de nivel por variación de capacidad, el condensador se conecta a un circuito de corriente alterna de alta frecuencia, de modo que el cambio en la capacidad C , que es el cambio de nivel, se puede convertir en señal eléctrica. La figura 16. Muestra un condensador conectado a una fuente de corriente alterna, conocido como oscilador de alta frecuencia. La corriente que pasa por el circuito es directamente proporcional al valor C de la capacidad.

Figura 16. Medición de nivel por capacidad o variación en la capacitancia



Un oscilador colocado en el cabezal de la sonda convierte los cambios de capacidad en variaciones de voltaje o frecuencia. Esta variación se convierte mediante un relé en un interruptor de capacidad o en un indicador de nivel por capacidad. En fluidos no conductores, se emplea una sonda (electrodo) normal, mientras que en fluidos conductores, con una conductividad mínima de 100 microsiemens. El electrodo está aislado usualmente con teflón. Otra característica de este tipo de sensores es que se puede emplear para medir la altura de la capa de separación entre dos productos.

Ventajas:

- Aplicable para medición de líquidos y sólidos
- No tiene partes móviles
- Adecuado para medios altamente corrosivos

Desventajas:

- Su aplicación está limitada a productos con propiedades eléctricas variables

1.1.8 Medición de niveles por ultrasonido. El método de reflexión del sonido se basa en medir el tiempo de retorno de un pulso de sonido emitido por un sensor. El pulso ultrasónico emitido se refleja en la superficie del producto y el mismo sensor vuelve a detectarlo. El tiempo de retorno de la señal es una medida indirecta de la altura de la sección vacía del tanque. Si a esta distancia se le resta la altura total del tanque, se obtiene el nivel del producto. El tiempo de retorno se convierte en una señal de salida analógica.

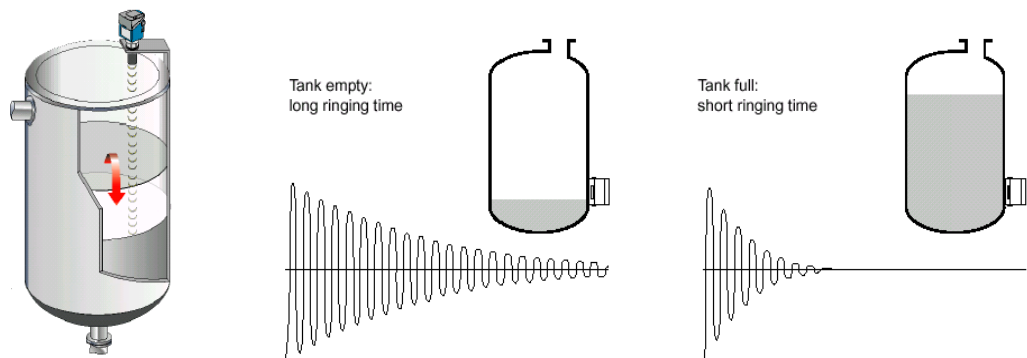
Ventajas:

- No hay contacto con el producto
- Adecuado para diversos líquidos y materiales granulados

Desventajas:

- El producto no debe producir demasiada espuma en la superficie
- El método no es adecuado a altas presiones ni altas temperaturas
- No es aplicable en condiciones de vacío

Figura 17. Medición de nivel por ultrasonido



El sensor (Figura 18) detecta la diferencia de tiempos de resonancia correspondientes a un “vacío” y un “lleno” y activa una señal de salida.

1.1.9 Medición de niveles por microondas en líquidos. Estos transmisores de nivel también se conocen con el nombre de *micropilots* funcionan según el principio del eco. Una antena de varilla o una antena de trompeta dirige impulsos cortos de microondas de 0.8 ns de duración hacia el producto, estos se reflejan en su superficie y la misma antena los detecta a su regreso, esta vez, actuando como receptor. Las microondas se reflejan por la diferencia de impedancia entre el aire y el producto. La distancia a la superficie del producto es proporcional al tiempo de retorno del impulso de microondas.

El nivel del producto se puede medir hasta justo por debajo de la antena de varilla o antena de trompeta, de modo que no hay restricciones de distancia. Este instrumento opera en la banda de frecuencias para aplicaciones industriales, científicas o médicas, llamada banda ISM (desde 6 GHz a 26 GHz).

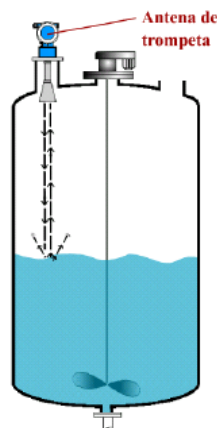
Ventajas:

- Su baja potencia de radiación permite una instalación segura en recipientes metálicos y no metálicos, sin riesgos para los seres humanos o el entorno
- Independiente de la temperatura, de condiciones de altas presiones o vacío, y de la presencia de polvo o vapor

Desventajas:

- El producto debe tener una constante dieléctrica mínima determinada

Figura 18. Medición de nivel por microondas en líquidos

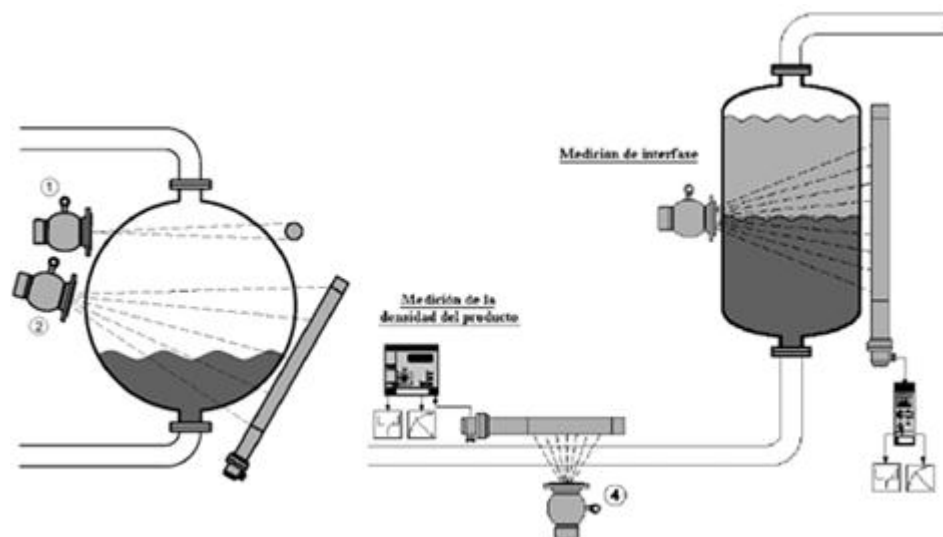


1.1.10 Detección y medición radiométrica de niveles. El principio del funcionamiento de este instrumento, es que cuando hay producto en el tanque o silo, un haz de rayos gamma que lo atraviesa se atenúa. Este es el único método totalmente no invasivo. Ningún elemento del sistema entra en contacto con el medio ni con la atmósfera del proceso. Este método se emplea como indicador de nivel e interruptor de nivel y solo se usa si las condiciones son muy extremas, es decir, altas presiones, temperaturas altas, productos abrasivos, tóxicos, corrosivos o pegajosos. Esto es así principalmente por que la radiación gamma no requiere equipo dentro del tanque o reactor, puesto que penetra fácilmente las paredes del tanque.

Para la medición de nivel, la fuente de rayos gamma emite un haz con un ángulo de salida de aproximadamente 20° o 40° . En el extremo opuesto de la fuente se dispone un detector de rayos gamma conectado eléctricamente con un transmisor de nivel que proporciona una señal de salida. Para la detección de nivel el principio es el mismo, pero en este caso la fuente emite un haz con un ángulo de salida no mayor de 5° ; y en el extremo opuesto el detector de rayos gamma se conecta eléctricamente con un interruptor de nivel.

La intensidad de la fuente de radiación está calculada de modo que cuando el tanque está vacío, el detector transmite justamente los pulsos necesarios para que el amplificador interruptor de nivel o el indicador de nivel procesen una señal. A medida que el nivel del producto aumenta, la radiación se atenúa, el detector deja de transmitir suficientes pulsos y el instrumento indica nivel alto.

Figura 19. Aplicaciones de la radiación gamma



La radiación gamma no se emplea solo en detección e indicación de niveles, sino que, como la atenuación de la energía emitida depende de la densidad del material atenuante, este principio de medición también se puede emplear para la medición de la densidad del producto y para la medición de la interface. Para éste último caso, se debe cumplir que entre los dos materiales debe haber una diferencia de densidad apreciable.

Ventajas:

- Adecuado para todos los productos y su montaje no causa ningún tipo de
- obstrucción
- Los sistemas de medición de nivel por rayos gamma ni siquiera requiere modificaciones en el tanque
- No hay contacto con el producto
- Adecuado para altas presiones y altas temperaturas

Desventajas:

- Se requieren medidas especiales de seguridad
- Alto costo
- Interfaz electrónica relativamente compleja

2. SENSORES DE PRESION

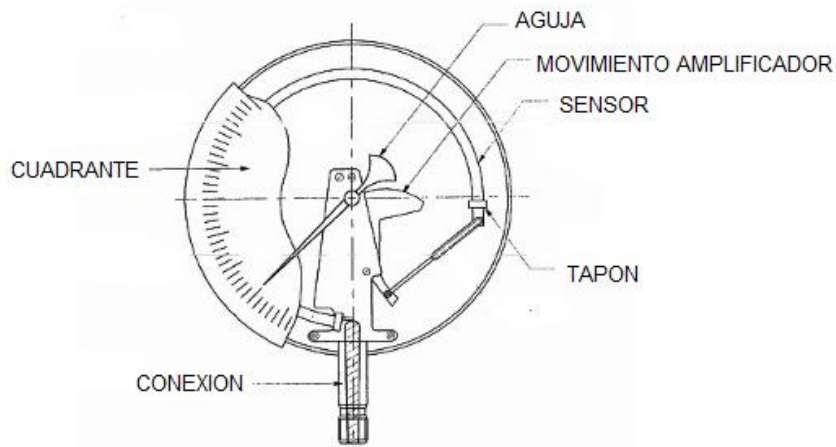
Según su campo de aplicación y clasificación estos se pueden clasificar según tres características:

- Mecánicos
- Neumáticos
- Electromecánicos

2.1 SENSORES MECÁNICOS

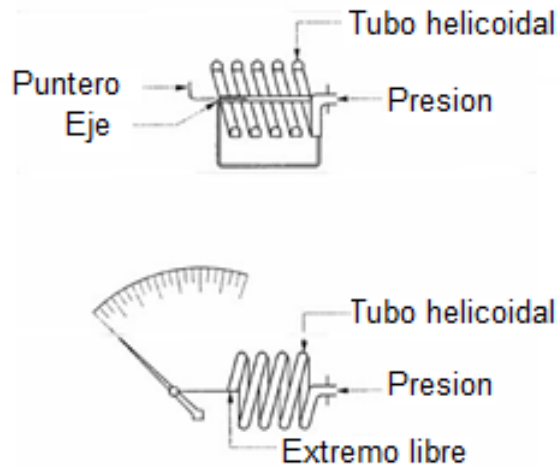
2.1.1 Sensor en tubo Bourdon. Tubo de sección elíptica que forma un anillo casi completo y cerrado por un extremo. Al aumentar la presión en el interior del tubo, éste tiende a enderezarse y el movimiento es transmitido a la aguja indicadora, por medio de un sistema de piñón y cremallera.

Figura 20. Sección interna tubo Bourdon



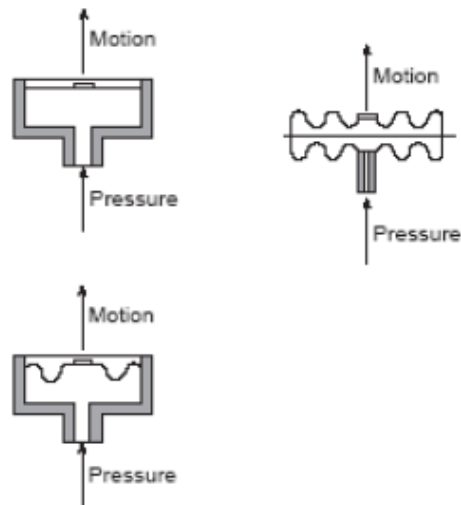
El Elemento en espiral se forma arrollando el tubo Bourdon en forma de espiral alrededor de un eje común, y el helicoidal arrollando más de una espira en forma de hélice. Ideales como registradores.

Figura 21. Funcionamiento espiral de presión para indicación



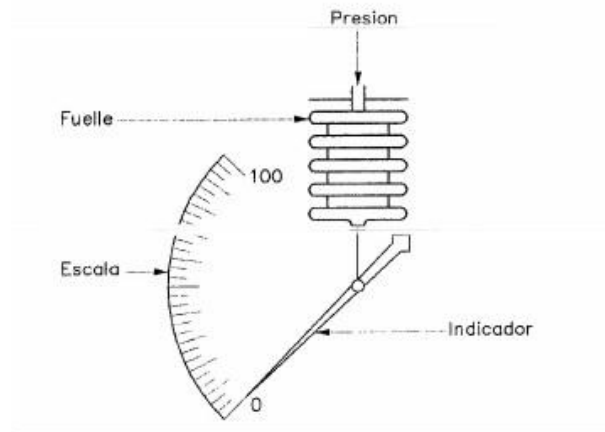
2.1.2 Sensor con diafragma. En éstos, al aplicar presión, el movimiento se aproxima a una relación lineal en un intervalo de medida lo más amplio posible con un mínimo de histéresis. Utilizado para pequeñas presiones.

Figura 22. Sección interna funcionamiento sensor de diafragma



2.1.3 Sensor de fuelle. Parecido al anterior, solo que está conformado por una sola pieza flexible axialmente, y puede dilatarse o contraerse con un desplazamiento considerable. Utilizado para pequeñas presiones

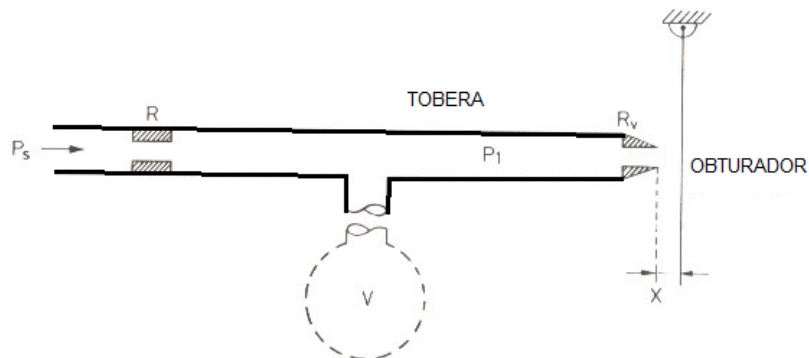
Figura 23. Funcionamiento sensor de fuelle



2.2 SENSORES NEUMÁTICOS

2.2.1 Sensor en sistema tipo Paleta o Tobera. Una tobera es un dispositivo que convierte la energía potencial de un fluido (en forma térmica y de presión) en energía cinética. Como tal, es utilizado en turbo máquinas y otras máquinas, como eyectores, en que se pretende acelerar un fluido para la aplicación de que se trate. El aumento de velocidad que sufre el fluido en su recorrido a lo largo de la tobera es acompañado por una disminución de su presión y temperatura, al conservarse la energía.

Figura 24. Funcionamiento sensor neumático



2.3 SENSORES ELECTROMECAÑICOS

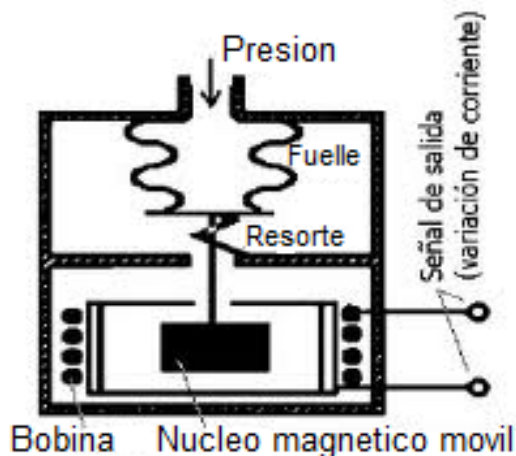
Consisten en la suma de dos elementos, en el cual uno es el elemento mecánico elástico y el siguiente sería un transductor eléctrico que puede ser resistivo, inductivo, de reluctancia variable o capacitivo.

2.3.1 Sensores de inductancia variable. El desplazamiento de un núcleo móvil dentro de una bobina aumenta la inductancia de ésta en forma casi proporcional a la porción metálica del núcleo contenida dentro de la bobina. Esto hace aumentar la tensión inducida en el bobinado.

Ventajas:

- No producen rozamiento en la medición
- Tienen una respuesta lineal
- Son pequeños y de construcción robusta
- Su precisión es del orden del 1%

Figura 25. Sensores de inductancia variable

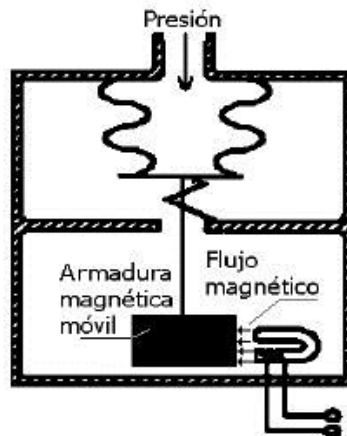


2.3.2 Sensor de reluctancia variable. Consisten en un imán permanente o un electroimán que crea un campo magnético dentro del cual se mueve una armadura de material magnético. El circuito magnético se alimenta con una fuerza magnetomotriz constante, con la cual, al cambiar la posición de la armadura, 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.

Ventajas:

- Alta sensibilidad a las vibraciones
- Sensibles a la temperatura

Figura 26. Sensores de reluctancia variable

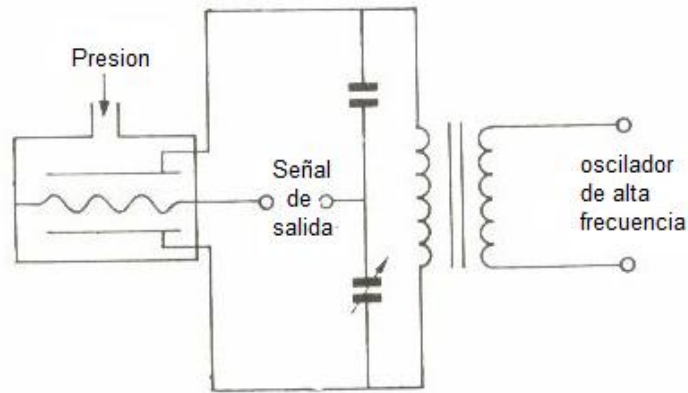


2.3.3 Sensores Capacitivos. Se basan en la variación de capacidad que se produce en un condensador al desplazarse una de sus placas por la aplicación de presión. Consiste en dos condensadores, uno de capacidad fija (de referencia) y el otro de capacidad variable, el cual da la medida.

Ventajas:

- Tamaño pequeño
- Construcción robusta
- Adecuados para medidas estáticas y dinámicas
- Señal de salida débil, por lo cual requieren de amplificación en su salida
- Sensibles a la variación de temperatura
- Su intervalo de medida es relativamente amplio, entre 0,5 - 600 bar y su precisión es del orden de 0,2 a 0,5 %

Figura 27. Sensor capacitivo



2.3.4 Sensores resistivos. El principio de medida con sensores resistivos se basa en la medida de la variación de la resistencia inducida por la deformación en función de la presión. La resistencia de un conductor eléctrico está definida por la ecuación.

Figura 28. Ecuación para el Cálculo de la resistencia eléctrica

$$R = \rho \frac{l}{A}$$

Dónde:

R = Resistencia eléctrica

ρ = Resistencia específica

l = Longitud

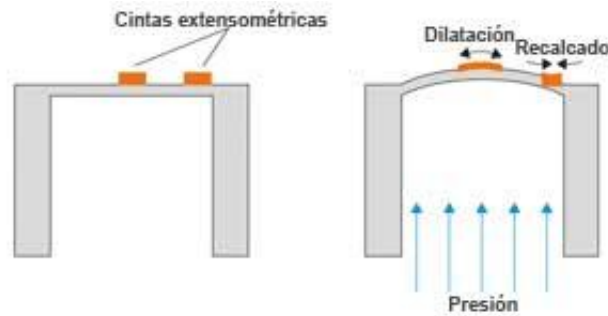
A = Área o superficie de la sección

Una tracción del conductor aumenta la longitud y reduce la superficie de sección con la consecuencia de un aumento de la resistencia eléctrica, ya que la resistencia específica se mantiene constante. Una deformación provocada por recalado tendría el efecto contrario. Para la realización del principio se utiliza un cuerpo base que se deforma de manera controlada al someterlo a presión. A menudo este cuerpo consiste en una membrana con una parte fina.

El valor de la deformación en función de la presión se mide mediante una cinta extensométrica.

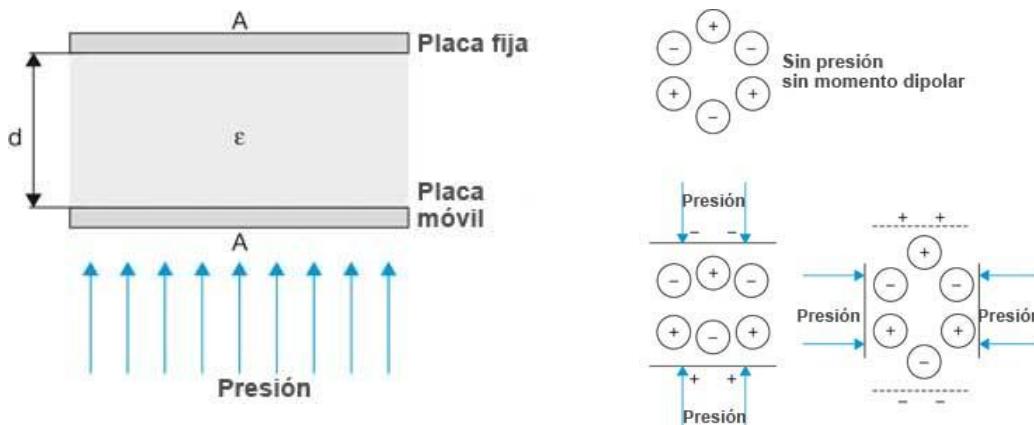
Habitualmente se encuentran cuatro cintas extensométricas en una membrana, de las cuales, unas están ubicadas en el área de dilatación y otras en el área del recalco. La deformación de la membrana provoca la deformación de las cintas con el efecto de un aumento proporcional de la resistencia (por dilatación) o de una reducción (por recalco). Para realizar una medición precisa se conecta las cintas a un puente de *Wheatstone*.

Figura 29. Funcionamiento de membrana extenso métrica



2.3.4.1 Sensores piezoresistivos. El principio de la medida con sensores piezoresistivos es similar al de los sensores resistivos. La diferencia reside en la utilización de semiconductores como cintas extensométricas en vez de metal y la deformación provoca en este caso una variación de la resistencia específica por efectos de su orientación atómica. Según la ecuación indicada arriba, la resistencia eléctrica varía proporcional con la resistencia específica. Este efecto piezoresistivo con semiconductores es de un factor 10 hasta 100 veces mayor que con metal.

Figura 30. Funcionamiento teórico en elementos piezoresistivos



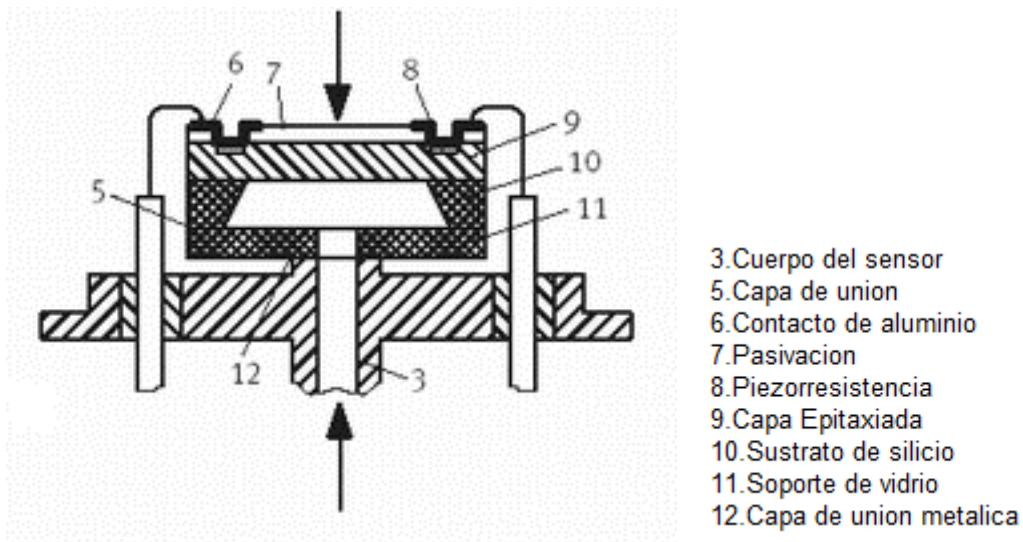
Las cintas metálicas pueden colocarse en cualquier material, mientras que las cintas semiconductoras están incorporadas como microestructura en la membrana. Por lo tanto las cintas extensométricas y el cuerpo expuesto a la

deformación están compuestas del mismo material. Normalmente se incorporan cuatro cintas en una membrana de silicio formando un puente de *Wheatstone*.

Dado que las microestructuras no presentan la suficiente resistencia contra numerosos medios de proceso, el chip se encapsula para la mayoría de las aplicaciones. La transmisión de la presión se efectúa en este caso de manera indirecta, por ejemplo, mediante una membrana metálica o mediante aceite como medio de transmisión.

El gran volumen del efecto piezoresistivo permite la aplicación de estos sensores también para presiones muy bajas. Sin embargo la elevada sensibilidad a efectos de temperatura requiere una compensación de temperatura individual para cada sensor.

Figura 31. Sección transversal del sensor piezoresistivo



3. SELECCIÓN DEL SENSOR

3.1 DESCRIPCIÓN Y FUNCIONAMIENTO

El funcionamiento de los sensores de presión de la serie MPX de Motorola está basado en el diseño patentado del calibrador de fuerza. A diferencia de los sensores de presión más convencionales que utilizan las cuatro resistencias exactamente apareadas en una configuración de puente de *Wheatstone*, la serie MPX utiliza solamente un único elemento piezoresistivo implantado en un diafragma de silicio que sensa la tensión mecánica inducida en el diafragma por una presión externa. La salida es un voltaje analógico proporcional a la presión de entrada y al voltaje de alimentación radiométrico. La alta sensibilidad y una excelente repetitividad a largo plazo hacen que sean las unidades más apropiadas para la mayoría de aplicaciones.

La precisión es muy buena debido al ajuste de las resistencias de calibración y compensación con láser controlado por ordenador, dando la medición de presión muy exacta sobre un rango amplio de temperatura. El efecto de la temperatura es típicamente $\pm 0,5$ % del fondo de escala sobre un rango de temperatura de 0 a 85 °C, mientras que el efecto sobre la tensión de offset, sobre un rango de temperatura similar, es de ± 1 mV como máximo.

3.1.1 Sensor de presión diferencial MPX. En Dichos sensores la presión atmosférica se utiliza como referencia, en un lado del sensor está abierto a la atmósfera mientras que la otra entrada se encuentra en el sistema a medir.

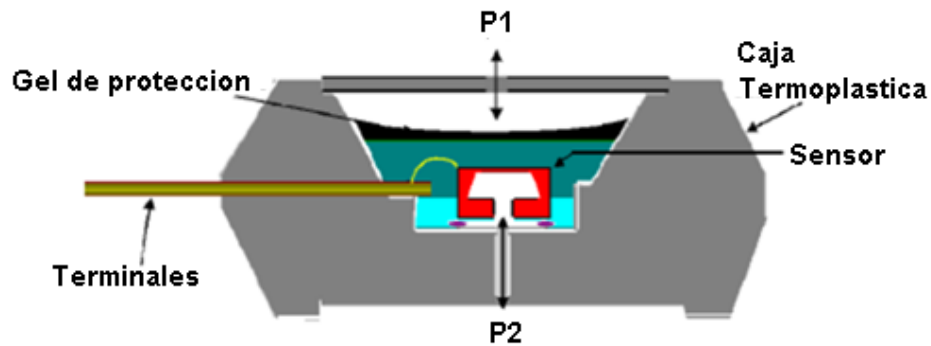
Figura 32. Sensor diferencial MPX



3.1.2 Sección transversal de un sensor de presión Diferencial MPX. La sección transversal de la estructura diferencial muestra un gel de silicona que aísla la superficie del “dado” y los hilos de conexión de los entornos duros, mientras que permite que la señal de presión sea transmitida al diafragma de silicio. Las características de trabajo de los sensores de presión de la serie MPX, las pruebas de fiabilidad y homologación están basadas en el uso de aire seco como medio de

presión. Los otros medios que no sean aire seco pueden tener efectos adversos en las características y estabilidad a largo plazo.

Figura 33. Sección de un sensor de presión diferencial



3.1.3 Funcionamiento del sensor de presión diferencial MPX2010. Los sensores de silicio piezoresistivos serie MPX2010, proporcionan medidas muy precisas de tensión y su salida lineal es directamente proporcional a la presión aplicada. Estos sensores constan de un solo chip de silicio monolítico con el indicador de tensión y red y una fina película de resistencia integrada.

Características eléctricas

Alimentación: Típica 10 V Máxima 16 V

Rango de medida: 0 a 10 kPa (0 a 1.45 psi)

Salida: 25 mV a escala máxima

Ventajas:

- Montaje sencillo
- Fácil de ajustar
- Precisión razonable
- Amplio uso en aplicaciones de la industria alimentaria, donde se usan productos con viscosidades cambiantes
- Bajo costo

Desventajas:

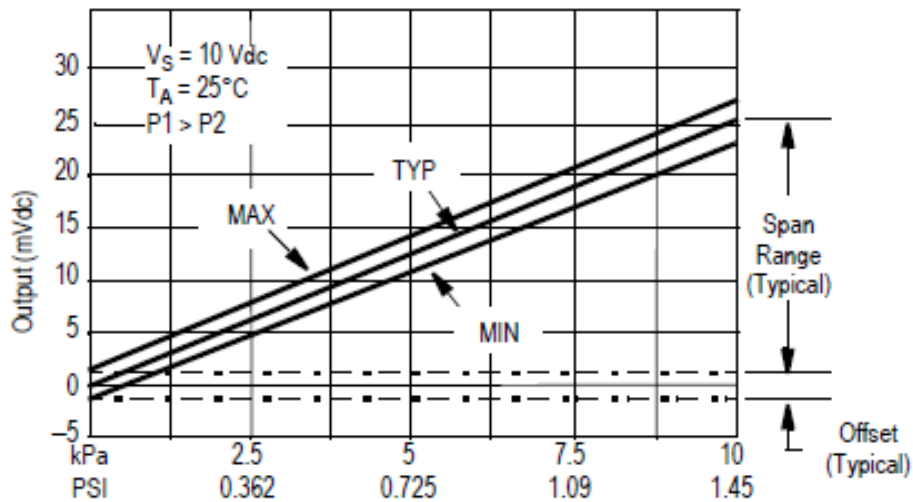
- Dependiente de la densidad relativa
- Tensión de salida no referida a tierra

3.1.4 Linealidad. La linealidad se refiere a que la salida del transductor se da con base en la siguiente ecuación:

$$V_{out} = + V_{off} + Sensibilidad \times Presión$$

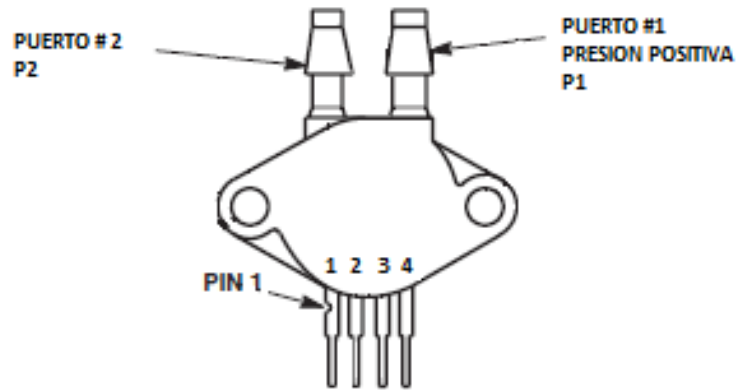
La curva característica de éste sensor se muestra en la figura 35.

Figura 34. Salida de tensión (mVdc) Vs presión diferencial (kPa)



3.1.5 Especificación de los puertos de entrada de presión. Es un sensor de presión diferencial de hasta 10 kPa, bastante sencillo y de bajo costo. Como se puede observar en la figura 36, éste cuenta con 2 boquillas, en las cuales se le aplican distintas presiones, respondiendo con un voltaje en función de la diferencia entre las presiones de dichas boquillas, si en la boquilla P1 hay más presión que en la boquilla P2, habrá como resultado un voltaje positivo, en cambio, si en P2 hay mayor presión que en P1, el voltaje será negativo, cabe destacar que la salida de este, está dada en milivoltios.

Figura 35. Puertos del Sensor MPX



3.1.6 Especificación y diagrama de pines. La distribución de pines se inicia en el pin1 con marca guía de identificación y va hasta el pin4, así:

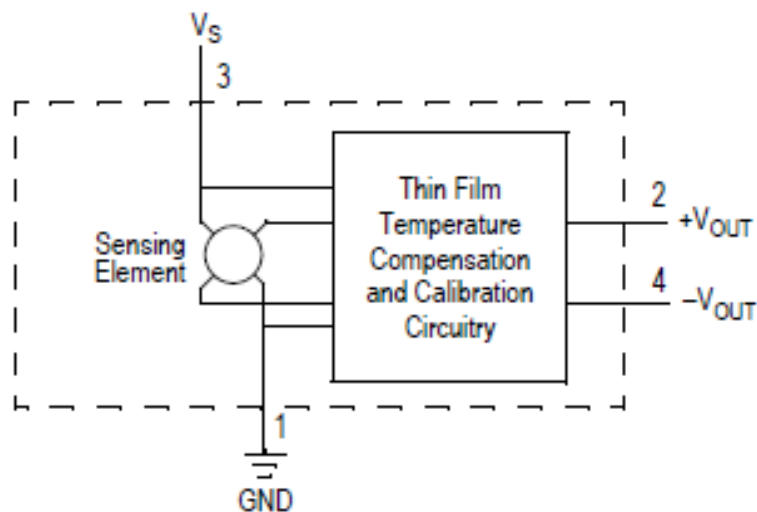
PIN 1: Común o tierra “GND”

PIN 2: SALIDA DE TENSIÓN POSITIVA “+Vout”

PIN 3: ALIMENTACIÓN DEL SENSOR “Vs”

PIN 4: SALIDA DE TENSIÓN NEGATIVA “-Vout”

Figura 36. Esquema en bloques del sensor de presión



4. MICROCONTROLADOR

Los microcontroladores son computadores digitales integrados en un chip que cuentan con un microprocesador o unidad de procesamiento central (CPU), una memoria para almacenar el programa, una memoria para almacenar datos y puertos de entrada salida. A diferencia de los microprocesadores de propósito general, como los que se usan en los computadores PC, los micro controladores son unidades autosuficientes y más económicas.

El funcionamiento de los microcontroladores está determinado por el programa almacenado en su memoria. Este puede escribirse en distintos lenguajes de programación. Además, la mayoría de los microcontroladores actuales pueden reprogramarse repetidas veces. Por las características mencionadas y su alta flexibilidad, los microcontroladores son ampliamente utilizados como el “cerebro” de una gran variedad de sistemas embebidos que controlan maquinas, componentes de sistemas complejos, como aplicaciones industriales de automatización y robótica, domótica, equipos médicos, sistemas aeroespaciales, e incluso dispositivos de la vida diaria como automóviles, hornos de microondas, teléfonos y televisores.

Frecuentemente se emplea la notación μC o las siglas MCU (por *microcontroller unit*) para referirse a los microcontroladores. De ahora en adelante, a los microcontroladores se les hará referencia en este documento como μC .

4.1 CARACTERÍSTICAS DE LOS MICROCONTROLADORES

Las principales características de los μC son:

- Unidad de Procesamiento Central (CPU): Típicamente de 8 bits, pero también las hay de 4, 32 y hasta 64 bits con arquitectura Harvard, con memoria/bus de datos separada de la memoria/bus de instrucciones de programa, o arquitectura de Von Neumann, también llamada arquitectura Princeton, con memoria/bus de datos y memoria/bus de programa compartidas.
- Memoria de Programa: Es una memoria ROM (*Read-Only Memory* o Memoria de Solo Lectura), EPROM (*Electrically Programmable ROM* o ROM Programable Eléctricamente), EEPROM (*Electrically Erasable/Programmable ROM* o ROM Eléctricamente Borrable y Programable) o Flash que almacena el código del programa que típicamente puede ser de 1 kilobyte a varios megabytes.
- Memoria de Datos: Es una memoria RAM (*Random Access Memory* o Memoria de Acceso Aleatorio) que típicamente puede ser de 1, 2 4, 8, 16, 32 kilobytes.

- Generador del Reloj: Usualmente un cristal de cuarzo que genera una señal oscilatoria de entre 1 y 40 MHz, o también resonadores o circuitos RC.
- Interfaz de Entrada/Salida: Puertos paralelos, seriales (UARTs, Receptor / transmisor Universal Asíncrono), I2C (Inter-Circuito integrado), Interfaces de Periféricos Seriales SPI, Controlador de red de área CAN, Bus Serie Universal USB.
- Otras opciones: Conversores Análogo-Digitales A/D, para convertir un nivel de voltaje presente en un cierto pin a un valor digital manipulable por el programa del μ C. Moduladores por Ancho de Pulso PWM, para generar ondas cuadradas de frecuencia fija pero con ancho de pulso modificable.

La alta integración de subsistemas que componen un μ C reduce el número de chips, la cantidad de pistas y espacio que se requeriría en un circuito impreso si se implementase un sistema equivalente usando chips separados. Un aspecto de especial interés para el desarrollador de circuitos basados en micro controladores son las interfaces de entrada/salida. A través de los pines del chip asociados a las interfaces de entrada/salida el μ C puede interactuar con otros circuitos externos enviándoles señales de comando o recibiendo estímulos correspondientes a variables externas. Por lo general varios pines de datos son bidireccionales, es decir pueden configurarse como entradas o salidas.

Cuando son entradas, pueden adquirir datos interpretando el valor de voltaje como un valor lógico 0 o 1, mientras que cuando son salidas pueden entregar una señal binaria de voltaje cuya magnitud dependerá del valor lógico 0 o 1. Monitoreando el valor de las entradas, el micro controlador puede responder a eventos externos y realizar una cierta acción, como variar las señales de salida de acuerdo al valor en la entrada. Para responder a eventos externos, los μ Cs cuentan con un recurso conocido como interrupciones. Las interrupciones son señales que se generan internamente en el micro controlador que detienen la ejecución normal del programa para ejecutar alguna subrutina de respuesta al evento. Una vez ejecutada la subrutina de interrupción la ejecución del programa continúa en el punto en que se encontraba antes de generarse la interrupción. Un ejemplo típico es el de un botón pulsador conectado a un pin de entrada. Una vez pulsado, se genera una señal de interrupción que iniciaría la ejecución de la subrutina de interrupción, que por ejemplo podría activar un pin de salida para encender un LED.

No todas las interrupciones necesariamente están asociadas al cambio del estado de los pines de entrada. También hay interrupciones que pueden estar asociadas al valor de una entrada A/D, o al cumplimiento de un periodo de tiempo fijado por un *timer* o temporizador. Estas características dependerán del modelo de μ C empleado.

4.2 PROCESO DE DESARROLLO

El proceso de desarrollo de una aplicación basada en μ C se compone de las siguientes etapas principales, las cuales se explican en más detalle en las siguientes subsecciones.

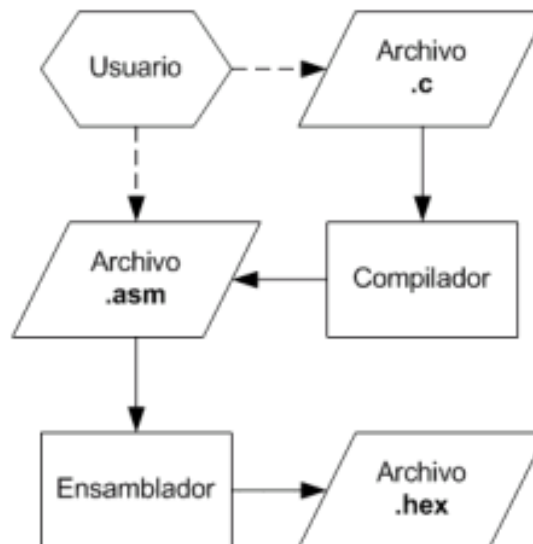
4. 3 DESARROLLO DE SOFTWARE

Esta etapa consiste en escribir y compilar/ensamblar el programa que determinaría las acciones del μ C y su funcionamiento. Existen distintas maneras de desarrollar el programa, dependiendo del lenguaje inicial que se utiliza para escribir el programa:

- Lenguaje *Assembly* - Lenguaje de Máquina/Código Objeto (.asm) → Ensamblador → (.hex, .o, .bin, .coff)
- Lenguaje de Alto Nivel - Lenguaje *Assembly* - Lenguaje de Máquina/Código Objeto (.c, .cpp) → compilador → (.asm) → ensamblador → (.hex, .o, .bin, .coff)

En la figura 38 se muestran las dos alternativas típicas que tiene el desarrollador para generar el código de máquina que es entendido por el μ C.

Figura 37. Alternativas generación de código



El método básico es escribir el programa en lenguaje *Assembly* (lenguaje de Ensamblador) en un archivo de texto con extensión .asm y luego utilizar una programa ensamblador (*Assembler*) para generar un archivo en lenguaje de

máquina, también denominado código de máquina o código objeto (object code), compuesto por instrucciones en código binario que son directamente entendidas por la CPU del μ C. El ensamblador normalmente genera un archivo con extensión .hex (por hexadecimal), .o (por objeto), .bin (por binario), o .coff (*common object file format* u formato de archivo de objeto común) dependiendo del ensamblador.

El lenguaje *Assembly* se compone de instrucciones mnemónicas de bajo nivel, es decir, que están ligadas a las características del μ C y con un número mínimo o nulo de abstracciones. Al carecer de abstracciones, el lenguaje *Assembly* es más difícil de emplear, requiere experiencia y un mayor tiempo de desarrollo. La ventaja es que el código de máquina generado a partir de un programa escrito en lenguaje de máquina es por lo general más eficiente, ya que el programase desarrolla en un nivel cercano a las características del hardware.

Otra alternativa es emplear un lenguaje de alto nivel con una mayor cantidad de abstracciones, las cuales son más fáciles de usar y reducen los tiempos de desarrollo. Tal vez los lenguajes de alto nivel más comunes para la programación de μ C's son el C y C++, pero también existen otros lenguajes variantes del BASIC y el Pascal. Una vez escrito el programa en el lenguaje de alto nivel, será necesario emplear un compilador para traducirlo, ya sea a lenguaje de ensamblador o directamente a lenguaje de máquina. Es importante considerar que el código de ensamblador generado por los compiladores tiende a ser más largo e ineficiente que aquel directamente desarrollado en lenguaje de ensamblador. Esta desventaja puede ser crítica en ciertas aplicaciones que requieren unos programas compactos y de una alta velocidad de ejecución. Un vez que el compilador ha generado el código de ensamblador (.asm), será necesario utilizar un ensamblador para generar el código binario de máquina.

4.3.1 Programación del μ C. En esta etapa el código de máquina correspondiente al Programa desarrollado en la etapa anterior se descarga en la memoria del μ C.

4.3.2 Prueba y verificación. Por último, el μ C debe conectarse al circuito base y someterse a pruebas para verificar el funcionamiento correcto del programa.

4.4 SELECCIÓN DEL MICROCONTROLADOR PIC 16F87X

Los modelos PIC16F873A, PIC16F874A, PIC16F876A y PIC16F877A cuentan con módulos de comparación analógicos y conversor análogo-digital. Necesarios para la implementación de este proyecto. Estos μ C se tratan de versiones mejoradas del original y muy usado PIC16F84.

4.4.1 Características

- CPU tipo RISC (conjunto de instrucciones reducidas).
- Modelos 873/6: 28 pines con tres puertos PA, PB, PC con 22 líneas de E/S y convertor A/D de 5 canales.
- Modelos 874/7: 40 pines con cinco puertos PA, PB, PC, PD, PE con 33 líneas de E/S y convertor A/D de 8 canales.
- Convertor A/D de 10 bits.
- 35 instrucciones de 14 bits.
- Ejecución de una instrucción en un ciclo, excepto las instrucciones de salto y de bifurcación, que se hacen en dos ciclos.
- Frecuencia de 20 MHz.
- Memoria de programa flash hasta 8 k x 14bits y memoria de datos.
- RAM hasta 368 bytes, EEPROM hasta 256 bytes.
- Hasta 14 fuentes de interrupción internas y externas.
- Programación serial *in-circuit* por dos pines.
- Bajo consumo 2 mA para 5 V.
- Tres temporizadores: TIMER0, TIMER1, TIMER2.
- Dos módulos de CAPTURA-COMPARACIÓN-PWM (CCP1 ,CCP2).
- Puerto serie síncrono (SSP) con SPI y I2C.
- USART.
- Puerto paralelo esclavo (PSP) para los de 40 pines.

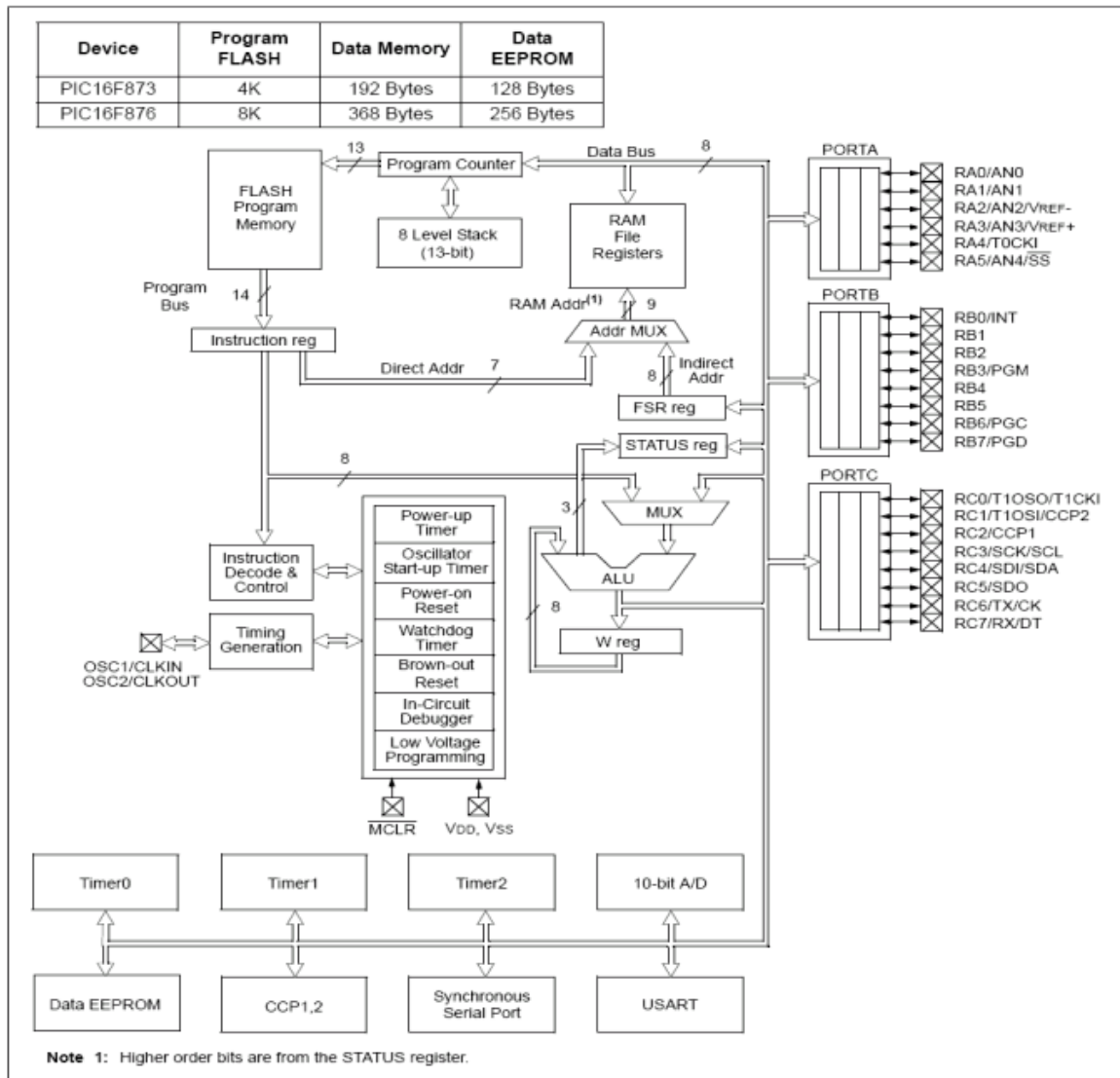
4.4.2 Distribución de pines. Tal como se muestra en la figura siguiente.

Figura 38. Diagrama general de pines



4.4.3 Diagrama de bloques

Figura 39. Diagrama general de bloques en el PIC

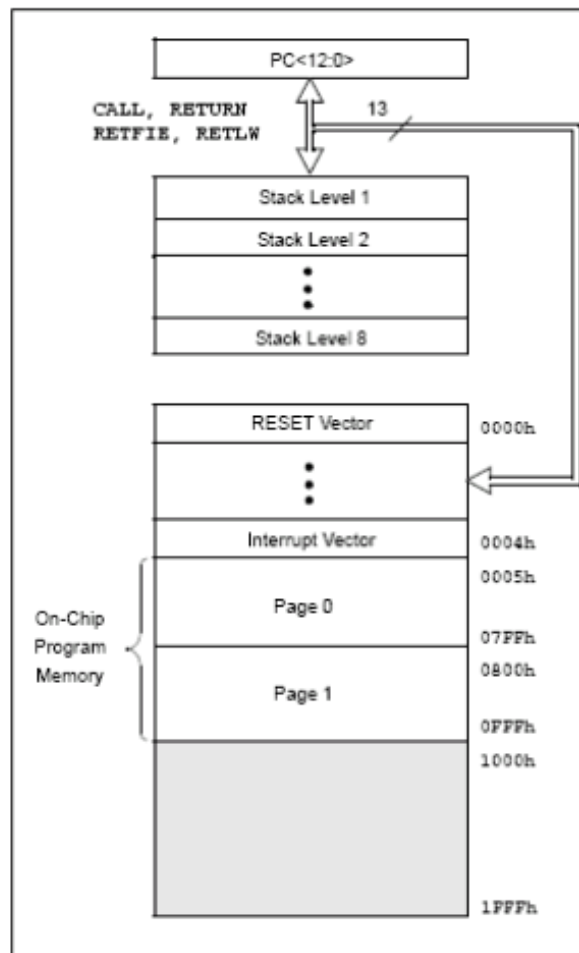


4.4.4 Memoria de programa.

- La memoria de programa es de tipo Flash y puede tener una capacidad de 4 k u 8 k dividida en bancos de 2 k y direccionada por el contador de programa PC de 13 bits de modo que puede acceder hasta 8 k x 14 bits.

- El 16F873/874 tiene una memoria de 4 k x 14 bits (2 páginas) y cada página es direccionada por 11 bits ($2^{11} = 2048$) tiene un tamaño de 0800.
- El vector de *RESET* se encuentra en la posición 0000h y el vector de interrupción general en la 0004h.

Figura 40. Diagrama del mapa de memoria y apilación



4.4.5 Memoria de datos

- La constituye la RAM y la EEPROM. consta de 4 bancos de 128 bytes cada uno seleccionados por los bits **RP1**, **RP0** del registro *STATUS*. Algunos tienen 192 bytes de RAM y otros 368 bytes.

- Las instrucciones CALL y GOTO sólo proporcionan 11 bits de dirección (2 k un banco), por tanto para salir del banco actual se deben programar los bits 4, 3 del registro PCLATH.
- En direccionamiento directo los bits RP1, RP0 seleccionan el banco.
- Para direccionamiento indirecto se usa el registro FSR, el banco lo determina el bit de más peso de FSR concatenado con el bit IRP del registro status.
- Esta particionada en múltiples bancos que contienen los registros de funciones especiales (SFR) y los registros de propósito general (GPR). Cada banco tiene 128 bytes (7Fh). Los registros especiales más frecuentemente usados tienen espejo en otro banco con el fin de hacer más rápido el acceso y reducir código de programa.

Figura 41. Diagrama del direccionamiento directo/indirecto

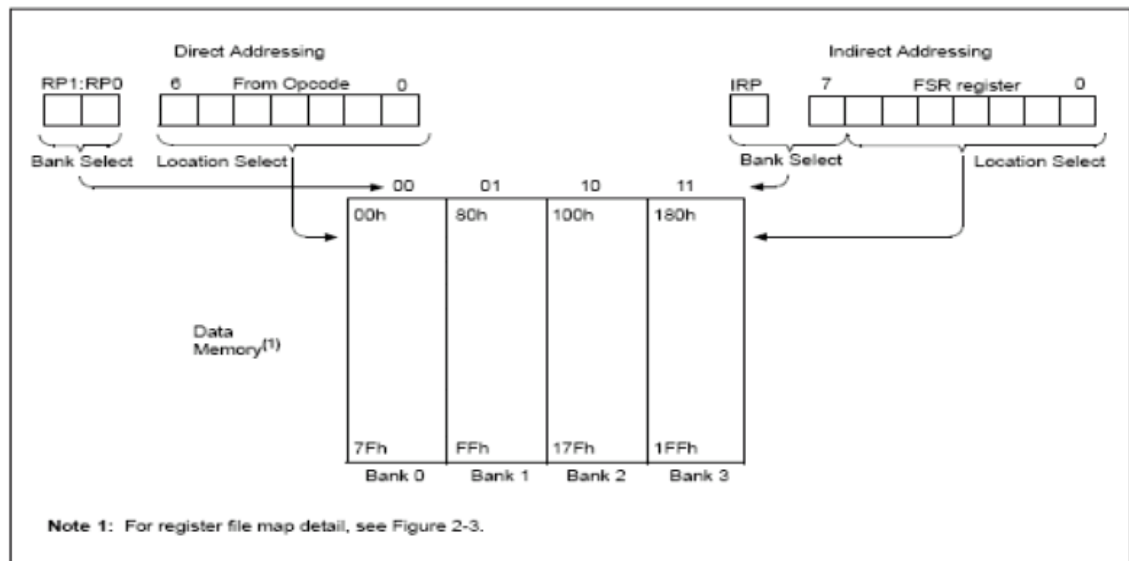
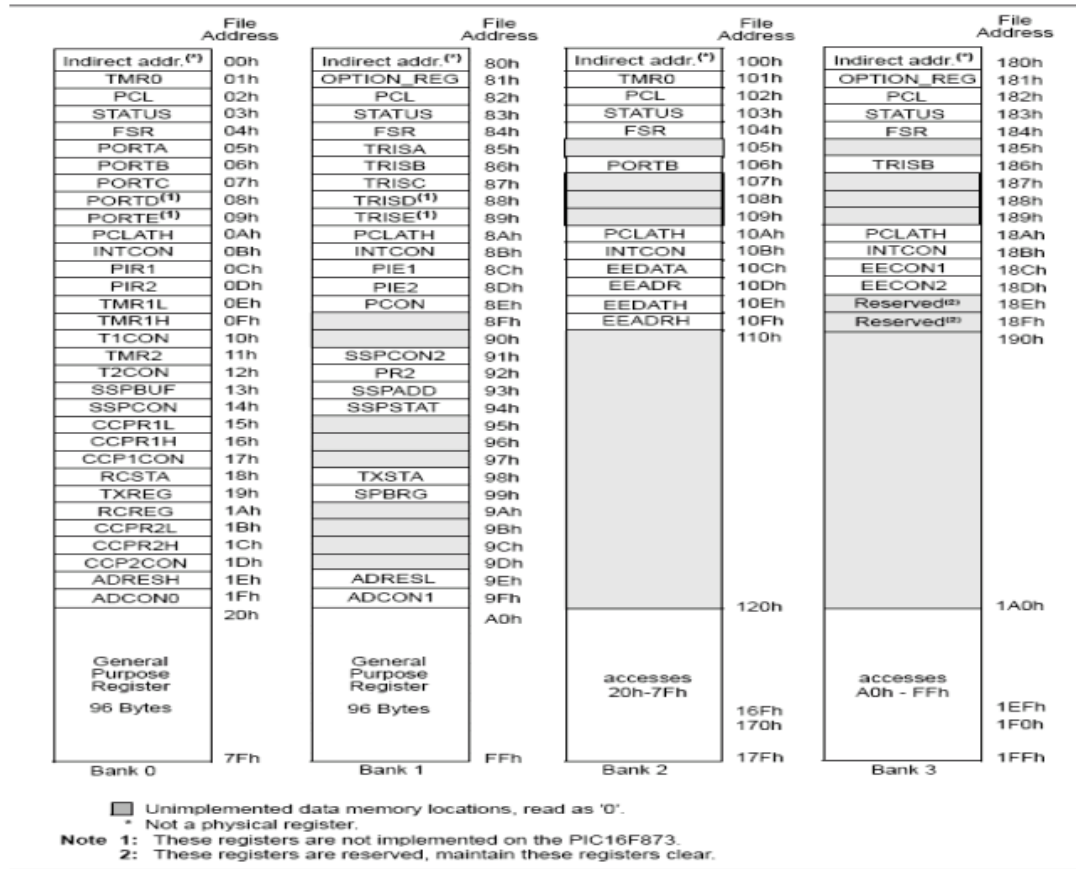


Figura 42. Diagrama mapa de registro de archivos



4.4.6 Configuración de los puertos de E/S

- El 16F873/876 tiene tres puertos de entrada/salida: Puerto A de 6 bits (RA5:RA0), Puerto B de 8 bits (RB7:RB0), y el Puerto C de 8 bits (RC7:RC0).
- Los registros de dirección del puerto se hacen a través del correspondiente registro TRIS: TRISA, TRISB, TRISC, TRISD, TRISE. Si el bit de TRIS = 1 corresponde a una entrada y si el bit TRIS = 0 es de salida. Por ejemplo, si TRISB = 10010010, entonces, RB0(salida), RB1(entrada), RB2(salida), RB3(salida), RB4 (entrada), RB5 (salida), RB6 (salida), RB7 (entrada).
- El puerto A tiene configuración especial. Primero se programa los pines como E/S a través del registro ADCON1 en los bits: PCFG3, PCFG2, PCFG1, PCFG0.

Figura 43. Diagrama configuración de puertos de E/S

PCFG3: PCFG0	AN7 ⁽¹⁾ RE2	AN6 ⁽¹⁾ RE1	AN5 ⁽¹⁾ RE0	AN4 RA5	AN3 RA3	AN2 RA2	AN1 RA1	AN0 RA0	VREF+	VREF-	CHAN/ Refs ⁽²⁾
0000	A	A	A	A	A	A	A	A	VDD	VSS	8/0
0001	A	A	A	A	VREF+	A	A	A	RA3	VSS	7/1
0010	D	D	D	A	A	A	A	A	VDD	VSS	5/0
0011	D	D	D	A	VREF+	A	A	A	RA3	VSS	4/1
0100	D	D	D	D	A	D	A	A	VDD	VSS	3/0
0101	D	D	D	D	VREF+	D	A	A	RA3	VSS	2/1
011x	D	D	D	D	D	D	D	D	VDD	VSS	0/0
1000	A	A	A	A	VREF+	VREF-	A	A	RA3	RA2	6/2
1001	D	D	A	A	A	A	A	A	VDD	VSS	6/0
1010	D	D	A	A	VREF+	A	A	A	RA3	VSS	5/1
1011	D	D	A	A	VREF+	VREF-	A	A	RA3	RA2	4/2
1100	D	D	D	A	VREF+	VREF-	A	A	RA3	RA2	3/2
1101	D	D	D	D	VREF+	VREF-	A	A	RA3	RA2	2/2
1110	D	D	D	D	D	D	D	A	VDD	VSS	1/0
1111	D	D	D	D	VREF+	VREF-	D	A	RA3	RA2	1/2

A = Analog input D = Digital I/O

4.4.7 Conjunto de instrucciones

Figura 44. Conjuntos de instrucción y características

Mnemonic, Operands	Description	Cycles	14-Bit Opcode		Status Affected	Notes			
			MSb	LSb					
BYTE-ORIENTED FILE REGISTER OPERATIONS									
ADDWF	f, d	Add W and f	1	00	0111	dfff	ffff	C,DC,Z	1,2
ANDWF	f, d	AND W with f	1	00	0101	dfff	ffff	Z	1,2
CLRF	f	Clear f	1	00	0001	1fff	ffff	Z	2
CLRWF	-	Clear W	1	00	0001	0xxx	xxxx	Z	
COMF	f, d	Complement f	1	00	1001	dfff	ffff	Z	1,2
DECWF	f, d	Decrement f	1	00	0011	dfff	ffff	Z	1,2
DECFSZ	f, d	Decrement f, Skip if 0	1(2)	00	1011	dfff	ffff		1,2,3
INCF	f, d	Increment f	1	00	1010	dfff	ffff	Z	1,2
INCFSZ	f, d	Increment f, Skip if 0	1(2)	00	1111	dfff	ffff		1,2,3
IORWF	f, d	Inclusive OR W with f	1	00	0100	dfff	ffff	Z	1,2
MOVF	f, d	Move f	1	00	1000	dfff	ffff	Z	1,2
MOVWF	f	Move W to f	1	00	0000	1fff	ffff		
NOP	-	No Operation	1	00	0000	0xxx	0000		
RLF	f, d	Rotate Left f through Carry	1	00	1101	dfff	ffff	C	1,2
RRWF	f, d	Rotate Right f through Carry	1	00	1100	dfff	ffff	C	1,2
SUBWF	f, d	Subtract W from f	1	00	0010	dfff	ffff	C,DC,Z	1,2
SWAPF	f, d	Swap nibbles in f	1	00	1110	dfff	ffff		1,2
XORWF	f, d	Exclusive OR W with f	1	00	0110	dfff	ffff	Z	1,2

BIT-ORIENTED FILE REGISTER OPERATIONS									
BCF	f, b	Bit Clear f	1	01	00bb	bfff	ffff		1,2
BSF	f, b	Bit Set f	1	01	01bb	bfff	ffff		1,2
BTFSC	f, b	Bit Test f, Skip if Clear	1 (2)	01	10bb	bfff	ffff		3
BTFSS	f, b	Bit Test f, Skip if Set	1 (2)	01	11bb	bfff	ffff		3
LITERAL AND CONTROL OPERATIONS									
ADDLW	k	Add literal and W	1	11	111x	k00k	k00k	C,DC,Z	
ANDLW	k	AND literal with W	1	11	1001	k00k	k00k	Z	
CALL	k	Call subroutine	2	10	0kkk	k00k	k00k		
CLRWDT	-	Clear Watchdog Timer	1	00	0000	0110	0100	$\overline{\text{TO,PD}}$	
GOTO	k	Go to address	2	10	1kkk	k00k	k00k		
IORLW	k	Inclusive OR literal with W	1	11	1000	k00k	k00k	Z	
MOVLW	k	Move literal to W	1	11	00xx	k00k	k00k		
RETFIE	-	Return from interrupt	2	00	0000	0000	1001		
RETLW	k	Return with literal in W	2	11	01xx	k00k	k00k		
RETURN	-	Return from Subroutine	2	00	0000	0000	1000		
SLEEP	-	Go into standby mode	1	00	0000	0110	0011	$\overline{\text{TO,PD}}$	
SUBLW	k	Subtract W from literal	1	11	110x	k00k	k00k	C,DC,Z	
XORLW	k	Exclusive OR literal with W	1	11	1010	k00k	k00k	Z	

4.4.8 Puertos de Entrada/Salida

- **Puerto B:**

- Tiene RB7...RB0 como entradas digitales bidireccionales.
- Disponen de una resistencia interna de *pull-up* que se conecta cuando el bit RBPU del registro OPTION es 0. en RESET se desconectan estas resistencias.
- RB7...RB4: pueden programarse para generar interrupción cuando una de ellas cambia de estado.
- RB0/INT puede ser programado para generar interrupción externa.

- **Puerto C:**

- RC0/T1OSO/T1CKI: E/S digital/ salida de TMR1/reloj de TMR1
- RC1/T1OSI/CCP2: E/S digital/ entrada OSC TMR1/entrada a CCP2; salida de comparador2; salida PWM2.
- RC2/CCP1: E/S digital/entrada a CCP1; salida comparador1; salida PWM1.
- RC3/SCK/SCL: E/S digital/reloj modo SPI/reloj en modo I2C.
- RC4/SDI/SDA: E/S digital/entrada modo spi/entrada modo I2C.
- RC5/SDO: E/S digital/salida modo SPI.
- RC6/TX/CK: E/S digital/transm. USART/reloj transm. serie síncrona.
- RC7/RX/DT: E/S digital, recepción USART/transm. serie síncrona.

- **Puerto D:**

- RD7...RD0: puertos bidireccionales con entrada en trigger schmitt. además se puede implementar como puerto paralelo esclavo (PSP) para comunicación paralela.
- **Puerto E:**
 - RE0/RD-/AN5: E/S digital/lectura de PSP/canal5 A/D.
 - RE1/WR-/AN6: E/S digital/escritura de PSP/canal6 A/D.
 - RE2/CS-/AN7: E/S digital/ chip select de PSP/canal7 A/D.
 - para activar el PSP se debe poner a 1 el bit PSPMODE del registro TRISE.

4.4.9 Ensamblador. Para realizar un programa en lenguaje ensamblador, además de las instrucciones propias del μ C se requiere el uso de las directivas del ensamblador a utilizar. Para los μ C de MICROCHIP se utiliza el MPASM.

5. INSTRUMENTACIÓN DE SOPORTE

El concepto de instrumentación virtual nace a partir del uso del computador personal (PC) como "instrumento" de medición de señales como temperatura, presión, caudal, etc. Es decir, el PC apoyado de hardware para la adquisición de datos comienza a ser utilizado para realizar mediciones de fenómenos físicos representados en señales de corriente (Ej. 4 – 20 mA) y/o voltaje (Ej. 0 – 5 Vdc). Sin embargo, el concepto de "instrumentación virtual" va más allá de la simple medición de corriente o voltaje, pues también involucra el procesamiento, análisis, almacenamiento, distribución y despliegue de los datos e información relacionados con la medición de una o varias señales específicas. Es decir, el instrumento virtual no se conforma con la adquisición de la señal, sino que también involucra la interfaz hombre-máquina, las funciones de análisis y procesamiento de señales, las rutinas de almacenamiento de datos y la comunicación con otros equipos. Para este proyecto, se utilizó una tarjeta de adquisición de datos para la toma de medidas y el posterior análisis.

5.1 TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS DE NATIONAL INSTRUMENTS CON LA REFERENCIA DAQ USB 6008/9 DAQ

El USB-6009 de *National Instruments (NI)* brinda funcionalidad de adquisición de datos básica para aplicaciones como registro de datos simple, medidas portátiles y experimentos académicos de laboratorio. Es accesible para uso de estudiantes y lo suficientemente poderoso para aplicaciones de medida más sofisticadas. Para usuarios de Mac OS X y Linux, puede trabajar con el software NI-DAQmx Base y programar la USB-6009 con lenguajes LabVIEW o C.

Para cursos suplementarios con experimentos prácticos sobre teoría de simulación, medidas y automatización, NI desarrolló un paquete de estudiante USB-6009 que incluye una copia de LabVIEW edición de estudiante. Estos paquetes son exclusivamente para estudiantes, proporcionándoles una herramienta de aprendizaje potente, práctica y a bajo costo.

Figura 45. Tarjeta de adquisición de datos USB 6008/9

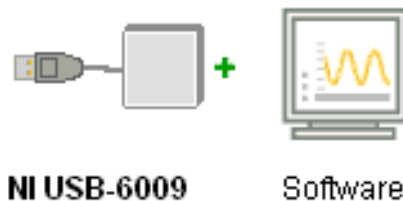


Características

- 8 entradas analógicas (14 bits, 48 kS/s).
- 2 salidas analógicas (12 bits a 150 S/s), 12 E/S digitales; contador de 32 bits.
- Energizado por bus USB para una mayor movilidad, conectividad de señal integrada.

Figura 46. Requisito de comunicación

Cada NI USB-6009 requiere:



5.1.1 Diagrama de pines. Para la DAQ USB 6008/9 los “*Device Pinouts* o pines de salida del dispositivo ” se encuentran acomodados de tal manera que las entradas y salidas analógicas (AI/AO) se encuentran separadas de las entradas y salidas digitales (DI/DO), tal y como se muestra en seguida:

Figura 47. Diagrama de pines de conexión

NI USB-6009

GND	1	17	P0.0
AI 0/AI 0+	2	18	P0.1
AI 4/AI 0-	3	19	P0.2
GND	4	20	P0.3
AI 1/AI 1+	5	21	P0.4
AI 5/AI 1-	6	22	P0.5
GND	7	23	P0.6
AI 2/AI 2+	8	24	P0.7
AI 6/AI 2-	9	25	P1.0
GND	10	26	P1.1
AI 3/AI 3+	11	27	P1.2
AI 7/AI 3-	12	28	P1.3
GND	13	29	PFI 0
AO 0	14	30	+2.5 V
AO 1	15	31	+5 V
GND	16	32	GND

5.1.2 Datos técnicos.

Las características eléctricas de las entradas y salidas analógicas y digitales de la tarjeta de adquisición de datos se resumen y muestran en las siguientes tablas:

Figura 48. Información técnica de E/S analógicas

Entrada Analógica		Salida Analógica	
Canales	4 , 8	Canales	2
Canales de una sola terminal	8	Resolución	12 bits
Canales Diferenciales	4	Máx. Voltaje de Entrada Analógica	5 V
Resolución	14 bits	Rango de Voltaje Máximo	0 V , 5 V
Velocidad de Muestreo	48 kS/s	Precisión Máxima del Rango de Voltaje	7 mV
Rendimiento (Todos los Canales)	48 kS/s	Rango de Voltaje Mínimo	0 V , 5 V
Máx. Voltaje de Entrada Analógica	10 V	Mínima Precisión del Rango de Voltaje	7 mV
Rango de Voltaje Máximo	-10 V , 10 V	Razón de Actualización	150 S/s
Precisión Máxima del Rango de Voltaje	138 mV	Capacidad de Corriente Simple	5 mA
Rango de Voltaje Mínimo	-1 V , 1 V	Capacidad de Corriente Total	10 mA
Mínima Precisión del Rango de Voltaje	37.5 mV		
Número de Rangos	8		
Muestreo Simultáneo	No		
Memoria Interna	512 B		

Figura 49. Información técnica E/S digitales

E/S Digital	
Canales Bidireccionales	12
Canales de Entrada Únicamente	0
Canales de Salida Únicamente	0
Número de Canales	0 , 12
Temporización	Software
Niveles Lógicos	TTL
Entrada de Flujo de Corriente	Sinking , Sourcing
Salida de Flujo de Corriente	Sinking , Sourcing
Filtros de Entrada Programables	No
¿Soporta Estados de Encendido Programables?	No
Capacidad de Corriente Simple	8.5 mA
Capacidad de Corriente Total	102 mA
Temporizador Watchdog	No
¿Soporta Protocolo de Sincronización para E/S?	No
¿Soporta E/S de Patrones?	No
Máximo Rango de Entrada	0 V , 5 V
Máximo Rango de Salida	0 V , 5 V

6. CONTROL DE PROCESOS CON CONTROLADORES PID INDUSTRIALES

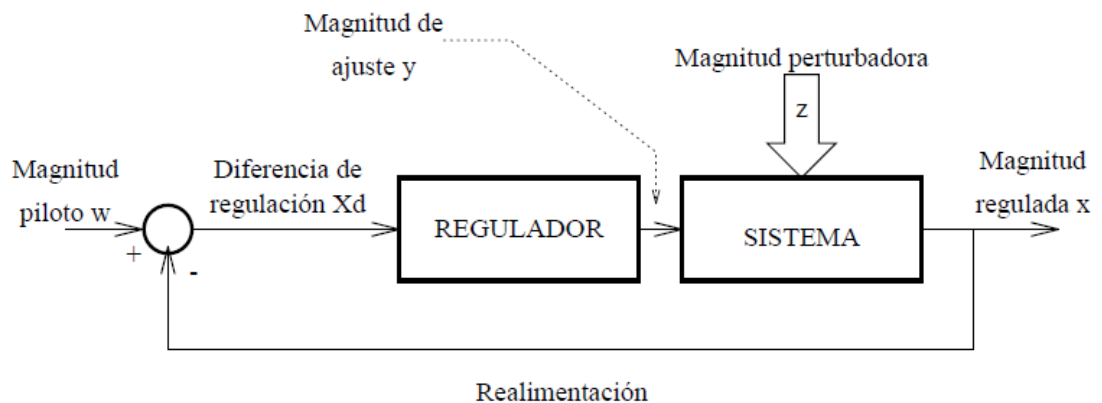
6.1 INTRODUCCIÓN

En la Fig. 51. se muestran los nombres que se asignan a las variables características del bucle de control en la mayor parte de los textos de fabricantes, según notación DIN 19 226 (nótese la diferencia de denominación de la variable de control y variable de salida del sistema respecto a la utilizada habitualmente en los textos académicos).

6.2 REGULADOR DIGITAL PID

Aunque los primeros reguladores digitales fueron realizados con ordenadores de procesos, actualmente se encuentran integrados, no solo en sistemas más complejos de mando y automatización, sino en la forma de ejecución de un regulador compacto. Como la estructura de control PID (Proporcional – Integral – Derivativa) se ha convertido en un estándar en su utilización, se intenta que el regulador digital que trabaja discretamente respecto al tiempo, se acerque bastante en su comportamiento al del regulador analógico:

Figura 50. Diagrama en bloques de un controlador PID



La magnitud regulada es leída y cuantificada en intervalos de tiempo discretos.

La operación PID es realizada por un algoritmo que está disponible en un procesador, y en cada punto de lectura se calcula una igualdad diferencial. Las partes **P** (Proporcional), **I** (Integral) y **D** (Derivativa) pueden ser ajustadas de forma independiente.

Por último el valor calculado es conectado al tramo de regulación después de pasar por un convertidor digital-analógico y mantenido hasta la llegada del siguiente valor. Para exigir un comportamiento casi continuo del PID digital, habrá que exigir una exploración frecuente y la elección apropiada del tiempo de muestreo.

6.2.1 Ventajas del regulador digital. En su modo principal de funcionamiento, el regulador se comporta de un modo casi igual al de los controladores analógicos, con unas ventajas adicionales:

- **Flexibilidad:** Las funciones técnicas de regulación se realizan por software (programas), modificándose sin que el constructor tenga que cambiar el hardware (estructura y cableado interno) y pudiendo ser usadas por el usuario en diversas partes del proceso.
- **Multiplicidad de funciones:** Algunos ejemplos son: conmutación automática del servicio manual/automático libre de saltos, evitar la saturación del termino integral al alcanzar un limite del valor prescrito (Referencia), limitación ajustable del valor de referencia, rampa parametrizable del valor prescrito, filtrado de magnitudes del proceso sometidas a perturbaciones.
- **Exactitud:** Al ser los parámetros ajustados digitalmente libres de deriva, y ajustados a voluntad, no presentan problemas en la realización de operaciones matemáticas.

6.2.2 Clases de señales de salida. Las señales de salida del regulador pueden ser ajustadas dando lugar a distintos tipos de configuraciones de regulación. Los más importantes son:

- **Regulador de acción continua (Regulador K):** Para accionamientos de ajuste neumático e hidráulico. Se denominan continuos porque el dispositivo de accionamiento al que se encuentra conectado el PID puede tomar todas las posiciones intermedias entre "cerrado" y "abierto", actuando así de forma continua a la entrada del aparato de ajuste.
- **Regulador de pasos:** Para accionamientos eléctricos. Posee un comportamiento de tres posiciones, (por ejemplo: calentar/enfriar/desconectar) que solo puede actuar sobre el circuito de regulación junto con un órgano de ajuste motorizado integral. La conexión con el sistema a controlar suele hacerse a través de tarjetas de relés sobre las que actúa el controlador. Se marcha a la posición deseada de acuerdo a una duración de impulso calculada cíclicamente.

- Regulador de dos o tres posiciones: Con este nombre se conocen los reguladores discontinuos, cuya salida puede ser binaria (0/1 para conectar/desconectar) o ternaria (0/1/-1 para calentar/enfriar/desconectar). En el regulador de dos posiciones la magnitud regulada mantiene una oscilación permanente. En el caso de un regulador digital estructurado así, la diferencia de regulación actual es elaborada internamente según el algoritmo PID a un valor de la magnitud de ajuste. A partir de ese valor de cálculo se obtiene la señal de ajuste binaria (0/1) o terciaria (0/1/-1) a dar como relación impulso/pausa con una duración del periodo o ciclo de trabajo ajustable.

A diferencia del regulador de pasos, cuyos impulsos de ajuste desaparecen tras decaer la diferencia de regulación, en el caso del regulador de dos o tres posiciones también en estado estacionario se dan impulsos de ajuste según el valor estacionario de la magnitud de ajuste calculada.

6.2.3 Estructuras de regulación ampliadas. En la práctica el regulador PID puede usarse en asociación con otros elementos ampliando así su estructura y funciones. Algunos ejemplos de este funcionamiento son:

- Regulación en cascada: Regulación más rápida que las perturbaciones. Un regulador piloto suministra el valor prescrito para un regulador subordinado, este reacciona a las perturbaciones antes de que ellas se hagan notar en la magnitud regulada (permite una especie de control por adelanto para disminuir el efecto de las perturbaciones sobre la magnitud regulada).
- Conexión de las magnitudes perturbadoras: si una magnitud perturbadora medible actúa en la entrada de un tramo, puede ser compensada en el tiempo multiplicándola por un factor y sumándola a la señal de entrada o salida del regulador (se compensa proporcionalmente al valor de la perturbación).

6.2.4 Adaptación. Como es bien sabido, los parámetros más importantes de un regulador PID son:

- **Kp**: constante de proporcionalidad.
- **Tv = Vv · Td**: tiempo de acción derivativa (Td es el tiempo derivativo de la formulación normal del PID y Vv es un factor de escala ajustable).
- **Tn = Ti**: tiempo de integración.

El diseño del regulador y/o ajuste de los parámetros puede ser un problema que se puede resolver en la práctica por medio de prueba y error, con reglas de ajuste sencillas o con métodos matemáticos. En todos los casos el hombre es el único responsable del ajuste efectivo, a diferencia de los llamados reguladores adaptativos, que realizan de forma automática (sin intervención humana) el ajuste de los parámetros del controlador.

A continuación se explica el funcionamiento básico de un controlador adaptativo.

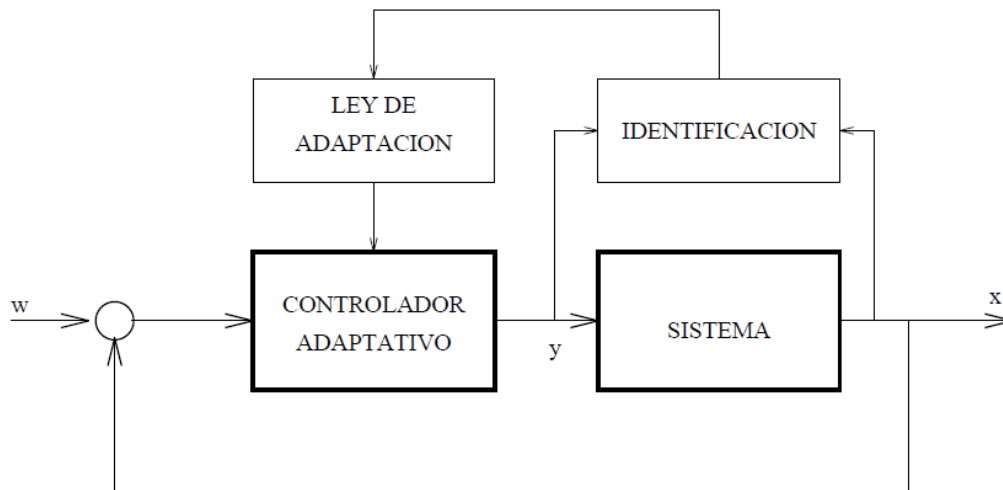
En primer lugar se supone un modelo lineal del sistema en tiempo discreto de la forma:

$$y_k = \sum_{i=1}^N a_i y_{k-i} + \sum_{j=0}^M b_j u_{k-j}.$$

Mediante un proceso de identificación por mínimos cuadrados se estima en cada momento los parámetros a_i y b_j . Con dichos coeficientes se entra en la ley de adaptación (los parámetros de los controladores en general se pueden poner en función de los del modelo del sistema), calculando los coeficientes del controlador.

Con los coeficientes del controlador se evalúa la ley de control obteniendo la señal de control adecuada.

Figura 51. Esquema de control adaptativo



7. REGULADOR SIPART DR20

7.1 FUNCIONAMIENTO

El regulador digital SIPART DR20 trabaja sobre la base de un microcontrolador moderno de alta escala de integración. En la memoria de valor fijo del aparato se ha instalado una gran cantidad de funciones preparadas para la regulación de procesos industriales.

El usuario configura (estructura) el aparato ajustando los interruptores de estructuración para lo cual no es necesario conocimientos de programación (ver tabla de conmutadores de estructuración). El “programa” es así depositado en la parte no volátil de la memoria de datos por si se produjera un fallo en la tensión de red. El regulador SIPART DR20 puede ser configurado como **P**, **PI**, **PD** o **PID** y además el algoritmo de regulación puede ser desconectado por estructuración y entonces el sistema actúa como estación de relación, indicador de proceso o aparato de conducción y mando manual. Un autómata programable ha sido diseñado para desarrollar múltiples funciones Como: leer señales de interruptores de posición, pulsadores, detectores de nivel, reóstatos, etc., y también para la lectura de señales digitales, así como las analógicas. Además de lo anterior, envía órdenes de mando a los contactos de los motores, válvulas magnéticas, lámparas de señalización, entre otros Dispositivos, y por último, contar impulsos, almacenar señales, etc., con solo tenerlo conectado a una red informática para enviar y recibir datos de la red.

7.2 CAMPO DE APLICACIÓN

La importancia práctica del regulador compacto radica en sus múltiples y atractivas características de potencia. Esta caracterizado por reunir todos los componentes del hardware y software necesarios para solucionar los problemas de regulación en los diversos campos de la automatización de procesos, en una caja bastante manejable.

Tanto la estructuración, que es la activación de diversas funciones parciales de acuerdo con el enunciado del problema, como la parametrización, es decir, el ajuste de los datos del aparato dentro del margen de valores, se realizan mediante pulsadores y/o apoyándose en indicaciones de valores digitales o de barras en la parte frontal del aparato.

Los reguladores industriales en general son adecuados para un amplio campo de utilidades desde la técnica de procesos hasta la construcción de máquinas y aparatos. Se pueden configurar como:

- Regulador continuo (**K**).

- Regulador con salida conectora (**S**) que se puede programar en dos modos, como regulador de pasos de tres posiciones y como regulador de dos posiciones.

Puede ser conectado a través de una interface serie, insertado en sistemas jerárquicos (ordenador de procesos o sistemas de mando) o incluido en un sistema central de operación y observación con ordenador personal. Además es estructurable como estación de relación o como indicador de procesos o como aparato piloto o de mando.

7.3 ESTRUCTURA

Los reguladores industriales (y en concreto el SIPART DR20) suelen estar configurados de forma modular. Están formados por un aparato básico (en el caso del DR20) que consta de:

- CPU: unidad de operación e indicación con placa de circuitos impresos principal.
- Placa de circuitos impresos con una fuente de alimentación y elementos de conexión para los circuitos de entrada y salida montados fijos. Esta placa está conectada a la principal, a través, de una regleta de contactos y enchufada a la parte trasera de la caja.
- El aparato consta de dos entradas analógicas fijas (entradas de corriente fijadas a un potencial que se pueden configurar de 0 mA a 20 mA o de 4 mA a 20 mA) y una entrada binaria que actúa de forma normal o invertida (asignándole el cero lógico a la alimentación).

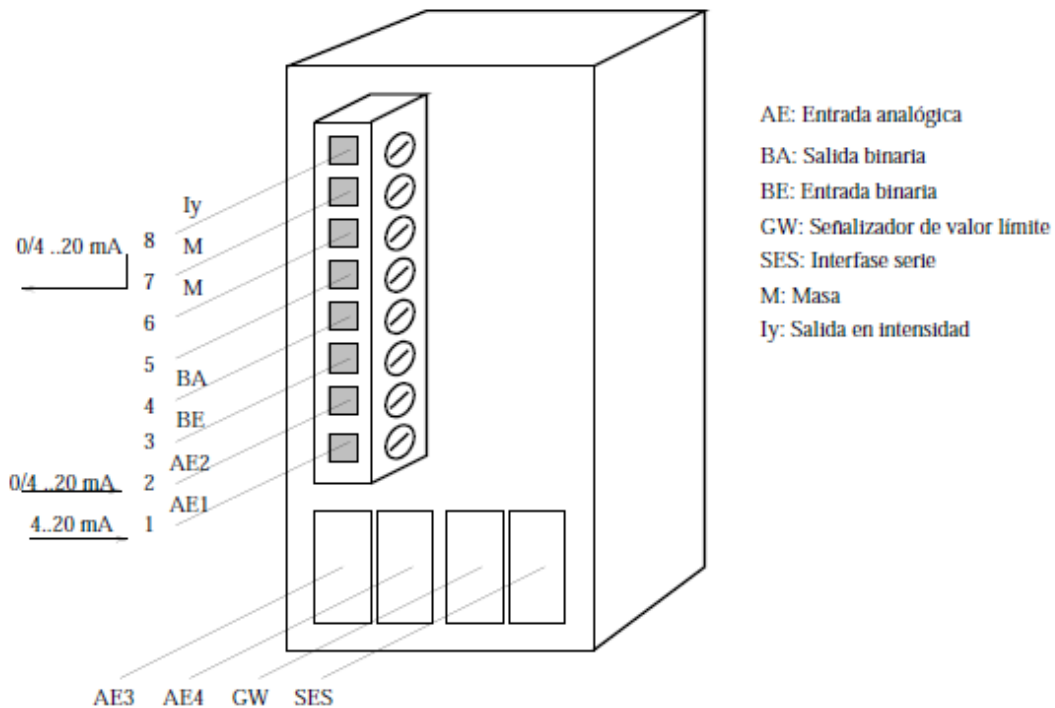
La salida del regulador (magnitud de ajuste) es diferente según el tipo:

- Regulador K: señal continua de corriente de 0 a 20 mA o de 4 a 20 mA.
- Regulador S: salida conectora con 2 relés para 250 V y 5 A.

También se dispone de una salida binaria.

El hecho de que el convertidor pueda aceptar otros módulos en su estructura, hace que se pueda ampliar el número de entradas, por ejemplo con convertidores de señal enchufados en la parte posterior del aparato. Para la conexión se dispone adicionalmente a las entradas AE1 y AE2 de puestos de enchufes para dos convertidores AE3 y AE4 (ver esquema funcional de la Fig. 53).

Figura 52. Regulador SIPART DR20, esquema funcional

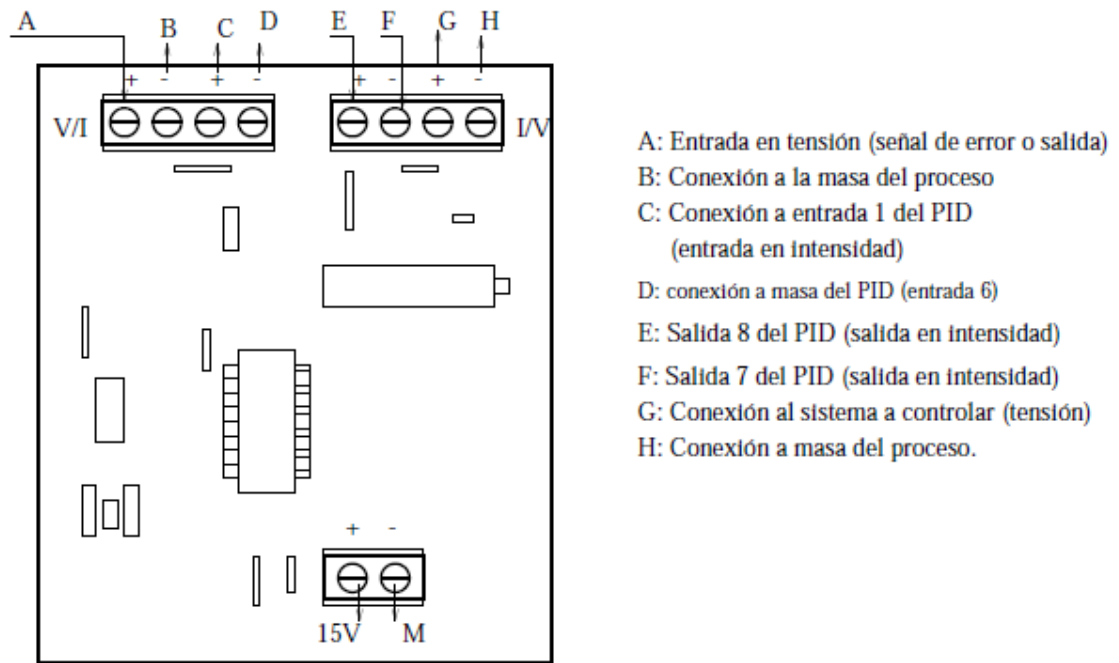


El punto de enchufe GW sirve para conectar un convertidor de señal para la salida de señalización de valor límite, eligiendo entre dos módulos de señalización distintos. El cuarto enchufe SES está previsto para un módulo interface para la comunicación serie.

7.4 SEÑALES DE ENTRADA ANALÓGICAS

- Entrada de corriente de 0 a 20 mA o de 4 a 20 mA en el aparato básico: las entradas analógicas AE1 y AE2 están sujetas a potencial con una carga de 249Ω . El margen de la señal y la subordinación de las magnitudes de proceso a las entradas son fijadas mediante los correspondientes conmutadores de estructuración (ver tabla de conmutadores).
- Puesto de enchufe AE3 y AE4 (no los trae el aparato básico): para entrada de corriente a 20 mA o 4 a 20 mA o entrada de tensión de 0 a 10 V. Como no se dispone de este aparato, se han diseñado una serie de circuitos convertidores de tensión a intensidad y de intensidad a tensión. El circuito conversor intensidad a tensión es simplemente una resistencia de valor 249Ω . El circuito convertidor de tensión a intensidad aparece esquemáticamente en la Fig. 55

Figura 53. Convertidor de tensión a intensidad e intensidad a tensión



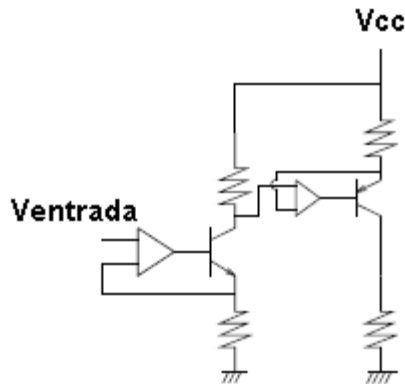
Además, los módulos AE3 y AE4 permiten convertir señales procedentes de termómetros de resistencia Pt100, potenciómetros, etc.

7.5 MAGNITUDES DE AJUSTE DEL REGULADOR

El aparato básico es suministrado con dos circuitos de salida:

- Regulador 6DR2001 con salida de pasos (Regulador S - salida 8): posee dos contactos de entrada de relé, libres de potencial para una tensión máxima de conexión de 250 V con una corriente de 5 A. La función del circuito de salida es estructurable, bien como regulador de dos posiciones (con la magnitud de salida dada por una relación de pulsos con una duración ajustable del periodo entre 0 y 100 %) para aparatos que solo puedan estar en dos estados: conectados y desconectados; o bien como regulador de tres posiciones.

Figura 54. Convertidor de tensión a intensidad



- Regulador 6DR2004 con salida continua (Regulador K - salidas 7 y 8). Da una señal normalizada de corriente, siendo el margen de esta señal ajustable de 0 a 20 mA o de 4 a 20 mA. Sección 7.4 Puesto de enchufe AE3 y AE4.

7.5.1 Entrada binaria (normal o invertida). El aparato básico contiene una entrada binaria, que actúa a voluntad, normal o invertida. La función de entrada binaria es estructurable o programable.

7.5.2 Salida binaria. Es válido lo comentado para la entrada binaria. Tanto la entrada como la salida binaria, están pensadas para trabajar con un ordenador.

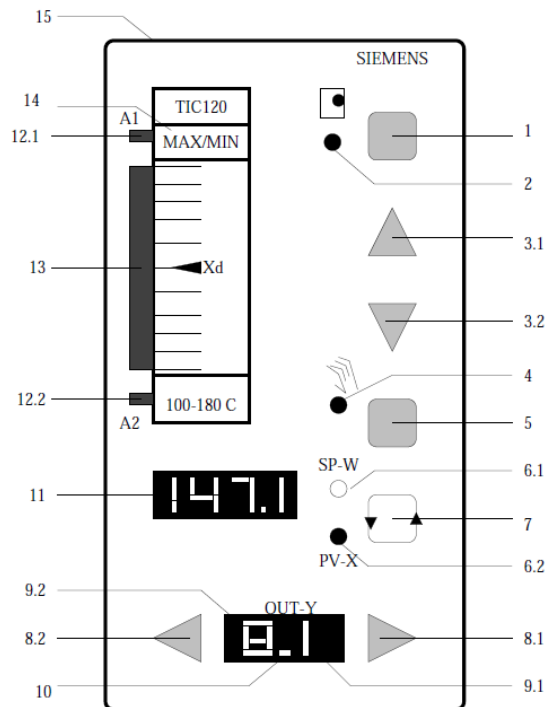
7.5.3 Puesto de enchufe GW. Para el convertidor de señal 6DR2801-8 para aviso de valor límite (ver A1 y A2). Para el convertidor de señal 6DR2801-8B para aviso de valor límite.

7.5.4 Fuente de alimentación. Son suministrables para tensión de alimentación de 220/240 Vc.a. y 110/120 Vc.a. que están previstas de un transformador. La ejecución para 24 Vc.c/c.a. posee una fuente de conexión a la red.

7.5.5 Sistemas de cero voltios. Los reguladores SIPART DR20 tienen en la parte de campo un conductor de 0 V el **M** (masa) y al que están referidas todas las señales analógicas y binarias de entrada y salida. En el caso que haya instalaciones con circuitos de regulación no interconectados no es necesario unir entre si los reguladores. En todos los demás casos, todas las conexiones 0 V de todos los reguladores deben ser llevadas a un punto estrella, que debe ser unido con un punto del conductor de protección de la red.

7.6 FUNCIONES DE OPERACIÓN E INDICACIÓN

Figura 55. Elementos de operación e indicación



La operación del regulador se realiza en tres niveles:

- Operación del proceso.
- Parametrización.
- Estructuración.

En los siguientes apartados se hará referencia a las indicaciones de la Fig. 56, que son comentadas a continuación:

1. Conmutador para servicio interno/externo.

2. Diodo LED (verde)

- Luz fija: valor prescrito interno.
- Luz intermitente: determinados estados de servicio DDC.

3.1 Pulsador para aumentar el valor prescrito interno o los valores de las variables de parametrización y estructuración.

3.2 Pulsador para reducir el valor prescrito interno o los valores de las variables de parametrización y estructuración.

4. Diodo LED (amarillo)

- Luz fija: servicio manual.
- Luz intermitente: manipulación externa.

5. Conmutador para servicio manual/automático.

6.1. Diodo LED (verde), luce cuando el indicador (11) refleja la referencia **w**.

6.2. Diodo LED (rojo), luce cuando el indicador (11) refleja la magnitud regulada **x**.

7. Conmutador para el indicador de cuatro décadas (11) y para activar los niveles de parametrización y estructuración.

8.1. Pulsador para modificación de la magnitud de ajuste hacia la indicación 100 % y para la selección de la variable a la que afecta la parametrización o estructuración.

8.2. Pulsador para modificar la magnitud de ajuste hacia 0 % y para la selección de la variable a la que afecta la parametrización o estructuración.

9.1. El punto luce en reguladores **S**.

9.2. El punto luce en reguladores **S**.

10. Indicador digital con dos décadas para magnitud de ajuste y así como para parámetros e interruptores de estructuración seleccionados.

11. Indicador digital con cuatro décadas para el valor actual **x**, prescrito **w**, límites **A1** y **A2**, en caso dado el valor prescrito de seguridad **SH**, así como para valores de parametrización y de interruptores de estructuración.

12.1. Diodo LED (rojo) avisa el paso por encima y por debajo del valor límite **A1**.

12.2. Diodo LED (rojo) avisa el paso por encima y por debajo del valor límite **A2**.

13. Indicador para diferencia y desviación de regulación.

14. Rotulo intercambiable.

15. Tapa para cambio de escala.

7.7 OPERACIÓN DEL PROCESO

Se describen a continuación cada una de las partes del panel frontal, en cuanto a su utilidad. El indicador (13, Fig. 56) puede ser estructurado a voluntad (ver tabla de conmutadores: S25) para indicar la diferencia de regulación. La sensibilidad de la indicación puede ser seleccionada en varios escalones (S25).

7.7.1 Parametrización. El proceso que debe seguirse se describe en los siguientes pasos:

1. Actuar sobre el conmutador (7) hasta que parpadee el indicador de dos décadas (10) y avise **PS**; soltar el pulsador.
2. Actuar varias veces sobre el pulsador (3.1) hasta que el indicador digital (11) muestre **PAr**, entonces el regulador es parametrizable.
3. Con los pulsadores (8.1 y 8.2) pasar hacia delante y hacia atrás la lista de parámetros (ver tabla de ajuste de parámetros). El indicador (10) señala el parámetro seleccionado.
4. Con los pulsadores (3.1, 3.2) ajustar el parámetro. Su valor es mostrado en el indicador de cuatro décadas (11).
5. Actuando sobre el pulsador (7) se efectúa la conmutación a servicio de proceso.

7.7.2 Estructuración. El proceso para ello es análogo al de parametrización, excepto en el segundo paso, donde debe aparecer **Str** inmediatamente después de **PAr**. En este caso se deben consultar las tablas de conmutadores de estructuración. Al final del proceso el dispositivo se encuentra en servicio manual.

7.7.3 Funciones del aparato. Se analizan a continuación los tipos de aparatos que se pueden estructurar con este controlador, que suponen, por lo general, un bloque común a todo **PID** industrial. Solo se comentan aquellos que tienen cierto interés en la práctica, remitiendo al lector a los manuales del aparato o a las tablas finales para un análisis más profundo de los tipos de funcionamiento.

7.8 REGULADOR DE VALOR FIJO DE UN COMPONENTE

Es la forma más simple de utilización del dispositivo y la más común a este nivel. El regulador elabora como señal analógica de entrada solo la magnitud principal **x1**, sin perturbación alguna. El valor prescrito, magnitud de referencia de control, es ajustado en la parte frontal del regulador conmutando el aparato a servicio interno (en concreto a parametrización) y buscando el parámetro correspondiente a valor prescrito, que aparecerá en el indicador digital de cuatro cifras. El

procedimiento para conmutar y parametrizar se explicara más adelante en el apartado correspondiente a funciones de operación e indicación.

7.9 APARATO DE CONDUCCIÓN Y MANDO MANUAL, APARATO DE MANDO MANUAL-DDC.

El dispositivo suministra una señal de salida ajustable con los pulsadores de ajuste (8, Fig.56) mostrada en % en el indicador (10, Fig. 56). En el indicador de cuatro cifras (11, Fig. 56) se visualiza el valor de una magnitud de proceso cualquiera, llevada a través de una entrada analógica (ver tabla de conmutadores de estructuración: S12, S13, S14).

Para representar un valor prescrito cualquiera se dispone de un conmutador (7, Fig.56) que permite seleccionar en el indicador de cuatro décadas (11, Fig. 56) la referencia del valor actual x , prescrito y límites **A1**, **A2**. Además se dispone de unos pulsadores de ajuste de dicho valor (3.1, 3.2, Fig. 56). Las señales **A1** y **A2** (12.1, 12.2, Fig.56) son indicativas del rebase superior o inferior de las magnitudes de proceso que se hayan elegido para su supervisión (ver tabla de parámetros: valor límite; y tabla de conmutadores: S20, S22, S23).

7.10 INDICADOR DE MAGNITUDES DE PROCESO

En el indicador de cuatro décadas (11, Fig. 56) Se puede representar a voluntad una de las dos magnitudes externas x_1 y x_2 en unidades físicas. Este indicador está parametrizado en % (0,0 a 100,0 %), puede ser ajustado por el usuario por medio de los parámetros **LA** y **LE** (ver tabla de parámetros); el margen de indicación debe ser igual para ambas magnitudes externas.

Es importante que el aparato deba estar conectado a servicio externo (1, Fig. 56) para poder actuar como indicador de magnitudes del proceso. Si el aparato básico es un regulador **K**, se da como salida analógica una señal de 0 mA (o 4 mA) a 20 mA. Esta señal puede ser ajustada como magnitud de valor prescrito (en caso de conmutación a servicio interno), con los pulsadores de valor prescrito y leída en el indicador de cuatro décadas.

7.11 PREPARACIÓN DE LAS SEÑALES DE ENTRADA ANALÓGICAS

El regulador puede elaborar tres magnitudes: x_1 , x_2/WE , e yr/yn . Las dos primeras pueden ser radicadas a voluntad (ver tabla de conmutadores: S12, S13) e incluso linealizada la magnitud principal x_{14} (conmutador S14).

7.12 INDICACIÓN EN UNIDADES FÍSICAS Y LINEALIZACION DE LA MAGNITUD REGULADA PRINCIPAL

Las magnitudes principales reguladas (magnitud regulada x , magnitud piloto w , así como los valores límites $A1$ y $A2$) representables en el indicador digital (11, Fig. 56) de cuatro dígitos pueden ser indicados en tanto por ciento o en unidades físicas, siempre que para estas magnitudes valga el mismo margen de medida. El valor inicial y final del margen de medida vienen dados por los parámetros LA y LE . El punto decimal es ajustado mediante el conmutador de estructuración S20.

Para poder indicar digitalmente una magnitud regulada principal $x1$ no lineal, ésta debe ser previamente linealizada, la cual se realiza con una traza poligonal que consta de 8 rectas, dadas como parámetros $L1$ a $L7$ (ver tabla de parámetros Fig. 57).

7.13 RAMPA DE VALOR PRESCRITO, LIMITACIÓN DEL VALOR PRESCRITO Y TRACKING X

Para ajustar la velocidad de modificación deseada para el valor prescrito se ha de variar el parámetro Tw , que da en qué tiempo el valor prescrito se modifica en el 100 %. Esta rampa actúa siempre a excepción del caso de *tracking x*. El margen de valor prescrito es limitado mediante los parámetros wa y we (ver tabla de parámetros Fig 57).

7.14 FILTRO Y UMBRAL DE REACCIÓN DE LA DIFERENCIA DE REGULACIÓN

El dispositivo lleva incorporado un filtro de primer orden con constante de tiempo TF (ver tabla de parámetros), que actúa sobre la diferencia de regulación xd , para que ésta no oscile. El umbral de esta señal se regula por medio de un parámetro A (ver tabla de parámetros Fig 57).

7.15 ALGORITMO DE REGULACIÓN.

Se pueden implementar reguladores P , PI , PD o PID . Mediante estructuración se puede elegir entre regulación P y PI (ver tabla de conmutadores S28).

- Para la parte P , la diferencia de regulación es multiplicada con el valor proporcional Kp (ver tabla de parámetros Fig 57).
- La parte I viene parametrizada por el Tn (ver tabla de parámetros).
- La parte D es añadida a la parte P o PI sin realimentación. Se tendrá que elegir que magnitud ($x1$, x o $x2/WE$) debe de ser dada a la parte D . Éste es un factor que amplifica la señal de entrada con el factor Vv (ver tabla de parámetros) y lo lleva a un temporizador con constante de tiempo Tv/Vv . Tv

es el tiempo de acción derivativa y se puede ajustar (ver tabla de parámetros Fig 57). La parte **D** se desconecta haciendo $T_v < 1$ s.

7.16 LIMITACIÓN DE LA MAGNITUD DE AJUSTE DEL REGULADOR

En caso de reguladores **K** y de reguladores paso a paso de tres puntos con realimentación de posición, puede ser conseguida una limitación de la magnitud de ajuste (salida) mediante los parámetros **ya**, **ye** (ver tabla de parámetros). La limitación de la magnitud de ajuste actúa solo en servicio automático. El regulador no puede dar ninguna corriente de ajuste negativo.

En caso de que la magnitud de ajuste **ya** (salida) alcance uno de los límites fijados por los parámetros antes comentados, se interrumpe la integración, evitándose la saturación de la integral.

Tabla 1. Indicación de ajuste de parámetros

Parámetros	Indicación	Margen Min.	Margen Máx.	Ajuste	Ud	Resolución	Notas
COMP. TEMPORAL							
Amplificación derivativa V_v	uu	1.00	10.0	5.000	-	128val/oct	en reg. PI S28=0 en reguladores P S28=1 ¹ $T_v = T_d \cdot V_v$ el órgano D, el filtro y por S1=7/8 por S1 \neq 7/8 rampa del valor presc.
Factor proporcional K_p	cP	0.100	100.0	0.100	-	128val/oct	
Tiempo de acción integral T_n	tn	1.00	9984	9984	s	128val/oct	
Punto de trabajo y_0	Yo	Auto. 0.0	99.5	Auto.	%	0.1 %	
Tiempo de acción derivativa T_v	tu	1.00/OFF	1000	OFF	s	128val/oct	
Constante de filtro TF por x_d	tF	1.00/OFF	1000	OFF	s	128val/oct	
Rampa de valor prescrito T_w	ts	1.00/OFF	100	OFF	s	128val/oct	
			9984				
Principio medida (0%)	LA	-1999	9999	0.0			
LINEALIZACIÓN							
Valor de apoyo 1/8	L1	-1999	9999	0.0	-	1 dígito	Los parámetros L1 a L7 son necesarios sólo para indicación de magnitudes físicas con linealización (S14=1) Con S1=7 ó 8 y S14=0 L1 a L7 no actúan
Valor de apoyo 2/8	L2	-1999	9999	0.0	-	1 dígito	
Valor de apoyo 3/8	L3	-1999	9999	0.0	-	1 dígito	
Valor de apoyo 4/8	L4	-1999	9999	0.0	-	1 dígito	
Valor de apoyo 5/8	L5	-1999	9999	0.0	-	1 dígito	
Valor de apoyo 6/8	L6	-1999	9999	0.0	-	1 dígito	
Valor de apoyo 7/8	L7	-1999	9999	0.0	-	1 dígito	
Final medida (100%)	LE	-1999	9999	100.0			
VALOR PRESCRITO							
Lím. val. prescrito w_a/w_{va}	SA	-1999	9999	-5.0	-	1 dígito	Sólo pueden ser ajustados valores $w_e/w_{ve} < w_e/w_{ve}$
Lím. val. prescrito w_e/w_{ve}	SE	-1999	9999	105	-	1 dígito	
Valor prescrito de seguridad w_s	SH	-1999	9999	0.0	-	1 dígito	
VALOR LIMITE							
Valor límite, valor mínimo	A2	-1999	9999	-5.0	-	1 dígito	Sólo A2 \leq A1. Con S24=1 A1 y A2 aj. en el nivel de operación
Valor límite, valor máximo	A1	-1999	9999	5.0	-	1 dígito	
UMBRAL DE X_d	A	0.0	10.0	0.0	%	0.1 % fin	con S2=2 y S2=3: ajustar A > 0
MAGNITUD PILOTO							
Limitación valor ajuste (principio de y_a)	ya	-10.0	110.0	-5.0	%	0.1 % final	Sólo pueden ajustar val. $y_a \leq y_e$ Especialidades: S2=1: y_a e y_e fijan z. muerta S2=2: y_a/y_e inactivos; y_a sólo 100 % S1=10: y_a/y_e mín./máx.
Limitación valor ajuste (final de y_a)	ye	-10.0	110.0	105.0	%	0.1 % final	
Valor de ajuste de seguridad y_s	yS	-10.0	110.0	0.0	%	0.1 % final	
CONSTANTES							
Constante 1 (punto cero) c_1	c1	-199.9	199.9	0.0	%	0.1 % final	
Constante 2 (factor) c_2	c2	-199.9	199.9	0.0	%	0.1 % final	

7.17 CONSIDERACIONES IMPORTANTES

7.17.1 Magnitudes del proceso. Una característica del SIPART DR20 es que permite trabajar en los rangos reales de las magnitudes del proceso, permitiendo una precisión de actuación y medición programable en el controlador (p.ej., el punto decimal se puede ajustar mediante estructuración en S20). El indicador digital de cuatro décadas se puede parametrizar de forma que la señal que indique (señal controlada en general) varíe en un rango entre 0% y 100% de su valor real.

Para que el indicador muestre numéricamente los valores de la señal procesada se deben definir en el apartado de parámetros su rango real con los límites **LA** (inferior) y **LE** (superior). Con esto se consigue que el indicador provea el % correspondiente entre **LA** y **LE** en cada momento. La elección de **LA** y **LE** por encima de los valores reales de la magnitud controlada no significa que el sistema vaya a sobrepasar sus límites físicos; en lo único que afecta, es que el indicador de 4 décadas no reflejara un % que directamente se pueda relacionar con el valor real de dicha variable.

En el indicador digital de 2 décadas se puede indicar en % la magnitud real de salida del regulador (**y**).

7.17.2 Rampa y márgenes del valor prescrito. Para evitar que la referencia varíe de forma rápida no aceptable, se puede ajustar la velocidad de modificación adecuada con el parámetro **Tw**, que provee el tiempo en que el valor prescrito se modifica un 100%. Los márgenes del valor prescrito son limitados mediante los parámetros **wa** y **wc**, que deben elegirse convenientemente ajustados al rango de valores reales que se deseen para la salida del proceso. Se puede actuar siempre sobre el valor de **w** con una rampa ajustable, salvo en el caso de selección del **tracking x** (S17), en el que la referencia se hace igual a la variable controlada **w = x**, moviéndose el sistema autónomamente para que si se ha variado manualmente la señal de control llevando la salida del sistema a una posición lejana a la referencia actual, no se produzca un cambio brusco en el paso de manual a automático. En el caso que sea conveniente analizar el comportamiento del sistema ante un escalón, se debe desactivar la opción de **tracking x**, llevando la salida del sistema actuando directamente en modo manual sobre la señal de control (pasando a modo manual y actuando sobre 8.1 y 8.2) lejos de la referencia y pasando seguidamente a automático.

7.17.3 Limitación de la magnitud de ajuste. En el caso de reguladores **K**, puede ser conseguida una limitación de la magnitud de ajuste mediante los parámetros **ya**, **ye**; actuando solo en servicio automático.

Tabla 2. Ejemplo programación de parámetros

PARÁMETRO	SÍMBOLO	SIGNIFICADO
$V_v = 1$	(uu)	No hay amplificación derivativa
$K_p = 1$	(cP)	Control proporcional sin amplificación
$S_H = 0$	(SH)	Valor prescrito de seguridad
$y_S = 0$	(yS)	Valor de ajuste de seguridad
$Y_0 = 0$	(Yo)	Punto de trabajo
$t_v = \text{OFF}$	(Tu)	No hay efecto derivativo
$T_w = 1$	(ts)	Rampa mínima de valor prescrito
$A_1 = 2$	(A1)	Valor mínimo de seguridad
$A_2 = 7$	(A2)	Valor máximo de seguridad
$LA=0$	(LA)	Valor mínimo alcanzable por x
$LE=10$	(LE)	Valor máximo alcanzable por x
$SA=0$	(SA)	Valor mínimo de la referencia
$SE=20$	(SE)	Valor máximo de la referencia
$y_A = 0$	(ya)	Valor mínimo de la actuación
$y_E = 100$	(ye)	Valor máximo de la actuación

Nota: Como se puede apreciar, la magnitud controlada en este caso (tensión de salida de los módulos de simulación) varía entre 0 y 10 V. La elección de los rangos máximo y mínimo de la señal de referencia ha venido precisamente condicionada por este hecho, dados los valores máximo y mínimo de la variable controlada y al estar usando un controlador proporcional con $K_p = 1$, el error en régimen permanente del sistema controlado será 0.5 ($x = w/2$). Sin embargo, se aprecia que el controlador automáticamente limita el valor máximo alcanzable por la referencia a un 50% por encima del valor máximo alcanzable por x . Por tanto, en este caso, aunque se había tomado $SE=20$, internamente actúa con $SE=15$. Esta limitación, no comentada en los manuales del fabricante, se supone que es debida a cuestiones de seguridad en la operación, limitando la banda de regulación.

Tabla 3. Tabla de conmutadores de estructuración del SIPART DR-20
Switches 1-37

Structuring switches and positions	Function	Structuring switches and positions	Function			
Basic positions	S1	Device type	Analog inputs			
	0	Fixed setpoint controller		S10	Allocation of the analog inputs to the auxiliary controlled variable x2/command variable x2 (ratio control) or external setpoint w_E :	
	1	Fixed setpoint controller with disturbance variable feedforward at input		-2	AE 1 (0/4 to 20 mA without electrical isolation)	
	2	Fixed setpoint controller with disturbance variable feedforward at output		-1	AE 2 (0/4 to 20 mA without electrical isolation)	
	3	DDC back-up fixed setpoint controller		0	AE 3 (option for I/U, R, P, T)	
	4	Slave controller without internal/external switchover		1	AE 4 (option for I/U, R, P, T)	
	5	Slave controller with internal/external switchover and SPC via the serial interface		S11	Transmitter monitoring	
	6	Synchronization controller without internal/external switchover		0	none	
	7	Ratio controller		1	x1	
	8	Ratio station (only in "K" version)		2	-	
9	Manual/automatic control station and manual control device, DDC manual control device	3	x1			
10	Process indicator K: with setpoint value output Process indicator S: with 2nd limit monitor	4	-			
Analog inputs	S2	Output structure	5	x1		
	0	K output (0/4 to 20 mA)	6	-		
	1	S output, two-step controller with 2 outputs for heating/cooling	7	x1		
	2	S output, three-pos. step controller for motor-operated devices, internal position feedback	0	No		
	3	S output, three-pos. step controller for motor-operated devices, external position feedback	1	Yes		
	S3	Mains frequency suppression:	S12	Root extraction of main controlled variable x1:		
	0	For 50 Hz	0	No		
	1	For 60 Hz	1	Yes		
	S4	Input signal from AE 1:	S13	Root extraction of x2:		
	0	0 to 20 mA	0	No		
1	4 to 20 mA	1	Yes			
S5	Input signal from AE 2:	S14	Linearization of main controlled variable x1:			
0	0 to 20 mA	0	No			
1	4 to 20 mA	1	Yes			
S6	Input signal from AE 3:	Binary input	S15	Function of the binary input BE	CB without acknowledgement	
0	0 to 20 mA or U, R, P, T		0	BL (blocking of manipulated output)		
1	4 to 20 mA		1	Si (safety value of manipulated variable $y = yS$)		
S7	Input signal from AE 4:		2	N (tracking of the output $y = yN$)		
0	0 to 20 mA or U, R, P, T		3	CB (computer ready signal)		
1	4 to 20 mA		4	BE on serial interface		
S8	Allocation of the analog inputs to the main controlled variable x1		5	BLPS Block parameterization/structuring		
0	AE 1 (0/4 to 20 mA without electrical isolation)		6	BL (blocking of manipulated output)		CB with acknowledgement
1	AE 3 (option for I/U, R, P, T)		7	Si (safety value of manipulated variable $y = yS$)		
S9	Allocation of the analog inputs to the position feedback y_R or position tracking y_N :		8	N (tracking of the output $y = yN$)		
0	AE 2 (0/4 to 20 mA without electrical isolation)		9	CB (computer ready signal)		
1	AE 4 (option for I/U, R, P, T)	10	BE on serial interface			
		11	BLPS Block parameterization/structuring			
		S16	Sense of the binary input BE:			
		0	13 to 30 V = logical 1			
		1	0 V/open = logical 1			
		S17	x-tracking ($w = x$, $wv = xv$) in H, N, DDC, BI and Si operation			
		0	No			
		1	Yes			
		S18	Setpoint w with CB failure:			
		0	Internal w			
		1	Safety setpoint w_S			
		S19	Tracking of the internal setpoint w_i to the effective setpoint w			
		0	Yes			
		1	No			

Configuring switches

**Tabla 4. Tabla de conmutadores de estructuración del SIPART DR-20
Switches 20-38**

Structuring switches and positions	Function	Structuring switches and positions	Function																				
Display	S20 Decimal point in display 4 for SP-PV-As-A1 (ineffective with S1 = 7 and 8): <table border="0"> <tr><td>-1</td><td>x</td><td>x</td><td>x</td><td>x</td></tr> <tr><td>0</td><td>x</td><td>x</td><td>x</td><td>x</td></tr> <tr><td>1</td><td>x</td><td>x</td><td>x</td><td>x</td></tr> <tr><td>2</td><td>x</td><td>x</td><td>x</td><td>x</td></tr> </table>	-1	x	x	x	x	0	x	x	x	x	1	x	x	x	x	2	x	x	x	x	Output switchover	S29 Priority N (DDC), BL or H: 0 N (DDC), BL 1 H
	-1	x	x	x	x																		
0	x	x	x	x																			
1	x	x	x	x																			
2	x	x	x	x																			
S21 Repetition rate of the digital display: <table border="0"> <tr><td>-3</td><td>0.1 s</td></tr> <tr><td>-2</td><td>0.2 s</td></tr> <tr><td>-1</td><td>0.5 s</td></tr> <tr><td>0</td><td>1 s</td></tr> <tr><td>1</td><td>2 s</td></tr> <tr><td>2</td><td>5 s</td></tr> <tr><td>oFF</td><td>Display 4 switched off, indicator 6: 0.1 s</td></tr> </table>	-3	0.1 s	-2	0.2 s	-1	0.5 s	0	1 s	1	2 s	2	5 s	oFF	Display 4 switched off, indicator 6: 0.1 s	S30 Manual mode with transmitter fault (S11): 0 Switchover does not take place to manual mode 1 Starts with last manipulated variable 2 Starts with safety manipulated variable								
-3	0.1 s																						
-2	0.2 s																						
-1	0.5 s																						
0	1 s																						
1	2 s																						
2	5 s																						
oFF	Display 4 switched off, indicator 6: 0.1 s																						
Alarm signalling	S22 Input of the limit monitors: $S1 = 0$ to 6, 9, 10 7, 8 <table border="0"> <tr><td>0</td><td>xd (f)</td><td> </td><td>-</td></tr> <tr><td>1</td><td>x</td><td> </td><td>xv</td></tr> <tr><td>2</td><td>w</td><td> </td><td>wv</td></tr> </table>	0	xd (f)		-	1	x		xv	2	w		wv	y display	S31 Blocking of the manual/automatic switchover: 0 No 1 Only automatic operation, switchover to manual mode not possible 2 Only manual operation with interlocking (the Δy readjustment facility can be switched off by key 10, LED 11 then does not light up)								
	0	xd (f)		-																			
	1	x		xv																			
2	w		wv																				
S23 Function of the limit monitors: 0 A1 = max and A2 = min 1 A1 = min and A2 = min 2 A1 = max and A2 = max	S32 Manipulated variable display: 0 Control output y 1 Feedback signal y_R oFF No display																						
S24 Setting the limit monitors: 0 Only in the parameterization level 1 Also in the process operation level	S33 Sense of the position display on the controlled system: 0 Normal (y-display = y or y_R) 1 Reversed (y-display = 100% - y or 100% - y_R)																						
xd display	S25 Display range of the xd display: <table border="0"> <tr><td>-2</td><td>+ 2.5 %</td></tr> <tr><td>-1</td><td>+ 5 %</td></tr> <tr><td>0</td><td>+ 10 %</td></tr> <tr><td>1</td><td>+ 20 %</td></tr> <tr><td>2</td><td>+ 40 %</td></tr> <tr><td>oFF</td><td>Display switched off</td></tr> </table>	-2	+ 2.5 %	-1	+ 5 %	0	+ 10 %	1	+ 20 %	2	+ 40 %	oFF	Display switched off	Binary output	S34 Function of the binary output BA: 0 \overline{RC} Controller not in computer mode 1 H Controller in manual mode 2 \overline{RB} Controller not in computer standby 3 MuSt Transmitter fault 4 BA is activated via the serial interface								
	-2	+ 2.5 %																					
-1	+ 5 %																						
0	+ 10 %																						
1	+ 20 %																						
2	+ 40 %																						
oFF	Display switched off																						
S26 Sense of the controller on the controlled system: 0 Normal ($K_p > 0$) } Referred to 1 Reversed ($K_p < 0$) } $xd = w-x$	S35 Sense of the binary output BA: 0 Logical 1 = 24 V 1 Logical 1 = 0 V																						
Algorithm	S27 Element input: 0 xd (f) 1 x 2 $x2/w_E$ (r) direction of action against x 3 $x2/w_E$ (r) direction of action with x	Alarm components GW	S36 Components supplied with the optional module GW: 0 Limit outputs: 1 Controller supplied with module 6DR2801-8A = 2 relays for A1/A2, or GW is not used Controller supplied with module 6DR2801-8B = 4 binary outputs for A1, A2 and + Δy , and 1 binary input for blocking of parameterization and structuring (the relay outputs + Δy of basic device have no function)																				
	S28 Control algorithm: 0 PI (D) 1 P (D)		K controller	S37 Current output i_y of the K controller (only with S2 = 0): 0 0 to 20 mA 1 4 to 20 mA																			
		S38 i_y switch-off with DDC operation (only with S2 = 0 and S1 = 3 or 9): 0 No 1 Yes																					

Configuring switches (continued)

**Tabla 5. Tabla de conmutadores de estructuración del SIPART DR-20
Switches 39-48**

Structuring switches and positions	Function	Structuring switches and positions	Function
S controller	S39 Minimum control pulse length t_e (only with S2 = 2 or 3)	Serial interface (SES)	S42 Serial interface, only in conjunction with optional module 6DR2803-8A:
	-9 20 ms		0 Without, controller sends all variables, receives none
	-8 40 ms		1 With, controller sends all variables, receives only parameters and structuring switches
	-7 60 ms		2 With, controller sends all variables, receives parameters, structuring switches and w_{ES} , y_{ES} , STES (CB, BL, Si and BA)
	:		
	:		
	-1 180 ms		S43 Data transmission rate:
	0 200 ms		0 9600 bit/s
	1 220 ms		1 4800 bit/s
	:		2 2400 bit/s
	:		3 1200 bit/s
	8 360 ms		4 600 bit/s
	9 380 ms		5 300 bit/s
	19 400 ms		
	Start-up conditions		S40 Min. control pulse pause t_a (function as S39)
-9 20 ms		0 Even	
:		1 Odd	
:			
-1 180 ms		S45 Longitudinal parity position:	
0 200 ms		0 Without	
1 220 ms		1 After ETX	
:		2 Before ETX	
:			
10 400 ms		S46 Longitudinal parity:	
	0 Normal		
	1 Inverted		
	S47 Station number (address):		
	0 0		
	1 1		
	2 2		
	:		
	:		
	31 31		
	S48 Time monitoring CB_{ES} :		
	0 Without		
	1 1 s		
	2 2 s		
	3 3 s		
	:		
	:		
	24 24 s		
	25 25 s		

Configuring switches (continued)

8. VÁLVULAS

Una válvula se puede definir como un aparato mecánico con el cual se puede iniciar, detener o regular la circulación (paso) de líquidos o gases mediante una pieza movable que abre, cierra u obstruye en forma parcial o total uno o más orificios o conductos.

Las válvulas son unos de los dispositivos más esenciales en la industria. Debido a su diseño y materiales, las válvulas pueden abrir y cerrar, conectar y desconectar, regular, modular o aislar una enorme serie de líquidos, sólidos y gases, desde los más simples hasta los más corrosivos o tóxicos. Sus tamaños van desde una fracción de pulgada hasta 30 ft (9 m) o más de diámetro. Pueden trabajar con presiones que van desde el vacío hasta más de 20.000 lb/in² (140 Mpa) y temperaturas desde las criogénicas hasta 1.500 °F (815 °C). En algunas instalaciones se requiere un sellado absoluto; en otras, las fugas o escurrimientos no tienen importancia.

8.1 VÁLVULAS DE BOLA

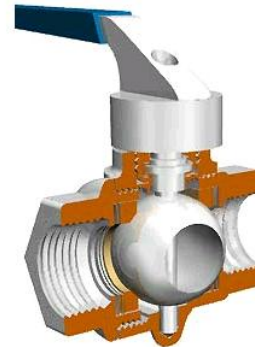
Las válvulas de bola ofrecen muy buena capacidad de cierre y son prácticas porque para abrir y cerrar la válvula es tan sencillo como girar la manivela 90°. Se pueden hacer de 'paso completo', lo que significa que la apertura de la válvula es del mismo tamaño que el interior de las tuberías y esto resulta en una muy pequeña caída de presión. Otra característica principal, es la disminución del riesgo de fuga de la glándula de sello, que resulta, debido a que el eje de la válvula solo se tiene que girar 90°.

Cabe señalar, sin embargo, que esta válvula es para uso exclusivo en la posición totalmente abierta o cerrada. Esta no es adecuada para su uso en una posición de apertura parcial para ningún propósito, tal como el control de caudal, porque la válvula de bola hace uso de un anillo suave conformado en el asiento de la válvula, y si la válvula se utiliza en posición parcialmente abierta, la presión se aplica a sólo una parte del asiento de la válvula, lo cual, puede causar que el asiento de la válvula se deforme. Si el asiento de la válvula se deforma, sus propiedades de sellado se vulneran y esta permitirá fugas como consecuencia de ello.

Figura 56. Válvula de bola abierta



Figura 57. Válvula de bola cerrada



8.2 VÁLVULAS DE MARIPOSA

El nombre de estas válvulas proviene del movimiento del disco de control de flujo, semejante al de las alas de una mariposa, que opera a ángulos rectos respecto al flujo. El disco tiene aproximadamente el mismo diámetro que la tubería de conexión, y el flujo es recto con una baja caída de presión. El mantenimiento es fácil debido al bajo número de partes móviles. La válvula de mariposa se puede usar como un tipo de válvula de abrir/cerrar o de modulación. Asahi/America creó recientemente la avanzada válvula Tipo 56, sin contacto alguno del metal al medio ni al entorno. Estas válvulas se pueden operar en forma manual, eléctrica o neumática.

Figura 58. Válvula de mariposa cerrada

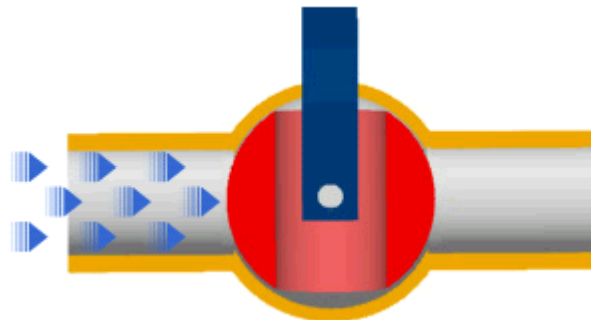


Figura 59. Válvula de mariposa con apertura media

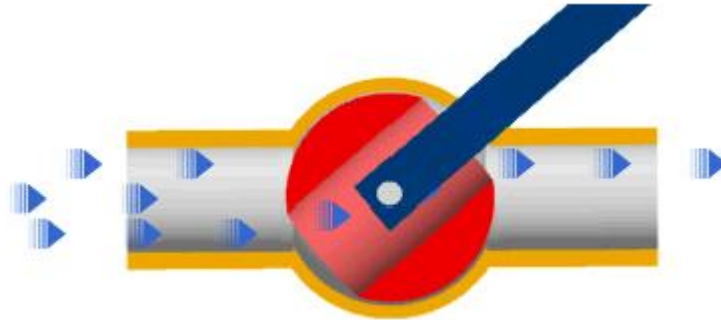
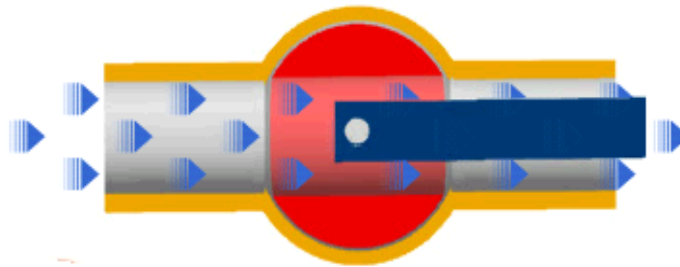


Figura 60. Válvula de mariposa abierta



8.3 VÁLVULAS DE DIAFRAGMA

Las válvulas de diafragma ofrecen muchas combinaciones de materiales de cuerpo y materiales de diafragma elastomérico. El diseño de la válvula es resistente a la abrasión y no se obstruye. Cuando el diafragma, que está conectado al eje del cuerpo de la válvula mediante un compresor, se separa del fondo del cuerpo de la válvula o vertedero, la ruta del fluido tiene un flujo uniforme y aerodinámico. Los lados a baja presión que normalmente obstruirían casi todos los demás diseños de válvulas pasan fácilmente a través de una válvula de diafragma. La válvula tiene un diseño de entrada superior, que permite el mantenimiento en línea; Es adecuado para servicio de estrangulación y de abrir/cerrar en aplicaciones que van desde el tratamiento de agua a procesos de

abrasión química. Las válvulas de diafragma se operan en forma manual, eléctrica o neumática.

Figura 61. Válvula de diafragma abierta

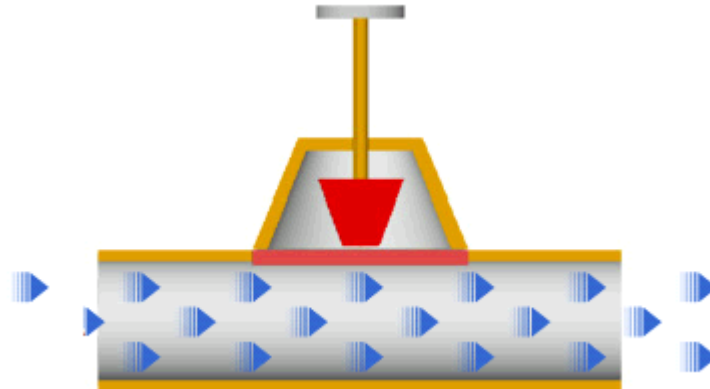
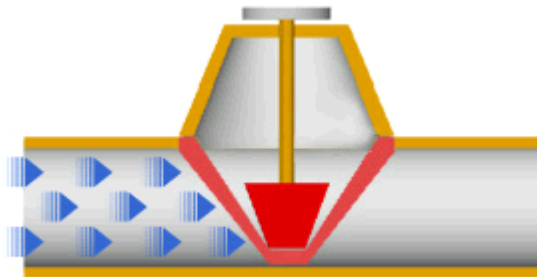


Figura 62. Válvula de diafragma cerrada



8.4 VÁLVULAS DE RETENCIÓN

Las válvulas de retención se usan para impedir la inversión de flujo en una línea. Cuando se abren y están bajo presión de flujo, el mecanismo de retención se moverá libremente en los medios, ofreciendo poca resistencia y caída de presión mínima. Se conocen dos tipos básicos de válvulas de retención: válvulas de retención de charnela y válvulas de retención de bola. Una válvula de retención de charnela utiliza un disco basculante que requiere sólo una contrapresión mínima para cerrar la válvula. Esta válvula también se puede modificar, con una palanca o pesa o resorte, para ayudar a cerrar más rápidamente la válvula y para eliminar el

choque. La válvula de retención de bola de Asahi/America usa una bola que se mueve libremente, que sale de su asiento para permitir el flujo en una dirección, pero que se sella contra un asiento para impedir el contraflujo. Ambos tipos de válvulas se pueden instalar vertical u horizontalmente.

Figura 63. Válvula de retención a media apertura



8.5 VÁLVULAS DE GLOBO

El flujo a través de una válvula de globo sigue un curso que requiere dos cambios de dirección de casi 90°. Pero debido a que el asiento de una válvula de globo es paralelo a la línea de flujo del líquido, se puede usar para estrangular el flujo a cualquier grado requerido o para dar cierres seguros. La economía y fiabilidad de la válvula de globo de Asahi/America la hacen recomendable para muchas aplicaciones en las cuales esta caída de presión no es crucial. Estas válvulas están diseñadas sólo para operación manual.

Figura 64. Válvula de globo abierta

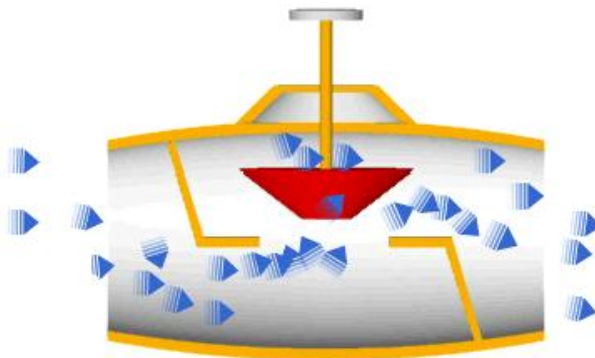
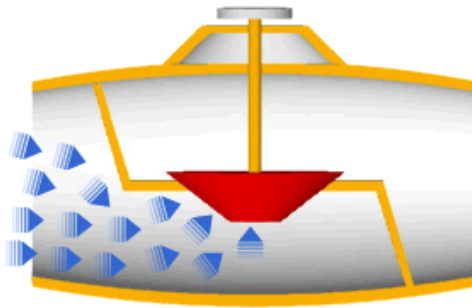


Figura 65. Válvula de globo cerrada



8.6 VÁLVULAS DE COMPUERTA

La válvula de compuerta es la válvula de abrir y cerrar más usada para aplicaciones de diámetro grande y puerto completo. Cuando la válvula está completamente abierta, permite el paso recto a través de una abertura que es esencialmente del mismo tamaño que el diámetro interior de la tubería de conexión, por lo que hay poca caída de presión a través de una válvula de compuerta. La válvula funciona cuando el volante y el tornillo del eje (o actuador eléctrico) mueven un macho cilíndrico, la compuerta, hacia arriba y hacia abajo a ángulos rectos respecto a la dirección de flujo. Tradicionalmente las válvulas de compuerta se usan sólo para servicio de abrir y cerrar, pero el diseño de macho deslizante exclusivo de Asahi/America permite un área de asiento más grande que las válvulas de compuerta convencionales, así que se puede usar para estrangulación.

Figura 66. Válvula de compuerta abierta

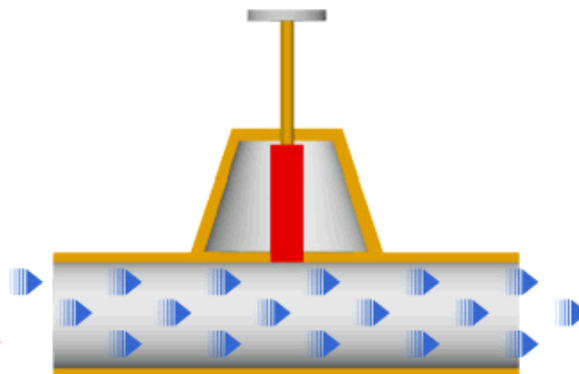
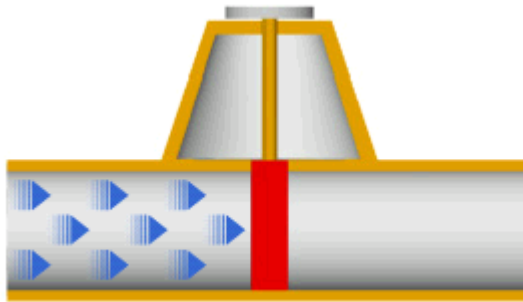


Figura 67. Válvula de compuerta cerrada



8.7 VÁLVULAS DE ALIVIO DE PRESIÓN

La válvula de alivio de presión termoplástica protege el equipo y el sistema contra excesos de presión o cambios de presión repentinos. Puede manejar líquidos altamente corrosivos o ultra puros e impide que las bombas trabajen con la válvula cerrada debido a cierres inesperados aguas abajo (ésta también se conoce como válvula de alivio de derivación). Mantiene la contrapresión en sistemas de ciclo cerrado para hacer que las bombas funcionen de manera más uniforme (también se conoce como una válvula de contrapresión). Los mecanismos de alivio pueden ser mecánicos, eléctricos o electrónicos.

Figura 68. Válvula de alivio de presión mecánica



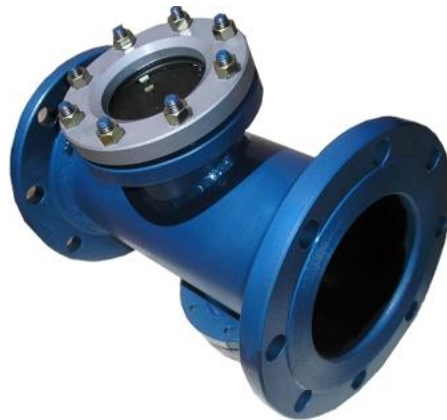
El mecanismo de alivio mecánico ver Fig. 69 consiste en un tapón que mantiene cerrado el escape. Un resorte conserva este tapón en posición, evitando que el fluido se escape del contenedor o tubería. Cuando la presión interna del fluido supera la presión del resorte, el tapón cede y el fluido es expulsado a través del escape. Una vez que la presión interna disminuye el tapón regresa a su posición original.

El umbral de presión que determina el punto de liberación del fluido se ajusta aumentando o reduciendo la presión que el resorte ejerce sobre el tapón con un tornillo que lo atraviesa por su centro.

8.8 VÁLVULAS CON MIRILLA/INDICADOR

La válvula con mirilla es la manera más cómoda de supervisar visualmente el nivel la presencia de fluidos en la tubería, observar el color, la temperatura y consistencia del material. Su construcción termoplástica produce una excelente resistencia a la corrosión y su diseño compacto permite que se ubique con seguridad cerca del tanque.

Figura 69. Válvula con mirilla de proceso



8.9 VÁLVULA SERVO CONTROLADA

Son válvulas con accionamiento de tipo hidráulico, neumático, mecánico o eléctrico a diferencia con las válvulas convencionales, se puede decir que la servo válvula puede controlar o variar el caudal o la presión de salida, mientras que las válvulas convencionales entregan todo o nada. Esto se da gracias a un servomotor y a un control de paso adecuado y controlado en un lazo cerrado.

8.9.1 Servomotor. Los servomotores llamados abreviadamente servos (son un tipo especial de motor que se caracterizan por su capacidad para moverse y posicionarse exactamente de forma rápida y precisa en cualquier posición dentro de su rango de operación. Para ello, el servo espera un tren de pulsos que se corresponden con el movimiento a realizar. Están generalmente formados por un amplificador, un motor, una caja de engranaje y el sensor de realimentación para

la posición actual, todo en una misma caja de pequeñas dimensiones. El resultado es un servo de posición con un margen de operación de 180° aproximadamente.

Ventajas:

- Es sumamente poderoso para su tamaño (tiene alto torque)
- Su potencia es proporcional para cargas mecánicas
- No consume mucha energía
- Alta precisión

Desventajas:

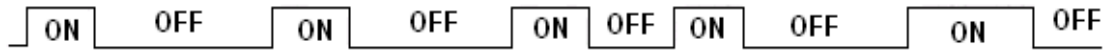
- No es posible cambiar las características eléctricas del motor por tanto no se puede cambiar la velocidad del mismo
- Esta limitado por el circuito de control para rotar su eje únicamente entre 0° y 180° mecánicos
- Su construcción puede ser costosa
- Poder controlar varias secuencias de posiciones, es difícil sin utilizar sistemas basados en microcontroladores

8.9.2 Principios de funcionamiento. Los servos poseen un amplificador, servo motor, piñonearía de reducción de velocidad y aumento de fuerza y un potenciómetro de realimentación; todo incorporado en el mismo conjunto. Esto es un servo de posición (lo cual significa que uno le indica a qué posición debe ir), con un rango de aproximadamente 180 grados. Tienen tres cables de conexión eléctrica; Vcc, GND, y entrada de control.

Para controlar un servo, se le envía una serie de pulsos, con un el tiempo ton del pulso se indica el ángulo al que debe posicionarse; 1 ms = 0 grados, 2,0 ms = máximo giro, y algún valor entre 1 y 2 ms da un ángulo de salida proporcional. Generalmente se considera que en 1,5 ms es la posición "centro", normalmente se puede usar un rango mayor que 1,5 ms para obtener un ángulo mayor e incluso de 2 ms para un ángulo de rendimiento de 180 grados o más. El factor limitante es el tope del potenciómetro y los límites mecánicos construidos en el servo. Un sonido de zumbido, vibración o *click* continuo, normalmente indica que se está forzando por encima del límite de giro al servo, esto debe evitarse, pues puede deteriorar el sistema mecánico de engranajes.

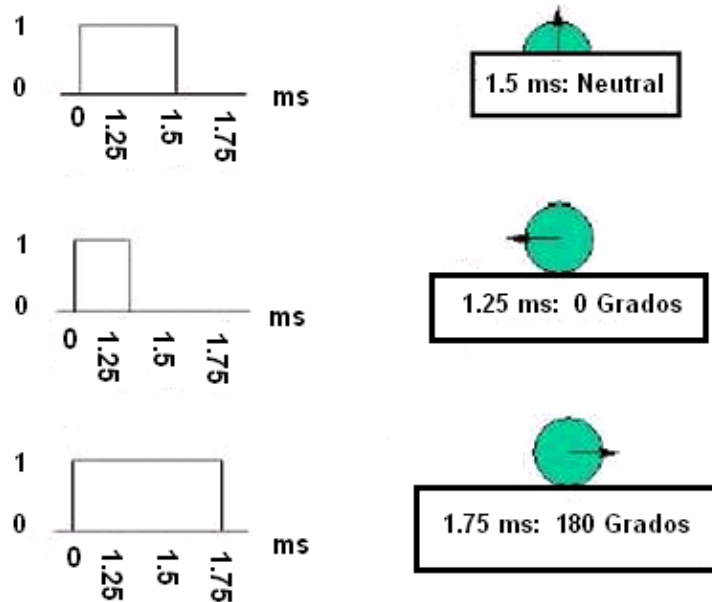
Figura 70. Ejemplo de una señal de alimentación del servomotor

Este es un ejemplo de la señal que debería tener el servo



El tiempo de OFF en el servo no es crítico; puede estar alrededor de los 20 ms. Se ha usado entre 10 ms y 30 ms. Esto No tiene que ser de ésta manera, puede variar de un pulso a otro. Los pulsos que ocurren frecuentemente en el tiempo de OFF pueden interferir con el sincronismo interno del servo y podría escucharse un sonido de zumbido o alguna vibración en el eje. Si el espacio del pulso es mayor de 50 ms típicamente (aunque depende del fabricante), entonces el servo podría estar en modo SLEEP entre los pulsos. Entraría a funcionar en pasos pequeños y el rendimiento no sería el óptimo.

Figura 71. Ejemplo con modulación por ancho de pulsos (PWM)



Como se observa en la figura, la duración del pulso indica o dictamina el ángulo del eje (mostrado como un círculo verde con flecha). Cabe anotar que las ilustraciones y los tiempos reales dependen del fabricante de motor. El principio, sin embargo, es el mismo.

Es importante destacar que para que un servo se mantenga en la misma posición durante un cierto tiempo, es necesario enviarle continuamente el pulso

correspondiente. De este modo, si existe alguna fuerza que le obligue a abandonar esta posición, intentará resistirse. Si se deja de enviar pulsos (o el intervalo entre pulsos es mayor que el máximo) entonces el servo perderá fuerza y dejará de intentar mantener su posición, de modo que cualquier fuerza externa podría desplazarlo de la posición deseada.

8.9.3 Tipos de servomotores *Coreless & Brushless*. Muchos servos estándar de bajo costo (análogos o digitales) utilizan lo que se denomina “motor de tres polos”. Este motor es el más común existente en el mercado. Un paso más allá de este está el motor de cinco polos, logrando hacer que el motor sea más rápido en aceleración y con un aumento notable en el torque. Con lo anterior se concluye que mientras más rápido sea el motor del servo, mas torque podrá entregar.

8.9.3.1 Motores de servo *Coreless*. Un motor estándar de tres polos tiene un núcleo de metal envuelto en cables y este conjunto a su vez está rodeado de magnetos, por lo tanto el peso añadido es tremendo para estos pequeños servos, además del voltaje que se necesita para hacer girar el núcleo con todos sus cables y sobre peso es grande, haciendo difícil la desaceleración por efecto de su inercia una vez que está a toda velocidad. En un diseño *Coreless* el pesado núcleo de metal es eliminado usando un conjunto de cables envueltos entre sí que giran alrededor de magnetos, este diseño es más ligero dando como resultado un motor más rápido con una desaceleración casi instantánea, el resultado, un motor más suave, rápido, con más torque.

8.9.3.2 Motores de servo *Brushless*. Lo más avanzando en la tecnología de esto tiempos para los servos, son la utilización de motores de corriente continua DC sin escobillas o *Brushless DC Motor*, Tienen el mismo principio y ventajas usados en los *Coreless* y en los motores eléctricos de los aviones y helicópteros de alata velocidad de radio control (RC). Estos pequeños motores no tienen escobillas que inducen carga y desgaste, es como si el sistema flotara Girando aún más rápido, son más eficientes, proveen más potencia, velocidad, aceleración, tiempo de respuesta, torque y operación suave.

8.9.4 Rodamientos. Los rodamientos son utilizados para ayudar al eje principal en su rotación envés de usar los comunes cojinetes. Las ventajas son incomparables ya que proveen menor fricción y ajuste perfecto, ayudando al servo a disminuir las vibraciones mecánicas, sin estos rodamientos el deterioro y la vida útil del servo aumenta, haciendo los controles más inexactos. Normalmente, inclusive los servos baratos tienen por lo menos un rodamiento, este se encuentra situado en el eje principal que sale del servo, aquí es donde ocurrirá la mayor presión de carga. Pero en servos más costosos el diseño es con dos rodamientos, manteniendo el eje casi totalmente libre de fricción.

8.9.5 Engranajes de metal. Un servo con engranajes de metal es la opción más fuerte y de alto torque, y que funcionará por mucho tiempo. El problema se presenta en el sobre peso y en que cuando realmente se rompen los piñones, se daña toda la caja interna de engranajes al liberar grandes fuerzas en su interior.

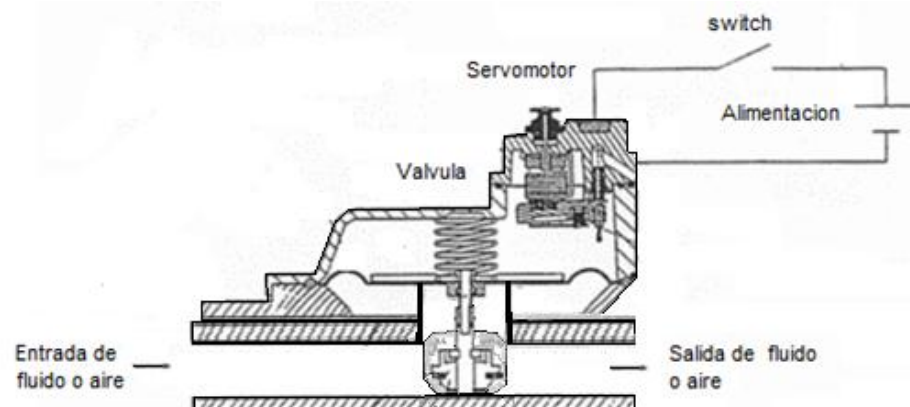
8.9.6 Servo válvula. Implementadas con un servomotor, las servo válvulas tienen la posibilidad de controlar la presión o el caudal.

Las servoválvulas se caracterizan por una estructura sencilla y robusta. El elemento de junta puede ser una membrana, para presiones de aplicación hasta 20 bares, o bien un émbolo obturador, para presiones de aplicación hasta 450 bares. Las válvulas de este tipo de construcción requieren para la apertura y el cierre una diferencia de presión de la presión de servicio. La presión mínima necesaria al efecto se indica como presión mínima en la hoja de características técnicas. El accionamiento cumple aquí una mera función piloto, la de suprimir la presión sobre el elemento de junta principal, es decir, la membrana o el émbolo. La presión del medio, o la diferencia de presión existente, levantan la junta principal.

Este tipo de construcción con pequeños imanes pueden gobernar altas presiones en combinación con grandes anchuras nominales. La posición de montaje de estas válvulas es discrecional hasta DN 50. La fácil sustitución de la bobina y del elemento de junta, hace que el mantenimiento de las servo válvulas electromagnéticas sea realmente cómodo y sencillo.

Los campos de aplicación de las servo válvulas pueden variar entre instalaciones de embotellado, instalaciones de irrigación, técnica de pozos y sanitarias, depuración de aguas, instalaciones mezcladoras, montaje de tuberías, abastecimiento de agua potable, etc.

Figura 72. Diagrama interno Servo válvula de paso de fluidos o gases

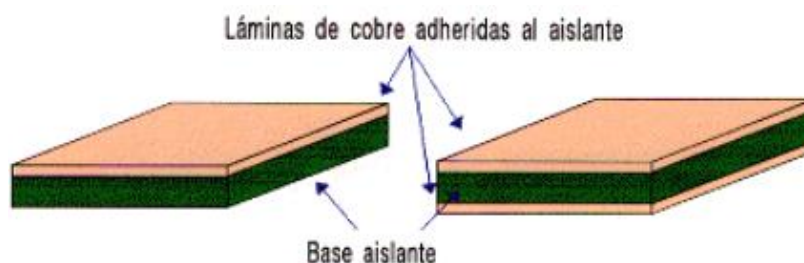


9. DISEÑO DE CIRCUITOS IMPRESO MEDIANTE EL MÉTODO DE TRANSFERENCIA (MÉTODO DE LA PLANCHA)

9.1 CONCEPTOS INICIALES

9.1.1 Placa de circuitos impresos. Es una placa virgen que consiste en una plancha base de material aislador (cartón endurecido, fibra de vidrio, plástico flexible, baquelita, etc) que servirá de soporte, y sobre una de las caras o las dos, se deposita una fina lámina de cobre firmemente pegada al aislador.

Figura 73. Placa de circuitos impresos



9.1.2 Diseño de pistas. Es un dibujo que representa las conexiones a realizar entre los distintos componentes del circuito. Puede obtenerse de diversas formas:

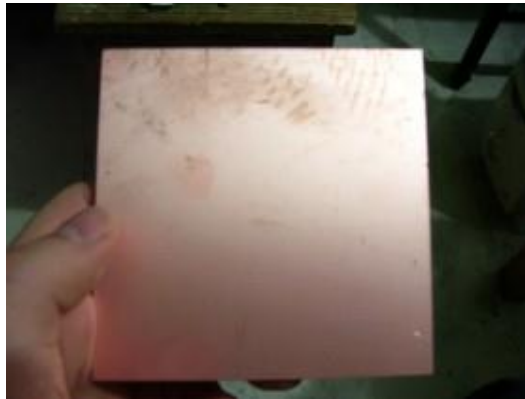
9.1.3 Diseño por ordenador. Partiendo del esquema electrónico y usando un software como OrCAD, TANGO, TraxMaker, etc. El diseño se imprime en papel normal o en papel vegetal. Si es necesario, se puede imprimir en papel normal y fotocopiar en papel de acetato (transparencia) o en papel vegetal.

9.1.4 Diseño a mano. Si el circuito es muy sencillo se pueden dibujar las pistas sobre un papel con un lápiz. Si es necesario, se puede fotocopiar en papel de acetato (transparencia) o en papel vegetal.

9.2 INICIO DEL PROCESO

9.2.1 Preparación de la superficie. Consiste en pulir la superficie de cobre virgen con lana de acero o esponjilla para remover cualquier mancha, partículas de grasa o cualquier otra cosa que pueda afectar el funcionamiento del ácido, que ataca el metal pero no la pintura, ni el plástico, ni manchas de grasa. Por lo que las superficies sucias sobre el cobre lo protegerán del ácido.

Figura 74. Fotografía de una placa de circuitos impreso en proceso de limpieza

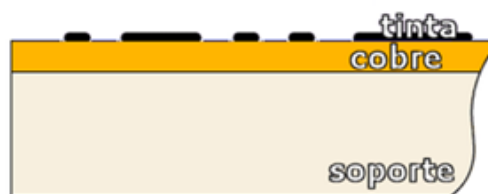


9.2.2 Fijación de las Pistas. Terminada la fase de pulido y limpieza del cobre, se pasa a la etapa de transferencia de la tinta por medio del planchado, que fijará la tinta del circuito, impreso en papel *termo transferible* sobre la superficie de la placa. Para se debe asegurar el papel a la placa y ubicar una hoja limpia sobre el área de planchado para evitar que el papel *transferible* se rasgue o sufra algún tipo de daño.

A continuación y con la plancha bien caliente en posición de algodón y sin vapor, se empieza el planchado. Enseguida la tinta empezará a desprenderse e ira pegándose a la hoja de cobre.

Terminado el planchado, con unas pinzas se coloca la placa en una vasija con agua y hasta que el papel se desprenda solo o al frotarlo suavemente con los dedos.

Figura 75. Vista transversal fijación de pistas



9.3 APLICACIÓN DEL QUÍMICO

Una vez que el ácido está en temperatura se pone la placa de circuito impreso flotando con la cara de cobre hacia abajo y se deja así durante 15 minutos.

Al cabo de los 15 minutos, con un guante de látex, se levanta la placa de circuito impreso y se observa cómo va todo. Si es necesario sumergir la placa en agua para observar en detalle es posible hacerlo, pero no se debe frotar ni tocar con los dedos el dibujo para evitar dañarlo. Si el cobre que debía irse aún permanece, se puede colocar la placa al ácido otros 10 minutos más y repetir inmersiones de 10 minutos hasta que el circuito impreso quede completo.

Si en alguna de las observaciones se nota que una pista corre peligro de cortarse secar cuidadosamente solo en esa zona y aplicar marcador para protegerla de la acción oxidante del ácido.

Una vez que el ácido ha actuado sobre el cobre como se esperaba, dejar la plaqueta bajo agua corriente durante 2 minutos. Luego, secar con papel para cocina y quitar el marcador con solvente. De ser necesario pulir suavemente con esponjilla. Una vez hecho esto tendremos las pistas ya definidas sobre el impreso.

Figura 76. Vista transversal aplicación de químico



9.4 ACABADO FINAL

Con esponjilla de acero quitar las rebabas de todas las perforaciones para que quede bien lisa la superficie de soldado y la cara de componentes, luego de esto, comprobar por última vez la continuidad eléctrica de las pistas y reparar lo que sea necesario.

Figura 77. Vista transversal acabado final



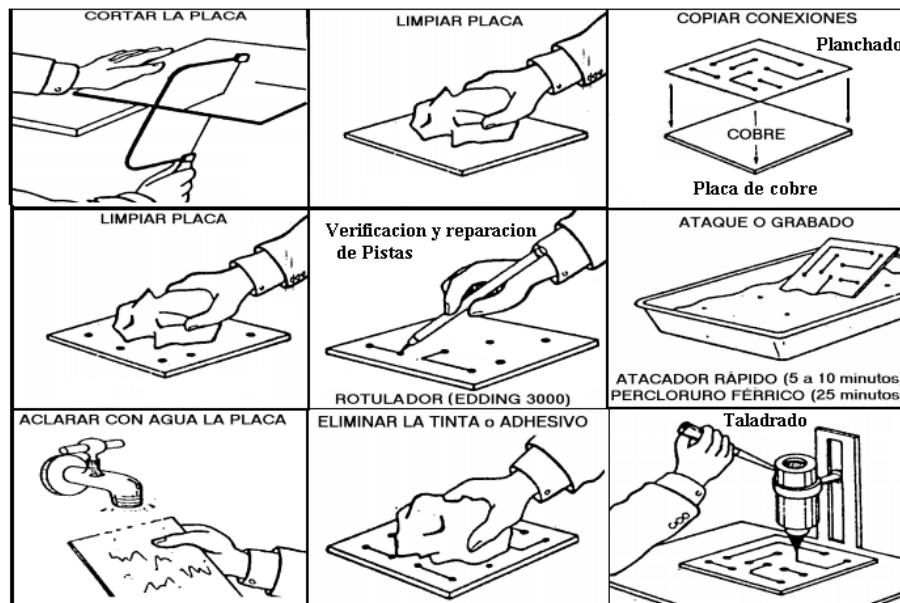
9.5 PROCESO DE PERFORACIÓN

Por último, con un taladro pequeño o mototool y brocas con diámetro recomendado de 1mm se perforan en los puntos donde deben ir los componentes, procurando de no presionar tanto para evitar romper la broca, por seguridad usar lentes de protección.

Figura 78. Fotografía proceso de perforación



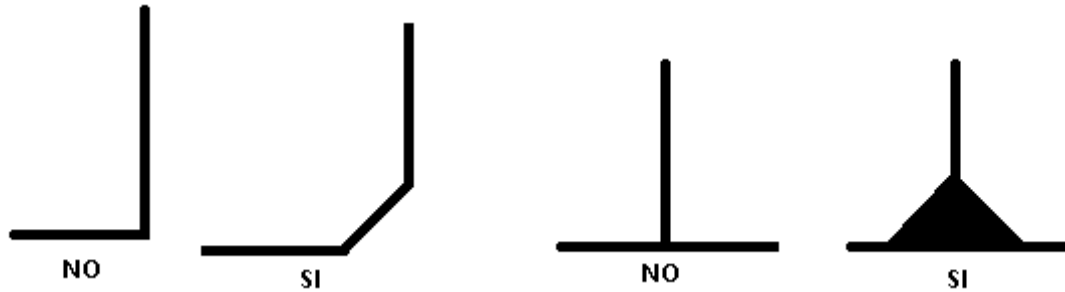
Figura 79. Mapa u orden orientativo de pasos a seguir en el método de transferencia de tinta



9.6 RECOMENDACIONES EN EL DISEÑO DE CIRCUITOS IMPRESOS

- No se unirán pistas con ángulos de 90° , cuando sea necesario efectuar un giro se hará con ángulos de 135° si es necesario realizar bifurcaciones en la pista se hará suavizando los ángulos con sendos triángulos a cada lado.

Figura 80. Ángulos de diseño de las pistas



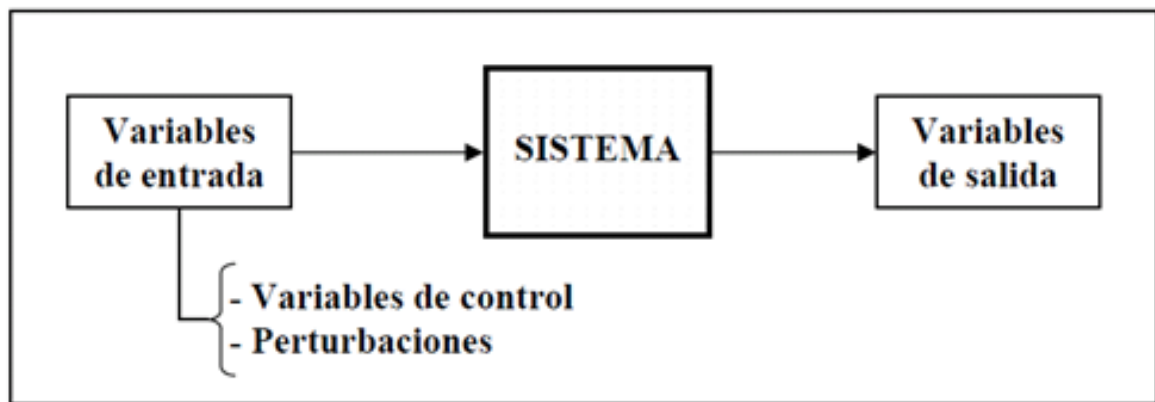
- Para determinar el ancho de cada pista hay que tener en cuenta la corriente que ésta debe soportar. Como ejemplo, se sabe que con un espesor de la capa de cobre de $35\ \mu\text{m}$ (el más común a nivel comercial), una pista de 4 mm de ancha soporta entre 8 y 10 A máximo; una de 1,5 mm soporta corrientes de 2 a 4 A máximo y 0,2 mm para una capacidad de 0,5 A.
- La tensión de manejo de las pistas debe considerarse para aumentar la separación entre las mismas, para tensiones pequeñas de trabajo ($\leq 50\ \text{V}$) se acepta como mínimo 0,2 mm.
- El diámetro de la dona debe ser como mínimo el doble del tamaño de la pista más ancha que se conecte con él. Si la pista fuese más ancha de 5 o 6 mm, el diámetro de la dona puede coincidir con el ancho de la pista.
- Debe dejarse un espacio de separación mínimo entre las pistas y el borde del circuito impreso de 2 o 3 mm.
- El ancho de las pistas es mínimo de 0,1 mm en los formatos de producción especial, ó, 0,2 mm en los formatos de producción estándar.
- Las pistas de alimentación siempre son más anchas, como mínimo de 1 mm ó 2 mm. En todos los casos se debe calcular exactamente conociendo la corriente de alimentación del circuito

10. SISTEMAS DE CONTROL

Un sistema dinámico puede definirse conceptualmente como un dispositivo que recibe unas acciones externas o variables de entrada, y cuya respuesta a estas acciones externas son las denominadas variables de salida. Las acciones externas al sistema se dividen en dos grupos, variables de control, que se pueden manipular, y perturbaciones sobre las que no es posible ningún tipo de control.

La Figura 81 ilustra de un modo conceptual el funcionamiento de un sistema.

Figura 81. Esquema general en bloques de un sistema



Dentro de los sistemas se encuentra el concepto de sistema de control. Un sistema de control es un tipo de sistema que se caracteriza por la presencia de una serie de elementos que permiten influir en el funcionamiento del sistema. La finalidad de un sistema de control es conseguir, mediante la manipulación de las variables de control, un dominio sobre las variables de salida, de modo que estas alcancen unos valores prefijados (consigna).

Un sistema de control ideal debe ser capaz de conseguir su objetivo cumpliendo los siguientes requisitos:

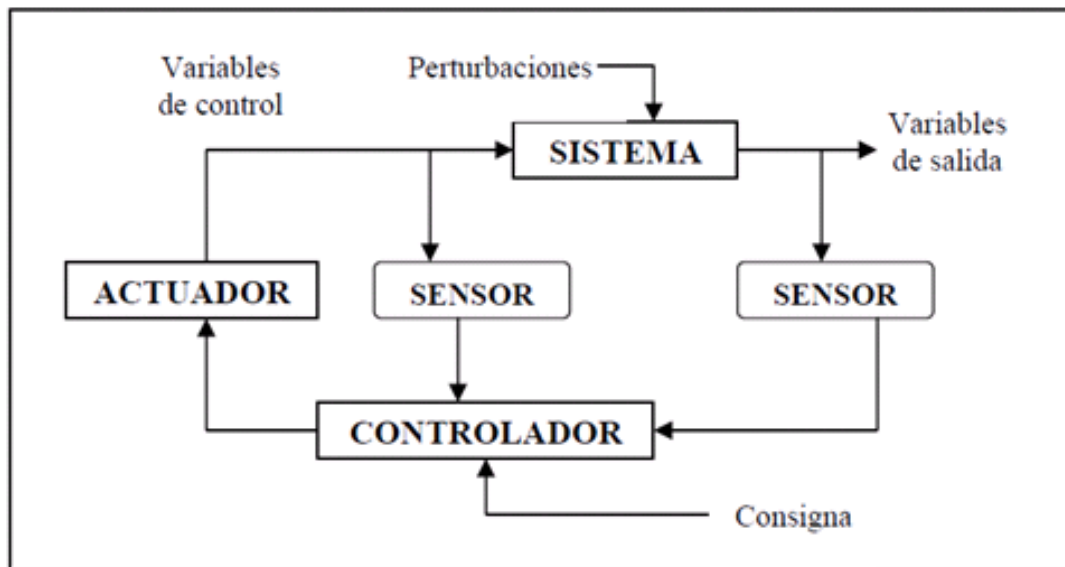
1. Garantizar la estabilidad, y particularmente, ser robusto frente a perturbaciones y errores en los modelos.
2. Ser tan eficiente como sea posible, según un criterio preestablecido. Normalmente este criterio consiste en que la acción de control sobre las variables de entrada sea realizable, evitando comportamientos bruscos e irreales.

3. Ser de fácil implementación y cómodo de operar en tiempo real con ayuda de un ordenador.

Los elementos básicos que forman parte de un sistema de control y permiten su manipulación son los siguientes:

- Sensores. Permiten conocer los valores de las variables medidas del sistema.
- Controlador. Utilizando los valores entregados para las magnitudes medidas por los sensores y la consigna o referencia impuesta, calcula la acción que debe aplicarse para modificar las variables de control con base en cierta estrategia.
- Actuador. Es el mecanismo o dispositivo que ejecuta la acción calculada por el controlador y que modifica las variables de control si es necesario.

Figura 82. Esquema de funcionamiento de un sistema de control genérico.



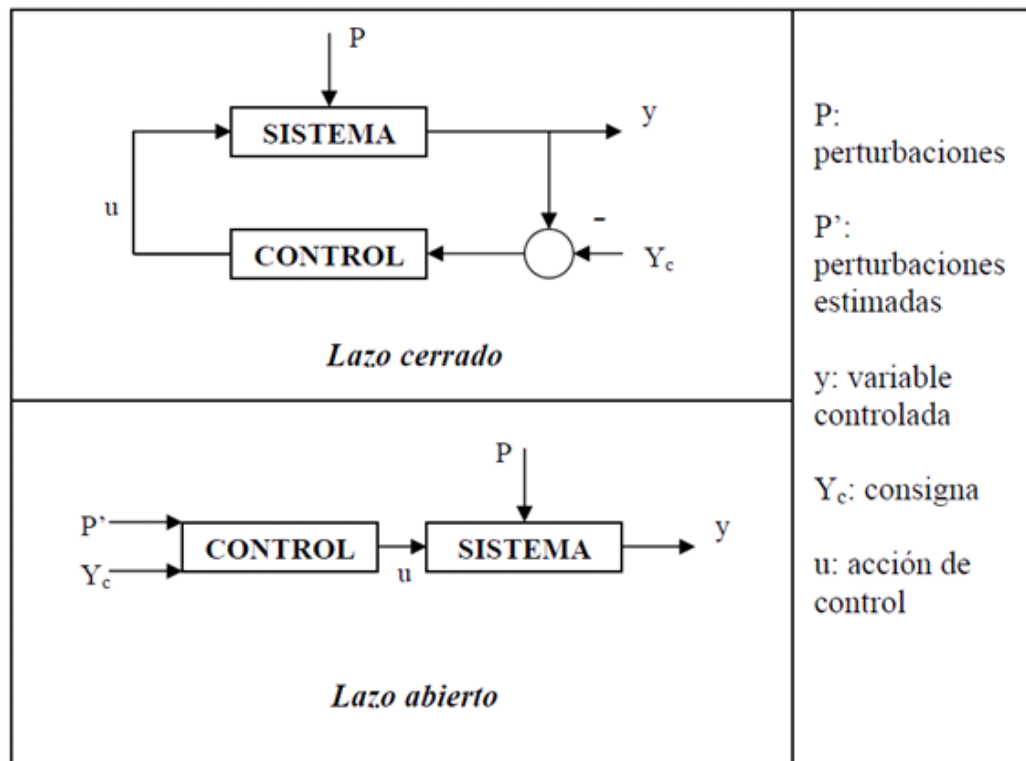
10.1 ESTRATEGIA DE CONTROL

La estrategia de control hace referencia a la naturaleza y la dirección de los lazos existentes entre las variables medidas y/o controladas y las variables de control. Se distinguen dos tipos de estrategias en función de la naturaleza de la información utilizada para calcular la acción de control del sistema, conocidas como lazo abierto y lazo cerrado.

10.1.1 Lazo abierto. La acción de control se calcula conociendo la dinámica del sistema, las consignas y estimando las perturbaciones. Esta estrategia de control puede compensar los retrasos inherentes del sistema anticipándose a las necesidades del usuario. Sin embargo, el lazo abierto generalmente es insuficiente, debido a los errores del modelo y a los errores en la estimación de las perturbaciones. Por ello, es común la asociación de lazo cerrado-lazo abierto, de modo que el lazo cerrado permite compensar los errores generados por el lazo abierto.

10.1.2 Lazo cerrado. La acción de control se calcula en función del error medido entre la variable controlada y la consigna deseada. Las perturbaciones, aunque sean desconocidas, son consideradas indirectamente mediante sus efectos sobre las variables de salida. Este tipo de estrategia de control puede aplicarse sea cual sea la variable controlada. La gran mayoría de los sistemas de control que se desarrollan en la actualidad son en lazo cerrado.

Figura 83. Control de lazo cerrado vs control de lazo abierto



11. MODELADO MATEMÁTICO

El primer paso para analizar un sistema de control es obtener un modelo matemático, una vez obtenido tal modelo, existen varios métodos para el análisis del desempeño del sistema. En el análisis y diseño de sistemas de control, se debe tener una base de comparación del desempeño de diversos sistemas de control, esta base se configura especificando las señales de entrada de prueba particulares y comparando las respuestas de varios sistemas a estas señales de entrada. Muchos criterios de diseño se basan en tales señales o en la respuesta del sistema a los cambios en las condiciones iniciales (sin señales de prueba). El uso de señales de prueba se justifica porque existe una correlación entre las características de respuesta de un sistema para una señal de entrada de prueba común y la capacidad del sistema de manejar las señales de entrada reales.

Al diseñar un sistema de control, debemos ser capaces de predecir su comportamiento dinámico a partir del conocimiento de los componentes. La característica más importante del comportamiento dinámico de un sistema de control es la estabilidad absoluta, es decir, si el sistema es estable o inestable. Un sistema de control está en equilibrio si, en ausencia de cualquier perturbación o entrada, la salida permanece en el mismo estado. Un sistema de control lineal e invariante con el tiempo es estable si la salida termina por regresar a su estado de equilibrio cuando el sistema está sujeto a una condición inicial. Un sistema de control lineal e invariante con el tiempo es críticamente estable si las oscilaciones de la salida continúan para siempre. Es inestable si la salida diverge sin límite a partir de su estado de equilibrio cuando el sistema está sujeto a una condición inicial.

En realidad, la salida de un sistema físico puede aumentar hasta un cierto grado, pero puede estar limitada por detenciones mecánicas o el sistema puede colapsarse o volverse no lineal después de que la salida excede cierta magnitud, por lo cual, ya no se aplican las ecuaciones diferenciales lineales.

Entre los comportamientos importantes del sistema que deben recibir una cuidadosa consideración (además de la estabilidad absoluta) están la estabilidad relativa y el error en estado estable. Dado que un sistema de control físico implica un almacenamiento de energía, la salida del sistema, cuando este está sujeto a una entrada, no sucede a la entrada de inmediato, sino que exhibe una respuesta transitoria antes de alcanzar un estado estable. La respuesta transitoria de un sistema de control práctico con frecuencia exhibe oscilaciones amortiguadas antes de alcanzar un estado estable. Si la salida de un sistema en estado estable no coincide exactamente con la entrada, se dice que el sistema tiene un error en estado estable. Este error indica la precisión del sistema. Al analizar un sistema de control, debemos examinar el comportamiento de la respuesta transitoria y el comportamiento en estado estable.

11.1 SISTEMAS DE PRIMER ORDEN

Se denomina orden de un sistema al grado de su polinomio característico, esto es, al número de polos que tiene el sistema en su conjunto. La función de transferencia de un sistema de primer orden es:

$$G(s) = \frac{N(s)}{(s+a)} \quad (11.1)$$

Donde **N(s)** es el polinomio del numerador de coeficientes constantes al ser de tipo LTI. Por el principio de causalidad, el grado de **N(s)** es uno o cero, bien es una constante o es un cero de primer orden. Considérese el caso más simple, el numerador corresponde a una ganancia. La relación entre la entrada y salida del sistema vendrá dada por una ecuación diferencia ordinaria de primer orden:

$$Ty(t) + y(t) = kx(t) \quad (11.2)$$

Donde **x(t)** representa la señal en la entrada y **y(t)** es la salida. Aplicando a ambos lados de la igualdad la transformada de Laplace y considerando condiciones iniciales nulas, se conseguirá la función de transferencia de los sistemas de primer orden.

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{k}{1+Ts} = \frac{K/T}{s+\frac{1}{T}} \quad (11.3)$$

El valor de **k** será la ganancia estática del sistema y **T** será la constante de tiempo. En general, se denominan **ai** y **bi** a los coeficientes de los polinomios del denominador y del numerador, respectivamente, de grado **i**, las dos FDT de primer orden de los sistemas causales serán:

$$a_1y + a_0y = b_0x \quad G(s) = \frac{b_0}{a_1s+a_0} \quad (11.4)$$

$$a_1y + a_0y = b_0x + b_1x \quad G(s) = \frac{b_0+b_1s}{a_1s+a_0} \quad (11.5)$$

Sin embargo, para determinar la respuesta dinámica del sistema de primer orden

se empleará el modelo de la ecuación (11. 3). En el caso de que tuviera un cero de primer orden, desde luego, su dinámica cambiará. Pero desde el punto de vista metodológico, se planteará como la adición de un cero al sistema simple definido en la ecuación (11.3). Estos aspectos serán tratados en el capítulo siguiente. Por tanto, se va a tratar de definir la respuesta dinámica de un sistema simple de primer orden y si poseyese un cero, su efecto se verá como una adición a la dinámica del sistema simple.

11.2 RESPUESTA TEMPORAL ANTE LA ENTRADA EN ESCALÓN

Para analizar la dinámica del sistema de primer orden se requiere conocer qué tipo de entrada excitará al equipo. Como a priori no se conoce la naturaleza de esta señal, tal cual se comentó en el anterior capítulo, se emplearán las señales de pruebas.

En el dominio temporal se definieron tres entradas normalizadas: escalón, rampa y parábola. Por dicha razón, la caracterización de los sistemas de primer y segundo orden en el dominio temporal se dará con estas excitaciones unitarias. Suponiendo un sistema de primer orden simple caracterizado por su ganancia \mathbf{k} y su constante de tiempo \mathbf{T} , al ser estimulado por una señal de entrada en escalón unitario, evolucionará a partir de la convolución entre la entrada y el sistema.

Aplicando las transformadas de Laplace y haciendo descomposición en fracciones simples, la respuesta transformada valdrá:

$$Y(s) = \frac{1}{s} * \frac{k}{1+sT} = k \left(\frac{1}{s} * \frac{1}{1+sT} \right) = \frac{k_1}{s} + \frac{k_2}{s+\frac{1}{T}} \quad (11.6)$$

Empleando el cálculo de los residuos será fácil de determinar la anti transformada y por ende la evolución temporal de la señal de salida, en función de sus dos parámetros característicos, \mathbf{k} y \mathbf{T} :

$$\left. \begin{aligned} k_1 = [sY(s)]_{s=0} = k \\ k_2 \left[\left(s + \frac{1}{T} \right) Y(s) \right]_{s=-\frac{1}{T}} = -k \end{aligned} \right\} y(t) = k(1 - e^{-t/T}) \quad (11.7)$$

Pero antes de representar la evolución temporal de un sistema de primer orden simple con una entrada en escalón, véase la correlación entre el dominio complejo y el temporal. Utilizando el teorema del valor final sobre la transformada de Laplace de la salida y haciendo el límite cuando el tiempo tiende a infinito en la ecuación (11. 7), los resultados son idénticos. La salida alcanzará, en el régimen permanente, el nivel de la ganancia estática del sistema, **k**:

$$\text{Valor final: } \lim_{s \rightarrow 0} sY(s) = k \qquad \lim_{t \rightarrow \infty} y(t) = k$$

Nótese que si el módulo de la ganancia, **|k|**, es mayor que uno el sistema amplifica, en caso contrario, atenúa, esto es, la amplitud de la salida es más pequeña que la entrada. Para resolver el valor inicial sólo basta con aplicar el teorema del valor inicial sobre la ecuación (6. 6) o hacer tender el tiempo a cero en la ecuación (11. 7):

$$\text{Valor inicial: } \lim_{s \rightarrow 0} sY(s) = 0 \qquad \lim_{t \rightarrow 0} y(t) = 0$$

La constante de tiempo del sistema, **T**, define la rapidez del equipo. De hecho, cuando el intervalo de tiempo recorrido desde el inicio de la estimulación hasta la constante de tiempo, la señal de salida ya ha alcanzado una buena parte de su recorrido:

$$\text{Valor } t = T : \quad y(t = T) = k(1 - e^{-1}) = 0.632k \quad (11.8)$$

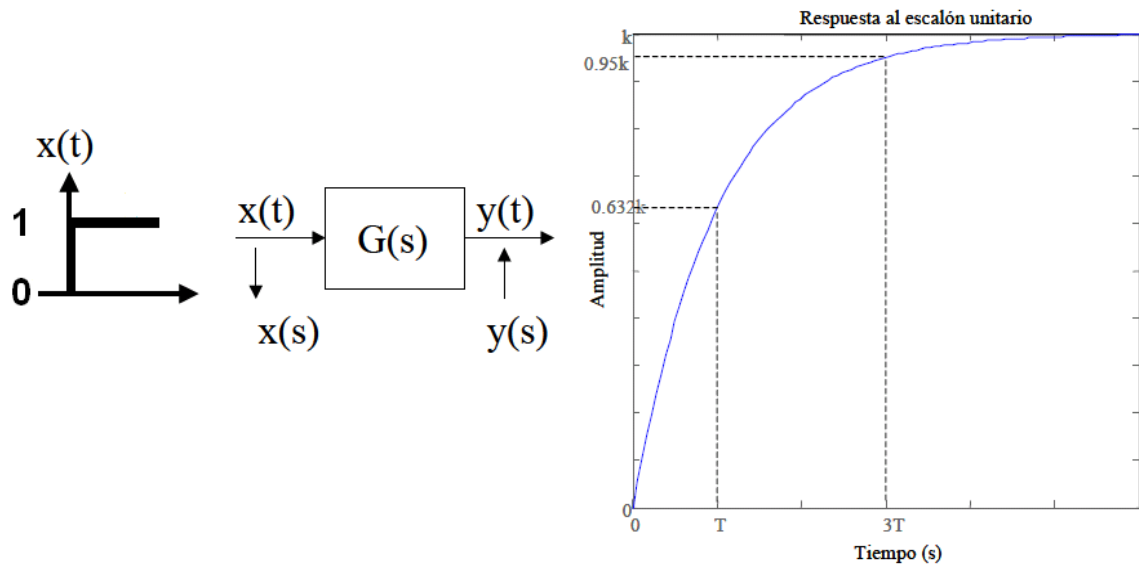
Se define el tiempo de establecimiento, **ts**, como el que necesita el sistema para alcanzar el régimen permanente. El valor de la señal del permanente no es exactamente el valor final. Atendiendo a la ecuación (11. 7) y si se pusiera la condición de lograr el valor de nivel de **k** ante una entrada en escalón unitario, el tiempo sería infinito y no habría medida de comparación entre estos sistemas sobre su velocidad de respuesta. Por dicha razón, se suele emplear el error del 5 % o el 2 % del valor final. En este curso, se empleará el 5 % de error del valor del régimen permanente. Para un valor de tres veces la constante de tiempo del sistema de primer orden, **T**, coincide con llegar al 5 % de error del valor final:

$$\text{Valor } t = 3T : \quad y(t = 3T) = k(1 - e^{-3}) = 0.95k$$

Por tanto, para sistemas de primer orden simples, el tiempo de establecimiento es de 3 veces la constante de tiempo. Si la definición está dada con el 2 %, entonces el tiempo de establecimiento es de cuatro veces la constante de tiempo.

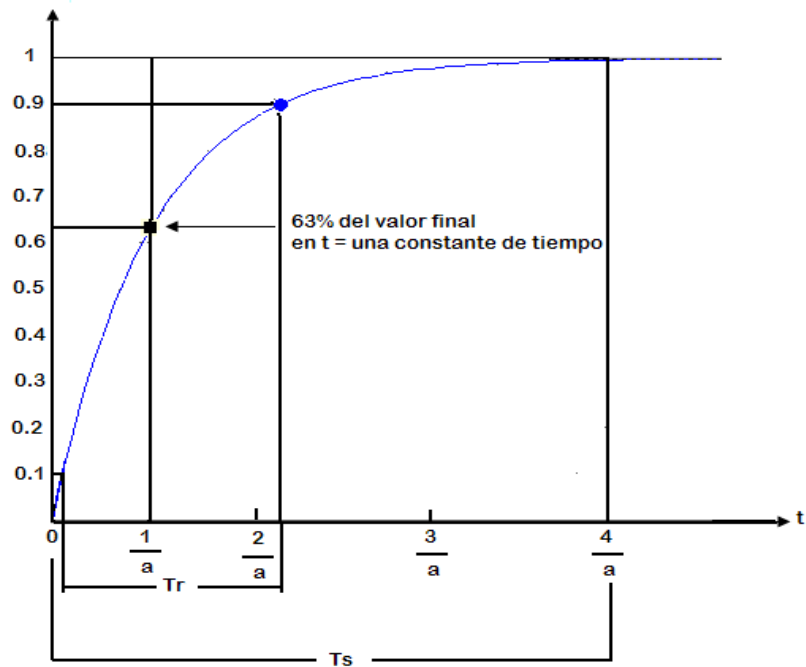
Concluyendo, si el sistema es de primer orden simple, los valores característicos pueden ser determinados experimentalmente ante la respuesta de una entrada en escalón unitario. La ganancia estática, k , será el valor final de la señal de salida y la constante de tiempo, T , está dada por el tiempo en que alcanza 0,632 veces el valor de k o 3 veces su valor coincidirá con el tiempo de establecimiento, ts , esto es, el tiempo que tarda la señal en alcanzar el 0,95k.

Figura 84 Respuesta de un sistema de primer orden simple ante una entrada en escalón unitario



En los sistemas de primer orden podemos encontrar una serie de parámetros que nos permiten identificar cómo 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 siguiente figura.

Figura 85 Tiempos de crecimiento y establecimiento



El tiempo de levantamiento se define como el tiempo necesario para que la forma de onda de la señal pase de 0,1 a 0,9 de su valor final.

$$T_r = \frac{2.2}{a} \quad (11.9)$$

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.

$$T_s = \frac{4}{a} = 4\tau \quad (11.10)$$

11.3 SISTEMAS DE SEGUNDO ORDEN

La función de transferencia canónica para un sistema LTI de segundo orden tiene la siguiente forma:

$$F(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}$$

Donde K es la ganancia, ω_n es la "frecuencia natural no amortiguada" y ξ es el "coeficiente de amortiguamiento" del sistema. En este caso, la primera condición para la identificación del sistema de segundo orden es que el sistema sea absolutamente estable. No conformes con esto, la segunda condición para poder identificar el sistema es que los polos del sistema sean complejos conjugados; es decir, que su parte imaginaria sea diferente de cero. Sin estas condiciones el sistema no se puede identificar por este método.

En el caso especial de los sistemas de segundo orden, la respuesta en el tiempo varía con respecto a la posición de los polos en el semiplano izquierdo del plano complejo. Por lo tanto, analizando las raíces del polinomio característico a partir de la forma canónica:

$$s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2 = 0$$

Se tiene

$$s = \frac{-2\xi\omega_n \pm \sqrt{(2\xi\omega_n)^2 - 4\omega_n^2}}{2} = \quad (11.11)$$

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

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

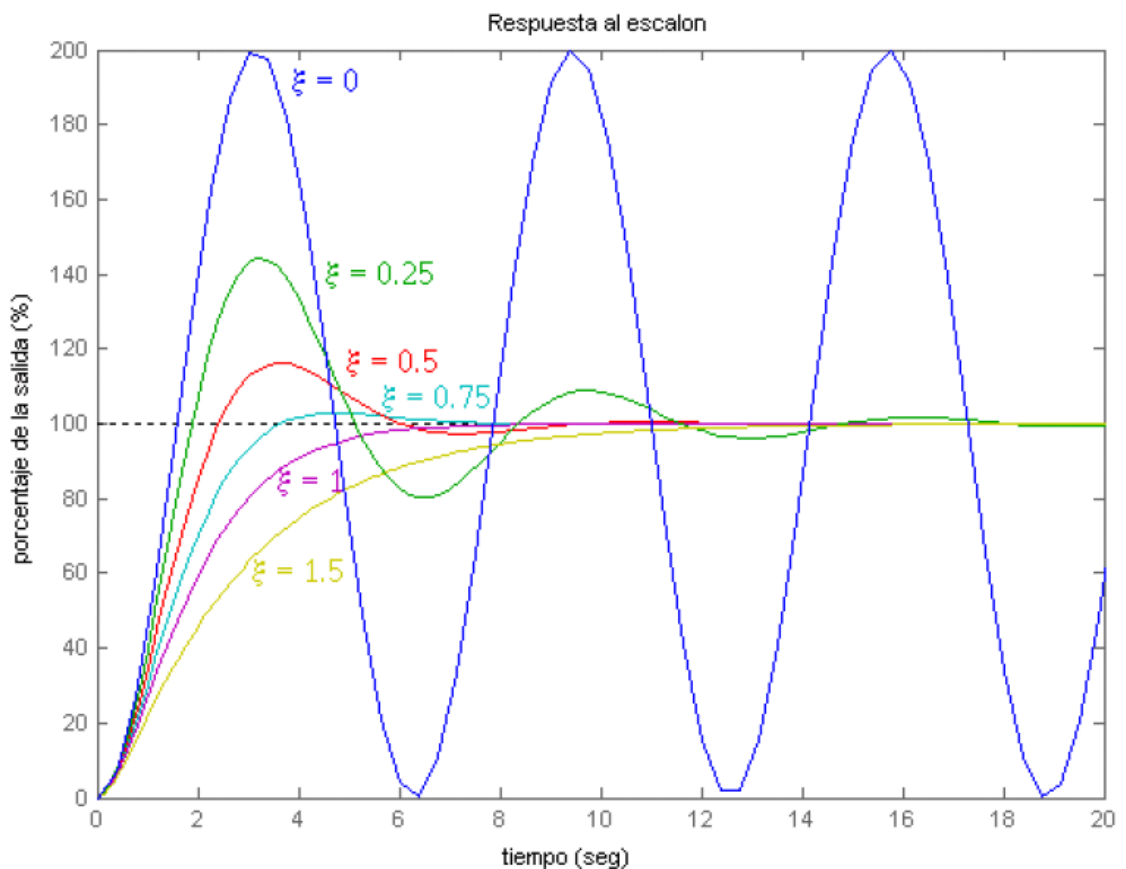
$$s_{1,2} = -\zeta\omega_n \pm j\omega_n\sqrt{1-\zeta^2}$$

$$s_{1,2} = -\sigma \pm j\omega_d$$

Donde

ξ : Factor de amortiguamiento relativo
 σ : Factor de amortiguamiento
 W_n : Frecuencia natural del sistema
 W_d : Frecuencia amortiguada del sistema

Figura 86. Respuesta en el tiempo de un sistema de segundo orden a una entrada escalón



A partir de la ecuación (11.11) existen cuatro casos generales:

1. Para $\xi = 0$ se tiene que $s = \pm W_n^2 \sqrt{-1} = \pm j W_n^2$ es decir, que solo se tiene parte imaginaria y por lo tanto, los polos del sistema se encuentran sobre el eje imaginario. Esto produce como consecuencia que la respuesta en el tiempo presente oscilaciones constantes como se muestra en la figura 86.

2. Para $0 < \xi < 1$ se observa que los polos son complejos conjugados ($s = \sigma + j\omega_n$) con parte real $-\xi \omega_n$ y parte imaginaria $j \omega_d = \sqrt{\xi^2 - 1}$ igual a $j\sqrt{1 - \xi^2}$ debido a que $\xi < 1$. La respuesta en el tiempo se puede visualizar también en la figura 86 para $\xi = (0,25, 0,5, 0,75)$ donde la gráfica presenta oscilaciones pero de menos magnitud y desaparecen exponencialmente.
1. Para $\xi = 1$ se tiene que los polos son reales y repetidos, es decir $s_{1,2} = \xi \omega_n$, debido a que la parte imaginaria es igual a cero, proporciona el valor crítico a partir del cual desaparecen las oscilaciones en el sistema. Su respuesta se puede observar en la figura 86 y cabe mencionar que su comportamiento es muy similar a la respuesta de un sistema de primer orden.
2. Para $\xi > 1$ se tienen polos reales y diferentes. En este caso la respuesta viene determinada por el polo más lento del sistema; es decir, el que se encuentra más cercano al origen y su respuesta es equivalente a la salida de dos sistemas de primer orden en cascada (ver figura 86 para $\xi = 1,5 > 1$).

Por otro lado, la respuesta en el tiempo se obtiene analizando la solución del sistema (11.12) a una entrada escalón Γ , dando como resultado la ecuación (11.13) Para $t \geq 0$.

$$Y(s) = \frac{K\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \left(\frac{\Gamma}{s} \right) \quad (11.12)$$

$$y(t) = K\Gamma \left[1 - \frac{e^{-\xi\omega_n t}}{\sqrt{1 - \xi^2}} \sin \left(\omega_n \left(\sqrt{1 - \xi^2} \right) t + \arctan \frac{\sqrt{1 - \xi^2}}{\xi} \right) \right] \quad (11.13)$$

De lo anterior se concluye, que debido a la relación entre el mapa de polos y la respuesta transitoria, el único tipo de respuesta útil para identificar un sistema de segundo orden es cuando el coeficiente de amortiguamiento es mayor que cero y menor que uno. Además, para cada caso del coeficiente de amortiguamiento, las respuestas del sistema tienen diferentes nombres:

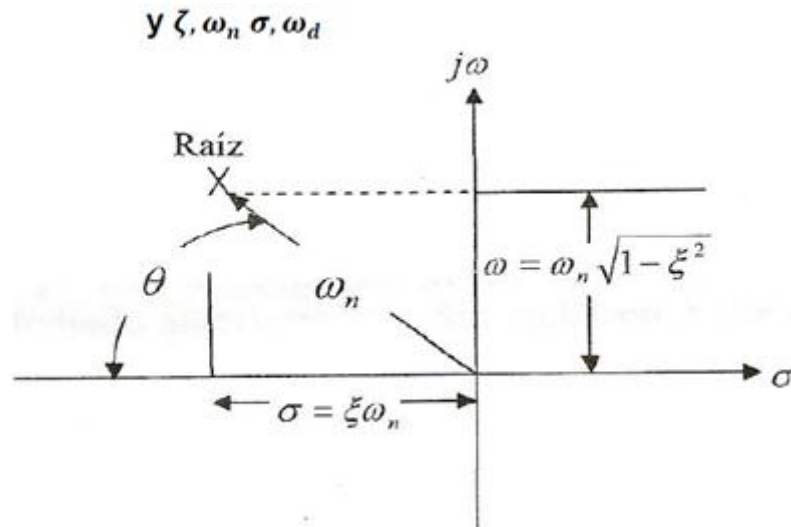
Respuesta no amortiguada (para $\xi = 0$)

Respuesta sub amortiguado amortiguada (para $0 < \xi < 1$)

Respuesta amortiguada o críticamente amortiguada (para $\xi = 1$)

Respuesta sobre amortiguada (para $\xi > 1$)

Figura 87. Relación entre las raíces y los polos de la ecuación característica de los sistemas de segundo orden



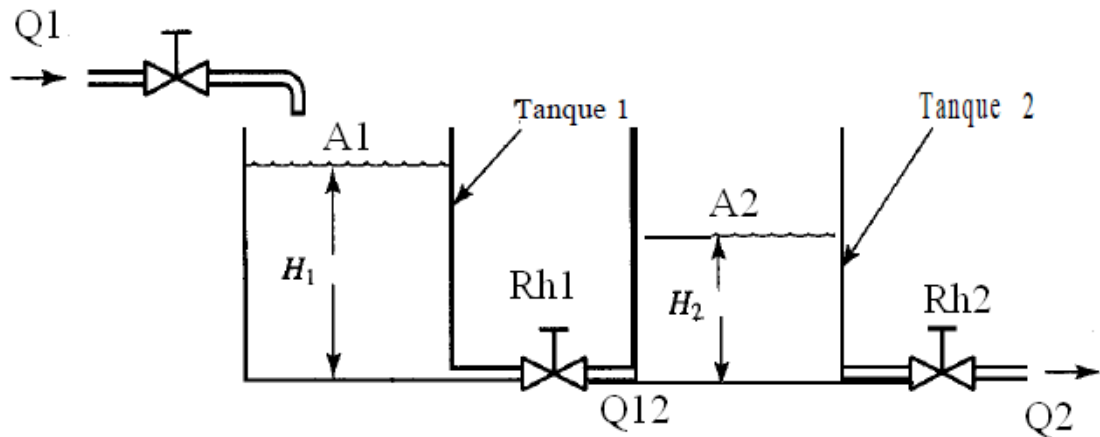
El semiplano izquierdo del plano complejo, donde el factor de amortiguamiento relativo es positivo, un coeficiente de amortiguamiento positivo hace que el amortiguamiento de la respuesta debido al exponente $-\zeta \omega_n$ sea igual a una constante final, haciendo que el sistema sea estable.

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 y el sistema es $\zeta = 0$ y $\sigma = 0$ y el sistema es oscilatorio o marginalmente inestable.

12. MODELADO Y SIMULACIÓN DE DOS TANQUES UNIDOS POR SUS BASES

Figura 88. Modelo de dos tanques relacionados



Consideraciones generales:

- El flujo entre los dos tanques es proporcional a la altura
- El flujo es laminar (no turbulento)
- Las áreas de los tanques A_1 y A_2 son constantes
- Las válvulas son lineales

12.1 MODELADO DEL SISTEMA

De acuerdo a la figura anterior se pueden observar las siguientes relaciones:

$$Q_1 - Q_{12} = A_1 \frac{dh_1}{dt} \quad (1)$$

$$Q_{12} - Q_2 = A_2 \frac{dh_2}{dt} \quad (2)$$

Por conveniencia podemos asumir que las variaciones del flujo en la tubería dependen de la altura del fluido, por lo tanto escribir que:

$$Q_{12} = \frac{h_1 - h_2}{R_1} \quad (3)$$

$$Q_2 = \frac{h_2}{R_2} \quad (4)$$

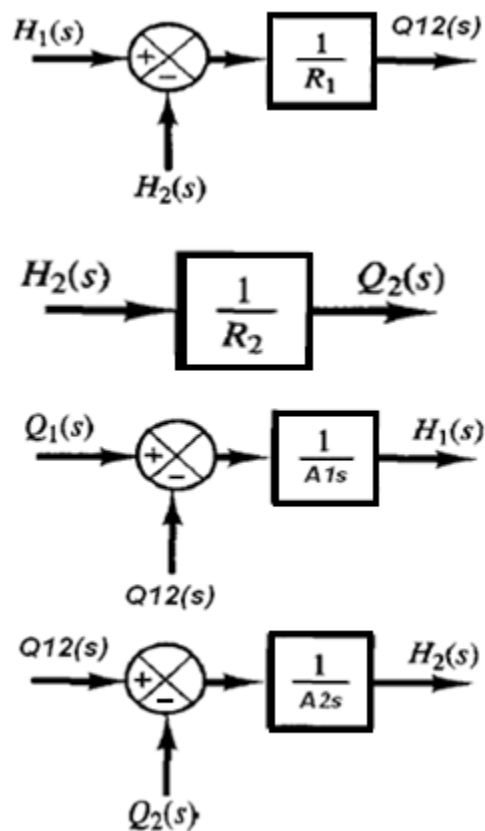
Sabiendo que $S = \frac{d}{dt}$, aplicamos la transformada de Laplace en las ecuaciones (1) y (2).

$$Q_1 - Q_{12} = Q_1 - \left(\frac{h_1 - h_2}{R_1}\right) = A_1 S h_1 \quad (5)$$

$$Q_{12} - Q_2 = \left(\frac{h_1 - h_2}{R_1}\right) - \frac{h_2}{R_2} = A_2 S h_2 \quad (6)$$

De las ecuaciones (3), (4), (5) y (6) obtenemos los siguientes diagramas de bloques respectivamente:

Figura 89. Diagrama de bloques H_1 , H_2 , Q_1 , Q_{12}



Si conectamos las señales de manera adecuada, podemos construir el siguiente diagrama de bloques:

Figura 90. Diagrama de bloques relacionados del sistema con los dos tanques

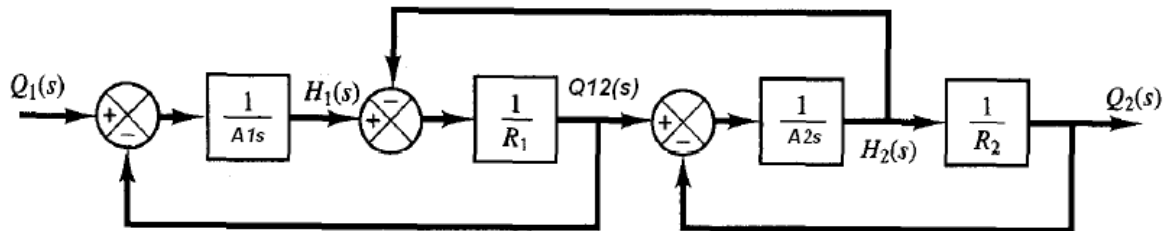
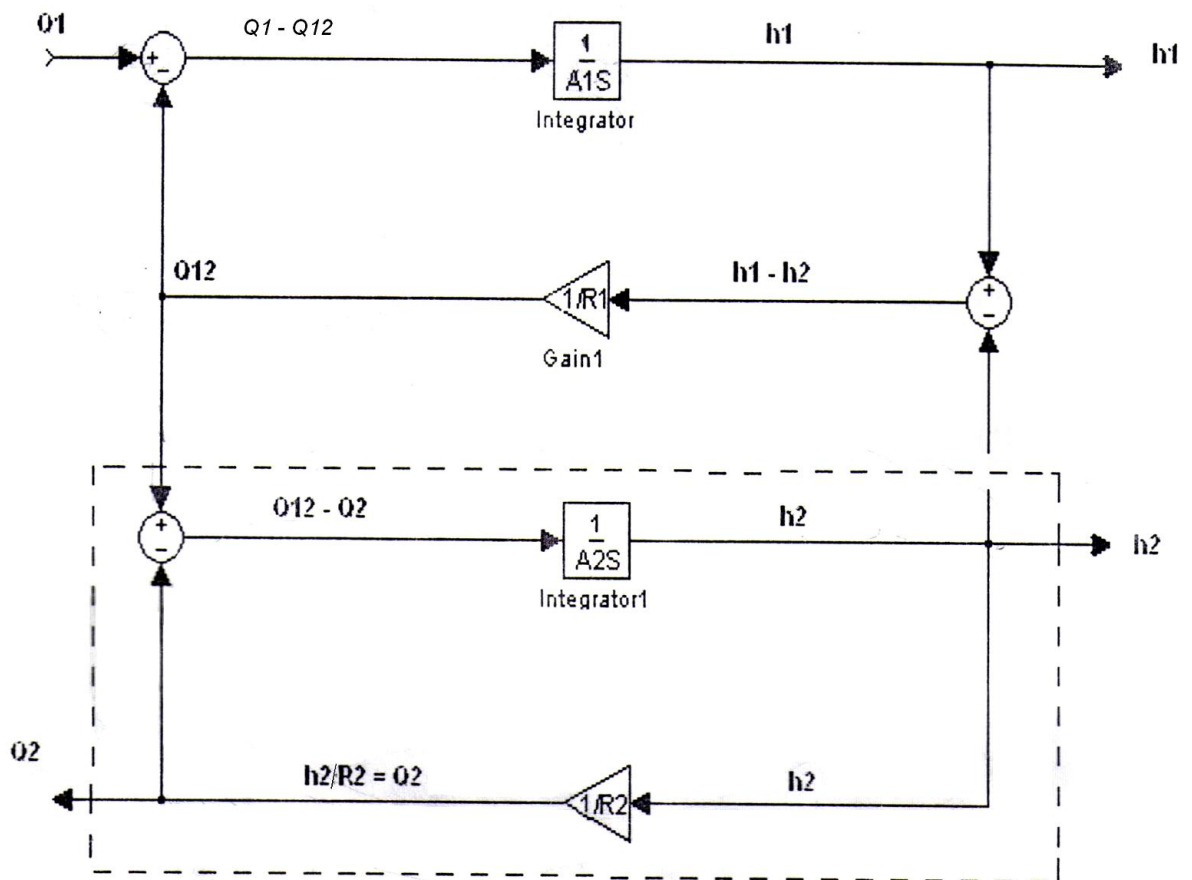
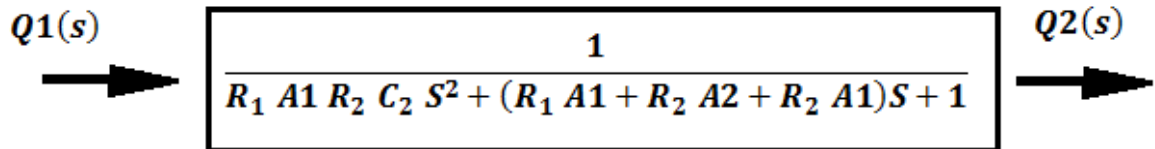


Figura 91. Representación en MATLAB Simulink



Es posible simplificar lo anterior hasta obtener el siguiente diagrama de bloques, que es la función de transferencia del sistema:

Figura 92. Función de transferencia del sistema de dos tanques relacionados



De la figura 91 podemos obtener la relación entre h_2 y Q_{12} :

$$G(s) = \frac{h_2}{Q_{12}} = \left(\frac{\frac{1}{A_2 S}}{1 + \frac{1}{A_2 R_2 S}} \right) = \left(\frac{\frac{1}{A_2 S}}{\frac{1 + A_2 R_2 S}{A_2 R_2 S}} \right) = \frac{R_2}{1 + A_2 R_2 S} = \frac{R_2}{1 + T_2 S} \quad (7)$$

Dónde:

$$T_2 = A_2 R_2$$

De la misma forma podemos obtener la relación entre Q_2 y Q_{12} :

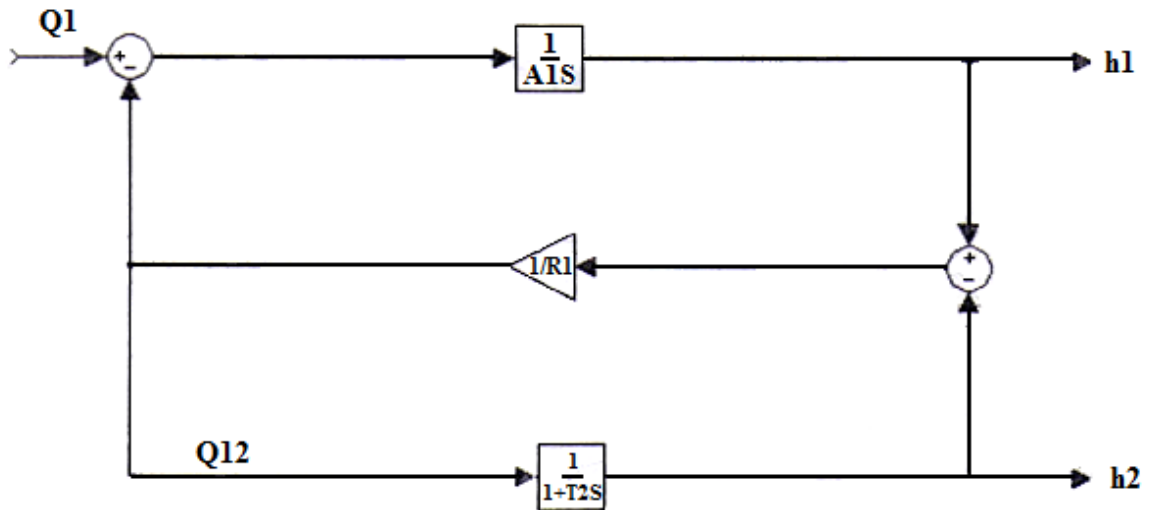
$$G(s) = \frac{Q_2}{Q_{12}} = \left(\frac{\frac{1}{A_2 R_2 S}}{1 + \frac{1}{A_2 R_2 S}} \right) = \left(\frac{\frac{1}{A_2 R_2 S}}{\frac{1 + A_2 R_2 S}{A_2 R_2 S}} \right) = \frac{1}{1 + A_2 R_2 S} = \frac{1}{1 + T_2 S} \quad (8)$$

Dónde:

$$T_2 = A_2 R_2$$

La relación entre H_2 y Q_{12} nos permite encontrar un segundo modelo (Figura 91), este nuevo modelo facilita la obtención de la relación entre H_1 y H_2 .

Figura 93. Modelado en MATLAB de la relación entre H2 y Q12



$$G(s) = \frac{h2}{h1} = \left(\frac{\frac{1}{R1} \left(\frac{1}{1+T2S} \right)}{1 + \frac{1}{R1} \left(\frac{1}{1+T2S} \right)} \right) = \left(\frac{\frac{1}{R1(1+T2S)}}{\frac{R1(1+T2S)+1}{R1(1+T2S)}} \right) = \frac{1}{R1(1+T2S)+1}$$

$$= \frac{1}{R1T2S + (R1 + 1)} = \left(\frac{1}{R1 + 1} \right) \left(\frac{1}{\left(\frac{R1}{R1 + 1} \right) T2S + 1} \right) = \left(\frac{1}{R1 + 1} \right) \left(\frac{1}{1 + T3S} \right) \quad (9)$$

Dónde:

$$T3 = \left(\frac{R1}{R1 + 1} \right) T2$$

Utilizando el Simulink de MATLAB, con los siguientes parámetros, podemos observar la relación entre los niveles H1 y H2. Con $A = 4,77 \text{ dm}^2$, $R1 = R2 = 0,1 \text{ seg/dm}^2$ y $Q1 = 1 \text{ lts/seg}$.

Figura 94. Modelado del sistema en MATLAB utilizando Simulink con parámetros definidos

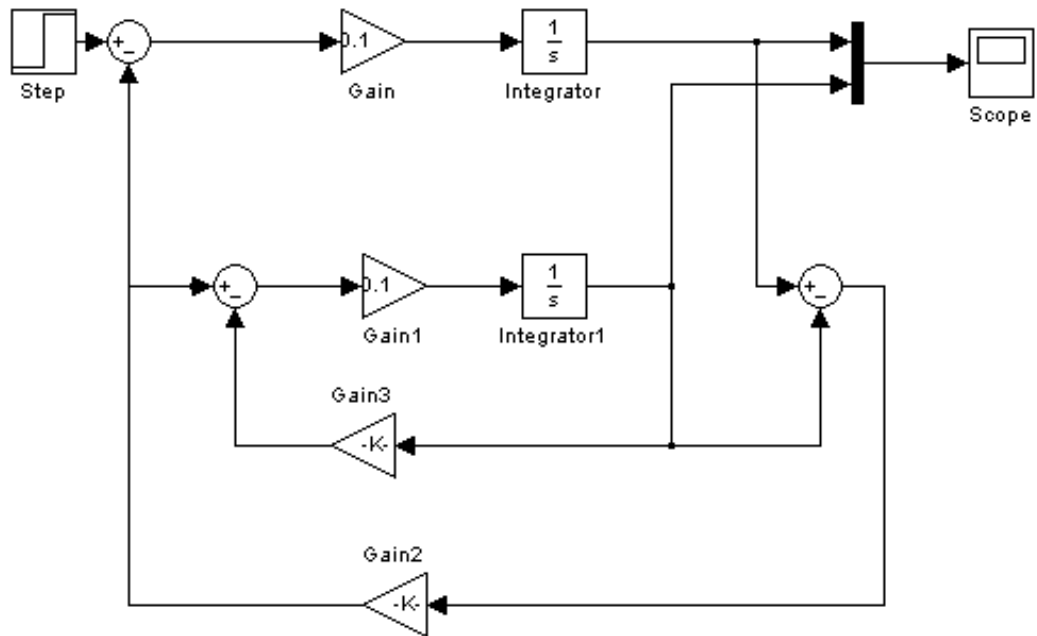
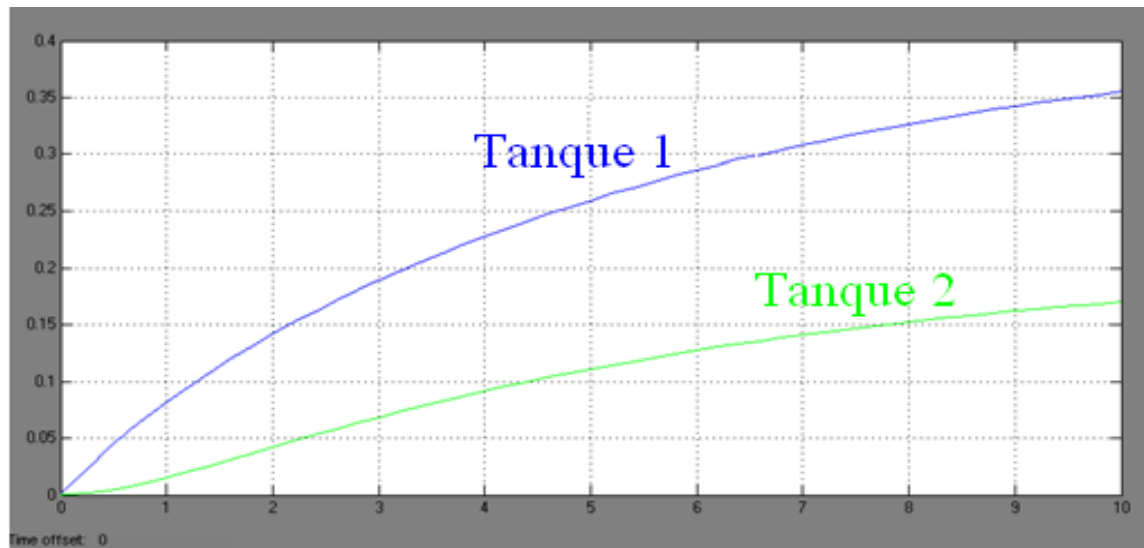


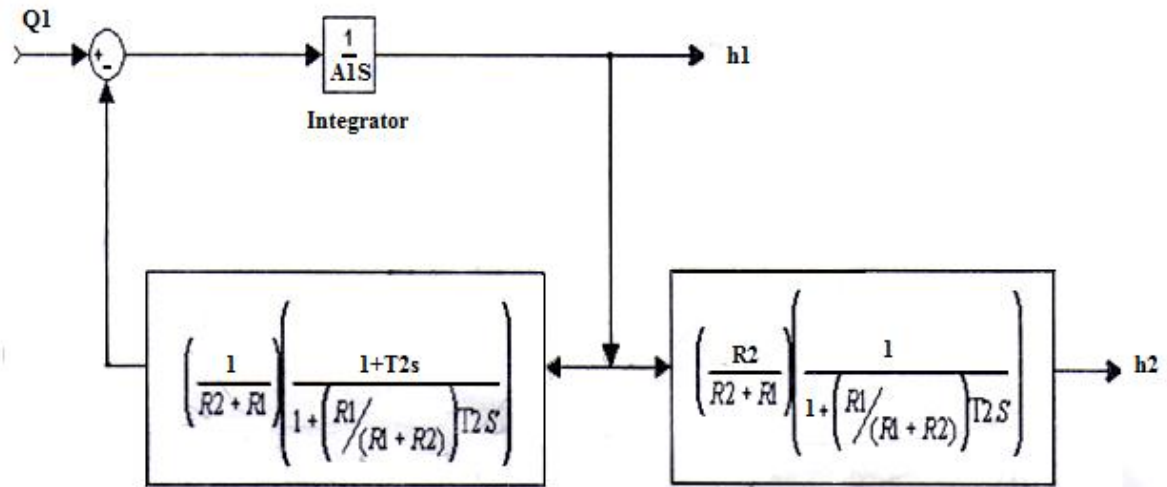
Figura 95. Modelado en MATLAB del comportamiento de los tanques



A partir de la Figura 90 se puede encontrar un tercer módulo (figura 93), en este se facilita la obtención de las funciones de transferencia:

$$G1 = \frac{h1}{Q1} \text{ y } G2 = \frac{h2}{Q1}$$

Figura 96. Modelado con MATLAB de las relaciones entre las variables h1, h2, Q1 y Q2



$$\frac{h1}{Q1} = \frac{\frac{1}{A1s}}{1 + \left(\frac{1}{A1s}\right) \left(\frac{1}{R1 + R2}\right) \left(\frac{1 + T2s}{1 + \left(\frac{R1}{R1 + R2}\right) T2s}\right)}$$

$$\frac{h1}{Q1} = \frac{(2R1 + R2)T2s}{A1T2(2R1 + R2)s^2 + T2s + 1} \quad (10)$$

$$\frac{h2}{Q1} = \frac{\frac{1}{A1s}}{1 + \left(\frac{1}{A1s}\right) \left(\frac{1}{R1 + R2}\right) \left(\frac{1}{1 + \left(\frac{R1}{R1 + R2}\right) T2s}\right)}$$

$$\frac{h_2}{Q_1} = \frac{(R_1 + R_2) \left(1 + \left(\frac{T_1 T_2}{T_1 + T_{12}} \right) s \right)}{T_1 T_2 s^2 + (T_1 + T_2 + T_{12}) s + 1} \quad (11)$$

Si se aplica el límite cuando s tiende a infinito a las ecuaciones (10) y (11), se obtiene el valor en estado estacionario de las alturas de los tanques h_1 y h_2 .

$$\lim_{s \rightarrow \infty} \left(\frac{(2R_1 + R_2) T_2 s}{A_1 T_2 (2R_1 + R_2) s^2 + T_2 s + 1} \right) = \frac{(2R_1 + R_2)}{2A_1 (2R_1 + R_2) s + 1} = 0.3$$

$$\lim_{s \rightarrow \infty} \left(\frac{(R_1 + R_2) \left(1 + \left(\frac{T_1 T_2}{T_1 + T_{12}} \right) s \right)}{T_1 T_2 s^2 + (T_1 + T_2 + T_{12}) s + 1} \right) = 0.2$$

13. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE LÍQUIDOS DE SEGUNDO ORDEN

Para desarrollar el proyecto de control y medida del nivel de líquidos del sistema, se realizó el montaje como se muestra a continuación:

Figura 97. Esquema de relación de los elementos que conforman el control del sistema de almacenamiento de líquidos

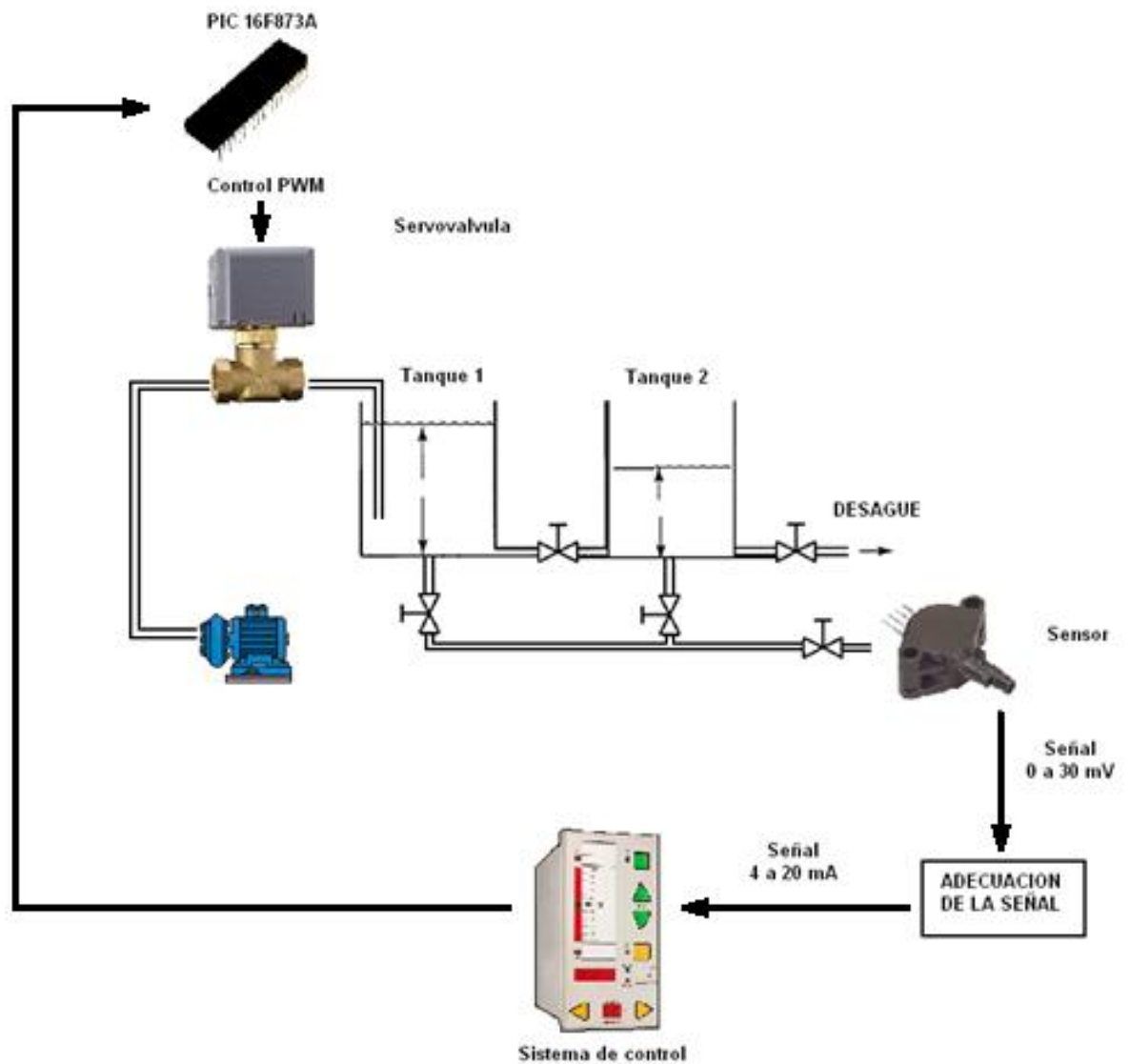


Figura 98. Foto del montaje del sistema real



Figura 99. Foto del montaje del sistema real



13.1 DISPOSICIÓN DEL PANEL DE CONTROL DEL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE LÍQUIDOS DE SEGUNDO ORDEN

El sistema de almacenamiento de líquidos de segundo orden trabaja sobre la base de un micro controlador moderno y un medidor de presión diferencial. En su panel frontal se cuenta con dos modos de operación a elección del usuario y sus entradas o salidas indicativas o requeridas

El panel frontal de control del sistema está conformado por las siguientes partes que se enuncian y explican a continuación. En la Figura 101. Se muestra el panel frontal de control construido para el sistema.

1. Botón de inicio o arranque del sistema,
2. *Setpoint* variable en tiempo real mediante manipulación del SiPART DR-20 “modo automatico”
3. Indicadores analógicos de la corriente de entrada y salida del controlador SiPART DR-20
4. Selector de modo de operación: manual o automático
En modo manual de utilizan las borneras especificadas para dicho uso
5. Señal de Entrada para operación de la servovalvula “modo manual”.
6. Señal de entrada de encendido o apagado de la motobomba “modo manual”
7. Señal de salida corriente 4-20 mA del medidor diferencial de presión para posterior análisis
8. Señal de salida indicadora del límite de rebose de los tanques “modo manual”
9. Señal de salida de indicación del valor de *setpoint* elegido “modo manual”
10. Perilla para elección o modificación de un valor de *setpoint* “modo manual”
11. Indicador digital de 8 segmentos para magnitud de nivel o en modo manual indicador del valor de *setpoint*.
12. Selector de modo de visualización en el indicador digital
13. Alarma de indicación de disparo de la seguridad de reboce

14. Señal luminosa de indicación de alimentación del sistema

Adicional:

- Sistema de seguridad en uno de los tanques encargado de evitar el rebose de estos.
- Indicadores luminosos en las bases de los tanques para indicación de llenado obtención del valor del *setpoint* o disparo de la seguridad de rebose.
- Interruptor manual de desconexión a la red eléctrica

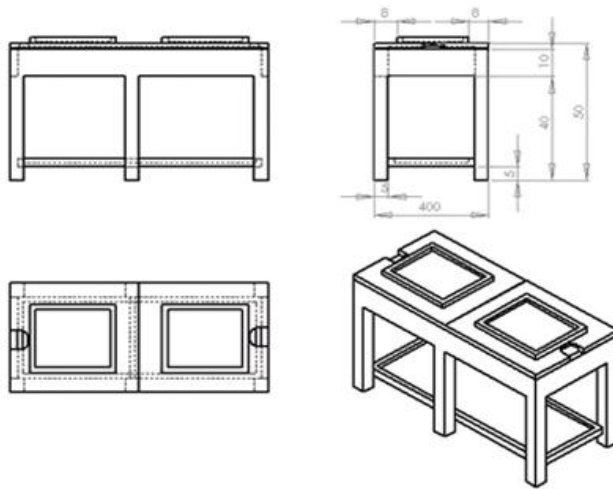
Figura 100. Panel de control del sistema



13.2 DESARROLLO DEL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE LIQUIDOS DE SEGUNDO ORDEN

13.2.1 Diseño de la estructura de soporte del sistema hidraulico

Figura 101. Modelo con dimensiones para la estructura de los tanques de almacenamiento

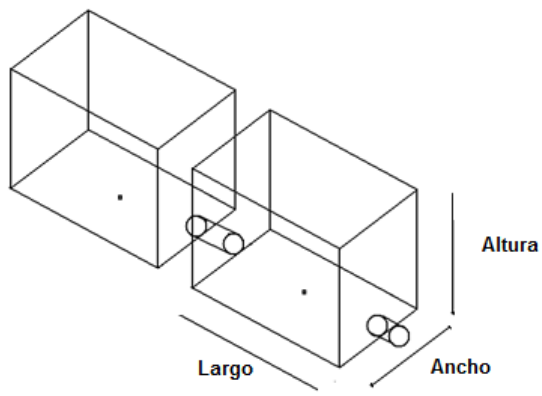


Características técnicas: Base en madera MDF

Dimensiones: Ancho 40 cm. Largo 89,8 cm. Alto 50 cm.

13.2.2 Construcción de los tanques de almacenamiento

Figura 102. Modelo con dimensiones para los tanques de almacenamiento

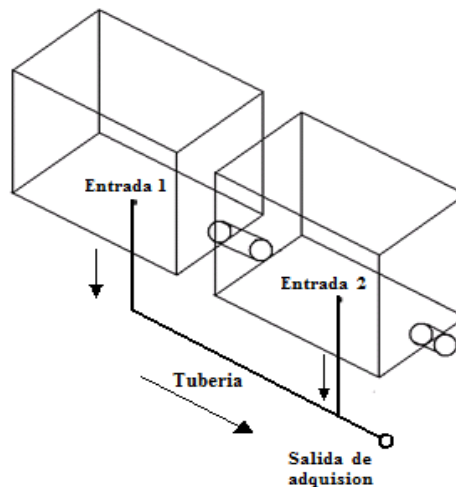


Características técnicas: Laminas en vidrio de 3 mm

Dimensiones: Ancho 19,5 cm. Largo 29,5 cm. Alto 25 cm

13.2.3 Salida de presión para la medición del nivel

Figura 103. Esquema de construcción y conexión de la salida de presión



Características técnicas: Tubería galvanizada de $\frac{1}{4}$ de pulgada y 3 llaves de paso de $\frac{1}{4}$ de pulgada.

En estos casos, la presión medida es igual a la presión de la columna de líquido más la presión atmosférica (presión en la superficie). La presión en la superficie suele ser despreciable porque la mayoría de los sensores de presión disponen de dispositivos que compensan la presión atmosférica. Para estos casos, los transmisores se montan en la parte más baja del tanque.

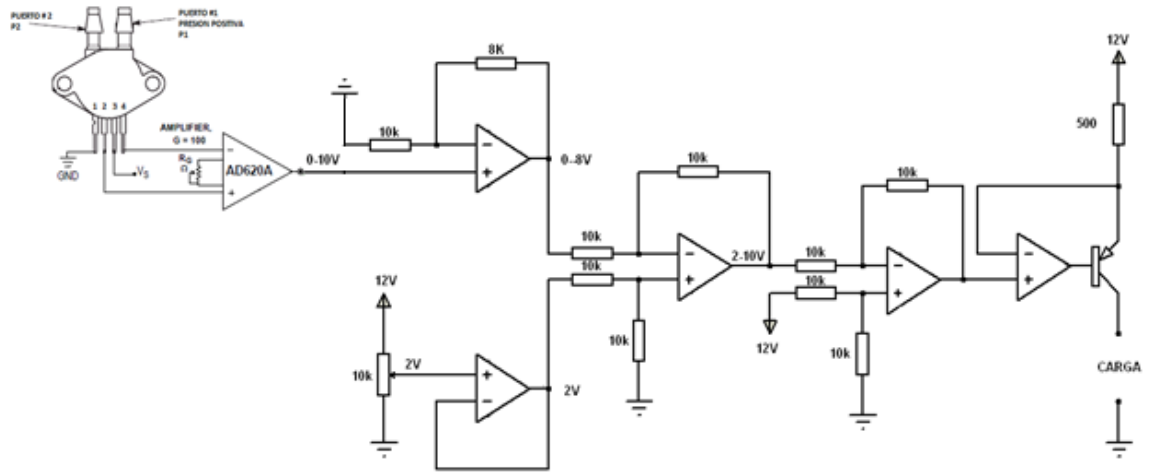
El sensor elegido para este diseño, al ser de presión diferencial, toma la presión de la superficie y efectúa una resta a la presión total, quedando la presión correspondiente a la columna de líquido.

13.2.4 Diagrama del circuito para obtención de medidas y adecuación de la señal de medida

El amplificador de instrumentación AD620 usado en el circuito es el encargado de que la tensión entregada por el sensor funcione de manera adecuada en amplios rangos de ganancia y tensiones óptimas de operación para los amplificadores operacionales. La ganancia se controla utilizando una sola resistencia externa.

La segunda parte del circuito, es la encargada de convertir la tensión entregada por el AD620 en una corriente entre 4 y 20 mA para una carga máxima de 250 Ω . Se hace dicha conversión de tensión a corriente para evitar pérdidas de señal por caída de tensión en su recorrido por el cable conductor de señal hasta el elemento de control.

Figura 104. Circuito implementado para la obtención de medidas



13.3 ELECCIÓN DE LA SERVO VÁLVULA PARA APLICACIÓN

Como uno de los objetivos de este proyecto de grado, se procedió a la elección de los elementos para el diseño, creación y puesta en marcha de una servo válvula funcional para el sistema.

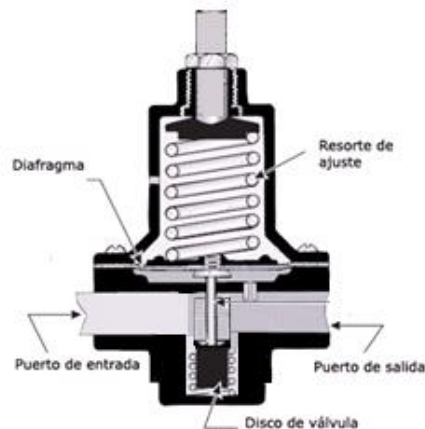
13.3.1 Selección de la válvula de 1 pulgada y 2 vías Las características técnicas de construcción son: cuerpo de hierro, presión de trabajo 16 bares, presión diferencial máxima de 2,0 bares, temperatura de trabajo entre 2 °C y 95 °C.

Figura 105. Imagen frontal de la válvula



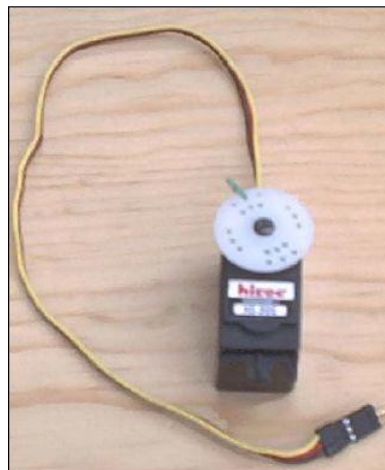
Para la construcción de la servoválvula, se selecciona una válvula de paso por resorte de uso general, a menudo conocida como reguladora de presión. La válvula utiliza la fuerza de un resorte para mantener una presión sobre un eje que a su vez actúa sobre una camisa cilíndrica con un anillo de sellado para asegurar la hermeticidad del sistema. Adicionalmente posee un muelle que abre el paso del líquido cuando la varilla situada en la parte superior de la válvula es accionada.

Figura 106. Principio básico de funcionamiento de la válvula seleccionada



13.3.2 Selección del servomotor. Basados en el torque suministrado y precio adecuado para el desarrollo del proyecto, se selecciona un servomotor estándar *Hitec* con piñones de carbonita, cuya vida útil es más de 3 veces la de los piñones de nylon.

Figura 107. Imagen frontal del servomotor seleccionado



- **Características técnicas servomotor *Hitec 322hd***

Piñones: Carbonita

Tensión: 4,8 V

Velocidad: 0,19 sec/60°, sin carga

Torque: 42 oz/in (3 kg.cm)

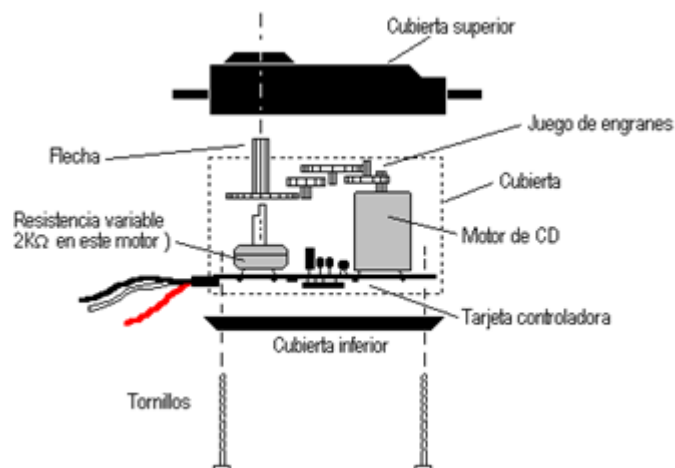
Tensión: 6 V

Velocidad: 0,15 sec/60°, sin carga

Torque: 51 oz/in (3,7 kg.cm)

- **Funcionamiento del servomotor típico *Hitec 322hd*.** Los servomotores de este tipo son de uso fundamental en robótica doméstica o aeromodelismo, es básicamente un motor eléctrico que sólo se puede girar en un ángulo de aproximadamente 180 grados (no dan vueltas completas como los motores normales). De los tres cables que salen de su cubierta, el cable rojo es para la tensión de alimentación (+5V), el cable negro es de tierra (0V ó GND) y el cable amarillo es por medio del cual se controla el servomotor indicando en qué posición debe ubicarse el eje de salida (entre 0 y 180 grados). Dentro del servomotor, un circuito electrónico recibe la señal de control, la interpreta y maneja el pequeño motor de corriente directa para acomodar la el eje de salida en la posición deseada.

Figura 108. Ubicación de piezas dentro del servomotor

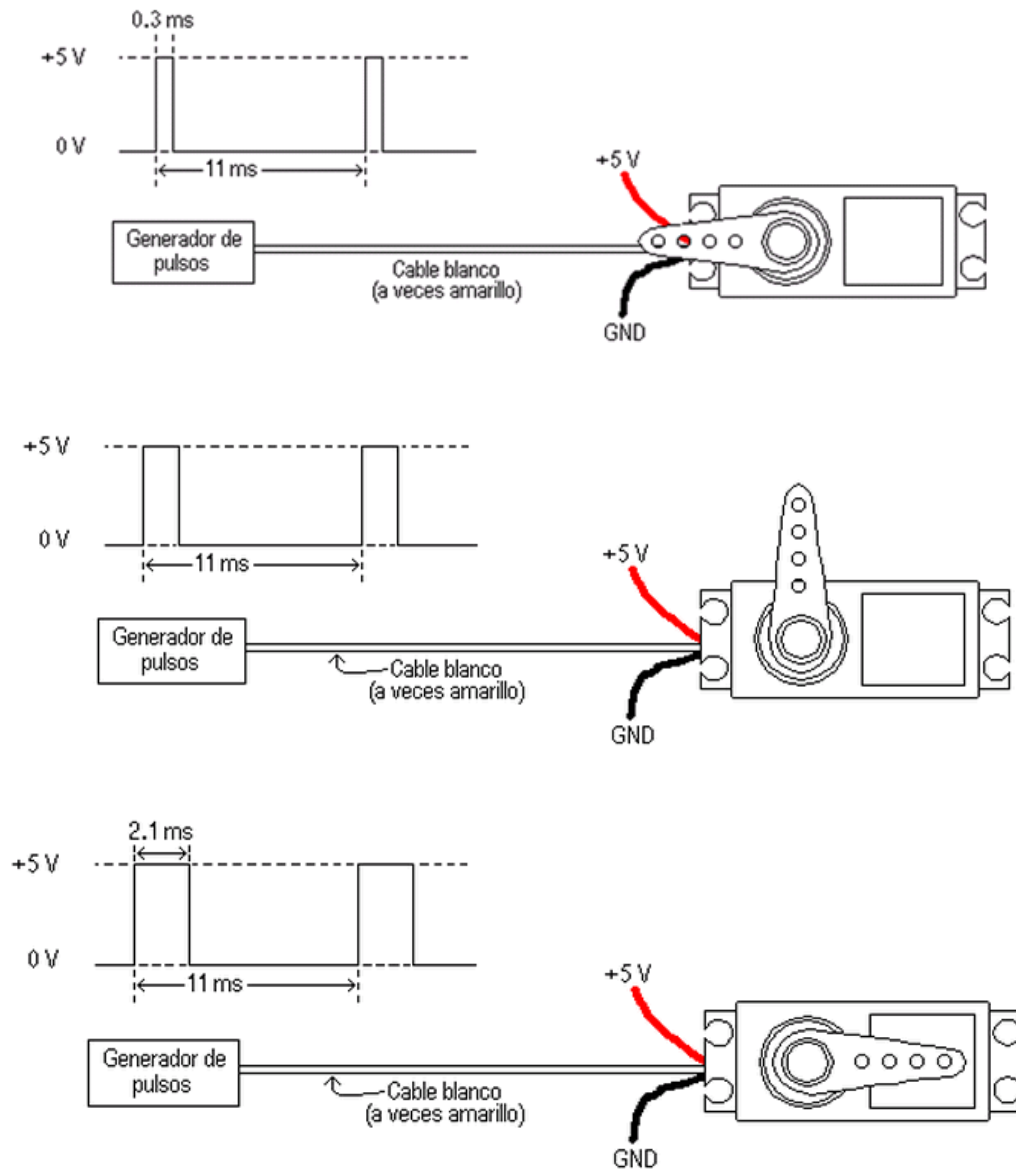


El cable de control se usa para comunicar el ángulo. El ángulo está determinado por la duración de un pulso que se aplica como señal de control. A esto se le llama PCM ó Modulación Codificada de Pulsos. El servo espera un pulso cada 20 milisegundos. La longitud del pulso

determinará los giros de motor. Un pulso de 1,5 ms, por ejemplo, hará que el motor se gire a la posición de 90 grados (llamada la posición neutra). Si el pulso es menor de 1,5 ms, entonces el motor se posicionará a los 0 grados. Si el pulso es mayor de 1,5ms, el eje se acercará a los 180 grados.

La señal de pulsos controla al servo de la siguiente forma:

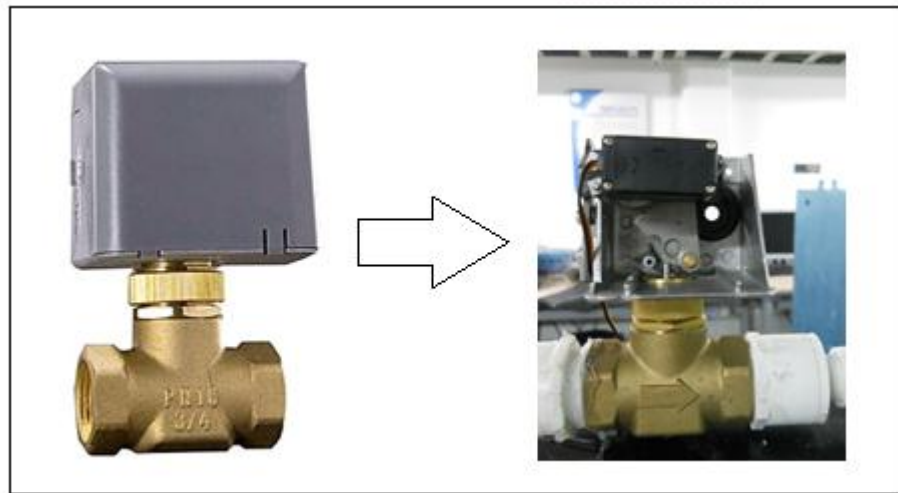
Figura 109. Cambio de posición o ángulo mediante el cambio del ancho de los pulsos



Nótese que el intervalo de tiempo entre pulsos se mantiene constante, y la variación del ancho de los mismos es lo que le indica al servo la posición que se desea.

13.4 SERVOVÁLVULA

Figura 110. Aspecto externo e interno de la servovalvula



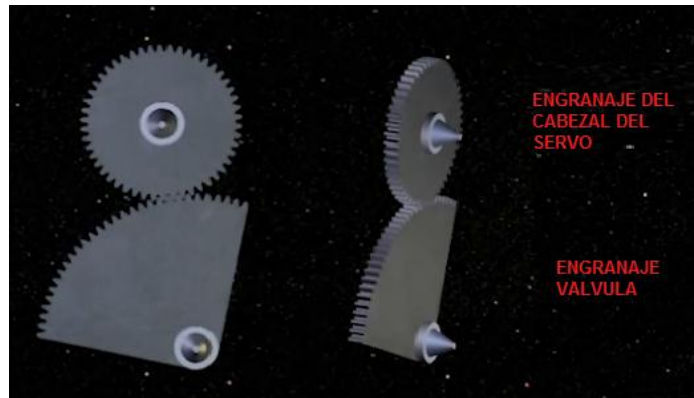
13.4.1 Características técnicas

Las características técnicas y funcionales de construcción de la válvula son: cuerpo hierro, presión de trabajo 16 bares, presión diferencial máxima 2,0 bares, temperatura de trabajo entre 2 °C y 95 °C, alimentación de 6 Vc.d., tiempo de respuesta 0,19 sec/60°, sin carga.

Se compone de dos elementos básicos: el cabezal servomotor y el cuerpo de la válvula de vástago con retorno por resorte de 1 pulgada y 2 vías. El cabezal o actuador consta de un servomotor con engranajes internos de carbonita y engranajes externos de acople en acero, que transmite al eje de salida un torque elevado, de hasta 5 kg.cm, a una velocidad de 0,19 sec/60°, sin carga. Que permiten accionar el vástago de la válvula y controlar el cierre o apertura de la válvula para el paso de líquido.

Todo este sistema es monitoreado por un regulador SIPART DR-20 y un control PWM para un buen desempeño de la servo válvula. Otra característica es su sencillo montaje y rápida instalación al cuerpo de la válvula para mejorar su portabilidad e independencia para futuros trabajos, ya sean de reparación, calibración o mantenimiento.

Figura 111. Engranajes de apertura servo-válvula



13.4.2 Aplicaciones. Estas válvulas son adecuadas para aperturas de paso parciales. Pueden aplicarse con cualquier tipo de fluido, dentro de las condiciones antes citadas: líquidas, gases, vapores, etc. Se emplean en los mismos tipos de instalaciones que las válvulas electromagnéticas. Son de sencilla instalación y bajo costo de mantenimiento.

13.5 IMPLEMENTACIÓN Y OBTENCIÓN DE DATOS A LA SALIDA DEL SIPART DR-20 EN EL SISTEMA

13.5.1 Programación de variables y parámetros de entrada

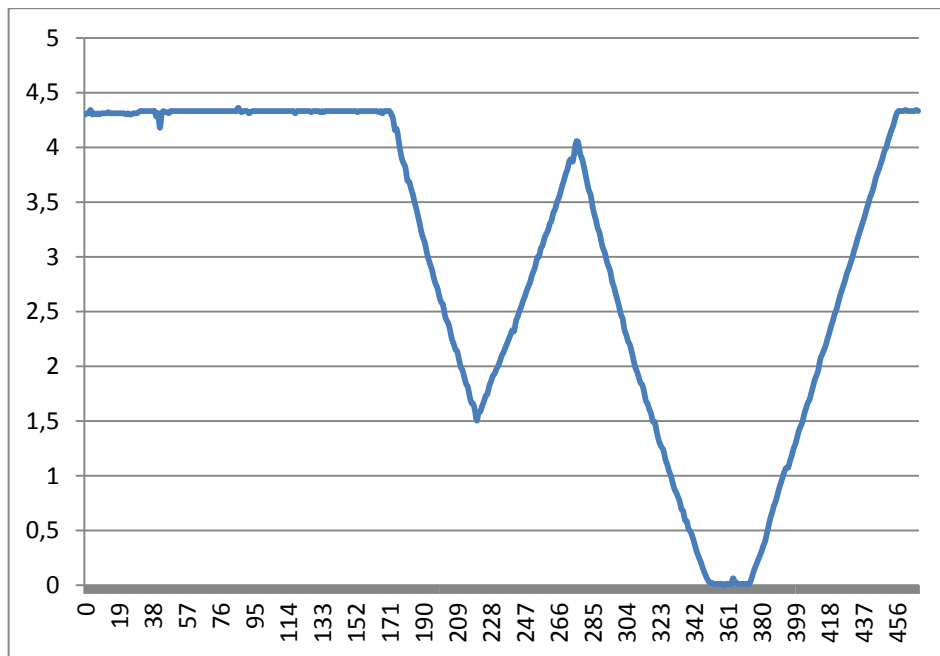
PARÁMETRO	SÍMBOLO	SIGNIFICADO
$V_v = 1$	(uu)	No hay amplificación derivativa
$K_p = 12.25$	(cP)	Control proporcional sin amplificación
$S_H = 12.22$	(SH)	Valor prescrito de seguridad
$y_S = 0$	(yS)	Valor de ajuste de seguridad
$Y_0 = 0$	(Yo)	Punto de trabajo
$t_v = \text{OFF}$	(Tu)	No hay efecto derivativo
$T_w = \text{OFF}$	(ts)	Rampa mínima de valor prescrito
$A_1 = 18$	(A1)	Valor mínimo de seguridad
$A_2 = 0$	(A2)	Valor máximo de seguridad
$LA = 0$	(LA)	Valor mínimo alcanzable por x
$LE = 18$	(LE)	Valor máximo alcanzable por x
$SA = 0$	(SA)	Valor mínimo de la referencia
$SE = 18$	(SE)	Valor máximo de la referencia
$y_A = 0$	(ya)	Valor mínimo de la actuación
$y_E = 100$	(ye)	Valor máximo de la actuación

13.5.2 Programación de switches de configuración “modo de operación”

S1 = 0	S2 = 0	S3 = 1	S4 = 0	S5 = 0
S6 = 1	S7 = 0	S8 = 0	S9 = 0	S10 = 0
S11 = 0	S12 = 0	S13 = 0	S14 = 0	S15 = 0
S16 = 0	S17 = 0	S18 = 0	S19 = 0	S20 = 1
S21 = 0	S22 = 0	S23 = 0	S24 = 0	S25 = 0
S26 = 0	S27 = 1	S28 = 0	S29 = 0	S30 = 0
S31 = 0	S32 = 0	S33 = 0	S34 = 0	S35 = 0
S36 = 0	S37 = 0	S38 = 0	S39 = 0	S40 = 0
S41 = 1	S42 = 1	S43 = 0	S44 = 0	S45 = 0

13.5.3 Obtención de datos a la salida del SIPART DR-20. Se hace una prueba inicial con un setpoint elegido al azar para analizar el comportamiento y estabilidad de nuestra respuesta a la salida.

Figura 112. Curva de respuesta del sistema implementado

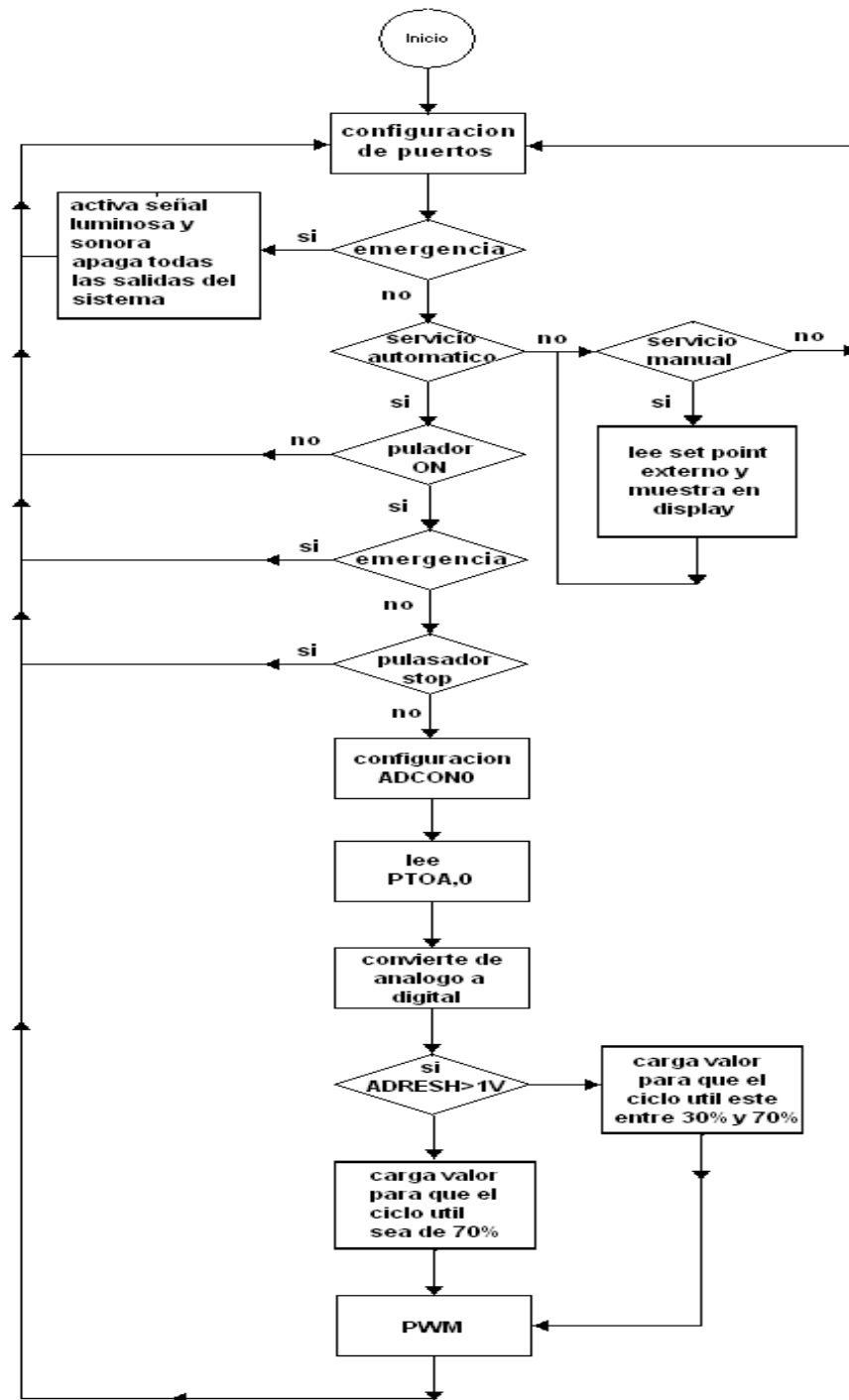


En la Figura 112 se obtiene como resultado y se puede observar, que el sistema montado y controlado presenta un filtrado y un mejoramiento de la señal con ruido eléctrico que se presentaba en la entrada y nos entrega una salida estable en términos de tensión para la siguiente etapa del proceso.

13.6 PROGRAMACIÓN DEL PIC "P16F873A"

13.6.1 Diagrama de flujo

Figura 113. Diagrama de flujo a seguir para programación del PIC



13.6.2 Programa del PIC

```
pc      equ 02h
status equ 03h
ptoa    equ 05h
ptob    equ 06h
ptoc    equ 07h
ptod    equ 08h
ptoe    equ 09h
pclath  equ 0ah
pir1    equ 0ch
rcsta   equ 18h
txreg   equ 19h
rcreg   equ 1ah
adresh  equ 1eh
adcon0  equ 1fh
trisa   equ 85h
trisb   equ 86h
trisc   equ 87h
trisd   equ 88h
trise   equ 89h
txsta   equ 98h
spbrg   equ 99h
adresl  equ 9eh
adcon1  equ 9fh
opción  equ 81h
intcon  equ 08bh
```

```
; ***** Configuracion para el simulador Proteus
```

```
list p=16f877
```

```
_CP_ALL      EQU  H'0FCF'
_CP_HALF     EQU  H'1FDF'
_CP_UPPER_256 EQU  H'2FEF'
_CP_OFF      EQU  H'3FFF'
_DEBUG_ON    EQU  H'37FF'
_DEBUG_OFF   EQU  H'3FFF'
_WRT_ENABLE_ON EQU  H'3FFF'
_WRT_ENABLE_OFF EQU  H'3DFF'
_CPD_ON      EQU  H'3EFF'
_CPD_OFF     EQU  H'3FFF'
_LVP_ON      EQU  H'3FFF'
_LVP_OFF     EQU  H'3F7F'
_BODEN_ON    EQU  H'3FFF'
```

```

_BODEN_OFF      EQU    H'3FBF'
_PWRTE_OFF      EQU    H'3FFF'
_PWRTE_ON       EQU    H'3FF7'
_WDT_ON         EQU    H'3FFF'
_WDT_OFF        EQU    H'3FFB'
_LP_OSC         EQU    H'3FFC'
_XT_OSC         EQU    H'3FFD'
_HS_OSC         EQU    H'3FFE'
_RC_OSC         EQU    H'3FFF'

```

```

Include "p16f877.inc"

```

```

cont equ 0x20
cont1 equ 0x21
cth equ 0x22
ctl equ 0x23
buffer equ 0x24
loops equ 0x25
loops2 equ 0x26
unidad equ 0x27
decena equ 0x28
centena equ 0x29
buffer2 equ 0x30
servo equ 0x31
go equ 0x2

```

```

org 00
goto puertos
;-----
bcd clrf unidad
      clrf decena
      clrf centena
paso1 movlw d'100'
      subwf buffer2,1
      btfss status,0
      goto x1
      incf centena
      goto paso1
x1 addwf buffer2,1
paso2 movlw d'10'
      subwf buffer2,1
      btfss status,0
      goto x2
      incf decena

```

```

    goto    paso2
x2    addwf  buffer2,1
      movf   buffer2,0
      movwf  unidad
      return
;-----
conver nop
      nop           ;estas instrucciones sirven para
      nop           ;darle al micro el tiempo de adquisición
      nop           ;requerido. En este caso es de 7 us aprox.
      nop
      nop
      nop
      nop
      bsf    adcon0,go ;inicia conversión
      nop
      nop
consu  btfsc  adcon0,go ;espera que termine de convertir el dato
      goto   consu
      movf   adresh,0   ;guarda resultado de 8 bits en W y en buffer
      return
;-----
retardo movwf  loops           ;de milisegundos del retardo
top2    movlw  d'110'
      movwf  loops2
top     nop
      nop
      nop
      nop
      nop
      nop
      decfsz loops2,1         ;pregunta si terminó ya 1 ms
      goto   top
      decfsz loops           ;pregunta si termina el retardo
      goto   top2
      return
;-----
display clrf    ptob          ;rutina que carga cada dato en su respectivo display
      swapf   unidad,0       ;activando el transistor correspondiente en cada caso
      movwf   ptob
      bsf    ptob,1
      movlw  d'2'
      call   retardo
      bcf    ptob,1
      swapf  decena,0

```

```

movwf ptob
bsf ptob,2
movlw d'2'
call retardo
bcf ptob,2
swapf centena,0
movwf ptob
bsf ptob,3
movlw d'2'
call retardo
bcf ptob,3
return
;-----
pwmcero clrf ccpr1l ;inicializa ciclo de trabajo en cero
bcf ccp1con,ccp1x
bcf ccp1con,ccp1y
movlw b'00000111' ;configura timer 2
movwf t2con ;preescalador 1/1, habilita timer 2
bsf ccp1con,ccp1m3 ;configura el modulo ccp1 para operación
; pwm
bsf ccp1con,ccp1m2 ;en este punto la salida pwm tiene un ciclo
; de trabajo ct=0
clrf ctl ;inicializa ct de 10 bits en cero
clrf cth
movlw d'30'
movwf ccpr1l ;actualiza parte baja del ct real
movlw 0xcf ;máscara and wf ccp1con,1 ;limpia los dos msbits del ct
; real
movlw 0x03 ;máscara andwf cth,1
swapf cth,w ;copia los 2 bits bajos de cth en el nibble alto de w
iorwf ccp1con,1 ;pone bits que deben ser 1 en los dos msb del ct
; real
return
;-----
puertos bsf status,rp0 ;banco1
movlw b'11111111'
movwf trisa
movlw b'00000001'
movwf trisb
movlw b'11111011'
movwf trisc
movlw b'11111111'
movwf trisd
movlw b'11101111'
movwf trise
movlw b'00000011'

```

```

movwf    adcon1
movlw    d'255'    ;carga periodo
movwf    pr2        ;lo establece para el pwm

    bcf    status,rp0 ;banco 0
;-----
    bsf    status,rp0 ;banco1
movlw    b'11111111'
movwf    trisa
inicio  bcf    status,rp0 ;banco 0
        clrf  unidad
        clrf  decena
        clrf  centena
        bcf  ptoa,5
        call pwmzero
        btfss ptoc,4    ;emergencia
        goto emergencia
        call display
        btfss ptoc,1    ;selector de servicio (1 automatico/ 0 manual)
        goto manual
        btfsc ptob,0    ;inicio
        goto inicio
        movlw d'50'
        call retardo
suelto btfss ptob,0
        goto suelto
ciclo  bsf    status,rp0 ;banco1
        movlw b'00000011'
        movwf adcon1
        bcf    status,rp0 ;banco 0
        call display
        btfss ptoc,4    ;emergencia
        goto emergencia
        btfsc ptob,0    ;stop
        goto normal
        movlw d'50'
        call retardo
stop   btfss ptob,0
        goto stop
        goto puertos

normal bsf    status,rp0 ;banco1
        movlw b'00011011'
        movwf trisc
        movlw b'11111111'

```

```

movwf trisa
bcf status,rp0 ;banco 0
movlw b'10000001' ;corriente de salida del sipart
movwf adcon0 ;selecciona canal 0, reloj de conv.
; fosc/32, convertidor encendido
call conver ;llama rutina de conversion A/D
movlw b'00001111'
subwf adresh,0
btfss status,0
goto neg
goto pos
pos movlw d'160'
movwf servo
goto leds
neg movlw d'30'
movwf servo
goto leds
leds btfss status,0
goto verde
bsf ptoc,3 ;nivel intermedio (activa señal luminosa y enciende
; bomba)
bsf ptoc,7
bcf ptoc,6
bcf ptoc,5
goto pwm
verde bcf ptoc,3 ;llego al set point (activa señal luminosa y apaga la
; bomba)
bcf ptoc,7
bsf ptoc,6
bcf ptoc,5
pwm movlw b'00000110' ;configura timer 2
movwf t2con ;preescalador 1/1, habilita timer 2
bsf ccp1con,ccp1m3 ;configura el modulo ccp1 para operación
; pwm
bsf ccp1con,ccp1m2 ;en este punto la salida pwm tiene un ciclo de
; trabajo ct=0
clrf ctl ;inicializa ct de 10 bits en cero
movf servo,0 ;si no se ha presionado obtiene copia de ct
; parte baja
movwf ccpr1l ;actualiza parte baja del ct real

```

;**** a continuación actualiza la parte alta del ct real

```

movlw 0xcf ;máscaraandwf ccp1con,1 ;limpia los dos msbits del ct real
movlw 0x03 ;máscaraandwf cth,1

```

;limpia los 6 bits altos en cth

```
    swapf cth,w      ;copia los 2 bits bajos de cth en el nibble alto de w
    iorwf  ccp1con,1 ;pone bits que deben ser 1 en los dos msb del ct real
```

;**** con esto queda actualizada la parte alta del ct real

;-----

```
    bsf    status,rp0 ;banco1
    movlw  b'00000000'
    movwf  adcon1
    bcf    status,rp0   ;banco 0
    movlw  b'10001001' ;entrada de corriente del sipart
    movwf  adcon0      ;selecciona canal 1, reloj de conv. fosc/32,
                       ; convertidor encendido

    call   conver      ;llama rutina de conversion a/d
    movlw  d'50'
    subwf  adresh,0
    movwf  buffer2
    call   bcd
```

;-----

goto ciclo

;-----

emergencia

```
    bsf    status,rp0   ;banco1
    movlw  b'11011111'
    movwf  trisa
    bcf    status,rp0   ;banco 0
    bsf    ptoa,5
    bcf    ptoc,3       ;nivel maximo de seguridad sobrepasado
    bsf    ptoc,5       ;señalización luminoza y acustica
    bcf    ptoc,6
    bcf    ptoc,7
    call   pwmzero
    movlw  b'10001001' ;se requiere que los tanques esten vacios para poder
                       ; iniciar de nuevo el proceso
    movwf  adcon0      ;selecciona canal 2, reloj de conv. fosc/32,convertidor
                       ;encendido

    call   conver      ;llama rutina de conversion A/D
    goto  inicio
```

;-----

```
    manual  btfsc      ptoc,1
    goto    puertos
```

```

        bsf      status,rp0      ;banco1
        movlw   b'00011111'     ;pwm externo/manejo de bomba externo
        movwf  trisc
        bcf     status,rp0      ;banco 0
        btfss  ptoc,0
        goto   referencia
        goto   nivel
luz     goto   manual
nivel   movlw  b'10001001'     ;entrada de corriente del sipart
        movwf  adcon0          ;selecciona canal 1, reloj de conv. fosc/32,
                                ;convertidor encendido
                                ;llama rutina de conversion A/D
        call   conver
        movf   adresh,0
        movwf  buffer2
        call   bcd
        call   display
        goto   luz

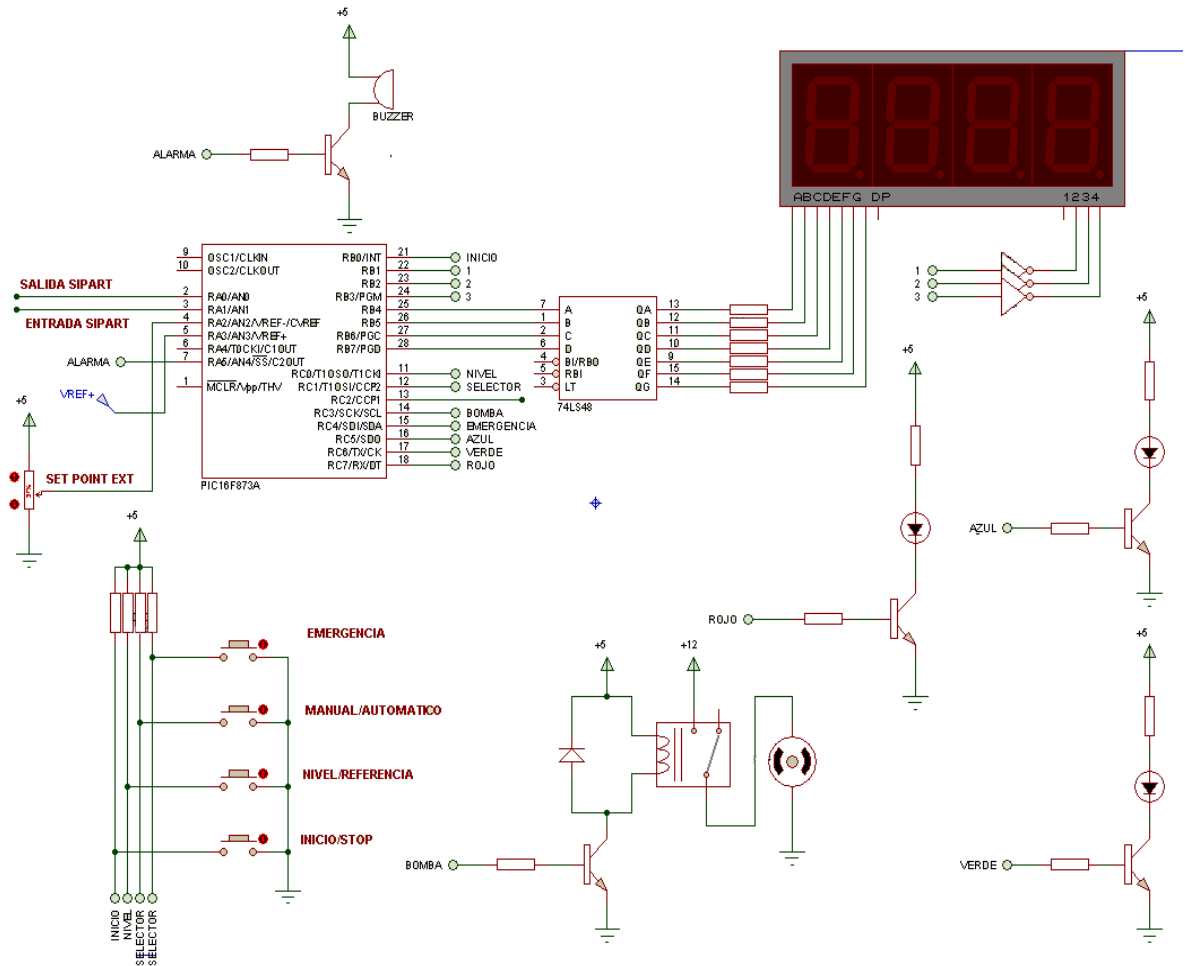
referencia  movlw  b'10010001' ;entrada de corriente del sipart
            movwf  adcon0      ;selecciona canal 2, reloj de conv. fosc/32,
                                ; convertidor encendido
                                ;llama rutina de conversion A/D
            call   conver
            movf   adresh,0
            movwf  buffer2
            call   bcd
            call   display
            goto   luz

end

```


13.6.3 Esquema del circuito de la aplicación con PIC "P16F873A"

Figura 114. Circuito de la aplicación con PIC "P16F873A"



13.7 CIRCUITO GENERAL OPERATIVO

El circuito de las figuras 105 y 115 han sido integrados en un solo circuito para obtener portabilidad del sistema, para esto fueron exportados a el programa TraxMaker para el diseño del circuito impreso y posterior quemado del mismo en la baquelita mediante el proceso de transferencia de tinta.

Figura 117. Transferencia del circuito impreso por medio de calor



Figura 118. Limpieza del papel residual



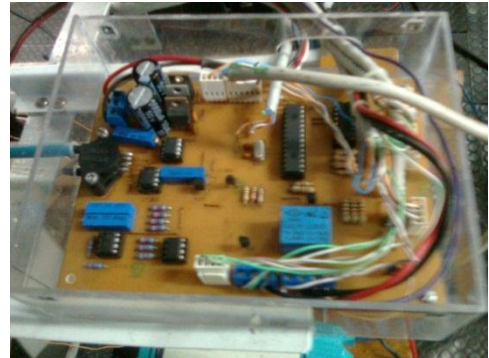
Figura 119. Verificación de pistas



Figura 120. Aplicación del químico



Figura 121. Instalación de los elementos



13.8 COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA HIDRÁULICO (OBTENCIÓN DE DATOS EXPERIMENTALES Y SIMULACIÓN)

13.8.1 Dinámica del sistema. Para hacer el estudio del comportamiento del sistema se usan 2 tanques cuadrados de medidas: altura 25,2 cm, largo 29,6 cm y ancho 19,7 cm; al cual se le tomaron datos de tensión cada segundo a través de una tarjeta de adquisición de datos USB-6008/9 y se obtuvieron los siguientes valores y la siguiente gráfica:

La tabla muestra los valores con los que se evaluó la dinámica del sistema.

Tabla 6. Valores obtenidos para construir la dinámica del sistema

Tiempo (s)	Altura (cm)	Tensión (v)
0	0	5,045577
1	0,09596102	5,065996
2	0,28787836	5,106833
3	0,2399002	5,096624
4	0,38383938	5,127252
5	0,28787836	5,106833
6	0,52777856	5,15788
7	0,52777856	5,15788
8	0,52777856	5,15788
9	0,86363978	5,229346
10	0,86363978	5,229346
11	0,86363978	5,229346
12	0,91161794	5,239555
13	1,05555712	5,270183
14	1,4393965	5,351858
15	1,24747446	5,31102
16	1,24747446	5,31102
17	1,1994963	5,300811
18	1,48737466	5,362067
19	1,72727486	5,413114
20	1,63131384	5,392695
21	1,58333568	5,382486
22	1,6792967	5,402905
23	2,11111424	5,494789
24	2,11111424	5,494789

25	2,06313138	5,484579
26	2,20707056	5,515207
27	2,20707056	5,515207
28	2,1590924	5,504998
29	2,3989926	5,556045
30	2,54293179	5,586673
31	2,59090995	5,596882
32	2,78283199	5,63772
33	2,68687097	5,617301
34	2,63888811	5,607091
35	2,63888811	5,607091
36	2,92677117	5,668348
37	3,16666667	5,719394
38	3,07071035	5,698976
39	3,21464953	5,729604
40	3,21464953	5,729604
41	3,21464953	5,729604
42	3,31060585	5,750022
43	3,50252789	5,79086
44	3,93434543	5,882744
45	3,64646707	5,821488
46	3,59848421	5,811278
47	3,64646707	5,821488
48	3,83838441	5,862325
49	3,93434543	5,882744
50	4,12626277	5,923581
51	4,07828461	5,913372

52	4,27020195	5,954209
53	4,12626277	5,923581
54	4,31818481	5,964419
55	4,31818481	5,964419
56	4,41414113	5,984837
57	4,55808031	6,015465
58	4,60606317	6,025675
59	4,84595867	6,076721
60	4,94191969	6,09714
61	4,79798051	6,066512
62	4,98989785	6,107349
63	4,89394153	6,086931
64	5,08585887	6,127768
65	5,18181989	6,148187
66	5,27778091	6,168606
67	5,42172009	6,199234
68	5,22979805	6,158396
69	5,46969825	6,209443
70	5,51767641	6,219652
71	5,51767641	6,219652
72	5,61363743	6,240071
73	5,66161559	6,25028
74	5,75757661	6,270699
75	5,94949395	6,311536
76	6,09343313	6,342164
77	5,99747681	6,321746
78	6,14141599	6,352374
79	6,18939415	6,362583
80	6,33333333	6,393211
81	6,18939415	6,362583
82	6,47727251	6,423839
83	6,42929435	6,41363
84	6,52525537	6,434049
85	6,57323353	6,444258
86	6,57323353	6,444258
87	6,81313373	6,495305
88	6,76515087	6,485095
89	6,86111189	6,505514
90	7,05302923	6,546351
91	6,90909005	6,515723

92	7,05302923	6,546351
93	7,10101209	6,556561
94	7,14899026	6,56677
95	7,19696842	6,576979
96	7,19696842	6,576979
97	7,3409076	6,607607
98	7,48484678	6,638235
99	7,43686862	6,628026
100	7,53282964	6,648445
101	7,62878596	6,668863
102	7,72474698	6,689282
103	7,72474698	6,689282
104	7,72474698	6,689282
105	7,91666902	6,73012
106	7,86868616	6,71991
107	7,96464718	6,740329
108	8,0606082	6,760748
109	8,10858636	6,770957
110	8,25252554	6,801585
111	8,20454738	6,791376
112	8,20454738	6,791376
113	8,39646472	6,832213
114	8,44444288	6,842422
115	8,5404039	6,862841
116	8,5404039	6,862841
117	8,5404039	6,862841
118	8,68434308	6,893469
119	8,63636492	6,88326
120	8,7803041	6,913888
121	8,92424328	6,944516
122	8,92424328	6,944516
123	9,0202043	6,964935
124	9,0202043	6,964935
125	9,11616062	6,985353
126	9,06818246	6,975144
127	9,11616062	6,985353
128	9,30808266	7,026191
129	9,40403898	7,046609
130	9,5	7,067028
131	9,5	7,067028

132	9,59596102	7,087447
133	9,59596102	7,087447
134	9,64393918	7,097656
135	9,78787836	7,128284
136	9,83585652	7,138493
137	9,78787836	7,128284
138	10,3156569	7,240587
139	9,88383938	7,148703
140	10,0757567	7,18954
141	10,2676788	7,230378
142	10,1237349	7,199749
143	10,2676788	7,230378
144	10,1717177	7,209959
145	10,3156569	7,240587
146	10,4595961	7,271215
147	10,4595961	7,271215
148	10,3636351	7,250796
149	10,5075743	7,281424
150	10,6515134	7,312052
151	10,6515134	7,312052
152	10,7954526	7,34268
153	10,7954526	7,34268
154	10,8914136	7,363099
155	10,7954526	7,34268
156	10,8914136	7,363099
157	11,083331	7,403936
158	11,2272702	7,434564
159	11,083331	7,403936
160	11,1313138	7,414146
161	11,179292	7,424355
162	11,275253	7,444774
163	11,371214	7,465193
164	11,4191922	7,475402
165	11,4191922	7,475402
166	11,371214	7,465193
167	11,6590924	7,526449
168	11,6590924	7,526449
169	11,7070706	7,536658
170	11,8030316	7,557077
171	11,8030316	7,557077

172	11,8510097	7,567286
173	12,0429271	7,608123
174	11,9469708	7,587705
175	12,0909099	7,618333
176	12,1868663	7,638751
177	12,2348491	7,648961
178	12,2828273	7,65917
179	12,2348491	7,648961
180	12,3308054	7,669379
181	12,4267665	7,689798
182	12,4747446	7,700007
183	12,5227275	7,710217
184	12,6186885	7,730636
185	12,7146448	7,751054
186	12,5707056	7,720426
187	12,7626277	7,761264
188	12,8106058	7,771473
189	12,858584	7,781682
190	13,0025232	7,81231
191	12,858584	7,781682
192	13,050506	7,82252
193	13,050506	7,82252
194	13,1944452	7,853148
195	13,0984842	7,832729
196	13,4343407	7,904194
197	13,2424234	7,863357
198	13,4343407	7,904194
199	13,4823236	7,914404
200	13,5782799	7,934822
201	13,4823236	7,914404
202	13,5782799	7,934822
203	13,6262628	7,945032
204	13,6262628	7,945032
205	13,8181801	7,985869
206	13,866163	7,996079
207	14,0101021	8,026707
208	14,0101021	8,026707
209	14,1540413	8,057335
210	14,1540413	8,057335
211	14,1540413	8,057335

212	14,0101021	8,026707
213	14,3459587	8,098172
214	14,2979805	8,087963
215	14,3459587	8,098172
216	14,4419197	8,118591
217	14,537876	8,139009
218	14,7297981	8,179847
219	14,7297981	8,179847
220	14,7297981	8,179847
221	14,8257544	8,200265
222	14,8257544	8,200265
223	14,8737372	8,210475
224	14,9696936	8,230893
225	14,9696936	8,230893
226	14,9696936	8,230893
227	15,0176764	8,241103
228	15,1616156	8,271731
229	15,1616156	8,271731
230	15,2095938	8,28194
231	15,3535329	8,312568
232	15,2095938	8,28194
233	15,3535329	8,312568
234	15,4974721	8,343196
235	15,545455	8,353406
236	15,5934331	8,363615
237	15,6893942	8,384034
238	15,6414113	8,373824
239	15,6414113	8,373824
240	15,7373723	8,394243
241	15,6893942	8,384034
242	15,8813115	8,424871
243	15,8813115	8,424871
244	15,9772725	8,44529
245	15,9772725	8,44529
246	16,0732288	8,465708
247	16,0732288	8,465708
248	16,2651509	8,506546
249	16,2651509	8,506546
250	16,4090901	8,537174
251	16,313129	8,516755

252	16,3611119	8,526965
253	16,5050511	8,557593
254	16,3611119	8,526965
255	16,5530292	8,567802
256	16,6489903	8,588221
257	16,7929294	8,618849
258	16,7449466	8,608639
259	16,7983387	8,62
260	16,9368686	8,649477
261	17,0808078	8,680105
262	16,9848468	8,659686
263	17,0328249	8,669895
264	16,9848468	8,659686
265	17,0808078	8,680105
266	17,3207033	8,731151
267	16,6969684	8,59843
268	17,0333184	8,67
269	17,3207033	8,731151
270	17,2727251	8,720942
271	17,3686862	8,741361
272	17,5126253	8,771989
273	17,4166643	8,75157
274	17,5606035	8,782198
275	17,5606035	8,782198
276	17,5126253	8,771989
277	17,6565645	8,802617
278	17,8005037	8,833245
279	17,6565645	8,802617
280	17,8005037	8,833245
281	17,8005037	8,833245
282	18,0404039	8,884292
283	17,8484819	8,843454
284	17,8964647	8,853664
285	18,0883821	8,894501
286	17,992421	8,874082
287	18,1843431	8,91492
288	17,992421	8,874082
289	18,3762604	8,955757
290	18,0883821	8,894501
291	18,2323212	8,925129

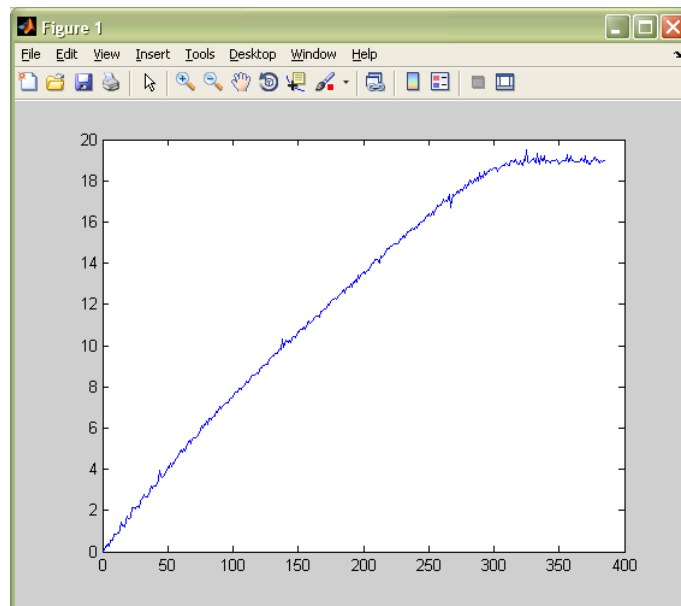
292	18,1843431	8,91492
293	18,4242386	8,965966
294	18,2802994	8,935338
295	18,4722214	8,976176
296	18,4242386	8,965966
297	18,5681778	8,996594
298	18,5201996	8,986385
299	18,5681778	8,996594
300	18,6161606	9,006804
301	18,6161606	9,006804
302	18,6161606	9,006804
303	18,4242386	8,965966
304	18,5681778	8,996594
305	18,6161606	9,006804
306	18,7600998	9,037432
307	18,7600998	9,037432
308	18,7600998	9,037432
309	18,8560608	9,057851
310	18,808078	9,047641
311	18,7600998	9,037432
312	18,7600998	9,037432
313	18,9520171	9,078269
314	18,9520171	9,078269
315	18,904039	9,06806
316	18,904039	9,06806
317	19,0479782	9,098688
318	18,808078	9,047641
319	18,808078	9,047641
320	18,9520171	9,078269
321	18,8560608	9,057851
322	18,7600998	9,037432
323	19,0479782	9,098688
324	18,9520171	9,078269
325	19,4797957	9,190572
326	18,9520171	9,078269
327	18,8560608	9,057851
328	18,904039	9,06806
329	19	9,088479
330	19,0959563	9,108897
331	18,9520171	9,078269

332	18,8560608	9,057851
333	19,3358565	9,159944
334	19	9,088479
335	18,808078	9,047641
336	19,1919173	9,129316
337	19	9,088479
338	19	9,088479
339	19,1919173	9,129316
340	18,8560608	9,057851
341	19	9,088479
342	18,904039	9,06806
343	18,8560608	9,057851
344	19	9,088479
345	18,9520171	9,078269
346	18,9520171	9,078269
347	18,9520171	9,078269
348	19,0479782	9,098688
349	19	9,088479
350	18,808078	9,047641
351	18,8560608	9,057851
352	18,904039	9,06806
353	18,9520171	9,078269
354	19	9,088479
355	18,9520171	9,078269
356	19,2878784	9,149735
357	18,904039	9,06806
358	19	9,088479
359	19,1919173	9,129316
360	19	9,088479
361	18,9520171	9,078269
362	18,904039	9,06806
363	18,904039	9,06806
364	18,904039	9,06806
365	18,9131562	9,07
366	19	9,088479
367	19,0959563	9,108897
368	19	9,088479
369	18,904039	9,06806
370	19,1919173	9,129316
371	18,8560608	9,057851

372	18,9520171	9,078269
373	18,808078	9,047641
374	18,808078	9,047641
375	18,9520171	9,078269
376	18,9520171	9,078269
377	19,1439392	9,119107
378	18,9520171	9,078269
379	19,0479782	9,098688

380	18,9520171	9,078269
381	18,8560608	9,057851
382	19	9,088479
383	18,904039	9,06806
384	18,9520171	9,078269
385	18,9520171	9,078269
386	19	9,088479

Figura 124. Comportamiento del sistema (Altura en cm vs Tiempo en s)



Basándonos en la gráfica del comportamiento del sistema, se puede obtener la función de transferencia del mismo:

$$G(s) = \frac{k/a}{(s/a) + 1}$$

Inicialmente podemos obtener un valor de tau en el 63 % de su valor final, el cual sería dado por:

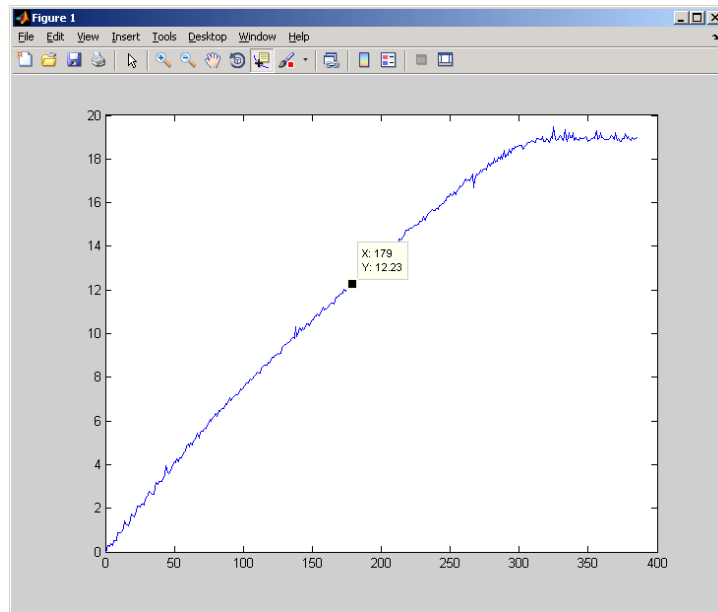
$$\gamma(\infty) = 19,42 \text{ cm}$$

$$\tau = 19,42 \text{ mA} \cdot 0,63 = 12,2346 \text{ cm}$$

Relación del valor de corriente respecto al tiempo

$$\tau = 179 \text{ s}$$

Figura 125. Gráfica del comportamiento del sistema



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

$$\tau = 179 \text{ s}$$

$$\tau = \frac{1}{\alpha} \quad \alpha = \frac{1}{\tau} \quad \alpha = \frac{1}{179 \text{ s}} \quad \text{por consiguiente } \alpha = 0,00558659$$

De la ecuación

$$\gamma(\infty) = \frac{k}{a} = \text{Valor final del sistema} = 19,42 \text{ cm}$$

Despejamos k

$$k = \gamma(\infty) * a = 0,10849162$$

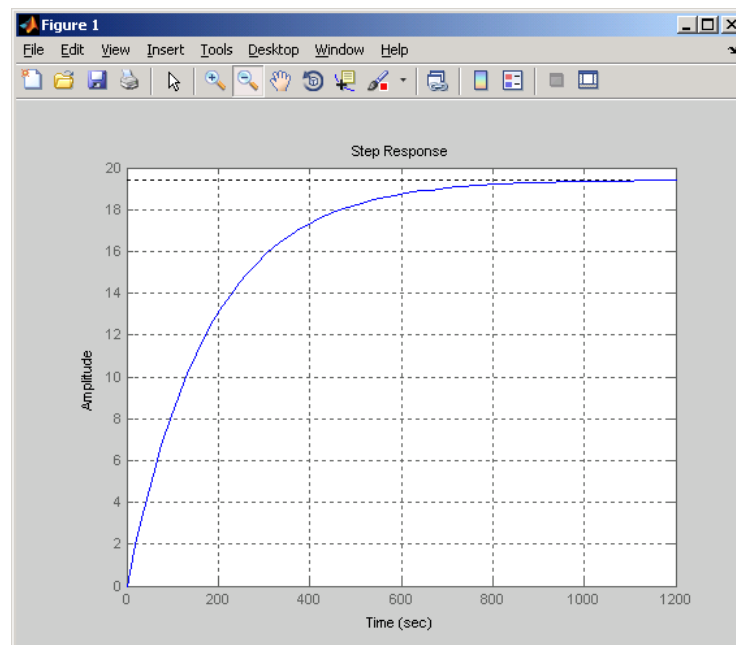
Remplazamos valores en la función de transferencia

$$G(s) = \frac{k/a}{\tau+1} = \frac{19,42 \text{ cm}}{179 S + 1}$$

Se procede a digitar la función de transferencia del sistema en lazo abierto en Matlab, para posterior análisis

```
num =[19.42];  
dem =[179 1];  
T=tf(num,dem)  
step (T)  
grid on
```

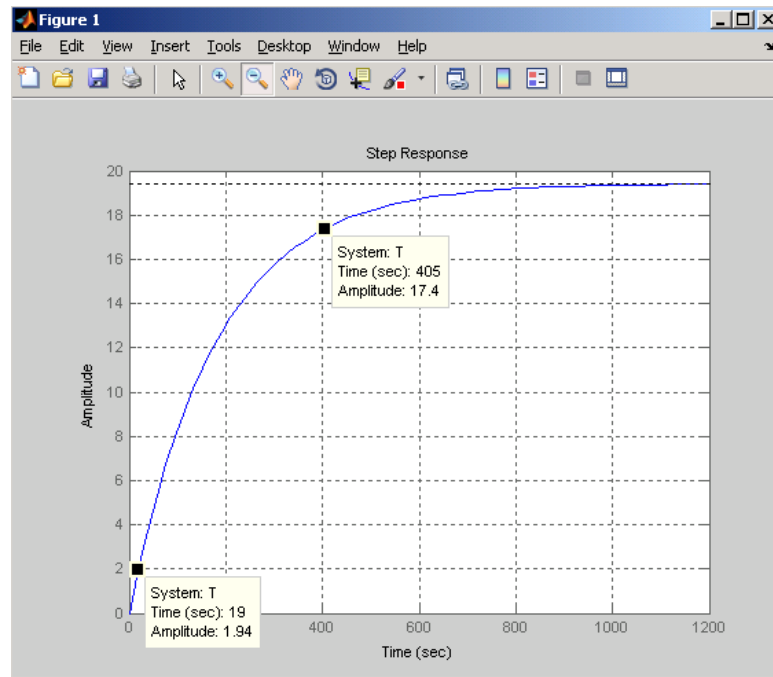
Figura 124. Curva de comportamiento del sistema lazo abierto simulada en Matlab



Con la gráfica se tomó el tiempo de subida T_r para el 10 % y el 90 % de la magnitud.

$T_r 10\% = 19\text{ s}$
 $T_r 90\% = 405\text{ s}$
 Tiempo de subida = 386 s

Figura 125. Tiempo de subida al 10% y al 90 %



13.8.2 Respuesta de la planta con una perturbación tipo escalón unitario.

Para el cálculo del el error de estado estacionario:

$$Ess = \frac{1}{1+K_p}$$

Donde k_p es la ganancia propia del sistema.

Para encontrar k_p determinamos el límite cuando S tiende a cero de $G(s)$.

$$K_p = \lim_{S \rightarrow 0} G(s) \quad \lim_{S \rightarrow 0} = \frac{19.42\text{ mA}}{179S + 1} = 19,42$$

$$Ess = \frac{1}{1+K_p} = \frac{1}{1+19.42} = 0,04897 \quad \%Ess = 4,897\%$$

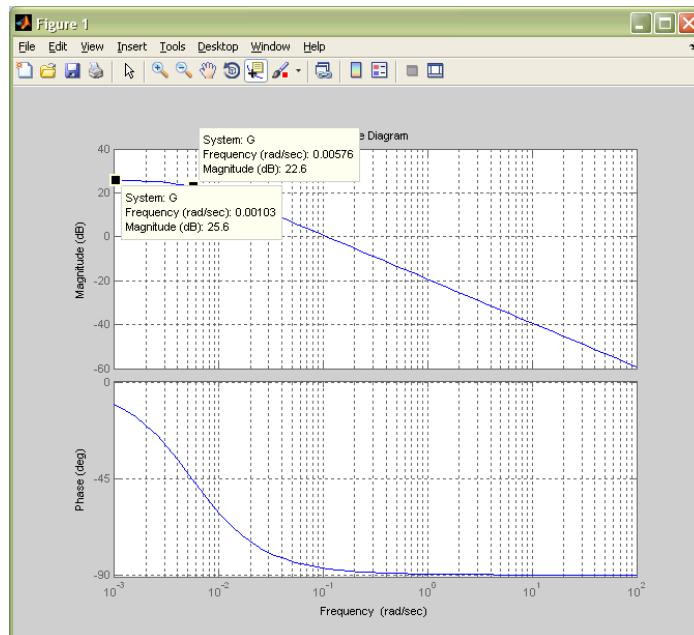
El tiempo de establecimiento para este sistema, se halló de la formula expresada para la función de transferencia de primer orden, donde:

$$T_s = \frac{4}{\alpha} = \frac{4}{0,00558659} = 716 \text{ s}$$

13.8.3 Análisis de la respuesta en frecuencia. Con este método se observó el comportamiento del sistema en magnitud y fase con respecto a la frecuencia usando el siguiente programa en Matlab.

```
num =[19.42];
dem =[179 1];
G=tf(num,dem)
bode(G,logspace(-3,2))
grid on
```

Figura 126. Análisis de la respuesta en frecuencia

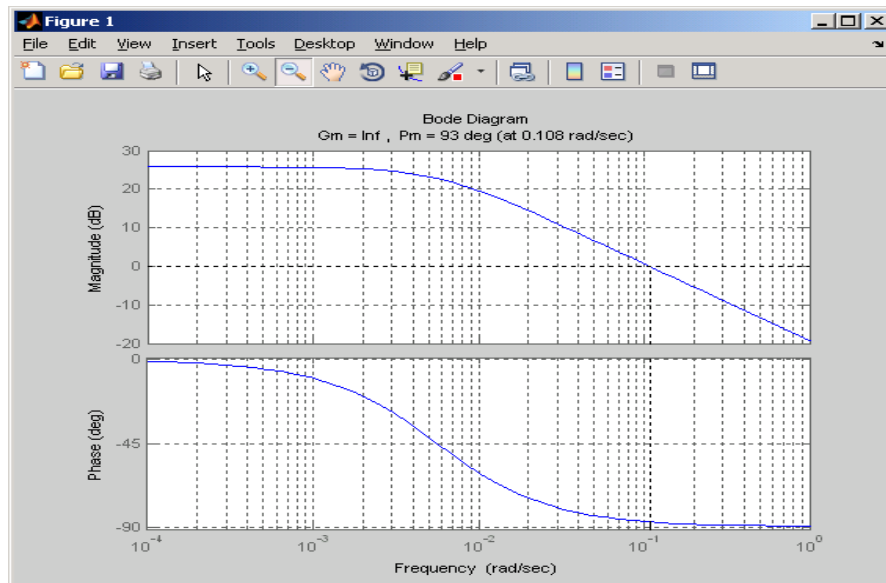


Se puede observar, en la respuesta mostrada, que a - 3 dB se obtiene un ancho de banda (BW) igual a 0,00576 rad/s. A continuación se ejecuta el mismo programa, pero con una función de Matlab llamada margin, que muestra el valor del margen de fase, denominado MP:

```
num =[19.42];
dem =[179 1];
G=tf(num,dem)
```

margin(G)
gridon

Figura 127. Margen de fase



En la Figura 127, se observa que el margen de fase es de 93 grados y el margen de ganancia es infinito. Los valores obtenidos son del sistema sin aplicar ningún tipo de control.

Para diseñar el controlador del sistema, se tuvieron en cuenta las siguientes condiciones:

- Error en estado estacionario, lo mínimo posible
- Sobrepaso entre 0 y 10%
- Minimizar el tiempo de subida
- El menor tiempo de establecimiento posible

Para esto se relacionan matemáticamente los valores del ancho de banda en función de zeta.

$$\zeta = \frac{PM}{100} \quad \longleftrightarrow \quad PM = \zeta * 100$$

El valor de ζ en función del sobrepaso es:

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

Para el próximo paso, se tendrán en cuenta la ecuación que relaciona el sobrepaso y el coeficiente de amortiguamiento

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

Y la Ecuación que relaciona el ancho de banda en función de ζ

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

$$w_n = \frac{4}{Ts\zeta^2}$$

Adicionalmente con el tiempo de establecimiento previamente calculado, $T_s = 716$ s, se podrá seleccionar el valor de sobrepaso deseado en valores normales entre 0 y 10 % y encontrar un valor de zita y el ancho de banda necesario para los valores deseados. Para esto, tendremos en cuenta para el valor de amortiguamiento las siguientes condiciones previamente definidas en la sección 11.3 (teoría de sistemas de segundo orden).

Respuesta no amortiguada (para $\zeta=0$)

Respuesta Sub amortiguada (para $0 < \zeta < 1$)

Respuesta amortiguada o críticamente amortiguada (para $\zeta = 1$)

Respuesta sobre amortiguada (para $\zeta > 1$)

Para poder hallar estos valores de zita y el ancho de banda, se utiliza el Matlab con la siguiente programación:

```
pos=input('Ingrese el sobrepaso en valor de porcentaje 0-10% ');
z=(-log(pos/100))/(sqrt(pi^2+log(pos/100)^2))
z=input('Ingrese valor de amortiguamiento ');
os=100*exp((-pi*z)/sqrt(1-z^2))
Ts=input('Ingrese el Ts deseado ')
```

$$BW=4/(Ts*z^2)*\sqrt{1-2*z^2+\sqrt{z^4-4*z^2+2}}$$

Se tiene con un valor de sobrepaso de 5:

$$\text{Zita } \zeta = 0,6901$$

Y un valor de amortiguamiento = 0,5

Ancho de banda, $BW = 0,0092$

$$\text{margen de fase, } PM = \zeta * 100$$

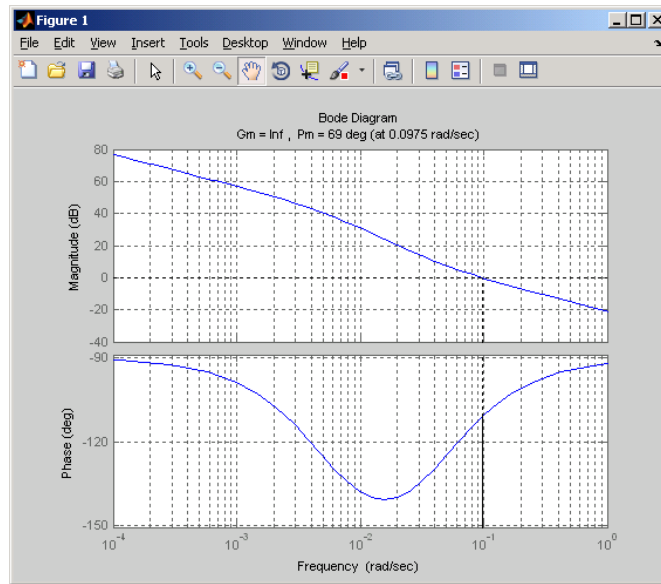
$$\text{margen de fase, } PM = 69,01$$

Los datos encontrados anteriormente son necesarios para calcular la estabilidad que se quiere para el sistema. Se varían los valores de las constantes **kp** (constante proporcional) y **ki** (constante integrativa) hasta encontrar el margen de fase deseado. El siguiente programa en Matlab muestra el controlador del sistema:

```
kp=.82;
ki=.0361;
num =[19.42];
dem =[179 1];
numpi=[kpkj];
dempj=[1 0];
sys1=conv(num,numpi);
sys2=conv(dem,dempj);
G = tf (sys1,sys2)
figure(1)
margin(G)
gridon
figure(2)
Glc=feedback(G,1)
t=0:0.1:200
step(Glc,t)
gridon
```

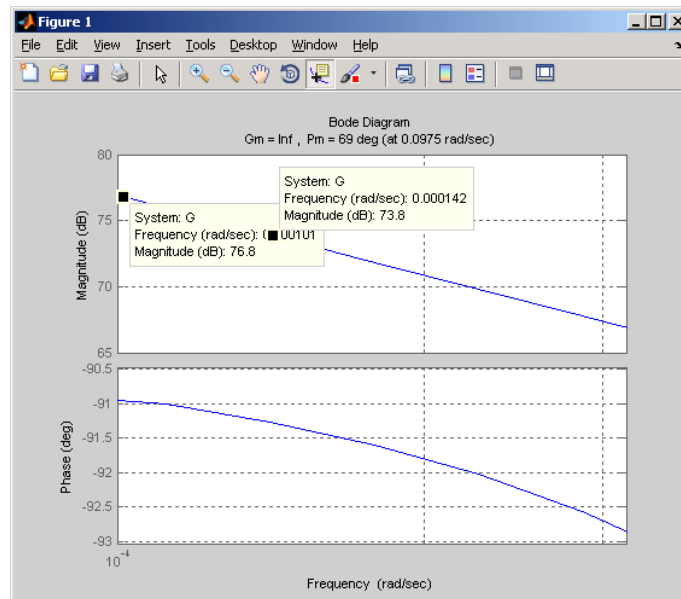
Se obtiene la siguiente gráfica como respuesta.

Figura 128. Respuesta en frecuencia con control



En la cual, se verifica el ancho de banda esperado.

Figura 129. Verificaciones ancho de banda en la respuesta en frecuencia con control



En la figura 130. Se puede ver que el ancho de banda (BW) es mayor de lo que se esperaba, pero esto no afecta el sistema, por el contrario, mejora el tiempo de subida. El valor del margen de fase (PM) es el adecuado para un sobrepaso entre 0 y 5 %, de acuerdo a la relación mostrada anteriormente en este capítulo.

$$G(s) = \frac{15.92 s + 0.7011}{179 s^2 + s}$$

13.9 OBTENCIÓN DE DATOS A LA SALIDA DEL SISTEMA DE NIVEL DE LÍQUIDOS DE SEGUNDO ORDEN

13.9.1 Variable de la salida del sistema abierta al 100%

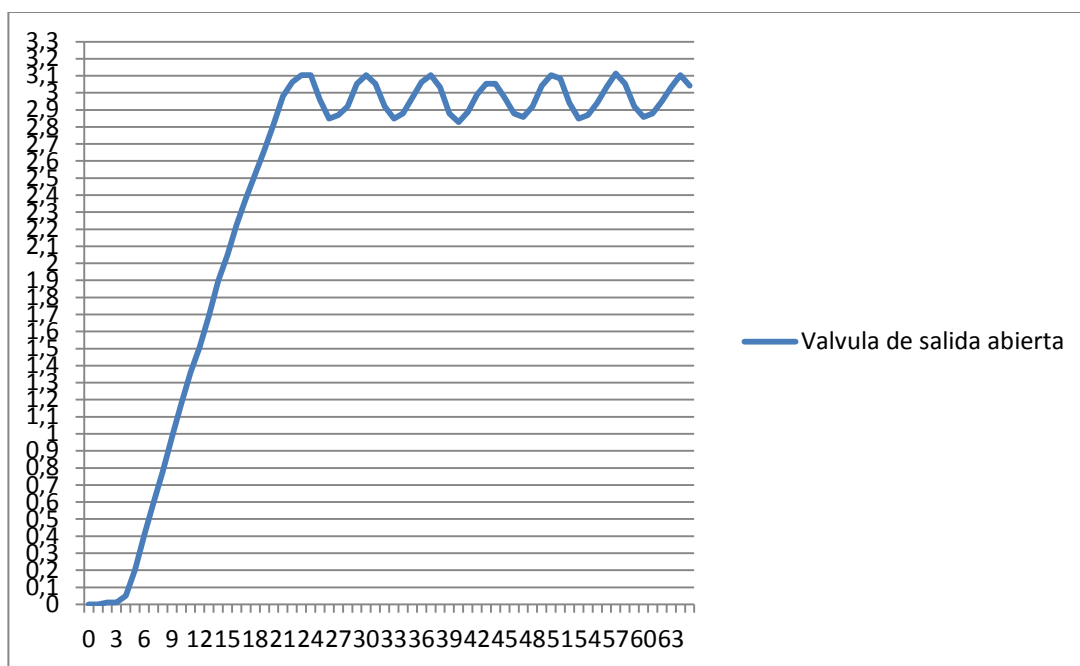
Tabla 7. Valores obtenidos aplicando el sistema de control

Tiempo (s)	Tensión (v)
0	0
1	0
2	0,010208
3	0,010208
4	0,051042
5	0,204168
6	0,408337
7	0,592089
8	0,77584
9	0,980009
10	1,173969
11	1,357721
12	1,510847
13	1,694599
14	1,898768
15	2,051894
16	2,225437
17	2,378564
18	2,521482
19	2,6644
20	2,817526
21	2,980861
22	3,062528
23	3,103362
24	3,103362
25	2,960444
26	2,848151
27	2,868568
28	2,91961
29	3,05232
30	3,103362
31	3,05232
32	2,91961
33	2,848151
34	2,878777
35	2,970653
36	3,062528
37	3,103362
38	3,031903
39	2,878777
40	2,827735
41	2,888985
42	2,991069
43	3,05232
44	3,05232
45	2,970653
46	2,878777
47	2,85836
48	2,91961
49	3,042112
50	3,103362
51	3,082945
52	2,940027
53	2,848151
54	2,868568
55	2,940027

56	3,031903
57	3,113571
58	3,05232
59	2,91961
60	2,85836

61	2,878777
62	2,950236
63	3,031903
64	3,103362
65	3,042112

Figura 130. Comportamiento de la salida del sistema con apertura del 100%



13.9.2 Variable de la salida del sistema abierta al 0%

Tabla 8. Valores obtenidos aplicando el sistema de control y variable en la salida

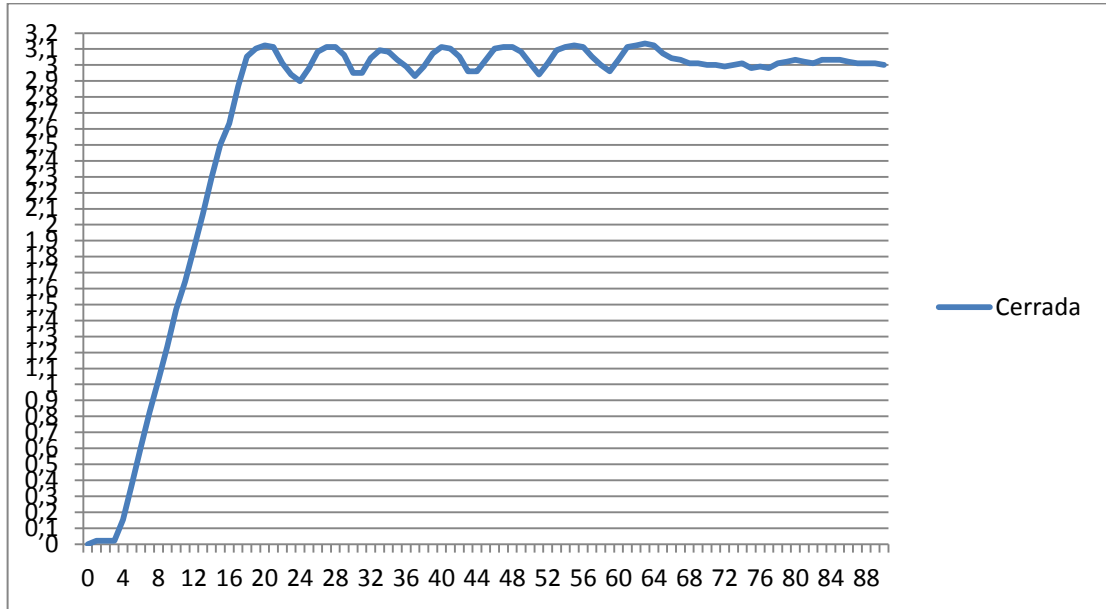
Tiempo (s)	Tensión (v)
0	0
1	0,020417
2	0,020417
3	0,020417
4	0,153126
5	0,377712
6	0,602297

7	0,826882
8	1,031051
9	1,23522
10	1,470014
11	1,643557
12	1,847725
13	2,062102
14	2,296896
15	2,501065

16	2,633774
17	2,868568
18	3,05232
19	3,103362
20	3,123779
21	3,113571
22	3,011486
23	2,940027
24	2,899194
25	2,980861
26	3,082945
27	3,113571
28	3,113571
29	3,062528
30	2,950236
31	2,950236
32	3,042112
33	3,093154
34	3,082945
35	3,031903
36	2,991069
37	2,929819
38	2,991069
39	3,072737
40	3,113571
41	3,103362
42	3,05232
43	2,960444
44	2,960444
45	3,031903
46	3,103362
47	3,113571
48	3,113571
49	3,082945
50	3,011486
51	2,940027
52	3,011486
53	3,093154
54	3,113571

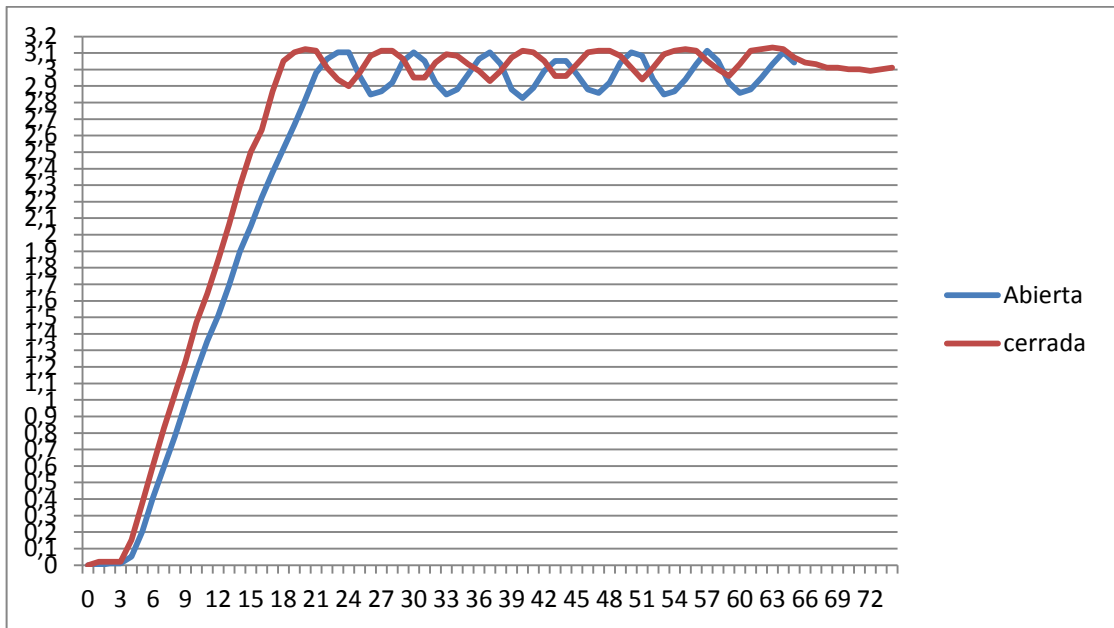
55	3,123779
56	3,113571
57	3,05232
58	3,001278
59	2,960444
60	3,031903
61	3,113571
62	3,123779
63	3,133987
64	3,123779
65	3,072737
66	3,042112
67	3,031903
68	3,011486
69	3,011486
70	3,001278
71	3,001278
72	2,991069
73	3,001278
74	3,011486
75	2,980861
76	2,991069
77	2,980861
78	3,011486
79	3,021695
80	3,031903
81	3,021695
82	3,011486
83	3,031903
84	3,031903
85	3,031903
86	3,021695
87	3,011486
88	3,011486
89	3,011486
90	3,001278

Figura 131. Comportamiento de la salida del sistema con apertura del 0%



13.9.3 Resultados del comportamiento del sistema

Figura 132. Relación de las curvas de comportamiento



Inicialmente se puede obtener un valor de tau en el 63 % de su valor final el cual sería dado por:

$$\gamma(\infty) = 3 \text{ V}$$

$$\tau = 3 \text{ A} \cdot 0,63 = 1,89 \text{ V}$$

Relación del valor de corriente respecto al tiempo
 $\tau = 14 \text{ s}$

Con los valores encontrados se determina la función de transferencia del Sistema:

$$\tau = s$$

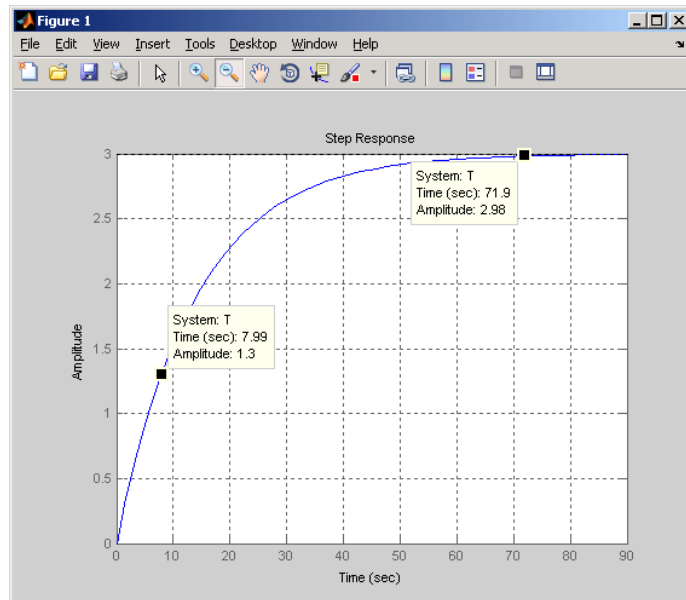
$$\tau = \frac{1}{a} \quad \alpha = \frac{1}{\tau} \quad \alpha = \frac{1}{14 \text{ s}} \quad \text{por consiguiente } \alpha = 0,214285714286$$

La función de transferencia del sistema en lazo abierto en Matlab, para posterior análisis, es:

```
num =[3];
dem =[14 1];
T=tf(num,dem)
step (T)
grid on
```

Inicialmente se puede obtener un valor de tau en el 63 % de su valor final, que estaría dado por:

Figura 133. Tiempo de subida al 10% y 90 %

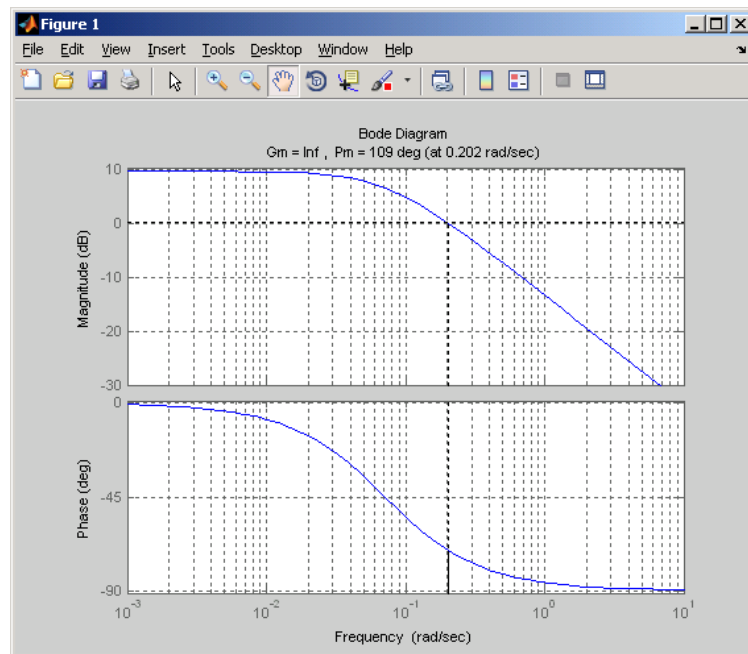


Con la gráfica se tomó el tiempo de subida T_r para el 10% y 90% de la magnitud

Tr 10 % = 7,99 s
Tr 90 % = 71,91 s
Tiempo de subida = 79,9 s

```
num =[3];  
dem =[14 1];  
G=tf(num,dem)  
bode(G,logspace(-3,2))  
grid on
```

Figura 134. Margen de fase

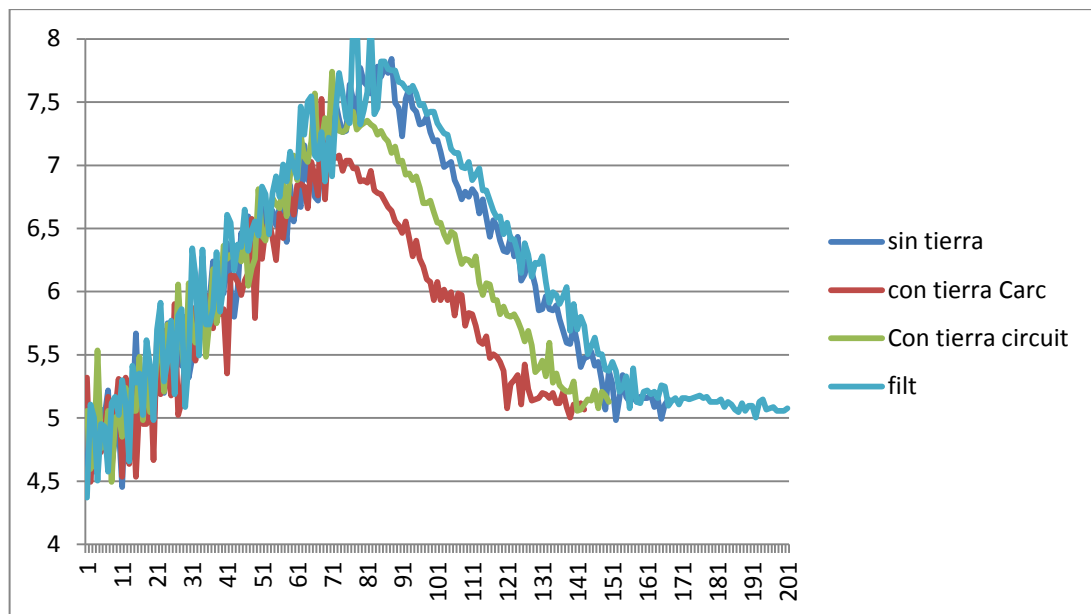


En la figura 134. se observa que el margen de fase es de 109 grados y el margen de ganancia es infinito.

Recomendaciones

Se observa un gran problema en la adquisición de datos de medidas a la salida del sensor, debido a la aparición de ruido eléctrico inducido en el sistema por la bomba hidráulica, en complicidad con un sistema de puesta a tierra deficiente del laboratorio. Por esto, se pueden presentar y medir señales con gran porcentaje de error durante el proceso de la adquisición de datos.

Figura 135. Gráfica de datos a la salida del medidor con problemas de tierras



Conclusiones

- Los sistemas de control en lazo cerrado permiten reducir el error que existe entre la señal de referencia y la salida del sistema, y de esta manera llevar la salida del sistema a un valor conveniente.
- En la teoría de control, a menudo se usan las funciones de transferencia para caracterizar las relaciones de entrada y salida de componentes o de sistemas, que se describen mediante ecuaciones diferenciales lineales e invariantes en el tiempo. A partir del concepto de función de transferencia, es posible representar el sistema mediante ecuaciones algebraicas en función de *Laplace* (s).
- Una metodología óptima en la construcción de un prototipo, es la simulación o diseño de un modelo inicial en el cual se analizaran posibles problemas físicos o de construcción antes de desarrollar el sistema final.
- Durante el proceso de aprendizaje de la tecnología, es importante la familiarización con dispositivos controladores PID industriales y estándar, como el SIPART DR-20, usado en este caso.
- Se construye un prototipo operativo y confiable de una servoválvula, encargada de permitir el paso controlado del líquido en el sistema implementado.
- Para el desarrollo tecnológico de una región, es importante la aplicación de los conceptos y las teorías adquiridas durante el proceso educativo, y el uso de propuestas nuevas e innovadoras, dirigidas a mejorar los procesos industriales o de cualquier índole, o la creación de elementos o partes de estos.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Dylan E. **Control y medida de nivel de líquido con señales de ultrasonido**. 2010.
- [2] Nohora Mercedes Lozano Areiza. **Control de nivel para tanques de agua con realimentación**. <http://docentes.uni.edu.ni/fec/Alejandro.Mendez/Nivel1.pdf>.
- [3] M. en C. Rubén Velázquez Cuevas. **Análisis de la respuesta transitoria de sistemas de primer y segundo orden**, Mayo 26, 2008.
- [4] Jordi Maine . **Sensores acondicionadores y procesadores de señal**. 2003
<http://www.jcee.upc.es/jcee2002/mayneponencia.pdf>.
- [5] **MICROCONTROLADORES PIC**
<http://www.ceduvirt.com/resources/Microcontroladores.pdf>.
- [6] Instrumentos WIKA S.A. BLOG DE INSTRUMENTACION
<http://www.bloginstrumentacion.com/instrumentacion-de-presion/transmisor-de-presion-instrumentacion-de-presion/%C2%BFcomo-funciona-un-transmisor-de-presion/>.
- [7] MANUAL DE USUARIO SIPART DR-20.
- [8] Sigifredo Arregocés profesor titular utp, Edwin Hernández, Walter cano. **Sistemas dinámicos de segundo orden**. 2006.
- [9] JUAN PABLO GONZÁLEZ T. NICOLÁS TORO GARCÍA. **Control predictivo generalizado implementado a dos tanques acoplados**
<http://www.utp.edu.co/php/revistas/ScientiaEtTechnica/docsFTP/1223361-66.pdf>.